

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 ผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ [1]

การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ธรรมชาติ เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีที่สิ่งมีชีวิตทำการย่อยสลายเพื่อใช้เป็นอาหาร โดยทั่วไป ผลิตภัณฑ์และพลังงานที่ได้จากการย่อยสลายจะถูกนำไปใช้ประโยชน์โดยสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น หรือใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบขึ้นใหม่ได้ ซึ่งปฏิกิริยาที่ทุกอย่างของการย่อยสลายพอลิเมอร์ให้เป็นโมเลกุลเล็ก ๆ นั้นเกิดจากการผลิตเอนไซม์ของจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย หรือ รา เป็นต้น

การย่อยสลายนี้จะจำเพาะในแง่ของเอนไซม์ และตำแหน่งของพอลิเมอร์ที่เข้าไปทำการย่อยสลาย การย่อยสลายทางชีวภาพจะเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ดังนี้

1. สภาพแวดล้อมขณะนั้น เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน ความเป็นกรด-ด่าง
2. ชนิดของจุลินทรีย์ที่สามารถปล่อยเอนไซม์ออกมาย่อยสลายพอลิเมอร์
3. น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ คือ ถ้าพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความสามารถในการย่อยสลายจะสูงขึ้น

ในภาวะหนึ่งๆนั้น พอลิเมอร์อาจเกิดการสลายตัวได้หลายประเภทพร้อมๆกัน แต่สำหรับการสลายตัวของขยะพอลิเมอร์สังเคราะห์ การสลายตัวด้วยกระบวนการทางชีวภาพ น่าจะมีบทบาทที่สำคัญมากที่สุด เนื่องจากการกำจัดขยะพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ใช้กันมากวิธีหนึ่งคือการฝังดินซึ่งมีแนวโน้มที่จะได้รับการพัฒนามากกว่าการกำจัดด้วยวิธีการเผา ที่ในบางกรณีอาจปลดปล่อยสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมได้ อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบว่า พอลิเมอร์สังเคราะห์แต่ละชนิดมีความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์เป็นอย่างมาก ดังตารางที่ 2.1 จึงทำให้เกิดปัญหาเมื่อนำขยะพอลิเมอร์สังเคราะห์ไปฝังดิน เพราะกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพจะเป็นไปได้ช้ามาก ดังนั้น เพื่อลดการสะสมของขยะเหล่านี้ งานวิจัยต่างๆจึงมุ่งไปที่การพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ไม่ว่าจะเป็นการเตรียมผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้บางส่วน (partially biodegradable product) จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเมอร์ธรรมชาติกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ [2-3] และการเตรียมผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ทั้งหมด (fully biodegradable product) จากพอลิเมอร์ธรรมชาติแต่เพียงอย่างเดียว [4-5]

ตารางที่ 2.1 ความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ของพอลิเมอร์สังเคราะห์แต่ละชนิด [6]

| พอลิเมอร์                  | การใช้งาน                                  | ความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ |
|----------------------------|--|--------------------------------------|
| พอลิเอทิลีน                | Packaging films, insulation containers     | VH                                   |
| พอลิโพรพิลีน               | Packaging films                            | VH                                   |
| พอลิไวนิลคลอไรด์           | Packaging films foam                       | VH                                   |
| พอลิไวนิลดีนคลอไรด์        | Packaging films of high chemical stability | H                                    |
| พอลิไวนิลอะซิเตต           | Packaging films, varnish, fabrics          | M                                    |
| พอลิไวนิลแอลกอฮอล์         | Packaging films                            | H                                    |
| พอลิเมทิลเมทาครีเลต        | Films, foam                                | H                                    |
| พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน    | Plexiglas                                  | H                                    |
| พอลิไตรฟลูออโรคลอโรเอทิลีน | Insulation                                 | H                                    |
| เซลลูโลสอะซิเตต            | Insulation                                 | H                                    |
| พอลิเอไมด์                 | Fabrics                                    | L                                    |
| พอลิเอทิลีนเทเรพทาเรต      | Fabrics                                    | F                                    |
| ซิลิโคน                    | Coating                                    | H                                    |
| พีนอลฟอร์มาลดีไฮด์         | Bekelite                                   | H                                    |
| ยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์        | -  | H                                    |

VH = สูงมาก H = สูง M = ปานกลาง L = ต่ำ F = พอใช้

## 2.2 เจลาติน [7-10]

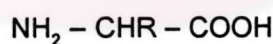
เจลาติน (gelatin) เป็นโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวครั้งแรก (first hydrolytic product) ของสารประกอบที่เรียกว่า คอลลาเจน (collagen) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissue) ที่พบในกระดูก ผิวหนัง และเอ็นจากสัตว์ [8] เจลาตินนับได้ว่าเป็นผลพลอยได้จากโรงงานฟอกหนัง กล่าวคือ หนังวัวสามารถนำไปแยก

เป็น 3 ชั้น เพื่อทำผลิตภัณฑ์ต่างๆกัน ชั้นบนสุดที่มีขนติดอยู่ มักนำไปทำเป็นกระเป๋า รองเท้า และเข็มขัด ชั้นถัดมานำไปทำเป็นถุงมือเบสบอล และถุงมือขี่ม้าที่ใช้กัน เป็นต้น และชั้นสุดท้ายจะนำมาทำเป็นเจลาติน [9]

ปริมาณของเจลาตินที่ใช้กันในปีหนึ่งๆ มีมากถึงประมาณ 110,000 – 140,000 ตัน จากสถิติโลกและคาดว่าแนวโน้มที่จะใช้กันมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากตลาดของผลิตภัณฑ์ที่มีเจลาตินเป็นส่วนประกอบหลักกำลังขยายตัวอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะทางด้านอุตสาหกรรมอาหารซึ่งเป็นที่ตลาดที่ใหญ่ที่สุด โดยสามารถนำเจลาตินไปใช้ในการผลิตอาหารต่างๆ เช่น ขนมหวาน แยม นอกจากนี้ ยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมการผลิตแผ่นฟิล์ม และอุตสาหกรรมเครื่องสำอางได้อีกด้วย [10]

### 2.2.1 องค์ประกอบของเจลาติน

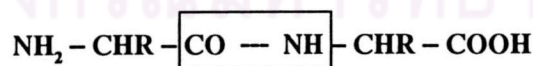
เจลาตินประกอบไปด้วยกรดอะมิโน (amino acid) มาต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ (peptide bond) ซึ่งก็คือ พันธะเอไมด์ระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดอะมิโนโมเลกุลแรกกับหมู่เอมีนของกรดอะมิโนโมเลกุลถัดไปดังรูปที่ 2.2 ซึ่งการมีแรงยึดเกาะประเภทพันธะเปปไทด์เป็นจำนวนมากนี้ จึงทำให้สามารถจัดเจลาตินเป็นพอลิเมอร์ที่เรียกว่า พอลิเปปไทด์ (polypeptide) จำนวนลูกโซ่ที่ต่อกันของเจลาตินมีความยาวตั้งแต่ 300-5,000 หน่วย



อนุมูลเบส

อนุมูลกรด

รูปที่ 2.1 อนุมูลกรดและเบสในกรดอะมิโน 1 โมเลกุล



↑  
พันธะเปปไทด์

รูปที่ 2.2 พันธะเปปไทด์ระหว่างกรดอะมิโน 2 โมเลกุล

เนื่องจากโมเลกุลของเจลาตินมีทั้งอนุภาคกรดและอนุภาคเบส จึงจัดได้ว่าเป็นสารแอมโฟเทอริก (amphoteric) ซึ่งมีสมบัติพิเศษคือ สามารถละลายได้ทั้งในสารละลายที่เป็นกรดและเป็นเบส การปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายให้เหมาะสม จะทำให้สภาพประจุของโมเลกุลเจลาตินเกิดความสมดุล มีสภาพเป็นกลาง ไม่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ ณ ตำแหน่งนี้เรียกว่าเป็นจุดไอโซอิเล็กทริก (isoelectric) ของเจลาติน ซึ่ง ณ จุดไอโซอิเล็กทริก เจลาตินจะมีสมบัติพิเศษ คือ มีอัตราการละลายน้ำหรือการบวมตัวน้อยมาก

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของเจลาติน พบว่า มีชนิดของกรดอะมิโนแตกต่างกันมากมาย เมื่อนำมาไฮโดรไลซ์อย่างสมบูรณ์พบว่า มีกรดอะมิโนทั้งหมด 18 ชนิด โดยมีองค์ประกอบหลักๆ คือ ไกลซีน (glycine) มีปริมาณ 27 มิลิเปอร์เซ็นต์ โพรลีน (proline) และไฮดรอกซีโพรลีน (hydroxyproline) มีปริมาณ 25 มิลิเปอร์เซ็นต์ และกรดกลูตามิก (glutamic acid) 10 มิลิเปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม เจลาตินเป็นโปรตีนที่ไม่ค่อยมีความสำคัญทางโภชนาการ เนื่องจากมีกรดอะมิโนจำเป็นอยู่ในปริมาณเพียงเล็กน้อย และมีไม่ครบทุกหมู่ตามความต้องการของร่างกาย จากการวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเจลาตินพบว่า มีคาร์บอน 50 เปอร์เซ็นต์ ออกซิเจน 25 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 17 เปอร์เซ็นต์ และไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์

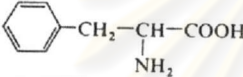
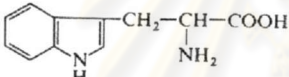
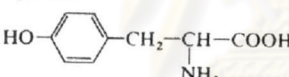
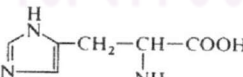
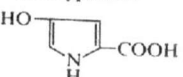
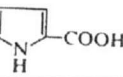
## ตารางที่ 2.2 ปริมาณกรดอะมิโนชนิดต่างๆในเจลาติน [8]

| กรดอะมิโน            | เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก | กรดอะมิโน     | เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก |
|----------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|
| Alanine              | 11                    | Methionine*   | 0.9                   |
| Arginine             | 8.8                   | Phenylalanine | 2.2                   |
| Aspartic acid        | 6.7                   | Proline       | 16.4                  |
| Glutamic acid        | 11.4                  | Serine        | 4.2                   |
| Glycine              | 27.5                  | Threonine     | 2.2                   |
| Histidine            | 0.78                  | Tyrosine**    | 9.3                   |
| Leucine & Isoleucine | 5.1                   | Valine        | 2.6                   |
| Lysine               | 4.5                   | Cystine       | trace                 |

\* กรดอะมิโนจำเป็น ที่ถูกทำลายได้โดยการออกซิเดชัน

\*\* กรดอะมิโนจำเป็น ที่ถูกทำลายได้ง่ายจากการไฮโดรไลซ์ และสูญเสียไปในการผลิต

ตารางที่ 2.3 ชนิดของกรดอะมิโน [11]

| ABBREVIATION                      | NAME AND FORMULA   | FIRST ISOLATION AND (SOURCE)   | ISOELECTRIC POINT |
|-----------------------------------|--|--|-------------------|
| Neutral Amino Acids—Amide Type    |  |  |                   |
| Asn                               | Asparagine<br>$\text{H}_2\text{NOC}-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{CH}}-\text{COOH}$   | 1932 by Damodaran (edestin)  | 5.4               |
| Gln                               | Glutamine<br>$\text{H}_2\text{NOC}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{CH}}-\text{COOH}$                              | 1932 by Damodaran, Jaaback, and Chibrikoff (gliadin)                     | 5.7               |
| Neutral Amino Acids—Aromatic Type |  |  |                   |
| Phe                               | Phenylalanine<br>                                     | 1881 by Schulze and Barbieri (lupine seedlings)                          | 5.5               |
| Trp                               | Tryptophan<br>                                       | 1902 by Hopkins and Cole (casein)  | 5.9               |
| Tyr                               | Tyrosine<br>  | 1849 by Bopp (casein)  | 5.7               |
| Acidic Amino Acids                |  |  |                   |
| Asp                               | Aspartic Acid<br>$\text{HOOC}-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{CH}}-\text{COOH}$   | 1868 by Ritthausen (conglutin; legumin)                                  | 2.8               |
| Glu                               | Glutamic acid<br>$\text{HOOC}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{CH}}-\text{COOH}$                                   | 1866 by Ritthausen (gluten-fibrin)                                       | 3.2               |
| Basic Amino Acids                 |  |  |                   |
| Arg                               | Arginine<br>$\text{H}_2\text{N}-\underset{\text{NH}}{\text{C}}-\text{NH}(\text{CH}_2)_3-\underset{\text{NH}_2}{\text{CH}}-\text{COOH}$ | 1895 by Hedin (horn)   | 11.2              |
| His                               | Histidine<br>                                       | 1896 by Kossel (sturine)<br>1896 by Hedin (various protein hydrolysates) | 7.6               |
| Lys                               | Lysine<br>$\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_4-\underset{\text{NH}_2}{\text{CH}}-\text{COOH}$   | 1889 by Dreschel (casein)  | 9.7               |
| Imino Acids                       |  |  |                   |
| Hyp                               | Hydroxyproline<br>                                  | 1902 by Fischer (gelatin)  | 5.8               |
| Pro                               | Proline<br>   | 1901 by Fischer (casein)   | 6.3               |

ตารางที่ 2.3 ชนิดของกรดอะมิโน [11] (ต่อ)

| ABBREVIATION                               | NAME AND FORMULA   | FIRST ISOLATION AND (SOURCE)   | ISOELECTRIC POINT |
|--|--|--|-------------------|
| Neutral Amino Acids—Aliphatic Type         |  |  |                   |
| Ala  | Alanine<br>$\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}-\text{COOH} \\   \\ \text{NH}_2 \end{array}$  | 1879 by Schutzenberger<br>1888 by Weyl (silk fibroin)                    | 6.0               |
| Gly  | Glycine<br>$\text{NH}_2-\text{CH}_2-\text{COOH}$   | 1820 by Braconnot (gelatin)  | 6.0               |
| Ile  | Isoleucine<br>$\begin{array}{c} \text{H} \\   \\ \text{C}_2\text{H}_5-\text{C}-\text{CH}-\text{COOH} \\   \quad   \\ \text{H}_3\text{C} \quad \text{NH}_2 \end{array}$ | 1904 by Ehrlich (fibrin)   | 6.0               |
| Leu  | Leucine<br>$\begin{array}{c} (\text{CH}_3)_2\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{COOH} \\   \\ \text{NH}_2 \end{array}$   | 1820 by Braconnot (muscle fiber; wool)                                   | 6.0               |
| Val  | Valine<br>$\begin{array}{c} (\text{CH}_3)_2\text{CH}-\text{CH}-\text{COOH} \\   \\ \text{NH}_2 \end{array}$  | 1901 by Fischer (casein)   | 6.0               |
| Neutral Amino Acids—Hydroxy Type           |  |  |                   |
| Ser  | Serine<br>$\begin{array}{c} \text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{COOH} \\   \\ \text{NH}_2 \end{array}$   | 1865 by Cramer (sericine)  | 5.7               |
| Thr  | Threonine<br>$\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}-\text{CH}-\text{COOH} \\   \quad   \\ \text{OH} \quad \text{NH}_2 \end{array}$                                    | 1925 by Gortner and Hoffman<br>1925 by Schryver and Buston (oat protein) | 6.2               |
| Neutral Amino Acids—Sulfur-Containing Type |  |  |                   |
| Cys  | Cysteine<br>$\begin{array}{c} \text{HS}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{COOH} \\   \\ \text{NH}_2 \end{array}$   | -----  | 5.1               |
| Cys Cys                                    | Cystine<br>$\begin{array}{c} (-\text{SCH}_2-\text{CH}-\text{COOH})_2 \\   \\ \text{NH}_2 \end{array}$  | 1899 by Mörner (horn)<br>1899 by Emden                                   | 4.6               |
| Met  | Methionine<br>$\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{S}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{COOH} \\   \\ \text{NH}_2 \end{array}$                                    | 1922 by Mueller (casein)   | 5.7               |

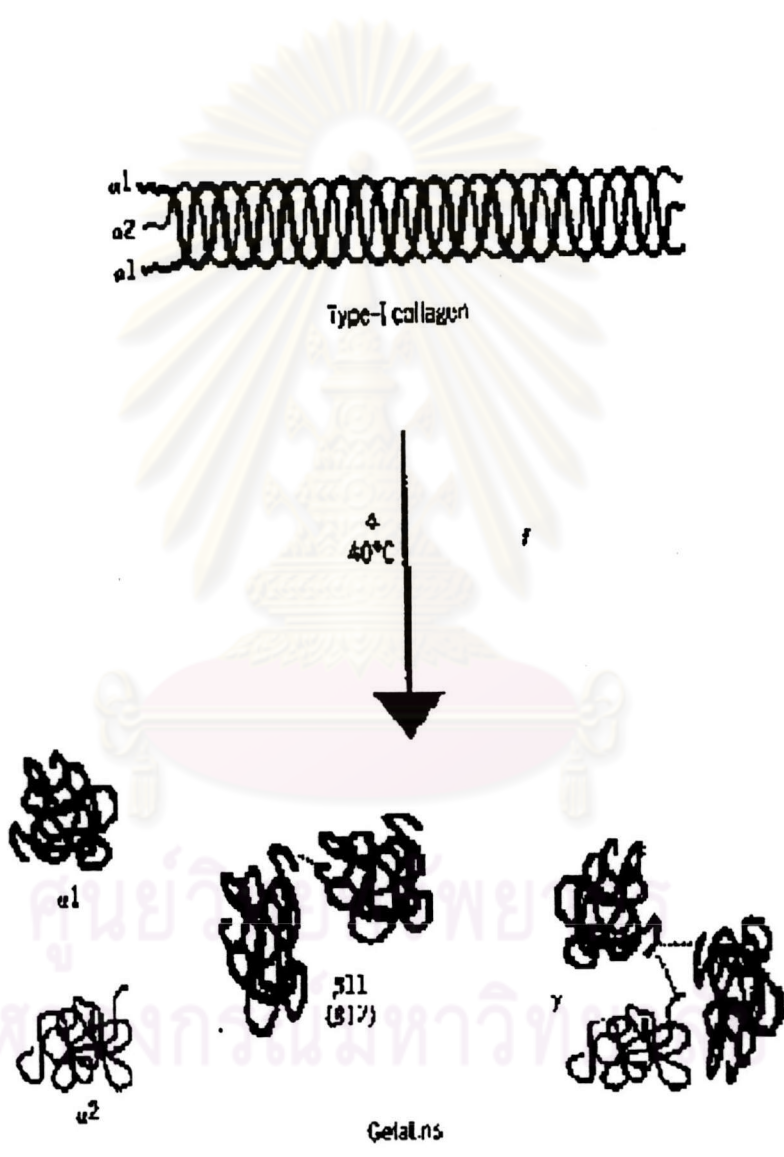
## 2.2.2 การเปลี่ยนสภาพจากคอลลาเจนเป็นเจลาติน

โดยทั่วไป หนึ่งสัตว์ประกอบไปด้วยน้ำ 64 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 33 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 2 เปอร์เซ็นต์ และสารอื่นๆ 1 เปอร์เซ็นต์ โปรตีนในหนึ่งสัตว์นั้นเป็นโปรตีนคอลลาเจนถึง 90 เปอร์เซ็นต์ โครงสร้างโมเลกุลของคอลลาเจนประกอบไปด้วยสายโซ่พอลิเปปไทด์ชนิดวนซ้าย 3 โซ่ มาพันขนานกัน มีโครงสร้างเกลียวสาม (triple helix structure) แบบวนขวา (right handed super helix) เป็นท่อนกลมยาว [12] แต่ละครดอะมิโนภายในโมเลกุลเดียวกันมาต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ระหว่างโมเลกุลดึงดูดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะของสายโซ่  $\alpha$  helix ของคอลลาเจน [12]

คอลลาเจนไม่ละลายน้ำ แต่สามารถดูดน้ำเข้าไปไว้ในโมเลกุลได้ ทำให้แผ่นหนังพองตัวขึ้น การสกัดหรือการเปลี่ยนแปลงคอลลาเจนให้เป็นเจลาติน สามารถทำได้โดยการไ้กรด เกลือ ความเย็น ความร้อน ซึ่งจะทำให้สายโซ่โมเลกุลแตกออกสั้นลง และสลายตัวเป็นเจลาตินที่มีช่วงน้ำหนักโมเลกุล ซึ่งกว้างมากตั้งแต่ 2,000 จนถึงหลายแสนอะตอม [10]



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงจากคอลลาเจนเป็นเจลาติน [12]



การสกัดมีหลายวิธีคือ [10,13]

กระบวนการสกัดด้วยด่าง (liming process)

วิธีนี้นิยมใช้กับวัตถุดิบที่เป็นพวกกระดูก เขาและหนังจากโคและกระบือ สารละลายของด่างที่ใช้ได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) การสกัดด้วยด่าง จะช่วยเปลี่ยนคอลลาเจนเป็นเจลาตินได้ง่ายขึ้น ช่วยกำจัดสารที่ไม่ต้องการจำพวกสารโปรตีนที่ละลายน้ำได้ เช่น มูซิน (mucin) และอัลบูมิน (albumin) ซึ่งมีผลต่อสีและความใสของเจลาติน และประการสุดท้ายช่วยทำให้เจลาตินที่สกัดได้มีความแข็งแรงเจล (gel strength) สูงขึ้น

กระบวนการสกัดด้วยกรด (acidifying process)

วิธีนี้นิยมใช้กับวัตถุดิบจำพวกหนังหมู กรดที่ใช้ส่วนมาก ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) กรดฟอสฟอริก ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) และ กรดซัลฟิวเรต ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ) วัตถุประสงค์ของการแช่วัตถุดิบในกรดนี้ จะช่วยเปลี่ยนคอลลาเจนเป็นเจลาตินได้ง่ายขึ้น ช่วยกำจัดสารที่ไม่ต้องการจำพวกสารโปรตีนที่ละลายน้ำได้ เช่น มูซิน และอัลบูมิน ซึ่งมีผลต่อสีและความใสของเจลาติน และประการสุดท้ายช่วยทำให้เจลาตินที่สกัดได้มีความแข็งแรงเจลสูงขึ้น

วัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการสกัดด้วยด่างหรือด้วยกรดแล้ว จะถูกนำมาสกัดเจลาตินโดยใช้น้ำร้อนอุณหภูมิอยู่ในช่วง 55–100 องศาเซลเซียส ถ้าใช้อุณหภูมิการสกัดสูงเกินไป เจลาตินที่ผลิตได้มักมีคุณภาพต่ำ ดังนั้น จึงนิยมสกัดที่อุณหภูมิไม่สูงนัก เพราะจะได้เจลาตินที่มีคุณภาพดี คือ มีสมบัติการเป็นเจลสูง สีไม่คล้ำ สารละลายของเจลาตินที่สกัดได้มักนำไปผ่านการฟอกสีก่อนนำไปผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เพื่อลดความชื้นออกบางส่วน แล้วจึงไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องกับการสกัดเจลาติน

- วัตถุดิบจากโรงงาน
- ขนาดของอนุภาคในเจลาติน
- ความเข้มข้นของเจลาตินที่ต้องการ
- เวลาที่ใช้
- เครื่องมือที่ใช้
- ความหนืดที่ไม่เท่ากันของเจลาตินแต่ละชนิด

เจลาตินแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ Type A และ Type B

- Type A ผลิตโดยใช้กระบวนการสกัดด้วยกรด มีค่าไอโซอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 7–9
- Type B ผลิตโดยใช้กระบวนการสกัดด้วยด่าง มีค่าไอโซอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 4.6–5.2

หลังจากการสกัด จะได้เจลาตินผง เมื่อนำไปละลายน้ำ จะได้สารละลายเจลาติน ซึ่งจับตัวกันแข็งเป็นวุ้น วุ้นมีสมบัติเป็นไฮโดรโซล (hydrosol) ในน้ำร้อน เพราะเกิดเปปติเซชัน (peptization) คือ การเกิดอนุภาคคอลลอยด์ (colloidal particles) และเมื่อน้ำร้อนนั้นเย็นลง จะเป็นไฮโดรเจล (hydrogel) เพราะเกิดไฮเดรชัน (hydration) ทำให้วุ้นพองตัวได้

### 2.2.3 สมบัติของเจลาติน [8,10,13]

เจลาตินมีลักษณะเป็นผงละเอียด มีสีใสเหมือนแก้ว ไม่มีรส ไม่มีกลิ่น มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.3 – 1.4 โมเลกุลมีรูปร่างเป็นเส้น มีความยาวเป็นหลายเท่าของความกว้าง

#### 2.2.3.1 การละลาย

เจลาตินไม่ละลายในแอลกอฮอล์ อะซิโตน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ อีเทอร์ และตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว แต่ละลายในน้ำ กรดอะซิติก กลีเซอรอล ซอร์บิทอล เป็นต้น เจลาตินเมื่อละลายน้ำจะดูดน้ำและพองตัว การดูดน้ำของเจลาตินเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งสามารถเร่งปฏิกิริยาได้โดยการลดอุณหภูมิที่ความเข้มข้นของเกลือต่ำๆ เมื่อมีการเติมฟอสเฟต ซิเทรต หรือซัลเฟตลงในสารละลายเจลาติน จะช่วยทำให้การละลายดีขึ้น แต่หากความเข้มข้นสูงเกินไปเจลาตินจะตกตะกอน เมื่อเม็ดเจลาตินพองตัวออก แรงเกาะกันจะมีน้อยลง และเปลี่ยนจากลักษณะแข็งเปราะเป็นอ่อนและยืดหยุ่น โมเลกุลมีรูปร่างเป็นเส้น จึงมีความสามารถในการดูดซึมน้ำไว้ได้มาก

ตารางที่ 2.4 สมบัติของเจลาติน [8]

| สมบัติ                                       | ปริมาณ                             |
|--|------------------------------------|
| Density, dry (g/cm <sup>3</sup> )            | 1.35                               |
| Refractive index, dry at 546.1 nm            | 1.54                               |
| Weight average MW, $\overline{M}_w$          | $1 \times 10^5$ to $5 \times 10^5$ |
| Number average MW, $\overline{M}_n$          | $5 \times 10^4$ to $5 \times 10^5$ |
| Viscosity at 6.67 wt%, 60°C, mPa.s           | 5-10                               |
| Gel rigidity, g Bloom                        | 75-330                             |
| Specific optical rotation at 589 nm, degrees | (-134)–(-140)                      |
| Refractive increment at 300 nm, dn/dv        | 0.187                              |
| Glass transition, dry, °C                    | 217                                |
| Moisture, wt% at 50% rh                      | 9-15                               |
| Ash, wt%                                     | 0-3                                |
| Isoionic pH – Type B                         | 4.8–5.2                            |
| – Type A                                     | 7–9                                |
| Nitrogen, wt% – Type B                       | 18.15                              |
| – Type A                                     | 18.30                              |
| Hexose sugars, wt%                           | 0.45–0.65                          |

### 2.2.3.2 เสถียรภาพ

เจลาตินแห้งสามารถดูดความชื้นได้ดีและรวดเร็ว จนเมื่อปริมาณความชื้นที่ดูดไว้เท่ากับปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่โดยรอบแล้ว จะหยุดดูดความชื้น เจลาตินดูดความชื้นได้ดี เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูง เช่น ในประเทศไทยซึ่งมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 70-80 เจลาตินที่มีขายทั่วไป มีความชื้นประมาณ 9-12 เปอร์เซ็นต์ แต่เจลาตินแห้งที่เก็บในภาชนะซึ่งปิดสนิท ณ อุณหภูมิห้อง จะมีอายุการเก็บได้หลายปี แต่สามารถสลายตัวได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส แล้วเกิดการสันดาปอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส สารละลายหรือเจลของเจลาตินเป็นแหล่งอาหารที่ดีสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และมีความไวต่อการสลายตัวของ protolytic enzymes เสถียรภาพของเจลาตินขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์

### 2.2.3.3 ความสามารถในการเป็นเจล (gel strength)

เป็นการทดสอบคุณภาพของเจลาตินที่สำคัญอันหนึ่ง ใช้เครื่อง Bloom gelometer ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้กันในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป โดยวัดน้ำหนัก (กรัม) ที่ต้องใช้ในการกด flat plunger ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. เป็นระยะทาง 4 มม. ในเยลลี่ซึ่งมีเจลาติน 6.67 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้สภาวะควบคุม โดยเก็บไว้ได้นาน 17 ชั่วโมงที่ 10 องศาเซลเซียส

### 2.2.3.4 ความหนืด

เป็นการทดสอบคุณภาพของเจลาตินที่สำคัญเช่นกัน ค่าความหนืดของเจลาตินจะแปรผกผันกับอุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่าง แต่จะแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลายเจลาติน โดยวัดจากเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของสารละลายเจลาติน 6.67 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 100 มล. ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้ปิเปตชนิดพิเศษ

### 2.2.3.5 การฟองตัว

เจลาตินที่แช่น้ำจะดูดซับน้ำถึง 10 เท่าของน้ำหนักเจลาติน แล้วจะเกิดการฟองตัว และมีความยืดหยุ่นซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นยกกำลังสอง และจำนวนการเชื่อมขวาง การฟองตัวทำให้จำนวนการเชื่อมขวางลดลง และมีการเชื่อมขวางน้อยที่สุดที่จุดไอโซอิเล็กทริก อย่างไรก็ตาม ที่ความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่าจุดไอโซอิเล็กทริก การเลือกชนิดของแอนไอออนสามารถควบคุมการฟองตัวได้ ไอออนเหล่านี้จะไปทำให้พันธะไฮโดรเจนแตกออก ทำให้การฟองตัวเพิ่มขึ้น

### 2.2.3.6 สี

สีของเจลาตินขึ้นกับชนิดวัสดุที่ใช้และจำนวนครั้งของการสกัดว่า เป็นการสกัดครั้งที่เท่าใดเจลาตินที่ทำจากหนังหมูจะมีสีอ่อนกว่าที่ทำจากกระดูกสัตว์ อย่างไรก็ตาม พบว่าคุณสมบัติของเจลาตินไม่ขึ้นกับสี

### 2.2.3.7 ความขุ่น

ความขุ่นอาจเกิดจากสิ่งเจือปนที่ไม่ละลาย (insoluble impurities) ที่มาจากขั้นตอนการสกัด การเติมเกลือ (neutral salt) จะช่วยรักษาความใส ความหนืด และความเร็วในการกลายเป็นเจลให้คงที่ นอกจากนี้ ความขุ่นยังขึ้นกับสัดส่วนของส่วนผสมและค่าความเป็นกรด-ด่างด้วย

## 2.2.4 ประโยชน์ของเจลาติน [14,15]

### 2.2.4.1 อุตสาหกรรมอาหาร

- ก. สารช่วยให้เกิดเป็นเจล (gelling agent)  
ใช้ในการผลิตเยลลี่
- ข. สารทำให้ข้น (thickener)  
ใช้ในอาหารประเภทแยม
- ค. ฟิล์ม (film)  
ใช้เป็นภาชนะห่อหุ้ม
- ง. สารช่วยให้เกิดเสถียรภาพ (protective colloid)  
สารช่วยให้ความคงตัวในขนมอบ
- จ. สารเพิ่มเสถียรภาพ (stabilizer)  
เป็นสารคงตัวในไอศกรีม
- ฉ. สารช่วยกระจายตัว (emulsifier)  
เป็นสารทำให้เกิดความเข้ากันได้ในอุตสาหกรรมเนื้อสัตว์
- ช. สารช่วยให้เกิดโฟม (foaming/whipping agent)  
สารที่ทำให้ marshmallows มีความอยู่ตัว
- ซ. สารเพิ่มความใส (beverage fining agent)  
ใช้ในการทำให้น้ำผลไม้ เบียร์ ไวน์ มีความใส

#### 2.2.4.2 อุตสาหกรรมยา

- ก. ตัวอย่างที่ใช้มากที่สุดคือ แคปซูลยา แบ่งได้เป็น
  - แคปซูลชนิดแข็ง ผลิตจากกระบวนการรุ่ม มีความแข็งแรงสูง 220–280 g Bloom
  - แคปซูลชนิดอ่อน ผลิตจากกระบวนการหมุนแห้ง มีความแข็งแรงปานกลาง 150–180 g Bloom
- ข. ใช้เป็นตัวประสาน (binder) ในเม็ดยา (tablets)
- ค. ใช้เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพ (stabilizer) ในน้ำมันที่มีคุณค่าต่าง ๆ
- ง. ใช้เป็นสารช่วยกระจายตัว (emulsifier) ในน้ำมันตับปลาที่มีการเติมวิตามิน
- ช. ใช้ในการผ่าตัด โดยเป็นฟองน้ำดูดซับเลือด (sterile sponge) ในขณะรักษาได้ ซึ่งสามารถทิ้งเอาไว้ในร่างกายโดยไม่เป็นอันตราย ทั้งนี้เพราะสามารถสลายได้ด้วยเอนไซม์ของร่างกาย

#### 2.2.4.3 อุตสาหกรรมถ่ายภาพ

- ก. เป็นองค์ประกอบสำคัญของ फिल्मถ่ายภาพชนิดซิลเวอร์เฮไลด์
- ข. เป็นสิ่งนำสีและทำหน้าที่ยึดเกาะ โดยยึดอนุภาคของผงสีและพื้นผิวเกาะไว้ด้วยกัน เพราะเจลาตินโปร่งใส ไม่มีสี ทนทานการขัดถู ยึดหยุ่นได้ ทำให้ผงสีติดกับฟิล์มได้นานขึ้น

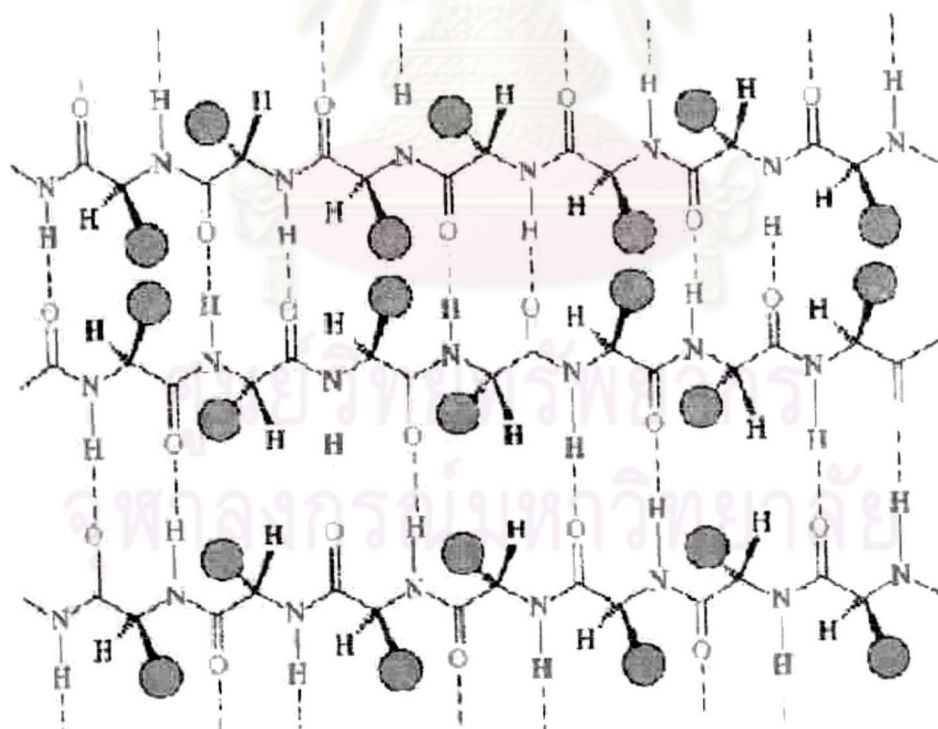
#### 2.2.4.4 อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

- ก. เติมเจลาตินในการทำให้เนื้อครีมในเครื่องสำอางเพื่อให้มีความเหนียวขึ้น เพิ่มผิวสัมผัสที่ดี
- ข. เจลาตินเป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยโปรตีน ช่วยในการซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอให้ผิวไม่เหี่ยวเหิน นุ่มชุ่มชื้น

### 2.2.4.5 ด้านอื่น ๆ

- ก. การผลิตท่อ PVC ใช้เจลาตินเป็นองค์ประกอบสำคัญ
- ข. การผลิตกระดาษไร้คาร์บอน ใช้คุณสมบัติของเจลาตินในการผลิตกระดาษที่ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม

จากประโยชน์ต่างๆของเจลาตินที่กล่าวมาแล้ว จึงได้มีผู้สนใจนำเจลาตินมาเตรียมเป็นวัสดุเติมในการผลิตพลาสติกแทนพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบว่าเจลาตินมีหมู่ที่เกิดพันธะไฮโดรเจนอยู่อย่างหนาแน่นดังรูปที่ 2.5 จึงทำให้หลอมและขึ้นรูปได้ยาก เพราะจะเกิดการเชื่อมสภาพไปก่อน ประกอบกับสมบัติที่ได้ยังไม่ดีนัก เช่น แข็งเปราะ ดูดซึมความชื้นสูง จึงต้องทำการดัดแปรเจลาตินเพื่อลดหมู่ฟังก์ชันที่เกิดพันธะไฮโดรเจนและ/หรือหมู่ที่สามารถดูดซึมความชื้นให้มัน้อยลง แล้วจึงนำมาขึ้นรูปเป็นพลาสติกได้



รูปที่ 2.5 พันธะไฮโดรเจนของเจลาติน [12]

## 2.2.4 เจลาตินดัดแปร

แนวทางในการดัดแปรเจลาติน มีหลายแนวทาง ตัวอย่างเช่น ในปี 1992 RUCKENSTEIN E. และ XU G. [16] ได้เตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์จากเจลาตินและสไตรีนมอนอเมอร์ โดยใช้อะซิโบบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรัล (AIBN) เป็นสารริเริ่มและโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) เป็นสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ผสมกันที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในระบบอิมัลชัน กราฟต์โคพอลิเมอร์ซึ่งสังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นเจลที่อุณหภูมิห้อง โดยมีความคงตัวสูง คงสภาพความเป็นเจลไว้ได้นาน และ ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นของไหลที่มีความหนืดสูงมาก การเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ดังกล่าว ใช้เวลา 2-3 วัน ที่อุณหภูมิห้อง และเกิดภายใน 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส กราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้มีสมบัติไม่ละลายในน้ำ เอทานอล ออกเทน และไซโคลเฮกเซน แต่บวมตัวในตัวทำละลายดังกล่าว การใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้มีอัตราการกราฟต์มากขึ้น ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของกราฟต์โคพอลิเมอร์ให้มากขึ้น

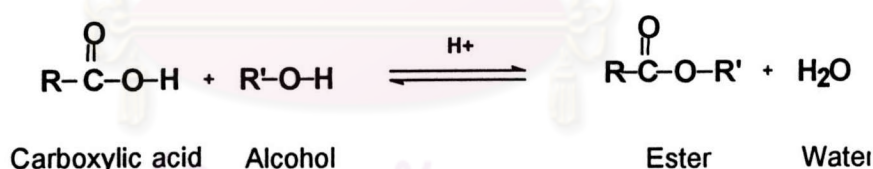
ในปี 1993 XU G. และ RUCKENSTEIN E. [17] ได้สังเคราะห์เจลาตินกราฟต์ด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตในระบบอิมัลชัน โดยนำเจลาตินกับสารลดแรงตึงผิวมาละลายในน้ำ และเติม เมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ที่มีสารริเริ่มอะซิโบบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรัลละลายอยู่ ปฏิกริยาดำเนินไป ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยกวนอย่างแรง แล้วปล่อยให้เย็นลงจนเท่ากับอุณหภูมิห้อง ได้เจลอิมัลชันที่มีความโปร่งใส และ ณ อุณหภูมิห้อง มีความคงตัวในสภาพเจลสูง แต่เกิดการกราฟต์อย่างช้าๆ หลังจากการเกิดเจล ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ละลายในน้ำ แต่หลังจากนั้น 5 วัน มีการบวมตัวเกิดขึ้น และการบวมตัวลดลงอย่างเห็นได้ชัดหลังจาก 25 วัน จากการวิเคราะห์โดยใช้เฟสที่อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR spectrophotometer) พบว่า มีการเกิดปฏิกิริยากราฟต์ระหว่างโพลิเมอร์ของเมทิลเมทาคริเลตกับเจลาตินด้วย และจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กราฟต์โคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นี้มีโครงสร้างที่มีรูพรุน

ณัฐภรณ์ สุวรรณโณ [18] ได้เตรียมโฟมที่มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพจากการผสมเจลาตินและถุงน่องในอัตราส่วนต่างๆกัน โดยใช้ น้ำเป็นตัวทำละลาย ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทั้งในสภาพที่มีและไม่มีสารดัดแปร สำหรับสารที่ใช้ดัดแปร คือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 ส่วนต่อร้อยละของเจลาตินโดยน้ำหนัก



เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุด ทำให้ของผสมที่ได้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พร้อมทั้งนำมาทดสอบสมบัติด้านแรงดึง การดูดซึมความชื้น ความทนทานต่อสารเคมี และความสามารถในการย่อยสลาย พบว่า โฟมที่ได้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนฐานซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นพลาสติก และส่วนบนที่เป็นฟองซึ่งมีลักษณะเป็นเซลล์เปิดทรงกลมขนาดต่างๆ นอกจากนี้ ยังพบว่า โฟมที่ได้มีความทนแรงดึงสูงกว่า มีความสามารถในการยืดดึงมากกว่า มีความสามารถในการดูดความชื้นที่มากกว่า และสามารถย่อยสลายได้เร็วกว่าเจลาตินบริสุทธิ์ ในขณะที่มีความทนทานต่อสารเคมีเหมือนกัน กล่าวคือ ทนทานต่อต่าง แต่ไม่ทนทานต่อกรด และน้ำ ซึ่งโดยรวมแล้วโฟมที่เตรียมจากสูตรที่ใช้ถุงน่อง 10 ส่วนต่อร้อยละของเจลาตินโดยน้ำหนัก และมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10 ส่วนต่อร้อยละของเจลาตินโดยน้ำหนัก จะให้สมบัติที่ดีกว่าโฟมที่เตรียมจากสูตรอื่น

Djagmy, K.B. และคณะ ในปี 2001 [19] ได้ดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของเจลาตินด้วยกรดไขมัน โดยกรดไขมันที่ใช้ ได้แก่ กรดสเตียริก ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$ ) ซึ่งเป็นกรดไขมันอิ่มตัว หรือกรดคาร์บอกซิลิกสายโซ่ยาวด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (esterification)



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

ในการทดลองใช้เจลาติน 5-30 เปอร์เซ็นต์ ละลายในน้ำ ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้เป็น 4.5 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ณ อุณหภูมิ 50-90 องศาเซลเซียส ในระบบอิมัลชัน ซึ่งมีการกวนตลอดเวลา 2-8 ชั่วโมง โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดสเตียริกเป็น 0 0.05 0.1 0.2 และ 0.4 กรัม/กรัม นำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยง และกรองโดยใช้กระดาษกรองขนาด 5000 Da นำส่วนใสที่ได้ไปประเหยจนแห้งจะได้เจลาตินดัดแปร

ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้นำมาซึ่งได้เจลาตินที่มีหมู่เอสเทอร์เป็นองค์ประกอบซึ่งมีช่วงปานกลาง มีค่าไดโพลโมเมนต์ 1.5–2.0 และทำให้เจลาตินขาดหมู่ไฮดรอกซิล แต่มีหมู่ไม่มีขั้วของกรดสเตียริกเข้ามาแทนที่ ดังนั้น เจลาตินแต่ละโมเลกุลจะไม่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลอื่น จึงเกิดการหลอมเหลวได้ นอกจากนี้ ออกซิเจนในเอสเทอร์ยังมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว ซึ่งสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับสารที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (น้ำ แอลกอฮอล์ กรด) จึงทำให้สามารถละลายในน้ำได้ ถ้ามีหมู่เอสเทอร์น้อยๆ ต่ำกว่า 33 เปอร์เซ็นต์ การละลาย ค่าความหนืดจำเพาะ และสมบัติการเป็นเจลจะค่อยๆ ลดลงตามจำนวนหมู่เอสเทอร์ที่เพิ่มเข้ามาในโครงสร้างของเจลาติน

#### ตารางที่ 2.5 สมบัติต่างๆของเจลาตินที่ดัดแปรด้วยกรดไขมัน [19]

| ปริมาณการแทนที่ด้วยหมู่เอสเทอร์ (%) | การละลายในไนโตรเจน (%) | ความหนืดจำเพาะ | Gel Strength (N cm <sup>-2</sup> ) | Surface Hydrophobicity (FI%protein) |
|-------------------------------------|------------------------|----------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 0                                   | 100                    | 0.351          | 2.07                               | 71.41                               |
| 17.5                                | 95.4                   | 0.347          | 1.78                               | 78.38                               |
| 31.6                                | 91.66                  | 0.34           | 1.71                               | 80.34                               |
| 34.4                                | 90.93                  | 0.331          | 1.54                               | 82.13                               |
| 41.8                                | 89.0                   | 0.32           | 1.49                               | 83.98                               |

ปฐมพล อาษาคง และ มณฑนา บรรลือศักดิ์ [20] ได้ทดลองเตรียมพลาสติกหุ้มไส้กรอกจากเจลาติน โดยนำเจลาตินมาดัดแปรด้วยกรดสเตียริกในปริมาณต่างๆกัน คือ 5 10 15 20 25 30 35 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเจลาติน ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มจากสารละลายเจลาตินดัดแปร สามารถทำได้โดยการหล่อในแม่แบบ จากการทดลองพบว่า ฟิล์มที่เตรียมจากเจลาตินดัดแปรมีการดูดความชื้นต่ำกว่า ความทนแรงดึงต่ำกว่า การยืดตัวต่ำกว่า และใช้เวลาแห้งตัวน้อยกว่าฟิล์มที่เตรียมได้จากเจลาตินดัดแปร

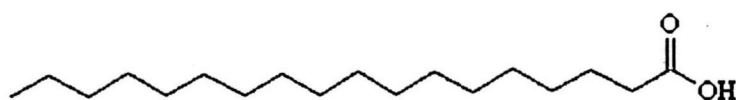
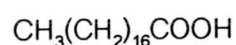
DALEV P.G. และคณะ [21] ได้เตรียมฟิล์มเจลาตินที่ดัดแปรด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde) ไกลออกซอล (glyoxal) กลูตารัลดีไฮด์ (glutaraldehyde) เฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (hexamethylene diisocyanate) และบิวตะไดอีนไดอิพอกไซด์ (butadiene diepoxide) เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน (burial test) พบว่า การย่อยสลายทางชีวภาพขึ้นอยู่กับชนิดของสารเชื่อมโยง และความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (density of crosslinking) ซึ่งพบว่า ฟิล์มที่ดัดแปรด้วยสารพวกอัลดีไฮด์ (ฟอร์มัลดีไฮด์ ไกลออกซอล และกลูตารัลดีไฮด์) มีความคงทนต่อการย่อยสลายทางชีวภาพนานที่สุด คือ 10 วัน แสดงว่ามีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากที่สุด รองลงมาคือ ฟิล์มที่ดัดแปรด้วยเฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต และบิวตะไดอีนไดอิพอกไซด์ เป็น 6 และ 4 วัน ตามลำดับ

## 2.3 กรดไขมัน [22]

กรดไขมัน (fatty acid) เป็นกรดอินทรีย์ที่มีหมู่คาร์บอกซิลเป็นองค์ประกอบเหมือนกรดอินทรีย์ทั่วไป แต่โมเลกุลประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนสายตรงค่อนข้างยาวและส่วนใหญ่มักจะมีจำนวนอะตอมเป็นเลขคู่ ซึ่งเมื่อทำการไฮโดรไลซ์ (hydrolyze) น้ำมัน (triglyceride) จะได้กลีเซอรอล (glycerol) และกรดไขมัน (fatty acid) ซึ่งกรดไขมันโดยทั่วไป สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ กรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acid) และกรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) ในกรดไขมันอิ่มตัว คาร์บอนอะตอมจะสร้างพันธะเดี่ยวทั้งหมดกับคาร์บอนอะตอมข้างเคียง ในกรดไขมันไม่อิ่มตัว คาร์บอนอะตอมจะสร้างพันธะคู่กับคาร์บอนอะตอมข้างเคียง 1 พันธะ ซึ่งกรดไขมันที่พบในธรรมชาติ มีทั้งชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว ดังตารางที่ 2.6

### 2.3.1 กรดสเตียริก [23]

กรดสเตียริก (stearic acid) เป็นกรดไขมันอิ่มตัวที่มีสูตรโครงสร้างแบบย่อ คือ



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของกรดสเตียริก [24]

ตารางที่ 2.6 ชนิดของกรดไขมัน จุดหลอมเหลว และแหล่งที่พบ [22]

| ประเภทของกรดไขมัน  | จำนวนคาร์บอนอะตอม | สูตรโครงสร้างแบบย่อ   | ชื่อ              | จุดหลอมเหลว (°C) | แหล่งที่พบ       |
|--------------------|-------------------|---|-------------------|------------------|------------------|
| กรดไขมันอิ่มตัว    | 4                 | $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$                                    | กรดบิวทีริก       | -79              | เนย              |
|                    | 6                 | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{COOH}$   | กรดคาไพโรอิก      | -                | เนย              |
|                    | 8                 | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$   | กรดคาพริลิก       | -                | น้ำมันมะพร้าว    |
|                    | 10                | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$   | กรดคาพริก         | 27.2             | น้ำมันมะพร้าว    |
|                    | 12                | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$  | กรดดเดอริก        | 44.2             | น้ำมันปาล์ม      |
|                    | 14                | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$  | กรดไมริสติก       | 53.9             | ลูกจันทร์เทศ     |
|                    | 16                | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$  | กรดปาล์มมิติก     | 63.1             | น้ำมันปาล์ม      |
|                    | 18                | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$  | กรดสเตียริก       | 69.1             | ไขมันสัตว์       |
| กรดไขมันไม่อิ่มตัว | 16                | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$         | กรดปาล์มมิโตเลอิก | -0.5             | เนย              |
|                    | 18                | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$         | กรดโอเลอิก        | 13.4             | น้ำมันมะกอก      |
|                    | 18                | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4(\text{CH}=\text{CHCH}_2)_2(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$ | กรดลิโนเลอิก      | -5               | น้ำมันถั่วเหลือง |
|                    | 18                | $\text{CH}_3\text{CH}_2(\text{CH}=\text{CHCH}_2)_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$     | กรดลิโนเลนิก      | -11              | น้ำมันปลา        |

### 2.3.1.1 สมบัติของกรดสเตียริก [23,25]

กรดสเตียริกที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆมี 2 ชนิด คือ ชนิดเกรดบริสุทธิ์ (pure grade) เป็นสารบริสุทธิ์ เรียกว่า กรดสเตียริกเกรดทางเคมี (chemical stearic acid) อีกชนิดหนึ่งเป็นเกรดทางการค้า (commercial grade) เรียกว่า กรดสเตียริกเกรดทางการค้า (commercial stearic acid) ทั้งสองชนิดนี้มีส่วนผสมและสมบัติแตกต่างกัน

#### ก. กรดสเตียริกเกรดบริสุทธิ์

เป็นสารประกอบเรียกชื่อทางเคมีว่า กรดออกทาเดคาโนอิก (*n*-octadecanoic acid) มีสูตรโมเลกุล  $C_{18}H_{32}O_2$  น้ำหนักโมเลกุล 284.4 เป็นกรดไขมันอิ่มตัว มีโครงสร้างทางเคมีเป็น  $CH_3(CH_2)_{16}COOH$  มีรูปผลึกเป็น leaflets มีจุดหลอมเหลว 69.6 องศาเซลเซียส จุดเดือด 376 องศาเซลเซียส ละลายในอีเทอร์และแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิสูง ไม่ละลายในน้ำ มีอยู่ทั่วไปในไขสัตว์และน้ำมันพืชในรูปของกลีเซอไรด์ (glycerides)

#### ข. กรดสเตียริกเกรดทางการค้า

เป็นสารผสม มีกรดสเตียริกเกรดทางเคมี ประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ กรดปาล์มมิติก (palmitic acid) ประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ และกรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) อีกเล็กน้อย อัตราส่วนดังกล่าวนี้ตรงกับกรดไขมันที่ได้จากการแยกสลายไขสัตว์ สมบัติของกรดสเตียริกเกรดทางการค้า ขึ้นอยู่กับชนิดของไขสัตว์ที่ใช้และกรรมวิธีการทำให้บริสุทธิ์ (purification) [23,25,26,27] มีจุดหลอมเหลวอยู่ระหว่าง 52 องศาเซลเซียส ถึง 55 องศาเซลเซียส ค่าไอโอดีน (iodine value) อยู่ระหว่าง 7 ถึง 13 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 สมบัติของกรดสเตียริกเกรดทางการค้าแปรตามกรรมวิธีการทำให้บริสุทธิ์ [28]

| กรรมวิธีการทำให้บริสุทธิ์ | กรดสเตียริก (เปอร์เซ็นต์) | กรดปาล์มมิติก (เปอร์เซ็นต์) | กรดโอเลอิก (เปอร์เซ็นต์) | ค่าไอโอดีน | จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส) |
|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|------------|----------------------------|
| Single press              | 40                        | 47                          | 13                       | 9-13       | 51.5-52.0                  |
| Double press              | 42                        | 51                          | 6                        | 7 max.     | 54.0-54.5                  |
| Triple press              | 42                        | 53                          | 4                        | 7 max.     | 54.5-55.0                  |

### 2.3.1.2 ประโยชน์ของกรดสเตียริก [24,28,29]

กรดสเตียริก ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆดังต่อไปนี้

- อุตสาหกรรมเทียนไข
- อุตสาหกรรมยาง
- อุตสาหกรรมสิ่งทอ
- อุตสาหกรรมน้ำยาทำความสะอาด
- อุตสาหกรรมเภสัช
- อุตสาหกรรมโลหะ
- อุตสาหกรรมสบู่
- อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง
- อุตสาหกรรมเคลือบผิว
- ใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมสารอื่นๆ
- ใช้ในรูปของเกลือของโลหะ เกลือคลอไรด์ เกลือโบรไมด์ เป็นต้น

ปริมาณการใช้กรดสเตียริกสามารถจำแนกออกโดยประมาณ ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 การจำแนกปริมาณการใช้กรดสเตียริกในอุตสาหกรรมต่างๆ [28]

| อุตสาหกรรม              | ร้อยละ |
|-------------------------|--------|
| สบู่และน้ำยาทำความสะอาด | 10     |
| ยาง และสารหล่อลื่น      | 25     |
| อุตสาหกรรมอื่นๆ         | 65     |

### 2.3.1.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกรดสเตียริก [27,31]

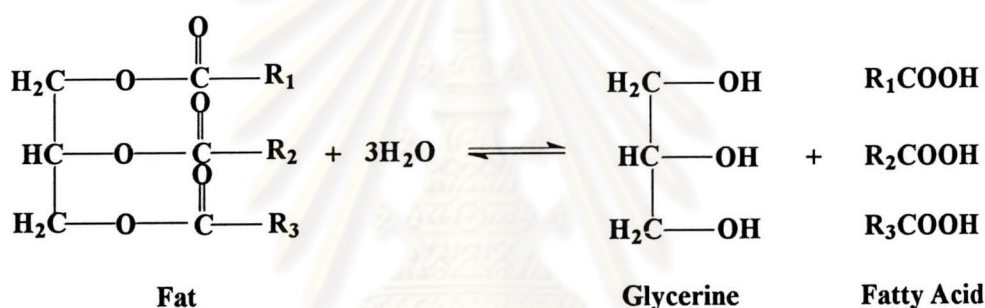
กรดสเตียริกที่มีอยู่ตามธรรมชาติอยู่ในรูปของกลีเซอไรด์ ซึ่งมีอยู่ในไขสัตว์ และน้ำมันพืชในไขสัตว์พวกแทลโลว์ (tallow) มีปริมาณกรดสเตียริกมากที่สุดถึง 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับไขสัตว์ชนิดอื่นๆ หรือน้ำมันพืชซึ่งมีกรดสเตียริกไม่ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ ฉะนั้น แทลโลว์จึงนับเป็นวัตถุดิบที่สำคัญและใช้มากในการผลิตกรดสเตียริก

แทลโลว์ เป็นไขสัตว์ที่ได้จากสัตว์ประเภทแพะ แกะ โค กระบือ ไขสัตว์จากแกะและแพะไม่เหมาะแก่การบริโภคเพราะมีกลิ่นจัด และยากแก่การขจัดกลิ่น ทั้งยังไม่เหมาะที่จะมาทำสบู่อีกด้วย ไขสัตว์จากโค และกระบือ มีคุณภาพเหนือกว่า คือ มีกลิ่นไม่จัด และเก็บไว้ได้นานไม่เสียง่าย นอกจากใช้บริโภคได้แล้ว ยังนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการทำสบู่และกรดไขมันได้อีกด้วย การแยกแทลโลว์ออกจากมันสัตว์มีกระบวนการโดยย่อดังนี้คือ แลเอาส่วนที่เป็นมันทั้งหมดออกมา นำมาสับเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปใส่กระทะหรือหม้อเจียว คุณภาพของแทลโลว์ขึ้นอยู่กับชนิดของมันสัตว์และเป็นมันที่มาจากส่วนไหนของสัตว์ คุณภาพของแทลโลว์วัดโดยการดูสี ดมกลิ่น จุดหลอมตัว ความชื้น และสิ่งเจือปน

### 2.3.1.4 ขั้นตอนการผลิตกรดสเตียริก

กระบวนการของทวิชเชล (twitchell process) [25,26,27,31,32]

แยกสลายไขมันด้วยปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolysis reaction) ที่เรียกว่า “Fat Splitting Process” เป็นการใช้น้ำเดือดเป็นตัวแยกสลายไขมันออกเป็นกรดไขมันและกลีเซอริน (glycerine) โดยใช้กรดซัลฟอนิก (sulphonic acid) เป็นตัวเร่งให้น้ำกับน้ำมันผสมกันได้ดีขึ้น และใช้กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเป็นแบบย้อนกลับได้ (reversible reaction) เขียนโดยย่อได้ดังนี้

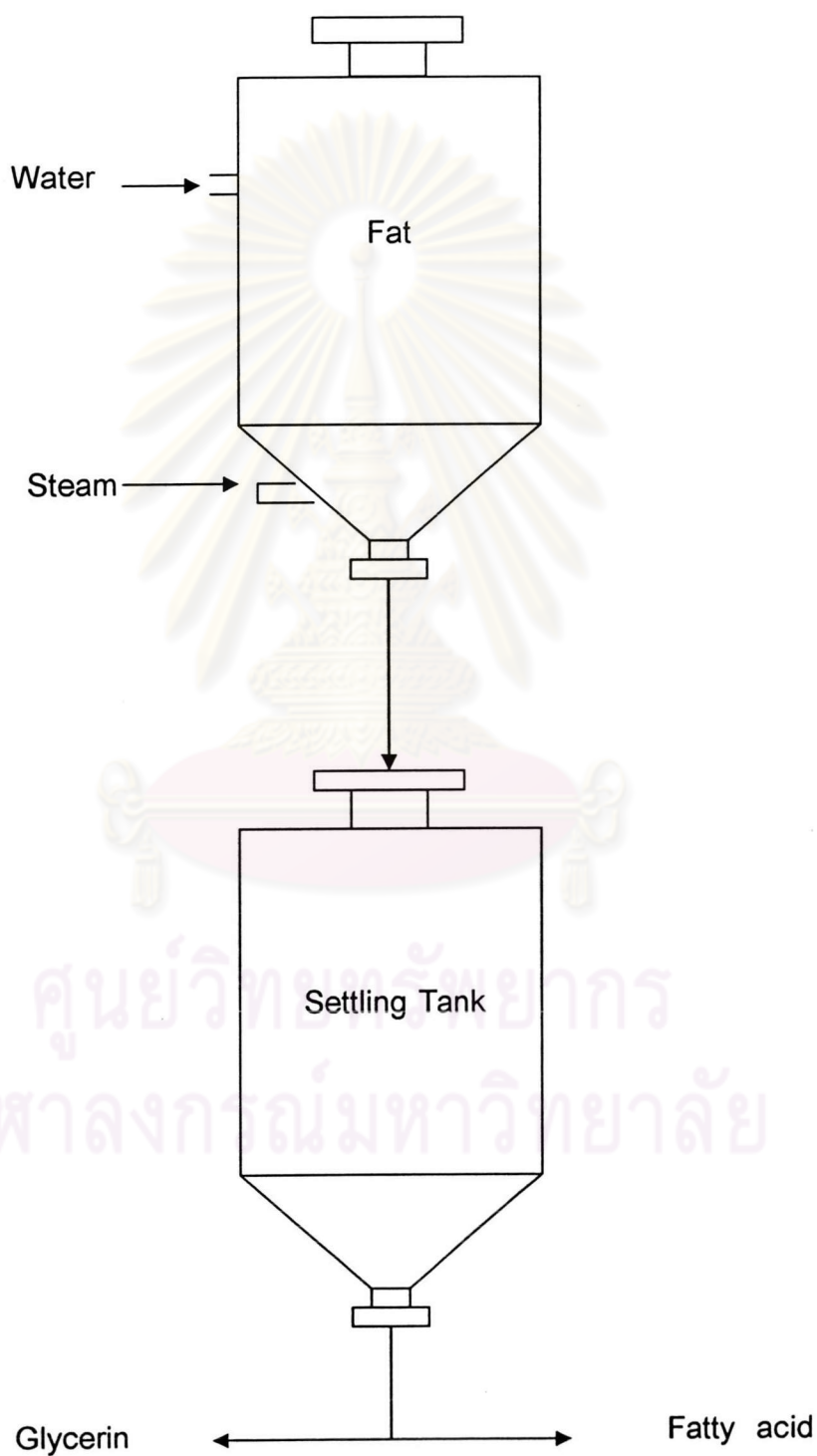


รูปที่ 2.8 การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ในการผลิตกรดสเตียริก [28]

กรดไขมันที่ได้จากปฏิกิริยานี้ประกอบไปด้วยกรดไขมันอิ่มตัว 40 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนใหญ่เป็นกรดสเตียริกและกรดปาล์มมิติก นอกนั้นเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งมีกรดโอเลอิก ประมาณ 40 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ กรดลิโนเลอิกประมาณ 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้น นำกรดไขมันนี้มาทำการแยกและสกัดให้บริสุทธิ์ เพื่อให้ได้กรด สเตียริกเกรดทางการค้า ด้วยวิธีการแยกแบบ fractional crystallization เป็นการตกผลึกกรดไขมัน จากนั้น นำผลึกกรดไขมันมาใส่ในถุงผ้าใบหนา ปิดให้สนิทแล้วกด อัด หรือบีบ (press) ให้กรดไขมันส่วนที่เป็นของเหลวไหลผ่านผ้าใบออกมา ของเหลวที่ได้นี้เรียกว่า Red oil หรือ Olein ซึ่งมีกรดโอเลอิก (oleic acid) เป็นส่วนใหญ่ ส่วนกรดไขมันที่เป็นของแข็งที่เหลืออยู่ในถุงผ้าใบเป็นกรดสเตียริกเกรดทางการค้า ซึ่งมีกรดสเตียริกและกรดปาล์มมิติกเป็นส่วนใหญ่ มีกรดโอเลอิกอยู่บ้าง กรดสเตียริกเกรดทางการค้าที่ได้นี้ เรียกว่า กรดสเตียริกแบบบีบครั้งเดียว (single pressed stearic acid) ซึ่งอาจนำไปหลอมและมาบีบใหม่ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ได้เป็นกรดสเตียริกแบบบีบสองครั้ง (double pressed stearic acid) ถ้านำไปหลอมและมาบีบหนที่สามในตู้อบไอน้ำ จะได้กรดสเตียริกแบบบีบสาม



ครั้ง (triple pressed stearic acid) การบีบมากครั้งจะทำให้ได้กรดสเตียริกที่บริสุทธิ์ และมีคุณภาพสูงยิ่งขึ้น ซึ่งขั้นตอนต่างๆ เป็นไปดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การผลิตกรดไขมันโดยกระบวนการของทวีซเซล [28]

## 2.4 การขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อ [33]

การหล่อ (casting) พลาสติกเป็นกระบวนการแปรรูปที่ผลิตชิ้นงานพลาสติกโดยมีการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเทอร์โมพลาสติกหลอม หรือเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางของเทอร์โมเซตหลอมในขณะทำการแปรรูป

การแปรรูปพลาสติกโดยวิธีการนี้ ชิ้นงานพลาสติกได้รับอิทธิพลจากความเค้นเนื่องจากภาวะของการผลิตต่ำมาก กล่าวคือ ทำการแปรรูปในความดันบรรยากาศหรือที่ความดันต่ำ การไหลส่วนใหญ่เกิดเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่ำ และแปรรูปที่อุณหภูมิปานกลาง ซึ่งตรงข้ามกับการแปรรูปพลาสติกโดยวิธีอื่นๆ เช่น การฉีดเข้าแม่แบบหรือการอัดรีด ซึ่งต้องทำที่อุณหภูมิและความดันสูง เพื่อผลักดันให้พอลิเมอร์หลอมไหลเข้าสู่แม่แบบหรือผ่านหัวตาย (die) ซึ่งกรณีหลัง จะมีผลต่อสมบัติของชิ้นงาน เนื่องมาจากการใช้ภาวะการผลิตที่ค่อนข้างรุนแรง

การหล่อพลาสติก เป็นเทคนิคที่ใช้กันแพร่หลายในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกหลายชนิด เช่น ฟิล์ม และแผ่นพลาสติกชนิดต่างๆ และการหล่อชิ้นงาน เช่น พวกเฟืองและเกียร์พลาสติก เป็นต้น นอกจากนี้ ในอุตสาหกรรมที่ผลิตชิ้นส่วนบางประเภทซึ่งไม่สามารถใช้เทคนิคการแปรรูปชนิดอื่นได้ นอกจากการหล่อ เช่น การห่อวัสดุแข็งตัวนำด้วยพลาสติก (encapsulation coating) และการใช้พลาสติกเข้าไปอุดในช่องว่างของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (potting)

การหล่อที่เป็นที่รู้จักกันมากที่สุด ได้แก่ การหล่อแผ่นอะคริลิก ส่วนการหล่อพลาสติกที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรม เช่น การหล่อไนลอน พอลิยูรีเทน และฟีนอลิก เป็นต้น

การหล่อสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

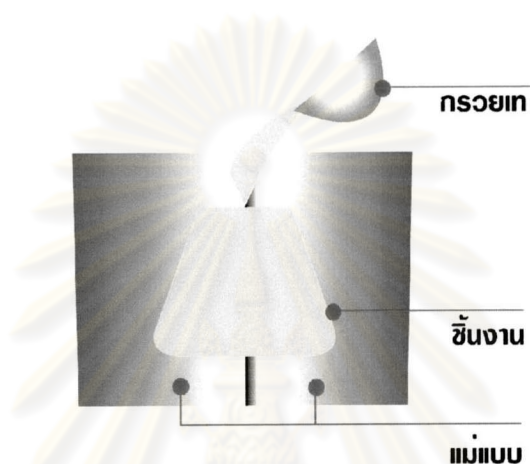
### 2.4.1 การหล่อเย็น (simple casting)

เป็นวิธีการผลิตที่ง่าย ไม่ต้องใช้แรงอัดมีขั้นตอนการผลิต คือ

- เทพลาสติกเหลวที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) แล้วลงในแม่แบบ ซึ่งส่วนมากใช้แม่แบบยางซิลิโคน แล้วปล่อยให้แข็งตัว บางชนิดต้องนำไปอบความร้อนเสียก่อน เช่น การหล่อแผ่นอะคริลิก (แม่แบบเป็นแผ่นกระจก)

- นำพลาสติกออกจากแม่แบบแล้วนำไปใช้ได้เลย

ข้อดีคือ ได้พลาสติกที่ใส ผิวเป็นเงามันและเรียบ การลงทุนต่ำ ชนิดของพลาสติกสามารถใช้ได้ทั้งเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติก ที่นิยมคือ อะคริลิก พอลิเอสเตอร์ อีพอกซี และ พอลิยูรีเทน



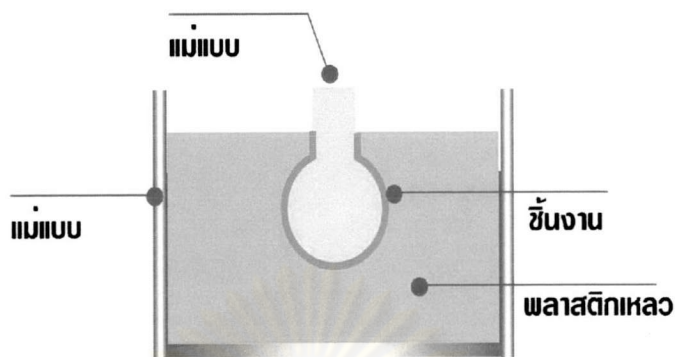
รูปที่ 2.10 แบบหล่อเย็น [33]

#### 2.4.2 การหล่อร้อน (plastisol casting)

ใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะภายในกลวง เช่น ลูกฟุตบอล และถุงมือพลาสติก ขั้นตอนคือ เทพลาสติกเหลว (plastisol) ลงในแม่แบบที่ร้อน หรือจุ่มแม่แบบที่ร้อนลงในพลาสติกเหลว พลาสติกเหลวจะเกาะผิวของแม่แบบ สามารถแบ่งออกได้อีก 3 แบบ ดังนี้

##### 2.4.2.1 แบบจุ่ม (plastisol dip casting)

นำแม่แบบตัวผู้ที่ทำให้ร้อน มีรูปร่างภายในเหมือนชิ้นงานที่ต้องการหล่อจุ่มลงในอ่างพลาสติกเหลว ทิ้งไว้ตามกำหนดเวลา ยกแม่แบบขึ้นแล้วนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 350-450 องศาฟาเรนไฮต์ ลอกชิ้นงานออกจากแม่แบบ แม่แบบควรเป็นวัสดุที่ทนความร้อน เช่น ดินเผาเคลือบ และโลหะบางชนิด



รูปที่ 2.11 แบบจุ่ม [33]

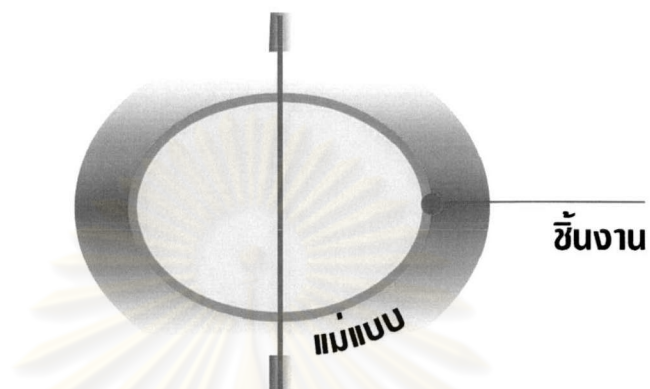
#### 2.4.2.2 แบบเท (plastisol slush casting)

เทพลาสติกเหลวลงในแม่แบบปิดกวางที่ทำให้ร้อนจนเต็ม รูปร่างแม่แบบเหมือนกับลักษณะภายนอกของขึ้นงาน ทั้งไว้ตามกำหนดเวลา พลาสติกเหลวจะเกาะติดผิวแม่แบบ เมื่อได้เวลาเทพลาสติกเหลวออก นำแม่แบบไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 350-450 องศาฟาเรนไฮต์ นำแม่แบบออก แยกแม่แบบและเปิดเอาขึ้นงานออก



รูปที่ 2.12 แบบเท [34]

### 2.4.2.3 แบบเหวี่ยง (plastisol rotational casting)



รูปที่ 2.13 แบบเหวี่ยง [33]

เทพลาสติกผงหรือเหลวในปริมาณที่กำหนดลงไปแม่แบบ ปิดแม่แบบ แล้วเหวี่ยงแม่แบบไปรอบๆ ทั้งในแนวตั้งและแนวนอน เพื่อให้พลาสติกเหลวติดผิวแม่แบบโดยสม่ำเสมอ นำแม่แบบเข้าเตาอบตามเวลาที่กำหนด นำแม่แบบออกแล้วเปิดเอาชิ้นงานออก แบบหล่อร้อนนี้ส่วนมากใช้กับพลาสติกจำพวกพีวีซีและพอลิเอทิลีน

สำหรับในงานวิจัยนี้ กรรมวิธีการหล่อที่เลือกใช้คือ การหล่อเย็น เพราะสามารถทำได้ง่าย สะดวก และรวดเร็ว ประกอบกับเจลาตินดัดแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปจะอยู่ในสภาพที่เป็นสารละลายอยู่แล้ว จึงสามารถเทลงในแม่แบบได้ง่าย