

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 การสลายตัวของพอลิเมอร์ [1]

การสลายตัวของพอลิเมอร์ สามารถเกิดขึ้นได้โดยอาศัยการขาดของพันธะเคมี และการเกิดปฏิกิริยาต่างๆที่สายโซ่หลักของโมเลกุลพอลิเมอร์ รวมทั้งที่หมู่ข้างเคียงด้วย โดยสามารถแบ่งประเภทของการสลายตัวของพอลิเมอร์ได้ดังต่อไปนี้

การสลายตัวทางเคมี จะเกิดขึ้นในกระบวนการที่มีสารเคมีต่างๆ เช่น กรด ด่าง และสารละลาย เป็นต้น ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยานี้ขึ้นที่อุณหภูมิสูง หรือในสภาวะที่มีพลังงานกระตุ้นเพียงพอในกระบวนการ

การสลายตัวทางความร้อน จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง โดยจะไปเร่งการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งยากที่จะแยกแยะว่าเกิดการสลายตัวทางความร้อนอย่างเดียว หรือเกิดการสลายตัวทางความร้อนและเคมีด้วย เพราะว่าสารประกอบของพอลิเมอร์จะมีสิ่งเจือปนอยู่ เช่น สารเติมแต่งต่างๆ อยู่ในวัสดุซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ได้

การสลายตัวด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เป็นปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี โดยที่จุลินทรีย์จะผลิตน้ำย่อยชนิดต่างๆออกมา เพื่อให้ในการย่อยสลายพอลิเมอร์เป็นอาหาร ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม (ประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส)

การสลายตัวเชิงกล จะเป็นผลมาจากแรงเฉือน ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้พอลิเมอร์แตกหักเมื่อนำวัสดุไปใช้งานและจากหลักการนี้เองจะสามารถนำไปใช้ในการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์แบบกลุ่มและแบบกิ่ง

การสลายตัวด้วยแสง จะเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีโดยเกิดจากการฉายแสงไปยังพอลิเมอร์ด้วยแสงในช่วงที่มองเห็น (visible light) หรือช่วงแสงเหนือม่วง (ultraviolet) ซึ่งแสงจะมีผลกระทบต่อพอลิเมอร์ก็ต่อเมื่อพอลิเมอร์นี้มีหมู่โครโมฟอร์หรือมีสารเติมแต่งที่สามารถดูดกลืนแสงได้

การสลายตัวด้วยการฉายรังสีพลังงานสูง เช่น รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) ตัวอย่างเช่น รังสีเอ็กซ์ (X-rays) รังสีแกมมา (γ -rays) หรือ รังสีอนุภาค (particle radiation) ตัวอย่างเช่น รังสีแอลฟา (α -rays) เป็นต้น ซึ่งไม่จำเป็นว่าจะจางว่าพอลิเมอร์จะมีการดูดกลืนรังสีหรือไม่ และพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องมีหมู่โครโมฟอร์เหมือนในกรณีของการสลายตัวด้วยการเหนี่ยวนำด้วยแสง แต่ว่าทุกส่วนของโมเลกุลสามารถถูกกระตุ้นได้ด้วยรังสี

ความสัมพันธ์ระหว่างประเภทของการสลายตัวต่างๆ ของพอลิเมอร์นั้น ในภาวะหนึ่งๆ อาจเกิดการสลายตัวได้หลายประเภทพร้อมๆ กัน แต่สำหรับการสลายตัวของขยะพอลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งมักเรียกกันโดยทั่วไปว่า “ขยะพลาสติก” การสลายตัวด้วยกระบวนการทางชีวภาพน่าจะมีบทบาทสำคัญมากที่สุด เนื่องจากการกำจัดขยะพลาสติกที่ใช้กันมากวิธีหนึ่งคือ การฝังดิน มีแนวโน้มที่จะได้รับการพัฒนามากกว่าการกำจัดด้วยวิธีการเผา ซึ่งอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมได้ อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบว่า พอลิเมอร์สังเคราะห์แต่ละชนิดมีความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์เป็นอย่างมาก ดังตารางที่ 2.1 จึงทำให้เกิดปัญหาเมื่อนำขยะพลาสติกไปฝังดิน เพราะกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพจะเป็นไปได้ช้ามาก

ตารางที่ 2.1 ความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ของพอลิเมอร์สังเคราะห์แต่ละชนิด [2]

พอลิเมอร์	การใช้งาน	ความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์*
Polyethylene	Packaging films, insulation containers	VH
Polypropylene	Packaging films	VH
Poly(vinyl chloride)	Packaging films, foam	VH
Poly(vinylidene chloride)	Packaging films of high chemical stability	H
Poly(vinyl acetate)	Packaging films, varnish, fabrics	M
Poly(vinyl alcohol)	Packaging films	H

ตารางที่ 2.1 ความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ของพอลิเมอร์สังเคราะห์แต่ละชนิด
(ต่อ) [2]

พอลิเมอร์	การใช้งาน	ความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์*
Poly(methyl methacrylate)	Plexiglas	H
Polytetrafluoroethylene	Insulation	H
Polytrifluorochloroethylene	Insulation	H
Cellulose acetate	Acetate rayon	H
Polyamides	Fabrics	L
Poly(ethylene terephthalate)	Fabrics	F
Silicone	Coating	H
Phenol formaldehyde	Bakelite	H
Urea formaldehyde	-	H

*VH= very high, H= high, M= moderate, L= low, F= fair

ดังนั้นเพื่อลดการสะสมของขยะพลาสติกในสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการพัฒนาแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ซึ่งที่นิยมใช้กันมี 2 วิธี คือ การรีไซเคิลพอลิเมอร์สังเคราะห์ และการเตรียมผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

2.2 การรีไซเคิลพอลิเมอร์สังเคราะห์

การรีไซเคิลขยะพอลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งอาจเป็นขยะที่ได้จากผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบริโภคหรือเป็นเศษเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการผลิต สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การรีไซเคิลทางกายภาพ และการรีไซเคิลทางเคมี

การรีไซเคิลทางกายภาพนั้น จะเริ่มจากการรวบรวมขยะพอลิเมอร์สังเคราะห์มาแยกประเภท จากนั้นนำมาทำความสะอาดและบด หรือตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ สุดท้ายนำมาผสมกับเม็ดพลาสติกบริสุทธิ์พร้อมผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่ หรืออาจนำไปใช้เป็นสารตัวเติม (filler) ในพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เช่น การนำเพทที่ใช้งานแล้วนำไปทำพอลิเมอร์ผสมกับพอลิเอทิลีน [3] หรือ

กากไหม [4] หรือผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ [5] มาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว เป็นต้น

ส่วนการรีไซเคิลทางเคมีนั้นเป็นการนำขยะพอลิเมอร์สังเคราะห์ไปทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้ได้มอนอเมอร์หรือสารเคมีอื่นๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเมอร์หรือสารชนิดอื่นๆ ต่อไป กระบวนการรีไซเคิลทางเคมีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน มีดังนี้ [6]

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (gasification process) เป็นกระบวนการที่ทำให้พอลิเมอร์ถูกออกซิไดซ์บางส่วน (partial oxidation) ไปจนถึงถูกเผาไหม้หมด โดยมุ่งแปรรูปพอลิเมอร์ที่ใช้แล้ว ให้เปลี่ยนเป็นแก๊สสังเคราะห์ เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งในกระบวนการนี้มักมีน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทนเกิดขึ้นด้วยเสมอ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่นิยมใช้มี 2 แบบ คือ fixed-bed pressure gasification และ high-temperature winkle process

การรีดักชันในเตาถลุงเหล็ก (reduction in the blast furnace) เป็นการนำพอลิเมอร์ที่ใช้แล้วไปใช้เป็นสารรีดิวซ์ (reducing agent) ในเตาถลุงเหล็กเพื่อทำการผลิตเหล็กกล้า (steel) แทนการใช้น้ำมันเตา (heavy oil) เนื่องจากธรรมชาติทางเคมีของพอลิเมอร์มีความคล้ายคลึงกับน้ำมันหนักและสามารถใช้ทดแทนน้ำมันเตาได้ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยนำพอลิเมอร์ที่ใช้แล้วใส่เข้าไปในเตาเผาที่อุณหภูมิ 2000 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์จะสลายตัวให้แก๊ส และสารรีดิวซ์ (เช่น คาร์บอนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สมีเทน และน้ำ) ออกมาอย่างต่อเนื่อง และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการจะพบว่าสามารถนำน้ำที่เกิดขึ้นไปใช้ได้ โดยไม่มีสารอันตรายใดๆ เจือปน นอกจากนี้ยังพบว่าสารรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นมีประสิทธิภาพสูงถึง 80 เปอร์เซ็นต์

กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis process) เป็นกระบวนการทางความร้อนภายใต้ภาวะเฉื่อย (inert condition) ที่สามารถเปลี่ยนพอลิเมอร์ให้เป็นมอนอเมอร์ และสารโมเลกุลเล็กอื่นๆ ที่สามารถนำกลับไปใช้ในอุตสาหกรรมเคมีได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งถ้าอุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 350-360 องศาเซลเซียส จะได้ผลผลิตทางเคมีที่มีคุณภาพสูง และจัดเป็นการไพโรไลซิสอุณหภูมิต่ำ (low temperature pyrolysis) ส่วนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่านี้สามารถทำได้ตามชนิดของเตาปฏิกรณ์ (reactor) และชนิดของสารที่ต้องการ กระบวนการที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 3 แบบ คือ BP chemical pyrolysis process , BASF thermolysis process และ Fuji process

พอลิเมอร์ไฮโดรจีเนชัน (polymer hydrogenation) เป็นกระบวนการที่มีรากฐานการพัฒนาจากกระบวนการกลั่นถ่านหิน (coal refining process) และกระบวนการกลั่นแยกกาก

ของน้ำมันเตาดิบ (heavy crude oil) ซึ่งอาศัยหลักการของ Veba Combi-cracking process (VCC) ด้วยการทำให้พอลิเมอร์ที่ใช้แล้วมีความหนืดลดลงในเตาปฏิกรณ์ดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization reactor) ที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงนำไปทำให้เกิด hydrocracking ที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 200 บาร์ ผลผลิตที่ได้จะเป็นของผสมระหว่างไฮโดรบีทูเมน (hydro-bitumen) และซินครูด (syncrude) ที่สามารถนำไปกลั่นแยกแล้วนำกลับมาใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้

กระบวนการโซโวลลิซิส (sovolysis process) เป็นกระบวนการที่ถูกออกแบบมาเพื่อทำให้พอลิเมอร์เกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) จนกลายเป็นมอนอเมอร์ที่สามารถนำไปใช้ผลิตพอลิเมอร์หรือสารโมเลกุลเล็กอื่นๆ ที่สำคัญในอุตสาหกรรมเคมี กระบวนการนี้ใช้ได้เฉพาะกับพอลิเมอร์บางชนิดที่มีพันธะซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอยู่ในสายโซ่หลักของโมเลกุลซึ่งได้แก่ เพท (PET) พอลิยูรีเทน (PU) พอลิเอไมด์ (PA) และพอลิอะซิเตด (POM) เป็นต้น การรีไซเคิลวิธีนี้จำเป็นต้องทำความสะอาด และคัดแยกประเภทพอลิเมอร์ เพื่อให้ได้ผลที่สมบูรณ์และช่วยให้ง่ายต่อการกลั่นแยกสารโมเลกุลเล็กๆ ที่เกิดขึ้น ซึ่งคำว่า “โซโวลลิซิส” จะรวมถึงกระบวนการต่างๆ เช่น ไกลคอลลิซิส (glycolysis) เมทานอลลิซิส (methanolysis) ไฮโดรลิซิส (hydrolysis) แอซิโดลิซิส (acidolysis) และแอลกอฮอล์ลิซิส (alcoholysis) ปัจจุบันได้มีการนำกระบวนการโซโวลลิซิสไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมกับพอลิเมอร์บางชนิด เช่น พอลิอะซิเตด เพท และพอลิยูรีเทน

ตัวอย่างการรีไซเคิลทางเคมี เช่น การนำขวดน้ำดื่มซึ่งทำจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือ เพท (PET) มาย่อยสลายเพื่อให้ได้กรดเทเรฟทาลิก ที่นำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ไดออกซิลเทเรฟทาเลต ซึ่งสามารถใช้เป็นพลาสติกไซเบอร์สำหรับพีวีซี [1] และการผลิตพรมที่ทำมาจากเส้นใยไนลอนที่ผ่านการรีไซเคิลแล้ว [7] เป็นต้น

2.3 ผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ [2,8]

การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ธรรมชาติ เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีที่สิ่งมีชีวิตทำการย่อยสลายเพื่อใช้เป็นอาหาร โดยทั่วไป ผลิตภัณฑ์และพลังงานที่ได้จากการย่อยสลายจะถูกนำไปใช้ประโยชน์โดยสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น หรือใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบขึ้นใหม่ได้ ซึ่งปฏิกิริยาต่างๆของการย่อยสลายพอลิเมอร์ให้เป็นโมเลกุลเล็กๆนั้นเกิดจากการผลิตเอนไซม์ของจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายพอลิเมอร์ทางชีวภาพได้ เช่น แบคทีเรีย หรือรา เป็นต้น

การย่อยสลายนี้จะจำเพาะในแง่ของทั้งเอนไซม์ และตำแหน่งของพอลิเมอร์ที่เข้าไปทำการย่อยสลาย การย่อยสลายทางชีวภาพจะเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่นั้น ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ดังนี้

- ขึ้นกับสภาพแวดล้อมขณะนั้น เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน ความเป็นกรด-เบส
- ชนิดของจุลินทรีย์ที่สามารถปล่อยเอนไซม์ออกมาย่อยสลายพอลิเมอร์
- น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ คือ ถ้าพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความสามารถในการย่อยสลายจะสูงขึ้น

การค้นคว้าวิจัยเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทนี้สามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. การดัดแปรพอลิเมอร์ธรรมชาติ

เป็นการนำพอลิเมอร์ธรรมชาติมาดัดแปรด้วยกระบวนการทางกายภาพ หรือทางเคมี เพื่อให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าพอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น แป้ง หรือเจลาติน มีโครงสร้างทางเคมีที่ก่อให้เกิดพันธะไฮโดรเจนยึดเหนี่ยวโมเลกุลของพอลิเมอร์เหล่านี้ไว้อย่างเหนียวแน่น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มักจะมีสมบัติต่างๆไม่ดัดนัก ที่สำคัญคือ มีความเปราะสูง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี หรือการเติมสารเพื่อลดหรือขัดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจน จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติที่ดีขึ้น ตัวอย่างเช่น การนำเจลาตินมาดัดแปรทางเคมีโดยใช้สารดัดแปร เช่น กรดสเตียริก [9] หรือนำแป้งไปผสมกับพลาสติกไฮเซอรอล เช่น กลีเซอรอล [10] แล้วนำไปขึ้นรูป ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารได้

2. การสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่มีสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

เป็นการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ตัวอย่างเช่น พอลิคาร์โบแลกโตน เรียกว่า PCL และพอลิไกลโคลิกแอซิด เป็นต้น รวมทั้งโคพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ เช่น โคพอลิเมอร์ของอะโครเลอินและกรดอะคริลิก (acrolein-acrylic acid copolymer) และโคพอลิเมอร์แบบกราฟต์ของแป้งกับอะครีโลไนไตรล์ เป็นต้น

3. การนำพอลิเมอร์ธรรมชาติมาผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์

โดยทั่วไป พอลิเมอร์ธรรมชาติที่นำมาใช้ ได้แก่ เจลาติน เซลลูโลส แป้ง ลิกนิน เป็นต้น ตัวอย่างเช่น การผสมแป้งกับพลาสติกพอลิเอทิลีน โดยที่แป้งจะแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของพลาสติกและมีกลไกการสลายตัวของพลาสติกคือ ชั้นแรกจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์อะไมเลส

(amylase) เข้าย่อยสลายแป้งในพลาสติกผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำ ทำให้แป้งมีโมเลกุลเล็กลงจนสามารถเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์ได้ ซึ่งเม็ดแป้งจะหายไปจากเนื้อของพลาสติก ทำให้พลาสติกอ่อนลงและมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ในชั้นที่สองโลหะและน้ำที่อยู่ในดินจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้สารเปอร์ออกไซด์ (peroxide) ซึ่งสารเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะไปทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์สั้นลง (น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง) ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายพลาสติกเกิดเป็นน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ทั้งนี้อัตราการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน ความเป็นกรด-เบส และชนิดของจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินและความหนาของพลาสติกนั้นด้วย อย่างไรก็ตาม ปัญหาประการหนึ่งที่มักพบในวิธีการนี้ คือ ความเข้ากันไม่ได้ระหว่างพอลิเมอร์ธรรมชาติซึ่งมักเป็นพวกชอบน้ำ (hydrophilic) กับพอลิเมอร์สังเคราะห์ซึ่งมักเป็นพวกไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) วิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวอาจทำได้ด้วยการเติมสารช่วยผสม (compatibilizer) เช่น พอลิพรอพิลีนกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ลงไป อีกวิธีหนึ่ง คือ ทำการดัดแปรโครงสร้างของพอลิเมอร์ธรรมชาติให้มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น หรือให้มีส่วนของพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่จะนำไปผสมเพิ่มเข้ามาในโครงสร้าง เช่น การดัดแปรโครงสร้างของแป้งด้วยคลอไรด์ของกรดไขมัน แล้วนำแป้งดัดแปรดังกล่าวไปผสมกับพอลิเอทิลีน [11] หรือการกราฟต์แป้งด้วยพอลิสไตรีน แล้วนำกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้ไปผสมกับพอลิสไตรีน [12] ตามลำดับ

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ซึ่งได้แก่ โฟมที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยการผสมผสานวิธีการรีไซเคิลพอลิเมอร์สังเคราะห์ และการเตรียมผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพเข้าด้วยกัน โดยเน้นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำถุงน่องที่ใช้แล้ว ถุงน่อง ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ พอลิเอไมด์ชนิดอะลิฟาติก (aliphatic polyamide) มารีไซเคิลด้วยการนำไปใช้เป็นสารตัวเติม (filler) ในผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับถุงน่อง อันได้แก่ เจลาติน

2.4 พอลิเอไมด์ (Polyamide, PA) [13]

พอลิเอไมด์ คือ พอลิเมอร์ที่มีพันธะเอไมด์ (-CO-NH-) อยู่ในสายโซ่หลักของโมเลกุล ซึ่งมีอยู่มากมายหลายชนิด พอลิเอไมด์กลุ่มสำคัญที่ใช้ในทางการค้า ได้แก่ พอลิเอไมด์ประเภทอะลิฟาติก (aliphatic polyamides) ได้ถูกผลิตขึ้นเป็นครั้งแรกโดยบริษัท ดูปองท์ ประเทศสหรัฐอเมริกา และมีชื่อทางการค้าว่า "ไนลอน" (Nylon) ไนลอนที่ถูกผลิตออกมาส่วนใหญ่ใช้ทำเส้นใย แต่ก็ยังมีความสำคัญในการใช้งานอื่นๆที่ไม่ใช่เส้นใยด้วย โดยเฉพาะการทำเป็นพลาสติกวิศวกรรม (ไนลอน 6,6 และไนลอน 6 มีการใช้งานมากที่สุด) โดยนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานต่างๆ เช่น ชิ้นส่วนใน

เครื่องจักร อุปกรณ์ และเครื่องมือแทนโลหะ ปัจจุบันไนลอนเป็นพลาสติกวิศวกรรมที่รู้จักกันแพร่หลายมากที่สุด โดยไนลอนแต่ละชนิดจะมีสมบัติพิเศษที่แตกต่างกัน เช่น

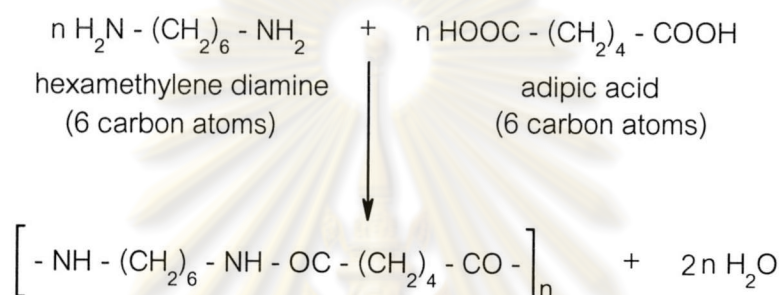
- ไนลอน 6,6 มีความแข็งตึง มีผิวที่แข็ง และทนทานต่อการขีดถูที่ดีเยี่ยม นอกจากนี้ยังมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูง
- ไนลอน 6 มีความแข็งแรง และเหนียวที่ดีแม้ที่อุณหภูมิต่ำ
- ไนลอน 6,9 มีความแข็ง เหนียว และมีความทนทานต่อการขีดถูที่ดี และยังมีความสามารถในการดูดซับความชื้นที่ต่ำ ดังนั้นจึงมีเสถียรภาพทางขนาดที่ดี (dimensional stability)
- ไนลอน 6,10 และ 6,12 มีความสามารถในการดูดซับความชื้นที่ต่ำ จึงเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการเสถียรภาพทางขนาดสูง
- ไนลอน 11 มีความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำมาก และมีความทนแรงกระแทกสูงมากเมื่อเทียบกับไนลอนชนิดอื่นๆ (ยกเว้นไนลอน 12) แต่มีความแข็งแรงต่ำกว่าเมื่อเทียบกับไนลอน 6
- ไนลอน 12 มีความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำกว่าไนลอน 11 และมีความทนแรงกระแทกดีกว่าไนลอน 6 แต่ไม่ดีเท่าไนลอน 11 นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าไนลอนชนิดอื่นๆ

2.4.1 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไนลอน

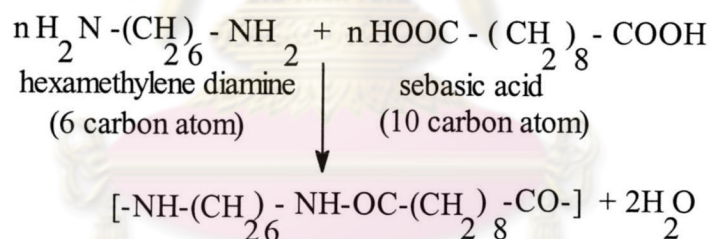
ไนลอนในทางการค้าสามารถสังเคราะห์ได้ 3 วิธี [14] คือ

(1) ปฏิกิริยาระหว่าง ไดเอมีน (diamine) กับกรดไดคาร์บอกซิลิก (dicarboxylic acid)

Nylon 6,6

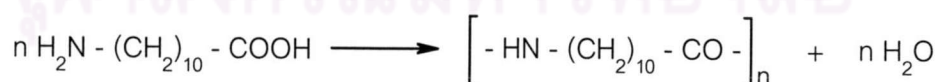


Nylon 6,10



(2) ปฏิกิริยา self condensation ของ กรดอะมิโน (ϵ -amino acid)

Nylon 11

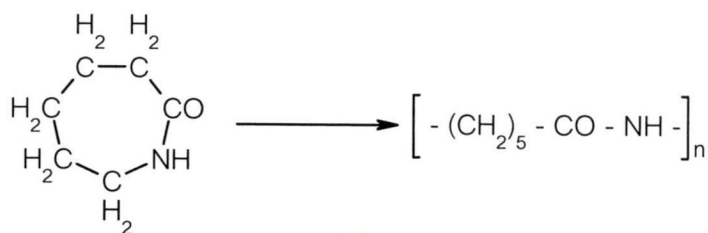


ϵ -aminoundecanoic acid

(11 carbon atom)

(3) ปฏิกิริยา ring opening polymerization ของแลกแทม (lactam)

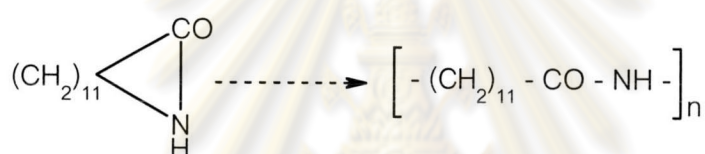
Nylon 6



ϵ -caprolactam

(6 carbon atom)

Nylon 12



dodecyl lactam

(12 carbon atoms)

จะเห็นได้ว่าไนลอน 6,6 และไนลอน 6,10 สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง เฮกซะเมทิลีนไดเอมีน (hexamethylene diamine) กับกรดอะดิพิค (adipic acid) และกรด เซบาสิก (sebacic acid) ตามลำดับ ในขณะที่ไนลอน 11 นั้นเกิดจากปฏิกิริยาการควบแน่นด้วย ตัวเอง (self condensation) ของ กรดอะมิโนแบบ ϵ (ϵ -amino acid) สำหรับไนลอน 6 และ ไนลอน 12 จะเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (ring opening polymerization) ของ คาร์โปลแลกแทม (ϵ -caprolactam) และโดเดซิลแลกแทม (dodecyl lactam) ตามลำดับ

สมบัติของไนลอน [15]

สมบัติทางกายภาพ

ลักษณะภายนอก ดูจากกล้องจุลทรรศน์ เส้นใยไนลอนโดยทั่วไปพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นทรงกลม ผิวเรียบคล้ายแท่งแก้วยาว ความยาวตลอดเส้นใยมีความต่อเนื่องสม่ำเสมอ มีทั้งเส้นใยยาวและเส้นใยสั้นที่มีความยาวขนาดต่างๆ ตามต้องการ

สี โดยทั่วไปเส้นใยไนลอนจากการผลิตมีสีขาวและมีความมันค่อนข้างสูง แต่ในกระบวนการผลิตมีการควบคุมระดับความมันตามความต้องการของลูกค้าในทุกระดับ

ความคงทน ไนลอนเป็นเส้นใยที่มีความคงทนสูง นอกจากนั้นยังสามารถทนต่อการขัดถูได้ดี และสภาพยืดหยุ่นสูงมาก การคืนตัวจากแรงอัดดีมาก ไม่มีปัญหาด้านการยับ การใช้งานของไนลอนจึงเป็นไปอย่างกว้างขวางมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานด้านอุตสาหกรรม เช่น ทำเป็นเต็นท์ ใบของเรือใบ และแท็งก์เก็บน้ำ เป็นต้น

ความสามารถในการดูดความชื้น มีการดูดความชื้นต่ำ ความสามารถในการดูดความชื้นประมาณ 4.0-4.5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เป็นจุดอ่อนที่สวมใส่ไม่สบายและเป็นปัญหาในระยะเริ่มแรกของการใช้ในลอน ด้วยผิวที่เรียบและเส้นใยเหยียดยาวเกาะตัวกันระหว่างเส้นใยชิดกันมากในโครงสร้างของด้าย ทำให้เส้นด้ายแน่นและการระบายไม่ดี ความนิยมของไนลอนจึงลดลงระดับหนึ่ง ต่อมาได้มีการแก้ปัญหาด้วยการพัฒนาเส้นใยให้มีโครงสร้างฟูขึ้นในรูของเส้นด้ายเทกซ์เจอร์ นอกจากนั้นยังมีกระบวนการตกแต่งสำเร็จเข้ามาช่วยเสริมเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซึมความชื้นให้ดีขึ้น

การทนต่อความร้อน ไนลอนเมื่อได้รับความร้อนสูงจะหลอมตัวคล้ายอะซิเตต

การติดไฟ เป็นสมบัติที่นับเป็นเอกลักษณ์อย่างหนึ่งของไนลอน สามารถนำไปทดสอบเพื่อวิเคราะห์เส้นใยได้เป็นอย่างดี เมื่อไนลอนเข้าสู่เปลวไฟจะเกิดการหลอมและหลุดตัวออกจากเปลวไฟ จากนั้นจึงเกิดการติดไฟ ทำให้เส้นใยหลอมเหลวและเกิดเป็นหยด กลิ่นคล้ายขี้ฉ่าย มีควันขาวออกมา ขี้เถ้าที่เหลือมีลักษณะเป็นเม็ดสีน้ำตาลดำ

ความถ่วงจำเพาะ 1.14 ถือได้ว่าค่อนข้างเบา

สมบัติทางเคมี

กรด ไนลอนถูกทำลายด้วยสารละลายกรดเข้มข้น เช่น กรดไนตริก กรดกำมะถัน กรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น หากต้มในสารละลาย 5 เปอร์เซ็นต์ ของกรดไฮโดรคลอริก ไนลอนจะสลายตัวได้

ต่าง ไนลอนมีความทนต่อต่างได้ดี

สารละลายอินทรีย์ ทนทานต่อสารละลายอินทรีย์ได้ดี สามารถซักแห้งได้ ไนลอนไม่ละลายในสารละลายอะซีโตน แต่ละลายได้ในกรดฟอร์มิกเข้มข้น

สารซักฟอก การใช้สารซักฟอกประเภทคลอรีนอาจต้องระวังเพราะมีผลเสียต่อไนลอนได้

ราและแมลงไม่มีผลต่อไนลอนในภาวะการใช้งานปกติ

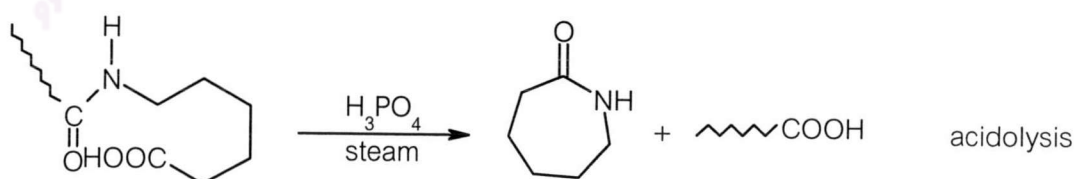
แสงแดด โดยทั่วไปไนลอนทนต่อแสงแดดได้ดี

การย้อมสี ไนลอน 6 ย้อมสีได้ดีกว่าไนลอน 6,6 อย่างไรก็ตามไนลอนทั้งสองชนิดจะรักษาสีไว้ได้นานไม่จางง่าย สีที่ใช้อาจใช้ได้ทั้ง แอซิด ไดเรก แวท เบสิก และดิสเพอร์ส

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาถึงวิธีการรีไซเคิลไนลอนจากผลิตภัณฑ์ต่างๆหลายประเภท เช่น

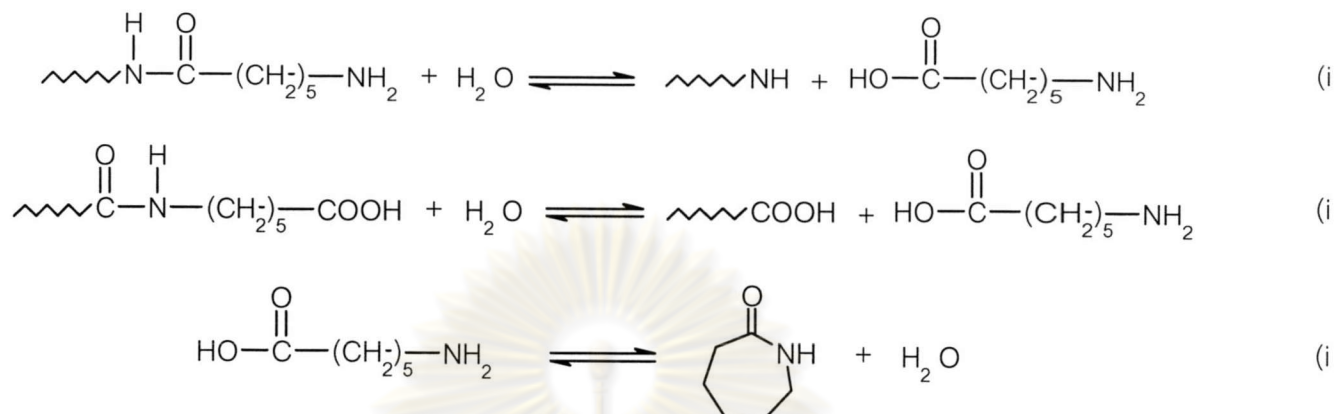
[9]

1. แอซิโดไลซิส (acidolysis) การรีไซเคิลโดยวิธีนี้พอลิเมอร์สังเคราะห์สามารถถูกเร่งปฏิกิริยาในการดีพอลิเมอร์เซชันให้เป็นมอนอเมอร์ โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่น แอซิโดไลซิสไนลอน 6 ได้คาร์โพรแลกแทมซึ่งเป็นมอนอเมอร์ออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แอซิโดไลซิสของไนลอน 6

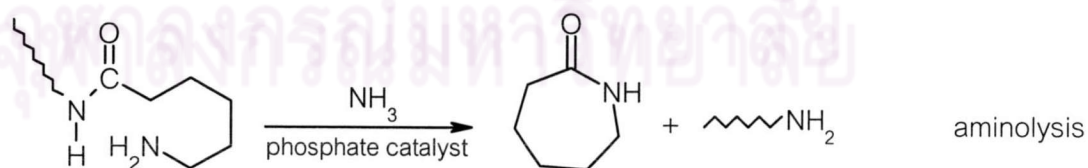
2. ไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เป็นการดีพอลิเมอร์ไรซ์พอลิเมอร์สังเคราะห์ในระบบที่เป็นน้ำ ภายใต้ความดันสูง ตัวอย่างเช่น การดีพอลิเมอร์ไรซ์ไนลอน 6 ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเกิดปฏิกิริยาได้ 3 แบบ



รูปที่ 2.2 ไฮโดรไลซิสของไนลอน 6

- (i) การไฮโดรไลซิสไนลอน 6 ที่มีหมู่เอมีนที่ปลาย แล้วกลายเป็นกรด 6 อะมิโนเฮกซานอิก
- (ii) การไฮโดรไลซิสไนลอน 6 ที่มีหมู่มกรดที่ปลาย แล้วกลายเป็นกรด 6 อะมิโนเฮกซานอิก
- (iii) การเปลี่ยนกรด 6 อะมิโนเฮกซานอิกเป็นคาร์โบรแลกแทมและน้ำ

3. แอมโมโนไลซิส (ammonolysis) เป็นการดีพอลิเมอร์ไรซ์พอลิเมอร์สังเคราะห์ด้วยแอมโมเนีย โดยใช้สารประเภทฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้มอนอเมอร์ออกมา ตัวอย่างเช่น การดีพอลิเมอร์ไรซ์ของไนลอน 6 แล้วได้คาร์โบรแลกแทม ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แอมโมโนไลซิสของไนลอน 6

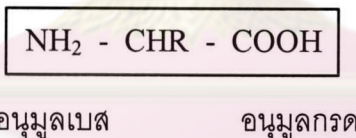
2.5 เจลาติน (Gelatin) [17]

เจลาตินเป็นสารจำพวกโปรตีน ซึ่งในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของโมเลกุลขนาดใหญ่มาก เรียกว่า คอลลาเจน (collagen) ซึ่งเป็นโปรตีนที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของกระดูก โดยที่กระดูกจะมีคอลลาเจนอยู่ประมาณร้อยละ 30 ที่เหลือจะเป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต การสกัดเจลาตินจากคอลลาเจน ทำได้โดยการไฮโดรไลซิสคอลลาเจนด้วยกรด (acid hydrolysis) หรือด้วยด่าง (alkaline hydrolysis)

โครงสร้างของเจลาติน

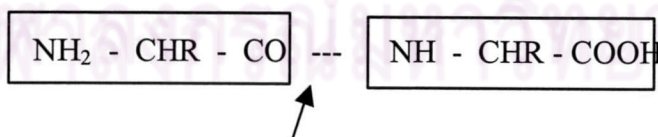
เจลาตินเป็นสารประเภทโปรตีนที่ประกอบด้วยหน่วยเล็กๆ ของกรดอะมิโน (amino acid) หลายโมเลกุลรวมกันเป็นโมเลกุลใหญ่ ด้วยพันธะที่เรียกว่าพันธะเปปไทด์ (peptide bond) ซึ่งก็คือพันธะเอไมด์ระหว่างหมู่คาร์บอนซิกของกรดอะมิโนตัวแรกกับหมู่อะมิโนของกรดอะมิโนตัวถัดไป ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งการมีแรงยึดเกาะประเภทพันธะเปปไทด์เป็นจำนวนมากนี้ จึงทำให้สามารถจัดเจลาตินเป็นพอลิเมอร์ที่เรียกว่า พอลิเปปไทด์ (polypeptide)

กรดอะมิโน 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยทั้งอนุมูลกรดและเบส ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปแสดงอนุมูลกรดและเบสในกรดอะมิโน 1 โมเลกุล

เมื่อกรดอะมิโน 2 ตัวมาต่อกัน



พันธะเปปไทด์ระหว่างกรดและเบส

รูปที่ 2.5 โครงสร้างของกรดอะมิโน

จำนวนลูกโซ่ที่ต่อกันของเจลาตินจะมีความยาวมากตั้งแต่ 300-5,000 หน่วยโมเลกุล ในโมเลกุลของเจลาตินมีทั้งอนุมูลกรดและอนุมูลเบส จึงจัดว่าเป็นสารแอมโฟเทอริก (amphoteric) ซึ่งมีสมบัติพิเศษ คือ สามารถละลายได้ทั้งในสารละลายที่เป็นกรดและเป็นเบส

การปรับความเป็นกรด-เบสของสารละลาย (pH) ให้เหมาะสมจะทำให้สภาพประจุของโมเลกุลเจลาตินเกิดความสมดุล มีสภาพเป็นกลาง ไม่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ ที่ตำแหน่งนี้เรียกว่าเป็นจุดไอโซอิเล็กทริกของเจลาติน (isoelectric point) เจลาตินที่ได้จากการสกัดคอลลาเจนด้วยสารละลายกรด จะมีจุดไอโซอิเล็กทริกอยู่ที่ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) 7-9 ในขณะที่เจลาตินที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายด่างจะมีจุดไอโซอิเล็กทริกอยู่ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 4-5 ที่จุดไอโซอิเล็กทริก เจลาตินจะมีสมบัติพิเศษ คือ มีอัตราการละลายน้ำหรือการบวมตัวน้อยมาก

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของเจลาติน พบว่า มีกรดอะมิโนมากมายหลายชนิด ที่พบเป็นส่วนใหญ่ คือ ไกลซีน (glycine) โพรลีน (proline) และไฮดรอกซีโพรลีน (hydroxyproline) ในปริมาณ 26.4-30.5 เปอร์เซ็นต์ 14.8-18 เปอร์เซ็นต์ และ 13.3-14.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้จะพบกรดอะมิโนชนิดอื่นๆแทรกอยู่บ้าง เช่น อะลานีน (alanine) 8.7 เปอร์เซ็นต์, วาลีน (valine) 2.5 เปอร์เซ็นต์, ลิวซีน (leucine) 3.2 เปอร์เซ็นต์, ไอโซลิวซีน (isoleucine) 1.4 เปอร์เซ็นต์, ซีสทีน (cystine) และซีสเทอีน (cysteine) 0.1 เปอร์เซ็นต์, เมไทโอนีน (methionine) 1.0 เปอร์เซ็นต์, ฟีนิลอะลานีน (phenylalanine) 2.2 เปอร์เซ็นต์, เซอรีน (serine) 0.4 เปอร์เซ็นต์, ทรอนีน (threonine) 1.9 เปอร์เซ็นต์, ไทโรซีน (thyrosin) 0.5 เปอร์เซ็นต์, กรดแอสพาทิก (aspartic acid) 6.6 เปอร์เซ็นต์, กรดกลูตามิก (glutamic acid) 11.4 เปอร์เซ็นต์, อาร์จินีน (arginine) 8.1 เปอร์เซ็นต์, ไลซีน (lysine) 4.1 เปอร์เซ็นต์, และฮิสทีดีน (histidine) 0.8 เปอร์เซ็นต์

และจากการวิเคราะห์ธาตุ (elemental analysis) พบว่าเจลาตินประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน 50.5 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 6.8 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 17 เปอร์เซ็นต์ และออกซิเจน 25.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในเจลาตินที่มีความบริสุทธิ์มากอาจมีไนโตรเจนถึง 18.2-18.4 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.2 ชนิดของอะมิโนแอซิด

Amino Acid	Chemical Structure	Amino acid	Chemical Structure
Threonine (Thr)	<chem>CC(O)C(N)C(=O)O</chem>	Glycine (Gly)	<chem>NC(=O)O</chem>
Tyrosine (Tyr)	<chem>CC1=CC=C(O)C=C1C(N)C(=O)O</chem>	Alanine (Ala)	<chem>CC(N)C(=O)O</chem>
Phenylalanine (Phe)	<chem>CC1=CC=C(C=C1)C(N)C(=O)O</chem>	Valine (Val)	<chem>CC(C)C(N)C(=O)O</chem>
Tryptophan (Try)	<chem>CC1=CC=C2C(=C1)N=CN=C2C(N)C(=O)O</chem>	Leucine (Leu)	<chem>CC(C)C(C)C(N)C(=O)O</chem>
Aspartic Acid	<chem>CC(N)C(=O)O</chem>	Isoleucine (Ileu)	<chem>CC(C)C(C)C(N)C(=O)O</chem>
Cysteine (CySH)	<chem>CC(N)C(=O)O</chem>	Serine (Ser)	<chem>CC(N)C(=O)O</chem>
Cystine (Cys)	<chem>CC(N)C(=O)O</chem>	Glutamic (Glu)	<chem>CC(N)C(=O)O</chem>
Proline (Pro)	<chem>C1CCN1C(=O)O</chem>	Lysine (Lys)	<chem>CC(N)C(=O)O</chem>
Hydroxyproline (Hypro)	<chem>C1CC(O)N1C(=O)O</chem>	Arginine (Arg)	<chem>CC(N)C(=O)O</chem>
		Histidine (His)	<chem>CC(N)C(=O)O</chem>
		Methionine (Met)	<chem>CC(N)C(=O)O</chem>

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมบัติของเจลาติน [18]

เจลาตินที่บริสุทธิ์เมื่อละลายน้ำจะให้สารละลายที่ใส ไม่มีสี สารละลายมีสภาพขุ่น แต่จะเหนียวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของเจลาติน ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย สามารถใช้รับประทานได้ ดังนั้นสารละลายเจลาตินจะเสียเนื่องจากเชื้อราหรือแบคทีเรียได้ แต่สำหรับเจลาตินแห้ง มีปริมาณน้ำอยู่น้อย เชื้อราหรือแบคทีเรียไม่สามารถเจริญเติบโตได้จึงเก็บในสภาพแห้งได้นานกว่า

สมบัติทางเคมีและทางกายภาพ เจลาตินมีลักษณะเป็นเม็ดหยาบๆ (coarse granules) จนถึงผงละเอียด ไม่มีสีหรือมีสีเหลืองเล็กน้อย โดยจะมีลักษณะโปร่งใส (transparent) ไม่มีกลิ่นหรือรส มีลักษณะเป็นของแข็ง เพราะ มีความถ่วงจำเพาะในช่วง 1.3-1.4 ซึ่งสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเจลาตินจะขึ้นอยู่กับ

1. แหล่งของคอลลาเจน
2. วิธีการสกัด
3. ภาวะในการสกัดและความเข้มข้น
4. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)
5. สารเติมแต่งหรือสิ่งเจือปนต่างๆ

การละลาย ในการนำไปใช้งานไม่ว่าจะเป็นในอุตสาหกรรมอาหาร ยา เคมีภัณฑ์ หรือฟิล์มถ่ายภาพ เจลาตินจะถูกใช้ในรูปของสารละลาย เจลาตินจะไม่ละลายในแอลกอฮอล์ อะซีโตน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ อีเทอร์ เบนซีน ไบโตรเลียมอีเทอร์ และตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว แต่จะละลายในน้ำ กรดอะซีติก และสารละลายของพอลิไฮดรอกซีแอลกอฮอล์ เช่น กลีเซอรอล โพรพิลีนไกลคอล ซอพิทอล และแมนนิทอล เจลาตินละลายได้ดีในน้ำร้อน เมื่อสารละลายเย็นตัวลงจะเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นเจล (gel) ที่มีความยืดหยุ่น การเปลี่ยนสภาพเป็นเจลนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา และความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลาย

การดูดความชื้น เจลาตินแห้งสามารถดูดความชื้นได้ดีและรวดเร็ว จนเมื่อปริมาณความชื้นที่ดูดไว้เท่ากับปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่โดยรอบแล้วก็จะหยุดการดูดความชื้น เจลาตินดูดความชื้นได้ดีเมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูง เช่น ในประเทศไทยซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 70-80 เจลาตินที่มีขายอยู่ทั่วไปจะมีความชื้นประมาณ 9-12 เปอร์เซ็นต์

การพองตัว เจลาตินพองตัวได้เมื่อดูดความชื้นเข้าไป น้ำทำให้เจลาตินพองตัวได้ดี และอุณหภูมิจะมีผลต่อการพองตัวด้วยอย่างมาก การพองตัวจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่อุณหภูมิมียค่ามากกว่า 30 องศาเซลเซียส พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลที่ทำให้โมเลกุลของเจลาตินยึดเกาะกันได้หลวมๆ จะหมดไป ส่งผลให้เจลาตินหมดสภาพของการกลายเป็นเจล แต่จะละลายในสารละลายได้หมด ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส เจลาตินจะละลายได้เป็นสารละลายใส ไม่มีสภาพเจล ไม่หนืด ต่อเมื่ออุณหภูมิลดลงจนพันธะระหว่างสายโมเลกุลเกิดขึ้นได้ใหม่ สารละลายเจลาตินจึงมีสภาพเป็นเจลเช่นเดิม

การพองตัวของเจลาตินขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดเป็นด่าง การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายมีผลทำให้เจลาตินมีการพองตัวในน้ำได้มากขึ้น ยกเว้นค่าความเป็นกรดเป็นด่างนั้นจะเป็นค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่จุดไอโซอิเล็กทริก ซึ่งในกรณีนั้นเจลาตินจะมีการพองตัวน้อยมาก

การแข็งตัวของเจลาติน เจลาตินแข็งตัวได้จากปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างสายโมเลกุลของเจลาตินกับสารที่ทำให้แข็งตัวหรือสารเพิ่มความแข็ง (hardener) เมื่อเจลาตินแข็งตัวจะมีสมบัติเปลี่ยนแปลงไปดังนี้

1. การลดการบวมตัวของเจลาตินเมื่ออยู่ในน้ำ และในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรดหรือเป็นด่าง
2. เพิ่มอุณหภูมิการหลอมเหลว เจลาตินจะทนต่อความร้อนได้ดีขึ้นโดยที่ไม่เกิดการหลอมตัว เปลี่ยนสภาพจากเจลเป็นของเหลว
3. เพิ่มความหนืดของสารละลาย สารละลายเจลาตินที่มีสารทำให้แข็งตัวอยู่จะมีความหนืดมากขึ้นกว่าเดิม

การสกัดเจลาติน

ในทางอุตสาหกรรมจะเตรียมเจลาตินได้จากการไฮโดรไลซ์สารโปรตีนคอลลาเจนในกระดูกหรือหนังสัตว์ ขั้นตอนการเตรียมเจลาติน คือ

1. นำกระดูกมาล้างให้สะอาด ขจัดสิ่งปนเปื้อนออก ทูบให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆ
2. ละลายแคลเซียมฟอสเฟตในกระดูกออกด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง เป็น เวลารนาน 1-2 วัน จะได้สารละลายโอเซอิน (ossein)
3. ล้างโอเซอินให้สะอาดด้วยน้ำ

- นำไอเซอินมาไฮโดรไลซ์ด้วยสารละลายกรดหรือด่าง เพื่อย่อยสลายโมเลกุลไอเซอินที่มีลักษณะโครงสร้างตาข่ายต่อกันยาวด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงให้ขาดออกจากกัน ได้เป็นโมเลกุลที่มีขนาดสั้นลง จนได้สารที่เรียกว่าคอลลาเจนซึ่งยังคงมีขนาดโมเลกุลใหญ่ และได้ความยาวของโมเลกุลประมาณ 300-5,000 หน่วย ในขั้นนี้ก็จะได้เจลาตินออกมา

วิธีการไฮโดรไลซ์ไอเซอินมีด้วยกัน 2 แบบ คือ

- การไฮโดรไลซิสด้วยกรด (acid hydrolysis) ใช้กรดไฮโดรคลอริกเจือจางย่อยสลายไอเซอินจนกระทั่งโมเลกุลสั้นลงใช้เวลาประมาณ 1-2 อาทิตย์ จะได้เจลาตินที่มีจุดไอโซอิเล็กทริกที่ความเป็นกรดต่าง 7-9
- การไฮโดรไลซิสด้วยด่าง (alkaline hydrolysis) ใช้ด่างจำพวกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ปูนขาว) ย่อยสลายไอเซอินจนกระทั่งโมเลกุลสั้นลง จะใช้เวลาในการย่อยสลายนานกว่าวิธีการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด คือ ใช้เวลาตั้งแต่ 20-100 วัน จึงจะได้สารละลายเจลาตินออกมา เจลาตินที่ได้มีจุดไอโซอิเล็กทริกที่ความเป็นกรดต่าง 4-5

เมื่อนำสารละลายเจลาตินที่ได้มากรองให้สะอาด ขจัดสารปนเปื้อนออกด้วยถ่านกัมมันต์ (active charcoal) สารละลายที่ได้มีความเข้มข้นของเจลาตินประมาณร้อยละ 20 ต้องทำการระเหยน้ำออกโดยกระบวนการลดความดันเพื่อให้เจลาตินแห้งอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เพราะการเคี้ยวด้วยความร้อนนานๆ เพื่อให้น้ำระเหย จะทำให้เจลาตินเสื่อมสภาพและเจลาตินที่ได้มีคุณภาพต่ำ จึงต้องใช้วิธีลดความดันที่อุณหภูมิต่ำแทน จึงได้เจลาตินแห้งที่มีคุณภาพดีและมีความชื้นเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 12-15

การใช้งานของเจลาติน

ปริมาณการผลิตเจลาตินทั่วโลกมีมากถึงประมาณ 115,000 เมตริกตัน ซึ่งประเทศที่มีการผลิตเจลาตินมากที่สุดคือ สหรัฐอเมริกา มีประมาณ 31,000 ตัน รองลงมาคือ ฝรั่งเศส เยอรมัน อังกฤษ และญี่ปุ่น ตามลำดับ โดยมีการใช้งานกันมากในอุตสาหกรรมอาหาร โดยใช้เป็นสตาบิไลเซอร์ (stabilizer) และสารเพิ่มความหนืด (thickener) ในอาหาร ในทางเภสัชกรรม ใช้ทำแคปซูลบรรจุยา (capsules) ตัวควบคุมและปลดปล่อยยา และในอุตสาหกรรมฟิล์มถ่ายภาพ จะใช้เป็นส่วนประกอบของฟิล์มถ่ายภาพโดยใช้ทำเป็นสารยึด (binder) หรือชั้นเคลือบ (emulsion layer) นั้นเอง

ในการใช้งานด้านอื่นๆ ซึ่งเป็นส่วนน้อย เช่น กาว (adhesive) ตัวกรองแสง (light filter) ในหลอดปรอท, ใช้เคลือบกระดาษและผ้า (sizing), bacteriological culture media, protective colloid, microencapsulated products และ clarifying agent เป็นต้น

การนำเจลาตินมาใช้ในการเตรียมเป็นผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น พลาสติก จะพบว่า พลาสติกที่เตรียมได้มักมีความเปราะ ความยืดหยุ่นไม่ค่อยดี อันเนื่องมาจากการที่เจลาตินมีพันธะไฮโดรเจนอยู่อย่างหนาแน่น จึงต้องมีการนำเจลาตินไปดัดแปรโครงสร้างทางเคมีเพื่อลดปริมาณของพันธะไฮโดรเจนลง ซึ่งแนวทางในการดัดแปรมีหลายแนวทาง ตัวอย่างเช่น การเตรียมเจลาตินกราฟต์ด้วยพอลิสไตรีน [19] การเตรียมเจลาตินกราฟต์ด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยระบบอิมัลชัน [20] และการเปลี่ยนโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของเจลาตินด้วยกรดไขมัน [21]

การดัดแปรเจลาติน

- การเตรียมเจลาตินกราฟต์ด้วยพอลิสไตรีน [19]

E. RUCKENSTEIN และ G. XU ทำการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์จากเจลาตินและสไตรีนมอนอเมอร์ โดยใช้ อะโซบิสไอโซบิวทิโรไนไตรล์ (AIBN) เป็นสารริเริ่มและ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) เป็นสารลดแรงตึงผิว (surfactants) ผสมกันที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในระบบอิมัลชัน ซึ่งจะสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเจลที่อุณหภูมิห้อง โดยมีความคงตัวสูงคงสภาพความเป็นเจลไว้ได้นานและ ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นของไหลที่มีความหนืดสูงมาก

การเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ดังกล่าว จะเกิดขึ้นโดยใช้เวลา 2-3 วัน ที่อุณหภูมิห้องแต่สามารถเกิดภายใน 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะได้โคพอลิเมอร์ที่มีสมบัติไม่ละลายในน้ำ เอทานอล ออกเทน และไซโคลเฮกเซน แต่จะบวมตัว การใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้มีอัตราการกราฟต์มากขึ้น ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของโคพอลิเมอร์ให้มากขึ้น

- การเตรียมเจลาตินกราฟต์ด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดยระบบอิมัลชัน [20]

G. XU และ E. RUCKENSTEIN ทำการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ด้วยระบบอิมัลชัน โดยมีสารละลายของเจลาตินกับสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ในน้ำ กับเมทิลเมทาคริเลตโมโนเมอร์ที่มีสารริเริ่มคือ อะโซบิสไอโซบิวทีโรไนไตรล์ (AIBN) ละลายที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พร้อมกวนอย่างแรงแล้วปล่อยให้เย็นลงจนเท่ากับอุณหภูมิห้องจะได้เจลาอิมัลชันที่มีความโปร่งใสและที่อุณหภูมิห้องจะมีความคงตัวในสภาพเจลสูง

จะเกิดการกราฟต์อย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิห้องหลังจากการเกิดเจลซึ่งทำให้มันไม่ละลายน้ำ แต่หลังจากนั้น 5 วัน จะมีการบวมตัวเกิดขึ้น และการบวมตัวจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดหลังจาก 25 วัน การเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางจะเกิดก็ต่อเมื่อมีสารริเริ่มอยู่ด้วยเท่านั้น

เจลาตินที่มีการกราฟต์นี้จะไม่ละลายในน้ำ ไฮโคลเฮกเซน โทลูอีน การบวมน้ำจะถึงสมดุลหลังจากการทำปฏิกิริยา 25 วัน จากการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องเอฟทีไออาร์สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ พบว่ามีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอลิโกเมอร์ของเมทิลเมทาคริเลตกับเจลาตินด้วย และจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เจลาตินที่สังเคราะห์ได้นี้จะมีโครงสร้างที่มีรูพรุน

- การเปลี่ยนโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของเจลาตินด้วยกรดไขมัน [21]

KODJO และคณะ การทดลองนี้ทำการเปลี่ยนการจัดเรียงตัวของอะตอมที่แตกต่างกันในที่ว่างอันเนื่องมาจากการหมุนของพันธะเดี่ยว และการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันบางหมู่ของเจลาตินด้วยกรดสเตียริก ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$) หรือ Octadecanoic acid ซึ่งเป็นกรดไขมันอิ่มตัวหรือกรดคาร์บอกซิลิกสายโซ่ยาวโดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification)

ในการทดลองใช้เจลาติน 5-30 เปอร์เซ็นต์ ละลายในน้ำที่ปรับความเป็นกรดต่างให้เป็น 4.5 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50-90 องศาเซลเซียส ในระบบอิมัลชันซึ่งมีการกวนตลอดเวลานาน 2-8 ชั่วโมง โดยจะเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดสเตียริกคือ จะใช้ความเข้มข้น 0, 0.05, 0.1 และ 0.4 กรัม/กรัม นำเข้าไปในเครื่องหมุนเหวี่ยงและทำการกรองโดยใช้กระดาษกรองขนาด 5000 Da นำส่วนใสที่ได้ไประเหยจนแห้งจะได้เจลาตินดัดแปร

ปฐมพล อาษาคง และ มัณฑนา บรรลือศักดิ์ ได้ทำการเตรียมพลาสติกหุ้มไส้กรอกจากเจลาติน เพราะเนื่องจากเจลาตินบริสุทธิ์มีสมบัติไม่เหมาะสมกับการใช้งานหลายประการ เช่น ดูดซึมความชื้นสูงและใช้เวลาแห้งตัวนาน เป็นต้น จึงต้องมีการนำเจลาตินไปดัดแปร สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการดัดแปรเจลาตินด้วยกรดสเตียริกในปริมาณต่างๆ กันคือ 5,10,15,20,25,30,35 และ 40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของเจลาติน ที่ความเป็นกรดเป็นด่างเท่ากับ 4.5 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มจากสารละลายเจลาติน สามารถทำได้โดย การหล่อในแม่แบบ จากการทดลองพบว่า ฟิล์มที่เตรียมจากเจลาตินดัดแปรจะมีการดูดซึมความชื้นต่ำกว่าความทนแรงดึงต่ำกว่า การยืดตัวต่ำกว่า และใช้เวลาในการแห้งตัวน้อยกว่าฟิล์มที่เตรียมจากเจลาตินที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร [22]

สำหรับงานวิจัยนี้ สารดัดแปรที่เลือกใช้ ได้แก่ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เนื่องจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีราคาต่ำกว่ากรดสเตียริก ประกอบกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีฟังก์ชันลิลิตีของกรดถึง 2 หมู่ใน 1 โมเลกุล จึงมีความเป็นไปได้ที่มาเลอิกแอนไฮไดรด์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับไนลอนในถุงน่องได้เช่นเดียวกับเจลาติน ที่ผ่านมาได้มีการนำมาเลอิกแอนไฮไดรด์ไปทดลองใช้เป็นสารดัดแปรในมันสำปะหลัง [23] และแป้งข้าวเหนียว [24] เพื่อให้ได้เป็นแป้งดัดแปรที่สามารถนำไปผลิตเป็นแผ่นพลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า แผ่นพลาสติกที่เตรียมได้มีลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าแผ่นพลาสติกที่เตรียมจากแป้งที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร

2.6 โฟมพลาสติก (Plastic Foams)

โฟมพลาสติก หรือ เซลลูลาร์พลาสติก (cellular plastics) หรือ โฟมพอลิเมอร์ (polymeric foam) หรือเอ็กซ์แพนเดดพลาสติก (expanded plastic) หมายถึง พลาสติกที่สามารถถูกทำให้ขยายตัวหรือพลาสติกที่มีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (sponge) โดยทั่วไปวัสดุประเภทนี้ประกอบด้วยเฟส (phase) ตั้งแต่สองเฟสขึ้นไป คือ เฟสที่เป็นพอลิเมอร์ของแข็ง (solid polymer matrix phase) และเฟสที่เป็นแก๊สซึ่งเกิดจากการแตกตัวของสารฟู (blowing agent) [25] และกระจายตัวในเฟสพอลิเมอร์ในรูปของช่องว่าง (void) เรียกว่า เซลล์ (cell) [26] สำหรับเฟสที่เป็นพอลิเมอร์ของแข็งอาจเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียว หรือพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) นอกจากนี้ยังมีเฟสที่เป็นของแข็งชนิดอื่นๆ อยู่ด้วย ได้แก่ สารตัวเติม (filler) ซึ่งอาจเป็นสารประกอบอนินทรีย์ เช่น แก้ว เซรามิก โลหะ หรือสารประกอบอินทรีย์ เช่น พอลิเมอร์ที่เป็นเส้นใยธรรมชาติ

2.6.1 ลักษณะของโฟม

โฟมพลาสติกอาจยืดหยุ่น (flexible) หรือ แข็ง (rigid) ขึ้นกับอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (glass transition temperature) องค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) ปริมาณผลึก (degree of crystallinity) และระดับการเชื่อมขวาง (degree of crosslinking) ของพอลิเมอร์ นอกจากนี้โฟมพลาสติกอาจมีสมบัติกึ่งยืดหยุ่น (semiflexible) หรือกึ่งแข็ง (semirigid) ก็ได้

โฟมพลาสติกมีสัณฐานโครงสร้าง (structure configuration) 2 รูปแบบ [27] คือ

- ก) แบบเซลล์เปิด (open-cell type) เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ ซึ่งแก๊สสามารถไหลผ่านจากเซลล์หนึ่งไปยังเซลล์อื่นๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ก) โดยทั่วไปโฟมที่มีสัณฐานโครงสร้างแบบนี้จะยืดหยุ่นเหมาะในการนำไปใช้ทำเบาะนั่งในรถยนต์ เพอร์ริเจอร์ ที่นอน และฉนวนกันเสียง
- ข) แบบเซลล์ปิด (closed-cell type) สัณฐานโครงสร้างแบบนี้เซลล์จะประกอบด้วยเยื่อบางๆ เรียกว่า หน้าต่างเซลล์ ทำให้แก๊สไม่สามารถไหลผ่านไปมาระหว่างเซลล์ได้แต่สามารถแพร่ผ่านหน้าต่างเซลล์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ข) โฟมแบบนี้จะแข็งเหมาะในการนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อน



ก) โครงสร้างเซลล์แบบเปิด



ข) โครงสร้างเซลล์แบบปิด

รูปที่ 2.6 สัณฐานโครงสร้างของเซลล์ [25]

การทำให้พลาสติกเกิดโครงสร้างโฟมมีหลายวิธีด้วยกัน ได้แก่

- 1) การสลายตัวของสารฟูจากการให้ความร้อนหรือผลจากปฏิกิริยาคายความร้อนระหว่างปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ผลิตผลที่ได้ เช่น แก๊สไนโตรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น
- 2) การทำให้เกิดฟองแก๊สโดยการกวนเชิงกลในระบบพอลิเมอร์เหลว หรือ สารละลายพอลิเมอร์ หรือ สารแขวนลอยพอลิเมอร์ แล้วทำให้แข็งตัวโดยตัวเร่ง และ/หรือ การลดความร้อนทำให้เกิดการกักฟองแก๊สไว้ในเนื้อพลาสติก
- 3) การกลายเป็นไอของของเหลวที่มีจุดเดือดในเนื้อพอลิเมอร์ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาคายความร้อนหรือการให้ความร้อน ตัวอย่างของเหลวจุดเดือดต่ำ ได้แก่ ฟลูออโรคาร์บอน (fluorocarbon) เมทิลีนคลอไรด์ (methylene chloride) เป็นต้น
- 4) การกลายเป็นไอของแก๊สซึ่งเป็นผลจากกระบวนการคายความร้อนระหว่างปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน เช่น ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยาเนต (isocyanate) กับน้ำได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลผลิต
- 5) การขยายตัวของแก๊ส (gas expansion) ในเนื้อพอลิเมอร์โดยลดความดันในระบบพอลิเมอร์
- 6) การเติมฮอลโลว์ไมโครสเฟียร์ (hollow microsphere) ในเนื้อพอลิเมอร์ซึ่งไมโครสเฟียร์ อาจจะมีองค์ประกอบเป็นเม็ดแก้วหรือเม็ดพลาสติก

2.6.2 กระบวนการเกิดโฟม (Foam Formation)

โฟมพลาสติกสามารถเตรียมได้หลายวิธี โดยวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ กระบวนการเอ็กซ์แพนชัน (expansion process) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การเกิดฟอง (bubble formation or initiation) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการเกิดโฟม โดยทำให้เกิดฟองแก๊สและขยายตัวต่อไปในสารละลายหรือพอลิเมอร์เหลว

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟอง ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น ความเรียบของผิวหน้าวัสดุ ลักษณะผิวของอนุภาคเติม ผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวหรือขนาดของ

nucleator ขนาดและปริมาณของฟองที่เกิดขึ้น อัตราการเกิดแก๊ส และแรงตึงผิว (surface tension)

ในขั้นตอนการเกิดฟองสารละลายพอลิเมอร์ต้องการพลังงานอิสระ (F) ของระบบที่เพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 2.1

$$F = \gamma A \quad (2.1)$$

เมื่อ γ คือ แรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ (surface tension of polymer solution) และ A คือ พื้นที่สัมผัสรวมทั้งหมด (total interfacial area) โดยที่ค่าแรงตึงผิวต่ำจะทำให้เกิดฟองได้ง่าย

ขั้นตอนที่ 2 การเพิ่มขนาดของฟอง (bubble growth) การเพิ่มขนาดของฟองเกิดจากการแพร่ของแก๊สจากเฟสของเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์เข้าไปสู่ฟองแก๊ส ฟองที่เกิดขึ้นในขั้นแรกจะมีลักษณะเป็นทรงกลม (sphere) ซึ่งจะขยายตัวต่อไปภายใต้ภาวะที่กำหนด และสามารถควบคุมได้โดยอาศัยความแตกต่างของค่าความดันระหว่างภายในและภายนอกฟองแก๊สหรือเซลล์ (ΔP) แรงตึงผิวที่ผิวสัมผัส (γ) และรัศมีของฟอง (r) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 2.2

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad (2.2)$$

ค่าความแตกต่างของความดันจะมีค่ามากในฟองขนาดเล็ก (ที่ค่าแรงตึงผิวหนึ่ง) ฟองที่เล็กกว่ามีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าความแตกต่างของความดันเท่ากันได้โดยการขยายตัวหรือเพิ่มขนาดขึ้น จากฟองที่มีขนาดเล็กไปยังขนาดใหญ่ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 2.3

$$\Delta P_1^2 = 2\gamma \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad (2.3)$$

เมื่อ ΔP_1^2 คือ ค่าความแตกต่างของความดันระหว่างฟอง 2 ฟอง ซึ่งมีขนาดรัศมีของฟองเท่ากับ r_1 และ r_2 ตามลำดับ

ในขณะที่เกิดการขยายตัวของฟองในโฟมพลาสติก สมบัติต่างๆ ของวัสดุจะเปลี่ยนไปอย่างมาก โดยอัตราการขยายตัวของฟองจะขึ้นกับสมบัติวิสโคอิลาสติก (viscoelastic) ของพอลิเมอร์เฟส ความดันที่เกิดเนื่องจากสารฟู ความดันภายนอกที่เกิดบนโฟมพลาสติก ขนาดของเซลล์ อัตราการซึมผ่านของสารฟูในเฟสพอลิเมอร์ และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของของไหลซึ่งมีอิทธิพลต่ออัตราการขยายตัวของเซลล์และการไหลของพอลิเมอร์จากผนังเซลล์สู่บริเวณเชื่อมต่อกันของเซลล์ ซึ่งนำไปสู่การยุบตัว (collapse) ของโฟมพลาสติก

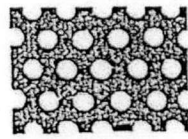
ขั้นตอนที่ 3 ความเสถียรของฟอง (bubble stability) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายและสำคัญที่สุดในกระบวนการเกิดโฟม ซึ่งฟองที่เกิดขึ้นในเฟสพอลิเมอร์เหลวอาจจะไม่เสถียรและยุบตัวภายใต้แรงโน้มถ่วง ความเสถียรของโครงสร้างโฟมขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ อุณหภูมิ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ความหนืดและแรงตึงผิวจะลดลง ส่วนอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผนังเซลล์บางลง และเกิดการยุบตัวเมื่อรับแรง นอกจากนี้ความเสถียรของโครงสร้างโฟมยังขึ้นกับการเชื่อมขวางอีกด้วย

การป้องกันการเกิดรอยแตกของผนังเซลล์ ทำได้โดยทำให้ระบบโฟมเกิดการเสถียรก่อนที่จะเกิดรอยแตกขึ้นที่ผนังเซลล์ สำหรับในระบบโฟมพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนืดของเฟสพอลิเมอร์ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดต่อความเสถียรของโฟม [25] การเพิ่มความหนืดจะเป็นการลดผลของการถ่ายเทของของเหลว (drainage effect) ไปรอยต่อระหว่างเซลล์ ซึ่งการทำให้ความหนืดของเฟสพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มน้ำหนักระหว่างโมเลกุลระหว่างการพอลิเมอไรเซชัน หรือการเชื่อมขวาง (crosslinking) หรือการลดอุณหภูมิ

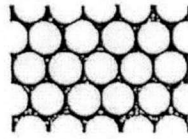
วิธีทำให้ภาวะโฟมเสถียรมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีทางเคมี เช่น กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของเทอร์โมเซตพอลิเมอร์ หรือ วิธีทางกายภาพ เช่น การทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ที่ขยายตัวเย็นตัวลงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพื่อป้องกันการไหลของพอลิเมอร์ [28]

จากขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการเกิดโฟม ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดการเติบโตและการขยายตัวของแก๊สในระบบพอลิเมอร์เหลว สามารถแสดงขั้นตอนต่างๆ ได้ดังภาพที่ 2.7 โดยรูปที่ 1) แสดงการเกิดฟองในระบบพอลิเมอร์เหลว โดยฟองจะมีรูปร่างทรงกลมในขั้นนี้ 2) แสดงการเติบโตของฟองแก๊ส 3) ฟองแก๊สขยายตัวและสัมผัสกันระหว่างฟองทำให้รูปร่างของเปลี่ยนเป็นทรง pentagonal dodecahedron 4) ขั้นตอนนี้โฟมพลาสติกจะมีลักษณะเป็น

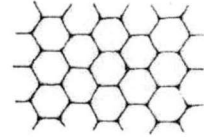
เซลล์เปิดซึ่งอาจจะเกิดการแตก (rupture) ของผนังเซลล์ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ เช่น ความหนืด พลังงานอิสระ เป็นต้น 5) ผลจากการขาดของผนังเซลล์ของฟองทำให้สัณฐานโครงสร้างโฟมเป็นแบบเซลล์เปิด



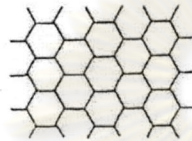
(1)



(2)



(3)



(4)



(5)

รูปที่ 2.7 แผนภาพขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการเกิดโฟม [29]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย