

บทที่ 14

พอลิเมอร์

สาระสำคัญ

บทนำเคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน ความหมายต่างๆที่เกี่ยวข้อง การจำแนกพอลิเมอร์ หลักพื้นฐานของเคมีพอลิเมอร์ การเกิดพอลิเมอร์ ปฏิกิริยาอินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดพอลิเมอร์ ลักษณะทางกายภาพและสมบัติของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ธรรมชาติและพอลิเมอร์สังเคราะห์ ชนิดต่างๆ

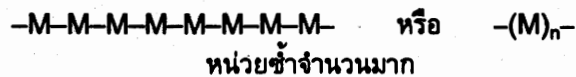
จุดประสงค์การเรียนรู้

เมื่อได้ศึกษาบทเรียนบทนี้แล้วนักศึกษาควรจะสามารถ

1. ให้คำจำกัดความ หรือความหมายพร้อมยกตัวอย่างคำศัพท์ที่เกี่ยวข้องได้
2. จำแนกประเภทพอลิเมอร์โดยอิงตามเกณฑ์ต่างๆ และยกตัวอย่างได้
3. เรียกชื่อพอลิเมอร์ในระบบสามัญและระบบ IUPAC เขียนชื่อเต็มจากชื่ออักษรย่อของพอลิเมอร์บางชนิดได้
4. อธิบายปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์และยกตัวอย่างได้
5. บอกความแตกต่างของการเกิดพอลิเมอร์แบบไซและการเกิดพอลิเมอร์แบบขั้นได้
6. อธิบายสมบัติของพอลิเมอร์ด้านต่างๆได้

บทนำ

พอลิเมอร์ (Polymers) เป็นกลุ่มสารที่ประกอบด้วยโมเลกุลขนาดเล็กจำนวนมาก เรียกมอนอเมอร์ (monomers) มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์กลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่มาก หรือแมโครโมเลกุล (macromolecule) การเชื่อมมอนอเมอร์อาจเป็นแบบโซ่ตรง โซ่กิ่ง หรือร่างแห



แมโครโมเลกุลอาจเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีหน่วยซ้ำ (repeating unit) เช่น พอลิเอทิลีน หรือโมเลกุลขนาดใหญ่แบบอื่นที่ไม่มีหน่วยซ้ำ เช่น โปรตีน และกรดนิวคลีอิก โครงสร้างหน่วยซ้ำของพอลิเมอร์พื้นฐานส่วนใหญ่ ไม่เพียงแต่สะท้อนโครงสร้างของมอนอเมอร์เท่านั้น แต่ยังคงแสดงถึงสูตรโครงสร้างของแมโครโมเลกุลเหล่านี้ด้วย

ขนาดของพอลิเมอร์ดูจากมวล หรือจำนวนหน่วยซ้ำในโมเลกุล ซึ่งเรียก *degree of polymerization* (DP) มวลโมเลกุลสัมพัทธ์ของพอลิเมอร์จึงได้จากผลคูณของมวลโมเลกุลหน่วยซ้ำกับ DP สารที่มีมวลโมเลกุลสัมพัทธ์อย่างน้อย 1000 หรือมีค่า DP อย่างน้อย 100 จัดอยู่ในกลุ่มพอลิเมอร์ได้

14.1 การจำแนกประเภทพอลิเมอร์ (Classification of Polymers)

การจัดกลุ่มพอลิเมอร์ทำได้หลายแบบ ดังนี้

14.1.1 จำแนกโดยแหล่งกำเนิด

14.1.1.1 พอลิเมอร์ธรรมชาติ เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติซึ่งรวมทั้งแมโครโมเลกุลอื่นในธรรมชาติ เช่น พอลิเมอร์ชีวภาพที่เซลล์สิ่งมีชีวิตสังเคราะห์ขึ้น

ตารางที่ 14.1 พอลิเมอร์ธรรมชาติที่สำคัญๆ

ชนิด	ตัวอย่าง
พอลิแซ็กคาไรด์	เซลลูโลส แป้ง ไกลโคเจน ไคทิน ไคโทแซน
พอลิไอโซพรีน	ยางพารา, ยาง gutta-percha
พอลิเอสเทอร์	คอร์ก
โปรตีน	ไข่ขาว คอลลาเจน เจลาติน ไหม ขนสัตว์
พอลินิวคลีโอไทด์	DNA, RNA

14.1.1.2 พอลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นพอลิเมอร์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยปฏิกิริยาเคมีหรือกระบวนการเคมีซึ่งเป็นที่รู้จัก สารเริ่มต้นโดยมากเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากปิโตรเลียม และถ่านหินเมื่อจำแนกตามการใช้งานอาจแบ่งได้ตามตารางที่ 14.2

ตารางที่ 14.2 พอลิเมอร์สังเคราะห์บางชนิด

ชนิด	ตัวอย่าง	ประโยชน์
พลาสติก	พอลิสไตรีน (polystyrene) PVC	ขวด ของเล่น
เส้นใย	ไนลอน พอลิเอสเทอร์ พอลิแอรามิด (polyaramids)	เสื้อผ้า พรม สายเบ็ด
ฟิล์ม	พอลิเอสเทอร์ พอลิเอทิลีน	วัสดุห่อของ ถุงขยะ สีฟิล์มถ่ายภาพ
วัสดุยืดหยุ่น (elastomers)	พอลิไอโซพรีน พอลิเอสเทอร์	ยางรถยนต์ ลูกกอล์ฟ ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย
สารยึดติด (adhesives)	อีพอกซี พอลิไวนิลแอลกอฮอล์	กาวอีพอกซี

14.1.1.3 พอลิเมอร์ธรรมชาติดัดแปลง เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ถูกเปลี่ยนโดยวิธีทางเคมีเพื่อเพิ่มคุณภาพ เช่น ยางสุก (vulcanized rubber) เซลลูโลสแอซีเตต เซลลูโลสไนเตรต

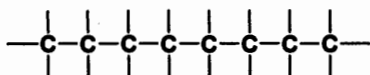
14.1.2 จำแนกโดยปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์

14.1.2.1 พอลิเมอร์แบบเติม (Addition Polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมหน่วยย่อยมอนอเมอร์เข้าด้วยกัน โดยไม่มีการเสียส่วนหนึ่งส่วนใด เกิดจากมอนอเมอร์ที่มีพันธะคู่ในโมเลกุลโดยปฏิกิริยาการเติม เช่น พอลิเอทิลีน พอลิสไตรีน พีวีซี พอลิไวนิลแอซีเตต [poly(vinyl acetate)] จึงเรียกพอลิเมอร์ประเภทนี้ว่า chain-growth polymers ด้วย

14.1.2.2 พอลิเมอร์แบบควบแน่น (Condensation Polymer) เกิดจากปฏิกิริยาควบนั่นระหว่างมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันอย่างน้อย 2 หมู่ โดยมีการกำจัดโมเลกุลขนาดเล็กออกมา เช่น พอลิอะไมด์ (polyamides) พอลิยูรีเทน (polyurethane) พอลิคาร์บอเนต (polycarbonate)

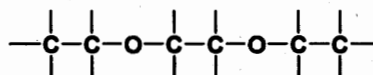
14.1.3 จำแนกตามชนิดอะตอมในแกนหลักพอลิเมอร์

ได้แก่ homochain polymers ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่โซ่แกนหลัก (backbone) ประกอบด้วยอะตอมชนิดเดียวกัน และ heterochain polymers ซึ่งมีอะตอมในแกนหลักมากกว่า 1 ชนิด



homochain polymers

เช่น polyacetylene, polysulfur



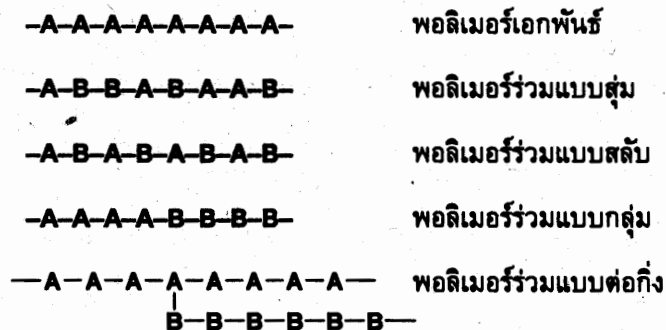
heterochain polymers

เช่น polyester, polyethers และ polyamides

14.1.4 จำแนกตามจำนวนชนิดมอนอเมอร์

14.1.4.1 พอลิเมอร์เอกพันธ์ (Homopolymers) เป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ชนิดเดียว ให้โครงสร้างพื้นฐานเป็น $-(A)_n-$ เช่น พอลิโพรพิลีน พอลิเมอร์จากกลุ่มไวนิล

14.1.4.2 พอลิเมอร์ร่วม (Copolymers) เกิดจากมอนอเมอร์มากกว่า 1 ชนิด ทำปฏิกิริยากัน โดยอาจมีการจัดเรียงหน่วยซ้ำหลายแบบ คือ พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (random copolymer) แบบกลุ่ม (block copolymer) แบบตอกกิ่ง (graft copolymer) และแบบสลับ (alternating copolymer) เช่น styrene-butadiene-styrene block copolymer และ ไนลอน 6,6 ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบสลับ



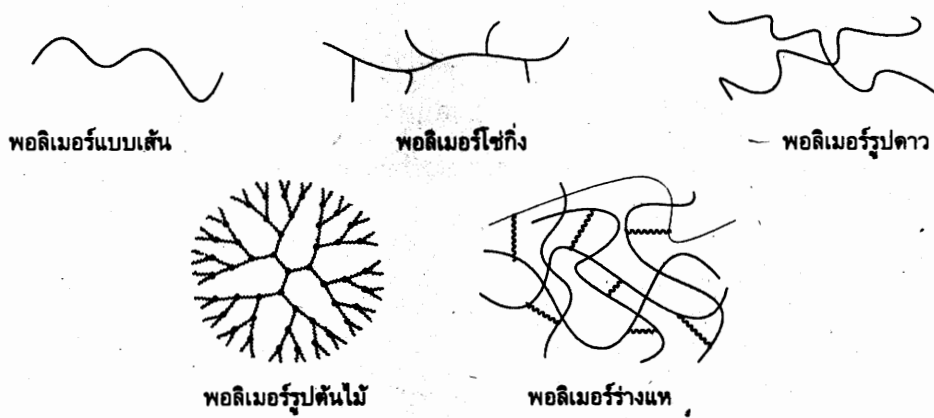
รูปที่ 14.1 แสดงพอลิเมอร์เอกพันธ์และพอลิเมอร์ร่วมชนิดต่างๆ

14.1.5 จำแนกตามโครงสร้างโมเลกุล (Molecular Structure)

14.1.5.1 พอลิเมอร์แบบเส้น (Linear Polymers) เป็นโซ่ยาวมีปลายสองด้าน ไม่มีโซ่กิ่ง ยกเว้นหมู่ที่มีอยู่เดิมในมอนอเมอร์

14.1.5.2 พอลิเมอร์โซ่กิ่ง (Branched Polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่มีโซ่หลักเป็นเส้นตรง และมีกิ่งที่มีหน่วยซ้ำเหมือนโซ่หลักมาเกาะ โซ่กิ่งอาจสั้นหรือยาว และมีความหนาแน่นกิ่งมากหรือน้อยก็ได้ อาจมีรูปร่างหลายแบบ เช่น พอลิเมอร์รูปดาว พอลิเมอร์รูปหวี พอลิเมอร์ชั้นบันได พอลิเมอร์รูปต้นไม้ (dendrimer)

14.1.5.3 พอลิเมอร์ร่างแห (Network Polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการสร้างพันธะจำนวนมาก เพื่อเชื่อมข้ามระหว่างสายพอลิเมอร์หรือส่วนโมเลกุลพอลิเมอร์ ทำให้เกิดโครงสร้างแบบร่างแห



รูปที่ 14.2 พอลิเมอร์โครงแบบต่างๆ พอลิเมอร์แบบเส้น แบบโซ่กิ่ง และแบบร่างแห

14.1.6 จำแนกตามสมบัติทางความร้อน (Thermal Behavior)

14.1.6.1 พอลิเมอร์ประเภทเทอร์มอพลาสติก (Thermoplastic Polymers) เป็นพอลิเมอร์โซ่ตรงหรือโซ่กิ่งที่เมื่อได้รับความร้อนจะหลอมและไหลได้ เมื่อเย็นลงจะเปลี่ยนสถานะและแข็งตัว สามารถใช้ใหม่และขึ้นรูปใหม่ได้หลายครั้ง

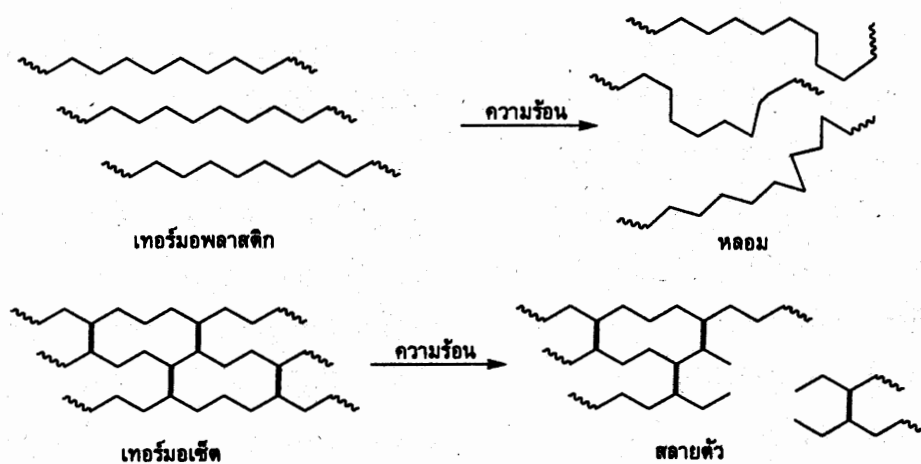
พลาสติกเหล่านี้มีระบบรหัสสากลแสดงชนิดที่นำมารีไซเคิลและขึ้นรูปใหม่ (plastic identification code) กำหนดโดยสมาคมอุตสาหกรรมพลาสติก (Society of the Plastics Industry; SPI) ในปี ค.ศ. 1988 แบ่งเป็น 7 กลุ่ม ตามตัวเลขซึ่งอยู่ภายในสัญลักษณ์โลกศรเวียน และมีอักษรย่อระบุชนิดไว้ด้านล่าง พบได้ทั่วไปที่ภาชนะบรรจุหรือวัสดุห่อหุ้มสินค้าที่ทำจากพลาสติกเหล่านี้

ตารางที่ 14.3 รหัสสัญลักษณ์ (recycling codes) ของพลาสติกที่นำกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้

รหัสสัญลักษณ์	ชนิดพลาสติก	ตัวอย่าง
	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate) PETE	เส้นใย dacron ขวดน้ำ ภาชนะบรรจุเครื่องดื่ม อาหารและอื่นๆ แผ่นฟิล์ม
	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene) HDPE	ขวดบรรจุ ท่อ วัสดุเชิงประกอบผสมไม้ (wood-plastic composite)
	พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride) PVC	ขวดบรรจุน้ำมัน ไซมัน กระเบื้องปูพื้น ฉนวนหุ้มสายไฟ
	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene) LDPE	ถุงซ้อปบั้ง ถุงขยะ พินรองเท้า ขวดน้ำ ฟิล์มบรรจุภัณฑ์
	พอลิโพรพิลีน (Polypropylene) PP	ถุงร้อน โตะ แก้วอ้อ เชือก พรหม สิ่งทอ ภาชนะไมโครเวฟ
	พอลิสไตรีน (Polystyrene) PS	โฟม อุปกรณ์ไฟฟ้า ของเล่น
	อื่นๆ (อาจเป็นพอลิคาร์บอเนต หรือพลาสติกกร่วม)	

14.1.6.2 พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต (Thermoset Polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่เชื่อมข้ามโซ่อย่างถาวร แปรสภาพถาวรระหว่างการแปรรูป ทนความร้อนดีกว่าเทอร์โมพลาสติก เมื่อได้รับความร้อนอ่อนตัวได้แต่ไม่ไหล ความร้อนสูงทำให้เสียสภาพ ไม่สามารถขึ้นรูปใหม่ได้ เช่น เรซินฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ (phenol-formaldehyde resin), เรซินเมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์ (melamine-formaldehyde resin), เรซินอีพอกซี

พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความต่างกันทางโครงสร้าง ประเภทเทอร์โมเซตมีการเชื่อมขวาง (crosslink) ระหว่างโซ่ ขณะที่อีกชนิดหนึ่งไม่มีการเชื่อมขวาง เมื่อได้รับความร้อนโซ่พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกจะมีอิสระในการเคลื่อนที่ระหว่างกันทำให้ยืดหยุ่นมากกว่า ซึ่งไม่เกิดกับพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต เพราะโซ่พอลิเมอร์ถูกตรึงด้วยการเชื่อมข้ามสาย พลังงานความร้อนจึงทำให้พันธะแตกหักและเสียสภาพในที่สุด



14.1.7 จำแนกตามลักษณะและการใช้งาน

อุตสาหกรรมพอลิเมอร์แบ่งเป็นประเภทต่างๆ ได้แก่ พลาสติก เส้นใย (fibers) วัสดุยืดหยุ่น (elastomers) สารเคลือบผิว (coatings) และสารยึดติด (adhesives)

14.1.7.1 พลาสติก

(1) พลาสติกโภคภัณฑ์ (Commodity plastics) ได้แก่พลาสติกที่ใช้ทั่วไป มักผลิตในปริมาณมาก มีส่วนแบ่งการตลาดสูงและมีราคาถูก สมบัติวัสดุถูกจำกัดโดยแรงระหว่างโมเลกุลค่อนข้างอ่อน ส่วนใหญ่เป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ แรงระหว่างโคโพล ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูงเพื่อให้ได้ความแข็งแรงตามต้องการ เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน และ PVC

(2) พลาสติกวิศวกรรม (Engineering plastics) มีราคาสูง ปริมาณการผลิตน้อยกว่า มีความแข็งแรง เหนียว ทนความร้อนและสารเคมีดีกว่าพลาสติกโพลีเอทิลีน ส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ที่มีอะตอมในแกนหลักมากกว่า 1 ชนิด โพลิเมอร์ยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ได้แก่ พอลิอะไมด์ (เช่น nylon 6, nylon 66), พอลิเอสเตอร์ (เช่น PETE), พอลิคาร์บอเนต (PC), และพอลิฟอร์มาลดีไฮด์ เป็นต้น

14.1.7.2 เส้นใย

เส้นใยเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวเป็นสายมีความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 100:1 ได้จากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ เส้นใยธรรมชาติได้แก่ เส้นใยพืช เช่น เส้นใยเซลลูโลส (ฝ้าย ลินิน ป่านหรือปอ) เส้นใยจากสัตว์ (ใยไหม ขนสัตว์ ใยแมงมุม เส้นผม) และเส้นใยแร่ เช่น แร่ใยหิน (asbestos)

เส้นใยอาจมาจากการสังเคราะห์ เช่น เส้นใยเทียม ที่ได้จากการปรับปรุงใยธรรมชาติ เซลลูโลส และเส้นใยสังเคราะห์ เช่น พอลิอะไมด์ พอลิเอสเตอร์ และพอลิยูรีเทน

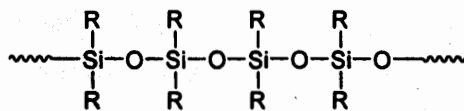
พอลิเมอร์หลายชนิดละลายได้หรือหลอมตัวได้ ทำให้ถูกอัดหรือดึงออกเป็นเส้นใยสิ่งทอได้ พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่เป็นเส้นใยเป็นพอลิเมอร์แบบเส้น มีลักษณะเป็นโซ่ยาวที่จัดตัวได้แน่น ซ้อนตัวเป็นระเบียบสม่ำเสมอ มีแรงระหว่างโมเลกุลแข็งแรง เช่นพันธะไฮโดรเจน เส้นใยมีสภาพยืดหยุ่นสูง แข็งแรง เป็นเส้นยาว ทนความร้อน และปั่นเป็นเส้นได้

14.1.7.3 วัสดุยืดหยุ่น

เป็นกลุ่มพอลิเมอร์ที่สมบัติคล้ายยาง มีสภาพยืดหยุ่นสูงมาก ทนต่อแรงดึงสูง ยืดตัวง่ายให้ขนาดขยายหลายเท่าของขนาดเดิมมาก และกลับคืนสู่ขนาดเดิมเมื่อคลายแรงดึงโดยไม่เสียรูปอย่างถาวร เช่น หนังยาง ยางยืด คุ้งยางอนามัย ยางยืดอื่นๆ และพอลิเมอร์สังเคราะห์

โดยปกติวัสดุยืดหยุ่นเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน โมเลกุลไม่เป็นระเบียบ ขณะที่ถูกดึงออก โมเลกุลถูกบังคับให้จัดตัวเป็นเส้นตามแนวแรงดึง ทำให้เป็นระเบียบมากกว่าเดิม ในโครงสร้างของพอลิเมอร์จะมีการเชื่อมข้ามเล็กน้อยในระดับพอเหมาะ โดยทั่วไปประมาณ 1 ใน 100 โมเลกุล เพื่อยึดโมเลกุลใกล้เคียงไว้ด้วยกันให้การยืดหยุ่นกลับคืนสภาพปกติได้ ถ้าการเชื่อมข้ามเพิ่มเป็น 1 ใน 30 วัสดุนั้นจะแข็งและเปราะ

สำหรับยางซิลิโคน หรือพอลิซิลอกเซน (polysiloxane) เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีคาร์บอนในแกนหลัก มี Si สลับ O ซิลิโคนแต่ละอะตอมจะมีหมู่ไฮโดรคาร์บอนเกาะ 2 หมู่ เช่น หมู่เมทิลและเฟนิล



พอลิไซลอกเซน (R = CH₃ หรือ C₆H₅)

ซิลิโคนมีสมบัติยืดหยุ่นมากเนื่องจากมุมพันธะมีขนาดใหญ่และความยาวพันธะยาวกว่าพอลิเมอร์ทั่วไป เช่น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทีลีน พันธะ C-C ในแกนหลักมีความยาว 1.54 Å และมุมพันธะ 112° ขณะที่แกนหลักไซลอกเซนพันธะ Si-O ยาว 1.63 Å และมุมพันธะ 130° ทำให้แกนโซ่หลักยืดหยุ่นบิดตัวเปลี่ยนโครงรูปง่ายมาก

ตารางที่ 14.4 พอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุยืดหยุ่นบางชนิด

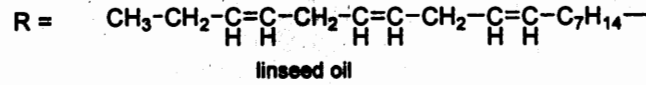
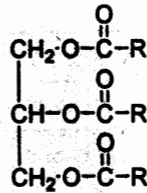
ลักษณะ	
Styrene-butadiene rubber (SBR)	พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม ใช้ทำยางรถยนต์
Butyl rubber	พอลิเมอร์ร่วมระหว่าง 1,3-butadiene กับ isobutylene
Polychloroprene rubber (CR)	ยางนีโอพรีน (<i>trans</i> -1,4-polymer ของ CH ₂ =CH-CCl=CH ₂)
Polyisoprene	ยางธรรมชาติ (<i>cis</i> -1,4-polymer)
Nitrile rubber	พอลิเมอร์ร่วมระหว่าง acrylonitrile กับ butadiene
Silicone rubber	เช่น polydimethylsiloxane
Urethane rubber	พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม (หัวข้อ 14.3.2.4)

14.1.7.4 สารเคลือบผิวและสารยึดติด (Coatings and Adhesives)

(1) สารเคลือบผิว

การเคลือบผิวเป็นการทำให้เกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางหรือเป็นชั้นบางๆเคลือบแผ่ติดกับพื้นผิว โดยอาจมีหรือไม่มีสี ขึ้นเงา แห้ง การเคลือบทำเพื่อป้องกัน ตกแต่ง หรือทำหน้าที่เฉพาะทาง สารเคลือบผิวมีหลายประเภท มีส่วนประกอบค่อนข้างซับซ้อน องค์ประกอบพื้นฐานได้แก่ เม็ดสี สารยึดเกาะ (binder) กิโนเนอร์ และสารเติมแต่ง ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะสารยึดเกาะซึ่งเป็นเรซิน หรือสารที่จะให้เรซิน ได้แก่

น้ำมันธรรมชาติ เช่น น้ำมันชุกแห้ง (linseed oil) เป็นไตรกลีเซอไรด์ ของกรดไขมันลิโนเลนิก (linolenic acid) พันธะคู่ในกรดจะเกิดการเชื่อมข้ามเมื่อถูกออกซิเจนในอากาศ กระบวนการนี้เรียก drying ซึ่งเป็นการเชื่อมข้ามโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดลักษณะคล้ายวุ้น น้ำมันที่มีพันธะคู่มากหรือระดับความไม่อิ่มตัวสูงจะแห้งเร็ว กรณีนี้ผิวเคลือบที่ได้ไม่ทนต่อสารเคมีและการขีดข่วน



ไวนิล ส่วนใหญ่ใช้กับผิวโลหะ เช่น พอลิเมอร์ร่วมไวนิลคลอไรด์-ไวนิลแอซีเตต ผิวเคลือบท่อน้ำและสารเคมีได้ดี

เรซินแอลคิิด (Alkyd resins) เป็นสารเคลือบผิวกลุ่มพอลิเอสเทอร์ที่ได้จากพอลิโออล (polyols) และกรดไดคาร์บอกซิลิก หรือกรดแอนไฮไดรด์ เช่น แอลคิิดจากทาลิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) หรือมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) กับพอลิโออล เช่น กลีเซอรอล หรือ pentaerythritol เมื่อแปรเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งมีพันธะคู่ จะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ทำให้มีการเชื่อมข้ามระหว่างโซ่ได้

เลเทกซ์ (Latex) สืบทายในภายนอก ส่วนใหญ่เป็นสีที่กระจายตัวในน้ำ ซึ่งเป็นที่นิยมมากเพราะทำความสะอาดง่าย ไม่ติดไฟ เป็นมลพิษทางอากาศต่ำ เลเทกซ์เป็นสารยึดเกาะที่เป็นพอลิเมอร์ที่อนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร กระจายตัวอยู่ในน้ำ ได้แก่ พอลิเมอร์ร่วมสไตรีน-บิวทาไดอิน

(2) สารยึดติด

สารยึดติด หรือ adhesives เป็นคำที่หมายรวมถึงคำสามัญอื่น เช่น กาว วัสดุประสาน (cement) แป้งเปียก สารยึดติด หมายถึงสารที่ไม่ใช่โลหะซึ่งสามารถทำให้พื้นผิววัสดุที่คล้ายกันหรือต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปสามารถยึดติดกันได้ โดยมีความแข็งแรง ทนแรงสั่นสะเทือน มีสมบัติกันน้ำ เป็นต้น

ส่วนประกอบสำคัญของสารยึดติดคือ สารยึดเกาะ (binder) เป็นตัวสำคัญที่มีผลต่อการติดแน่น ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น พอลิเมอร์ อาจเป็น มอนอเมอร์ หรือ พรีพอลิเมอร์ (prepolymer) ซึ่งจะให้พอลิเมอร์ขณะมีการเชื่อมที่พื้นผิววัสดุ สมัยโบราณใช้สารธรรมชาติจากพืชและสัตว์ช่วย การยึดติด (adhesion) ได้แก่ ยางธรรมชาติ ชันสน กาวแป้ง กาวโปรตีน เช่น กาวจากโปรตีนคอลลาเจน (collagen) และโปรตีนอื่นๆ ซึ่งต่อมาได้มีพอลิเมอร์สังเคราะห์เป็นสารยึดเกาะเพิ่มขึ้นหลายชนิด

ตารางที่ 14.5 ตัวอย่างสารยึดเกาะบางชนิด

ชนิดสารยึดเกาะ	กลไกการยึดติด
Cyanoacrylates	แข็งตัวเมื่อมีความชื้น
Epoxy resins	เชื่อมข้ามโดยปฏิกิริยาการเติม
Polyurethanes	เชื่อมข้ามโดยปฏิกิริยาความแน่น
Silicones	เชื่อมข้ามโดยปฏิกิริยาความแน่น
Acrylate (มอนอเมอร์และโอลิโกเมอร์)	เกิดพอลิเมอร์แบบอนุมูลอิสระ (โดยใช้แสง)

14.2 การเรียกพอลิเมอร์

การเรียกพอลิเมอร์ทำได้หลายวิธี วิธีที่ใช้เรียกพอลิเมอร์ส่วนใหญ่มี 2 วิธี คือ เรียกโดยอิงตามที่มา (source-based names) และเรียกโดยการอิงโครงสร้าง (structure-based names) นอกจากนี้มีพอลิเมอร์หลายชนิดรู้จักกันมากตามชื่ออักษรย่อ และชื่อทางการค้า

ชื่อสามัญ เป็นการเรียกโดยอิงตามที่มา โดยเรียกตามชื่อมอนอเมอร์
ชื่อตามระบบ เรียกโดยอิงโครงสร้าง เรียกตามหน่วยซ้ำที่เล็กสุดตามระบบ IUPAC

14.2.1 การเรียกพอลิเมอร์เอกพันธ์









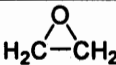



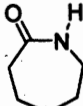
14.2.1.1 เรียกโดยอิงตามที่มา

- เรียกตามชื่อ มอนอเมอร์ ใช้ชื่อสามัญของมอนอเมอร์ได้
- เรียกเป็น *polymonomer*
- ใช้วงเล็บ () เมื่อชื่อมอนอเมอร์เป็นคำ 2 คำ หรือเป็นชื่อที่มีการแทนที่

14.2.1.2 เรียกโดยอิงโครงสร้าง

- เรียกตามหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุด (constitutional repeating unit, CRU)
- ชื่อหน่วยซ้ำ อยู่ในวงเล็บ () เรียกเป็น *poly*(ชื่อหน่วยซ้ำ)
- ชื่อหน่วยซ้ำเรียกตามระบบ (ถ้ามีหมู่แทนที่ จะอยู่ในตำแหน่งที่เป็นตัวเลขน้อยๆ)

ตารางที่ 14.6 ตัวอย่างการเรียกพอลิเมอร์เอกพันธ์บางชนิด

โครงสร้าง	มอนอเมอร์	Source-based Name	Structure-based Name
<u>Vinyl Polymers</u>			
$\text{-(CH}_2\text{CH}_2\text{)}_n$	$\text{H}_2\text{C=CH}_2$	polyethylene	poly(methylene)
$\text{-(CF}_2\text{CF}_2\text{)}_n$	$\text{F}_2\text{C=CF}_2$	polytetrafluoroethylene	poly(difluoromethylene)
$\text{-(CH}_2\text{-CH)}_n$ 	$\text{H}_2\text{C=CH}$ 	polystyrene	poly(1-phenylethylene)
$\text{-(CH}_2\text{-CH)}_n$ 	$\text{H}_2\text{C=CH}$ 	poly(acrylic acid)	poly(1-carboxylatoethylene)
$\text{-(CH}_2\text{-CH)}_n$ 	$\text{H}_2\text{C=CH}$ 	poly(vinyl chloride)	poly(1-chloroethylene)
$\text{-(CH}_2\text{-CH)}_n$ 	$\text{H}_2\text{C=CH}$ 	polyacrylonitrile	poly(1-cyanoethylene)
<u>Polyethers</u>			
$\text{-(CH}_2\text{CH}_2\text{-O)}_n$		poly(ethylene oxide)	poly(oxyethylene)
$\text{-(CH}_2\text{-O)}_n$	$\text{H}_2\text{C=O}$	polyformaldehyde	poly(oxymethylene)
-(CH-O)_n 	H-C=O 	polyacetaldehyde	poly(oxyethylidene)
<u>Polyesters</u>			
$\text{[OCH}_2\text{CH}_2\text{C(=O)]}_n$		poly(beta-propiolactone)	poly[oxy(1-oxopropane-1,3-diyl)]
$\text{[O(CH}_2\text{)}_9\text{C(=O)]}_n$	$\text{HO(CH}_2\text{)}_9\text{C(=O)-OH}$	poly(10-decanoate)	poly[oxy(1-oxodecane-1,10-diyl)]
<u>Polyamide</u>			
$\text{-(C(=O)-NH(CH}_2\text{)}_5\text{)}_n$		polycaprolactam	Poly[imino(1-oxohexane-1,6-diyl)]

14.2.2 การเรียกพอลิเมอร์ร่วม

เรียกโดยอิงตามที่มา โดยแสดงค่าเฉพาะภายในชื่อเพื่อระบุลักษณะการต่อเชื่อมของพอลิเมอร์ร่วมว่าเป็นแบบใด เช่น

ตารางที่ 14.7 ตัวอย่างการเรียกพอลิเมอร์ร่วมบางแบบ

ชนิดพอลิเมอร์ร่วม		เรียกตามระบบ	เรียกแบบย่อ
ไม่ระบุ	-co-	poly(A-co-B)	copoly(A/B)
แบบสลับ	-ran-	poly(A-ran-B)	ran-copoly(A/B)
แบบสลับ	-alt-	poly(A-alt-B)	alt-copoly(A/B)
แบบกลุ่ม	-block-	polyA-block-polyB	block-copoly(A/B)
แบบตอก	-graft-	polyA-graft-polyB	graft-copoly(A/B)
แบบเชื่อมข้าม	-net-	polyA-net-polyB	net-copoly(A/B)

ตัวอย่าง เช่น

poly[styrene-co-(methyl methacrylate)] หรือ copoly(styrene/methyl methacrylate)

poly(styrene-co-ethylene-co-propylene) หรือ copoly(styrene/ethylene/propylene)

poly[styrene-alt-(methyl methacrylate)] หรือ alt-copoly(styrene/methyl methacrylate)

polystyrene-block-poly(methyl methacrylate) หรือ block-copoly(styrene/methyl methacrylate)

polystyrene-graft-poly(methyl methacrylate) หรือ graft-copoly(styrene/methyl methacrylate)

สำหรับชื่ออักษรย่อ และชื่อทางการค้ามีตัวอย่างในตาราง 14.8 และ 14.9

ตารางที่ 14.8 ตัวอย่างชื่ออักษรย่อของพอลิเมอร์บางชนิด

อักษรย่อ	คำเต็ม
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene
LLDPE	Linear low density polyethylene
PA11	Polyamide (Nylon) 11
PC	Polycarbonate
PMMA	Poly(methyl methacrylate)
PEEK	Polyetheretherketone
PTFE	Polytetrafluoroethylene
TPU	Thermoplastic polyurethane
UHMWPE	Ultra high molecular weight polyethylene

ตารางที่ 14.9 ตัวอย่างชื่อทางการค้าของพอลิเมอร์บางชนิด

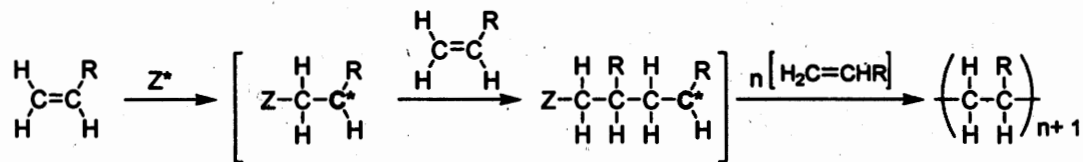
ชื่อทางการค้า	ชนิดพอลิเมอร์/บริษัทผู้ผลิต
Barex	acrylonitrile copolymer (BP Chemical)
Crystallor	polymethylpentene (Phillips)
Denka	ABS (Showa, Japan)
Dowlex	LDPE/LLDPE (Dow)
Kevlar	aramid fiber (DuPont)
Lexan	polycarbonate (G.E.)
Lucite	acrylic (DuPont)
Mylar	poly(ethylene terephthalate) (DuPont)
Teflon	tetrafluoroethylene (DuPont)

14.3 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์

พอลิเมอร์เกิดจากปฏิกิริยาพื้นฐาน 2 ชนิดคือ ปฏิกิริยาการเติม และปฏิกิริยาควบนั่น (condensation reaction)

14.3.1 การเกิดพอลิเมอร์แบบเติม (Addition Polymerization)

เป็นปฏิกิริยาที่มอนอเมอร์รวมกันโดยไม่มีการจัดโมเลกุลขนาดเล็ก มักเกิดกับมอนอเมอร์ที่มีพันธะคู่ โดยเฉพาะแอลคีนและแอลคีนที่มีการแทนที่ที่พันธะคู่ ซึ่งมีการแตกหักพันธะไพ และเกิดจุดไวปฏิกิริยาเป็นอินเตอร์มีเดียตที่ว่องไวที่ปลายโซ่ เป็นการเติมที่พันธะไพของมอนอเมอร์ด้วยอินเตอร์มีเดียตที่ไวปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ทำให้โซ่พอลิเมอร์ยาวขึ้น บางครั้งจึงเรียกรวมการเกิดพอลิเมอร์แบบโซ่ (chain-growth polymerization) ด้วย ลักษณะทั่วไปเป็นดังนี้



Z* = ตัวเริ่มปฏิกิริยา (* อาจเป็นอนุมูลอิสระ แคตไอออน หรือแอนไอออน)

ตารางที่ 14.10 ตัวอย่างพอลิเมอร์แบบเติมบางชนิด

สูตรโครงสร้างมอนอเมอร์	ชื่อสามัญ	พอลิเมอร์
$H_2C=CH_2$	ethylene	polyethylene, polythene
$H_2C=CHCH_3$	propylene	polypropylene
$H_2C=CH-Cl$	vinyl chloride	poly(vinyl chloride), PVC
$H_2C=CH-CN$	acrylonitrile	polyacrylonitrile, orlon
$F_2C=CF_2$	tetrafluoroethylene	polytetrafluoroethylene,
$H_2C=CH-C_6H_5$	styrene	polystyrene, styrofoam
$H_2C=CH-\overset{O}{\parallel}C-OCH_2CH_3$	ethyl acrylate	poly(ethyl acrylate)
$H_2C=C(\overset{O}{\parallel}C-OCH_3)-CH_3$	methyl methacrylate	poly(methyl methacrylate), plexiglas

พอลิเมอร์แบบเติมเกิดได้ 4 ลักษณะ คือ

1. การเกิดพอลิเมอร์แบบอนุมูลอิสระ (Radical polymerization) ตัวเริ่มปฏิกิริยาเป็นอนุมูลอิสระ บริเวณไวปฏิกิริยาที่เกิดการแผ่โซ่ (*) เป็นอนุมูลอิสระของคาร์บอน
2. การเกิดพอลิเมอร์แบบแคตไอออน (Cation polymerization) ตัวเริ่มปฏิกิริยาเป็นกรดบริเวณไวปฏิกิริยาที่เกิดการแผ่โซ่ (*) เป็นคาร์โบแคตไอออน
3. การเกิดพอลิเมอร์แบบแอนไอออน (Anion polymerization) ตัวเริ่มปฏิกิริยาเป็นนิวคลีโอไฟล์ บริเวณไวปฏิกิริยาที่เกิดการแผ่โซ่ (*) เป็นคาร์แบนไอออน
4. การเกิดพอลิเมอร์แบบโคออร์ดิเนต (Coordination polymerization) ตัวเริ่มปฏิกิริยาเป็นสารเชิงซ้อนของโลหะแทรนซิชัน บริเวณไวปฏิกิริยาที่เกิดการแผ่โซ่ (*) เป็นอะตอมหรือไอออนของโลหะที่เกิดพันธะโคออร์ดิเนตกับหมู่ฟังก์ชันในพอลิเมอร์

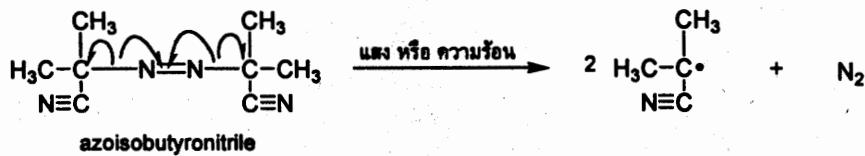
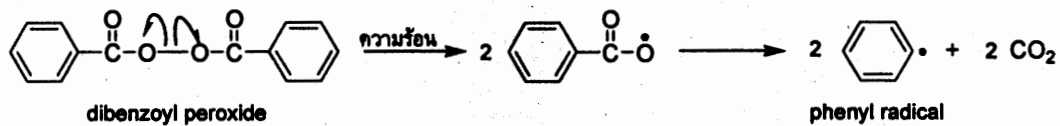
ขั้นตอนทั่วไปของปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบโซ่ มีดังนี้

1. **ขั้นการเริ่มโซ่ (chain initiation)** ทำให้เกิดโครงสร้างที่ไวปฏิกิริยา เช่น อนุมูลอิสระ แคตไอออน หรือแอนไอออน
2. **ขั้นการแผ่โซ่ (chain propagation)** เป็นการเพิ่มขนาด/น้ำหนักโมเลกุลโดยเพิ่มมอนอเมอร์เข้าที่ปลายโซ่ซึ่งกำลังเพิ่มขนาด ทำให้ความยาวเพิ่มขึ้น

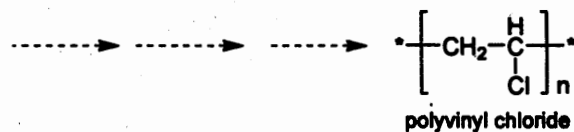
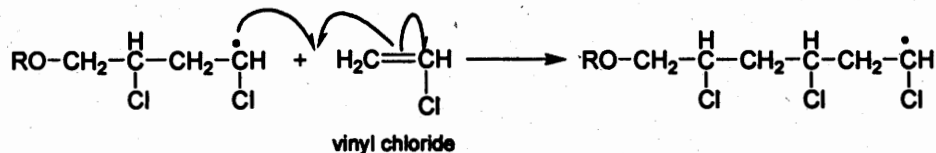
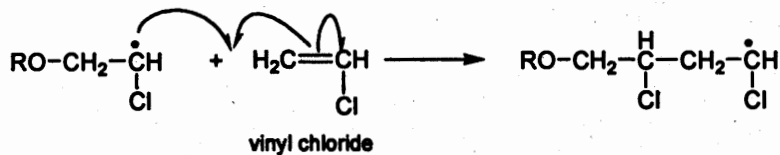
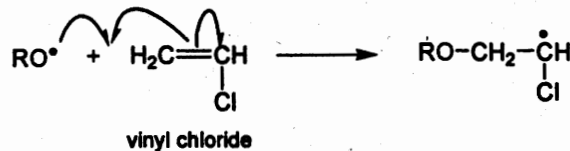
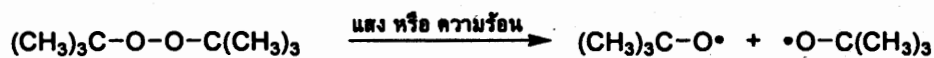
3. **ขั้นสิ้นสุดโซ่ (chain termination)** เป็นการทำให้การเติบโตของโซ่พอลิเมอร์สิ้นสุดลง และได้ผลิตภัณฑ์ที่เสถียร

14.3.1.1 ปฏิกิริยาที่เกิดผ่านอนุมูลอิสระ

สารเริ่มอนุมูลอิสระ (Free radical initiator) ได้แก่ สารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ (organic peroxides) เช่น *t*-butyl peroxide และ benzoyl peroxide และสารประกอบเอโซ (azo compounds) ซึ่งสลายตัวให้อนุมูลอิสระ เมื่อมีความร้อนหรือแสงเป็นตัวเร่ง เช่น

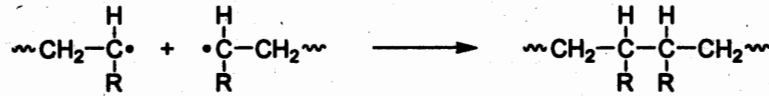


ปฏิกิริยาที่เกิดผ่านอนุมูลอิสระเกิดขึ้นได้ดีกับแอลคีนทั่วไป เช่น ไวนิลคลอไรด์ (vinyl chloride)

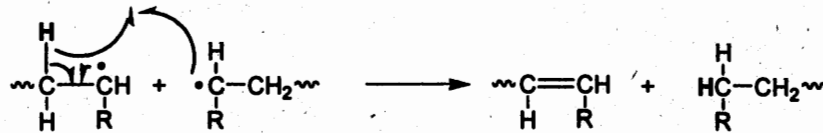


ขั้นสิ้นสุดโซ่ในปฏิกิริยาที่เกิดผ่านอนุมูลอิสระ อาจเกิดโดยการรวมอนุมูลอิสระสองสาย เป็นสายเดี่ยว (combination) หรือถ่ายโอนอะตอมไฮโดรเจนซึ่งเกาะที่คาร์บอนซึ่งติดอนุมูลอิสระ ของสายหนึ่งไปยังจุดวาบปฏิกิริยาของอีกสายหนึ่ง (disproportionation) ให้พอลิเมอร์ 2 โมเลกุล หรือถ่ายโอนอนุมูลอิสระจากปลายสายไปยังบริเวณอื่นในโซ่ ซึ่งเรียกปฏิกิริยาตกลงหลัง (back biting¹) หรือถ่ายโอนอนุมูลอิสระให้โซ่พอลิเมอร์โมเลกุลอื่น หรือโมเลกุลอื่นๆ (chain transfer) เช่น มอนอเมอร์ ตัวทำละลาย สารถ่ายโอนโซ่ (chain transfer agents, CTA) หรือตัวยับยั้ง ทำให้เกิดการเริ่มโซ่ใหม่ หรือเกิดโซ่กิ่งได้

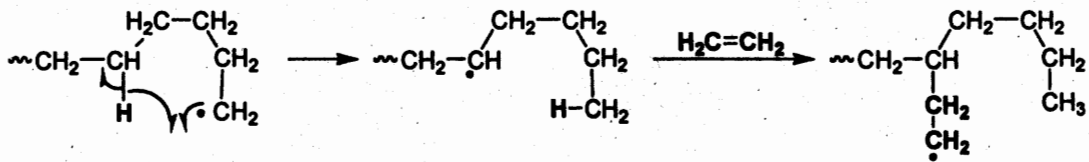
การรวมตัวของอนุมูลอิสระ



การถ่ายโอนอะตอมไฮโดรเจน



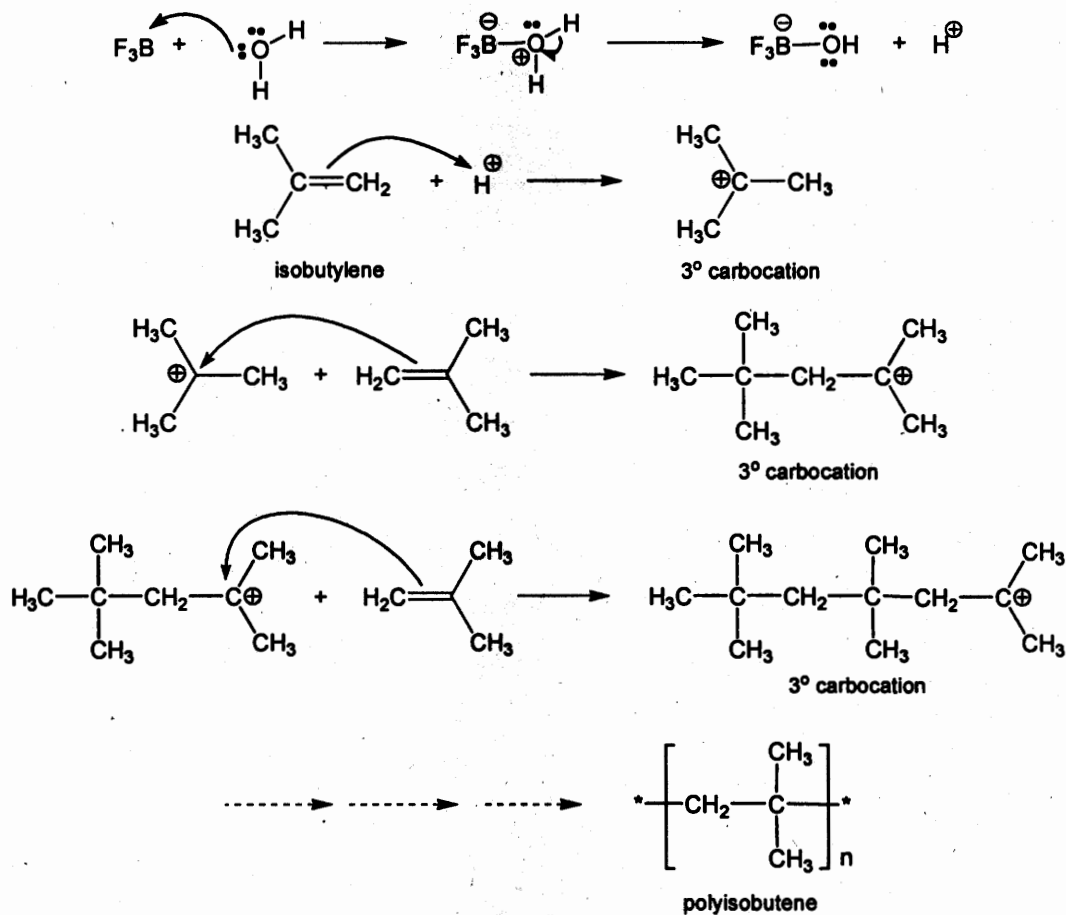
การถ่ายโอนอนุมูลอิสระ (ปฏิกิริยาตกลงหลัง)



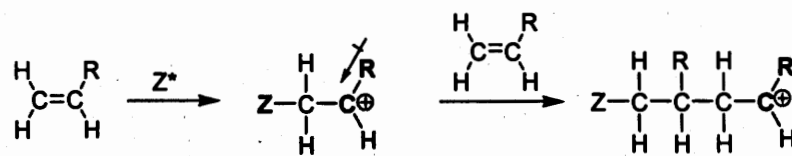
14.3.1.2 ปฏิกิริยาที่เกิดผ่านแคตไอออน

เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ที่ขึ้นการแผ่โซ่เกิดผ่านคาร์โบแคตไอออน สารเริ่มปฏิกิริยามีสมบัติเป็นอิเล็กโตรไฟล์ เช่น กรดที่ให้โปรตอนหรือกรดลิวอิส เป็นตัวเร่ง ได้แก่ $\text{H}_2\text{O}/\text{BF}_3$, HF/AsF_5 หรือ HF/BF_3 เกิดได้ดีกับแอลคีนที่ให้คาร์โบแคตไอออนที่เสถียรและมีพันธะคู่อยู่ปลายโซ่เพื่อให้เกิดพันธะขณะทำปฏิกิริยามีน้อยที่สุด เช่น พอลิเมอร์ของ Isobutylene

¹ เป็นการย้ายอนุมูลอิสระไปอยู่ภายในโซ่พอลิเมอร์ เกิดการจัดโครงสร้างผ่านสภาวะแทรนซิชันเป็นวงขนาด 6 อะตอม มีการดึงอะตอมไฮโดรเจนตำแหน่งที่ 5 เกิดเป็นอนุมูลอิสระใหม่ ซึ่งสามารถจะเกิดปฏิกิริยาเป็นโซ่กิ่งต่อไปได้

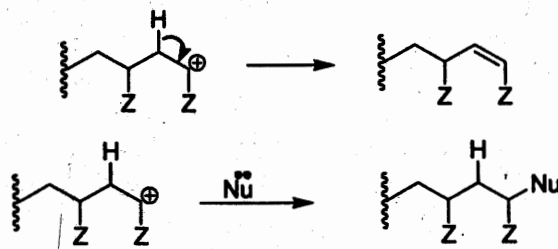


ปฏิกิริยาการเติมที่พันธะคู่ซึ่งเกิดผ่านคาร์โบแคตไอออน ได้ผลเป็นไปตามกฎของ มาร์คอฟนิกอฟ ปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดีกับมอนอเมอร์ที่มีหมู่ให้อิเล็กตรอนที่คาร์บอนของพันธะคู่ ซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพของคาร์โบแคตไอออนที่เกิดขึ้น เช่น styrene, isobutylene, vinyl ethers ($H_2C=CH-OR$) และ vinyl thioethers ($H_2C=CH-SR$)



Z = สารเริ่มปฏิกิริยา (กรดตัวแรง)
R = หมู่ให้อิเล็กตรอน

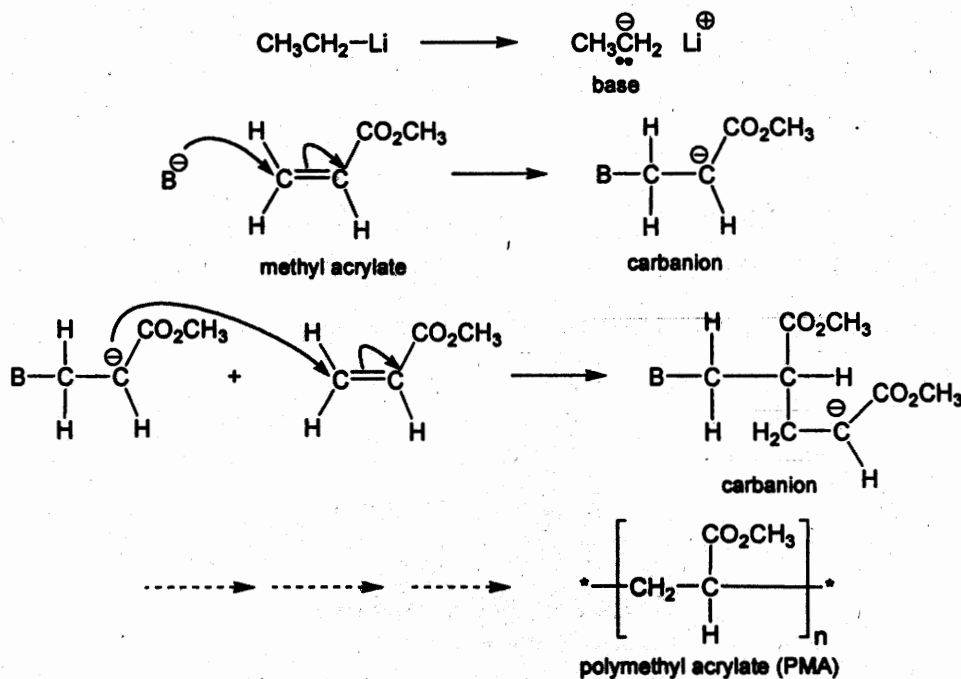
ปฏิกิริยาขั้นสิ้นสุดโซ่เกิดได้หลายแบบ เช่น เสียโปรตอนให้แอลคีน และคาร์โบแคตไอออนทำปฏิกิริยากับแอนไอออนหรือนิวคลีโอไฟล์ เช่น



14.3.1.3 ปฏิกิริยาที่เกิดผ่านแอนไอออน

ขั้นการแผ่โซ่เกิดผ่านคาร์แบนไอออน โดยมีนิวคลีโอไฟล์ที่แรง เช่น ⁻OH, ⁻OR และ แอลคิลลิเทียม หรือ กรดคาร์เรียมเป็นตัวเริ่มปฏิกิริยาที่สลายให้คาร์แบนไอออน ปฏิกิริยาเกิดได้ดีกับแอลคีนที่ให้คาร์แบนไอออนที่เสถียร และเกิดกับอียพอกไซด์ได้

แอลคีนทั่วไปไม่เกิดปฏิกิริยานี้เนื่องจากหมู่แอลคิลเป็นหมู่ให้อิเล็กตรอน แอลคีนที่เกิดปฏิกิริยานี้ได้มักมีหมู่ดึงอิเล็กตรอน ได้แก่ หมู่ฟีนิล, -CN, -COR, -COOR ที่คาร์บอนของพันธะคู่ เช่น พอลิเมอร์ของ methyl acrylate ซึ่งมีหมู่ -CO₂CH₃ (carbomethoxy) เป็นหมู่ดึงอิเล็กตรอนที่พันธะคู่

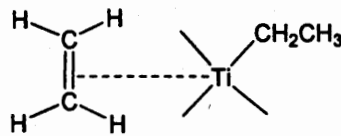


การเกิดพอลิเมอร์แบบแอนไอออนทำให้ได้พอลิเมอร์ยังไม่สิ้นสุด (living polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่ตำแหน่งไวปฏิกิริยายังอยู่ในโซ่ ถึงแม้มอนอเมอร์ในระบบจะหมดไปแล้ว แต่ถ้าเติม

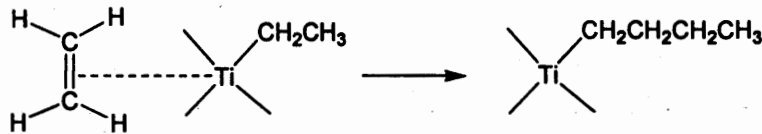
ลงไปใหม่ หรือเติมชนิดใหม่เข้าไปก็จะเกิดปฏิกิริยาต่อได้อีก ปฏิกิริยาถูกโซ่หยุดได้ด้วยการเติมอิเล็กโตรไฟล์ตัวใหม่ เช่น น้ำ CO₂ หรือเอทีลีนออกไซด์เข้าไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยากรด-เบส (ตามนิยามของเบรินสเตด-ลาวรี) ปฏิกิริยาจึงหยุดได้

14.3.1.4 ปฏิกิริยาแบบโคออร์ดิเนชัน (coordination polymerization หรือ Ziegler-Natta polymerization) ปฏิกิริยานี้ไม่มีอินเตอร์มีเดียตที่มีประจุและอนุมูลอิสระมาเกี่ยวข้อง ใช้ตัวเร่งที่เป็นสารเชิงซ้อนของสารประกอบแฮไลด์ของโลหะทรานซิชันหมู่ 4B และสารประกอบโลหะอินทรีย์ (alkylaluminum compounds) เรียก ตัวเร่งซีเกลอร์-นัตตา (Ziegler-Natta²) ใช้ได้ดีกับมอนอเมอร์ที่ไม่มีขั้ว โดยเฉพาะแอลคีนที่พันธะคู่อยู่ปลายโซ่ (α -olefin หรือ 1-alkene) ได้พอลิเมอร์แบบเส้นที่มีโครงสร้างเป็นระเบียบ โดยสามารถควบคุมสเตอริโอเคมีของโครงสร้างได้ด้วย

ตัวอย่างของตัวเร่งซีเกลอร์-นัตตา ได้แก่ สารผสมของสารละลายของ TiCl₄ กับ triethylaluminum [Al(CH₂CH₃)₃] ในไฮโดรคาร์บอนที่ปราศจากน้ำ ให้สารประกอบเชิงซ้อนที่ Ti ถูกรีดิวส์เป็น Ti(III) พันธะคู่ของแอลคีนจะเป็นเบสลิวอิส ให้คู่อิเล็กตรอนแก่ออร์บิทัล *d* ที่ว่างของ Ti เกิดสารเชิงซ้อนกับโลหะทรานซิชัน



แอลคีนแทรกเข้าตรงพันธะระหว่าง Ti-CH₂CH₃ และให้โซ่พอลิเมอร์ที่ยาวขึ้นเรื่อยๆ



² ในปี ค.ศ. 1953 Karl Ziegler นักเคมีเยอรมัน ได้เตรียมพอลิเมอร์ของเอทีลีนที่ความดันบรรยากาศ ใช้ตัวเร่งที่ประกอบด้วย TiCl₄ และสารประกอบ alkyl aluminium ต่อมา Giulio Natta นักเคมีอิตาลีได้นำวิธีการมาต่อยอด พัฒนาและปรับปรุงจนได้ตัวเร่ง Ziegler-Natta ซึ่งเป็นสารผสมของสารประกอบแฮไลด์ของโลหะทรานซิชัน (โดยเฉพาะ Ti, Cr, Va และ Zr) กับอนุพันธ์ของสารอินทรีย์กับโลหะที่ไม่ใช่โลหะทรานซิชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง alkyl aluminium

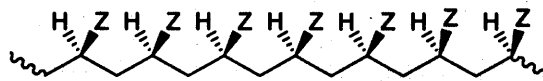
ทั้งสองท่านได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมีร่วมกันในปี ค.ศ. 1963 โดย Karl Ziegler ได้รับเนื่องจากการค้นพบตัวเร่งที่มี Ti เป็นหลัก และ Giulio Natta สำหรับการนำไปใช้เตรียมพอลิเมอร์ที่โครงสร้างที่มีระเบียบมาก

ปัจจุบันตัวเร่ง Ziegler-Natta เป็นตัวเร่งที่ใช้กันทั่วโลกในการเตรียมพอลิเมอร์ต่อไปนี้จาก α -olefin เช่น High density polyethylene (HDPE), Linear low density polyethylene (LLDPE), Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE), Polypropylene (PP), Thermoplastic polyolefins (TPO's), Ethylene propylene diene monomer polymers (EPDM) และ Polybutene (PB)

พอลิเอทิลีนจากระบบที่ใช้ตัวเร่งซีเกลอร์-นัตตา จะได้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high-density polyethylene; HDPE) ซึ่งระดับการเกิดโซ่กิ่งน้อยกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มาก จึงมีสภาพผลึก ความหนาแน่น จุดหลอมเหลวสูงกว่า และแข็งแรงมากกว่า LDPE

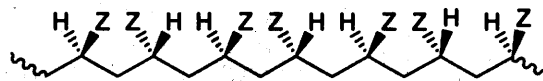
โดยทั่วไปแอลคีนที่มีพันธะคู่อยู่ปลายโซ่ ($H_2C=CH-Z$) จะให้พอลิโอลิฟินที่มีสเตอริโอเซ็นเตอร์ (stereocenter) อะตอมเว้าอะตอม สเตอริโอเคมีของโครงสร้างแบบนี้จึงค่อนข้างซับซ้อน ซึ่งมีการจัดตัวใน 3 มิติ อยู่ 3 แบบ คือ

1. พอลิเมอร์ไอโซแทกติก (isotactic polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่การจัดโครงรูปโมเลกุลที่มีหมู่แทนที่หรือหมู่ฟังก์ชันชนิดเดียวกันในหน่วยซ้ำ อยู่ด้านเดียวกันของระนาบแกนโซ่หลัก



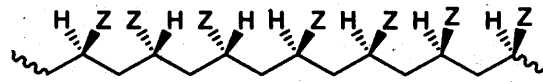
การจัดอะตอมใน 3 มิติ ที่สเตอริโอเซ็นเตอร์ทุกแห่งเหมือนกัน

2. พอลิเมอร์ซินดิโอแทกติก (syndiotactic polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่การจัดโครงรูปโมเลกุลโดยที่หมู่แทนที่หรือหมู่ฟังก์ชันชนิดเดียวกันในหน่วยซ้ำอยู่สลับกันลงด้านไปตลอดระนาบแกนโซ่หลัก



การจัดอะตอมใน 3 มิติ ที่สเตอริโอเซ็นเตอร์สลับกันทุกแห่ง

3. พอลิเมอร์เอแทกติก (atactic polymer) มีการจัดโครงรูปโมเลกุลโดยที่หมู่แทนที่หรือหมู่ฟังก์ชันชนิดเดียวกันในหน่วยซ้ำอยู่ในลักษณะสุ่มไปตลอดแกนโซ่หลัก



การจัดอะตอมใน 3 มิติ ที่สเตอริโอเซ็นเตอร์ไม่มีแบบแผน

การจัดตัวที่มีระเบียบของโครงสร้างแบบไอโซแทกติกและซินดิโอแทกติกทำให้โมเลกุลจัดตัวอัดแน่นได้มาก ทำให้พอลิเมอร์แข็งแรงมากกว่าและแข็งกว่าแบบเอแทกติก ซึ่งจัดตัวไม่แน่นเท่า จุดหลอมเหลวจึงต่ำกว่าและมีเนื้อนุ่มกว่า การเกิดพอลิเมอร์แบบอนุกรมอิสระมักได้พอลิเมอร์แบบเอแทกติก การใช้ตัวเร่งซีเกลอร์-นัตตา จึงมีข้อดีว่าการเกิดพอลิเมอร์แบบโซ่ยาวขึ้น 2 ประการ คือ

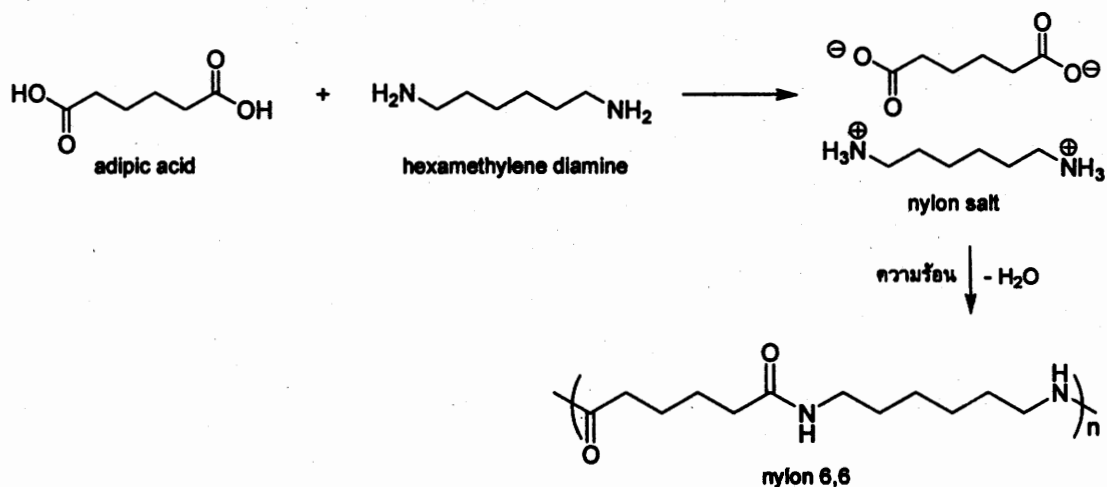
1. ความคุมสเตอริโอเคมีของพอลิเมอร์ได้ง่าย จะได้พอลิแบบใดขึ้นกับตัวเร่งที่ใช้
2. ได้พอลิเมอร์แบบเส้นโซยาวที่ไม่มีโซกิ่ง เนื่องจากไม่มีอนุกรมลิสระเกิดขึ้นจึงไม่มีการถ่ายโอนอะตอมไฮโดรเจนซึ่งจะนำไปสู่การเกิดโซกิ่ง

14.3.2 การเกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่น (Condensation Polymerization)

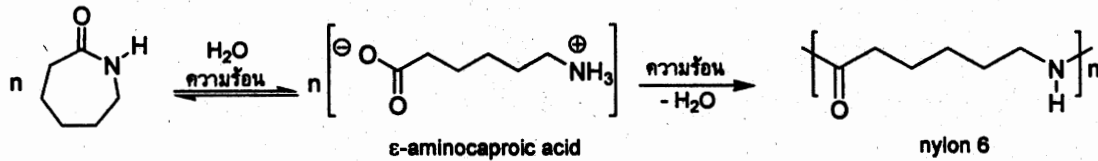
เป็นการเกิดพอลิเมอร์ระหว่างมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ เช่น $-\text{COOH}$, $-\text{COCl}$, $-\text{COOR}$, $-(\text{CO})\text{O}(\text{OC})-$, $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{CHO}$, $-\text{NCO}$ และ epoxy การเพิ่มขนาดโซ่เกิดทีละขั้นๆ เมื่อมีการรวมกันระหว่างปฏิกิริยา จะมีการขจัดโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น H_2O , HCl , NH_3 โดยโซ่ขนาดเดียวกันจะเกิดไปด้วยกัน ด้วยปฏิกิริยาที่เหมือนกันทั้งอัตราและกลไกปฏิกิริยา เริ่มจาก มอนอเมอร์อย่างเดียว \rightarrow ไดเมอร์ส่วนใหญ่ \rightarrow ไตรเมอร์ส่วนใหญ่ \rightarrow เตตระเมอร์ส่วนใหญ่ เป็นต้น จึงเรียกการเกิดพอลิเมอร์แบบขั้น (step-growth polymerization) ด้วย พอลิเมอร์แบบขั้นเชิงพาณิชย์ ได้แก่ พอลิอะไมด์ พอลิเอสเทอร์ พอลิยูรีเทน พอลิคาร์บอเนต และ เรซินอีพอกซี

14.3.2.1 พอลิอะไมด์ (Polyamides)

ไนลอน (nylon) เป็นพอลิอะไมด์ เกิดจากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ควบแน่น เช่น ไนลอน 6,6 ซึ่งเป็นพอลิอะไมด์สังเคราะห์ชนิดแรก เตรียมจากมอนอเมอร์ที่มีคาร์บอน 6 อะตอม 2 ชนิด คือ กรดแอดิพิก (adipic acid) และ hexamethylene diamine ซึ่งได้เกลือไนลอน เมื่อได้รับความร้อนประมาณ 250°C จะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นระหว่างหมู่ $-\text{COO}^-$ ของโมเลกุลหนึ่ง กับหมู่ $-\text{NH}_3^+$ จากอีกโมเลกุลหนึ่ง น้ำถูกขจัดเป็นไอและได้ไนลอนหลอมละลาย ซึ่งถูกหล่อในพิมพ์ หรือถูกอัดฉีดเป็นเส้น เมื่อดึงให้ยืดออกขณะเย็นจะได้เส้นใยไนลอนที่ความยาวเพิ่มเป็น 4 เท่า ทำให้มีสภาพผลึก ความทนแรงดึง (tensile strength) และความเหนียวเพิ่มขึ้น

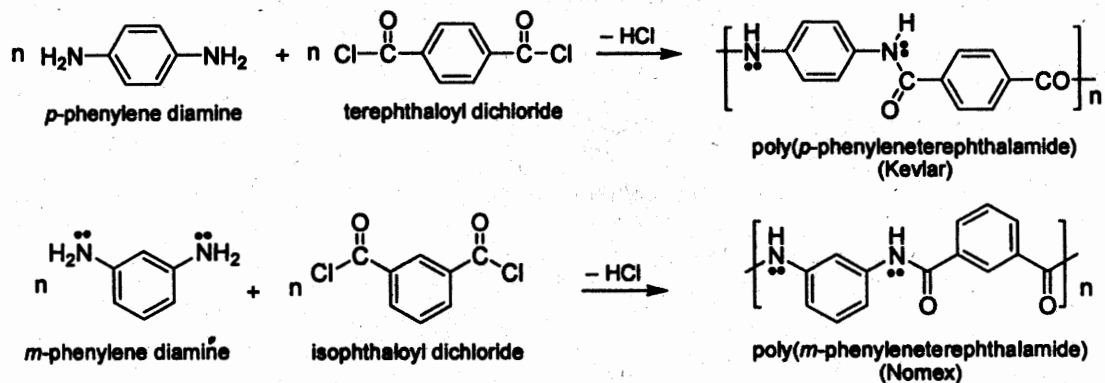


ไนลอน 6 เตรียมจากมอนอเมอร์เพียงชนิดเดียว ซึ่งมีหมู่อะมิโนที่ปลายด้านหนึ่งและหมู่คาร์บอกซิลที่ปลายอีกด้านหนึ่ง คล้ายการเกิดโปรตีนจากกรดแอลฟา-อะมิโน โดยเตรียมจาก ϵ -caprolactam ซึ่งเป็นอะไมด์ชนิดวง (cyclic amide) เมื่อให้ความร้อนโดยมีน้ำในปริมาณเล็กน้อย บางส่วนถูกแยกสลายด้วยน้ำและวงเปิดให้กรดอะมิโน ϵ -aminocaproic เมื่อให้ความร้อนต่อไปที่ประมาณ 250°C จะเกิดปฏิกิริยาควบแน่น (self-condensation polymerization) ได้พอลิเมอร์ไนลอน 6



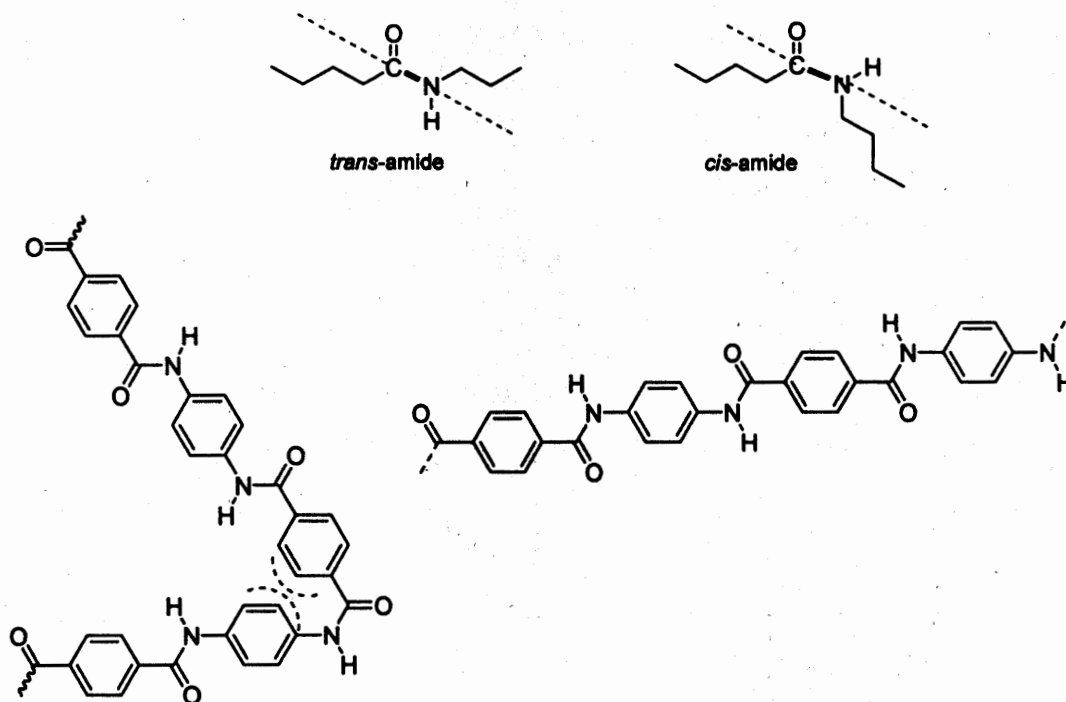
แอรามิด (Aramid) เป็นแอโรแมติกพอลิอะไมด์ (aromatic polyamides) เตรียมจากสารประกอบที่มีวงแอโรแมติก ตรงข้ามกับไนลอนซึ่งเป็นแอลิแฟติกโซ่ตรง ตัวอย่างของแอรามิด ได้แก่ เคฟลาร์ (kevlar) และโนเม็กซ์ (nomex) ซึ่งเป็นชื่อทางการค้าเส้นใยแอรามิดที่ผลิตโดยบริษัทดูปองต์ มีวงแอโรแมติกเป็นส่วนหนึ่งในโซ่หลัก การคอนจูเกตระหว่างวงแอโรแมติกกับหมู่คาร์บอนิลของอะไมด์ในโครงสร้างทำให้แอรามิดมีความแข็งแรง เหนียว และทนต่อความร้อนมากเป็นพิเศษ

เคฟลาร์ เป็นพอลิเมอร์ควบแน่น เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง terephthaloyl chloride กับ *p*-phenylenediamine ให้พอลิอะไมด์ poly(*p*-phenylene-terephthalamide) ส่วน โนเม็กซ์ เป็นพอลิอะไมด์โซ่ยาว เกิดจากปฏิกิริยาแบบควบแน่นระหว่าง isophthaloyl chloride กับ *m*-phenylenediamine ให้พอลิอะไมด์ poly(*m*-phenyleneisophthalamide)



เคฟลาร์เป็นพาราแอรามิด วงเบนซีนมีการแทนที่แบบ 1,4 หรือพารา จึงเป็นโมเลกุลที่สมมาตร พันธะจากวงแอรอแมติกแต่ละวงขนานกัน ขณะที่ไนเม็กซ์เป็นแบบ 1,3 หรือเมตา พันธะทำมุมกัน 120° ไนเม็กซ์จึงแข็งน้อยกว่าเคฟลาร์

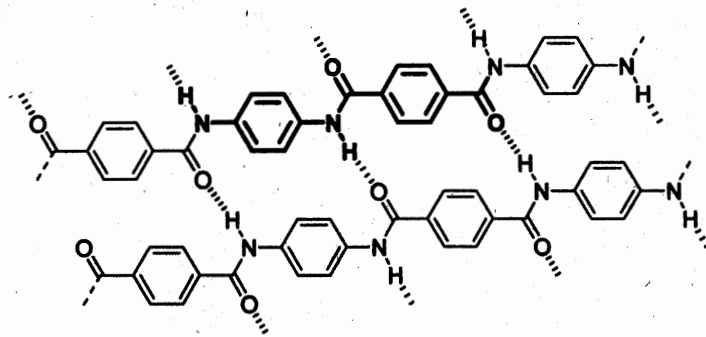
เมื่อพิจารณาหมู่แอลคิลที่พันธะอะไมด์ จะเห็นว่าพันธะอะไมด์มีโครงสร้างได้ 2 แบบ คือแบบทรานส์ และแบบซิส โครงรูปเช่นนี้พบในโมเลกุลพอลิเมอร์ด้วย เมื่ออะไมด์ทุกหมู่ของพอลิอะไมด์มีโครงสร้างแบบทรานส์ พอลิเมอร์จะยึดออกเป็นเส้นตรงซึ่งเป็นลักษณะของเส้นใย ไชท์ที่ยึดออกจะอัดตัวเป็นรูปผลึกได้ดี ทำให้มีลักษณะเป็นเส้น โดยทั่วไปพันธะอะไมด์บางบริเวณจะมีโครงสร้างแบบซิส ไชพอลิอะไมด์ เช่น ไนลอน จึงไม่ยึดขยายอย่างเต็มที่



รูปที่ 14.3 เปรียบเทียบโครงสร้างเคฟลาร์แบบซิส (ซ้าย) และแบบทรานส์ (ขวา)

กรณีของเคฟลาร์ไม่พบโครงสร้างแบบซิสเลย เนื่องจากอะตอมไฮโดรเจนที่วงเบนซีนทั้งสองด้านของหมู่อะไมด์อยู่ไกลกันมากเกินไป เคฟลาร์จึงมีเฉพาะโครงสร้างแบบทรานส์ โมเลกุลจึงยึดออกเต็มที่ให้เส้นใยที่สมบูรณ์แบบ

โครงสร้างแบบพาราและโครงสร้างแบบทรานส์ทำให้โมเลกุลจัดตัวได้แน่นในรูปผลึก เส้นใยเคฟลาร์จึงมีสภาพผลึกสูง ความแข็งแรงของเคฟลาร์มาจากแรงระหว่างไชพอลิเมอร์ เช่นพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ C=O จากไชสายหนึ่งกับ -NH- จากอีกสายหนึ่งด้วย



รูปที่ 14.4 โครงสร้างโมเลกุลเคฟลาร์ และพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล

เคฟลาร์มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับสารอื่นที่มีความแข็งแรงพอกัน จึงใช้เคฟลาร์ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ชื่อเสียงของเคฟลาร์มาจากการนำมาทำเสื้อเกราะกันกระสุน หมวกทหาร เนื่องจากน้ำหนักเบาและแข็งแรง ใช้ทำหมวกนิรภัย ชุดป้องกันภัยที่ใช้ผจญเพลิง นอกจากนี้สายเคเบิลจากเคฟลาร์แข็งแรงพอกับที่ทำจากเหล็กกล้า แต่น้ำหนักน้อยกว่ามาก

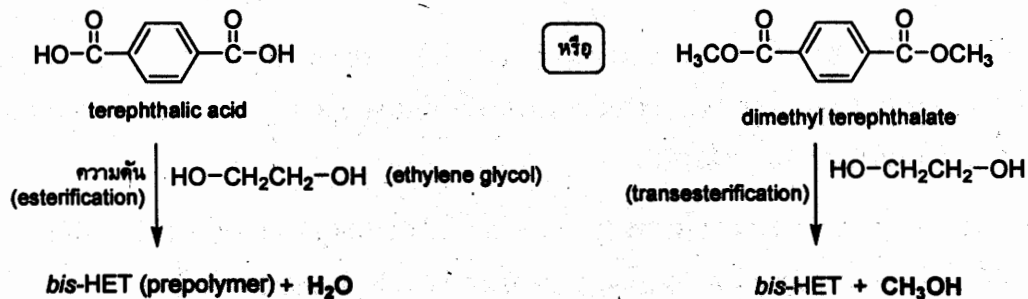
ไนเม็กซ์เป็นเส้นใยที่ทนไฟ ทนความร้อน น้ำหนักเบา ใช้ทำฉนวนกันไฟ กันความร้อน ฉนวนไฟฟ้า เสื้อผ้าชุดป้องกัน อุปกรณ์กีฬาต่างๆ เป็นต้น

14.3.2.2 พอลิเอสเตอร์ (Polyesters)

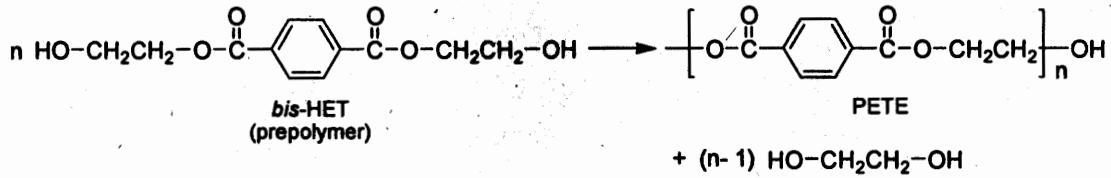
พอลิเอสเตอร์ ได้จากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบขั้น เป็นการแทนที่ด้วยนิวคลีโอไฟล์ที่หมู่เอซิล เช่น พอลิเอทีลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate; PETE หรือ PET)

PETE อาจเตรียมจากเอทีลีนไกลคอล และ DMT (dimethylterephthalate) หรือ กรดเทเรฟทาติก (terephthalic acid) ที่มีความบริสุทธิ์สูง ในแต่ละวิธีนั้นขั้นแรกเป็นการเตรียมพรีพอลิเมอร์ bis-hydroxyethyl terephthalate (bis-HET) ซึ่งต่อมาเกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่น และมีการจัดเอทีลีนไกลคอล ให้ PETE

ขั้นแรก เตรียมพรีพอลิเมอร์

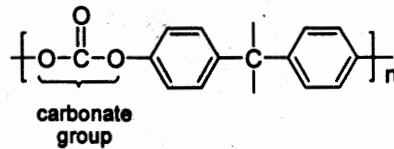


ขั้นที่สอง การเกิดพอลิเมอร์



14.3.2.3 พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate)

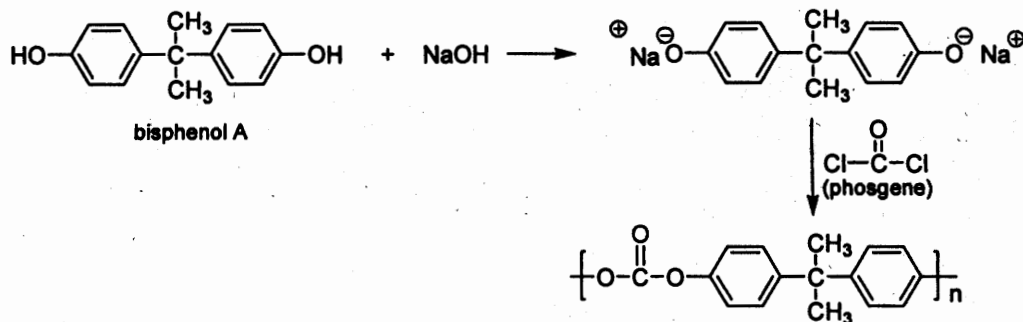
พอลิคาร์บอเนต เป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่คาร์บอเนตอยู่ในแกนโซ่หลัก ชนิดที่สำคัญคือพอลิคาร์บอเนตของสารประเภท bisphenols ส่วนใหญ่เป็น bisphenol A ทำปฏิกิริยากับอนุพันธ์ของกรดคาร์บอนิก เช่น ฟอสจีน (phosgene) และเอสเทอร์ของกรดคลอโรฟอร์มิก (chloroformic acid esters) ได้อะโรแมติกพอลิคาร์บอเนต



พอลิคาร์บอเนตของ bisphenol A เป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์มอพลาสติก ใช้งานง่าย เป็นพลาสติกใส แสงช่วงวิสิเบิลผ่านได้ดีมาก มีความแข็งแรง เป็นวัสดุที่คงทน เหนียว ทนความร้อน มีสมบัติหลายอย่างคล้าย PMMA แต่แข็งแรงมากกว่า ใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า และราคาแพงกว่า PMMA

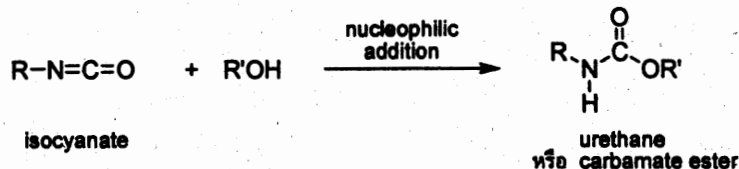
ประโยชน์ของพอลิคาร์บอเนตของ bisphenol A มีมากมาย เช่น ใช้ทำส่วนประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์ กระจกนิรภัย แวนนิรภัย เส้นใยหน้าต่างหนักเบา หมวกนิรภัย กระจกกันกระสุน ภาชนะไมโครเวฟ ใช้งานโครงสร้าง ชนิดที่เสถียรต่อแสง UV ใช้ทำหลังคาทางเดิน ช่องแสงบนหลังคา และทำแผ่นซีดีและดีวีดีด้วย

พอลิคาร์บอเนตของ bisphenol A เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่าง bisphenol A กับ NaOH ได้เกลือโซเดียมของ bisphenol A ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับฟอสจีนจะได้พอลิคาร์บอเนต

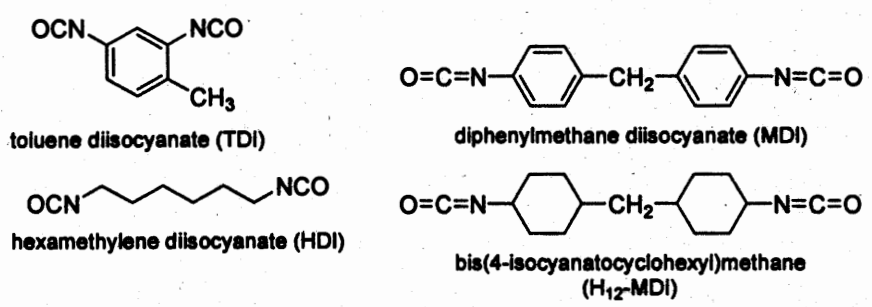


14.3.2.4 พอลิยูรีเทน (Polyurethanes)

ยูรีเทน หรือคาร์บาเมต (carbamate) เป็นเอสเทอร์ของกรดคาร์บาไมก (carbamic acid ; R-NH-COOH) มีหมู่คาร์บอนิลสร้างพันธะกับหมู่ -OR และหมู่ -NHR หรือ NR₂ ยูรีเทนเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยาเนต (isocyanate; R-N=C=O) กับแอลกอฮอล์หรือฟีนอล

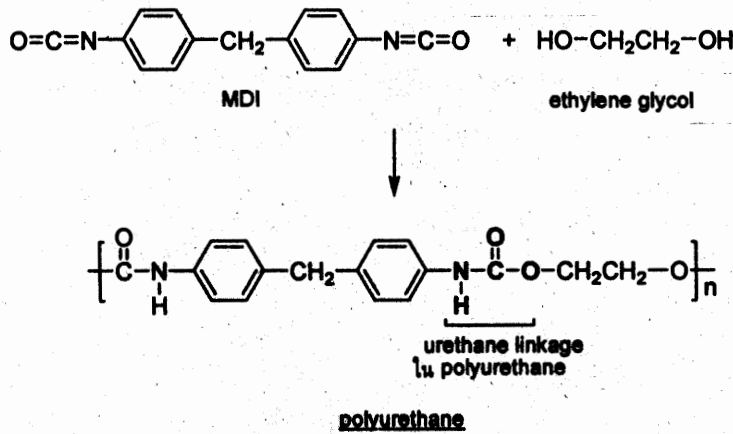


พอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่มีหลายรูปแบบ พบได้ทั่วไป เป็นได้ทั้งวัสดุยืดหยุ่น สี สารยึดติด สารเคลือบผิว และเส้นใย การที่พอลิเมอร์ชนิดนี้มีชื่อพอลิยูรีเทนเพราะมีส่วนเชื่อมยูรีเทนในแกนโซ่หลัก พอลิยูรีเทนเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างไดออล (diols) กับสารที่มีหมู่ไอโซไซยาเนต 2 หมู่ (diisocyanates)

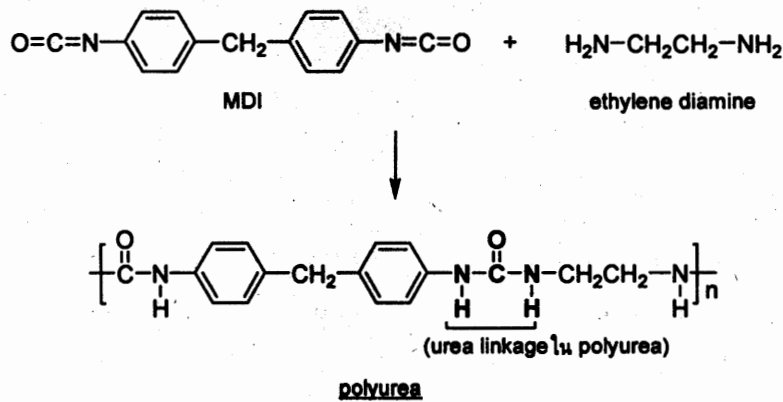


รูปที่ 14.5 ไดไอโซไซยาเนตทั้งชนิดแอมโรแมติก (แถวบน) และแอลิแฟติก (แถวล่าง)

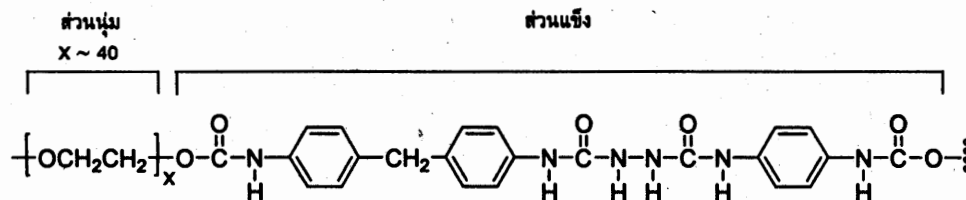
ตัวอย่างปฏิกิริยา



ถ้าใช้ไดอะมีนแทนไดออลจะได้พอลิยูเรีย (polyurea) ซึ่งมีส่วนเชื่อมยูเรียแทนยูรีเทนในโครงสร้าง เช่น



พอลิยูรีเทนเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ดีจึงมีสภาพผลึกสูง มักใช้ทำพอลิเมอร์รวมแบบกลุ่มร่วมกับพอลิเมอร์ที่คล้ายยางนุ่ม ทำให้ได้พอลิเมอร์รวมแบบกลุ่มที่มีสมบัติเป็นวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก พอลิยูรีเทนยืดหยุ่นที่เป็นที่รู้จักกันดี คือ *สแปนเด็กซ์* (spandex) ซึ่งเป็นเส้นใยพอลิเมอร์ยืดหยุ่นที่เบามาก แข็งแรง และกระชับลำตัวผู้สวมใส่ มีส่วนเชื่อมยูเรียและคาร์บาไมด์ในแกนโซ่หลัก การที่ *สแปนเด็กซ์* มีลักษณะยืดหยุ่นเป็นพิเศษเช่นนี้เพราะโครงสร้างซ้ำของโซ่พอลิเมอร์ประกอบด้วยกลุ่มส่วนแข็งเชื่อมต่อกับกลุ่มส่วนอ่อน



รูปที่ 14.6 โครงสร้างของ *สแปนเด็กซ์* ซึ่งมีทั้งส่วนเชื่อมยูเรียและยูรีเทนในแกนหลัก

กลุ่มส่วนอ่อนเป็นโซ่สั้นๆของพอลิไกลคอลประมาณ 40 หน่วย ทำให้นุ่มและยืดหยุ่น ส่วนที่เหลือซึ่งมาจากหน่วยเชื่อมยูรีเทน หน่วยเชื่อมยูเรีย และวงแอมิดิกเป็นกลุ่มโครงสร้างส่วนแข็ง ซึ่งส่วนนี้รวมตัวกับส่วนแข็งจากโซ่อื่นและปรับแนวเป็นเส้นใย ให้ได้เส้นใยที่ยืดหยุ่นมากเป็นพิเศษ ซึ่งเมื่อพอลิเมอร์ขยายตัวแล้วจะหดกลับสู่รูปเดิมได้ดีมาก

14.3.2.5 เรซินอีพอกซี (Epoxy resins)

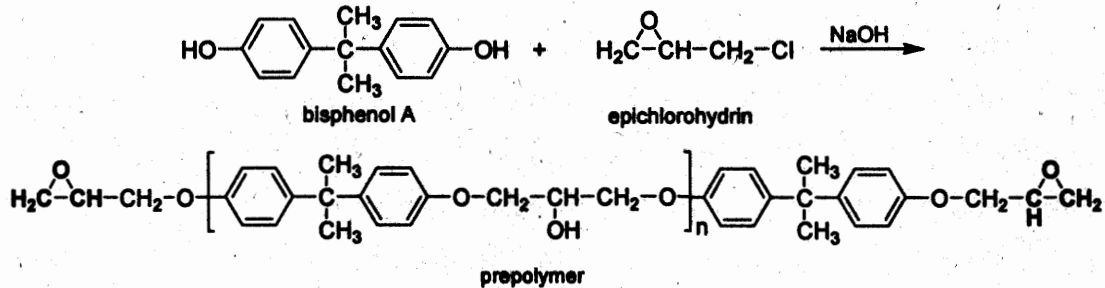
เรซินอีพอกซีเป็นพอลิเมอร์ร่างแหที่เกิดจากการเชื่อมข้ามที่หมู่อีพอกซี หรือวงอีพอกไซด์จากโมเลกุลพรีพอลิเมอร์ เรซินอีพอกซีจึงประกอบด้วย 2 ส่วน คือ พรีพอลิเมอร์ของเหลว

ที่ประกอบด้วยไซโพลีเมอร์สายสั้นๆ ปลายทั้งสองเป็นหมู่อีพอกซี และสารทำให้แข็ง (hardener) เช่น ไดอะมิน ไตรอะมิน หรือแอซิดแอนไฮไดรด์ ซึ่งเกิดการเชื่อมข้ามด้วยการเปิดวงอีพอกไซด์

การเกิดเรซินอีพอกซีจึงมี 2 ขั้นตอนคือ การเกิดพรีพอลิเมอร์ได้อีพอกซี (diepoxy) และการเชื่อมข้าม

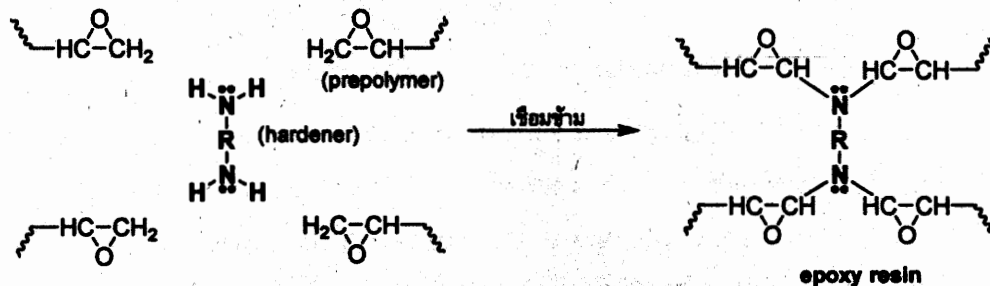
การเตรียมพรีพอลิเมอร์ได้อีพอกซี

พรีพอลิเมอร์ ได้จากมอนอเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งทั้งคู่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 แห่ง เช่น ปฏิกิริยาระหว่าง bisphenol A กับ epichlorohydrin เป็นการเกิดพอลิเมอร์แบบขั้นด้วยการเปิดวงอีพอกไซด์ใน epichlorohydrin โดยนิวคลีโอไฟล์จาก bisphenol A ให้พอลิเมอร์สายสั้นที่มีหมู่อีพอกซีอยู่ที่ปลายทั้งสองด้าน



การเชื่อมข้าม

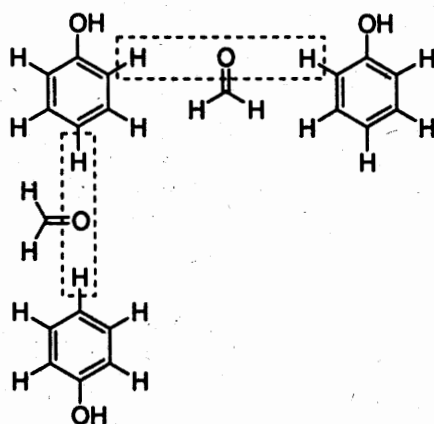
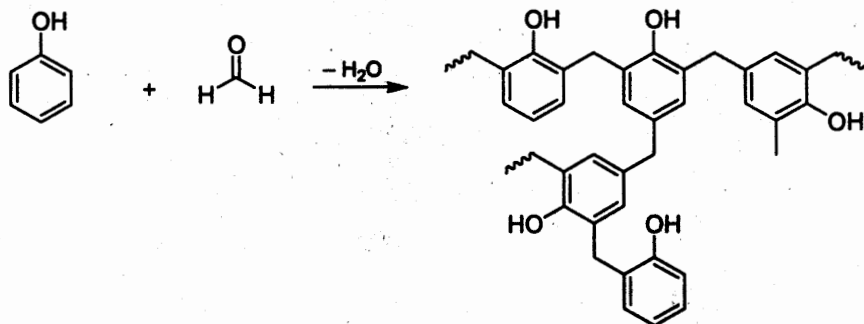
เมื่อผสมสารทั้งสองส่วนจะเกิดพอลิเมอร์แบบร่างแห ซึ่งมาจากการเชื่อมข้ามที่หมู่ได้อีพอกซีจากพรีพอลิเมอร์เข้าด้วยกัน โดยสารทำให้แข็ง เช่น ไดอะมิน ได้โมเลกุลเดี่ยวขนาดยักษ์ของพอลิเมอร์แบบร่างแห เป็นสารที่แข็งตัว ทนทาน ซึ่งนำไปหลอมหรือขึ้นรูปไม่ได้



โดยทั่วไปวัสดุอีพอกซีมีสมบัติเป็นสารยึดติดที่ดี ทนน้ำ ทนสารเคมีและความร้อน มีสมบัติเชิงกลดี และเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้หลายด้าน ใช้ทำสี วัสดุเคลือบผิว สารยึดติด เป็นกาวไม้กึ่งชนิดที่ใช้กับโลหะได้ ใช้เป็นฉนวนในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และใช้เป็นวัสดุเชิงประกอบได้ดี

14.3.2.6 ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์พอลิเมอร์ (Phenol-Formaldehyde Polymers)

ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์พอลิเมอร์ เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์แบบร่างแห มีชื่อทางการค้า เบเคอไลต์ (Bakelite) ตามผู้ค้นพบ Leo Bakeland เมื่อประมาณ ค.ศ. 1900 ซึ่งเริ่มผลิตจาก โรงงานแรกในปี ค.ศ. 1910 พอลิเมอร์ชนิดนี้เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ โดยมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่ง หมู่ -OH เป็นหมู่ให้อิเล็กตรอน ฟอร์มัลดีไฮด์จึงทำปฏิกิริยาที่วง เบนซินที่ตำแหน่งออร์โทและพารา เกิดปฏิกิริยาควบแน่นซึ่งมีการขจัดน้ำ ได้โครงสร้างที่มีหมู่ เมทิลีน (-CH₂-) เชื่อมระหว่างวงแอรอแมติก



ปฏิกิริยาควบแน่น

14.4 สมบัติของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีสมบัติไม่ธรรมดา ได้แก่ สันฐานของพอลิเมอร์ สมบัติเคมี สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อน ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงระหว่างโซ่โดยมีผลต่อ รูปร่างแกนหลักในโซ่พอลิเมอร์ โมเลกุลพอลิเมอร์เป็นโซ่ยาวที่มีการพันเกี่ยวหรือไขว้กันไปมา ซึ่งเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความแข็งและการยืดหยุ่นด้วย

14.4.1 โครงสร้างทางเคมีและโครงสร้างกายภาพของพอลิเมอร์

สมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนเป็นผลจากโครงสร้างทางเคมี ลักษณะทางสเตอริโอเคมี และลักษณะกายภาพของโครงสร้าง การเป็นผลึกและลักษณะอสัณฐานของพอลิเมอร์ทั้งหมดนี้จะมีผลกับแรงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์

14.4.1.1 สัณฐานของพอลิเมอร์ (Polymer Morphology)

เป็นรูปแบบโดยรวมของโครงสร้างพอลิเมอร์ เกี่ยวกับรูปร่างและวิธีจัดโมเลกุลในสถานะของแข็ง ซึ่งได้แก่ การเป็นผลึก การเกิดกิ่ง การเชื่อมข้าม น้ำหนักโมเลกุล

สภาพการเป็นผลึก (Crystallinity)

พอลิเมอร์เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีแรงระหว่างโมเลกุลและมีการพันเกี่ยวของโซ่มาก ความยาวของโมเลกุลพอลิเมอร์ทำให้เกิดผลึกขนาดใหญ่ได้ยากซึ่งไม่เหมือนสารอินทรีย์ทั่วไป แต่เกิดผลึกระดับไมโครซึ่งเรียก *หย่อมผลึก* (crystallite) ได้ โครงสร้างกายภาพของพอลิเมอร์จึงอาจเป็นผลึก หรือเป็นอสัณฐาน พฤติกรรมของพอลิเมอร์จึงมี 3 ลักษณะ คือ เป็นผลึก ออสัณฐาน และหลอม

พอลิเมอร์บางชนิดเป็นแบบอสัณฐานอย่างเดียว พอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกส่วนใหญ่เป็นแบบเส้นหรือมีกิ่งเล็กน้อย มักเป็นกึ่งผลึก (semicrystalline) คือมีทั้งบริเวณที่เป็นหย่อมผลึก โมเลกุลยึดกันด้วยแรงระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน และบริเวณอสัณฐานหรือส่วนที่จัดตัวไม่เป็นระเบียบในโครงสร้าง



พอลิเมอร์อสัณฐาน
(amorphous polymer)



พอลิเมอร์กึ่งผลึก
(semicrystalline polymer)

รูปที่ 14.7 แบบจำลองโครงสร้างกายภาพของพอลิเมอร์อสัณฐาน โมเลกุลจัดตัวไม่มีระเบียบ (ซ้าย) และพอลิเมอร์กึ่งผลึก (ขวา) ซึ่งมีทั้งบริเวณที่จัดตัวเป็นระเบียบ *บริเวณผลึก* และจัดตัวไม่เป็นระเบียบ หรือ*บริเวณอสัณฐาน*

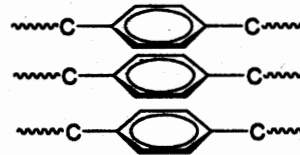
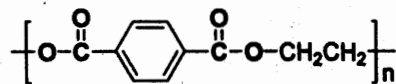
ในกระบวนการตกผลึกพบว่าโซ่ที่ค่อนข้างสั้นจัดตัวในโครงสร้างผลึกได้เร็วกว่าโมเลกุลที่มีโซ่ยาว ระดับการเกิดพอลิเมอร์ (degree of polymerization; DP) จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่บอก

สภาพผลึกของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ที่มีค่า DP สูง จะจัดตัวเป็นชั้นๆ ยาก เพราะโมเลกุลมีการพันเกี่ยวไปมา การที่โมเลกุลจะมีสภาพผลึกสูงหรือจะเป็นอสัณฐานจึงขึ้นกับโครงสร้างพอลิเมอร์ และแรงระหว่างโมเลกุล

1. ลักษณะโซ่บริเวณที่เป็นผลึก:

- มีสเตอริโอเคมีที่เป็นระเบียบ สม่่าเสมอ เช่น พอลิสไตรีนแบบแอตทิกเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน ส่วนแบบซินดีโอแอตทิกเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก
- โครงสร้างไม่มีกิ่งหรือมีเล็กน้อย เช่น พอลิเอทิลีนมีโครงสร้างแบบเส้นเป็นพอลิเมอร์ผลึก ส่วนแบบโซ่กิ่งเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน

2. แรงระหว่างโมเลกุล: หมู่แทนที่ชนิดมีขั้วทำให้แรงระหว่างโมเลกุลแข็งแรง เช่น หมู่เอสเทอร์ในพอลิเอสเทอร์ และวงแอมไคดิกที่ซ้อนอย่างเป็นระเบียบ พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต ทำให้ผลึกแข็งแรงขึ้นเช่นกัน



3. กระบวนการตกผลึก เช่น การตกผลึกจากพอลิเมอร์ที่หลอม การระเหยสารละลายของผลึก การให้ความร้อนในสุญญากาศที่อุณหภูมิเฉพาะ และการยัด เป็นต้น สภาพการเป็นผลึกมีผลต่อสมบัติกายภาพหลายด้าน เช่น

- สมบัติเชิงกลดีขึ้น
- ชุ่นมากขึ้น พอลิเมอร์กึ่งผลึกมักจะชุ่น เนื่องจากค่าดัชนีหักเหบริเวณอสัณฐานและบริเวณผลึกต่างกัน ทำให้เกิดการกระเจิงแสง
- ความหนาแน่นสูงขึ้น
- การละลายลดลง

14.4.1.2 แรงระหว่างโมเลกุล

พอลิเมอร์เริ่มแสดงสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรง ความเหนียว เมื่อการเกิดพอลิเมอร์ถึงระดับที่จะแสดงลักษณะพิเศษ ซึ่งขึ้นกับแรงระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์และปริมาณการพันเกี่ยวของโซ่ น้ำหนักโมเลกุลต่ำสุดที่พอลิเมอร์แสดงสมบัติเชิงกล ขึ้นกับโครงสร้างทางเคมี แรงระหว่างโมเลกุล และโครงสร้างกายภาพของพอลิเมอร์

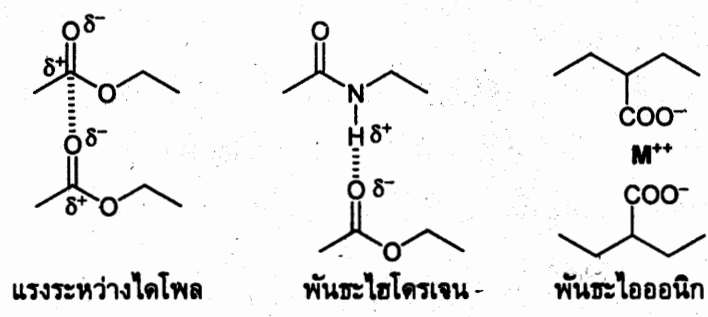
แรงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์เป็นชนิดเดียวกับแรงที่เกิดระหว่างโมเลกุลขนาดเล็ก แต่เนื่องจากพอลิเมอร์มีขนาดใหญ่จึงส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพมาก โดยเฉพาะแรงระหว่างโมเลกุลชนิดแข็งแรงที่ทำให้สมบัติกายภาพมีลักษณะเฉพาะ แรงระหว่างโมเลกุลแบ่งตามความแข็งแรงได้ดังนี้

1. Dispersion force เป็นแรงระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงน้อยสุด พบในพอลิเมอร์ทุกชนิด เกิดระหว่างโมเลกุลชนิดไม่มีขั้ว เช่น แรงลอนดอน เป็นเป็นแรงดึงดูดที่เกิดระหว่างสภาพขั้วอย่างอ่อนที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นช่วงสั้น ๆ ชั่วขณะ ขึ้นกับสภาพการเกิดขั้ว (polarizability) ของโมเลกุล โดยทั่วไปโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจะเกิดสภาพขั้วได้มากกว่า แรงชนิดนี้จึงมีความสำคัญในพอลิเมอร์ชนิดไม่มีขั้วที่น้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้รับแรงกระแทกได้ดีเช่น พอลิเอทิลีนที่น้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่ง (Ultra High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE) น้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 3,000,000 g/mole ซึ่งใช้ทำเสื่อเกราะกันกระสุน

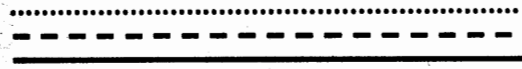
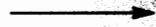
2. แรงระหว่างไดโพล เป็นแรงดึงดูดระหว่างหมู่ฟังก์ชันชนิดมีขั้ว เช่น พอลิเอสเทอร์ และไวนิลพอลิเมอร์ กับคลอรีนที่เกาะกับโซ่หลัก

3. พันธะไฮโดรเจน เป็นแรงดึงดูดที่พบในโมเลกุลพอลิเมอร์ที่มีหมู่ -OH หรือ -NH เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิอะไมด์

4. พันธะไอออนิก เป็นแรงดึงดูดระหว่างประจุต่างชนิดกันพบในพอลิเมอร์ที่มีหมู่คาร์บอกซิล



แรงระหว่างโมเลกุลที่อ่อนมักทำให้น้ำหนักโมเลกุลน้อยและเป็นพอลิเมอร์อสังฐาน แรงที่แข็งแรงทำให้น้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น เมื่อความแข็งแรงมากขึ้นระยะห่างระหว่างโมเลกุลจะลดลง โมเลกุลจึงมีระเบียบและสภาพผลึกเพิ่มขึ้น



วัสดุยืดหยุ่น สภาพปกติก่อนยืด
(อสัณฐาน)

ขณะยืด ความยาวเพิ่มขึ้นหลายเท่า
โมเลกุลมีระเบียบมากกว่าเดิม
และมีลักษณะผลึกสูง

รูปที่ 14.8 แบบจำลองตัวอย่างความสัมพันธ์ของแรงระหว่างโมเลกุลและความเป็นระเบียบ
ของโมเลกุลพอลิเมอร์

14.4.2 สมบัติทางความร้อน (Thermal Properties)

การเปลี่ยนสภาวะของพอลิเมอร์อสัณฐานและพอลิเมอร์กึ่งผลึก

ช่วงการเปลี่ยนสภาวะของพอลิเมอร์ เป็นช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติพอลิเมอร์ ที่สำคัญคือการเปลี่ยนสภาพแก้ว และการหลอมผลึก พอลิเมอร์กึ่งผลึกส่วนใหญ่แสดงสมบัติที่มีประโยชน์ระหว่างช่วงอุณหภูมิทั้งสองนี้

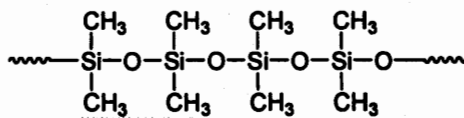
14.4.2.1 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (Glass Transition Temperature; T_g)

สภาพแก้วเป็นสมบัติของบริเวณอสัณฐานของของแข็งกึ่งผลึก บริเวณที่เป็นผลึกยังคงรักษารูปผลึกไว้ได้ในช่วงการเปลี่ยนสภาพแก้ว อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่พอลิเมอร์เปลี่ยนจากสภาพแข็งเปราะแบบแก้วเป็นสภาพนุ่มยืดหยุ่นแบบยาง

อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วขึ้นกับความอิสระในการเคลื่อนไหวหรือการหมุนโมเลกุลพอลิเมอร์ โมเลกุลที่เคลื่อนไหวสะดวกมีค่า T_g ต่ำ ขณะที่พวกที่ไม่เคลื่อนไหวหรือเคลื่อนไหวช้าจะมีค่า T_g สูง ปัจจัยที่จำกัดการหมุนภายในโซ่ซึ่งเพิ่ม T_g ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุล แรงระหว่างโมเลกุล ความยืดหยุ่นของแกนโซ่หลัก หมู่ที่เกาะกับแกนหลัก (pendant group) จำนวนโซ่กิ่ง และร่างแห

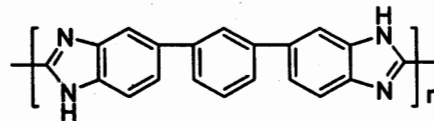
น้ำหนักโมเลกุล: น้ำหนักโมเลกุลเพิ่ม ค่า T_g สูงขึ้น

ความยืดหยุ่น: โซ่ที่ยืดหยุ่นมาก T_g มีค่าน้อย โซ่ที่ไม่ยืดหยุ่น T_g มีค่าสูง



polydimethylsiloxane
 $T_g -127^\circ\text{C}$

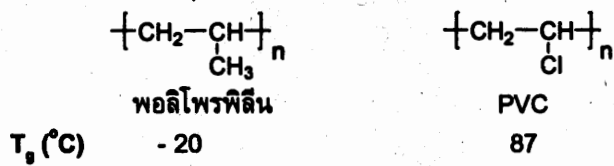
ยืดหยุ่นมาก



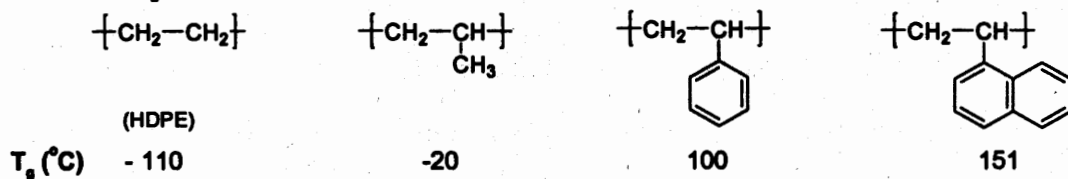
$T_g 429^\circ\text{C}$

ไม่ยืดหยุ่น

แรงระหว่างโมเลกุล: แรงที่แข็งแรง ทำให้ค่า T_g สูง เช่น PVC มี T_g สูงกว่าพอลิโพรพิลีน เพราะแรงระหว่างโมเลกุลแข็งแรงมากกว่า เนื่องจากไดโพลของพันธะมีขั้ว C-Cl



หมู่แทนที่: หมู่แทนที่ขนาดใหญ่ทำให้โมเลกุลหมุนช้าลง T_g จึงมีค่าสูง หมู่เกาะที่มีแขนงและหมู่เกาะซึ่งมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนมากทำให้ค่า T_g เพิ่มเช่นกัน เช่น

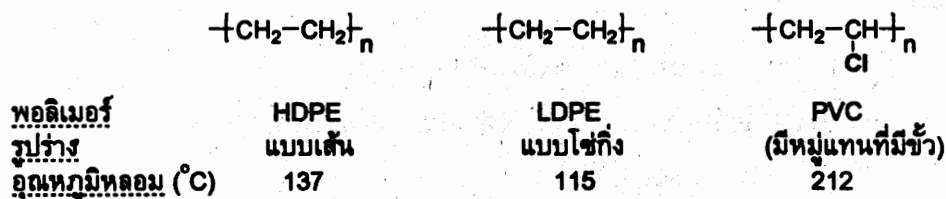


การเชื่อมข้าม: การเชื่อมข้ามระหว่างโซ่จำกัดการเคลื่อนที่และทำให้ค่า T_g สูง

14.4.2.2 อุณหภูมิหลอม (Melting Temperature; T_m)

สำหรับพอลิเมอร์สังเคราะห์จะศึกษาอุณหภูมิหลอมผลึกเฉพาะพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติก ขณะที่พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงมากกว่าเกิดการหลอม

อุณหภูมิหลอมผลึกเป็นอุณหภูมิที่ทำให้พอลิเมอร์หลอม เปลี่ยนสถานะจากของแข็งหรือยึดหยุ่นเป็นของเหลวหรือของไหล พบในบริเวณที่เป็นผลึก เกี่ยวข้องกับการสลายแรงระหว่างโมเลกุล ปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิหลอม ได้แก่ โครงสร้างทางเคมี ขนาดและรูปร่างของหมู่แทนที่ ขนาดของโมเลกุล ขนาดและจำนวนโซ่กิ่ง พอลิเมอร์ที่มีแรงระหว่างโมเลกุลแข็งแรง ได้แก่ พวกที่มีหมู่แทนที่ชนิดมีขั้วในแกนหลัก เช่น Cl, CN, OH ทำให้ค่า T_m สูง สำหรับจำนวนโซ่กิ่งถ้ามากทำให้โมเลกุลอยู่ห่างกันค่า T_m จึงลดลง



14.4.3 สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เป็นลักษณะเฉพาะซึ่งต่างไปจากโมเลกุลขนาดเล็ก โดยเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมพอลิเมอร์ภายใต้ความเค้น (stress) และความเครียด (strain) เป็นสิ่งที่บอกให้ทราบว่าพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะมีสมบัติต่างๆ ต่อไปนี้เป็นอย่างไร เช่น ความแข็งแรง (strength), ความแข็ง (hardness), ความเหนียว (toughness), การคงรูป (stiffness), ความตึง (tension), การยืด (elongation), โมดูลัส (modulus), การเฉือน (shear), การกดอัด (compression) เป็นต้น

14.5 พอลิเมอร์ที่ประยุกต์ใช้งานด้านการแพทย์

ประโยชน์สำคัญด้านหนึ่งคือการนำพอลิเมอร์มาใช้ในการรักษา ซึ่งต้องเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ ทำหน้าที่ได้เป็นอย่างดี และเสื่อมสภาพได้ทางชีวภาพ โดยย่อยสลายได้ตามธรรมชาติหรือโดยวิธีทางชีวภาพ เช่น เอนไซม์ หรือจุลชีพ แบ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติและพอลิเมอร์สังเคราะห์ โดยทำหน้าที่ในแง่ต่างๆ เช่น ทำข้อเทียม ไหมเย็บแผล เป็นสารยึดติด ช่วยระบบของการปล่อยตัวยา การรักษาฟัน

ในการลำเลียงผ่านเยื่อ พอลิเมอร์จะยึดกับเซลล์เยื่อบุผิวได้ควรมีสมบัติเฉพาะ เช่น น้ำหนักโมเลกุลสูง ขอบน้ำ เกิดพันธะไฮโดรเจนได้ และมีแรงดึงผิว พอลิเมอร์ประเภทนี้ช่วยลำเลียงยาผ่านเยื่อบริเวณต่างๆ เฉพาะแห่ง เช่น

พอลิเอสเทอร์ ได้แก่ PLGA หรือ poly(lactic-co-glycolic acid) เป็นพอลิเมอร์ร่วมระหว่างกรดไกลคอลลิก (glycolic acid) กับกรดแลคติก (lactic acid) ช่วยลำเลียงสารสเตียรอยด์ สารต้านมะเร็ง และสารปฏิชีวนะ

พอลิอะไมด์ เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ได้จากสิ่งมีชีวิต หาง่าย ราคาไม่แพง เช่น เจลาติน คอลลาเจน และแอลบูมิน

สำหรับพอลิเมอร์ที่ช่วยในเรื่องของฟันมีทั้งพอลิเมอร์ธรรมชาติ พอลิเมอร์สังเคราะห์ และวัสดุเชิงประกอบซึ่งเป็นพอลิเมอร์ผสมสารอนินทรีย์ที่มีอนุภาคขนาดเล็ก เป็นวัสดุอุดฟัน พอลิเมอร์ที่ใช้ทำฟันเทียมได้แก่ PMMA resin ซึ่งเหนียวและทนการแตกหัก

ข้อเทียม ใช้พอลิเมอร์เช่น UHMWPE ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ทนแรงกระแทกสูง และไหมเย็บแผล เช่น ไหมละลาย (absorbable suture) ได้แก่ พอลิเมอร์ของกรดไกลคอลลิก (PGA) และพอลิเมอร์ของกรดแลคติก (PLA)

แบบฝึกหัด บทที่ 14

- เป็นโมเลกุลโซ่ยาวที่อาจได้จากธรรมชาติ หรือสังเคราะห์ขึ้นมา โดยมีการเชื่อมโมเลกุลขนาดเล็กจำนวนมากเข้าด้วยกัน
 - (1) พลาสติก
 - (2) พอลิเมอร์
 - (3) กรดนิวคลีอิก
 - (4) กรดไขมัน
- โมเลกุลขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกันเป็นพอลิเมอร์ใช้แรงหรือพันธะชนิดใด
 - (1) แรงลอนดอน
 - (2) แรงระหว่างไดโพล
 - (3) พันธะไฮโดรเจน
 - (4) พันธะโคเวเลนต์
- ข้อใดเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์
 - (1) เซลลูโลส ลิพิด ในลอน
 - (2) เรซินอีพอกซี เซลลูโลสในเทรต คอลลาเจน
 - (3) เคฟลาร์ สเปนเด็กซ์ พอลิคาร์บอนเนต
 - (4) เบเคอไลต์ พอลิไซลอกเซน ไคโทแซน
- ข้อใดไม่ใช่พลาสติกโคมพอนด์
 - (1) พอลิเอทิลีน
 - (2) พอลิสไตรีน
 - (3) พอลิคาร์บอนเนต
 - (4) พอลิพรอพิลีน
- ข้อใดช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้โมเลกุลพอลิเมอร์
 - (1) การให้ความร้อน
 - (2) การเชื่อมข้าม
 - (3) แรงลอนดอน
 - (4) ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส
- เมื่อเกิดพอลิเมอร์แบบเติม...
 - (1) พันธะคู่มอนอเมอร์ยังอยู่ในพอลิเมอร์
 - (2) มีการเคลื่อนอิเล็กตรอนไปตามโซ่พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นได้
 - (3) พันธะคู่มอนอเมอร์ให้อิเล็กตรอนในการสร้างพันธะกับมอนอเมอร์โมเลกุลอื่น
 - (4) ถูกทุกข้อ
- ความแตกต่างระหว่าง HDPE และ LDPE คือข้อใด
 - (1) LDPE มีการเชื่อมข้ามในโมเลกุลพอลิเมอร์มากกว่า
 - (2) LDPE มีโซ่กิ่งมากกว่า
 - (3) LDPE เป็นพอลิเมอร์ชนิดเติม ส่วน HDPE เป็นพอลิเมอร์ชนิดควบแน่น
 - (4) เตรียมจากมอนอเมอร์ต่างชนิดกัน

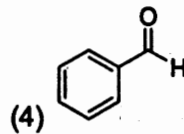
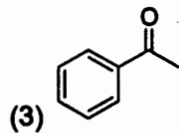
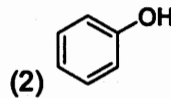
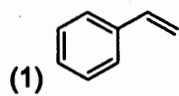
8. ถ้าได้นำเกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ แสดงว่า
- (1) พอลิเมอร์ที่ได้เป็นชนิดควบแน่น
 - (2) เป็นพอลิเมอร์แบบเติม
 - (3) มาจากกรดไดคาร์บอกซิลิก
 - (4) ปฏิกิริยาเกิดผ่านอนุมูลอิสระ
9. พอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการเติม มีส่วนที่สำคัญที่สุดในโครงสร้างโมเลกุลหน่วยย่อย คือ...

- (1) หมู่ตั้งอิเล็กตรอน
- (2) พันธะ C=C
- (3) หมู่ตั้งอิเล็กตรอน
- (4) ทั้ง 1, 2 และ 3

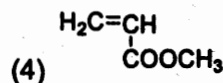
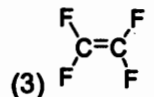
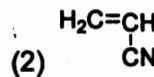
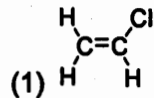
10. การเกิดพอลิเมอร์แบบแอนไอออน เกิดได้ดีกับแอลคีนที่มีหมู่แทนที่ที่พันธะคู่ต่อไปนี้ ยกเว้นข้อใด

- (1) $-C\equiv N$
- (2) $-CO_2CH_3$
- (3) $-CH(CH_3)_2$
- (4) $-COCH_3$

11. สารประกอบใดต่อไปนี้เมื่อรวมกันแล้วจะได้พอลิสไตรีน



12. เทฟลอน (PTFE) เกิดจากมอนอเมอร์ใด



13. พอลิเมอร์ยังไม่สิ้นสุด (living polymer) มักพบในปฏิกิริยาแบบใด

- (1) ปฏิกิริยาที่เกิดผ่านแอนไอออน
- (2) ปฏิกิริยาที่เกิดผ่านแคตไอออน
- (3) ปฏิกิริยาที่เกิดผ่านอนุมูลอิสระ
- (4) ปฏิกิริยาแบบโคออร์ดิเนชัน

14. พอลิเมอร์แบบขั้นได้แก่ข้อใด

- (1) เกิดจากมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันอย่างน้อย 2 หมู่ และมีการกำจัดโมเลกุลขนาดเล็ก
- (2) ถูกเปลี่ยนแปลงจากพอลิเมอร์ธรรมชาติโดยวิธีทางเคมี
- (3) เกิดจากมอนอเมอร์ที่มีพันธะคู่ในโมเลกุลโดยปฏิกิริยาการเติม
- (4) เป็นพอลิเมอร์ที่มีอะตอมไนโตรเจนหลัก (backbone) เป็นชนิดเดียวกัน

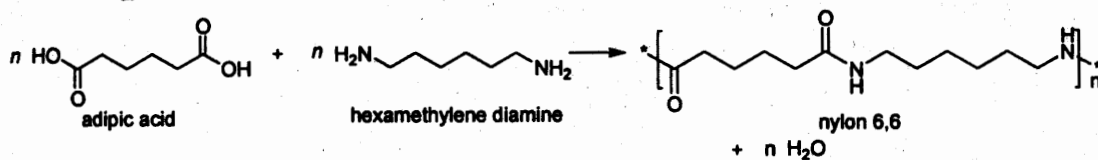
15. ข้อใดเป็นพอลิเมอร์แบบเติมที่เกิดจาก ethene.

- (1) PVC
- (2) Kevlar
- (3) polyethylene
- (4) PETE

16. Polyethylene เป็น

- (1) พอลิเมอร์แบบเติมของ ethyl ethanoate
- (2) พอลิเมอร์แบบควบแน่นของ ethene
- (3) ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว
- (4) ไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว

17. ปฏิกิริยาต่อไปนี้เป็น



- (1) การเกิดพอลิเมอร์แบบเติม
- (2) ปฏิกิริยาการเติม
- (3) ปฏิกิริยาการแทนที่
- (4) การเกิดพอลิเมอร์แบบขั้น

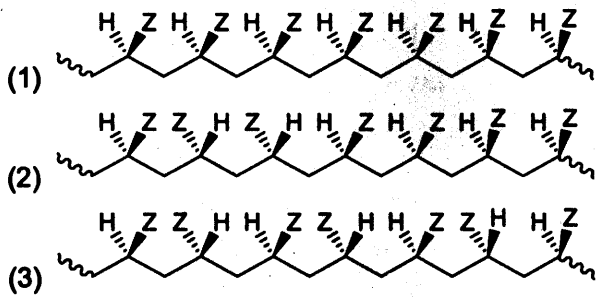
18. พอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง HOOC-COOH และ HOCH₂CH₂OH คือข้อใด

- (1) $\text{[O-C(=O)-C(=O)-CH}_2\text{CH}_2\text{-O]}_n$
- (2) $\text{[O-CH}_2\text{CH}_2\text{-O-C(=O)-C(=O)]}_n$
- (3) $\text{[O-C(=O)-O-O-CH}_2\text{CH}_2\text{-O]}_n$
- (4) $\text{[C(=O)-CH}_2\text{-O-C(=O)-CH}_2\text{-O]}_n$

19. n ในสูตรโครงสร้างของพอลิเมอร์ หมายถึงสิ่งใด

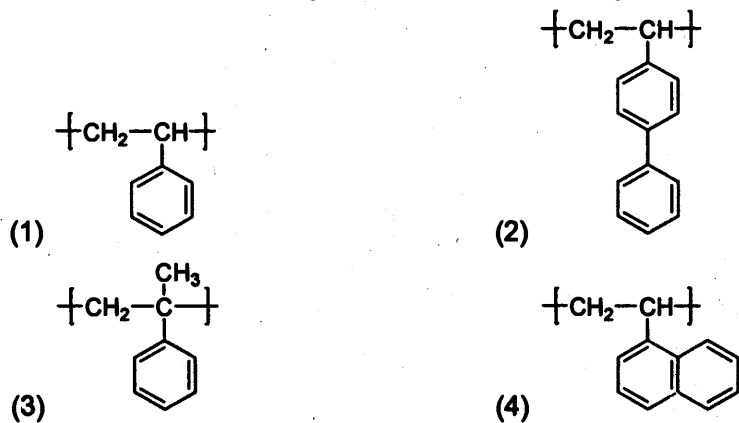
- (1) จำนวนหน่วยซ้ำในโซ่พอลิเมอร์
- (2) จำนวนมอนอเมอร์ที่กลายเป็นพอลิเมอร์
- (3) มวลโมเลกุลของพอลิเมอร์
- (4) ความยาวของโมเลกุล

20. โครงสร้างแบบใดไม่มีระเบียบ



(4) ไม่มีระเบียบทั้ง 3 โครงสร้าง

21. พอลิเมอร์ในข้อใดมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) สูงสุด



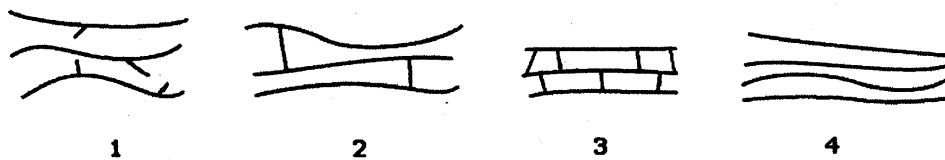
22. แรงระหว่างโมเลกุลชนิดใดทำให้สภาพการเป็นผลึกในพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น

- (1) แรงลอนดอน (2) พันธะไฮโดรเจน
 (3) แรงระหว่างไดโพล (4) พันธะไอออนิก

23. ลักษณะใดเป็นพอลิเมอร์แบบเทอร์โมเซต

- (1) โมเลกุลเป็นแบบเส้น
 (2) โมเลกุลมีโซ่กิ่ง
 (3) โมเลกุลมีการเชื่อมข้ามเล็กน้อย
 (4) โมเลกุลมีการเชื่อมข้ามมาก

24. วัสดุยืดหยุ่นได้แก่พอลิเมอร์รูปร่างแบบใด



25. _____ ใช้หมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่เพื่อทำปฏิกิริยา

- | | |
|----------------------|--------------------------|
| (1) พอลิไวนิลคลอไรด์ | (2) พอลิเมอร์ชนิดควบแน่น |
| (3) ปฏิกิริยาการขจัด | (4) พอลิเมอร์เทอร์โมเซต |

26. _____ ใช้ทำถุงใส่ของ

- | | |
|----------------------|---------------------------|
| (1) พอลิไวนิลคลอไรด์ | (2) LDPE |
| (3) พอลิสไตรีน | (4) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต |

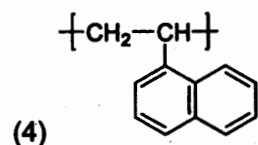
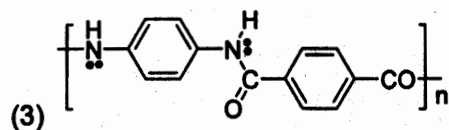
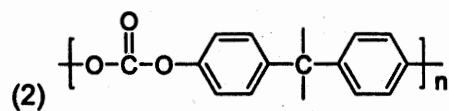
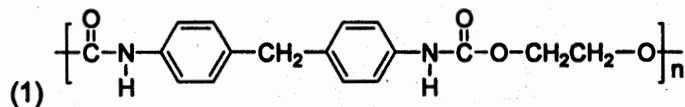
27. พอลิเมอร์ชนิดใดที่ไม่อยู่ในกลุ่มที่นำมารีไซเคิลและขึ้นรูปใหม่ (recycle polymers)

- | | |
|----------|----------|
| (1) PETE | (2) PVC |
| (3) PS | (4) PTFE |

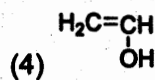
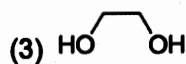
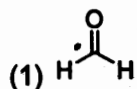
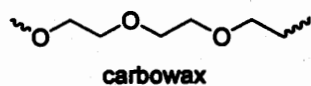
28. พอลิเมอร์ชนิดใดไม่มีคาร์บอนในแกนหลัก

- | | |
|------------------|-----------------------|
| (1) epoxy resin | (2) silicone rubber |
| (3) polyurethane | (4) polyacrylonitrile |

29. ข้อใดเป็น aramid



30. พอลิเมอร์ต่อไปนี้เกิดจากมอนอเมอร์ในข้อใด



31. ตัวเลือกใดเป็นพอลิเมอร์แบบเติมทุกชนิด
- (1) พอลิเอทีลีน, PVC, ไนลอน
 - (2) พอลิโพรพิลีน, PVC, PETE
 - (3) polyacrylonitrile, พอลิเอทีลีน, พอลิสไตรีน
 - (4) พอลิสไตรีน, PVC, ไนลอน
32. พอลิเมอร์ของไวนิลแอลกอฮอล์ ($H_2C=CH-OH$) มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 150,000 จำนวนเฉลี่ยของมอนอเมอร์ต่อโมเลกุลพอลิเมอร์ใกล้เคียงข้อใด
- (1) 1500
 - (2) 2750
 - (3) 3000
 - (4) 3400
33. ตัวเลือกใดทำให้ความแข็งของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น
- (1) มีโซ่กิ่งจำนวนมาก
 - (2) โซ่พอลิเมอร์เป็นโซ่สั้นๆ
 - (3) โซ่พอลิเมอร์จัดตัวเป็นระเบียบมาก
 - (4) แรงระหว่างโซ่เป็นแรงอย่างอ่อน
34. พอลิเมอร์ชนิดใดเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำขวดรีเอเจนต์น้อยที่สุด
- (1) HDPE
 - (2) พอลิสไตรีน
 - (3) พอลิโพรพิลีน (ไอโซแทกติก)
 - (4) ไนลอน6,6
35. อักษรย่อของพอลิเมอร์ชนิดใดกำกับด้วยรหัสรีไซเคิล ต่อไปนี้



- (1) LDPE
- (2) PTFE
- (3) PETE
- (4) PMMA