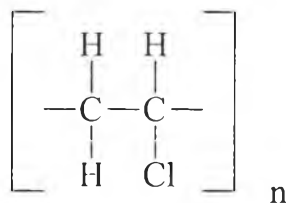


## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC)



โพลีเมอร์ชนิดนี้เตรียมได้ในห้องปฏิบัติการตั้งแต่ปี ค.ศ.1872 แต่ยังไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เนื่องจากปัญหาการสลายตัวจากการหลอมเพื่อจะขึ้นรูปแบบต่างๆ จนกระทั่งปี ค.ศ.1928 ได้เริ่มมีผู้สนใจทางการค้า โดยบริษัท I.G. Farbenindustrie ของเยอรมัน Carbide&Carbon Chemical Corporation, และ E.I. du Pont de Nemours and Company ของอเมริกา โดยพบว่าถ้าผสมไวนิลอะซีเตตลงไปเป็นโคโพลีเมอร์แล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถผ่านกระบวนการแปรรูปได้โดยไม่สลายตัว และในปี ค.ศ.1930 บริษัท B.F. Goodrich Chemical Company ของอเมริกา พบว่าถ้าผสมของเหลวที่มีจุดเดือดสูง เช่น Tritolyl phosphate เป็นพลาสติกไซเซออร์ จะได้โพลีไวนิลคลอไรด์ที่มีคุณสมบัติดีขึ้น จากนั้นในปี ค.ศ.1933 จึงได้เริ่มผลิตในทางการค้าในเยอรมันและอเมริกา โพลีไวนิลคลอไรด์ที่เติมพลาสติกไซเซออร์ใช้ประโยชน์ได้มากกว่าโคโพลีเมอร์ ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 โพลีไวนิลคลอไรด์ใช้เป็นฉนวนหุ้มสายเคเบิลปริมาณสูงมาก ปัจจุบันใช้ทำท่อน้ำ ถังน้ำ ถูมือ ของเล่น ถ้วย ถาด ขวด ฯลฯ เป็นต้น

##### 2.1.1 กระบวนการผลิตโพลีไวนิลคลอไรด์

โพลีไวนิลคลอไรด์เกิดจากปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันของไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ โดยที่กระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชันในอุตสาหกรรมนิยมเตรียมโพลีไวนิลคลอไรด์ด้วยกระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชันโดยเรดิคัล อาจใช้กระบวนการแบบบัลค์หรือแบบสารละลาย หรือแบบแขวนลอยก็ได้ แต่นิยมแบบแขวนลอยมากที่สุดเพราะควบคุมง่าย ผลิตผลได้ออกมาเป็นเม็ดเล็ก ล้างและทำให้แห้งง่าย แบบบัลค์นั้นมีจุดอ่อนตรงที่มีความร้อนสูงมาก ได้ผลิตผลเปอร์เซ็นต์ต่ำ ปกติใช้เบนโซิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่ง ใช้อุณหภูมิประมาณ 58° C เวลาประมาณ 17 ชั่วโมง

โพลีเมอร์ที่ได้ไม่ละลายในโมโนเมอร์ ส่วนประกอบด้านล่างเป็นส่วนที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตแบบแขวนลอย

โมโนเมอร์ (VCM)	30-50	ส่วน
เจลาติน (Dispersing agent)	0.001	ส่วน
Trichorethylene (Modifier)	0.1	ส่วน
ตัวเริ่ม (Caproyl peroxide)	0.001	ส่วน
น้ำ	90	ส่วน

### 2.1.2 คุณสมบัติของโพลีไวนิลคลอไรด์

สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์พีวีซีเป็นเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะสายโซ่ตรง การที่มีคลอรีนอะตอมในสายโซ่ทำให้มีสมบัติต่างไปจากโพลีเอทิลีนเนื่องจากมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมากขึ้น จึงทำให้เพิ่มความแข็งแรงมากขึ้นเพราะมีสภาพชั่วคราวที่มีการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature:  $T_g$ ) และอุณหภูมิหลอมตัวผลึก (Melting temperature:  $T_m$ ) ประมาณ  $87^\circ\text{C}$  และ  $212^\circ\text{C}$  แต่ถ้าใส่พลาสติกไซเซออร์จะทำให้  $T_g$  ลดลง น้ำหนักโมเลกุล  $M_w$  อยู่ในช่วง  $100,000-200,000$ ,  $M_n = 45,000-64,000$  พีวีซีที่ได้ปกติไม่มีสี นอกจากจะเติมสีลงไป ลักษณะการเรียงตัวของคลอรีนมักจะเป็นแบบอะแทกติก ทำให้มีลักษณะความเป็นผลึกต่ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง ไม่ติดไฟ ทนต่อสารเคมี ไม่ละลายในตัวทำละลายชนิดไม่มีขั้ว แต่ถ้าเผากับสังกะสี (Zn) จะเกิดการดีคลอรีเนตคือขจัดคลอรีนออกไป และในกระบวนการแปรรูปซึ่งปกติใช้อุณหภูมิประมาณ  $150-200^\circ\text{C}$  อาจทำให้เกิดการย่อยสลายได้โดยเกิดการขจัด HCl ออกไปแล้วจะได้โพลีอื่น ดังนั้นจึงต้องเติมสเตบิไลเซอร์ เช่น  $(\text{C}_7\text{H}_{15}\text{COO})_2\text{Zn}$  ลงไปป้องกัน นอกจากนี้โดยทั่วไปยังมีสารอื่นๆ ที่ถูกผสมอยู่ใน พีวีซีเช่น พลาสติกไซเซออร์ Extender ฟิลเลอร์ สี สารหล่อลื่น เป็นต้น ทำให้พีวีซีที่นำไปใช้ไม่เหมาะกับการทำเป็นภาชนะบรรจุอาหาร เพราะอาจมีสารเจือปนเหล่านั้นหลุดออกมาและเป็นอันตรายต่อร่างกายได้ พีวีซีถูกนำไปผลิตเป็นท่อน้ำ ผนังเทียม ฉนวนหุ้มสายไฟ ขวด รองเท้า อุปกรณ์ทางการแพทย์ อุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ โฟม เบาะรถยนต์ เก้าอี้วมที่นอน เป็นต้น

## 2.2 สารเติมแต่งสำหรับโพลีไวนิลคลอไรด์ (Additives for polymers)

จากที่ได้กล่าวมาบ้างแล้วว่าโพลีเมอร์ที่นำไปใช้งานนั้น ถ้านำไปใช้เลยโดยไม่ได้ใส่สารเติมแต่งบางชนิดเข้าไป จะพบว่าโพลีเมอร์นั้นขาดความคงทนคือไม่เสถียรใช้ไปได้ไม่นานจะเกิดการย่อยสลายทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนไปในทางที่ไม่ต้องการ ในหัวข้อนี้จึงจะกล่าวถึงการใส่สารเติมแต่งลงไปโพลีเมอร์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของโพลีเมอร์ให้เหมาะสมและคงทนต่อการใช้งานมากขึ้น นอกจากนี้จะได้กล่าวรวมถึงสารเติมแต่งอื่น ๆ บางชนิดที่ช่วยทำให้สีสวยงามน่าใช้หรือบางชนิดช่วยปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสม เช่น ถ้าแข็งเกินไปก็ทำให้อ่อนลงได้หรือถ้าอ่อนเกินไปก็ทำให้แข็งแรงเพิ่มขึ้น เป็นต้น

### 2.2.1 แอนติออกซิแดนต์และสตาบิไลเซอร์ (Antioxidants and stabilizers)

โพลีเมอร์ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะเกิดการย่อยสลายได้ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือถูกแสงหรือถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนในอากาศ ดังรายละเอียดที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นในการนำโพลีเมอร์ไปใช้งานไม่ว่าจะในรูปของพลาสติก ยาง เส้นใย และกาว มักจะมีการผสมสารเติมแต่งเข้าไปในโพลีเมอร์ สารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปเพื่อต้านการออกซิไดซ์ เรียกว่า แอนติออกซิแดนต์ แต่ถ้าเป็น สตาบิไลเซอร์ที่ช่วยไม่ให้อายุสลายเวลาถูกแสง หรือความร้อน หรือพลังงานอื่น ๆ ก็คงเรียกสตาบิไลเซอร์อย่างเดิม แต่อาจเติมไปว่า สตาบิไลเซอร์สำหรับอะไร เช่น สตาบิไลเซอร์สำหรับความร้อน หรือสตาบิไลเซอร์สำหรับแสงอุลตราไวโอเล็ต เป็นต้น

แอนติออกซิแดนต์ถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกโดย คาดเวลล์ (Cadwell) วิงเคลแมน (Winkelman) และเกรย์ (Gray) คือ อะซีตอลดีไฮด์ แอนนิลีน (VGB) และแอลคิล-แอลฟา-แนฟทิลามีน (Agerite resin) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาของอะโรเมติกเอมีนกับอะลิฟาติกอัลดีไฮด์ซึ่งยังคงใช้อยู่ในขณะนี้ นอกจากนี้ก็ยังมีแอนติออกซิแดนต์อื่น ๆ ที่ใช้ในทางการค้าในปัจจุบันเช่นพวก เอมีน ฟีนอล ตัวอย่างเช่น Butylated hydroxytoluol (BHT) และ Fatty ester ของ Hindered phenol ซึ่งใช้ในผลิตภัณฑ์หุ้มห่ออาหาร

การใช้สารเคมีเป็นแอนติออกซิแดนต์นี้มีข้อควรคำนึง 2 ประการที่สำคัญ คือ ความเป็นพิษและการเกิดสี การใช้แอนติออกซิแดนต์เติมใส่ในโพลีเมอร์ที่จะต้องใช้งานเกี่ยวกับอาหารจะต้องได้รับการตรวจสอบอย่างละเอียดรอบคอบ และต้องได้รับอนุญาตจากสถาบันควบคุมมาตรฐานอาหาร หรือสถาบันที่เกี่ยวข้อง เช่น สำนักงานคณะกรรมการคุ้มครองผู้บริโภค และสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา ก่อน

แอนติออกซิแดนต์เหล่านี้เมื่ออยู่ในโพลีเมอร์ จะช่วยป้องกันการเกิดออกซิไดซ์ โดยจะทำปฏิกิริยากับโพลีเมอร์เรดิคัล (PO<sub>2</sub>) โดยให้อะตอมไฮโดรเจนไป แล้วตัวแอนติออกซิไดซ์เปลี่ยนเป็นเรดิคัลเอง แต่เป็นเรดิคัลที่เสถียรไม่เกิดปฏิกิริยาอีก

ปฏิกิริยาดังกล่าวมานี้ช่วยให้โพลีเมอร์หยุดเกิดการย่อยสลายต่อไป โพลีเมอร์ที่มีพันธะคู่มากจะมีโอกาสเกิดออกซิเดชันได้มากกว่าโพลีเมอร์ที่มีพันธะคู่น้อย การเติมสารแอนติออกซิแดนต์จึงต้องเติมในปริมาณที่แตกต่างกัน เช่น ถ้ามีพันธะคู่เพียง 4 คู่ ต่อพันธะเดี่ยว 1000 พันธะ ก็เติมแอนติออกซิแดนต์ประมาณ 0.1% ถ้ามีพันธะคู่มากขึ้นก็เพิ่มแอนติออกซิแดนต์ให้มากขึ้น

โพลีไวนิลคลอไรด์ซึ่งมักเกิดการย่อยสลายโดยการขจัด HCl ออกจากโมเลกุล การป้องกันให้ใช้สารพวกเกลือสบู่ของโลหะหนัก เช่น แบริยม แคดเมียม ตะกั่ว สังกะสี และแคลเซียม ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ HCl ได้ กลไกของปฏิกิริยาการย่อยสลายของโพลีไวนิลคลอไรด์ยังคงค่อนข้างไม่ชัดเจน ดังนั้นการป้องกันการย่อยสลายก็พยายามทำโดยหาทางจับ HCl ที่หลุดออกจากโมเลกุล การเติมสารพวกสบู่ของโลหะหนักลงไปช่วยให้โพลีไวนิลคลอไรด์เสถียรมากขึ้น พบว่าทนความร้อนได้สูงถึง 175°C เป็นเวลา 10-15 นาที นอกจากสเตบิลิเซเตอร์ที่เป็นสบู่ของโลหะหนักแล้วยังมีสารประกอบอื่นๆ ที่ใช้ได้ดีอีกเช่น สารประกอบออร์กาโน-ทิน สารประกอบอีพอกซี สารประกอบฟอสไฟต์ และฟีนอล เป็นต้น

พวกสเตบิลิเซเตอร์ที่ช่วยป้องกันการสลายตัวที่เกิดจากแสง โดยเฉพาะแสงจากดวงอาทิตย์ซึ่งเป็นแสงที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 300-400 นาโนเมตร สารที่จะช่วยป้องกันได้ดีควรจะเป็นสารที่ดูดกลืนแสงช่วงนี้ได้ดี และคายออกมาเป็นความร้อนต่ำๆ หรือแสงที่มีความยาวคลื่นสูงกว่าเช่นเป็นช่วงอินฟราเรด เป็นต้น พบว่า คาร์บอนดำสามารถดูดกลืนแสงอุลตราไวโอเล็ตได้ดีมาก และยังสามารถทำปฏิกิริยากับฟรีเรดิคัลที่อาจเกิดขึ้นได้ด้วย นอกจากนี้ก็ยังมีสารประกอบข้างล่างนี้ ที่สามารถดูดกลืนแสงอุลตราไวโอเล็ตได้ดีเช่นกันเนื่องจากมีพันธะคู่คอนจูเกต

## 2.2.2 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer)

พลาสติไซเซอร์เป็นสารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปในโพลีเมอร์เพื่อปรับปรุงให้มีคุณสมบัติดีขึ้น เหมาะสำหรับการใช้งาน โดยช่วยลดความแข็ง ทำให้แตกยากขึ้น โดยพลาสติไซเซอร์จะไปช่วยให้โมเลกุลของโพลีเมอร์เกิดการเคลื่อนไหวง่ายขึ้น ทำให้อุณหภูมิ T<sub>g</sub> ลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง จึงทำให้โพลีเมอร์ที่มีสมบัติแข็ง เปราะเหมือนแก้ว เปลี่ยนเป็นอ่อน ยืดหยุ่น และเหนียวขึ้น ใน

กรณีนี้ พลาสติกไซเซออร์ที่เติมลงไปทำปฏิกิริยากับโพลิเมอร์เกิดเป็นโคโพลิเมอร์ คือโมเลกุลของพลาสติกไซเซออร์เกิดพันธะโควาเลนต์กับโพลิเมอร์ กรณีเช่นนี้เรียก พลาสติกไซเซออร์ภายใน (Internal plasticizer) แต่ถ้าพลาสติกไซเซออร์ที่เติมลงไปไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เป็นเพียงส่วนผสมอยู่ในโพลิเมอร์ กรณีนี้เรียกพลาสติกไซเซออร์ภายนอก (External plasticizer)

พลาสติกไซเซออร์ที่ดีจะต้องรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับโพลิเมอร์ และต้องคงทน ไม่หลุดออกไปจากโพลิเมอร์ได้ง่าย ดังนั้นพลาสติกไซเซออร์ควรมีแรงดึงดูดกับโพลิเมอร์ได้คือมีสภาพขั้วส่วนการที่จะอยู่ได้คงทนก็ต้องมีความดันไอต่ำ และมีอัตราการซึมผ่านต่ำ จะได้ไม่หลุดออกจากโพลิเมอร์ได้ง่าย เพื่อให้ได้สมบัติทั้งสองอย่างดังกล่าวควรใช้พลาสติกไซเซออร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ ประสิทธิภาพของพลาสติกไซเซออร์อยู่ที่ว่าเปลี่ยนคุณสมบัติไปสู่สิ่งที่เราต้องการได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งอาจทำได้โดยการทดสอบหลายๆครั้ง จากการสังเกต ค่าอุณหภูมิ  $T_g$  ที่ลดลงหรือความหนืดของสารละลายโพลิเมอร์ในพลาสติกไซเซออร์ เป็นต้น ชนิดของพลาสติกไซเซออร์ที่ใช้กันอยู่แบ่งออกได้เป็นกลุ่มๆ ดังนี้

- ฟอสเฟตเอสเทอร์ ใช้มากที่สุดในบรรดาพลาสติกไซเซออร์ทั้งหมด สารตัวนี้มากกว่าครึ่งหนึ่งของพลาสติกไซเซออร์ทั้งหมดรวมกัน
- ฟอสเฟตเอสเทอร์ ที่สำคัญๆคือ Tricresyl phosphate พลาสติกไซเซออร์พวกนี้นอกจากช่วยทำให้เกิดความยืดหยุ่นแล้วยังช่วยป้องกันการติดไฟได้ด้วย ทำให้โพลิเมอร์มีสมบัติไม่ติดไฟ
- สารประกอบพวกอะดิเปต อะซีเลต โอลิเลต และ ซีบาเคต ซึ่งมักใช้มากในไวนิลเรซิน ทำให้ยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำๆ
- พลาสติกไซเซออร์พวกอีพอกซี ซึ่งได้มาจากธรรมชาติ พวกนี้จะใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิตเพราะราคาไม่แพง แต่ไม่ค่อยดีนัก ต้องใช้ผสมกับพลาสติกไซเซออร์ชนิดอื่นๆด้วย จึงเรียก พลาสติกไซเซออร์ทุติยภูมิ
- เอสเทอร์ของกรดไขมันจากธรรมชาติ พวกนี้จะใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิตเพราะราคาไม่แพง แต่ไม่ค่อยดีนัก ต้องใช้ผสมกับพลาสติกไซเซออร์ชนิดอื่นๆ ด้วย จึงเรียกพลาสติกไซเซออร์ทุติยภูมิ
- อนุพันธ์ไกลคอล กลุ่มนี้นิยมใช้เป็นตัวหล่อลื่น และลดการติดแบบ และนิยมใช้กับโพลิไวนิลแอลกอฮอล์
- สารประกอบพวกซัลโฟนาไมด์ นิยมใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์ กับเซลลูโลสเอสเทอร์ ฟีนอลิกเรซิน อะมิโนเรซิน และพลาสติกพวกเอไมด์และโปรตีน

- สารประกอบไฮโดรคาร์บอนและอนุพันธ์ของไฮโดรคาร์บอน นิยมใช้เป็นพลาสติกไฮเซอรัทวอื่น เหมือนสารประกอบกลุ่มที่ 5 เป็นพลาสติกไฮเซอรัทวอื่นเหมือนกัน

### 2.2.3 ฟิลเลอร์ (Fillers)

ฟิลเลอร์ (Fillers) พวกฟีนอลิกและอะมิโนเรซิน เป็นโพลีเมอร์ที่มักจะมีการผสมสารเติมแต่งลงไปด้วยเสมอ สารเติมแต่งดังกล่าวได้แก่พวกเส้นใยเซลลูโลสสั้นๆ ผงไมกาและแอสเบสตอส เป็นต้น จุดประสงค์หลักของการเติมสารเติมแต่งชนิดนี้คือการลดต้นทุน นอกจากนั้นแล้วสารเติมแต่งเหล่านี้ช่วยให้โพลีเมอร์มีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้ทนต่อแรงกระแทกแตกได้ดี ทนต่อแรงดึง แรงกดได้ดีความต้านทานการฉีกขาดสูง ทนความร้อนมากขึ้น เรียกสารเติมแต่งพวกนี้ว่าฟิลเลอร์พวกโพลีเอสเทอร์เรซินมักใช้ใยแก้วเป็นฟิลเลอร์ เทอร์โมพลาสติกที่อ่อนเช่นคูมาโรน-อินดีนและไฮโดรคาร์บอนเรซิน นิยมใช้หินปูนหรือทรายเป็นฟิลเลอร์ ในอีลาสโตเมอร์นิยมใช้คาร์บอนดำเป็นฟิลเลอร์มากกว่าตัวอื่น แต่ก็มีใช้พวกซิลิกา และซิลิเกตด้วยในบางกรณี

การกระทำของฟิลเลอร์ต่อโพลีเมอร์ยังไม่ทราบแน่ชัด แต่เข้าใจว่าฟิลเลอร์จะเป็นตัวช่วยขจัดความเคลื่อนไหวภายในโมเลกุลของโพลีเมอร์ ให้อยู่นิ่งมากขึ้น จึงทำให้โพลีเมอร์แข็งแรงทนทานมากยิ่งขึ้น

### 2.2.4 สารเติมแต่งอื่นๆ

2.2.4.1 สารที่ให้สี (Colorants) สารที่ใช้เป็นตัวให้สีในโพลีเมอร์มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ สารอนินทรีย์ตัวอย่างเช่น ดีเตเนียมไดออกไซด์ แบเรียมซัลเฟต ซึ่งให้สีขาว สารประกอบของแคดเมียมให้สีแดงและเหลือง เหล็กออกไซด์ให้สีเหลือง เป็นต้น ส่วนสีที่เป็นสารอินทรีย์ ได้แก่ สารพวกเอโซ (Azo) มีสีเหลืองหรือแดง ฟธอโลไซยานีน (Phthalocyanine) สีน้ำเงินและเขียว ควินาคริโดน (Quinacridone) สีแดงและม่วง เป็นต้น

ปัจจุบันนิยมผสมสีให้โพลีเมอร์ด้วยเม็ดสีสำเร็จรูป (Masterbatch) เม็ดสีสำเร็จรูปทำได้จากการผสมระหว่างสีผง (Pigment) เปอร์เซนต์สูงกับโพลีเมอร์เข้าด้วยกันโดยเครื่องจักรที่มีแรงรีดสูง เพื่อให้สีละลายในตัวโพลีเมอร์อย่างทั่วถึง แล้วรีดออกมาเป็นเส้นเล็ก ๆ ผ่านเครื่องตัดตัดออกมาเป็นท่อนอย่างสม่ำเสมอ โดยทั่วไปเม็ดสีสำเร็จรูปจะใช้สีอินทรีย์ผสมกับสีอนินทรีย์ เพราะสีอินทรีย์จะมีความเข้มข้น สีสดใสมากกว่า แต่ความทึบแสงจะน้อย ในขณะที่สีอนินทรีย์มีความเข้มของสีดำ มีลักษณะที่เรียกว่าสีด้านไม่สดใส แต่ความทึบแสงมีมาก ดังนั้นจึงใช้ทั้งสอง

ชนิดผสมกัน จะได้สีที่สดใส และทึบแสงได้ดี ส่วนสีย้อม (Dyes) ซึ่งละลายในตัวทำละลาย จะใช้กับพวกพลาสติก เช่น โพลีสไตรีน โพลีเมธิลเมทาไครเลต และ ABS เป็นต้น

สีที่จะนำมาใช้กับโพลีเมอร์ที่จะใช้ทำภาชนะหีบห่อบรรจุอาหาร ของเด็กเล่น หรือเครื่องอุปโภค บริโภค จะต้องเป็นสีที่ไม่หลุดง่าย ทนความร้อน ทนต่อสารละลายสีดังกล่าวมักจะทำให้สีอินทรีย์ที่มีความบริสุทธิ์มาก เพราะต้องสัมผัสกับอาหารโดยตรง จะต้องปราศจากธาตุโลหะหนัก ถ้ามีก็ต้องต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

2.2.4.2 สารที่ช่วยหน่วงเหนี่ยวการติดไฟ (Flame retardants) ปกติโพลีเมอร์ประเภทไฮโดรคาร์บอน สามารถติดไฟได้เหมือนพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ เช่นเดียวกัน การนำโพลีเมอร์ไปใช้งานจึงมักผสมสารเติมแต่งบางตัวลงไปช่วยหน่วงเหนี่ยวการติดไฟ ทำให้ติดไฟยาก สารประกอบที่ใช้กันมากที่สุดได้แก่ แอนติโมนีไตรออกไซด์ (Antimony trioxide) โดยจะต้องใช้ผสมกับสารที่มีคลอรีนด้วยเพื่อให้เกิดเป็นสารประกอบแอนติโมนีออกซีคลอไรด์ (Antimony oxychloride) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ป้องกันหรือหน่วงเหนี่ยวการติดไฟได้ดีมาก นอกจากนี้ยังพบว่าสารประกอบอนุพันธ์ของแอนติโมนีอื่นๆ ฟอสเฟตเอสเทอร์ที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์ ก็สามารถใช้เป็นตัวหน่วงเหนี่ยวการติดไฟได้ดีเช่นกัน โดยเฉพาะใช้มากกับพวกไวนิลเรซิน กลไกการควบคุมเชื้อเพลิงที่ระเหยง่ายไม่ให้มีผลต่อการติดไฟได้ ก็คือเกิดการขัดขวางการเคลื่อนผ่านของความร้อน ทำให้เชื้อเพลิงที่จะติดไฟได้รับพลังงานความร้อนต่ำ หรืออาจเติมเรดดิคัลที่เหมาะสมเข้าไปหยุดปฏิกิริยาที่จะเกิดการลุกไหม้

สารที่ช่วยหน่วงเหนี่ยวการติดไฟที่กล่าวมานั้นจัดเป็นตัวหน่วงเหนี่ยวภายนอก บางครั้งอาจจะพบตัวหน่วงเหนี่ยวภายใน คืออยู่ภายในโมเลกุลของโพลีเมอร์ด้วยเลย เช่น โพลีเอสเทอร์ที่ได้จาก Chlorendic anhydride, Tetrabromophthalic anhydride หรือ Phosphate polyols หรืออีพอกซีเรซินที่ได้จาก Tetrabromobisphenol A โพลีเมอร์ดังกล่าวบรรจุ คลอรีน หรือโบรมีน หรือฟอสฟอรัส อยู่ภายในโมเลกุล และช่วยหน่วงเหนี่ยวการติดไฟได้

2.2.4.3 สารที่ช่วยหล่อลื่น (Lubricants) โพลีเมอร์ที่ผลิตไปใช้งานเป็นเส้นใยจำเป็นต้องใส่สารที่ช่วยหล่อลื่น เพื่อลดแรงเสียดทานที่จะเกิดในขณะถูกรีดออกจากเครื่อง สารหล่อลื่นที่ใช้กันได้แก่น้ำมันพืช เกลีสของกรดสเตียริก หรือเอไมด์ หรือผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม เป็นต้น สารที่ช่วยหล่อลื่นนี้มักใส่ลงในโพลีเมอร์ก่อนจะผ่านขบวนการแปรรูป ปกติใช้ปริมาณไม่มากนัก อาจจะประมาณ 0.05-0.5% พวกน้ำมันพืชมีข้อดีที่กำจัดออกได้ง่ายด้วยกระบวนการ

ชะพอนิฟิเคชัน (Sponification) สารที่ช่วยหล่อลื่นที่ดีที่สุดควรละลายน้ำได้ เช่น โพลีแอลคิลีนไกลคอล สารที่ช่วยหล่อลื่นน้ำยังมีหน้าที่สำคัญในการช่วยลดการเกิดประจุไฟฟ้าสถิต ในเส้นใยได้ด้วย ในกรณีที่เส้นใยไม่ดูดความชื้นเลยจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าสถิต บนผิวหน้าโพลีเมอร์ สารที่ช่วยหล่อลื่นจะช่วยดูดความชื้นได้บ้าง ทำให้ไม่เกิดประจุไฟฟ้าสถิต การเกิดประจุไฟฟ้าสถิตบนผิวหน้าโพลีเมอร์จะทำให้มีฝุ่นละอองมาเกาะสกปรก จึงไม่ควรให้เกิด การใช้สารที่ป้องกันการเกิดประจุไฟฟ้าสถิต (Antistatic agents) อย่างเดียวสารนั้นจะต้องมีสมบัติดูดความชื้นได้ เช่น พวกเอมีน ( $\text{RNH}_2$ ) ซึ่งจะใช้ผสมพลาสติกเวลาผ่านกระบวนการแปรรูป สารที่ช่วยหล่อลื่นในโพลีเมอร์ที่ผลิตเป็นแผ่นฟิล์มเรียกว่าตัวแอนติบล็อก (Antiblock agents) ซึ่งจะช่วยให้แผ่นฟิล์มติดกันเวลาวางซ้อนกันจำนวนมาก ๆ และช่วยลดแรงเสียดทานของผิวหน้า ตัวอย่างสารที่ใช้เป็นตัวแอนติบล็อก เช่น ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

### 2.3 การเสื่อมสภาพ (Polymer degradation)

การย่อยสลายที่เกิดในโพลีเมอร์ มีผลให้น้ำหนักโมเลกุลในสายโซ่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากการสูญเสียตัวพลาสติกไซเซอร์เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไปในทางที่ไม่ดีทั้งสิ้น เราอาจแยกตัวการที่ทำให้เกิดการย่อยสลายในโพลีเมอร์ได้เป็น 2 กลุ่มคือ

กลุ่มที่ 1 เป็นตัวการทางด้านพลังงาน แบ่งออกเป็น

- พลังงานจากความร้อน
- พลังงานกล
- พลังงานจากรังสี

กลุ่มที่ 2 เป็นตัวการทางเคมี แบ่งออกเป็น

- การเกิดไฮโดรลิซิส
- การเกิดออกซิเดชัน
- การเกิดปฏิกิริยาอื่น ๆ

ตัวการแต่ละชนิดมีผลต่อการเกิดการย่อยสลายของโพลีเมอร์ ดังนี้

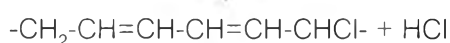


### 2.3.1 การย่อยสลายโดยความร้อน (Thermal degradation)

โพลีเมอร์ที่ใช้งานกับอุณหภูมิสูงๆ จะเกิดการย่อยสลาย โดยสายโซ่โมเลกุลจะแตกออกหรือขาด ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงลักษณะของการย่อยสลายอาจเกิดได้ 2 ลักษณะคือ

- การย่อยสลายแบบสุ่ม (Random degradation) มักเกิดกับโพลีเมโรเลฟินแบบควบแน่น การแตกออกของสายโซ่จะเกิดที่จุดใด ๆ ก็ได้ในสายโซ่โพลีเมอร์ คือมีโอกาสเกิดการแตกออกได้เท่า ๆ กันทุกจุดไม่แน่นอน ส่วนที่เหลือจะยังคงใหญ่กว่าโมโนเมอร์

- เกิดดีโพลีเมโรเลฟิน (Depolymerisation) หรืออาจเรียกว่า Unzipping คือโมโนเมอร์จะหลุดออกทีละ 1 หน่วยจากสายโซ่โมเลกุล มักเกิดกับโพลีเมอร์ที่ได้จากโพลีเมโรเลฟินแบบรวมตัว ตัวอย่างเช่นถ้าให้ความร้อนกับโพลีเมธิลเมธาไครเลตสูงๆ ในบรรยากาศของไนโตรเจนจะได้โมโนเมอร์กลับคืนมาเกือบ 99% แสดงว่ากรณีนี้เกิดโพลีเมโรเลฟินเท่ากับอัตราการเกิดดีโพลีเมโรเลฟิน เพราะฉะนั้นถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้ ปฏิกริยาจะเกิดย้อนกลับเนื่องจากอัตราการเกิดดีโพลีเมโรเลฟินสูงกว่า อุณหภูมิซิลลิงของโพลีเมอร์แต่ละตัวจะแตกต่างกันไป เช่นของโพลีเมธิลเมธาไครเลต  $T_c = 130^\circ \text{C}$  โพลีสไตรีนมีอุณหภูมิ  $T_c$  ประมาณ  $150^\circ \text{C}$  แต่พบว่าโพลีสไตรีน เวลาเกิดดีโพลีเมโรเลฟินจะมีปฏิกริยาข้างเคียงเกิดด้วย ทำให้ได้โมโนเมอร์กลับมาประมาณ 60% และได้ผลิตภัณฑ์อื่นปะปนมาเช่น ถ้าถ่านโพลีเมอร์บางตัวเช่นโพลีโพรพิลีนจะเกิดการย่อยสลายเร็วขึ้นถ้ามีออกซิเจน ดังนั้นเวลาผ่านกระบวนการแปรรูปซึ่งจำเป็นต้องใช้ความร้อน อาจเกิดการย่อยสลายได้จึงต้องผสมแอนติออกซิแดนต์ (Antioxidant) เข้าไปในโพลีเมอร์ด้วย โพลีไวนิลคลอไรด์จะเกิดการย่อยสลายที่ต่างไปจากตัวอื่น ๆ คือแทนที่จะได้โมโนเมอร์ออกมา กลับได้เป็นไฮโดรเจนคลอไรด์ ถ้าอุณหภูมิประมาณ  $100^\circ \text{C}$



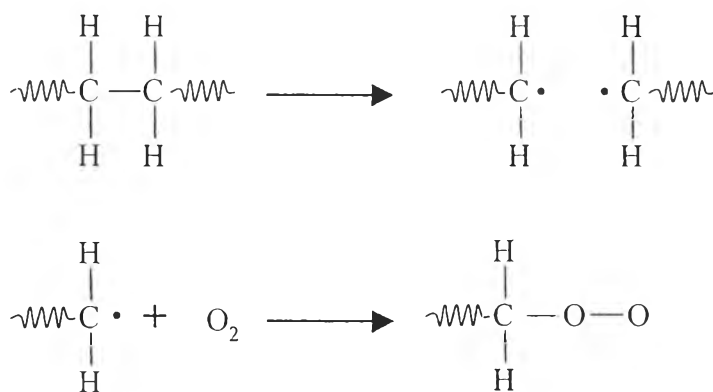
ทำให้ได้สายโซ่โมเลกุลไม่อิ่มตัวเพิ่มขึ้น สีจะเปลี่ยนจากเหลืองไปเป็นสีส้ม และแดงจนกระทั่งดำในที่สุด

### 2.3.2 การย่อยสลายโดยพลังงานกล (Mechanical Degradation)

ในโพลีเมอร์ที่มีสายโซ่ยาวๆ บางครั้งถ้าได้รับแรงกระทำจากภายนอกอาจทำให้เกิดการย่อยสลายได้ ซึ่งเป็นผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง ตัวอย่างเช่นเมื่อโพลีเมอร์ได้รับแรงกระทำด้วยอัตราการเลื่อนไหลสูงไม่ว่าจะอยู่ในสถานะสารละลายหรือของแข็งก็ตามทำให้เกิดการฉีกขาดได้

ในยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึง  $5 \times 10^5$  จะมีความเหนียวมากจนไม่สามารถผ่านกระบวนการแปรรูปได้ และจะผสมสารเติมแต่งและตัวทำให้เกิดร่างแห (Curing) ก็ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงต้องนำยางนี้ไปผ่านกระบวนการหนีบด้วยลูกกลิ้งเหล็กหนัก ๆ ด้วยอัตราการหมุนที่แตกต่างกันไป จะได้ผลิตภัณฑ์ที่อ่อนนิ่มกว่าเดิม สามารถผสมสารเติมแต่งได้ง่ายขึ้น กระบวนการดังกล่าวนี้อาจจะทำให้สายโซ่โมเลกุลสั้นลงเพราะผลของแรงกระทำซึ่งเป็นพลังงานกล ทำให้มีความเหนียวลดลง และการย่อยสลายนี้จะเกิดเร็วขึ้นถ้ามีตัวออกซิไดซ์ เช่น ออกซิเจนอยู่ด้วย

ที่แตกต่างกันไป จะได้ผลิตภัณฑ์ที่อ่อนนิ่มกว่าเดิม สามารถผสมสารเติมแต่งได้ง่ายขึ้น กระบวนการดังกล่าวนี้อาจจะทำให้สายโซ่โมเลกุลสั้นลงเพราะผลของแรงกระทำซึ่งเป็นพลังงานกล ทำให้มีความเหนียวลดลง และการย่อยสลายนี้จะเกิดเร็วขึ้นถ้ามีตัวออกซิไดซ์ เช่น ออกซิเจนอยู่ด้วย



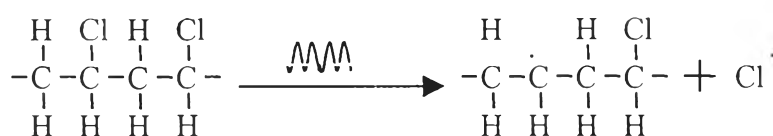
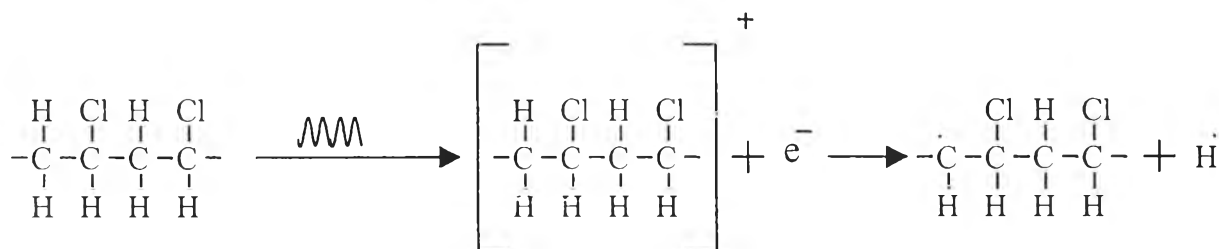
โพลีเมอร์ที่อยู่ในสถานะเป็นสารละลาย เมื่อได้รับพลังงานกลจะเกิดการย่อยสลายได้เช่นกัน เช่น ถ้ากวนแรง ๆ จะพบว่าความเหนียวของสารละลายลดลง หมายถึงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยลดลง หรือการผ่านคลื่นอุลตราโซนิกเข้าไปในสารละลายของโพลีเมอร์ ก็จะมีผลเช่นเดียวกัน การผ่านสารละลายเข้าไปในท่อเล็ก ๆ ด้วยแรงกระทำที่มีอัตราการเลื่อนไหลสูง ทำให้เกิดการย่อยสลายได้เช่นเดียวกัน

### 2.3.3 การย่อยสลายโดยพลังงานจากรังสี (Radiation degradation)

โพลีเมอร์ที่นำไปใช้งานส่วนมากจะต้องถูกแสงเกือบทั้งนั้น เพราะฉะนั้นโอกาสเกิดการย่อยสลายโดยพลังงานจากรังสีจึงมีมากทีเดียว รังสีดังกล่าวอาจทำให้เกิดการกระตุ้น (Exciting) หรืออาจทำให้เกิดการไอออไนซ์ซึ่งเรียกว่ารังสีพลังงานสูง กรณีแรกพลังงานมีเพียงพอที่จะรื้อให้อิเล็กตรอนย้ายไปอยู่ในออร์บิทัลใหม่ที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเดิม ซึ่งอาจนำไปสู่การแตกออกของพันธะระหว่างอะตอม แต่อะตอมที่เกี่ยวข้องจะไม่มีการสูญเสียหรือรับอิเล็กตรอน ทำให้เกิดฟรีเรดิคัลแต่ถ้าพลังงานสูงขึ้นจะทำให้มีโอกาสเกิดการย้ายอิเล็กตรอนออกจากอะตอม ทำให้เกิดการไอออไนซ์ได้เป็นไอออน

รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มาจากดวงอาทิตย์ สามารถทำให้เกิดการร้าวได้ เพียงความยาวคลื่นขนาด 350 นาโนเมตร. ก็มีพลังงานเพียงพอที่จะสลายพันธะระหว่างคาร์บอน แล้วเกิดเรดิคัลขึ้น จากนั้นก็อาจเกิดปฏิกิริยาดีโพลีเมอไรเซชัน หรืออาจเกิดการเชื่อมโยงแบบร่างแหก็ได้ ถ้าเกิดดีโพลีเมอไรเซชันก็ทำให้โพลีเมอร์อ่อนลง ถ้าเกิดการเชื่อมโยงแบบร่างแห ก็ทำให้โพลีเมอร์แข็งขึ้น ซึ่งล้วนแต่ทำให้โพลีเมอร์ที่ใช้งานอยู่มีคุณสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม และเป็นไปในทางที่ไม่ต้องการ ทำให้ผิดเปราะและแตกกระแหง โพลีเมอร์จะเกิดการย่อยสลายได้เร็วมากถ้าถูกแสงแดด ขณะที่โพลีเมธิลเมทาไครเลตจะคงทนมากกว่าส่วนพวกที่ใช้เป็นสีหรือแผ่นฟิล์ม การย่อยสลายจะทำให้ค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีเหลือง และนาน ๆ ไปจะหลุดออกมาเป็นผง

ส่วนรังสีที่มีพลังงานสูง ๆ โดยปกติจะไม่พบ นอกจากทำการศึกษาวิจัย เช่นการให้รังสีบีตา โดยอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เร็ว หรือรังสีแกมมา จะเกิดการไอออไนซ์สายโซ่ที่เกิดไอออนอาจขจัดไฮโดรเจนออกไปได้สายโซ่เรดิคัล แล้วสายโซ่เรดิคัลอาจจับคู่เกิดโครงสร้างแบบร่างแห หรืออาจเกิดการย่อยสลายอีกก็ได้ แล้วแต่ชนิดของโพลีเมอร์ เช่น โพลีเอทิลีนจะเกิดโครงสร้างแบบร่างแหมากกว่า แต่โพลีเมอร์อื่น ๆ ส่วนใหญ่เกิดการย่อยสลายไปเรื่อย ๆ



เมื่อโพลิเอทีลีนถูกแสง จะเกิดโครงสร้างแบบร่างแหนั้น ปริมาณโครงร่างแหจะเพิ่มตามปริมาณการฉายแสง ผลอันนี้จะทำให้อุณหภูมิจุดอ่อนตัวของโพลิเอทีลีนสูงขึ้นและไม่หลอมแม้ว่าอุณหภูมิจะสูงเกินอุณหภูมิ  $T_m$  แต่มีสถานะคล้ายยาง สิ่งที่พบอีกอย่างหนึ่งเมื่อโพลิเอทีลีนถูกแสงก็คือดีกรีของความเป็นผลึกจะลดลง ซึ่งทดสอบได้ด้วยรังสีเอกซ์ โดย X-ray diffraction photograph

อันตรกิริยาของรังสีต่อโพลิเมอร์มีหลายประเภทขึ้นกับพลังงานของรังสีหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหล่านั้น อาจเริ่มจากไม่ปรากฏผลใดๆ เลยถ้าพลังงานต่ำมาก หรือเกิดสถานะกระตุ้นและเกิดเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) รวมเรียกรังสีประเภทนี้ว่า Non ionizing radiation หรือ Excitation radiation ตัวอย่างเช่น รังสี อัลตราไวโอเล็ต คลื่นวิทยุ เป็นต้น และอาจเกิดการแตกตัวเป็นไอออนในที่สุดถ้าพลังงานของรังสีมีค่ามาก เรียกรังสีที่มีพลังงานระดับนี้ว่า Ionizing Radiation เช่น รังสีแกมมา รังสีอัลฟา เป็นต้น สำหรับ พีวีซีเพียงระดับพลังงานของแสง อัลตราไวโอเล็ต ก็สามารถเป็นสาเหตุของปฏิกิริยาอันนำมาซึ่งการเสื่อมสภาพของ พีวีซีได้ ในแสงอาทิตย์เรามีรังสีที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 280-290 นาโนเมตร แต่รังสีที่พลังงานสูงกว่า(ความยาวคลื่นสั้น) ถูกดูดกลืนในบรรยากาศ เพราะฉะนั้นเราจึงถูกอาบด้วยแสงของพลังงานน้อยกว่า 100 กิโลแคลอรีต่อโมล ซึ่งก็ยังสูงกว่าระดับพลังงานที่ทำให้โมเลกุลของ พีวีซีเกิดการย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่ง (Disociation) นั่นคือมีผลต่อพันธะในโมเลกุลของพีวีซี

แต่โดยปกติ วัสดุจะไม่ดูดกลืนรังสีที่มีระดับพลังงานมากกว่าระดับที่ทำให้เกิดการแตกพันธะ(bond rupture) มากๆ ลักษณะจำเพาะของแสงความยาวคลื่นที่ถูกดูดกลืนโดยวัสดุที่ประกอบด้วยพันธะ C-Cl เช่น พีวีซีดูดกลืนรังสี อัลตราไวโอเล็ต ที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 210 นาโนเมตร (133) ส่วนรังสีที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 290 นาโนเมตร จะไม่ถูกดูดกลืนโดยพีวีซี

ดังนั้น อาจสรุปได้ว่า พีวีซีบริสุทธิ์ จะไม่เสื่อมสภาพโดยแสง อัลตราไวโอเล็ต แต่ที่บางครั้งปฏิกิริยาดังกล่าวจะมีผลต่อคุณสมบัติบางประการของพีวีซี เช่น สี คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties) เนื่องมาจากเหตุผลหลายประการ เช่น ความบริสุทธิ์ของวัสดุ พีวีซี(Impurities) ลักษณะการโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) วิธีการขึ้นรูป (Processing) เป็นต้น

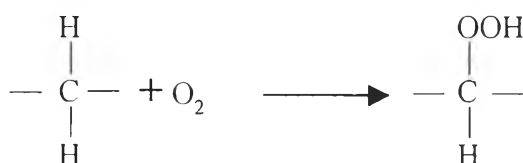
### 2.3.4 การย่อยสลายจากการเกิดไฮโดรลิซิส (Hydrolysis)

โพลีเมอร์ที่เกิดจากโพลีเมอไรเซชันแบบควบแน่นส่วนใหญ่จะถูกย่อยสลายได้โดยการไฮโดรไลซิส เช่นโพลีเอสเตอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสจะถูกเร่งให้เร็วขึ้นถ้ามีไฮโดรเจนไอออนหรือไฮดรอกซิลไอออนนอกจากนี้ตัวเร่งในธรรมชาติ เช่น เอนไซม์ ก็เป็นตัวเร่งให้เกิดไฮโดรลิซิสด้วยเช่นกัน พวกโพลีเมอร์ประเภทอะตอมต่างชนิดกันในสายโซ่

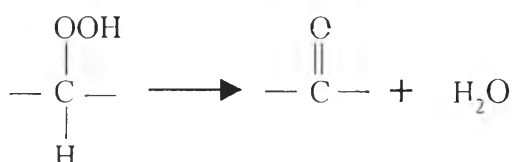
ตัวการที่ทำให้เกิดไฮโดรลิซิสคือน้ำซึ่งเป็นตัวการที่เราพบมากที่สุดในสภาพทั่วไป นอกจากนี้ที่อาจพบอีกคือแอลกอฮอล์ เรียกว่า แอลกอฮอล์ลิซิส (Alcoholysis) เช่นในโพลีซัคคาไรด์ ถ้าเกิดแอลกอฮอล์ลิซิส โดยมีกรดเป็นตัวเร่ง จะเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายได้สารที่มีหมู่สุดท้ายเป็นไกลโคไซด์ กับ ไฮดรอกซิล

### 2.3.5 การย่อยสลายจากการถูกออกซิไดซ์ (Oxidation)

การย่อยสลายที่เกิดในโพลีเมอร์ซึ่งมีผลมาจากการถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจน นับเป็นการย่อยสลายที่พบมากเช่นกันแต่กลไกของการเกิดออกซิเดชันในโพลีเมอร์ค่อนข้างจะซับซ้อนมาก และเปลี่ยนแปลงไปตามแต่ชนิดของโพลีเมอร์ จากงานวิจัยพบว่าออกซิเดชันที่เกิดในโพลีเมอร์พวกไฮโดรคาร์บอน เช่น โพลีเอทีลีน โพลีโพรพิลีน และยาง จะมีกลไกที่แตกต่างกันไปในกระบวนการออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว พิจารณาการเกิดออกซิเดชันในโพลีเอทีลีนก่อน เนื่องจากเป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว ถ้าไม่ได้ถูกแสงจากดวงอาทิตย์จะเกิดออกซิเดชันโดยออกซิเจนน้อยมาก ลักษณะที่ถูกออกซิไดซ์คือออกซิเจนจะสอดเข้าตรงระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับอะตอมไฮโดรเจน ได้ไฮโดรเปอร์ออกไซด์

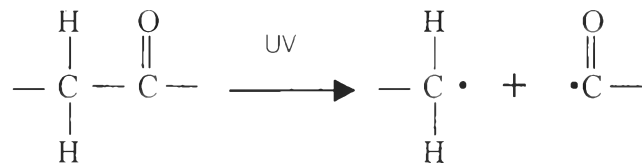


ถ้าหากอุณหภูมิสูงขึ้น ไฮโดรเปอร์ออกไซด์อาจจะสลายตัวได้หมู่คีโตน กับน้ำดังนี้



การเกิดออกซิเดชันลักษณะดังกล่าวนี้ไม่ทำให้เกิดการย่อยสลายภายในสายโซ่ เพียงแต่เกิดหมู่คีโตนขึ้นมาภายในสายโซ่โมเลกุล สีจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ความแข็งแรงจะลดน้อยลง

ในกรณีที่ถูกแสงอุลตราไวโอเล็ต ปฏิกิริยาจะซับซ้อนมากขึ้นหลังจากถูกออกซิไดซ์ และจะเกิดเรดดิคอลลายโซ่จะถูกย่อยสลาย



เรดดิคอลลที่เกิดจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนต่อไปอีกได้ เกิดการเร่งอัตโนมัติ อัตราการใช้ออกซิเจนจะเพิ่มตามเวลา โพลีเอทีลีนจะเปราะและมีรอยแตก แต่ถ้าไปพิจารณากรณีของโพลีโพรพิลีน จะแตกต่างไปจากโพลีเอทีลีน ถ้าโพลีโพรพิลีนที่บรรจุคาร์บอนอะตอมตติยภูมิ คาร์บอนอะตอมตติยภูมินั้นจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนได้มากกว่าคาร์บอนตัวอื่น จะได้ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะเกิดการแตกตัวออกเป็นเรดดิคอลล จากนั้นจะเกิดการแตกออกของสายโซ่ตามมาอย่างรวดเร็วดังนี้ เรดดิคอลลที่เกิดจากปฏิกิริยาการย่อยสลายนี้จะเกิดปฏิกิริยาอื่น ๆ ต่อไปอีก เช่น อาจไปดึงไฮโดรเจนจากโมเลกุลอื่น ทำให้โมเลกุลนั้นเกิดเรดดิคอลลขึ้นอีก กรณีของโพลีโพรพิลีนจะเกิดออกซิเดชันได้มากขึ้นถ้าได้รับแสงอุลตราไวโอเล็ต หรือได้รับอุณหภูมิสูงขึ้น

ในโพลีสไตรีน การเกิดออกซิเดชันจะเกิดได้ช้ากว่าในโพลีโพรพิลีน เนื่องจากการกีดขวางของวงเบนซีน จึงทำให้เสถียรกว่าโพลีโพรพิลีน ถ้าเป็นโพลีเมอร์ที่บรรจุพันธะคู่ เช่น ยาง จะมีกลไกในการเกิดออกซิเดชันเร็วกว่าพวกโพลีเมอร์ที่เป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว การย่อยสลายของสายโซ่โมเลกุลจะได้หมู่สุดท้ายเป็นอัลดีไฮด์ ในกรณีที่มีเรดดิคอลล ออกซิเจน พันธะคู่ระหว่างคาร์บอนอะตอม อยู่ด้วยกันจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ผลิตผลดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนต่อไปอีก ทำให้ได้เป็นโครงร่างแห โครงร่างแหที่เกิดคล้าย ๆ กับการเกิดวัลคาไนเซชันในยางโดยกำมะถัน การเกิดโครงร่างแหกับออกซิเจนดังกล่าว ทำให้ยางที่ใช้ไปนาน ๆ แข็งกระด้างตามที่เรพบกันเสมอ

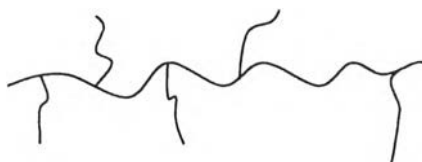
## 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของโพลีเมอร์

โครงสร้างโมเลกุลแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

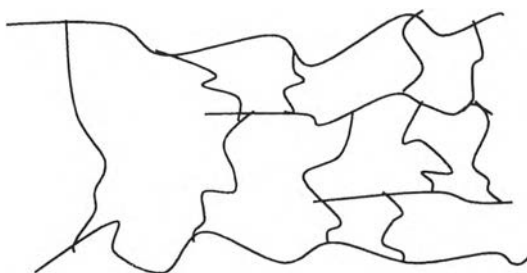
2.4.1 โพลีเมอร์แบบสายโซ่ตรง (Linear polymers) โพลีเมอร์ชนิดนี้ตัวอย่างเช่น พีวีซีจะมีสายโซ่โมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นยาวๆ ไม่มีกิ่งหรือสาขาออกไป มีลักษณะดังนี้



2.4.2 โพลีเมอร์แบบที่มีกิ่งหรือสาขา (Branched polymer) กลุ่มนี้สายโซ่โมเลกุลจะมีกิ่งก้านสาขาแยกออกไปจากสายโซ่หลัก มีลักษณะดังนี้



2.4.3 โพลีเมอร์แบบร่างแห (Network polymer) โพลีเมอร์กลุ่มนี้จะมีสายโซ่โมเลกุลเชื่อมโยงกันเป็นร่างแห อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าโพลีเมอร์แบบเชื่อมโยง (Crosslinked polymer) ก็ได้ มีลักษณะคล้ายตาข่าย



## 2.5 ส่วนประกอบพื้นฐานของฉนวนสายไฟฟ้า

ฉนวนสายไฟฟ้าทั่วไป

พีวีซี	100
สเตบิไลเซอร์ :	5 phr
พลาสติกไซเซอร์ :	52 phr
Plasticiser extender: chlorinated paraffin (50-52 % Cl)	32 phr
สารหล่อลื่นชนิดภายนอก :	0.5-1.0 phr
สารเพิ่มเนื้อ :	40 phr