

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎี

##### 2.1.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea Brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่น และมีเนื้อยางแห้ง (Dry rubber) ประมาณ 30% แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) และแยกน้ำออก จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60% เรียกว่า น้ำยางข้น (Concentrated latex) และมีการเติมสารแอมโมเนียลงไป เพื่อช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ในระยะเวลานานขึ้น

น้ำยางธรรมชาติเป็นสารไม่บริสุทธิ์เมื่อกรีดยจากต้นยางจะมีปริมาณของเนื้อยางแห้งอยู่ระหว่าง 25-45% สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด ระหว่าง 27-48% และส่วนประกอบอื่นๆ (ตาราง 2.1)

ตาราง 2.1 องค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก)
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content, TSC)	27-48
เนื้อยางแห้ง 25-45 (Dry Rubber Content, DRC)	25-45
สารพวกโปรตีน	1-1.5
สารพวกเรซิน	1-1.25
จีเอ็ม	สูงถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำ... ในปริมาณที่รวมแล้วเป็น	100

โดยทั่วไปส่วนประกอบของน้ำยางแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1. ส่วนของเนื้อยางแห้ง ประกอบด้วย อนุภาคยาง โปรตีน และไขมัน
2. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง ประกอบด้วย ส่วนที่เป็นน้ำ หรือเซรัม (Serum) ส่วนของลูทอยด์ และสารอื่นๆ

### 1. ส่วนของเนื้อยางแห้ง

1) อนุภาคยางถูกห่อหุ้มด้วยสารจำพวกไขมัน และโปรตีน โดยโปรตีนจะอยู่ชั้นนอกสุด อาจมีโลหะบางชนิด เช่นแมกนีเซียม และทองแดง ปะปนอยู่ปริมาณเล็กน้อยประมาณ 0.5%

2) ส่วนของโปรตีน ที่มีอยู่ในน้ำยางทั้งหมด (100%) แบ่งออกเป็น

- โปรตีนที่ห่อหุ้มอยู่ผิวรอบอนุภาคยางมีอยู่ประมาณ 25%
- โปรตีนที่อยู่ในชั้นน้ำ มีอยู่ประมาณ 50%
- โปรตีนที่ปะปนอยู่ในส่วนของสารลูทอยด์ มีอยู่ประมาณ 25%

- ในส่วนของโปรตีนที่อยู่บริเวณผิวของอนุภาคยางนี้ จะมีส่วนประกอบของกำมะถัน (Cystine disulphide linkage) อยู่ประมาณ 5% ดังนั้นขณะที่น้ำยางเกิดการเสียดสี จะเกิดการบดเน่า โดยโปรตีนในส่วนนี้จะสลายตัวให้สารประกอบพวก ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารเมอร์แคปแทน (Mercaptan) ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นขึ้น

3) ส่วนของไขมัน จะอยู่ระหว่างผิวของอนุภาคยาง และโปรตีน

- ส่วนใหญ่เป็นสารพวก ฟอสโฟไลปิดชนิด  $\alpha$ -Lecithin ซึ่งเชื่อว่าทำหน้าที่ยึดโปรตีนให้เกาะอยู่บนผิวอนุภาคยาง

- น้ำยางในสภาวะที่เป็นด่าง เช่น มีแอมโมเนียอยู่ประมาณ 0.6% ขึ้นไป ฟอสโฟไลปิดจะถูกไฮโดรไลซ์ เป็นกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาว (Long chain fatty acid) ซึ่งจะรวมตัวกับแอมโมเนียกลายเป็นสารพวกสบู่ ที่จะทำให้น้ำยางมีความเสถียรยิ่งขึ้น

- กรณีที่แอมโมเนียมีปริมาณน้อย ประมาณ 0.2% ในน้ำยางการไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นน้อย การเพิ่มความเสถียรของน้ำยางจึงจำเป็นต้องเพิ่มสบู่ หรือสารอื่นที่ช่วยในการเก็บรักษาน้ำยางเพิ่มลงไป

### 2. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1) ส่วนที่เป็นน้ำหรือเซรัม

การโบไฮเดรต เป็นสารพวกแป้ง และน้ำตาลมีอยู่ในน้ำยางประมาณ 1% เป็นน้ำตาลชนิดคิวบราซิทอล (Quebrachitol) และน้ำตาลชนิดกลูโคส ซูโครส และฟรุคโตส อีกเล็กน้อย

**โปรตีนและกรดอะมิโน** เป็นส่วนที่อยู่ในเซรุ่มของน้ำยาง (มีค่า Isoelectric point หลายค่า) โดยถ้าโปรตีนยังมีค่า Isoelectric point สูง จะสลายตัวให้ประจุบวกได้ เป็นสาเหตุของการสูญเสียสภาพของน้ำยาง โปรตีนที่พบในน้ำยางส่วนใหญ่เป็นโปรตีนประเภท อัลฟาไกลูโบลิน

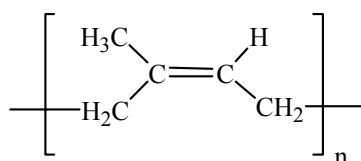
## 2) ส่วนของลิวทอยด์และสารอื่นๆ

**ลิวทอยด์** เป็นอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5-3.0 ไมครอน ห่อหุ้มด้วยเยื่อบางๆ ภายในเยื่อบาง ๆ นี้ จะมีทั้งสารละลาย และสารแขวนลอย ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยโปรตีนที่ละลายน้ำ ประมาณ 5% และโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำ ประมาณ 2% สารที่เป็นพวกฟอสโฟไลปิดแขวนลอยอยู่ ประมาณ 0.5% และสารพอลิฟีนอลออกซีเคส ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดสีเหลืองหรือสีคล้ำของน้ำยางเมื่อมีการสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ

## สารอื่นๆ

อนุภาคเฟรย์-วิสลิง (Frey-wyssling) เป็นสารที่ไม่ใช่ยาง มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่ายาง แต่มีความหนาแน่นน้อยกว่า มีรูปร่างค่อนข้างกลม มีผนังล้อมรอบสองชั้น มีอยู่ปริมาณไม่มากนัก ประกอบด้วยสารเม็ดสีพวกคาโรทีนอยด์ ซึ่งทำให้น้ำยางมีสีเหลืองเข้มสามารถรวมตัวกับแอมโมเนียและแยกตัวออกจากยางมาอยู่ในส่วนของเซรุ่มได้

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ *cis*-1,4-Polyisoprene กล่าวคือ มี Isoprene ( $C_5H_8$ ) เป็นหน่วยซ้ำในโครงสร้าง โดยที่  $n$  มีค่าตั้งแต่ 15-20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบบอสันฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืดยางสามารถเกิดผลึก การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นยางก็จะอ่อนลง และกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให้งางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือ ยางจะมีความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) และความต้านทานต่อการขัดสี (Abrasion resistance) สูง



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของโมเลกุลยางธรรมชาติ (*cis*-1,4-Polyisoprene)

ลักษณะเด่นอีกอย่างของยางธรรมชาติ คือ ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับมันหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติที่เชื่อมด้านการเหนียวติดกัน (Tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (Assemble) ชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น

สมบัติทั่วไปของน้ำยางธรรมชาติ มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวมีสภาพเป็นคอลลอยด์ (Colloid dispersion) หรือสารแขวนลอย (Suspension) มีความหนาแน่น 0.975-0.980 g/ml มีค่า pH 6.5-7.0 ความหนืดค่อนข้างแปรปรวน โดยขึ้นอยู่กับส่วนประกอบในน้ำยาง ฤดูกาลกรีดยาง และพันธุ์ยาง เป็นต้น

น้ำยางสดมีสภาพเป็นสารแขวนลอย เป็นสารละลายที่ประกอบด้วยส่วนของสารพอลิเมอร์ที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลาง ประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนของสารแขวนลอย (Disperse phase) ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กของสารพอลิเมอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 5 ไมครอนลงไป และส่วนของสารที่เป็นตัวกลาง (Dispersion medium) เรียกโดยทั่วไปว่า ส่วนที่เป็นเซรุ่ม

น้ำยางสดมีสภาพเป็นคอลลอยด์ เป็นคอลลอยด์ชนิดไฮโดรโซล (Hydrosol) คือมีสารที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายที่เป็นน้ำ แต่มีความพิเศษกว่าไฮโดรโซล มีความก้ำกึ่งระหว่างความเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic : เกิดเป็นสารละลายได้ง่ายเมื่อมีน้ำเป็นตัวทำละลาย) และมีความก้ำกึ่งระหว่างความเป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) เป็นลักษณะที่ไม่ยอมรวมกับน้ำ และเกิดเป็นสารละลายได้ยากเมื่อมีน้ำเป็นตัวทำละลาย แต่โดยภาพรวมลักษณะไฮโดรโฟบิกจะเด่นกว่าความเป็นไฮโดรฟิลิก

แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลักคือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความชื้น เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนโดยมีแสงแดดและความชื้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารในกลุ่มของ Antidegradants) เพื่อยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังทนต่อตัวทำละลายไม่มีขั้ว น้ำมัน และสารเคมีต่ำ จึงไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับสารเคมีดังกล่าว

### 2.1.2 ยางธรรมชาติเหลว

ยางธรรมชาติเหลว (Liquid Natural Rubber, LNR) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มาจากการตัดสลายสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ (Depolymerisation) ให้มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง จนกระทั่งยังมี

ความหนืดต่ำ สามารถไหลได้ที่อุณหภูมิห้องหรือที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  โดยอาศัยความร้อนหรือปฏิกิริยาทางเคมี ยางธรรมชาติเหลวจะมีหน่วยโครงสร้างซ้ำชนิดเดียวกับยางธรรมชาติ และมีองค์ประกอบอื่นๆ เหมือนกับยางธรรมชาติ ได้แก่ สี กลิ่น ลักษณะทางกายภาพ สมบัติการใช้งาน อีกทั้งยังมีความหนาแน่น ระดับของความไม่อึดตัว และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) เท่ากับยางธรรมชาติอีกด้วย สิ่งที่แตกต่างกัน คือ น้ำหนักโมเลกุล โดยยางธรรมชาติเหลวจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 100,000 หรือประมาณ  $10^3$ - $10^4$  มีลักษณะเป็นของเหลวที่ระเหยไม่ได้ มีสีน้ำตาลเข้ม และสามารถใช้งานเป็นสารทำให้ยางนิ่ม (Plasticiser) ยางธรรมชาติเหลวมีหลายเกรด เกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีค่าความหนืดสูง ยางธรรมชาติเหลวมีความหนืดตั้งแต่ 400-4,000 พอยส์ (Poise) ยางธรรมชาติเหลวสามารถทำให้เกิดการคงรูปได้โดยใช้กำมะถัน เปอร์ออกไซด์ หรือโลหะออกไซด์ ข้อดีของยางธรรมชาติเหลวคือ กระบวนการผลิตง่าย และการปรับปรุงสมบัติการใช้งานทำได้ง่ายเมื่อนำยางธรรมชาติเหลวไปใช้เป็นสารทำให้ยางนิ่ม ยางธรรมชาติเหลวจะช่วยให้สามารถเติมผงเขม่าดำในปริมาณที่สูงขึ้นลงไปในยางคอมพาวด์ โดยยังรักษาสมบัติการคงรูปของยางได้ เพราะว่ายางธรรมชาติเหลวจะวัลคาไนซ์ไปพร้อมกับยางธรรมชาติ ข้อดีอื่นๆ ที่เด่นชัดของยางธรรมชาติเหลวก็คือ ช่วยลดอัตราเสี่ยงในการทำให้เกิดยางตาย (Scorch) ใช้พลังงานในการผลิตต่ำลง สมบัติการไหลดีขึ้น และมีค่าพลาสติกซิตี (Plasticity) ต่ำลง เป็นต้น

ยางธรรมชาติเหลวถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการยัดติด และเป็นสารที่ทำให้ยางนิ่ม เพื่อปรับปรุงสมบัติในกระบวนการผลิตยางรถยนต์ ยางธรรมชาติเหลวจะทำให้ยางนิ่มขึ้น ดังนั้นจึงง่ายต่อการผสมกับสารประกอบในระหว่างกระบวนการผสมยางธรรมชาติเหลวเวลานำมาใช้งานจะใส่สารตัวเติม และสารวัลคาไนซ์ลงไปในยางแล้วนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ ทำยางลูกกลิ้ง เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมปั้นค้ำย งานพิมพ์ และทำแม่พิมพ์ใช้ในงานหล่อแบบ หรือเทลงในเบ้าโดยไม่จำเป็นต้องใช้ตัวทำละลาย ใช้เป็นกาวเชื่อมติดและประสาน ในอุตสาหกรรมรองเท้า ใช้เป็นฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ช่วยในกระบวนการแปรรูปยาง โดยไม่ทำให้สมบัติของยางเปลี่ยนแปลงมากนัก (เสาวนีย์, 2547)

การทำยางธรรมชาติเหลวจากยางธรรมชาติสามารถเตรียมได้ทั้งในสถานะน้ำยาง และสถานะสารละลาย ดังนี้

#### การเตรียมในสถานะน้ำยาง (เสาวนีย์, 2547)

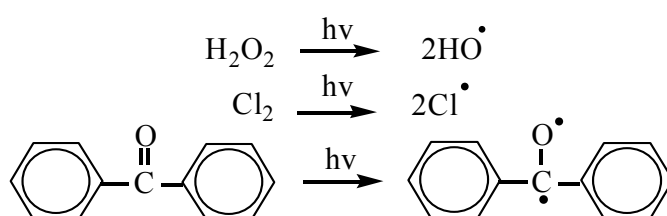
สามารถแบ่งการเตรียมได้ 3 ขั้นตอน คือ

1. การทำให้ยางเสถียรขึ้น (Stabilization) โดยการใส่สารเพิ่มความเสถียรให้ยางก่อน เช่น น้ำยางที่เก็บรักษาด้วยแอมโมเนีย จะใส่สารเพิ่มความเสถียรที่มีประจุลบ เช่น โซเดียมโคโคซิล

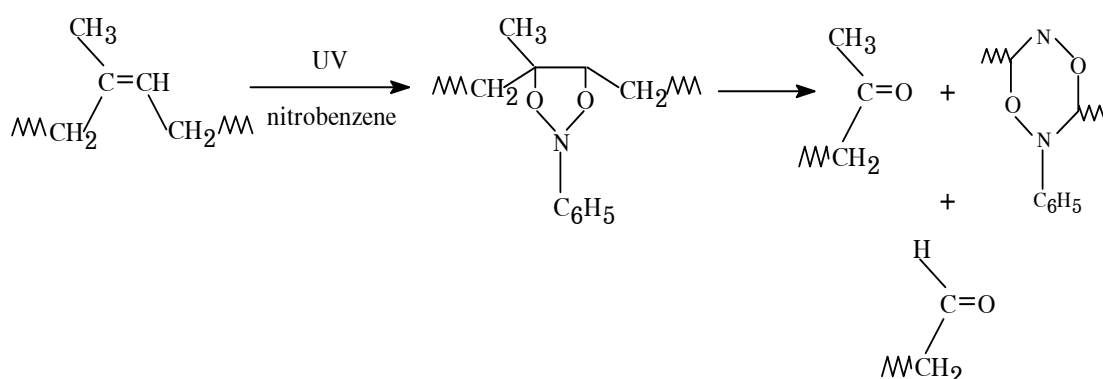
ซัลเฟต (Sodium dodecylsulfate, SDS) หรืออาจใส่สารเพิ่มความเสถียรที่ไม่มีประจุ เช่น พอลิเอทิลีนออกไซด์ปริมาณ 2% ของเนื้อยางแห้ง

2. การดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerisation) เป็นการตัดโมเลกุลของยางในขณะที่เป็นน้ำยาง สามารถเตรียมได้ดังนี้

- ปฏิกริยาโฟโตเคมีคอล (Photochemical reaction) เป็นวิธีการตัดสลายสายโซ่โมเลกุล โดยการใช้รังสีอัลตราไวโอเลต หรือแสงวิสิเบิลร่วมกับสารตัดสายโซ่โมเลกุล (Chain breaker compound) เช่น ไนโตรเบนซีน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เบนโซฟีโนน ซึ่งสามารถแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระได้ ดังตัวอย่าง



Tanaka *et al.* (1999) ศึกษาการลดน้ำหนักโมเลกุลโดยการตัดสลายสายโซ่โดยปฏิกริยาโฟโตเคมีคอล เป็นการตัดสลายสายโซ่โมเลกุลโดยใช้พลังงานแสง เช่น แสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับสารเคมีต่างๆ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คลอรีน และเบนโซฟีโนน ซึ่งสามารถแตกเป็นอนุมูลอิสระได้ วิธีนี้ได้หมุ่กิโลนที่ปลายสายโซ่ ซึ่งผลจากการตัดสลายสายโซ่โมเลกุลสามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ จากปฏิกริยาที่เกิดขึ้นมีความว่องไวสูงทำให้การควบคุมน้ำหนักโมเลกุล การกระจายน้ำหนักโมเลกุลทำได้ยาก และเกิดปฏิกริยาไอโซเมอไรเซชัน ทำให้โครงสร้างของยางเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากซิส (*cis*-1,4-Structure) ไปเป็นทรานส์ (*trans*-1,4-Structure) ตัวอย่างปฏิกริยาตัดสลายสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติโดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไนโตรเบนซีน แสดงปฏิกริยาดังนี้ (Hashim *et al.*, 2002)

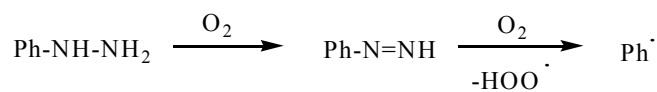


- ไพโรไลซิส (Pyrolysis) การทำปฏิกิริยาหรือถูกแตกตัวด้วยความร้อนเป็นโมเลกุลเล็กๆ โดยไม่มีออกซิเจนเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งไพโรไลซิสนี้จะเป็นกระบวนการทางเคมีที่ผันกลับไม่ได้แบบหนึ่ง ส่วนมากจะเกิดที่อุณหภูมิระหว่าง 200-600°C ในสถานะปิดภายใต้สภาวะปราศจากออกซิเจน

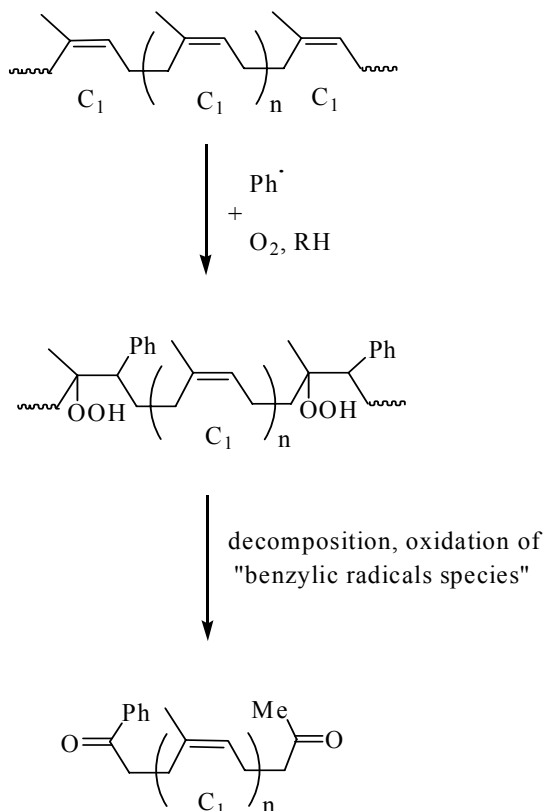
- การสลายตัวโดยกระบวนการทางเคมี ได้แก่ การสลายตัวโดยโอโซน (Ozone degradation) และการสลายตัวโดยการออกซิไดซ์ (Oxidative degradation) สำหรับการสลายตัวโดยการออกซิไดซ์จะใช้สารออกซิไดซ์ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือฟีนิลไฮดราซีน หรือโดย Metal ionic catalyt ส่วนการเสื่อมสลายด้วยโอโซน จะใช้เฉพาะในการวิเคราะห์ทางอุตสาหกรรมเท่านั้น ซึ่งไม่ค่อยนิยมใช้ เนื่องจากต้องควบคุมปฏิกิริยาให้เกิดที่อุณหภูมิต่ำ ไม่เช่นนั้นจะเกิดไอโซไนต์ในปริมาณที่มากซึ่งเป็นอันตรายได้

- การใช้ปฏิกิริยารีดอกซ์ในการเตรียมยางธรรมชาติเหลว ซึ่งวิธีการนี้จะใช้ตัวรีดิวส์ (Reducing agent) เช่น กรดพาราเมทิลเบนซีนซัลฟินิก (*p*-Methyl-benzene sulfinic acid) ฟีนิลไฮดราซีน (Phenylhydrazine) โซเดียมคลอไรท์ (Sodium chlorite) โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (Sodium hypochlorite) และใช้สารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) ในกรณีที่ใช้ฟีนิลไฮดราซีนร่วมกับแก๊สออกซิเจนในการตัดสลายสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติแสดงดังปฏิกิริยา (Hashim *et al.*, 2002) ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยฟีนิลไฮดราซีนถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนและเกิดเป็นอนุมูลอิสระของฟีนิลไฮดราซีน ( $\text{Ph}\cdot$ ) จากนั้น  $\text{Ph}\cdot$  ทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของยางธรรมชาติทำให้เกิดการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์ จากนั้นเปอร์ออกไซด์เข้าไปจับกับตำแหน่งพันธะคู่ ในโมเลกุลของยางธรรมชาติ เมื่อผ่านขั้นตอนการตัดสลายสายโซ่ ทำให้ได้หมู่ปลายเป็นหมู่เมทิลคีโตน และฟีนิลคีโตน แสดงปฏิกิริยาดังนี้

Oxidation of phenylhydrazine :



Depolymerization by Ph radical :



3. การทำให้ยางจับก้อน (Coagulation) กรณีใช้สารเพิ่มความเสถียรที่มีประจุลบในการจับก้อน โดยการใช้กรดอะซิติก หรือแคลเซียมคลอไรด์ หากใช้สารเพิ่มความเสถียรที่ไม่มีประจุ ให้แยกยางออกจากน้ำ หรือเซรุ่ม โดยการใช้ความร้อนเลย แล้วล้างน้ำอีกครั้ง ต่อจากนั้นอบยางให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 40°C จะได้อย่างธรรมชาติเหลวสีน้ำตาลเข้ม

ความเร็วของปฏิกิริยารลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติขึ้นอยู่กับ ปริมาณสารที่ใช้ อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยา

**การเตรียมในสถานะสารละลาย** (เสาวนีย์, 2547)

การเตรียมยางเหลวจากยางแห้ง สามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. การบดยางธรรมชาติให้มีความหนืดต่ำ ซึ่งวิธีการบดยาง (Mastication process) เป็นการตัดสลายสายโซ่โมเลกุลของยางด้วยวิธีทางกล และความร้อน โดยใช้เครื่องผสมแบบลูกกลิ้ง (Two roll mill) หรือเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) เมื่อระยะเวลาในการบดยางเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้

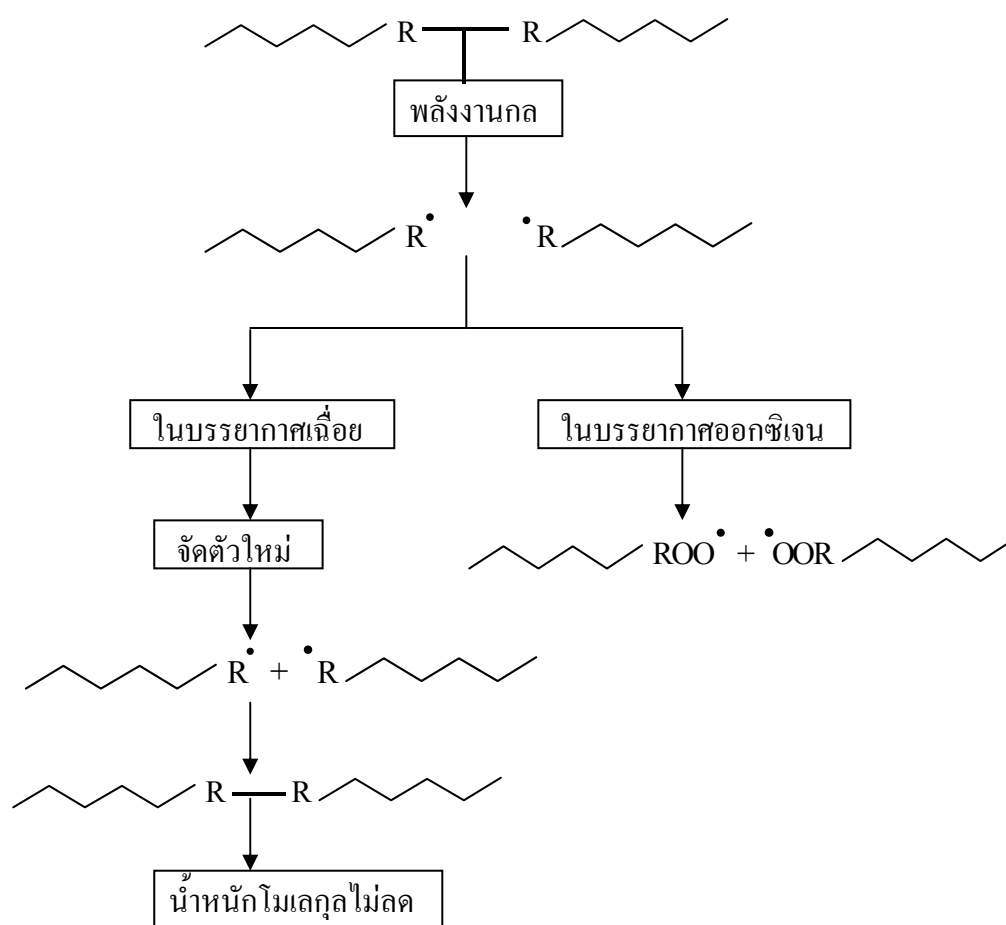


น้ำหนักโมเลกุลของยางลดลง ประสิทธิภาพของการบดยางขึ้นกับอุณหภูมิของการผสม และแรงเฉือนที่ยางได้รับ

ส่วนการเติมสารย่อยยางเพื่อช่วยให้บดยางได้เร็วขึ้น คือ การใช้สารประกอบอินทรีย์ใส่ลงในยางแล้วทำให้ยางนิ่มขึ้นแม้จะเติมในปริมาณเพียงเล็กน้อย และยังช่วยลดระยะเวลาในการบด ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกสารดังกล่าวว่า สารเร่งการบดยาง (Mastication accelerator) เช่น เมอร์แคปแทน (Mercaptan) ซึ่งมีผลในการป้องกันการรวมตัวกันใหม่ของโมเลกุลยางที่ขาดออกจากกันได้

2. การนำยางที่บดเรียบร้อยแล้วมาแช่ให้พองตัวในน้ำมัน เป็นเวลาประมาณ 6-8 ชั่วโมง แล้วทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยการกวนด้วยเครื่องกวน จนกระทั่งได้เป็นยางเหลว ควบคุมอุณหภูมิระหว่าง 120-140°C ยางเหลวที่ได้มีความหนืดประมาณ 50,000-70,000 เซนติพอยส์

3. การนำยางเหลวที่ได้มาทำให้ร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 250-300°C เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง จะได้ยางเหลวที่มีความหนืดต่ำลง เหลือประมาณ 2,500 เซนติพอยส์ สามารถไหลได้ที่อุณหภูมิห้อง กลไกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยวิธีการบด สามารถเขียนได้ดังรูปที่ 2.2 (เสาวนีย์, 2547)

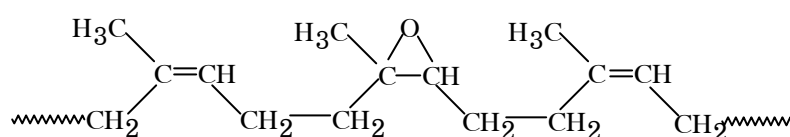


รูปที่ 2.2 กลไกของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะบดยาง

อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวนี้จะได้ยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำ แต่จะได้การกระจายน้ำหนักโมเลกุลในช่วงกว้างยากต่อการควบคุม

### 2.1.3 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxydized natural rubber, ENR)

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นยางธรรมชาติที่เปลี่ยนโครงสร้างโดยใช้สารประเภทกรดเปอร์ออกซี (Peroxy acid) โดยยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ได้จะมีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ยางธรรมชาติมีความเป็นขั้ว ซึ่งมีสูตรโครงสร้าง แสดงดังนี้



ยางธรรมชาติอีพอกไซด์จึงเป็นยางที่ได้จากการเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลของยางตรงบริเวณพันธะคู่เกิดเป็นวงแหวนอีพอกไซด์โดยผ่านปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxydation) โดยมีร้อยละโดยโมลอีพอกไซด์ตั้งแต่ร้อยละ 10-50 ยาง ENR ที่ได้จึงมีความเป็นขั้วสูงกว่ายางธรรมชาติทั่วไป ทำให้ทนต่อความร้อน และน้ำมันได้ดีขึ้น โดยยาง ENR เกรดที่มีร้อยละโดยโมลอีพอกไซด์สูงถึงร้อยละ 50 จะมีความเป็นขั้วสูงเทียบเท่ากับยางไนไตรล์ (NBR) ที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ปานกลาง (Roy *et al.*, 1993) นอกจากนี้ยังพบว่ายาง ENR ที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจะมีสมบัติคล้ายกับยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเขม่าดำอีกด้วย ซึ่งยางธรรมชาติอีพอกไซด์สามารถเตรียมได้โดยผ่านปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน

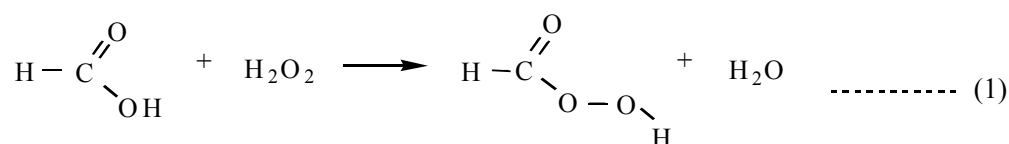
#### 2.1.3.1 ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน

การเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์จากปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันเริ่มต้นครั้งแรกในปี 1922 แต่ยังไม่มีการผลิตในเชิงการค้า และการใช้งานยางธรรมชาติอีพอกไซด์ยังไม่เป็นที่นิยม ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันของยางธรรมชาติสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งในสถานะน้ำยาง และสารละลาย

##### ปฏิกิริยาในสถานะน้ำยาง (เสาวนีย์, 2547)

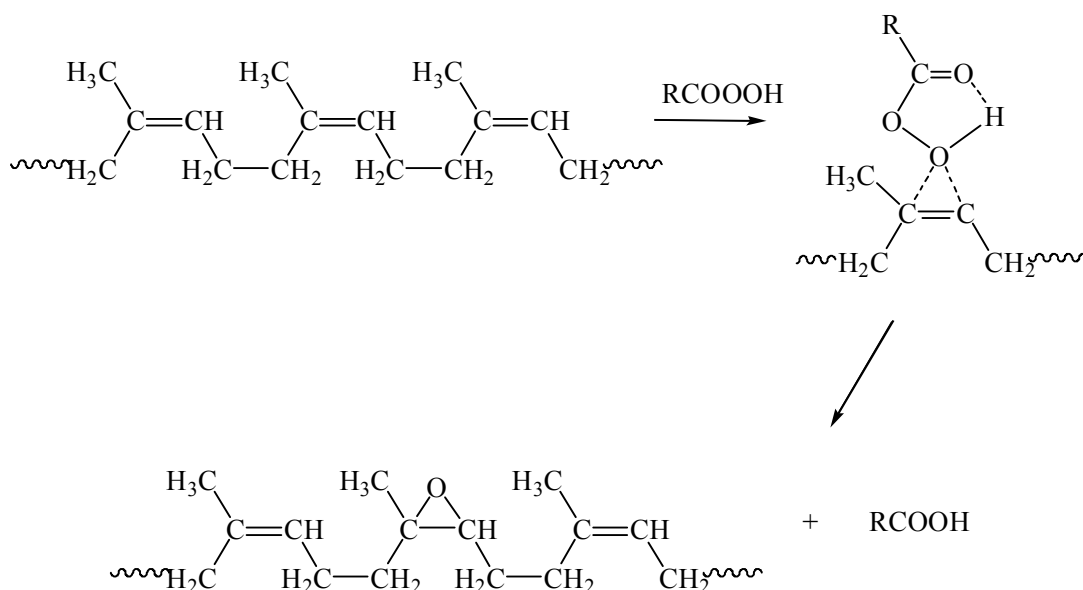
1. น้ำยางที่ใช้มีการปรับสภาพโครงสร้าง เพื่อให้อนุภาคของยางมีความเสถียรก่อน โดยการเติมสารลดแรงตึงผิว ซึ่งสารลดแรงตึงผิวมีหลายประเภท คือ สารลดแรงตึงผิวที่เป็นประจุลบ (Anionic surfactant) เช่น Sodium alkyl sulfate Sodium linear alkylbenzenesulfonate เป็นต้น สารลดแรงตึงผิวที่เป็นประจุบวก (Cationic surfactant) เช่น Alkyltrimethylammonium salts และ สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Non-ionic surfactant) เช่น พอลิเอทิลีนออกไซด์ เป็นต้น

2. เตรียมสารละลายกรดเปอร์ฟอร์มิก (Peroxyformic acid) โดยการใส่กรดฟอร์มิก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำปฏิกิริยากันเกิดกรดฟอร์มิกเปอร์ออกซี และน้ำดังสมการ (1) จากนั้นกรดฟอร์มิกเปอร์ออกซีที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการอีพอกซิเดชันอย่างรวดเร็วในโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่อิมตัว



Formic acid    Hydrogen Peroxide    Peroxyformic acid

3. เตรียมสารละลายกรดฟอร์มิกเปอร์ออกซี ในขณะที่ทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (*in-situ* performic epoxidation) โดยควบคุมสภาวะในการเตรียมอย่างระมัดระวัง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาเปิดวงแหวนอีพอกไซด์ น้ำยาธรรมชาติที่นำมาใช้จะต้องนำมาทำให้มีความเสถียรต่อกรดเสียก่อน โดยการเติมสารช่วยเพิ่มความเสถียรที่ไม่มีประจุ (Non-ionic surfactant) จากนั้นจึงนำมาทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันที่อุณหภูมิ 60-70°C เกิดเป็นยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติ โดยกลไกปฏิกิริยาเริ่มจากออกซิเจนของเปอร์ออกไซด์เข้าไปจับตำแหน่งพันธะคู่ ทำให้เกิดสถานะทรานซิชันไบไซคลิก (Bicyclic transition state) หลังจากนั้นเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ได้โมเลกุลที่มีหมู่อีพอกไซด์ และได้กรดฟอร์มิกกลับคืนมาจากปฏิกิริยาการเกิดอีพอกซิเดชัน กลไกของปฏิกิริยาแสดงดังนี้



จากนั้นนำน้ำยางธรรมชาติอพอกไซค์ที่ได้มาปรับสภาพให้เป็นกลาง จับตัวด้วยเมทานอล ล้างด้วยน้ำแล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C

#### ปฏิกิริยาในสถานะสารละลาย (เสาวนีย์, 2547)

โดยการนำยางแห้ง หรือยางธรรมชาติเหลวทำให้เป็นสารละลายมาก่อน โดยการนำยางดังกล่าวมาละลายในตัวทำละลายโทลูอีน ต่อจากนั้นจึงเติมสารอพอกไซค์ลงในระบบ เช่น กรดเปอร์เบนโซอิก (Perbenzoic acid) กรดเปอร์ฟทาลิก (Perphthalic acid) กรดเปอร์แอซติก (Peracetic acid) หรือกรดฟอร์มิกเปอร์ออกซี (Peroxyformic acid) โดยปฏิกิริยาเกิดเช่นเดียวกับในสถานะน้ำยาง

ยางธรรมชาติอพอกไซค์มีการศึกษาสมบัติต่างๆ ดังนี้

Burfield *et al.* (1984) ได้ศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติอพอกไซค์ ดังนี้

- ผลจาก การตัดแปรรูปโครงสร้างยางธรรมชาติทำให้เกิดโครงสร้างอพอกไซค์ซึ่งทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) สูงกว่ายางธรรมชาติ และการตัดแปรรูปสายโซ่หลักของยางธรรมชาติให้มีโครงสร้างอพอกไซค์ที่ร้อยละโดยโมลอพอกไซค์สูงขึ้นส่งผลให้ค่า  $T_g$  สูงขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของค่า  $T_g$  เป็นผลมาจากการลดลงของปริมาตรอิสระ (Free volume) ของสายโซ่ นอกจากนี้การเตรียมยางธรรมชาติอพอกไซค์ต้องพิจารณาการเกิดโคพอลิเมอร์แบบสุ่มซึ่งมีการเข้าร่วมของบล็อกของอพอกไซค์ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้ค่า  $T_g$  ที่มีลักษณะเฉพาะในยางที่ผ่านการตัดแปรรูปโครงสร้าง

- สมบัติการบวมพองของยางธรรมชาติอพอกไซค์ พบว่าดีกว่ายางธรรมชาติเพราะเมื่อมีการตัดแปรรูปโครงสร้างทำให้ยางธรรมชาติอพอกไซค์มีสภาพขี้วมมากขึ้น ดังนั้นยางธรรมชาติอพอกไซค์จึงทนต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขี้วมได้ดีกว่ายางธรรมชาติ นอกจากนี้การทนต่อตัวทำละลายจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณร้อยละโดยโมลอพอกไซค์

- การซึมผ่านแก๊สของยางธรรมชาติอพอกไซค์ที่ผ่านการเชื่อมโยงสายโซ่ พบว่าการซึมผ่านแก๊สลดลงเมื่อร้อยละโดยโมลอพอกไซค์สูงขึ้น อาจสัมพันธ์กับการเคลื่อนไหวของส่วนไอโซพรีนเกิดได้ลดลง และความหนาแน่นของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผ่านการเชื่อมโยงสายโซ่ แสดงดังตาราง 2.2

ตาราง 2.2 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติอ็อกไซค์ที่ผ่านการเชื่อมโยงสายโซ่ (Burfield *et al.*, 1984)

Modification level (mole %)	Modulus (MN.m <sup>-2</sup> )			Relaxed modulus MR 100 (MN.m <sup>-2</sup> )	Tensile strenght (MN.m <sup>-2</sup> )	Elongation at break (%)	Hardness (IRHD)	Dunlop resiliene (%)
	100%	200%	300%					
	Control	1.0	1.8					
5.5	1.1	1.9	3.4	0.99	7.0	380	43	81.1
10.5	1.1	2.0	3.4	-	7.6	400	43	79.6
15.4	1.1	2.0	3.7	-	7.6	380	44	79.5
20.4	1.3	-	-	-	2.0	180	45	74.3
30.0	1.0	2.0	-	-	1.0	200	-	-

ผลของสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอ็อกไซค์ดังตาราง 2.2 จากข้อมูลในตาราง ค่ามอดูลัส และความต้านทานแรงดึง ของยางธรรมชาติอ็อกไซค์ ที่ร้อยละโดยโมลอ็อกไซค์ 5-15 สูงขึ้น เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ

ปฏิกิริยาการอ็อกซิเดชันของไดอินอีลาสโตเมอร์ สามารถทำได้โดยใช้เปอร์ออกไซด์ และเปอร์ออกไซด์ชนิดต่างๆ ชนิดสารอ็อกซิไดซ์จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับไดอินอีลาสโตเมอร์ที่ใช้ แสดงดังตาราง 2.3

#### 1. ใช้เปอร์ออกไซด์และไฮโดรเปอร์ออกไซด์

เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ใช้เป็นสารอ็อกซิไดซ์พวกพอลิไอโซพรีน ในกรณีของพอลิบิวตะไดอินใช้ *t*-Butyl hydroperoxide เป็นสารอ็อกซิไดซ์ แต่สารพวกเปอร์ออกไซด์เป็นสารอ็อกซิไดซ์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าพวกเปอร์ออกไซด์

#### 2. ใช้เปอร์ออกไซด์โดยตรง

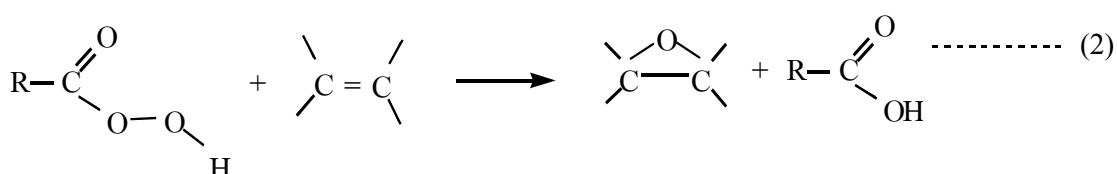
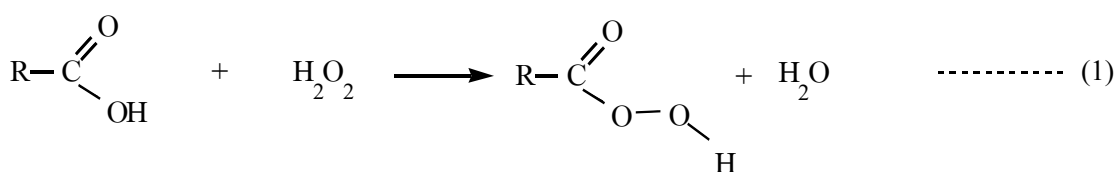
สามารถใช้เปอร์ออกไซด์เป็นสารอ็อกซิไดซ์สำหรับยางไดอินทั้งในสภาวะสารละลาย และสภาวะน้ำยาง เช่น กรดเปอร์เบนโซอิกเป็นสารอ็อกซิไดซ์พอลิไอโซพรีน และพอลิบิวตะไดอิน กรดเปอร์ออกซีคาร์บอกซิลิกที่ใช้ในการอ็อกซิเดชันของไดอินพอลิเมอร์

ตาราง 2.3 สารอีพอกซีไดซ์ชนิดต่างๆ (Roy *et al.*, 1993)

Epoxidizing agents	Elastomer	Reaction
Benzoyl peroxide	Polyisoprene	Solution
<i>t</i> -Butyl hydroperoxide + dioxomolydenum bis(acetyl acetate)	Polybutadiene	Solution
Perbenzoic acid	Polybutadiene, Natural rubber	Solution
Monoperphthalic acid	Polybutadiene, Natural rubber	Solution
<i>m</i> -Chloroperbenzoic acid	Polybutadiene, Natural rubber	Solution
Peracetic acid	EPDM, Butyl, Polybutadiene,	Solution and latex
Hydrogen peroxide + Acetic acid	Polyisoprene	
Hydrogen peroxide and Acetic acid+toluene- <i>p</i> - sulfonic acid	Polyisoprene Polybutadiene, Natural rubber	Solution Solution
Hydrogen peroxide+Formic acid	Polybutadiene, Natural rubber	Solution and latex
Hydrogen peroxide+Formic acid+A second acid	Polybutadiene, Natural rubber	Solution
N-Phenylcarbamoyl azoformate	Polybutadiene, Natural rubber	Solution
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Ce(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> +Polyether	Natural rubber, Polybutadiene	

### 3. ใช้เปอร์ออกไซด์ในสถานะ *in situ*

ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับกรดคาร์บอกซิลิกทำปฏิกิริยาได้เปอร์ออกไซด์ ดังปฏิกิริยา (1) ขณะที่ดำเนินปฏิกิริยากับพันธะคู่ของ โอลิฟินส์เปลี่ยนเป็นหมู่อีพอกซี ดังปฏิกิริยา (2)



ในกระบวนการออกซิเดชันที่ใช้สารออกซิไดซ์ในลักษณะนี้ ได้แก่

1) กรดแอซติก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

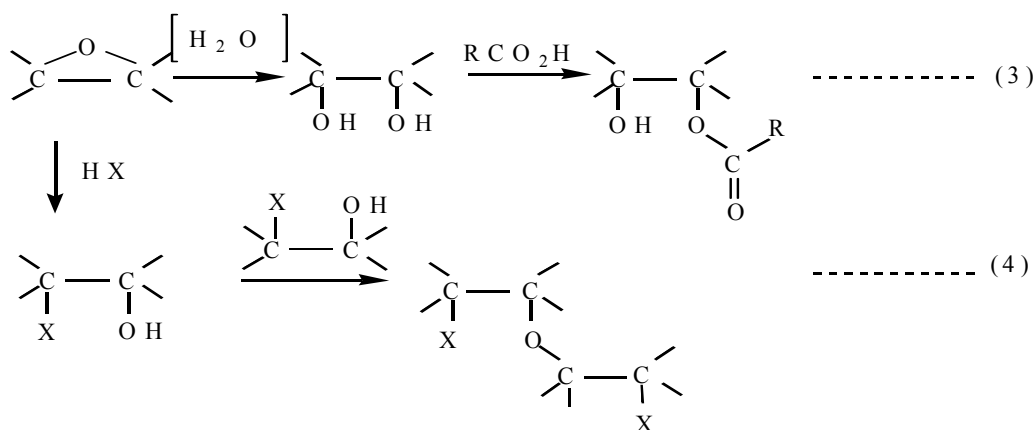
กรดแอซติก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยาได้เป็นกรดเปอร์แอซติกที่อุณหภูมิสูงกว่า 40°C อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60°C อัตราการเกิดเป็นกรดเปอร์แอซติกจะช้าลงโดยทั่วไปจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่อุณหภูมิสูงเมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำจะใช้สารเร่งปฏิกิริยาเช่น *p*-Toluenesulfonic acid ช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น

2) กรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

โดยทั่วไปใช้กรดฟอร์มิก เป็นสารออกซิไดซ์พวกพอลิไดอินอลาสโตเมอร์ สำหรับการออกซิไดซ์ยางธรรมชาติในกรณีใช้สารเร่งปฏิกิริยาของ 2,5 di-*t*-Phenylhydroquinone ปริมาณ 1phr ที่อุณหภูมิ 60°C จะได้อย่างธรรมชาติออกไซด์ ร้อยละโดยโมลออกไซด์เท่ากับ 50

4. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของสารอินทรีย์ หรือตัวเร่งที่เป็นโลหะอินทรีย์ ร้อยละโดยโมลออกไซด์ที่ได้จากวิธีนี้จะได้สูง เมื่อร้อยละโดยโมลออกไซด์น้อยกว่า 50 ที่ร้อยละโดยโมลออกไซด์มากกว่า 50 จะเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวเร่งที่เป็นโลหะอินทรีย์

นอกจากนี้ระหว่างกระบวนการออกซิเดชันจะเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ชนิดของรีเอเจนต์ และความเข้มข้นของกรด ซึ่งจะทำให้เกิดตะกอนไฮโดรฟิวเรน และหมู่ไฮดรอกซิล เอสเทอร์ คาร์บอนิล และหมู่เอเธอร์ ดังแสดงในปฏิกิริยา(3) และ (4) (Roy *et al.*, 1993)



จากปฏิกิริยาพบว่า ที่ความเข้มข้นกรดสูงจะเกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้ (Second product) สูง ในขณะที่ความเข้มข้นกรดต่ำอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะต่ำกว่า ตรวจสอบหมู่ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาข้างเคียงโดยเทคนิค <sup>1</sup>H-NMR และ IR โดยข้อมูลทั้งสองเทคนิค แสดงสัญญาณของหมู่ฟังก์ชัน แสดงดังตาราง 2.4

ตาราง 2.4 ตำแหน่งการดูดกลืนแสงของ IR และ Chemical shift ของ  $^1\text{H-NMR}$  (Roy *et al.*, 1993)

Functional group	[IR] Wavenumber ( $\text{cm}^{-1}$ )	[ $^1\text{H-NMR}$ ] Chemical shift (ppm)
Hydroxyl (-OH)	3600-3200	-
-C-H	-	3.85
Ester	1720-1740	-
Carbonyl	1710-1740	-
Formate	1725	9.75
Tetrahydrofuran	1065	3.65
Epoxy ( <i>cis</i> -1,4-polyisoprene)	870, 1250	2.70

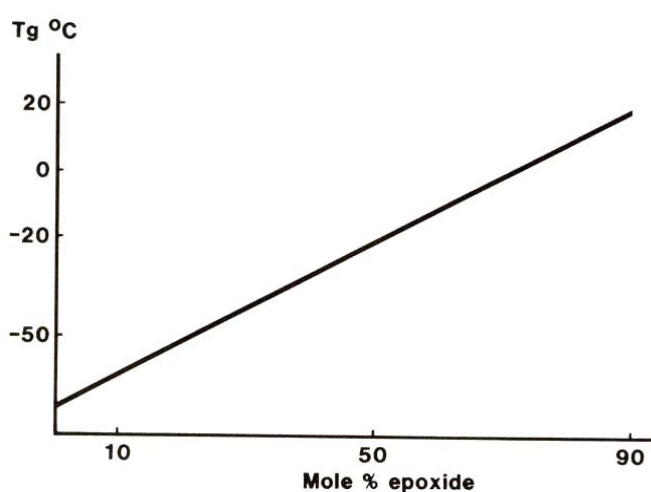
Gelling (1984) ศึกษาการเกิดอ็อกซิเดชันของยางธรรมชาติด้วยเปอร์ออกไซด์ จากผลการเตรียมยางธรรมชาติอ็อกไซด์พบว่า ได้ร้อยละ โดยโมลของอ็อกไซด์เท่ากับ 25, 50 และ 75

ในการเตรียมร้อยละ โดยโมลอ็อกไซด์ให้ได้ในช่วง 25-100 จะต้องใช้ปริมาณของเปอร์ออกไซด์สูง และอุณหภูมิสูง จะส่งผลต่อโครงสร้าง และสมบัติของยางธรรมชาติอ็อกไซด์ที่ได้ ซึ่งยางธรรมชาติอ็อกไซด์ที่ได้ มี 2 ลักษณะ คือ ที่ความเข้มข้นของเปอร์ออกไซด์สูง และที่อุณหภูมิสูง จะมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น คือ ปฏิกิริยาการเกิดวงอ็อกไซด์ ส่งผลให้มีการเกิดเจลมากขึ้น ในขณะที่ที่ความเข้มข้นของเปอร์ออกไซด์ต่ำ และอุณหภูมิต่ำ การอ็อกซิเดชันจะไม่เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ส่งผลให้ไม่เกิดเจล

Gelling and Porter (1988) รายงานว่า ENR-25 และ ENR-50 มีค่าความหนืดมูนนี้อยู่ในช่วง 75-90 หน่วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องบดก่อนที่จะนำไปผสมกับสารเคมีต่างๆ (Pre-mastication) นอกจากนี้ยางธรรมชาติอ็อกไซด์จะมีสภาพความเป็นขี้เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณอ็อกไซด์ที่มีในโครงสร้างโมเลกุล ส่วนความสามารถในการละลายของยางธรรมชาติอ็อกไซด์ขึ้นอยู่กับร้อยละ โดยโมลอ็อกไซด์ และชนิดของตัวทำละลาย ซึ่งยางธรรมชาติอ็อกไซด์สามารถละลายได้ง่ายขึ้น หากมีการบดมาก่อน ตัวทำละลายที่เหมาะสมได้แก่ โทลูอิน คลอโรฟอร์ม และเตตระไฮโดรฟิวแรน เป็นต้น



การเกิดหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 1 เปอร์เซ็นต์โมลบน โมเลกุลยางธรรมชาติ จะทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature,  $T_g$ ) เพิ่มขึ้น  $0.93^{\circ}\text{C}$  (Gelling and Porter, 1988) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดย โมลอีพอกไซด์กับค่า  $T_g$  ได้กราฟเส้นตรง สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณ หรือร้อยละ โดยโมลอีพอกไซด์ได้ซึ่งพบว่า ENR-25 มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ประมาณ  $-47^{\circ}\text{C}$  และ ENR-50 มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ประมาณ  $-22^{\circ}\text{C}$  ผลจากการเปลี่ยนแปลงของ ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจะส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพอย่างชัดเจน



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ที่ร้อยละโดยโมลอีพอกไซด์ ต่างๆ (Gelling and Porter, 1988)

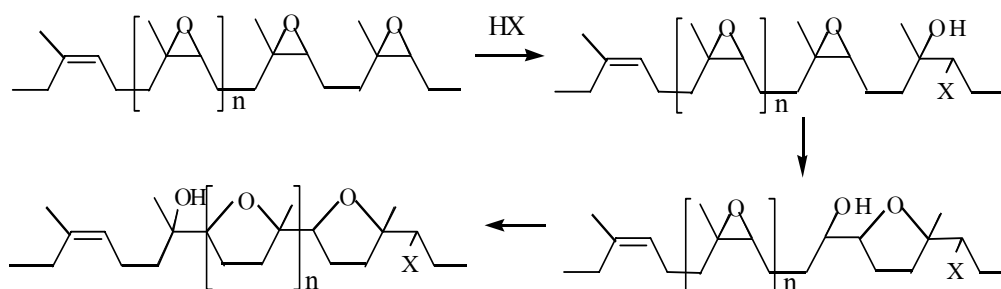
จากสมบัติเด่นหลายประการของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ทำให้สามารถนำมาทำผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย ซึ่งตัวอย่างการใช้งานยางธรรมชาติอีพอกไซด์ แสดงดังตาราง 2.5

ตาราง 2.5 การใช้งานยางธรรมชาติอีพอกไซด์

สมบัติเด่น	การใช้งาน
- ทนทานต่อน้ำมัน	- ท่อ ซีล ข้อต่อ และสายยาง
- การซึมผ่านอากาศต่ำ	- แบลคเคอร์ ยางใน เคลือบภายในท่อ
- เสริมประสิทธิภาพได้ด้วยซิลิกา	- ใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงสูงแต่ไม่ต้องการให้เป็นสีดำ
- มีความต้านทานต่อการหมุนต่ำ	- ดอกยางรถยนต์ พื้นยาง พื้นรองเท้า กีฬา
- การหน่วง	- ป้องกันการสั่นของเครื่องและใช้งานกับเครื่องกลทางวิศวกรรม

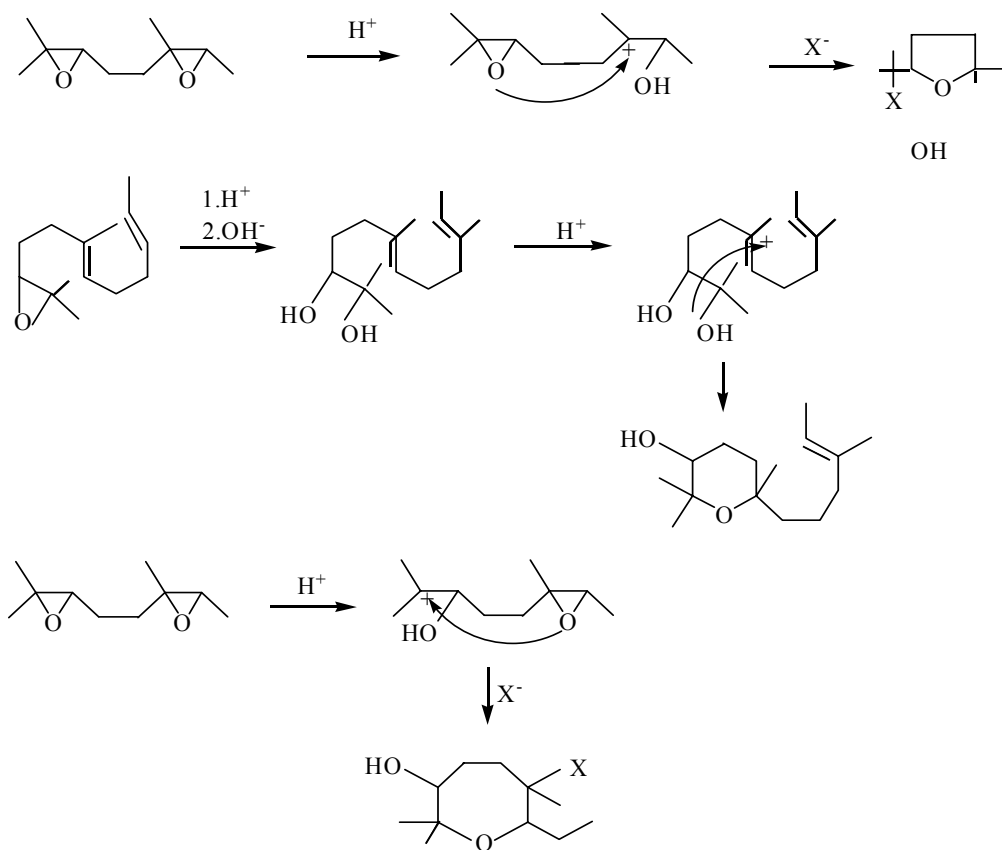
### 2.1.3.2 การเปิดวงของยางธรรมชาติอีพอกไซค์

ที่ความเข้มข้นของกรด และอุณหภูมิสูง ทำให้ปฏิกิริยาอีพอกไซเดชันเกิดขึ้นตรงตำแหน่งพันธะคู่ในยางรวดเร็ว ซึ่งปฏิกิริยาการเปิดวงนี้เป็นปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาอีพอกไซเดชัน เพราะในขณะที่เกิดปฏิกิริยามีน้ำและกรดอยู่ด้วย ทำให้วงแหวนที่มีออกซิเจนอยู่ด้วยในโมเลกุลเปิดออก (เสาวนีย์, 2547) ซึ่งปฏิกิริยาการเปิดวงของยางธรรมชาติอีพอกไซค์ขึ้นอยู่กับร้อยละโดยโมลอีพอกไซค์ ที่ร้อยละโดยโมลอีพอกไซค์สูงโอกาสทำให้เกิดปฏิกิริยาการเปิดวงสูง และจะเกิดเป็นวงฟิวเรนสูงขึ้นด้วย ในขณะที่ร้อยละโดยโมลอีพอกไซค์ต่ำโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาการเปิดวงน้อย ส่งผลให้โอกาสเกิดเป็นวงฟิวเรนน้อยลงด้วย โดยปฏิกิริยาการเปิดวง และเกิดเป็นวงฟิวเรนแสดงปฏิกิริยาดังนี้ (Gelling, 1984)



### 2.1.3.3 ยางฟิวเรน

ผลิตภัณฑ์รองที่ได้เมื่อเพิ่มปริมาณกรดแอซิดิก และเพิ่มอุณหภูมิในการอีพอกไซเดชันยางธรรมชาติกับกรดเปอร์แอซิดิกคือ ยางฟิวเรน ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติกที่แข็ง เพราะค่า  $T_g = 100^\circ\text{C}$  ซึ่งสมบัติหลายอย่างคล้ายกับพอลิสไตรีน แสดงปฏิกิริยาดังนี้ (Perera *et al.*, 1988)



#### 2.1.4 การวิเคราะห์หาปริมาณออกซิเดชัน

การวิเคราะห์หาปริมาณออกซิเดชัน สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค ดังนี้

**1. วิธีการไทเทรต** คำนวณปริมาณออกไซด์โดยใช้เทคนิคการไทเทรตกับไฮโดรเจนโบรไมด์ (HBr) ในสารละลายกรดแอซิดิก โดยที่กรดคาร์บอกซิลิก อัลดีไฮด์ อีเทอร์ เอสเทอร์ และเปอร์ออกไซด์ที่ปรากฏในระบบจะไม่เข้าไปรบกวนปฏิกิริยาการไทเทรต แต่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับ HBr อย่างช้าๆ

การไทเทรตโดยตรงของวงออกซิแรนกับ HBr พบว่ามีสารรบกวนน้อยสำหรับพอลิไอโซพรีนที่ร้อยละโดยโมลออกไซด์ต่ำ (ร้อยละโดยโมลออกไซด์เท่ากับ 5) สำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณร้อยละโดยโมลออกไซด์มากกว่า 15 พบว่ามีข้อจำกัดในการละลายในตัวทำละลายเช่นเดียวกับยางฟิวแรนที่เกิดจากปฏิกิริยาไซโคลเซชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาข้างเคียงระหว่างหมู่ฟอกไซด์ที่อยู่ใกล้ ซึ่งปฏิกิริยาไซโคลเซชันจะไม่เกิดที่ร้อยละโดยโมลออกไซด์ต่ำ เนื่องจากมีวงแหวนออกซิแรนที่อยู่ใกล้กันในปริมาณน้อย

เทคนิคการไทเทรตด้วย HBr เป็นวิธีการไม่ซับซ้อน เป็นเทคนิคที่รวดเร็ว และเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ ENR ที่ร้อยละโดยโมลออกไซด์น้อยกว่า 15 (Burfield *et al.*, 1983)

## 2. อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (IR Spectroscopy)

โดยปกติเมื่อ โมเลกุลของสารอินทรีย์ดูดกลืนพลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรดจะทำให้เกิดการสั่นภายในโมเลกุล (Molecular vibration) การสั่นของพันธะในโมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขั้วคู่ (Dipole moment) ซึ่งเกิดจากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด หมู่ฟังก์ชันต่างๆ จะมีตำแหน่งการดูดกลืนเฉพาะตัวที่ต่างกัน ซึ่งโดยทั่วไปจะบอกตำแหน่งของการดูดกลืนรังสีเป็นเลขคลื่นที่มีหน่วย ( $\text{cm}^{-1}$ ) โดย ความเข้มของสัญญาณการดูดกลืนรังสีจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง

ในการเตรียมตัวอย่าง ถ้าพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายอาจเตรียมตัวอย่างโดยการอัดด้วย KBr หรือ NaCl ในทางตรงกันข้ามถ้าตัวอย่างเป็นยาง ENR แห่งสามารถละลายด้วยตัวทำละลาย และเตรียมเป็นแผ่นบางๆ โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $120^{\circ}\text{C}$  หรืออาจจะวิเคราะห์ตัวอย่างโดยตรง โดย IR แผ่นฟิล์มอาจจะถูกเตรียมโดยใช้แผ่นกระจกซิลเวอร์เฮไลด์ (Silver halide) (Davey and Loadman, 1984)

สัญญาณการดูดกลืนรังสีของออกซิแรนปรากฏที่เลขคลื่น  $800\text{-}950\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสายโซ่หลักของไดอินพอลิเมอร์ เมื่อสายโซ่หลักของ *cis*-1,4-Polyisoprene ที่ถูกเปลี่ยนให้เป็นโครงสร้างของ *cis*-epoxy จะปรากฏสัญญาณการดูดกลืนรังสีที่เลขคลื่น  $870\text{ cm}^{-1}$  การหาปริมาณของอีพอกซี สามารถทำได้โดยใช้กราฟมาตรฐาน (Calibration internal standard) โดยหาอัตราส่วนความเข้มของการดูดกลืนรังสีของเลขคลื่น  $870\text{ cm}^{-1}$  ต่อเลขคลื่นที่  $1375\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบงอของพันธะ C-H ของหมู่เมทิลของหน่วยไอโซพรีน เปรอร์เซ็นต์ผลผลิตของหมู่อีพอกซีคำนวณจาก (Davey and Loadman, 1984)

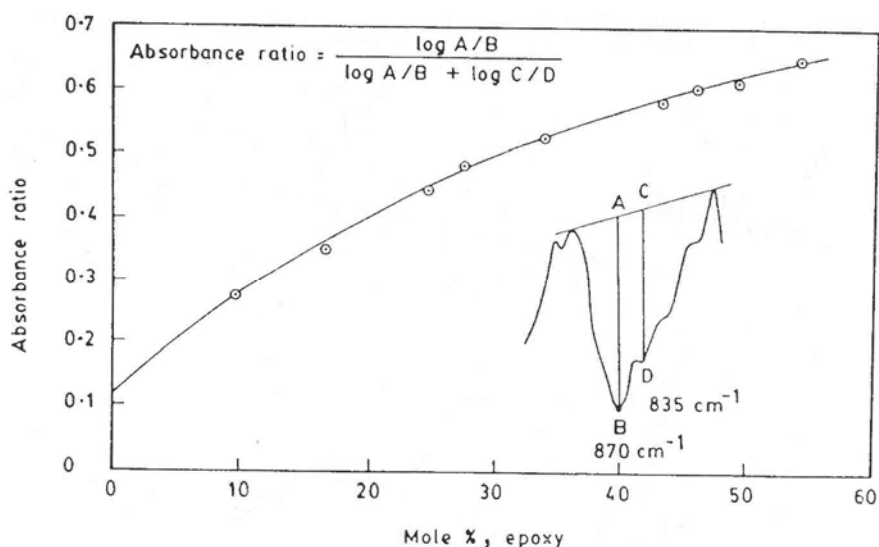
$$A_r = \frac{a_{870}}{a_{870} + a_{835}}$$

เมื่อ  $A_r$  = อัตราส่วนความเข้มข้นของสัญญาณการดูดกลืนรังสี

$a_{870}$  = ความเข้มของสัญญาณการดูดกลืนรังสีของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่  $870\text{ cm}^{-1}$

$a_{835}$  = ความเข้มของสัญญาณการดูดกลืนรังสีของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่  $835\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นหน่วยของไอโซพรีน

กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการหาเปอร์เซ็นต์อีพอกซีเคชัน โดยได้จากการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการดูดกลืนรังสีเทียบกับร้อยละ โดย โมลของอีพอกซี แสดงดังรูปที่



รูปที่ 2.4 Calibration curve ในการหาปริมาณของร้อยละ โดยโมลของอีพอกซีของยางธรรมชาติ เหลวอีพอกซีโดยเทคนิค IR (Davey and Loadman, 1984)

### 3. นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, NMR)

#### 3.1 $^1\text{H-NMR}$

$^1\text{H-NMR}$  เป็นวิธีที่ทำได้รวดเร็ว และสามารถหาโครงสร้างของสารตัวอย่างได้อินพอลิเมอร์ของโอลิฟินิกโปรตอนเกิดการเรโซแนนซ์โดยปรากฏสัญญาณที่ตำแหน่ง 5.14 ppm สำหรับของยางอีพอกซีโปรตอนที่อยู่ติดกับหมู่อีพอกซีปรากฏที่สัญญาณ 2.70 ppm จากเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  สามารถคำนวณหาปริมาณอีพอกซีได้จากสมการ (Burfield *et al.*, 1983)

$$\text{Mol}\% \text{epoxy} = \frac{A_{2.70}}{A_{5.14} + A_{2.70}} \times 100$$

$A_{2.70}$  = พื้นที่พีคที่ตำแหน่ง 2.70 ppm (Proton adjacent epoxide unit)

$A_{5.14}$  = พื้นที่พีคที่ตำแหน่ง 5.14 ppm (Olefinic proton)

#### 3.2 $^{13}\text{C-NMR}$

การวิเคราะห์โครงสร้างเคมีโดยใช้เทคนิค  $^{13}\text{C-NMR}$  ของอีพอกซีได้ซึ่งจากพอลิไดอิน คือ 1,4 Polybutadiene และ 1,4-Polyisoprene ศึกษาโดยนักวิจัยหลายๆท่าน 1,4-Polyisoprene พบสัญญาณของ  $^{13}\text{C-NMR}$  คาร์บอนของโอลิฟินส์ที่สัญญาณ 125 ppm และคาร์บอนของอีพอกซีเกิดการเรโซแนนซ์ที่สัญญาณ 64 ppm ดังนั้นเป็นไปได้ที่สามารถหาปริมาณอีพอกซีได้จาก

พื้นที่ได้สัญญาณที่ 64 ppm โดยการรวมพื้นที่ได้สัญญาณที่ 64 ppm และ 125 ppm ดังนั้นสามารถหาร้อยละโดยโมลของเอพอกไซด์ได้ดังนี้ (Burfield *et al.*, 1983)

$$\text{mol \%epoxide} = 100 \left( \frac{A_{64.5}}{A_{64.5} + A_{124.4,125,125.7}} \right)$$

### 2.1.5 ปฏิริยาอะคริลชันของเอพอกไซด์อีลาสโตเมอร์ (Acrylation of epoxidized elastomer)

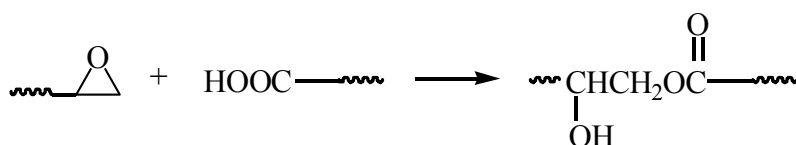
#### - ปฏิริยาการเปิดวงของหมู่เอพอกไซด์

โมเลกุลเอพอกไซด์ที่มีส่วนประกอบของวงอีเธอร์ซึ่งมี 3 อะตอม ซึ่งหนึ่งใน 3 อะตอมคืออะตอมของออกซิเจนซึ่งจะไม่เกิดการเรียงตัวเป็น  $sp^3$  ไฮบริดออร์บิทัลของคาร์บอน ดังนั้นโมเลกุลที่ประกอบด้วยวงเอพอกไซด์จึงไวต่อปฏิริยาการเปิดวงเอพอกไซด์ (Deeprasertkul, 1993)



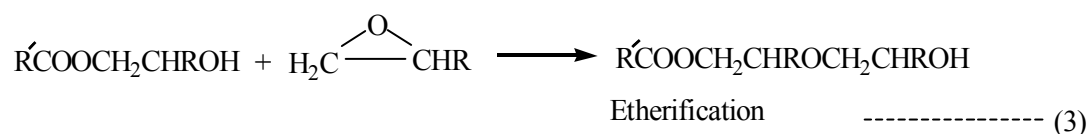
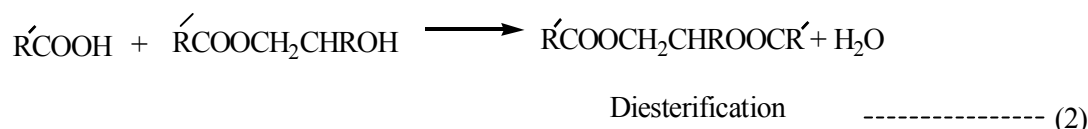
X คือ O, S,  $\text{NR}_3$        $\text{R}_1$  คือ หมู่อัลคิล      n คือ 0, 1, 2...

ปฏิริยาการเปิดวงของหมู่เอพอกไซด์โดยใช้กรดคาร์บอกซิลิกเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ศึกษากัน ปฏิริยาการเปิดวงเอพอกไซด์ของเอพอกไซด์แสดงดังนี้ (Deeprasertkul, 1993)



อัตราของปฏิริยาการเปิดวงเอพอกไซด์ ขึ้นอยู่กับสถานะของตัวเร่งของปฏิริยา อุณหภูมิ และปฏิริยาที่เหมาะสม

Shechter และคณะ (อ้างโดย Deeprasertkul, 1993) ศึกษาปฏิริยาเอพอกไซด์เรซิน และปฏิริยาการเปิดวงเอพอกไซด์โดยการเข้าร่วมของกรด แสดงปฏิริยา 4 ขั้นตอน ดังนี้



จากปฏิกิริยา กรดทำปฏิกิริยากับอิมพอกไซค์ ได้มอนอเอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลัก (1) จากนั้นมอนอเอสเทอร์ฟิเคชันทำปฏิกิริยากับกรดที่เหลือ ได้ไดเอสเทอร์ฟิเคชัน (2) ไดเอสเทอร์ฟิเคชันทำปฏิกิริยากับอิมพอกไซค์ ได้อิเทอร์ฟิเคชัน (3) และอิมพอกไซค์ทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดไฮโดรไลซิส (4) ซึ่งปฏิกิริยา (2), (3) และ (4) เป็นปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้น

ในสภาวะที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยาจะเกิดช้ามาก ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น เอมีน เกลือแอมโมเนียม โลหะอัลคาไลด์ และอัลคอกไซค์ ในกรณีที่ใช้เบสเป็นตัวเร่ง จะเกิดปฏิกิริยามอนอเอสเทอร์ฟิเคชันอย่างเดียวเท่านั้น (1) ในขณะที่ปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชัน (3) จะเกิดในระบบที่มีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

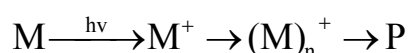
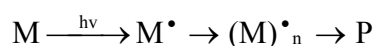
## 2.1.6 กระบวนการโฟโตเคมีพื้นฐานในปฏิกิริยาที่เหนี่ยวนำโดยแสง

### (Basic photochemical process in light –induced reaction)

#### 2.1.6.1 กระบวนการพอลิเมอไรเซชันในปฏิกิริยาที่เหนี่ยวนำโดยตรงจากแสง

##### (Direct photo-induced polymerization)

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันโดยใช้แสงเมื่อทำให้เกิดพอลิเมอร์ (Polymer, P) โดยเกิดผ่านปฏิกิริยาสายโซ่ที่ถูกริเริ่ม โดยแสง ดังนั้นชนิดของหน่วยที่ทำปฏิกิริยา (อนุมูลอิสระ หรือแคตไอออน) จะเกิดขึ้นจากมอนอเมอร์ (Monomer, M) เรียกปฏิกิริยาในลักษณะนี้ว่า อนุมูลอิสระหรือแคตไอออนพอลิเมอไรเซชัน (Fouassier, 1993)

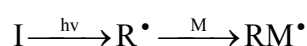




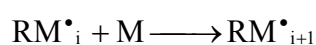


(Fouassier, 1993) ขั้นที่ 1 เป็นขั้นการริเริ่ม เกิดขึ้นจาก ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นค่าหนึ่งเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ  $R^\bullet$  และเมื่อ  $R^\bullet$  ทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์จะได้  $RM^\bullet$  ขั้นที่ 2 เป็นขั้นการแผ่ขยายสายโซ่ เกิดขึ้นจาก  $RM^\bullet$  ทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ไปเรื่อยๆ และขั้นที่ 3 เป็นขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยา เกิดขึ้นเมื่ออนุมูลอิสระของมอนอเมอร์มารวมกันทำให้สิ้นสุดปฏิกิริยา

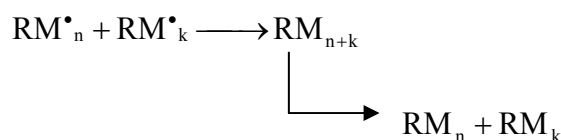
Initiation



Propagation



Termination



ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตเคมีคอล โดยทั่วไปการกระตุ้นโดยแสงอัลตราไวโอเล็ต โฟโตอินิเชียเตอร์ถูกกระตุ้นในขั้นแรกอยู่ในสถานะ Excited singlet และจากนั้นจะเปลี่ยนเป็น Triplet state (การที่โมเลกุลที่  $S_1$  ข้ามไปอยู่ที่  $T_1$  โดยผ่านการเชื่อมโยงอย่างรวดเร็วภายในระบบ อนุมูลอิสระจะสามารถเข้าไปในโมเลกุลมอนอเมอร์และเริ่มการพอลิเมอไรเซชัน สถานะ กระตุ้นที่อยู่ใน triplet state กระบวนการ ดังเช่น

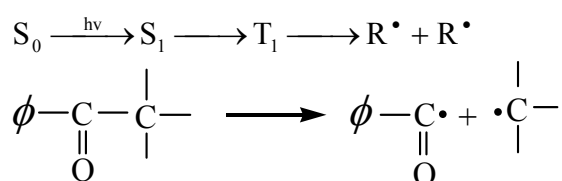
- การระงับปฏิกิริยาด้วยออกซิเจน (Quenching oxygen)
- กระบวนการไม่ใช้รังสี หรือใช้รังสี (non-radiative or radiative processes)
- โครงสร้างทางเคมีของผลิตภัณฑ์ โมเลกุลที่อยู่ใน Triplet state จะเกิดการเปลี่ยนแปลง

- ปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นๆ

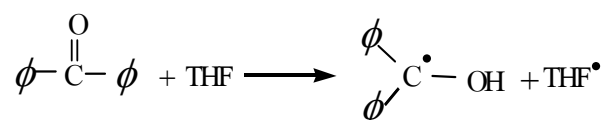
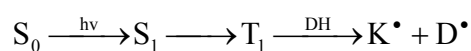
ตัวริเริ่มหลายชนิดถูกใช้ในกระบวนการบ่มเร่งด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต กระบวนการโฟโตเคมีคอล และโฟโตฟิสิกส์คอล และที่นิยมใช้ เช่น กระบวนการตัดสลายโดยใช้แสง ปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจน และการถ่ายโอนอิเล็กตรอน เป็นต้น

ลักษณะโดยทั่วไปของการเกิดโฟโตอินิเชียเตอร์ ดังนี้

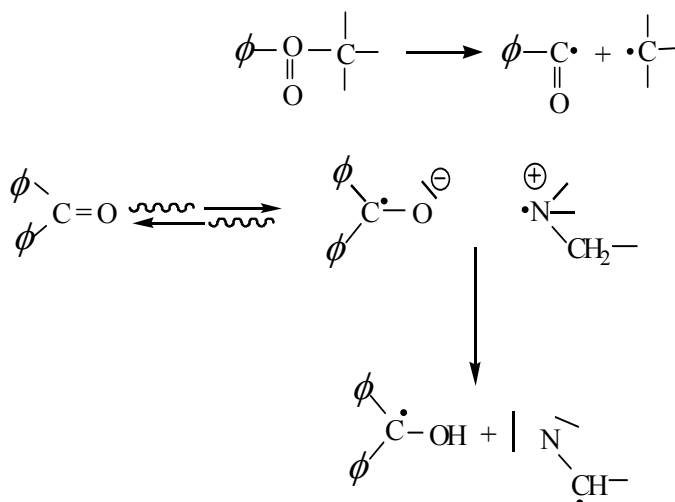
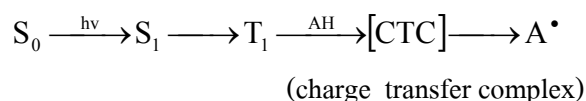
1. กระบวนการตัดสลายโดยใช้แสง (Photocission process) สารพวกเอริล-อัลคิลคีโตน เช่น Irgacure 184 และ Irgacure 651 จะถูกใช้ในกระบวนการนี้ ซึ่งจะเกิดเป็นอนุมูลอิสระ



2. ปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจนออก (Hydrogen abstraction reaction) ชนิดของอนุมูลอิสระชนิดที่ก่อให้เกิดโฟตรีดักชันให้เป็นสถานะ Triplet โดยการให้ไฮโดรเจน เช่น เตตระไฮโดรฟิวแรน หรือแอลกอฮอล์



3. การถ่ายโอนอิเล็กตรอน (Electron transfer) ในระบบเอมีนจะเกิดกระบวนการถ่ายโอนโปรตอน (Proton transfer) ตามด้วยปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในสถานะ Triplet



ช่วงชีวิตของสถานะ Triplet ประสิทธิภาพในการเกิดอนุมูลอิสระจะลดลง และประสิทธิภาพของการระงับปฏิกิริยาโดยมอนอเมอร์หรือออกซิเจนมากขึ้น

โดยทั่วไปโพลีเมโรไลเซชัน ประกอบด้วยสารที่เกี่ยวข้อง 4 ชนิด (Fouassier, 1993)

1. โฟโตอินิเชียเตอร์ (Photoinitiator) โฟโตอินิเชียเตอร์หลายชนิด และโฟโตเซนติไซเซอร์ จะส่งผลข้างเคียงต่อการพอลิเมโรไลเซชัน

2. ไดลูเอนต์ที่มีความว่องไว (Reactive diluent) มีหลักการคือ ให้ความหนืดของสารผสมในระดับที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ซึ่ง Reactive diluent จะเข้าร่วมในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันด้วย

3. โอลิโกเมอร์ (Oligomer) โดยทั่วไปมอนอเมอร์หลายๆ ฟังก์ชันจะเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่ สายโซ่หลักของโอลิโกเมอร์มีโครงสร้างทางเคมีที่หลากหลาย (เช่น พอลิเอสเตอร์ ยูรีเทน อีพอกซี) ซึ่งจะมีสมบัติเชิงกลเป็นอย่างดี และให้สมบัติทางกายภาพ เช่น ความแข็ง การทนต่อการกัดกร่อน ทนต่อตัวทำละลาย มีความเป็นอีลาสโตเมอร์ การเกาะติดดี การทนต่อการซึมผ่านแก๊ส ทนภายใต้แสงแดด เป็นต้น

4. สารตัวเติม (Additive) ในทางอุตสาหกรรมสารตัวเติม คือ ต้องมีสมบัติพิเศษ ตัวอย่างสารตัวเติม เช่น Filler pigment, Stabilizer, Wetting agent, Anti-foam เป็นต้น

อย่างไรก็ตามมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน

1) ประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงของโมเลกุลที่มีหมู่โครโมฟอร์ ซึ่งวัดจากค่าการดูดกลืนแสง และความเข้มแสง

2) ช่วงสเปกตรัมการดูดกลืน มีความสำคัญที่ระยะความยาวคลื่นที่เหมาะสมของการดูดกลืนของโฟโตอินิเชียเตอร์ ไปยังช่วงสเปกตรัมของแหล่งแสง

3) การระเหยและความสามารถในการสกัด ปกติโฟโตอินิเชียเตอร์เป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยทั่วไปมีการระเหยสูง และง่ายต่อการสกัดระหว่างกระบวนการบ่มเร่ง นอกจากนี้การสลายตัวทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเข้าร่วมของอนุโมลอิสระจะไม่ถูกทำลายในกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันซึ่งจะระเหยง่าย และเป็นสารตั้งต้นที่มีกลิ่น

4) การสลายตัวด้วยแสงภายใต้การได้รับแสงภายนอก ฟิล์์มที่ผ่านการบ่มเร่ง โดยเฉพาะในกรณีของวารันิช จะต้องมีการเปลี่ยนสีภายหลังการก่อตัว และเวลาที่จะกลายเป็นสีเหลืองปรากฏการณ์นี้ขึ้นอยู่กับพอลิเมอร์หลัก และขึ้นอยู่กับธรรมชาติของโฟโตอินิเชียเตอร์ด้วย

5) ผลของความเข้มแสง ที่ความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการพอลิเมอร์ไรเซชันสูงขึ้นด้วย

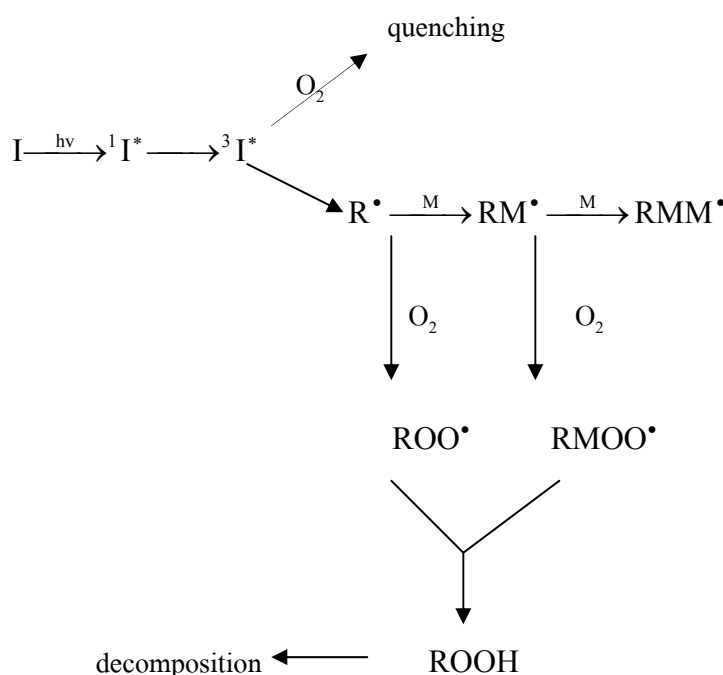
6) ภาวะแวดล้อม ความสำคัญ และความแตกต่างที่เห็นได้ชัดของสารเหล่านั้น ซึ่ง เป็นผลมาจากการเกิดพอลิเมอร์ ดังนี้ คือ

- ที่อัตราการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันสูง ซึ่งเกิดจากลักษณะของมัดติฟังก์ชัน ความหนาของฟิล์มต่ำ ความเข้มข้นของตัวริเริ่มสูง

- ความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายพอลิเมอร์กับน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยที่ต่ำ ระหว่างการเชื่อมโยง 2 สายโซ่เข้าด้วยกันในกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันโดยใช้แสง

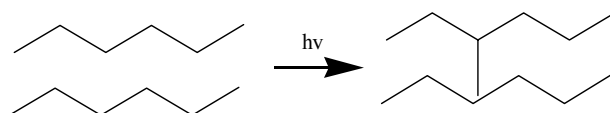
- สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของพอลิเมอร์ที่เชื่อมโยงเป็นโครงร่างตาข่าย ซึ่งจะต้องมีความทนทานต่อแสงแดดของผลิตภัณฑ์เมื่อเวลาผ่านไป

- การระงับปฏิกิริยาคัวยออกซิเจน เป็นที่รู้กันดีว่าออกซิเจนในบรรยากาศทำให้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของวาร์นิชเกิดได้ยากขึ้น (ไม่เกิดการกระตุ้นในชั้นสารมัธยันตร์ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง และเกิดอนุมูลอิสระของออกซิเจน) ทำให้เกิดการออกซิเดชัน



### 2.1.7 กระบวนการเชื่อมโยงสายโซ่โดยใช้แสง (Photocrosslinking process)

โดยทั่วไปกระบวนการเชื่อมโยงสายโซ่โดยใช้แสงจะสัมพันธ์กับการเชื่อมโยงของโมเลกุลใหญ่บนสายโซ่ โดยผ่านปฏิกิริยาโฟโตเคมีคอล ทำให้น้ำหนักโมเลกุลระหว่างการเชื่อมโยงสายโซ่ ( $M_c$ ) 2 ชนิดลดลง (Fouassier, 1993)





### 2.1.8 โฟโตอินิเชียเตอร์ (Photoinitiator)

โฟโตอินิเชียเตอร์ เป็นสารประกอบที่สามารถดูดกลืนแสงได้แล้วเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวสปีชีส์ ที่มีความว่องไว ซึ่งสปีชีส์ทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มหรือเป็นตัวเร่งในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันซึ่งโฟโตอินิเชียเตอร์เมื่อเข้าไปเป็นตัวริเริ่มในปฏิกิริยาเคมี จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านสมบัติการละลาย และสมบัติทางกายภาพซึ่งเหมาะสมในการนำมาออกสูตรต่างๆ

โดยส่วนมากการเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดโดยการพอลิเมอไรเซชัน หรือปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันเมื่อถูกริเริ่มการเกิดปฏิกิริยาด้วยโฟโตอินิเชียเตอร์ และแสงเรียกกระบวนการนี้ว่า โฟโตพอลิเมอไรเซชัน หรือการบ่มเร่งรังสีปกติจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากของเหลว และที่ละลายได้ กลายเป็นพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมโยงสายโซ่เป็นโครงร่างตาข่ายที่มีความแข็ง สารเคลือบที่ผ่านการบ่มเร่งจะมีความทนทานทั้งทางด้านกายภาพ และทางเคมี และสามารถเพิ่มความเงางามให้ไม่พลาสติก หรือแห้งได้ด้วย

#### 2.1.8.1 โฟโตอินิเชียเตอร์แบบอนุมูลอิสระ (Radical photoinitiator)

กระบวนการพอลิเมอไรเซชันโดยอนุมูลอิสระของอะคริเลทหรือสไตรีน พบว่ามีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง ความหลากหลายของโฟโตอินิเชียเตอร์แบบอนุมูลอิสระได้ถูกพัฒนาออกไปการบ่มเร่งโดยการใช้รังสีจะทำโดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต 300-400 nm

#### 2.1.8.2 โฟโตอินิเชียเตอร์แบบแคตไอออนิก (Cationic photoinitiator)

Brönsted ถูกใช้เป็นตัวริเริ่มสำหรับการเกิดพอลิเมอร์แบบแคตไอออนิก (เช่น อีพอกไซด์) หรือถ้าเป็นเรซินจะสามารถเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โดยผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น การใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นในกระบวนการขั้นริเริ่ม จะเป็นข้อดีสำหรับเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโยงสายโซ่โดยการใช้รังสี

### 2.1.9 กระบวนการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV – Curing process )

(<http://www.tasuvcuring.com/curing.htm>., 2007)

UV – Curing เป็นกระบวนการโฟโตเคมีคอลโดยใช้ศึกษาถึงการพอลิเมอไรซ์ของมอนอเมอร์ที่เป็นของเหลว หรือการบ่มเร่งโดยได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ความสัมพันธ์ของการบ่มเร่ง ขึ้นอยู่กับปริมาณของมอนอเมอร์ ความเข้มแสง และแหล่งรังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีอัลตราไวโอเล็ตมีค่าความยาวคลื่น 3 ช่วง คือ

Long wave UV-A 320-420 nm

Mid range UV-B 280- 320 nm

Short wave UV-C 180-280 nm

โดยนำมาประยุกต์ใช้งานในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของงาน ดังต่อไปนี้

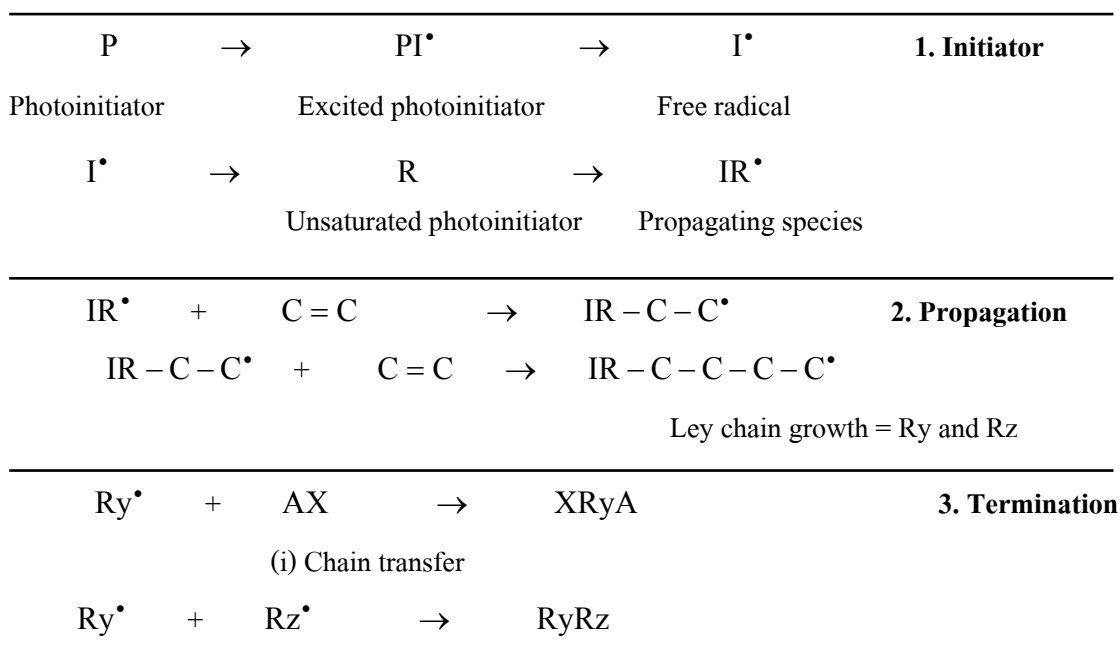
1. Ozone Production 184.9 nm
2. Germicidal 253.0 nm
3. Erythematous 300.0 nm
4. Black light 365.0 nm
5. UV-curing 180-420 nm

#### หลักการของ UV-curing

การพอลิเมอไรเซชันในระหว่างการบ่มเร่ง โดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต จะเกิดขึ้นเมื่อสารเคลือบถูกฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยมีปัจจัยสำคัญ ดังนี้คือ

1. พื้นฐานทางเคมีของ UV-curing (Basic chemistry of ultraviolet curing)

การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตในกระบวนการเคลือบผิว สามารถทำได้โดยผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างเป็นร่างตาข่าย การเกิดอนุมูลอิสระ ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้



ขั้นแรก ขั้นริเริ่มปฏิกิริยาจะเกิดอนุมูลอิสระของโฟโตอินิเชียเตอร์เมื่อมีแสงมากระตุ้น โฟโตอินิเชียเตอร์เหล่านี้จะถูกใช้จาก 1 %-10% โดยน้ำหนักของปริมาณเรซินทั้งหมด

ขั้นที่สอง ขั้นการแผ่ขยาย สายโซ่จะเกิดการเคลื่อนย้าย และแผ่ขยายออกไป

ขั้นที่สาม ขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยา จะติดตามบ่มเร่งบนพื้นผิวได้น้อย อาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาอื่นๆในขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยา จะเกิดจากการยับยั้งของออกซิเจนซึ่งสามารถเกิดได้ 2 ทาง โดยไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ ซึ่งเป็นสาเหตุของการขัดขวางบ่มเร่ง เช่น Quenching reaction และ Scavenging reaction ออกซิเจนจะอยู่ในสถานะ Triplet ในโฟโตอินิเชียเตอร์ ดังนั้นจึงเป็นการยับยั้งการเกิด Primary radical ถ้าโฟโตอินิเชียเตอร์สามารถเป็นตัวนำในการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน ดังนั้นจึงไม่เกิดการบ่มเร่ง

Quenching reaction จะทำให้เกิดอนุมูลอิสระของเปอร์ออกซี ซึ่งอนุมูลอิสระจะเป็นตัวเหนี่ยวนำในกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันแต่อนุมูลอิสระขั้นแผ่ขยายจะลดลง ดังนั้นประสิทธิภาพของปฏิกิริยาจะลดลง หรือเพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับโฟโตอินิเชียเตอร์ ซึ่งจะส่งผลให้สารเคลือบราคาสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีการใช้เอมีน หรืออะคริเลทเอมีนกันมาก

## 2. โอลิโกเมอร์ (Oligomers)

อะคริเลทโอลิโกเมอร์ในการเคลือบโดยกระบวนการบ่มเร่ง ควรมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 400 กระบวนการอะคริเลชันจะเกิดตรงตำแหน่งพันธะคู่หรือที่หมู่  $C=C$  และความหนืดของโอลิโกเมอร์จะเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น

อะคริเลทพอกซีโอลิโกเมอร์มีความทนทานต่อสารเคมีดีเยี่ยม และมีอัตราการบ่มเร่งที่เร็ว จึงถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับพื้นผิว และอิเล็กทรอนิกส์

พอลิเอสเทอร์อะคริเลทพบว่าถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการยึดติดหมึกพิมพ์ และอุตสาหกรรมกระดาษ ซึ่งโอลิโกเมอร์ชนิดนี้จะมีข้อจำกัดน้อย

## 3. มอนอเมอร์ (Monomers)

มอนอเมอร์ถูกใช้เป็นตัวไดลูเอนต์ (Diluents) ในกระบวนการบ่มเร่ง ซึ่งจะมีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยา และการเชื่อมโยงสายโซ่ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม ผลของฟังก์ชันนอลิตี แสดงดังตาราง 2.6

อย่างไรก็ตามถ้าฟังก์ชันของมอนอเมอร์สูงความสามารถในการเคลื่อนที่ของมอนอเมอร์จะลดลงที่ฟังก์ชันของมอนอเมอร์สูง จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงสายโซ่ได้สูงขึ้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงขึ้น ทนต่อความร้อน ทนต่อแรงดึง และทนต่อสารเคมีมากขึ้น ตัวอย่างมอนอเมอร์ที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม แสดงดังตาราง 2.7



ตาราง 2.6 ผลของฟังก์ชันแนลิตีของไดคลูแอนท์ต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยแสงยูวี (RadTech Asia 95 Symposium and Workshop, 1995)

Properties	Increasing Functionality
Elongation	-
Hardness	+
Flexibility	-
Impact resistance	-
Thermal stability	+
Chemical resistance	+

ตาราง 2.7 ตัวอย่างมอนอเมอร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการบ่มเร่งด้วยแสงยูวี (RadTech Asia 95 Symposium and Workshop, 1995)

Monofunctional	Difunctional	Trifunctional
IBOA	HDDA	TMPTA
NVP	TPGDA	OTA 480
ODA	DPGDA	TMPTMA
B-CEA	TTEGDA	PETIA

#### 4. สารตัวเติม (Additives)

สารเคลือบผิวที่ได้โดยปฏิกิริยาการบ่มเร่ง โฟโตอินิเชียเตอร์ที่ใช้เติมโดยทั่วไปเป็นสารตัวเติม (Filler) หรือเม็ดสี (Pigment) โฟโตอินิเชียเตอร์จะดูดซับแสง ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระซึ่งโฟโตอินิเชียเตอร์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ Photoabstraction และ Photocleavage initiator ซึ่งในปัจจุบันโฟโตอินิเชียเตอร์ 2 ประเภทนี้มีการใช้กันอย่างสารตัวเติมและเม็ดสีจะถูกใช้ในอุตสาหกรรมหมึกพิมพ์ และอุตสาหกรรมอื่นๆ มากมาย แต่การใช้สารตัวเติมนี้ต้องมีการควบคุมใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เพราะสารตัวเติมนี้จะเป็นตัวแข่งขันกับโฟโตอินิเชียเตอร์ซึ่งอาจจะไปยับยั้งในกระบวนการบ่มเร่งได้

## 5. การแก้ปัญหา

ปัญหาที่เกิดขึ้นเกือบทั้งหมดเกิดจากเมื่อเคลือบแล้วไม่มีการยึดติดกับวัสดุ ถ้าสารเคลือบผิวโดยผ่าน UV curing ไม่เกิดการบ่มเร่ง อาจเนื่องมาจากเครื่องมือทำงานบกพร่อง เช่น ได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ตไม่เพียงพอ การเติมเม็ดสีมากเกินไปในหมึกพิมพ์ ความเข้มของแสงน้อยเกินไป หรือปริมาณของโฟโตอินิเชียเตอร์คลาดเคลื่อน ถ้าเป็นปัญหาเกี่ยวกับอุปกรณ์ความผิดพลาดของหลอดแสง ซึ่งในทางอุตสาหกรรมต้องวัดปริมาณแสงอัลตราไวโอเล็ตจาก Radiometer ในหน่วย จูล/เซนติเมตร ถ้าเกิดการบ่มเร่งสมบูรณ์แต่ประสิทธิภาพการยึดติดไม่ดี สมมติฐานได้ว่า อาจเกิดจากปริมาณของแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งเป็นไปได้ที่จะไปยับยั้งการทำงานของซบสเตอร์ก่อนการทำปฏิกิริยา (Substrat pretreatment) วิธีนี้เป็นวิธีการที่สำคัญในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับการยึดติด ก่อนการทดลอง สามารถกระทำโดยเชิงเคมี เชิงกล เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการยึดติดของสารเคลือบผิว

### 2.9.1.1 การบ่มเร่งด้วยแสงยูวีของยางอะคริเลท (UV-curing of acrylate rubber)

(RadTech Asia 95 Symposium and Workshop, 1995)

#### Photoinduced radical polymerisation

การบ่มเร่งของยางอะคริเลทพบว่ายางอะคริเลทถูกเชื่อมโยงสายโซ่ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของหมู่อะคริเลทที่ยื่นออกมาโดยใช้ Irgacure 369 เป็นโฟโตอินิเชียเตอร์ ภายใต้ความเข้มแสง  $400 \text{ mWcm}^{-2}$  ซึ่งพบว่าปฏิกิริยาของสายโซ่จะเกิดอย่างรวดเร็วพอลิเมอร์ที่ผ่านการฉายแสงจะมีความแข็งแรง และไม่สลายตัวในตัวทำละลายอินทรีย์

สำหรับ Acrylate cyclic rubber การบ่มเร่ง จะเกิดอย่างช้าๆ เนื่องจากพอลิเมอร์มีความแข็งดั่งนั้น โมเลกุลจึงมีการเคลื่อนที่ได้น้อยปฏิกิริยาจึงเกิดได้ช้าลง ที่ 80 % ของยางไซโคลซ์จะมีความแข็งแรงยังคงยืดหยุ่นอยู่โดยการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งจะให้สารเคลือบที่มีความทนทานต่อการขีดข่วน และทนต่อการกระแทก

ความเร็วของการเชื่อม โยงสายโซ่จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมตัวเชื่อม โยงสายโซ่ (Crosslinker) เช่น 1,6-hexanediol diacrylate (HDDA) สารตัวนี้จะเป็นตัวพลาสติกไซเซอร์ที่มีความว่องไวโดยทำให้การทำงานในขั้นริเริ่ม และขั้นการแผ่ขยายในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันเพิ่มขึ้น การเติม HDDA พบว่ากระบวนการพอลิเมอไรซ์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อผ่านการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตในยางธรรมชาติ และสายโซ่จะเชื่อมโยงเป็นโครงร่างตาข่ายเกิดขึ้น และพบว่า การเติม HDDA 50% ในยางธรรมชาติอะคริเลทจะเป็นตัวนำให้อัตราการเกิดพอลิเมอไรเซชันเพิ่มขึ้น 70% ของพันธะคู่ในยางอะคริเลทจะถูกทำปฏิกิริยาหลังจากการฉายแสง 0.1 วินาที ในขั้นการบ่มเร่ง การเชื่อม โยงสายโซ่จะเกิดได้สูง และจะได้พอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรง ดังนั้นการฉายแสงจะส่งผลให้

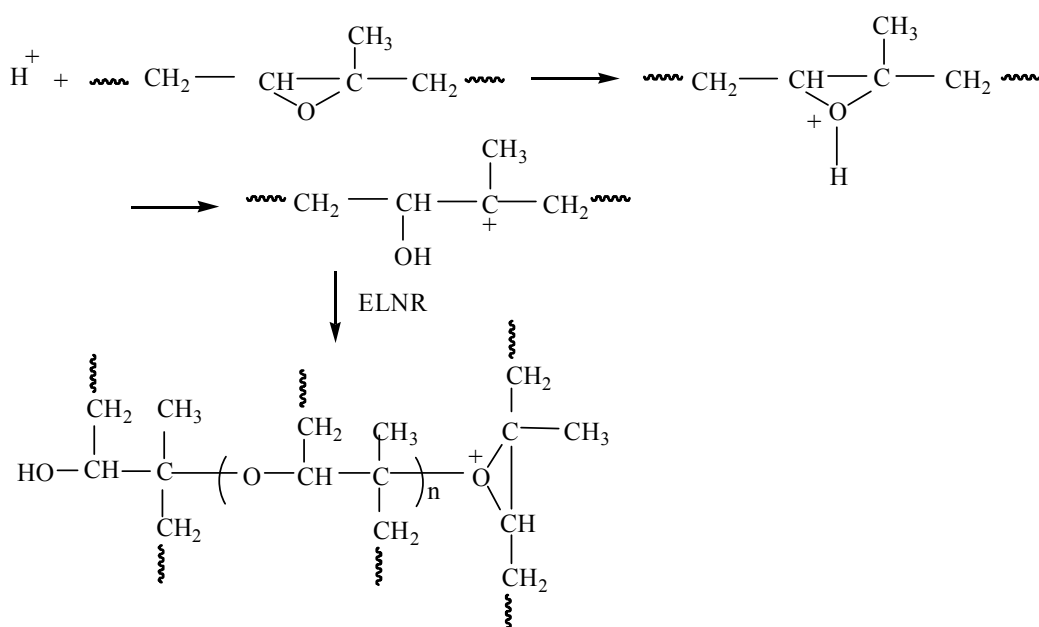
พอลิเมอร์มีความแข็งแรงขึ้นซึ่งการเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายของโคพอลิเมอร์ จะแสดงให้เห็นสายโซ่ของยางจะถูกเชื่อมต่อกันในทิศทางเดียวกันโดยผ่านสายโซ่อะคริเลท หรือไม่ก็เกิดการพอลิเมอไรเซชันของ HDDA นอกจากนี้มีบางช่วงที่เกิดจากการผ่านพอลิเมอไรเซชันภายในโมเลกุลของพันธะคู่ของยางอะคริเลทที่ยื่นออกมาบนตำแหน่งสายโซ่

การพิจารณาความว่องไวของการทำปฏิกิริยาของยางอะคริเลทที่เป็นได หรือไตรอะคริเลทมอนอเมอร์โดยเติมพลาสติกไซเซออร์ มีการทดลองโดยการได้รับแสงอาทิตย์ ครั้งหนึ่งของพันธะคู่ในยางอะคริเลทจะทำปฏิกิริยาหลังจาก 2 นาทีของการได้รับแสง และมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติ Viscoelastic ของฟิล์มที่ผ่านการได้รับแสง และบางครั้งการพอลิเมอไรเซชันของหมู่อะคริเลทที่ยื่นออกมาในยางไซโคลซ์แทบจะไม่เกิดปฏิกิริยาเมื่อได้รับแสงอาทิตย์ ซึ่งอาจเนื่องมาจากผลของการยับยั้งของออกซิเจนที่อยู่ในอากาศทำให้ฟิล์มทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ เมื่อความเข้มแสงอาทิตย์ลดลง

### 2.1.9.2 การบ่มเร่งด้วยแสงยูวีของยางอีพอกไซด์ (UV-curing of epoxidised rubber)

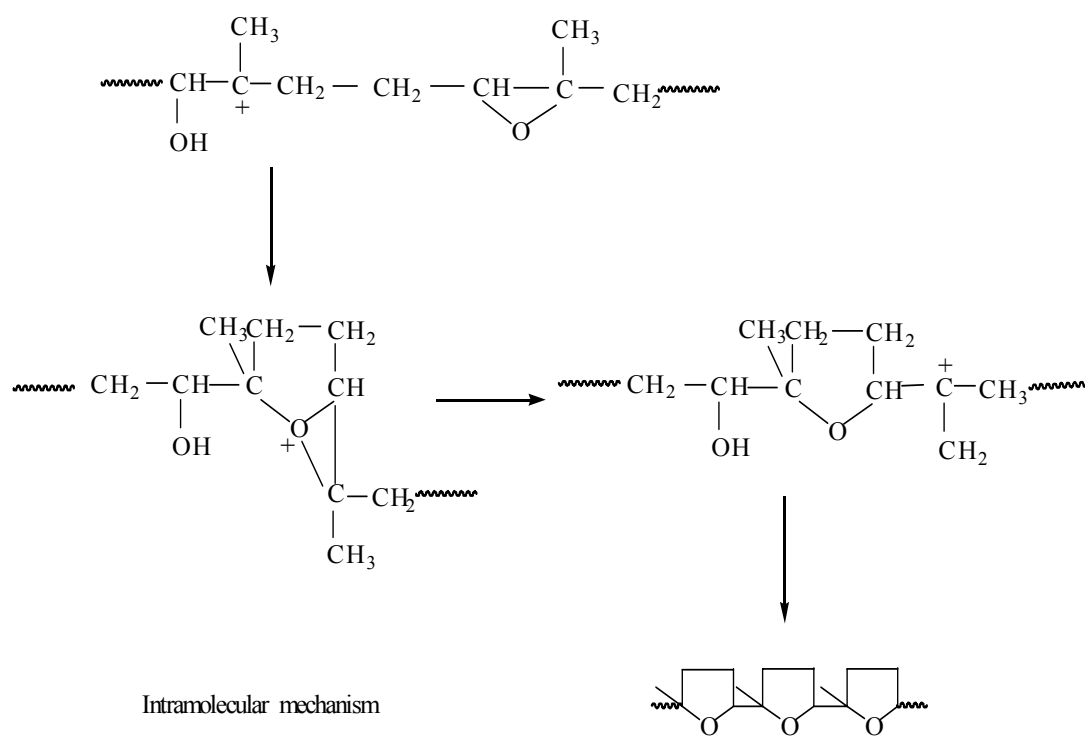
#### Photoinitiated cationic polymerisation

ยางอีพอกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่เมื่อผ่านการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งแสงจะเป็นตัวทำให้กรดมีแตกตัวเป็นประจุบวก ซึ่งจะเป็นตัวริเริ่มในปฏิกิริยาการเปิดวงอีพอกไซด์และจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแคตไอออนิกของหมู่เอพอกไซด์ และมีการเชื่อมโยงสายโซ่ของอีเทอร์ระหว่างสายโซ่ (RadTech Asia 95 Symposium and Workshop, 1995)



เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค FT-IR หมู่อีพอกซ์จะปรากฏที่สัญญาณ  $870\text{ cm}^{-1}$  และหมู่ไฮดรอกซิลจะปรากฏที่สัญญาณ  $1080\text{ cm}^{-1}$  สำหรับยางธรรมชาติอีพอกไซด์เมื่อผ่านการฉายแสง โดยมีการเข้าร่วมของเฮกซะฟลูออโรโรฟอสเฟต ไตรเอริลซัลโฟเนียม (Hexafluorophosphate triarylsulfonium) 3% โดยน้ำหนัก จะมีสมบัติที่ไม่สามารถละลายได้ และความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป แต่ก็ยังคงความยืดหยุ่นที่ดี ซึ่งส่งผลให้สมบัติการทนต่อการกระแทก และทนต่อการขีดข่วนสูงขึ้น

นอกจากนี้ปฏิกิริยาการเปิดวงอีพอกไซด์โดยผ่านกลไกภายในโมเลกุล ส่งผลต่อหมู่ข้างเคียงที่อยู่บนสายโซ่เช่นเดียวกัน เช่นปฏิกิริยาจะไม่มีผลทั้งความสามารถในการละลาย และความแข็งของตัวอย่างที่ผ่านการฉายแสง ซึ่งทำให้เกิดโครงสร้างของเตตระไฮโดรไพวเรนในสายโซ่ของยาง ดังรูป



การเกิดพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันในยางอีพอกไซด์

(Polymerization multifunctional monomer in epoxidised rubber)

1. ไดไซโคลอีพอกไซด์ + ยางอีพอกไซด์ (Dicycloepoxide + epoxidise rubber)

กระบวนการเปิดวงอีพอกซ์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อยางอีพอกไซด์ และไดไซโคลอีพอกซ์มีมอนอเมอร์ ผ่านการฉายแสงซึ่งหมู่อีพอกซ์ 2 ชนิดจะมีผลศาสตร์คล้ายๆ กัน แต่ยางอีพอกไซด์จะมี Conversion สูงกว่า (90% หลังจากการฉายแสง 3 วินาที) ไดไซโคลอีพอกไซด์ (76%) อาจ

เนื่องจากการพอลิเมอไรเซชันระหว่างโมเลกุลของโคพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ผ่านบ่มแรงจะไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ และจะแสดงดีกรีการบวมพองน้อยกว่ายางธรรมชาติอีพอกซีไธด์ที่ผ่านกระบวนการบ่มแรง ซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีการเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่เป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ ส่งผลให้สารเคลือบมีความแข็งมากขึ้น และทนทานต่อการขีดข่วน

## 2. ๒. ไดอะครีเลท + ยางอีพอกซีไธด์ (Diacrylate + epoxidised rubber)

การทำให้สายโซ่เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงร่างตาข่าย สามารถกระทำให้เกิดอย่างรวดเร็วขึ้น โดย การบ่มแรงของยางอีพอกซีไธด์ที่เติมพลาสติกไฮเซอรด์ด้วยไดอะครีเลทมอนอเมอร์ เช่น 1, 6-hexanediol diacrylate (HDDA) ซึ่งมีการเข้าร่วมทั้งอนุมูลอิสระ และแคตไอออนิกโฟโตอินิเชียเตอร์ ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายใต้การได้รับแสง ซึ่งกระบวนการพอลิเมอไรเซชันเหล่านี้จะถูกพัฒนาอย่างกว้างขวาง เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีความแข็ง

การเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์ซึ่งมีโครงสร้างที่แตกต่างออกไป จะอาศัยปัจจัยหลัก 3 ข้อที่ควบคุมกระบวนการอยู่ คือ หมู่ฟังก์ชันในสายโซ่ของพอลิเมอร์ มอนอเมอร์ที่ใช้ทำปฏิกิริยากับพลาสติกไฮเซอรด์ และ ชนิดของโฟโตอินิเชียเตอร์ (Le Xuan and Decker, 1993)

### 2.1.9.3 ข้อดีของการใช้ กระบวนการบ่มแรงด้วยแสงยูวี

(<http://www.tasuvcuring.com/curing.htm>., 2007)

1. ผลผลิตที่เกิดจากการบ่มแรงจะมีความเร็วสูง
2. กระบวนการบ่มแรง จะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพราะการเชื่อมโยงสายโซ่โดยการใช้รังสีจะมีปริมาณตัวทำละลายน้อยมากๆ สารประกอบนี้จะเป็นโคพอลิเมอร์ และจะติดอยู่ในเรซินที่ผ่านการบ่มแรง และปริมาณของสารอินทรีย์ที่ระเหยจะมีปริมาณน้อยมากๆ ด้วย
3. การบ่มแรงสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งเหมาะกับวัสดุที่ไม่ทนต่อความร้อน
4. มีความร้อนออกมามาก เพราะแสงอัลตราไวโอเล็ตจะสามารถใช้รังสีอินฟราเรดแทนได้ซึ่งวัสดุที่มีความเปราะบาง หรือแตกหักง่ายเช่น กระจก พลาสติก และสามารถทำเป็นฟิล์มบางๆที่ใช้กระบวนการได้อย่างปลอดภัย

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ ในกระบวนการบ่มแรงในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมหมึกพิมพ์ แม่พิมพ์ สารเคลือบผิว สี และอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการยึดติด

### 2.1.10 สารเคลือบผิว (Surface coating) (อรอุษา, 2543)

#### 2.1.10.1 วัตถุประสงค์ของการเคลือบผิว

สารเคลือบผิว (Surface coating) มีอิทธิพลต่อสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อมนุษย์ มากมายพอสมควร

วัตถุประสงค์ของการเคลือบผิวมีอยู่ด้วยกัน 2 ประการ คือ

1. เพื่อป้องกันพื้นผิววัสดุจากมลภาวะต่างๆ สารเคลือบผิวจะช่วยให้ใบหน้าของวัสดุที่ถูกเคลือบมีความทนทานต่ออากาศ น้ำและสารเคมีต่างๆ นอกจากนี้สารเคลือบผิวยังช่วยให้ผิวหน้าของวัสดุมีความแข็งแรงขึ้น ทนทานต่อการขีดสีได้มากขึ้น และอายุการใช้งานยาวนาน

ตัวอย่างของการป้องกันพื้นผิววัสดุ เช่น การใช้สีทาไม้เพื่อป้องกันการผุพังของไม้อันเนื่องมาจากความชื้น หรือการเคลือบผิวภายในกระป๋องโลหะ เพื่อป้องกันการเกิดการกัดกร่อนของอาหาร หรือจากสารเคมีที่บรรจุอยู่ภายใน หรือการเคลือบพื้นผิวชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อไม่ให้เกิดความชื้น หรือสารเคลือบผิวประเภทสีหน่วงการติดไฟ (Fire retardant paint) ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการลุกไหม้บนผิวหน้า เป็นต้น

2. เพื่อตกแต่งให้แลดูสวยงาม ความสวยงามของวัสดุหลังการเคลือบผิวหน้าด้วยสารเคลือบผิวอาจมาจากสี ความเงา จากกลดลายการตกแต่ง หรือจากความสว่าง หรือจากทั้งหมดรวมกัน

### 2.1.10.2 ประเภทของสารเคลือบผิว

แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. สี (Paint) หมายถึง สารที่มีส่วนผสมของผงสี (Pigment) สารยึด (Binder) ตัวทำละลาย (Solvent) และสารเติมแต่ง (Additives)

ผงสี เป็นสารที่ให้สี และมีความสามารถในการปิดบังพื้นผิวหรือกำลังซ่อนแสง (Hiding power) ผงสีอาจเป็นสารประกอบอินทรีย์ หรืออนินทรีย์ก็ได้

สารยึดหรือสิ่งนำสี คือสารที่ทำหน้าที่ยึดประสานอนุภาคของสารในสีเข้าไว้ด้วยกันให้เกิดเป็นฟิล์มของสีติดแน่นกับพื้นผิวที่ถูกเคลือบ ตัวอย่างของสารยึดได้แก่ น้ำมันแห้งเร็ว (Drying oil) เรซินธรรมชาติ เรซินสังเคราะห์ เป็นต้น

ตัวทำละลาย มีหน้าที่ช่วยปรับความหนืดของสี เพื่อให้เหมาะต่อการผลิตหรือสะดวกต่อการใช้ตัวทำละลายส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์

สารเติมแต่ง เป็นสารที่เติมลงไปนสีเพียงเล็กน้อย เพื่อช่วยให้สีมีสมบัติพิเศษต่างๆ เช่น ทำให้สีแห้งเร็วขึ้น ทำให้สีไม่ขึ้นรา เป็นต้น

2. วาร์นิช (Varnish) คือ สารเคลือบผิวที่ประกอบด้วยสารยึดเพียงอย่างเดียว

3. แล็กเกอร์ (Lacquer) ได้แก่ สารละลายซึ่งได้จากการนำเรซิน หรือสารยึดมาละลายในตัวทำละลายอินทรีย์

### 2.1.10.3 การเกิดฟิล์ม (Film formation)

การเปลี่ยนสภาพจากสารเคลือบผิวในภาชนะบรรจุ ไปเป็นฟิล์มที่ติดยึดแน่นกับผิว และทำให้พื้นผิวมีความทนทานเพิ่มขึ้นคือ กระบวนการเกิดฟิล์ม ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. การประยุกต์ใช้ (Application) เป็นการนำสารเคลือบผิวไปเคลือบผิวหน้า หรือ ทำให้ผิวหน้าของวัสดุเกิดเป็นฟิล์มบางๆ ขึ้น การทำอาจใช้แปรง ลูกกลิ้ง การพ่น หรือการจุ่มก็ได้

2. ฟิกเซชัน (Fixation) เป็นการทำให้ฟิล์มติดแน่น ไม่หลุดออกจากผิวหน้า และไม่เกิดเป็นชั้นของฟิล์มที่ไม่ต้องการ ตัวอย่างเช่น กรณีที่เป็นสารเคลือบผิวหน้าที่มีตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นส่วนประกอบ การเกิดเป็นฟิล์มในขั้นตอนฟิกเซชันจะเกิดโดยการระเหยของตัวทำละลาย หรือ ถ้าสารเคลือบผิวเป็นแบบระบบลาเท็กซ์ (Latex system) ขั้นตอนฟิกเซชันจะเกิดโดยการระเหยของ น้ำ เป็นต้น

3. การบ่มเร่ง (Curing) เป็นการทำให้ฟิล์มที่ผ่านขั้นตอนฟิกเซชันแล้วมีความทนทานดีขึ้น ซึ่งอาจทำได้โดยการใช้แสง ความร้อนหรืออากาศ เช่น สีน้ำมันทาบ้าน จะเกิดการบ่ม โดยการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นฟิล์มแห้งแข็งที่มีความทนทานเพิ่มขึ้น หรือการนำเคลือบ (Ensmel) ที่ทำจากพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตไปอบก็เป็นการบ่ม อีกวิธีหนึ่ง

กระบวนการเกิดฟิล์มของสารเคลือบผิวบางชนิด ไม่จำเป็นจะต้องมีขั้นตอนเสมอไป ตัวอย่างเช่น แล็กเกอร์ มีขั้นตอนฟิกเซชัน และการบ่มรวมกัน โดยอาศัยการระเหยของตัวทำละลาย ระหว่างการประยุกต์ เป็นต้น

### 2.1.10.4 การแห้งของสารเคลือบผิว

โดยทั่วไป สารเคลือบผิวจะแห้งโดยกรรมวิธีต่างๆ กันได้ 2 แบบ คือ

1. แห้งโดยกรรมวิธีทางฟิสิกส์ (Physical drying) คือ การแห้งโดยวิธีการนี้เกิดจากการระเหยของตัวทำละลาย กลายเป็นฟิล์มยึดติดกับผิวหน้าด้วยพันธะทุติยภูมิ (Secondary bond) อย่างอ่อนๆ ดังนั้นฟิล์มที่ได้ยังคงละลายได้ในตัวทำละลายของมัน

2. แห้งโดยกรรมวิธีทางเคมี (Chemical drying) คือ ฟิล์มที่ได้จากการแห้งตัวโดยวิธีการยึดติดกับผิวหน้าด้วยพันธะปฐมภูมิ (Primary bond) จากการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นแผ่นฟิล์มที่ได้จะแข็งแรง และทนทานต่อตัวทำละลาย

การแห้งโดยกรรมวิธีทางเคมีนี้ อาจเกิดโดย

- แห้งโดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารเคลือบผิวประเภทนี้เมื่อโดนออกซิเจนในอากาศจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ขนาดอนุภาคของสารเคลือบผิวใหญ่ขึ้น จนรวมตัว

เป็นฟิล์มแห้งแข็งตามต้องการ เช่น สีน้ำมันทาบ้านที่ผลิตจากอัลคิเดเรซิน (Alkyd resin) เป็นต้น การแห้งโดยวิธีนี้อาจเร่งให้เร็วขึ้นได้โดยการใส่สารเร่งแห้ง (Drier)

- แห้งโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมี สารเคลือบผิวประเภทนี้ส่วนใหญ่บรรจุในภาชนะแยกกัน ก่อนใช้จึงนำมาผสมกันตามอัตราส่วนที่ผู้ผลิตแนะนำ ซึ่งเมื่อผสมแล้วจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นฟิล์มที่แห้งแข็ง ดังนั้นเมื่อผสมแล้วจึงต้องทำให้หมดภายในระยะเวลาที่กำหนดไว้ ถ้าปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิต่ำ เรียกว่าสารเคลือบผิวชนิดนี้ว่า สารเคลือบผิวชนิดบ่มเย็น (Cold curing coatings) ตัวอย่างเช่น ยูเรีย เรซิน (Urea resin) พอลิยูรีเทนเรซิน (Polyurethane resin) เป็นต้น แต่ถ้าปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิสูง เรียกว่าสารเคลือบผิวชนิดนี้ว่า สารเคลือบผิวชนิดอบ (Stoving or baking coatings)

#### 2.1.10.5 การทดสอบสารเคลือบผิว ( อรอุษา, 2543)

ในการทดสอบสารเคลือบผิว จะทำการทดสอบในสถานะต่างๆกันดังนี้ คือ ของเหลว (Liquid coating) ฟิล์มเปียก (Wet film) และ ฟิล์มแห้ง (Dry film)

##### 1. การทดสอบสารเคลือบผิวในสถานะของเหลว (Tests on liquid coating)

###### - ความหนืด (Viscosity)

ความหนืด หมายถึง ความต้านทานต่อการไหลของของเหลว การวัดความหนืดสามารถทำได้หลายวิธี เครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดความหนืดหรือวิสโคมิเตอร์ (Viscometer) ในการวัดความหนืด ไม่ว่าจะโดยวิธีใดก็ตามอุณหภูมิมาตรฐานที่กำหนดให้ใช้คือ 25°C

โดยปกติความหนืดของสารเคลือบผิวหาได้ในหน่วยพอยส์ (Poise) โดยที่น้ำจะมีความหนืดประมาณ 0.01 พอยส์ หรือ 1 เซนติพอยส์ แต่มาตรฐานความหนืดบางประเภทจะวัดการไหลภายใต้แรงโน้มถ่วง กล่าวคือ อัตราการไหลหาได้จาก อัตราส่วนของความหนืดต่อความหนาแน่น ความหนืดที่ได้จากวัดโดยวิธีการแบบนี้ เรียกว่า ความหนืดคิเนมาติก (Kinematic viscosity) มีหน่วยเป็นสโตกส์ (Stokes) หรือตารางเซนติเมตรต่อวินาที

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยสโตกส์ และหน่วยพอยส์ แสดงได้ดังนี้

$$\text{ความหนืดจลนศาสตร์} = \frac{\text{ความหนืดพลวัต}}{\text{ความหนาแน่น}}$$

###### - ปริมาณสารที่ระเหยได้ (Volatile content)

การหาปริมาณสารที่ระเหยได้เป็นการตรวจสอบส่วนประกอบต่างๆ ของสารเคลือบผิว ทำได้โดยการนำสารเคลือบผิวหนัก 2-3 กรัม ใส่ในภาชนะกั้นเบนแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปอบต่ออีกประมาณ 30 นาทีแล้วมา



ซึ่งนำหน้าอีกครึ่งว่าหน้าหนักงที่แล้วหรือยัง หน้าหนักส่วนที่หายไปก็คือ ปริมาณสารที่ระเหยได้นั่นเอง

#### - ระยะเวลาการแห้งตัว (Drying time)

วิธีการที่ง่ายที่สุดในการหาระยะเวลาการแห้งของสารเคลือบผิว คือใช้นิ้วแตะเบาๆที่ผิวของฟิล์ม การแห้งของฟิล์มของสารเคลือบผิวซึ่งแห้งได้เองในอากาศแตกต่างกันตามระยะเวลาการแห้งตามลำดับ ดังนี้

1. แห้งฝุ่นไม่ติด หมายถึง การแห้งชั้นที่ฝุ่นไม่ติดพื้นผิวที่เคลือบไว้แล้วอีกต่อไป การแห้งชั้นนี้เป็นระยะเวลาที่เมื่อใช้นิ้วแตะเบาๆ ที่ผิวของฟิล์มแล้วสารเคลือบผิวจะไม่ติดนิ้วออกมา
2. แห้งที่ผิว หมายถึง การแห้งถึงขั้นแห้งเฉพาะผิวหน้าแต่ข้างล่างยังนิ่มและเหนียวอยู่ ทดสอบได้โดยใช้ลูกแก้วกลมเล็กใส่ทดลองบนแผ่นทดสอบที่เคลือบผลิตภัณฑ์แล้วจากระยะสูง 15 เซนติเมตรทิ้งไว้ 10 นาทีถือแผ่นทดสอบเอียงท่ามุม 20 องศากับแกนนอนแล้วใช้แปรงปัดลูกแก้วเบาๆ ถ้าสามารถเอาลูกแก้วออกโดยไม่ทำให้ผิวเสียหาย แสดงว่าผิวเคลือบนั้นแห้งที่ผิวแล้ว
3. แห้งแตะได้ หมายถึง การแห้งถึงขั้นที่แตะเบาๆ แล้วไม่มีรอยนิ้วมือติดอยู่
4. แห้งแตะไม่ติด หมายถึง การแห้งถึงขั้นที่ผิวไม่อยู่ในสภาพเหนียวติดแม้ว่าจะมีแรงกด การแห้งชั้นนี้เป็นระยะเวลาที่เมื่อใช้นิ้วแตะเบาๆ ที่ผิวของฟิล์มแล้วจะไม่มียอยใดๆเกิดขึ้นบนผิวของฟิล์มเลย หรืออาจทำได้โดยการใส่ทรายโปรยที่ผิวของฟิล์ม แล้วบันทึกระยะเวลาที่เมื่อใช้แปรงขนปัดเบาๆ ที่ผิวแล้วทรายหลุดออกมาได้ง่ายโดยไม่ทำให้ผิวของฟิล์มเสียหาย
5. แห้งแข็ง หมายถึง การแห้งที่ใช้นิ้วหัวแม่มือกดบนผิวของฟิล์ม แล้วหมุนรอบๆ ถ้าผิวไม่เกิดความเสียหาย แสดงว่าผิวเคลือบนั้นแห้งแข็งดีแล้ว

#### 2.1.10.6 การทดสอบสารเคลือบผิวในสถานะฟิล์มแห้ง (Tests on dry film)

##### - ความแข็ง (Hardness)

ความแข็ง หมายถึง ความสามารถของฟิล์มของสารเคลือบผิวที่ทนต่อการเกิดรอยจากการกด หรือขูดขีดด้วยของแข็ง

วิธีการทดสอบหาความแข็งของฟิล์มของสารเคลือบผิวที่ง่ายที่สุด และสามารถใช้ประโยชน์ได้ดี ได้แก่ การทดสอบความแข็งโดยใช้ดินสอด (Pencil hardness test) การทดสอบทำได้โดยการนำดินสอดที่มีความแข็งต่างๆ กัน (ความแข็งของดินสอดจะลดลงจากเบอร์ 6H ถึง 4B) กดลงบนฟิล์มถ้าปลายดินสอดเบอร์ใดแตกในระหว่างที่แทงทะลุผิวฟิล์มไป ก็ถือว่าฟิล์มดังกล่าวมีความแข็งเท่ากับดินสอดนั้น เช่น ถ้าฟิล์มมีความแข็งมากจนทำให้ดินสอดเบอร์ 6H ซึ่งแข็งที่สุดแตกแสดงว่าฟิล์มนั้นมีความแข็งมากคือ เท่ากับดินสอดเบอร์ 6H แต่ถ้าดินสอดสามารถแทงทะลุผ่านผิวของฟิล์มได้

โดยดินสอ ไม่แตกเลยแม้กระทั่งดินสอเบอร์ 4B ที่มีความแข็งน้อยที่สุด แสดงว่าฟิล์มนั้นมีผิวเคลือบที่อ่อน (Soft coating) (อรอุษา, 2543)

**- การทดสอบการกระทบ (Impact test)**

สามารถทดสอบได้โดยเครื่องทดสอบความทนทานต่อการกระทบ ประกอบด้วย ลูกตุ้มหนัก 2.25 ปอนด์ (1 กิโลกรัม) หรือ 4 ปอนด์ (1.8 กิโลกรัม) แล้วสามารถเลื่อนขึ้นเลื่อนลงได้ในระยะทาง 25 หรือ 40 นิ้ว เมื่อทดสอบก็นำแผ่นทดสอบที่เคลือบตัวอย่างทดสอบไว้แล้วยึดที่ฐานของเครื่องมือจากนั้นตั้งระยะทางที่ปล่อยให้ลูกตุ้มลงมากระทบกับแผ่นทดสอบที่ระยะต่างๆกัน ทำการทดสอบโดยการปล่อยลูกตุ้มลงให้กระทบกับแผ่นทดสอบอย่างรวดเร็ว จากนั้นตรวจผิวแผ่นทดสอบความทนทานต่อการกระทบ มีหน่วยเป็นนิ้ว-ปอนด์ (Inch-pounds) เช่น ใช้ลูกตุ้มหนัก 4 ปอนด์ ปล่อยลงมาให้กระทบกับแผ่นทดสอบจากระยะทาง 40 นิ้ว ปรากฏว่าเป็นระยะทางสูงสุดที่ทำให้ฟิล์มไม่เกิดการบกร่อง เช่น การแตก หรือการหลุดล่อน แสดงว่าฟิล์มดังกล่าวมีความทนทานต่อการกระทบเท่ากับ 160 นิ้ว-ปอนด์

**- การติดแน่น (Adhesion)**

วิธีทดสอบที่ง่ายที่สุด คือใช้ของมีคมขีดที่ผิวฟิล์ม ถ้าฟิล์มเปราะหรือมีแรงยึดเกาะกับพื้นผิวได้ไม่ดีฟิล์มก็จะเกิดการแตก ซึ่งการทดสอบให้ใช้ของมีคมปาดเป็นรูปสี่เหลี่ยมเล็กๆ บนผิวของฟิล์มให้ทะลุถึงแผ่นทดสอบจากนั้นใช้แปรงปัดแผ่นทดสอบไปมาเบาๆ 5 ครั้งแล้วตรวจสอบดูว่า ผิวของฟิล์มบกร่องมากน้อยเพียงใดถ้าไม่พบข้อบกพร่องบนผิวของฟิล์มเลย แสดงว่าฟิล์มดังกล่าวมีความติดแน่นดีมาก

**- ความทนน้ำ (Water resistance)**

การทดสอบทำโดยวิธีการจุ่มน้ำภายในระยะเวลาที่กำหนด เมื่อครบระยะเวลาแล้วนำแผ่นทดสอบออกจากรูน้ำแล้วซับด้วยกระดาษซับ ตรวจสอบพื้นผิวแผ่นทดสอบเพื่อดูรอยพองหรือข้อบกพร่องอื่นๆ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตรวจสอบพื้นผิวแผ่นทดสอบอีกครั้งหนึ่ง เพื่อดูสภาพการยึดเกาะ สนิม การเปลี่ยนสี การเกิดเชื้อรา หรือข้อบกพร่องอื่นๆ

**- ความทนทานต่อตัวทำละลาย (Solvent resistance)**

การทดสอบความทนทานต่อตัวทำละลายใช้วิธีการเดียวกับการทดสอบหาความทนน้ำกล่าวคือ ทดสอบโดยการนำแผ่นทดสอบไปจุ่มในตัวทำละลายต่างๆ ภายในช่วงเวลาที่กำหนด แล้วตรวจสอบสภาพของฟิล์ม ถ้าฟิล์มมีความทนทานต่อตัวทำละลายได้ดีหลังการจุ่มแล้วฟิล์มต้องมีสภาพเหมือนเดิมไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้น

### 2.1.10.7 ข้อบกพร่องที่เกิดกับสารเคลือบผิว

ข้อบกพร่องที่เกิดกับสารเคลือบผิวหรือฟิล์มของสารเคลือบผิวไม่ว่าจะเป็นสี วาร์นิช หรือแล็กเกอร์อาจเป็นผลมาจากสาเหตุหลายประการดังนี้ คือ

1. การเตรียมพื้นผิววัสดุที่ต้องการเคลือบยังไม่ดีพอ เช่น พื้นผิวไม่สะอาดหรือไม่แห้งสนิท เป็นต้น
2. ใช้เทคนิคหรือกรรมวิธีการเคลือบไม่ถูกต้อง
3. ทำการเคลือบภายใต้ภาวะที่ไม่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิต่ำเกินไป หรือ ความชื้นสูงเกินไป เป็นต้น
4. เคลือบพื้นผิวบางหรือหนาเกินไป
5. เลือกใช้สารเคลือบผิวที่ไม่เหมาะสมกับพื้นผิววัสดุ
6. เลือกใช้วัสดุคิพที่ไม่เหมาะสมกับชนิดของสารเคลือบผิวหรือวัสดุคิพที่ใช้มีคุณภาพต่ำ

ดังนั้นสามารถป้องกันการเกิดข้อบกพร่อง หรือให้เกิดขึ้นน้อยที่สุดได้โดยการหลีกเลี่ยงสาเหตุต่างๆ ที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

**ข้อบกพร่องที่เกิดกับสารเคลือบผิวมีหลายลักษณะ ดังนี้**

#### 1. การเป็นฝ้า (Bloom)

การเป็นฝ้า หมายถึง ลักษณะมีคราบน้ำมันหรือไขมันที่เกิดขึ้นบนผิวของฟิล์มที่แห้งแล้วและทำให้ความเงาของฟิล์มลดลง การเป็นฝ้าอาจเกิดมาจาก

- การใช้สารเร่งแห้งที่ทำจากเกลือของโคบอลต์หรือแมงกานีสมากเกินไปเป็นผลทำให้เกิดการตกตะกอนของสารที่เรียกว่า ลิโนซิน(Linoxyn) บนผิวของฟิล์ม สารลิโนซินนี้จะดูดความชื้นและฝุ่น ทำให้ฟิล์มเป็นฝ้า

- การใช้สารยึดที่มีคุณภาพต่ำซึ่งจะดูดความชื้นจากอากาศในระหว่างการแห้ง ทำให้ฟิล์มเมื่อแห้งเกิดเป็นฝ้าขึ้น

- แอมโมเนียและซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งมีอยู่ในอากาศ จะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นตะกอนเล็กๆ ของแอมโมเนียมซัลเฟตจับอยู่บนผิวของฟิล์ม ทำให้ฟิล์มเป็นฝ้า

การเป็นฝ้าที่เกิดขึ้นบนผิวของฟิล์มของสารเคลือบผิวนี้ สามารถกำจัดได้โดยการใช้ผ้าเปียกเช็ดออก นอกจากนี้สามารถป้องกันการเกิดเป็นฝ้าได้โดยการใส่แคลเซียมเนฟทีนตเป็นสารเติมแต่งลงไปในสารเคลือบผิวด้วย

## 2. ความดำน (Blushing)

ความดำน หมายถึง ลักษณะที่บวมแดงของฟิล์มของแล็กเกอร์ที่กำลังแห้ง ซึ่งเกิดจากการตกตะกอนของส่วนที่เป็นของแข็งของผลิตภัณฑ์ ความดำนมี 2 แบบ คือความดำนเนื่องจากความชื้น (Moisture blushing) และความดำนเนื่องจากกัม (Gum blushing) แบบแรกมีสาเหตุมาจากความชื้นสูง และแบบหลังมีสาเหตุมาจากการเลือกใช้ตัวทำละลายที่ไม่ถูกต้อง เกิดการระเหยเร็วเกินไป เป็นผลให้ของแข็งที่ไม่ระเหยบางส่วนตกตะกอน การป้องกันไม่ให้แล็กเกอร์เกิดความดำนทำได้โดยการปรับอัตราการระเหยของตัวทำละลายที่ใช้โดยการใช้ตัวทำละลายที่มีส่วนผสมต่างๆ กัน

## 3. รอยแตก (Cracking)

รอยแตก หมายถึง ข้อบกพร่องของฟิล์มของสารเคลือบผิวที่เกิดการแยกตัวเนื่องจากสารเคลือบผิวสามารถขยายตัว และหดตัวได้ในอัตราที่เท่ากันระหว่างกรรมวิธีการแห้งของตัวฟิล์ม ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลือบสารเคลือบผิวหนา ซึ่งรอยแตกมีหลายลักษณะต่างๆ กัน

## 4. การเป็นรูเข็มและการเป็นหลุม (Pinholing and cratering)

การเป็นรูเข็ม หมายถึง การเกิดเป็นรูเข็มเล็กๆ บนผิวของฟิล์มของสารเคลือบผิวมีสาเหตุมาจากระหว่างการเคลือบเกิดฟองอากาศเล็กๆ ซึ่งจะแตกระหว่างกรรมวิธีแห้งตัวเป็นฟิล์ม ทำให้ผิวของฟิล์มเกิดเป็นรูเล็กๆ ลักษณะเหมือนรูเข็ม

## 5. การล่อนเป็นเกล็ด (Flaking)

การล่อนเป็นเกล็ด หมายถึง ปรากฏการณ์ที่ฟิล์มของสารเคลือบผิวหลุดออกมาเป็นแผ่นเล็กๆ ซึ่งมีรูปร่างแตกต่างกัน และมีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยต่ำกว่า 6 มิลลิเมตร การล่อนเป็นเกล็ด มีสาเหตุจากฟิล์มของสารเคลือบผิวไม่มีแรงยึดกับผิวของวัสดุ มักจะเกิดกับผิววัสดุที่ยังมีความชื้นยังเหลืออยู่ ดังนั้นเมื่อเคลือบด้วยสารเคลือบผิวแรงดันจากน้ำใต้ฟิล์มจะดันฟิล์มให้หลุดออกมา โดยเริ่มจากฟิล์มเกิดการพองก่อนแล้วจึงจะล่อนเป็นเกล็ดออกมาทีหลัง

## 6. การดิ่งตัว (Lifting)

การดิ่งตัว หมายถึง การพองตัวของฟิล์มของสารเคลือบผิวที่แห้งแล้ว เมื่อเคลือบสารเคลือบผิวอีกชั้นหนึ่งทับ มักจะเกิดเป็นรอยย่น การดิ่งตัวมีสาเหตุมาจากการเลือกใช้ตัวทำละลายที่มีสภาพแรงเกินไป

## 7. ลักษณะผิวส้ม (Orange peel)

ข้อบกพร่องชนิดนี้ แสดงถึงลักษณะของฟิล์มที่พ่นแล้วไม่เรียบคล้ายผิวส้ม มีเหตุหลายประการ คือ

### 1. ความหนืดของสารเคลือบสูงเกินไป

2. ใช้อัตราส่วนของตัวทำละลายไม่เหมาะสม กล่าวคือ ใช้ตัวทำละลายที่มีจุดเดือดต่ำในปริมาณสูงเกินไป ดังนั้นแก้ไขได้โดยการเพิ่มอัตราส่วนของตัวทำละลายที่มีจุดเดือดสูง

3. ขณะพ่นหัวพ่นอยู่ห่างจากผิววัสดุมากเกินไป เกิดการสูญเสียตัวทำละลายก่อนที่สารเคลือบผิวจะไปเกาะที่ผิววัสดุ ทำให้ฟิล์มที่ได้ไม่เรียบ

#### 8. การเป็นคลื่น (Rivelling)

การเป็นคลื่น หมายถึง การที่ผิวของสารเคลือบมีลักษณะไม่เรียบคล้ายระลอกคลื่น มีสาเหตุจากการเคลือบหนาเกินไป หรือจากการใช้สารเร่งแห้งของโคบอลต์มากเกินไป ทำให้การแห้งตัวเป็นฟิล์มจากชั้นบนสุดไปยังชั้นล่างสุดเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ

#### 9. การย้อย (Sagging or curtaining)

การย้อย หมายถึง การที่ฟิล์มของสารเคลือบผิวไหลลงมาระหว่างทำการเคลือบ แล้วเกิดการแข็งตัวเป็นผลให้ผิวเคลือบไม่สม่ำเสมอมีขอบล่างหนา ซึ่งการย้อยมีสาเหตุจากการเคลือบหนาเกินไป หรือเกิดจากการใช้ตัวทำละลายที่ระเหยช้า หรือมีสาเหตุมาจากการเคลือบที่อุณหภูมิต่ำเกินไป

#### 10. การเกิดฝ้า (Silking)

การเกิดฝ้าที่ผิวหน้าของฟิล์มของสารเคลือบผิว (Skin on surface) มีสาเหตุจากสารเคลือบผิวมีส่วนผสมของสารเร่งแห้งไม่เหมาะสม คือ มีส่วนผสมของสารเร่งแห้งจากโคบอลต์มากเกินไป

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 ยางธรรมชาติเหลว

Brosse *et al.* (1981) ศึกษาการเตรียมยางเหลวโดยใช้ปฏิกิริยารีดอกซ์ สารออกซิไดซ์ที่ใช้ได้แก่ ออกแกนิคเปอร์ออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และออกซิเจนในอากาศ ส่วนสารรีดิวซ์ได้แก่ อะโรมาติกไฮดราซีน (Aromatic hydrazine) กรดซัลฟานิลิก (Sulfhanilic acid) โดยพบว่าหมู่ปลายเป็น คาร์บอนิล (Carbonyl) หรือไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบของการเลือกใช้สารออกซิไดซ์ ยางเหลวที่เตรียมได้มีค่า  $\overline{M}_n$  ระหว่าง 3000- 35,000 และการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 1.70- 1.97

Perera *et al.* (1988) เตรียมยางธรรมชาติเหลวโดยเจือจางน้ำยางขึ้นให้มีปริมาณ 20 %DRC เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดนอนไอออนิก 2% เติมฟีนิลไฮดราซีน 10% โดยน้ำหนักเติมแก๊สออกซิเจน ปั่นกวนเป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C สามารถลดน้ำหนักโมเลกุลได้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามความหนืดเท่ากับ 4500

Tangpakdee *et al.* (1998) เตรียมยางธรรมชาติเหลวโดยการตัดสลายของยางโปรตีนต่ำ ด้วยวิธีการออกซิเดชันของ  $K_2S_2O_8$  และ โพรพานาล กวนที่อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  ได้ค่าความหนืด  $[\eta] = 5.5$  จากความหนืดของยางธรรมชาติ มีค่า  $[\eta] = 7.2$  เมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง และจากนั้น  $[\eta]$  เพิ่มขึ้นเป็น 6.5 เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง เมื่อเติมโพรพานอลพบว่า  $[\eta]$  ของยางเหลวที่ได้ มีค่า 0.5 เมื่อเวลาผ่านไป 5 ชั่วโมง ในขณะที่ยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงค่า  $[\eta]$  จะลดลงอย่างเล็กน้อย นอกจากนี้พบว่าความเข้มข้นของน้ำยางข้นและสารลดแรงตึงผิวจะมีผลน้อยมากต่อการอัตราตัดสลาย เมื่อนำยางธรรมชาติเหลววิเคราะห์ด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  พบว่าหมู่ปลายประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของคีโตนและอัลดีไฮด์

Tangpakdee *et al.* (2001) ศึกษาการตัดสลายยางธรรมชาติที่มีความบริสุทธิ์สูงโดยการออกซิเดชันยางธรรมชาติโปรตีนต่ำมีโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยนำยางธรรมชาติโปรตีนต่ำในรูปน้ำยางและสารละลาย และยางธรรมชาติโปรตีนต่ำมาเติมด้วย 1 phr  $\text{Co}(\text{acac})_2$  แล้วกวนที่อุณหภูมิ  $65^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้ววัดความหนืดโดย Ubbelohde viscometer รวมทั้งหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยคำนวณจาก vapour pressure osmometry และจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่อง FT-IR,  $^1\text{H-NMR}$  และ  $^{13}\text{C-NMR}$  พบว่าค่าความหนืดของยางธรรมชาติในรูปสารละลายเกิดการสลายตัวได้ง่ายกว่าในรูปน้ำยาง และค่าความหนืดของยางธรรมชาติโปรตีนต่ำ และยางธรรมชาติโปรตีนต่ำที่สกัดมีค่า  $[\eta] = 12$  และ  $[\eta] = 0.7$  ตามลำดับ ได้ค่า degree of polymerization ( $\overline{DP}$ ) จาก vapour pressure osmometry (VPO) ประมาณ 97 ซึ่งคิดเป็นค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ( $\overline{Mn}$ ) ประมาณ  $6.6 \times 10^3$

Okiemen *et al.* (2002) ศึกษาลักษณะและสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติเหลวซึ่งได้มาจากการตัดสายโซ่โมเลกุลของน้ำยางธรรมชาติ โดยใช้ไนโตรเบนซีนเป็นตัวตัดสลายพอลิเมอร์ (Depolymerizing agent) เพื่อให้ได้น้ำยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดลงโดยเฉลี่ยประมาณ 21% ของน้ำหนักของยางธรรมชาติเดิม ความเข้มข้นของไนโตรเบนซีนที่เหมาะสมในการตัดสลายสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ คือ 2.0 และ 2.5 phr ยางธรรมชาติเหลวจะมีสมบัติเฉพาะได้ดีกว่า

Curti *et al.* (2003) ศึกษาการตัดสลายโมเลกุลยางธรรมชาติโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสองชนิดคือคลอรานิล (Chloranil) และ  $\text{FeCl}_3$  ในสถานะสารละลาย ผลที่ได้เกิดการตัดสลายตรงตำแหน่งพันธะคู่บนสายโซ่ กลไกการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้คลอรานิลปฏิกิริยาการตัดสลายเกิดขึ้นแบบอนุมูลอิสระ กรณีใช้  $\text{FeCl}_3$  เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาการตัดสลายแบบแคตไอออนิก จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาศึกษาได้จากเทคนิค IR พลังงานกระตุ้นในการตัดสลายของ ยางธรรมชาติ /คลอรานิล เท่ากับ  $60.1 \text{ kJ.mol}^{-1}$  และ ยางธรรมชาติ/ $\text{FeCl}_3$  เท่ากับ  $41.9 \text{ kJ.mol}^{-1}$

### 2.2.2 ยางธรรมชาติอิพอกไซค์

NG and Gan (1981) ได้ศึกษาปฏิกิริยาของยางธรรมชาติกับกรดเปอร์ฟอร์มิก ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอร์มิก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้เกิดร้อยละโดยโมลอิพอกไซค์เป็น 1.71 และปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของวงแหวนอิพอกไซค์เป็นเตตระไฮโดรฟิวแรน และไกลคอล เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่ามีการเกิดวงเตตระไฮโดรฟิวแรนเพิ่มมากขึ้นด้วย

Burfield *et al.* (1983) ศึกษาการเกิดอิพอกซิเดชันของยางธรรมชาติ การอิพอกซิเดชันประกอบด้วยโบรโมไฮดรินเกิดอินเทอร์มีเดียตในระบบและมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่ง และก่อตัวเป็นกรดเปอร์เอซิดิก จลนศาสตร์ของการเกิดอิพอกซิเดชันด้วยกรดเปอร์เอซิดิกเป็นปฏิกิริยาอันดับ 2 ในเปอร์เอซิด และยางไฮโดรคาร์บอน และมีพลังงานกระตุ้นทั้งหมด  $56.2 \text{ kJ.Mol}^{-1}$  เมื่อระดับอิพอกซิเดชันสูงขึ้น ส่งผลต่อค่า  $T_g$  และความหนาแน่นของพอลิเมอร์สูงขึ้นด้วย

Burfield *et al.* (1984) ศึกษาการเกิดอิพอกไซค์ของยางธรรมชาติด้วยเทคนิค การไทเทรต การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$ ,  $^{13}\text{C-NMR}$  และ Differential scanning calorimetry (DSC) พบว่าเทคนิคการไทเทรต สามารถวิเคราะห์ร้อยละโดยโมลอิพอกไซค์ ( $<15$  ร้อยละโดยโมลอิพอกไซค์) เทคนิค NMR ได้ค่าความเที่ยงตรงต่อเมื่อร้อยละโดยโมลอิพอกไซค์อยู่ในช่วง 20-75 ส่วนเทคนิคการวิเคราะห์จะเชื่อถือได้น้อย การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC สามารถวัดค่า  $T_g$  และสามารถเชื่อถือได้สูง

Johnson and Thomas (2000) ศึกษาผลของอิพอกซิเดชันสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ เช่นสมบัติการทนน้ำมัน การทนต่อการซึมผ่านของอากาศโดยการเกิดร้อยละโดยโมลอิพอกไซค์เท่ากับ 25 และ 50 ปีจัยต่างๆที่ทดสอบ เช่น การแพร่ ประสิทธิภาพการซึมผ่าน และประสิทธิภาพการดูดซับ รวมถึงศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างที่บวมพอง ไม่บวมพอง และการบวมพองที่ลดลง จากการทดลองพบว่าอัตราการแพร่และประสิทธิภาพการแพร่ลดลง เมื่อปรับปรุงจากยางธรรมชาติให้มีร้อยละโดยโมลอิพอกไซค์เท่ากับ 50 สายโซ่ของยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นลดลง ประสิทธิภาพการซึมผ่านของอากาศ และประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มไปทางเดียว แต่ประสิทธิภาพการดูดซับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

### 2.2.3 การเคลือบผิว

Le Xuan and Decker (1993) ศึกษาพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดโครงร่างตาข่ายด้วยแสงได้ โดยขึ้นอยู่กับหมู่เอคริเลตซึ่งหมู่เอคริเลตนี้ได้จากปฏิกิริยาการเปิดวงอิพอกไซค์ในยางธรรมชาติอิพอกไซค์โดยใช้กรดอะคริลิก โดยยางธรรมชาติอะคริเลตจะเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงร่างตาข่าย

อย่างรวดเร็วเมื่อทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ในขณะที่มีพวก Aryl ketone เป็นโฟโตอินิเชียเตอร์ ซึ่งแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระเมื่อได้รับความร้อน พอลิเมอร์ที่เตรียมได้จะไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ และมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความแข็ง ความยืดหยุ่น และการทนต่อแรงกระแทกได้ดี และพบว่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นตามร้อยละการเกิดอะคริเลชัน

Chiantore *et al.* (2000) ศึกษาการทนต่อการออกซิเดชันของ เมทิลอะคริเลท พอลิเอทาอะคริเลท และพอลิบิวทิลเมทาคริเลท ภายใต้ภาวะรังสีอัลตราไวโอเล็ต ผลการเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเคมี โดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared spectroscopy (FTIR) และ Size exclusion chromatography พบว่าอะคริเลทมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่า เมื่อเทียบกับเมทาคริเลท เกิดการตัดสายโซ่ของหมู่อัลคิล ซึ่งเป็นปฏิกิริยาข้างเคียง เห็นได้ชัดว่าปฏิกิริยาการเชื่อมโยงตาข่ายทั้งในอะคริเลท และเมทาคริเลทปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่แบบตาข่าย และปฏิกิริยาการตัดสลายเกิดขึ้นพร้อมกัน

Phinyocheep and Duangthong (2000) เตรียมยางธรรมชาติเหลวที่สามารถเกิดโครงร่างตาข่ายด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยการเกาะติดของโมเลกุลที่ว่องไวแสงบนโมเลกุลของยางธรรมชาติเหลว ยางธรรมชาติเหลวเตรียมได้โดยการตัดสลายโดยออกซิเดชันของน้ำยางธรรมชาติ โดยใช้ฟีนิลไฮดรอกซี/ออกซิเจน น้ำยางธรรมชาติเหลวทำปฏิกิริยาต่อไปกับกรดเปอร์ฟอร์มิกซึ่งเตรียมในปฏิกิริยาได้ยางธรรมชาติเหลวอิมพอกไซค์ติดตามการดำเนินไปของปฏิกิริยาการเติมกรดอะคริลิก ซึ่งว่องไวต่อแสงบนวงแหวนอิมพอกไซค์ โดยใช้อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 80°C ปฏิกิริยาการเปิดวงอิมพอกไซค์ของยางธรรมชาติเหลวอิมพอกไซค์เกิดสมบูรณ์เมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมงซึ่งเร็วกว่าที่อุณหภูมิ 60°C ศึกษาปฏิกิริยาการเกิดโครงร่างตาข่ายด้วยแสงของยางธรรมชาติเหลวอิมพอกไซค์อะคริเลทโดยการติดตามความร้อนที่คายออกมาของการเกิดโครงร่างตาข่ายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ตำแหน่งพันธะคู่ของอะคริเลทซึ่งใช้โฟโตแคลอรีมิเตอร์ชนิดลำแสงคู่ การทดลองพบว่าปฏิกิริยาการเชื่อมข้ามพันธะเกิดขึ้นได้รวดเร็วเมื่อได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยมี Irgacure 184 และ Duracure 1173 เป็นตัวริเริ่ม และมอนอเมอร์อะคริเลทในรูปของเหลว (1,6-Hexanediol diacrylate และ Tripropylene glycol diacrylate) ศึกษาจลนศาสตร์พบว่าความเข้มข้นของมอนอเมอร์ และตัวริเริ่มมีบทบาทสำคัญต่ออัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยา

Chattopadhyay *et al.* (2005) เตรียมอิมพอกไซอะคริเลทเรซินที่มีสมบัติดีเยี่ยมได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมสารเคลือบผิวสามารถทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายโดยการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต จึงได้ศึกษาการเตรียมอิมพอกไซอะคริเลทและอิมพอกไซเมทาอะคริเลทจากปฏิกิริยาของ Epoxy novolac หรือ bis phenol-A-epoxy กับกรดอะคริลิกหรือกรดเมทาอะคริเลท ศึกษาการเกิดโครงร่างตาข่ายของอิมพอกไซอะคริเลทเรซิน



เมื่อแปรปริมาณของ Trimethylolpropane triacrylate (TMPTA) ซึ่งใช้เป็นตัวเชื่อมโยงสายโซ่ (Crosslinker) จากผลการทดลองพบว่าปริมาณ ของ TMPTA 10% โดยน้ำหนัก เป็นสูตรที่ให้ผลดีที่สุด จากผลการตรวจสอบจะสมบัติการทนต่อความร้อน สมบัติเชิงกล และการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ TMPTA เพิ่มขึ้น สมบัติบนพื้นผิวของสารเคลือบผิวสามารถวิเคราะห์โดยเทคนิค AR-XPS จากการตรวจสอบอีพอกซีอะคริเลทและอีพอกซีเมทาอะคริเลทโดยการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ไม่เพียงแต่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ขณะเดียวกันให้สารเคลือบผิวที่มีสมบัติที่ดีหลายประการ

Katangur *et al.* (2006) พัฒนาการเตรียมสารเคลือบผิวอะคริลิกโดยมีการเติมอนุภาคระดับนาโน เพื่อทำให้เกิดการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตได้มาก ทั้งที่เกิดการกระเจิงแสงได้น้อย เพื่อป้องกันโครงสร้างพอลิเมอร์จากการตัดสลายสายโซ่จากรังสีจากแสงอาทิตย์ อนุภาคระดับนาโนที่ใช้คือ ซิงค์ออกไซด์ และไททาเนียมออกไซด์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 15-70 นาโนเมตร โดยกระจายในอะคริลิกที่มีสภาวะเป็นอิมัลชัน ความหนาของฟิล์มที่เตรียมได้คือ 10 และ 20 ไมโครเมตร และเอาไปหุ้มเส้นใยเคฟลาร์ ผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกล และลักษณะของอะคริลิกอิมัลชัน และเส้นใยเคฟลาร์ที่เคลือบด้วยอนุภาคระดับนาโนโดยเทคนิค Infrared Visible และ UV spectroscopy พบว่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล และสมบัติทางเคมีของเส้นใย Kevlar หลังจากฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต 1 วันและ 1 สัปดาห์ที่ได้รับปริมาณแสงอัลตราไวโอเล็ต พบว่าผลการทดสอบการต้านต่อการฉีกขาดลดลง 22 % เมื่อฉายแสง 1 วัน และลดลง 33% เมื่อฉายแสง 1 สัปดาห์ ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงให้ผลในทำนองเดียวกัน และพบว่า ที่ความหนา 20 ไมโครเมตรของสารเคลือบทำให้เส้นใยที่ถูกเคลือบทนต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี ผลจากการพิสูจน์ด้วย FT-IR พบว่าหลังจากฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต มีการลดลงของตำแหน่งพีค  $1632\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของ เอไมด์ของโครงสร้างเส้นใยโดยลดลง 46% เมื่อฉายแสง 1 สัปดาห์