

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กาว (adhesive)

2.1.1 ศัพท์เทคนิคด้านกาว

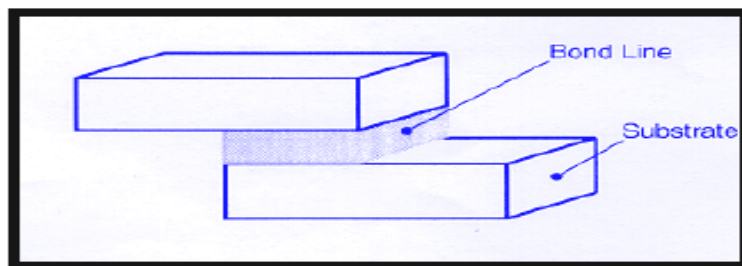
การติดประสาน (adhesion) เป็นกรรมวิธีที่ทำให้วัสดุที่เป็นของแข็งติดกันด้วยวัสดุเชื่อมติด (หรือกาว) ซึ่งมักจะเป็นแผ่นบางต่อเนื่อง ในการติดกาวส่วนใหญ่ต้องเตรียมผิวให้สะอาดและขรุขระหรือเรียบเสมอกัน ความแข็งแรงของกาวนั้นอาจต้องใช้เวลา ความร้อน แรงกด หรือการแนบของวัสดุทั้งสองชิ้นเข้าด้วยกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของงานและชนิดของกาว การเชื่อมติดด้วยกาวมีทั้งแบบถาวรซึ่งกาวจะใช้ได้ครั้งเดียวและจะเสียไปเมื่อถูกลอกหรือหักออก และแบบไม่ถาวรซึ่งใช้ซ้ำได้ วัสดุติดกาวหลุดออกจากกันได้ทั้งสองลักษณะ คือ กาวหลุดจากวัสดุที่เชื่อมติด (adhesive failure) และเนื้อกาวแยกหลุดออกจากกัน (cohesive failure)

กาว (adhesive) เป็นวัสดุที่ใช้สำหรับยึดติดวัตถุตั้งแต่สองชิ้นเข้าด้วยกัน ส่วนใหญ่เป็นวัสดุประเภทพอลิเมอร์ ในอดีตเราใช้กาวที่ได้จากธรรมชาติ เช่น เคซีนในน้ำมัน นํ้ายางจากต้นไม้ แป้ง หรือสารที่สกัดจากเกล็ดปลา ไข่ขาว หรือเขาสัตว์ แต่กาวที่ใช้กันมากในปัจจุบันนี้ส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ทั้งที่เป็นชนิดเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์แข็งมีการยึดติดที่ดีที่อุณหภูมิห้อง อ่อนตัวได้เมื่อโดนความร้อน และชนิดเทอร์โมเซตติง (thermosetting) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์แข็งที่มีความคงทนต่อความร้อน และไม่ละลายในตัวทำละลาย

Bond Line เป็นช่องว่างระหว่างผิววัสดุซึ่งบรรจุด้วยกาว ดังภาพประกอบ 2.1

Substrate เป็นวัสดุที่นำมายึดติดด้วยกาว ดังภาพประกอบ 2.1

Surface ผิวหน้าของวัสดุที่ใช้ทา กาว



ภาพประกอบ 2.1 การยึดติดของกาว (<http://www.glugura.com>, 2005)

Cure กาวเกิดปฏิกิริยา โดยจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง โดย การคงรูปของกาว ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเนื่องจาก ความเย็น ตัวทำละลายระเหย หรือสารเคมีในส่วนประกอบเกิดปฏิกิริยา โดยส่งผลให้กาวเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และทางเคมี

Green Strength เป็นความแข็งแรงของกาวในการยึดติดวัสดุเข้าด้วยกันในช่วงแรกที่กาวเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง (ในช่วง green time)

Green Time (open time) เป็นระยะเวลาที่กาวเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งโดยนับจากการทา กาวลงบนผิววัสดุที่ต้องการจะยึดติด

Kick Over เป็นการเพิ่มขึ้นของความหนืดอย่างทันทีทันใดในขณะที่กาวกำลัง cure โดยกาวจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งอย่างทันทีทันใด จึงจำเป็นต้องทา กาวอย่างรวดเร็ว

Pot Life เป็นระยะเวลาที่กาวสามารถคงอยู่ในสถานะของเหลวในระหว่างการผสม ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญยิ่ง

Rheology เป็นความสามารถในการไหล/การเปลี่ยนรูปของสาร โดยหากมีการไหลง่ายแสดงว่าสารนั้นมีสมบัติด้านการไหลที่ดี

Shelf Life เป็นระยะของกาวที่สามารถเก็บไว้ก่อนการใช้งาน โดยไม่เสียสภาพ ซึ่งกาวโดยส่วนใหญ่มีอายุ 6-12 เดือน ซึ่งอายุมากขึ้นเมื่อเก็บไว้ในที่เย็น และอายุน้อยลงเมื่อวางไว้ในที่แสงที่มีความร้อน

Viscosity เป็นค่าความหนืดที่ด้านการไหลของกาวและทำให้กาวมีความเข้มข้นขึ้น กาวบางชนิดไหลได้ดี ในขณะที่กาวบางชนิดจะไหลยากเนื่องจากความเข้มข้นสูง

Wetting การเปียกผิวของหยดของเหลวบนวัสดุที่เป็นของแข็ง การเปียกผิวดีส่งผลให้การ ดึงดูดระหว่างผิววัสดุ ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการยึดติด

2.1.2 ประเภทของกาว

แบ่งกาวได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ ตามหลักการทำงานของกาว

(<http://www.bangkokbiznews.com/Scitech/2003/0508/index.php?news=p17.html>, 2005) ดังนี้

1. เป็นพวกที่มีสายโซ่ของโมเลกุลยาวอยู่แล้ว แต่จะละลายหรือแขวนลอยอยู่ในตัวทำละลาย อย่างเช่น กาวน้ำ (ใสๆ) กาวลาเท็กซ์ (สีขาวขุ่นๆ) หรือกาวยาง (สีเหลืองขุ่นๆ) กาวพวกนี้ต้องรอให้ตัวทำละลายแห้งออกไปหมดเสียก่อนจึงจะแข็งและยึดติดสิ่งของบางอย่างได้ เราคงเคยเห็นช่างซ่อมรองเท้าทา กาวบนพื้นรองเท้า (ที่ทำความสะอาดผิวแล้ว) แล้วปล่อยให้แห้งไว้สักพักจึงค่อย

ประกบ เพราะถ้าประกบทันทีก็ต้องรอนานกว่ากาวจะแห้ง กาวพวกนี้มีจุดเด่น คือ ราคาถูก ใช้งานง่าย แต่มีจุดอ่อนคือ ไม่แข็งแรงมากนัก ไม่ทนความร้อน หากไปโดนสารละลายที่เข้ากันได้ จะยึดกลับมาใหม่ได้ (กาวที่ติดหลังแสดมปีก็เป็นแบบนี้ จึงสามารถลอกออกได้ด้วยน้ำ)

2. เป็นพวกที่เริ่มจากโมเลกุลเล็กๆ ซึ่งอาจจะเป็นมอนอเมอร์ตัวเดียว (คลิพหนีบกระดาษอันเดียว) หรือไม่กี่ตัวมาต่อกัน เรียกว่าพรีพอลิเมอร์ (หรือ prepolymer) กาวแบบนี้จะใช้ปฏิกิริยาเคมีเพื่อทำให้ได้สายโซ่ยาว ตัวอย่างที่รู้จักกันดี คือ ซุปเปอร์กลู (แบบหลอดเดียว) (ชื่อเคมีคือไซยาโนอะคริเลต, cyanoacrylate) ตอนที่กาวอยู่ในหลอดจะเป็นของเหลวใสไหลไปมาได้ (เพราะเป็นโมเลกุลเล็กๆ) แต่พอบีบออกมากาวจะแข็งตัวเนื่องจากโดนความชื้น โดยความชื้นนี้เองที่จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้โมเลกุลเล็กๆ มาต่อกันเป็นสายโซ่ยาวๆ ทำให้กาวตราช่างใช้ติดวัสดุได้หลายชนิด เพราะว่าที่ผิวของวัตถุมักจะมีน้ำ ความชื้นเสมอ กาวชนิดนี้มีข้อดี คือ แข็งตัวเร็ว และยึดติดได้แน่นมาก แต่ก็มีจุดอ่อนที่ไม่ค่อยพูดถึงกันคือ กาวแบบนี้ไม่ทนความร้อน และละลายได้ในสารละลายบางชนิดอีกด้วย ดังนั้นถ้าเราจะเอาไปติดหุกระแทกก็จะเสี่ยง เพราะว่าถ้าบริเวณที่ติดกาวโดนความร้อน หุกระแทกก็จะหลุดออกมาได้

ส่วนในกาวพวกที่สองอีกแบบหนึ่ง คือ กาวอีพอกซี (epoxy) จะมี 2 หลอด หลอดหนึ่งมีชื่อเรียกว่าเรซิน (resin) ส่วนอีกหลอดหนึ่งเรียกว่าตัวทำให้แข็ง (hardener) กาวอีพอกซีนี้ถ้าใช้แค่หลอดเดียวจะไม่เหนียว ต้องใช้ 2 หลอดผสมกันอย่างเหมาะสม ที่เป็นอย่างนี้ก็เพราะว่าสารเคมีในหลอดแรกที่เรียกว่าเรซินนั้นมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายโซ่สั้นๆ (หรือพรีพอลิเมอร์) ซึ่งยังไม่เป็นกาวแข็งแต่ถ้าเติมตัวทำให้แข็งเข้าไป ตัวทำให้แข็งก็จะไปยึดสายโซ่สั้นๆ เข้าด้วยกันทำให้ได้โมเลกุลใหญ่คล้ายร่างแห ส่งผลให้กาวอีพอกซีแข็งแรงมาก

3. เป็นพวกที่มาในรูปของแข็งเป็นแท่งพลาสติกยาวๆ และต้องใช้ปืนที่ให้ความร้อนทำให้หลอม กาวพวกนี้เริ่มต้นก็เป็นสายโซ่ยาวๆ (คือเป็นพอลิเมอร์อยู่แล้ว) แต่เนื่องจากไม่มีตัวทำละลายจึงมีสภาพเป็นของแข็ง เวลาจะใช้ก็ต้องให้ความร้อนทำให้กาวหลอมเหลวแล้วปล่อยให้เย็นตัวแข็งใหม่อีกครั้ง ตัวอย่างในเชิงพาณิชย์ เช่น กาวแท่งโพลีเอไมด์ (polyamide) และกาวแท่งโพลีเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (polyethylene vinyl acetate) กาวพวกนี้มีจุดเด่น คือ ไม่ค่อยหดตัว แต่มีจุดอ่อน คือ ไม่ทนความร้อน กาวยังสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้เป็น 10 ชนิด (<http://www.bangkokbiznews.com/Scitech/2003/0508/index.php?news=p17.html>, 2005) คือ

1. Heat-Cured Adhesive เป็นกาวที่ต้องใช้ความร้อนช่วยในกระบวนการยึดติด
2. Holding Adhesive เป็นกาวที่ใช้ยึดระหว่างผิววัสดุเข้าด้วยกัน แบบไม่ถาวร แร่งยึดติดมีค่าน้อย เช่น เทปกาว (adhesive tape)

3. Hot Melt Adhesive กาวชนิดนี้โดยปกติแล้วจะอยู่ในรูปของแข็งสามารถใช้งาน
ได้โดย การใช้ความร้อนซึ่งจะทำให้กาวหลอม นิยมใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการให้กระบวนการ
ผลิตที่ต้องการความรวดเร็วเพราะกาวชนิดนี้เมื่อเย็นจะเซตตัวได้เร็ว แต่มีข้อเสียคือใช้ในงานที่
ละเอียดและมีพื้นที่ผิวมากๆ ไม่ได้ ดัดได้เฉพาะผิวที่ทนต่ออุณหภูมิสูง ตัวอย่างวัสดุที่ใช้ผลิตกาว
ชนิดนี้ ได้แก่ ไนลอน (nylon) โพลีเอสเตอร์ (polyester) โพลีเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (ethylene-
vinyl acetate เป็นต้น

4. Instant Adhesive กาวที่สามารถยึดติดได้ ภายในระยะเวลาอันสั้น 5.
Locking Adhesive กาวชนิดนี้ใช้กับงานที่ต้องการป้องกันการคลายตัวของเส้น (ป่าน ปอ ด้าย
ไหม หรือ ใยสังเคราะห์) ม้วนเก็บเพื่อป้องกันการสั่น

6. Pressure Sensitive Adhesive กาวชนิดนี้มีความสามารถในการยึดติดได้ดีเมื่อใช้
ความดัน เพียงเล็กน้อย เช่น กาวที่ใช้ฉีกซองจดหมายและมีลักษณะเป็นเทปกาวสองหน้า

7. Retaining Adhesive กาวชนิดนี้ใช้เพื่อป้องกันการบิดโค้งหรือลื่นไถลของส่วน
ที่ไม่ได้ ทากาว ทำหน้าที่คล้ายกับว่าล็อคส่วนที่ไม่ได้ทากาวให้อยู่คงรูป

8. Sealing Adhesive กาวชนิดนี้ใช้ในงานเพื่อป้องกันการรั่วของ อากาศ น้ำ หรือ
น้ำมัน เป็นต้น เช่นกาวในงานอุดหรือสมานรอยเชื่อมของช่องที่ขอบหน้าต่าง

9. Structural Adhesive กาวชนิดนี้ใช้กับอุปกรณ์ที่ต้องการทนความดันสูงๆ เช่น
ในงานติด ชิ้นส่วนของเครื่องบิน

10. Ultraviolet Adhesive กาวชนิดนี้ทำงานโดยใช้แสงอุตราไวโอเลต

2.1.3 ส่วนประกอบของกาว

1. พอลิเมอร์ (polymer) เป็นสารที่ทำให้เกิดการยึดติดวัสดุเข้าด้วยกัน ซึ่งสารที่ใช้
เป็นเนื้อกาวอาจ แบ่งได้ตามลักษณะดังนี้

1. สารธรรมชาติ ได้แก่

- พวกที่ได้จากพืช (vegetable gum) แป้ง เด็กซ์ตริน (dextrin)
- โปรตีนจากพืชและสัตว์ ยางธรรมชาติ เป็นต้น
- สารอื่นๆ เช่น ยางมะตอย (asphalt) เซลแลค ยางธรรมชาติ เป็นต้น

2. สารสังเคราะห์ ได้แก่

- สารพวก Thermoplastic resin เช่น cellulose ester and ester, alkyd and acrylic esters, polyamide เป็นต้น

- สารพวกยางสังเคราะห์ เช่น neoprene, nitrile, polysulphide เป็นต้น

2. ตัวกระตุ้น (activator) เป็นสารเคมีที่เติมลงบนผิววัสดุได้โดยตรงหรือสามารถผสมกับ กาว เพื่อเพิ่มการแห้งของกาวได้เร็วขึ้น

3. สารเร่งปฏิกิริยา (catalysts/accelerators) เป็นสารเคมีที่ใช้ในปริมาณน้อย เพื่อให้ กาว กลายเป็นของแข็ง

4. Curing Agent เป็นสารเคมีที่ใช้ เพื่อให้กาวกลายเป็นของแข็ง

5. สารอื่นๆ (miscellaneous component)

- สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antioxidant) เป็นตัวที่ทำให้การเสื่อมของพันธะคู่ของพอลิเมอร์ช้าลง เนื่องจากการใช้งาน

- สารช่วยเสริมประสิทธิภาพของผิว (surface active) เป็นตัวเสริมความเสถียรของคอลลอยด์ และความสามารถในการเปียกผิว

- สารป้องกันการแข็งตัว เป็นกลุ่มของสาร stabilizer เช่น เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) และ กลีเซอรอล (glycerol) เป็นต้น

- สารป้องกันเชื้อรา เช่น เพนตะคลอโรฟีนอล (pentachlorophenol) และสารประกอบอินทรีย์ของปรอท เป็นต้น

- สารป้องกันการกร่อน เช่น โซเดียมเบนโซเอต (sodiumbenzoate)

- สารป้องกันการเกิดฟอง เช่น n-hexyl alcohol, n-octyl alcohol ซึ่งกาวเกิดเป็นฟองเมื่อทาจะทำให้จุดนั้นเป็นจุดล้มเหลวของกาว

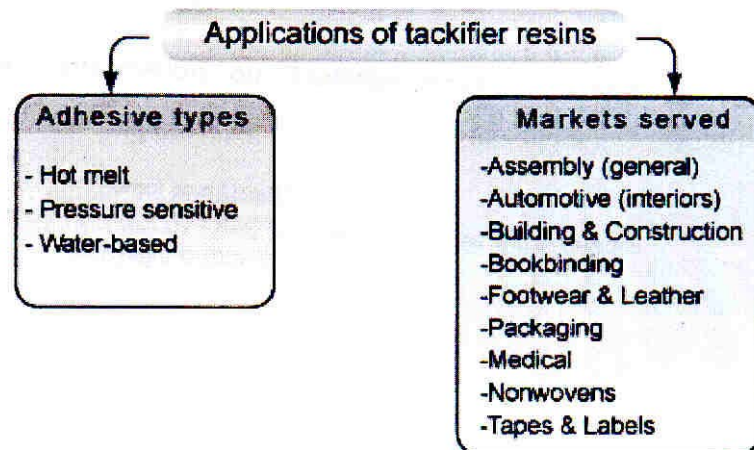
- สารป้องกันการติดไฟ เช่น antimony trioxide และ chlorinate paraffin waxes

- สี เป็นต้น

6. สารพลาสติกไซเซอร์ (plasticizers) เป็นสารเคมีที่เติมเพื่อป้องกันการเปราะของกาว กาวหลายชนิดมีความแข็งแรงสูงแต่หากอยู่ในสภาวะที่ได้รับแรงกดสูง กาวก็มีโอกาสที่จะเกิดการแตกได้ (crack) พลาสติกไซเซอร์ช่วยทำให้กาวนิ่มมากขึ้นเพื่อลดความเปราะของกาว

7. ตัวทำละลาย (solvents) เป็นของเหลวที่เติมลงไปเพื่อให้กาวกระจาย หรือ แฉวนลอยอยู่ในรูปของเหลวเพื่อที่จะให้กาวเปียกบนผิววัสดุได้ง่ายขึ้น ซึ่งตัวทำละลายจะระเหยออกจากกาวในขณะที่กาวกำลัง cure ในกาวบางชนิดใช้ตัวทำละลายเป็นสารทำให้เจือจาง (thinners หรือ diluents) (<http://www.gluguru.com>, 2005)

8. แทคคิไฟเออร์ (tackifier) ใช้เติมในกาวบางประเภทเท่านั้น โดยใช้ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถเพิ่มความเหนียวหรือเพิ่มความสามารถในการเกาะติด (ability to stick) การใช้งานของสารนี้แสดงได้ดังภาพประกอบ 2.2

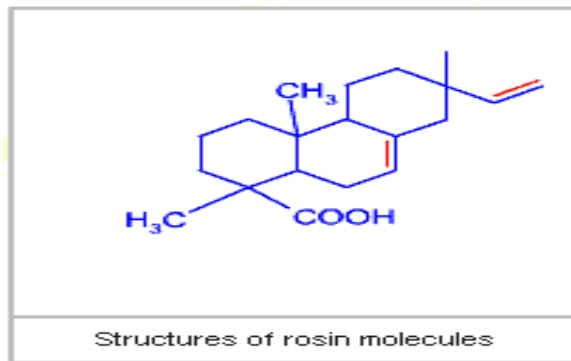


ภาพประกอบ 2.2 กาวที่ใช้แทคคิไฟเออร์และการนำไปใช้งาน

แทคคิไฟเออร์แบ่งออก เป็น 3 ชนิด (<http://www.special4adhesive.com>, 2005) คือ

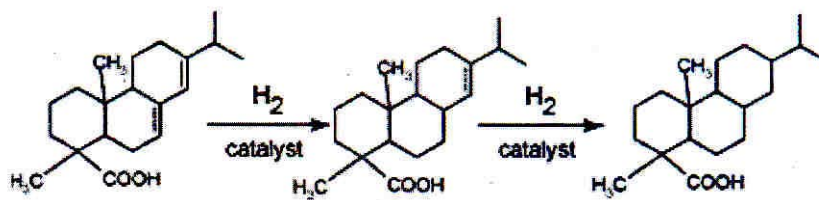
1. Rosin resins
2. Hydrocarbon resins
3. Terpene resin

1. Rosin resins เป็นสารที่ใช้เป็นแทคคิไฟเออร์สำหรับอุตสาหกรรมกาวที่เก่าแก่ตัวหนึ่งมีอยู่ 3 ชนิดที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน คือ gum rosin, wood rosin และ tall oil rosin สามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์หลายชนิด แต่ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวภายในเนื้อกาวลดลง (ลด cohesive strength) โมเลกุลของ rosin มีความเสถียรต่ำเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีไม่อิ่มตัว และจะมีการจัดเรียงตัวใหม่ของพันธะคู่ในโครงสร้างได้ 8 แบบ โครงสร้าง 1 ใน 8 แบบ แสดงดังภาพประกอบ 2.3



ภาพประกอบ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของ Rosin

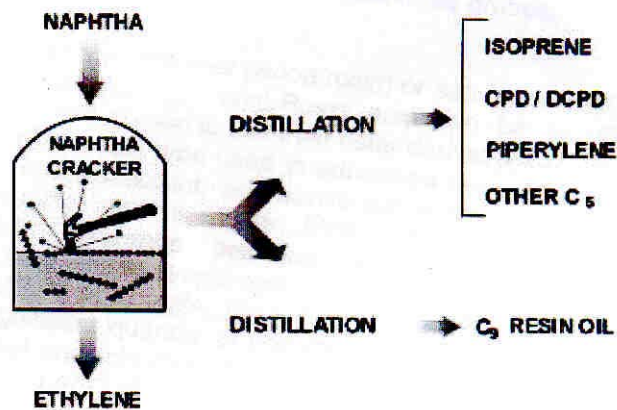
การทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน rosin ได้เป็น hydrogenated rosin resin จะเพิ่มความอึดตัวให้กับโครงสร้างและเพิ่มความเสถียรได้ ดังภาพประกอบ 2.4



ภาพประกอบ 2.4 กระบวนการเตรียม hydrogenated rosin ester

2. Hydrocarbon resins เรซินสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรมกาวแบ่งเป็น 3 ชนิดคือ
 1. C5 aliphatic resins
 2. C9 aromatic resins
 3. C5/C9 aliphatic/aromatic resins

สำหรับการผลิต C5 aliphatic resins และ C9 aromatic resins เกิดจากการแตกออกของ naphtha ดังภาพประกอบ 2.5



CPD/DCPD ย่อมาจาก cyclopentadiene/dicyclopentadiene

ภาพประกอบ 2.5 แหล่งกำเนิดของ C₅&C₉ resin oils

3. Terpene resin แหล่งกำเนิดมาจากไม้ และพืชจำพวกมะนาวโดยมีการเตรียมโดยปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันโดยใช้ $AlCl_3$

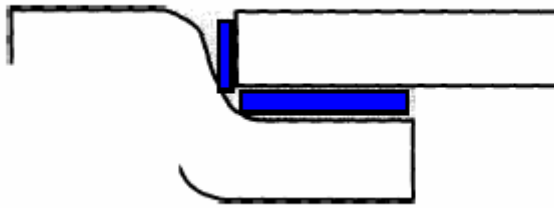
2.1.4 รูปแบบของการติดประสาน (type of joint) (<http://www.gluguru.com>, 2005)

1. Lab/Overlap Joint เป็นลักษณะของรอยต่อที่วางวัสดุสองชิ้นมาทับกัน ดังภาพประกอบ 2.6



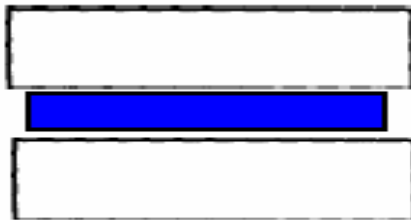
ภาพประกอบ 2.6 Lab/Overlap Joint

2. Joggle Lab Joint เป็นลักษณะของรอยต่อที่คล้ายกับ Overlab Joint แต่แตกต่างกันตรงที่ Joggle Lab Joint เป็นรอยต่อบริเวณข้อต่อ ดังภาพประกอบ 2.7



ภาพประกอบ 2.7 Joggle Lap Joint

3. Butt Joint เป็นลักษณะของรอยต่อที่ปลายของทั้งสองวัสดุ ดังภาพประกอบ 2.8



ภาพประกอบ 2.8 Butt Joint

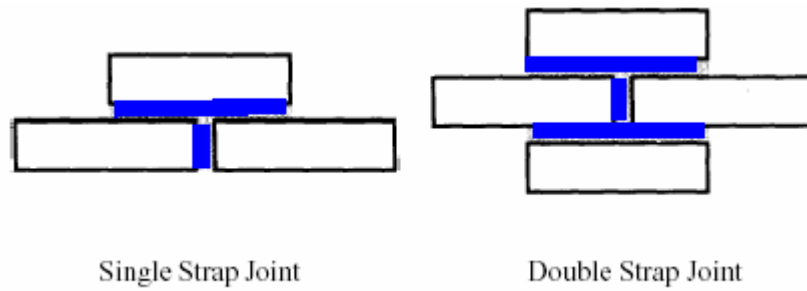
4. Scarf Joint เป็นรอยต่อแบบ Butt Joint ที่มีมุมเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังภาพประกอบ

2.9



ภาพประกอบ 2.9 Scarf Joint

5. Strap Joint เป็นลักษณะของรอยต่อที่มีทั้ง Overlap Joint และ Butt Joint ดังภาพประกอบ 2.10



ภาพประกอบ 2.10 Strap Joint

6. Cylindrical Joint เป็นรอยต่อเหมือนกับแบบ Butt Joint แต่วัสดุมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ดังภาพประกอบ 2.11

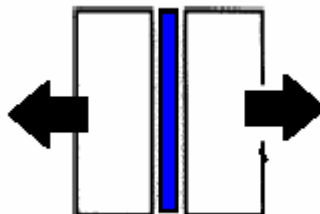


ภาพประกอบ 2.11 Cylindrical Joint

2.1.5 การทดสอบความแข็งแรงในการยึดติด

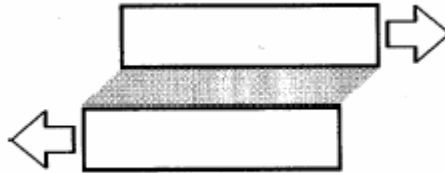
การที่ดีจะต้องมีความต้านทานการแยกกันเนื่องมาจากแรงกระทำในลักษณะต่างๆ ตามสภาพการใช้งาน ดังนั้นก่อนทำการผลิตเพื่อจำหน่าย ผู้ผลิตทาวจึงมักทำการทดสอบความแข็งแรงของการยึดติดโดยใช้แรงดึงแบบต่างๆ เพื่อให้ได้ทาวที่มีคุณภาพเหมาะสมกับความต้องการ (ธนาวดี, 2546)

1. การดึงในแนวตั้งฉากกับการติดยึด (tensile) โดยใช้แรงดึงกระจายไปทั่วพื้นที่ที่เกิดการติดยึดทั้งหมด ดังภาพประกอบ 2.12



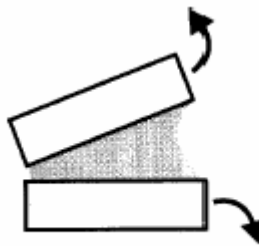
ภาพประกอบ 2.12 การดึงในแนวตั้งฉากกับการติดยึด

2. การดึงในแนวระนาบที่ขนานกับการยึดติด (shear) โดยให้แรงดึงกระจายทั่วพื้นที่ที่เกิดการติดยึดทั้งหมด ดังภาพประกอบ 2.13



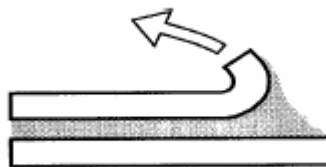
ภาพประกอบ 2.13 การดึงในแนวระนาบที่ขนานกับการยึดติด

3. แรงแยก (cleavage) โดยให้แรงในการแยกเฉพาะบริเวณขอบของการติดยึดเท่านั้น ดังภาพประกอบ 2.14



ภาพประกอบ 2.14 แรงแยก

4. การดึงลอก (peel) เมื่อมีวัสดุอย่างน้อยหนึ่งชนิดมีความยืดหยุ่นสูง ดังภาพประกอบ 2.15

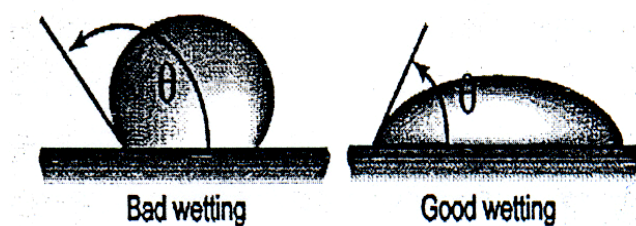


ภาพประกอบ 2.15 การดึงลอก

2.1.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการยึดติดระหว่างกาวกับวัสดุ

1. การเตรียมผิวพื้นผิววัสดุเป็นสิ่งสำคัญ ที่มีผลต่อความสามารถในการยึดติดระหว่างกาวและพื้นผิวของวัสดุ เนื่องจากถ้าผิววัสดุมีความสกปรก เช่น ฝุ่นละออง คราบน้ำมัน หรือความชื้น จะทำให้พันธะในการยึดติดระหว่างกาวและพื้นผิววัสดุลดน้อยลง ทำให้การยึดติดไม่ดี

2. มุมสัมผัสระหว่างกาวและพื้นผิวของวัสดุซึ่งความสามารถในการยึดติดระหว่างกาวกับพื้นผิววัสดุจะดีถ้ามุมสัมผัสระหว่างกาวและพื้นผิวของวัสดุไม่เกิน 90° แสดงได้ดังภาพประกอบ 2.16 โดยที่มุมสัมผัสจะขึ้นกับแรงดึงผิวและความหนืดของกาว ซึ่งกาวที่มีความหนืดต่ำจะสามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับพื้นผิวได้ง่าย ดังนั้นสมบัติการไหลของกาวจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องใช้ให้เหมาะสมกับสภาวะการใช้งาน



ภาพประกอบ 2.16 มุมสัมผัสระหว่างกาวและพื้นผิววัสดุ

(<http://www.special4adhesive.com>, 2005)

3. พลังงานพื้นผิว (surface energy) ถ้าของเหลว (เช่น กาว) สามารถเปียกบนพื้นผิวที่มีพลังงานพื้นผิวสูงกว่าเท่านั้น (พลังงานพื้นผิวของของแข็งมีความหมายเทียบเท่ากับความตึงผิว (หรือ surface tension ของของเหลว) โดยความสามารถในการเปียกผิวของกาวบนผิวสัมผัสของวัสดุ อธิบายได้ดังภาพประกอบ 2.17 และตามสมการของยังค์ (young's equation) (ตามสมการที่ 2.1)

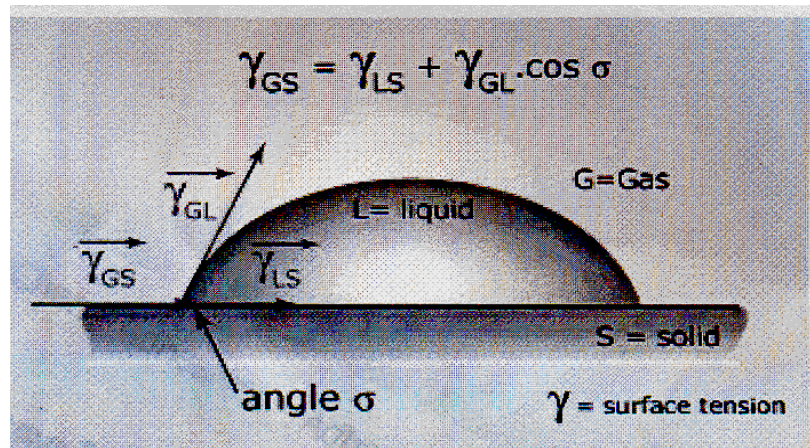
$$\gamma_{GS} = \gamma_{LS} + \gamma_{GL} \cdot \cos \sigma \quad (2.1)$$

เมื่อ

- γ_{GS} คือ ความตึงผิว vapor/solid
- γ_{LS} คือ ความตึงผิว liquid/solid
- γ_{GL} คือ ความตึงผิว vapor/ liquid

ซึ่งทั้ง 3 เฟสของการสัมผัสจะส่งผลต่อมุมสัมผัสระหว่างกาวและพื้นผิววัสดุ ตามสมการที่ 2.1 และปัจจัยที่สำคัญต่อการยึดติดอีกอย่าง คือ การกระจายของกาวบนพื้นผิววัสดุอย่างสม่ำเสมอซึ่งการเปียกของกาวบนพื้นผิววัสดุเกิดขึ้นได้ดีเมื่อมีสถานะตามสมการที่ 2.2

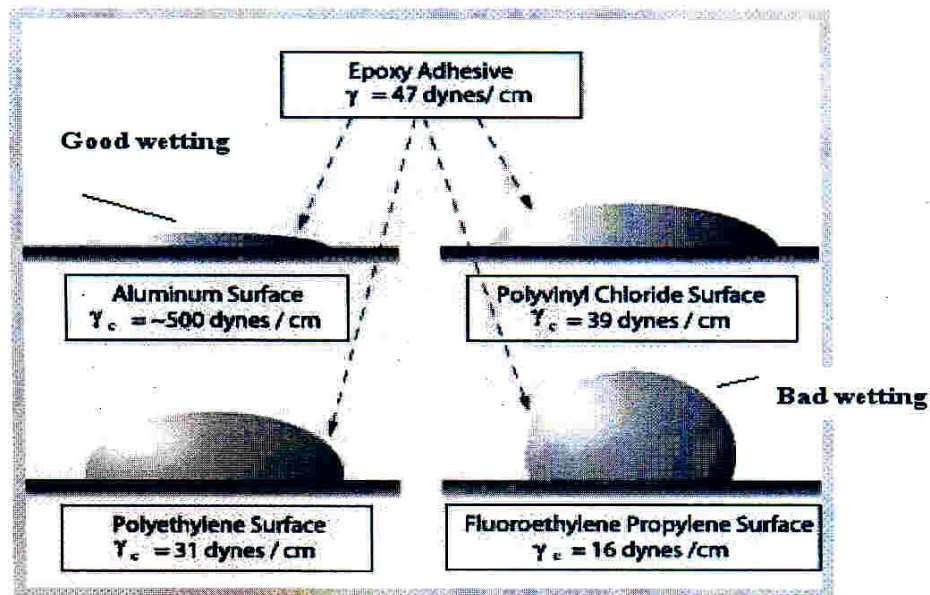
$$\gamma_{LS} < \gamma_{GL} \quad (2.2)$$



ภาพประกอบ 2.17 มุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวบนพื้นผิววัสดุที่เป็นของแข็ง

(<http://www.special4adhesive.com>, 2005)

ภาพประกอบ 2.18 แสดงถึงความสามารถในการเปียกผิวของกาวอีพอกซี บนพื้นผิว 4 ชนิด ที่มีพลังงานพื้นผิวแตกต่างกัน คือ อะลูมิเนียม โพลีไวนิลคลอไรด์ โพลีเอทิลีน และ เทฟลอน (fluoroethylene propylene) มีพลังงานพื้นผิว ณ จุดวิกฤตเท่ากับ 500, 39, 31 และ 16 ไลน์/เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนกาวอีพอกซีมีความตึงผิวเท่ากับ 47 ไลน์/เซนติเมตร สามารถเปียกพื้นผิวอะลูมิเนียมได้ดีที่สุด เพราะอะลูมิเนียมมีพลังงานพื้นผิว ณ จุดวิกฤต ประมาณ 500 ไลน์/เซนติเมตร สูงกว่าความตึงผิวของกาวอีพอกซีมากที่สุด ในขณะที่เดียวกันกาวอีพอกซีไม่สามารถเปียกผิวเทฟลอนได้ เพราะเทฟลอนมีพลังงานพื้นผิว ณ จุดวิกฤตเท่ากับ 16 ไลน์/เซนติเมตร ซึ่งต่ำกว่าความตึงผิวของกาวอีพอกซี



ภาพประกอบ 2.18 การเปียกผิววัสดุ (<http://www.special4adhesive.com>, 2005)

4. โครงสร้างของวัสดุเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการยึดติดของกาว ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้กาวให้เหมาะสมกับโครงสร้างของวัสดุ วัสดุที่โครงสร้างมีรู เช่น ไม้และกระดาษจะเหมาะกับกาวที่มีความหนืดต่ำ เนื่องจากทำให้กาวสามารถไหลแทรกซึมเข้าไปได้ดี ทำให้การยึดติดระหว่างกาวและพื้นผิวของวัสดุดี

2.1.7 การเตรียมพื้นผิววัสดุและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเตรียมผิวน้ำยาง

2.1.7.1 การเตรียมพื้นผิววัสดุ

วิธีการเตรียมพื้นผิววัสดุก่อนการยึดติดมีหลายวิธี อันเนื่องมาจากการยึดในงานหลายรูปแบบ เช่น การยึดติดระหว่างเหล็กกับเหล็ก พลาสติกกับพลาสติก ยางกับยาง เป็นต้น ซึ่งมีหลายเทคนิคที่เพิ่มความแข็งแรงของการยึดติด มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน เหตุผลที่จะต้องมีการเตรียมพื้นผิวก่อนการยึดติด มีดังนี้คือ (<http://www.special4adhesive.com>, 2005)

1. เพื่อขจัดหรือป้องกันการมีชั้นของสารบนผิวน้ำวัสดุที่ก่อให้เกิดการยึดติดลดน้อยลง
2. เพื่อให้โมเลกุลกาวกับผิวน้ำวัสดุสัมผัสได้สนิทมากที่สุด
3. เพื่อให้เกิดสารเคมี/พันธะใหม่บนผิวน้ำวัสดุ
4. เพื่อป้องกันผิวน้ำวัสดุก่อนการยึดติด

5. เพื่อเพิ่มแรงดึงผิวบนผิววัสดุซึ่งส่งผลให้การเปียกผิวดีมากขึ้น

โดยแบ่งวิธีการเตรียมผิววัสดุได้ 3 วิธีการหลัก คือ (<http://www.gluguru.com>, 2005)

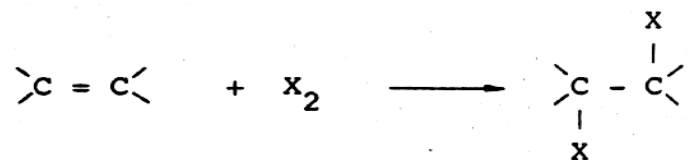
1. การขัดผิว (abrasion) เป็นวิธีการเตรียมพื้นผิวเพื่อต้องการขัดผิวหน้าวัสดุออก กำจัดส่วนที่แข็งหรือส่วนที่หยาบออก ซึ่งมี 2 วิธี ที่นิยมใช้ คือ วิธีการแปรง (brushing) และการพ่น (blasting)

2. การทำความสะอาด (cleaning) มี 2 วิธี ที่นิยมของการเตรียมผิววัสดุด้วยวิธีการทำความสะอาดคือ วิธีการทำความสะอาดด้วยตัวทำละลาย (solvent cleaning) และ วิธีการทำความสะอาดด้วยสารเคมี (chemical cleaning)

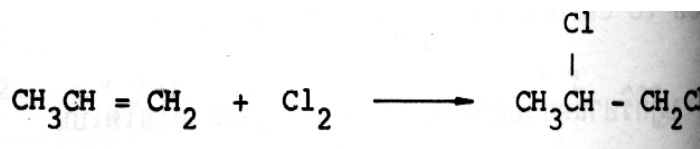
2.1 วิธีการทำความสะอาดด้วยตัวทำละลาย (solvent cleaning) วิธีนี้จะใช้ตัวทำละลายเพื่อละลายสิ่งเจือปนบนผิวหน้าวัสดุ ซึ่งสามารถทำได้ด้วยวิธีการดังนี้

ก. จุ่มในตัวทำละลาย (solvent dip) มีวิธีการโดยการจุ่มวัสดุลงในถังที่มีตัวทำละลาย ซึ่งสามารถละลายและหลุดออกจากผิววัสดุ วิธีนี้นิยมใช้กำจัดสารพวกน้ำมันแต่วิธีนี้มีข้อด้อย คือ ตัวทำละลายจะปนเปื้อนบนผิวหน้าวัสดุ

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการเตรียมพื้นผิวหน้ายางด้วยวิธีนี้โดยจะใส่สารที่มีหมู่คลอรีน (trichloroisocyanuric acid (TCI) และ dongsung primer) ลงในตัวทำละลายแล้วนำยางจุ่มในตัวทำละลายและอบยางให้แห้งก่อนนำไปใช้งาน ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาคลอรีนชันบนผิวหน้ายาง กล่าวคือ เป็นปฏิกิริยาที่มีการเติมอะตอมหรือหมู่อะตอมคลอรีนเข้าไปในโมเลกุลของยางตรงตำแหน่งพันธะคู่ แสดงได้ดังภาพประกอบ 2.19

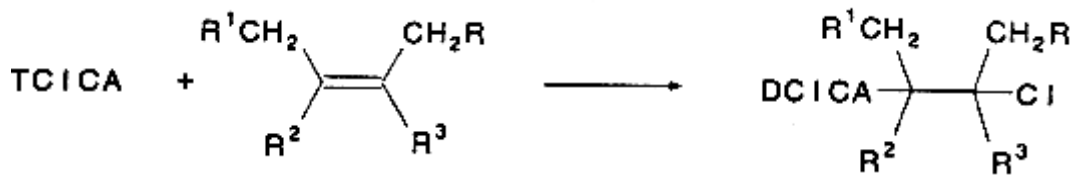


เช่น



ภาพประกอบ 2.19 ปฏิกิริยาคลอรีนชัน (สมเกียรติและคณะ, 2528)

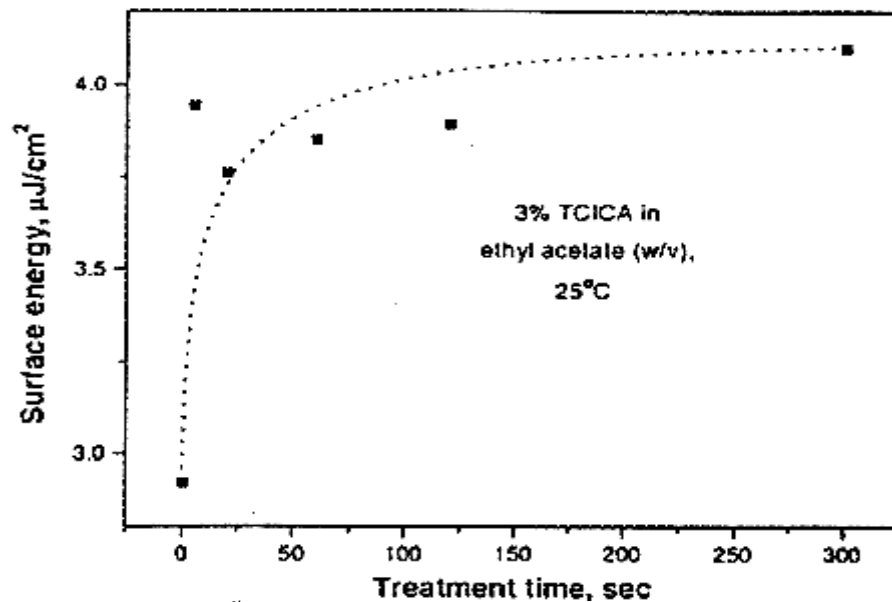
และสำหรับกลไกการเกิดปฏิกิริยาคลอรีนชันบนผิวหน้ายางที่มีพันธะคู่ด้วย trichloroisocyanuric acid (TCICA) แสดงได้ดังภาพประกอบ 2.20



ภาพประกอบ 2.20 ปฏิกิริยาคลอรีนชันบนผิวหน้ายางที่มีพันธะคู่ด้วย TCICA

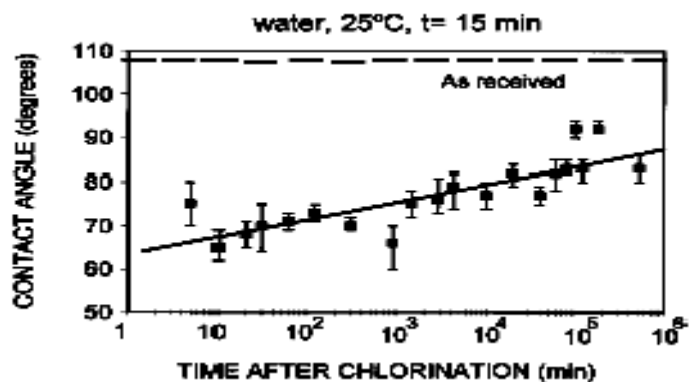
(Lawson et al., 1997)

ซึ่งการเตรียมผิวยางด้วยตัวทำละลายที่เกิดปฏิกิริยาทำคลอรีนชันส่งผลให้พลังงานพื้นผิว (surface energy) มีค่าสูงขึ้นช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงของการยึดติดสูงขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 2.21 ซึ่งอธิบายได้ว่า พลังงานพื้นผิวบนผิวหน้ายางก่อนการเตรียมพื้นผิว มีค่าประมาณ 3 ไมโครจูล/ตารางเซนติเมตร โดยหลังจากใช้ตัวทำละลาย TCICA/EA ที่ความเข้มข้น 3 % น้ำหนัก/ปริมาตร เตรียมผิวหน้ายาง ส่งผลให้พลังงานบนพื้นผิวหน้ายางมีค่าสูงขึ้นเป็น 4 ไมโครจูล/ตารางเซนติเมตร ภายในเวลา 50 วินาที



ภาพประกอบ 2.21 พลังงานพื้นผิวบนผิวหน้ายางวัลคาไนซ์ SBR ที่เตรียมผิวหน้าด้วย TCICA/EA ที่ความเข้มข้น 3 % น้ำหนัก/ปริมาตร (Lawson et al., 1997)

นอกจากนี้ Romero-Sanchez และคณะ พบว่าการเตรียมผิวหน้ายางด้วยตัวทำละลาย TCI/MEK ความเข้มข้น 0.5 % โดยน้ำหนัก ส่งผลให้กาวพอลิยูรีเทนสามารถเปียกผิวบนผิวหน้ายางได้ดีขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 2.22 ซึ่งอธิบายได้ว่ามุมสัมผัสบนผิวหน้ายางที่ยังไม่ได้เตรียมผิวหน้ายางมีค่าประมาณ 110 องศา (ดังแสดงเป็นเส้นประด้านบนของภาพประกอบ 2.22) แต่มุมสัมผัสบนพื้นผิวหน้ายางที่ผ่านการเตรียมผิวหน้ายางด้วยตัวทำละลาย TCI/MEK 0.5 % โดยน้ำหนัก มุมสัมผัสมีค่าลดลงเหลือประมาณ 70 องศา



ภาพประกอบ 2.22 มุมสัมผัสบนผิวหน้ายางที่เตรียมผิวหน้าด้วย TCI/MEK 0.5 % โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 25 °C เวลา 15 นาที (Romero-Sanchez et al., 2001)

ข. เช็ดด้วยตัวทำละลาย (solvent wipe) ใช้ผ้าหรือวัสดุที่ทนตัวทำละลายนั้นจุ่มในตัวละลาย และนำมาเช็ดบนผิวหน้าวัสดุ จนกว่าจะสะอาดและกำจัดสิ่งเจือปนบนผิวหน้าออกหมด วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายไม่ซับซ้อน ประหยัด และเป็นวิธีที่นิยม แต่วิธีนี้มีข้อด้อย คือ เศษผ้าหรือวัสดุที่นำมาเช็ดปนเปื้อนบนผิวหน้ายึดติด

ค. ใช้ไอตัวทำละลาย (vapor degreasing) วิธีนี้ใช้ทำความสะอาดพื้นผิวที่ใช้ผ้าเช็ดไม่สะดวก เช่น บริเวณรอยแตกโดยการให้ความร้อนกับตัวทำละลายระเหยกลายเป็นไอไปสัมผัสกับส่วนที่ต้องการทำความสะอาด ซึ่งสามารถกำจัดสารจำพวกน้ำมันปิโตรเลียม หรือน้ำมันหล่อลื่นได้

ง. ใช้ความถี่อัลตราโซนิก (ultrasonic cleaning) เป็นวิธีการที่ใช้ความถี่คลื่นเสียงเพื่อทำให้เกิดการสั่น เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออกจากพื้นผิววัสดุ

ซึ่งวิธีการทำความสะอาดด้วยตัวทำละลายจะมีความรุนแรงน้อยกว่าวิธีการทำความสะอาดโดยใช้สารเคมี กล่าวคือ วิธีการทำความสะอาดด้วยตัวละลายไม่รุนแรงมากเกินไป

2.2 วิธีการทำความสะอาดด้วยสารเคมี (chemical cleaning)

เป็นวิธีการที่รุนแรงกว่าการทำความสะอาดด้วยตัวทำละลายประกอบด้วย 3 วิธี คือ

ก. Hot Alkaline Cleaning เป็นวิธีการที่ใช้เกลือโลหะของกรดที่ได้จากไขมัน (สบู่) หรือผงซักฟอกที่ร้อน ผงซักฟอกที่มีฤทธิ์รุนแรง จะสามารถกำจัดสารพวกน้ำมันปิโตรเลียมและน้ำมันหล่อลื่นออกจากผิวหน้าวัสดุได้ ในหลายกรณีใช้วิธีการนี้เพื่อทำความสะอาดผิววัสดุแต่จะต้องล้างสบู่หรือผงซักฟอกออกให้สะอาดและวางให้แห้งก่อนนำไปยึดติด

ข. Pickling วิธีการนี้ใช้น้ำเกลือสำหรับการทำความสะอาดผิว สามารถกำจัดสารปนเปื้อนจำพวกออกไซด์ ใช้ได้เฉพาะสารที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับต่างเท่านั้น

ค. Etching วิธีการนี้ใช้สารเคมีที่กัดกร่อนผิวหน้าวัสดุ สามารถกำจัดสารปนเปื้อนพวกออกไซด์และด้านล่างพื้นผิวได้

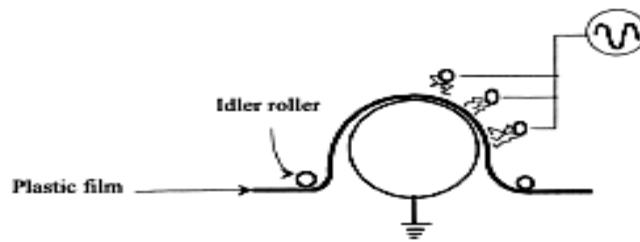
3. การเปลี่ยนแปลง (conversion) วิธีการเตรียมผิววัสดุด้วยวิธีนี้ เป็นการเปลี่ยนแปลงจากผิวหน้าวัสดุเดิมเป็นผิวหน้าวัสดุที่มีพันธะหรือองค์ประกอบเปลี่ยนไปประกอบด้วย 3 วิธี

3.1 Phosphating เป็นวิธีการที่ใช้สารละลายกรดฟอสฟอริก (phosphoric acid solution) จุ่มหรือสเปรย์ลงบนผิววัสดุเพื่อเพิ่มสมบัติด้านความต้านทานต่อการกัดกร่อน (corrosion resistant) และเพิ่มการยึดติดบนผิววัสดุ ซึ่งเป็นวิธีที่เป็นประโยชน์กับกาวหลายชนิด เช่น ใช้เพียงปริมาณน้อยเพื่อเตรียมผิวหน้าโลหะ (metal) จะเกิดสาร zinc phosphate หรือ ฟิล์ม iron phosphate บนผิวหน้า

3.2 Chromating เป็นวิธีการที่คล้ายคลึงกับวิธี phosphating โดยวิธี chromating ใช้สารละลายกรดโครมิก (chromic acid solution) ซึ่งเป็นวิธีที่ลดการกัดกร่อนและเพิ่มการยึดติดสำหรับกาวเกือบทุกชนิด

3.3 Anodizing เป็นวิธีการสำหรับเตรียมผิวหน้าของวัสดุที่เป็นอะลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังมีวิธีการอื่นๆ ที่นิยมใช้เตรียมผิวหน้าพลาสติก เช่น (<http://www.special4adhesive.com>, 2005)

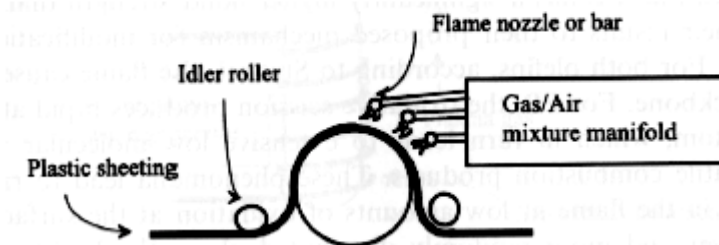
- Corona Discharge Treatment เป็นวิธีการเตรียมผิวหน้าวัสดุโดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูง (100,000 โวลต์) และใช้ความถี่ประมาณ 1-100 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อไอออไนซ์อากาศระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้วให้กลายเป็นไอออนและไอออนที่เกิดขึ้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผิววัสดุ โดยการไปออกซิไดส์แผ่นฟิล์มส่งผลให้แผ่นฟิล์มมีพลังงานพื้นผิว ความขรุขระของผิวหน้าวัสดุ และความสามารถในการเปียกผิวเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสิ่งที่มีผลต่อการเตรียมพื้นผิวด้วยวิธีนี้ คือ ความเข้มข้นแม่เหล็ก (เช่น ความถี่, โวลต์) รูปแบบของขั้วไฟฟ้า (electrode shape) บรรยากาศ (ส่วนใหญ่ใช้อากาศ) และลักษณะของวัสดุ โดยวัสดุที่เป็นแผ่นฟิล์ม แสดงได้ดังภาพประกอบ 2.23



Corona Discharge Treatment

ภาพประกอบ 2.23 วิธีการเตรียมผิวหน้าวัสดุด้วย Corona Discharge Treatment

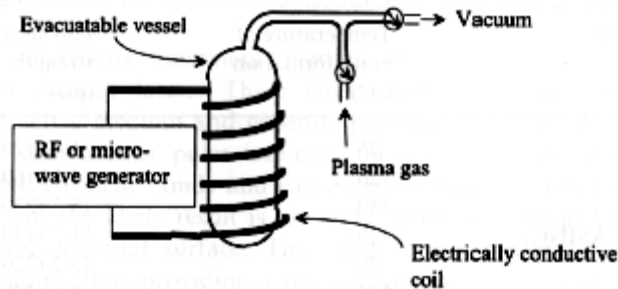
- Flame Treatment เพิ่มความสามารถในการยึดติด ด้วยกระบวนการออกซิไดส์ผิวหน้าวัสดุ โดยกลไกอนุมูลเสรี (free radical) ส่งผลให้สายโซ่โชนตัดให้สั้นลง และเกิดการเชื่อมโยงพันธะ (crosslink) การออกซิไดส์ก่อให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) คาร์บอนิล (carbonyl) และหมู่เอไมด์ (amide group) ที่ความลึก 4-9 นาโนเมตร นอกจากนี้วิธีการนี้ส่งผลให้แรงดึงผิวสูงขึ้น ความสามารถในการเปียกผิวดีขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 2.24



Flame Treatment

ภาพประกอบ 2.24 วิธีการเตรียมผิวหน้าวัสดุด้วย Flame Treatment

- Plasma Treatment เป็นวิธีการเพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดติดบนผิวหน้าวัสดุโดยการยิงอนุภาคบนผิวหน้าด้วยไอออนของแก๊ส เช่น อาร์กอน (Ar) ฮีเลียม (He) ไนโตรเจน (N₂) และออกซิเจน (O₂) ที่ความดันต่ำๆ ส่งผลให้ผิวหน้าวัสดุมีความสามารถในการเปียกผิวมากขึ้น และผิวหน้ามีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 2.25



Plasma Treatment

ภาพประกอบ 2.25 วิธีการเตรียมผิวหน้าวัสดุด้วย Plasma Treatment

2.1.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมผิวหน้ายาง

Cepeda-Jimenez และคณะ (2002) ศึกษาการเตรียมผิวหน้ายาง SBR และ SBS ที่ใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมรองเท้าและทำการเตรียมผิวหน้ายางด้วยตัวทำละลาย โดยใช้ DCI/EA ที่ความเข้มข้น 1-5 % โดยน้ำหนัก โดยนำเทคนิค ATR-IR, SEM, contact angle และความแข็งแรงของการยึดติด ระหว่างยาง SBR/กาวน้ำพอลิยูรีเทน/หนัง และระหว่าง ยาง SBS/กาวน้ำพอลิยูรีเทน/หนัง พบว่า DCI สามารถทำให้หมู่ C-Cl เกิดขึ้นบนผิวหน้ายาง SBR และยาง SBS ได้และสามารถกำจัด zinc stearate ได้ (เกิดขึ้นจากสาร zinc oxide และ steric acid เกิดปฏิกิริยากลายเป็น zinc stearate ในกระบวนการวัลคาไนซ์) ส่วนการทดสอบความแข็งแรงของการยึดติด ทำโดยเตรียมชิ้นตัวอย่างหนึ่งด้วยการทากาวสองชั้น โดยทาชั้นที่หนึ่งแล้วทิ้งไว้ 15-20 นาที หลังจากนั้นทากาวชั้นที่สองวางให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 30-45 นาที ส่วนยาง SBR และยาง SBS ทากาวแค่ชั้นเดียว หลังจากนั้นนำชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 60-70 °C (เป็นอุณหภูมิที่กาวน้ำพอลิยูรีเทนเกิดปฏิกิริยายึดติด) ภายใต้แสงอินฟราเรด หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาประกบกันที่ความดัน 0.2-0.3 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 10 วินาที ตั้งทิ้งไว้ 1 วันก่อนนำไปทดสอบค่าความแข็งแรงของการยึดติด (ใช้ความเร็วในการทดสอบเท่ากับ 0.1 เมตร/นาที) พบว่าค่าความแข็งแรงของการยึดติดของยาง SBS เมื่อเตรียมผิวหน้ายางด้วยตัวทำละลายมีค่าสูงขึ้นอย่างสม่ำเสมอตามความเข้มข้น กล่าวคือที่ความเข้มข้นเท่ากับ 3 % โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งแรงของการยึดติดเพิ่มขึ้น 9 กิโลนิวตัน/เมตร (จาก 3 กิโลนิวตัน/เมตร เป็น

12 กิโลนิวตัน/เมตร) ในขณะที่ยาง SBR ค่าความแข็งแรงของการยึดติดอยู่ในช่วง 6-8 กิโลนิวตัน/เมตร เท่านั้น

Fernandez-Garcia และคณะ (1990) ได้ศึกษาการเตรียมผิวหน้ายาง SBR ด้วยวิธีอัลตราโซนิก การขัดผิวหน้ายาง และวิธีการใช้ตัวทำละลาย เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาคลอริเนชันบนผิวหน้ายาง โดยใช้เทคนิค FTIR, SEM, contact angle และ ความแข็งแรงของการยึดติด ของการยึดติดกาวพอลิยูรีเทนด้วยยาง ระหว่างยาง SBR กับ ยาง SBR ตรวจสอบพบว่า การขัดผิวหน้ายางเพียงอย่างเดียวค่าความแข็งแรงของการยึดติด เท่ากับ 3.3-4.3 กิโลนิวตัน/เมตร และการทำความสะอาดผิวหน้ายางด้วยวิธีอัลตราโซนิก ความแข็งแรงของการยึดติด เท่ากับ 1.7-2.7 กิโลนิวตัน/เมตร ซึ่งทั้ง 2 วิธีข้างต้นค่าจะต่ำไม่เป็นที่ยอมรับ แม้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณและความหนืดของกาวให้มากขึ้นแต่ค่าความแข็งแรงของการยึดติดก็ไม่ได้เพิ่มสูงขึ้น ส่วนการเตรียมผิวหน้ายางยึดติดด้วยตัวทำละลาย TCI/MEK, TCI/acetone และ TCI/EA ที่ความเข้มข้น 1-3 % โดยน้ำหนัก เมื่อการเตรียมผิวหน้ายางเพียง 1 ชั้น (อีก 1 ชั้นไม่มีการเตรียมผิวหน้า) พบว่าความแข็งแรงของการยึดติดเท่ากับ 2-4 กิโลนิวตัน/เมตร แนวโน้มเหมือนกันทุกชนิดของตัวทำละลาย และความเข้มข้นแต่เมื่อเตรียมผิวหน้ายางทั้ง 2 ชั้น พบว่าความแข็งแรงของการยึดติดมีค่าเท่ากับ 12 กิโลนิวตัน/เมตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มมากขึ้นมากกว่า 4 % โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความแข็งแรงของการยึดติดกลับลดลง ทั้งนี้ เนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มมากขึ้น โอกาสที่น้ำมันจะเคลื่อนที่ออกมาที่ผิวหน้ายางมีมากขึ้น และทำให้ผิวหน้าแตก

Lawson และคณะ (1997) ศึกษาการเตรียมผิวหน้ายางโดยใช้ตัวทำละลาย TCI/EA ที่ความเข้มข้น 3 % โดยน้ำหนัก หลังเตรียมเสร็จใหม่ๆ โดยจุ่มยางในตัวทำละลาย 1 นาที ใช้ยางหลายชนิด และมีสูตรยางที่ต่างกัน โดยยาง NR, BR และ SBR ใช้ HAF 50-65 phr น้ำมัน 12 phr และ ยาง EPDM, CIIR และ CR ไม่ใช้น้ำมัน โดยใช้เทคนิค XRS (X-ray photoelectron spectroscopy) เพื่อศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง TCI/EA และผิวหน้ายาง พบว่าที่ผิวหน้ายางมีปฏิกิริยาแทนที่และปฏิกิริยาการเติมเกิดขึ้นทั้งในยาง NR, BR, SBR และยาง CR ซึ่งพบ %Cl ในโครงสร้างเท่ากับ 8.5, 14.2, 14.2 และ 16.7 % ตามลำดับ โดย %Cl ที่เกิดปฏิกิริยาแทนที่เท่ากับ 9.6, 11.1, 8.3, 12.0 % ตามลำดับ และปริมาณคลอรีนต่อหนึ่งพันธะคู่เท่ากับ 0.89, 1.28, 1.78 และ 1.39 ตามลำดับ ส่วนยาง CIIR และยาง EPDM ไม่เกิดปฏิกิริยาแทนที่หรือปฏิกิริยาการเติมเกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างของยางเป็นพันธะที่อิ่มตัว และพบว่าตัวทำละลายสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่มีความลึก 4-5 ไมโครเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวทำละลาย

Pastor Blas และคณะ (1997) ได้เตรียมผิวหน้ายางโดยใช้ตัวทำละลาย บนผิวหน้ายาง SBS โดยใช้ความเข้มข้นของตัวทำละลาย TCI ความเข้มข้น 0.5-7 % โดยน้ำหนัก และศึกษาสมบัติยึดติดระหว่างยาง SBR/กาวพอลิยูรีเทน/ยาง SBR พบว่าการเตรียมผิวหน้ายาง SBS โดยใช้ตัวทำละลายที่มีความเข้มข้น 0.5 % โดยน้ำหนัก TCI ส่งผลให้ความแข็งแรงของการยึดติดมีค่าสูงขึ้นและค่าเพิ่มสูงขึ้นตามเข้มข้นของ TCI นั่นคือหลังจากใช้ตัวทำละลายบนผิวหน้ายางด้วย TCI หมู่ C-CI และ C-O เกิดขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงของการยึดติดกลับมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของ TCI มากกว่า 2 % โดยน้ำหนัก และสำหรับค่าความแข็งแรงของการยึดติด ที่ความเข้มข้น 7 % โดยน้ำหนัก การล้มเหลวของการยึดติดมีการกระจายไม่ได้ล้มเหลวที่จุดใดจุดหนึ่ง ซึ่งเหตุผลของผลการทดสอบข้างต้นยังไม่ชัดเจน

Romero-Sanchez และคณะ (2001) ได้ศึกษาการเตรียมผิวหน้ายาง SBR ที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมและใช้ wax และพลาสติกไซเซอรเป็น ส่วนประกอบของยาง หลังจากเตรียมผิวหน้ายางด้วย TCI/butanone ความเข้มข้น 0.5 % โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาต่างๆ (ระหว่าง 5 นาที ถึง 1 ปี) โดยเก็บชิ้นตัวอย่างในกล่องที่ปิดสนิทที่อุณหภูมิห้อง และใช้เทคนิค ATR-IR, SEM และ contact angle ตรวจสอบพบว่าเมื่อเก็บยาง SBR ระยะเวลาหลังจากทำคลอรีนชันที่ระยะเวลาต่างๆ ก่อนนำมาตากเพื่อทดสอบค่าความแข็งแรงของการยึดติด พบว่าค่าความแข็งแรงของการยึดติดระหว่าง ยางSBR/กาวพอลิยูรีเทน/ยางSBR มีค่าลดลงและค่า contact angle มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา อันเนื่องมาจาก wax ที่อยู่ด้านในยาง SBR เคลื่อนที่ออกมาที่ผิวมากขึ้นนั่นเอง

Romero-Sanchez และคณะ (2001) ได้ศึกษาสมบัติการยึดติดของยาง SBR/กาวพอลิยูรีเทน/ยาง SBR โดยใช้ ethyl acetate (EA), propyl acetate (PA) และ butyl acetate (BA) เป็นตัวทำละลาย TCI ที่ความเข้มข้น 0.5 % โดยน้ำหนัก และ 2 % โดยน้ำหนัก ยาง SBR ที่ใช้มี 2 สูตร สูตร 1 ปริมาณน้ำมันและพลาสติกไซเซอรน้อยประมาณ 5 % สูตร 2 ปริมาณน้ำมัน และ พลาสติกไซเซอร้มาก ประมาณ 30 % โดยเตรียมขึ้นยาง SBR ขนาด 150 มม×30 มม × 6 มม และทำคลอรีนชันตั้งขึ้นงานให้แห้ง 15 ชั่วโมง ทากาบบนยาง SBR ประมาณ 150 มิลลิกรัม/ชิ้นงาน รอให้ตัวทำละลายในกากระเหยที่อุณหภูมิ 100 °C ภายใต้แสงอินฟราเรดเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาประกบกันภายใต้ความดัน 0.8 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 10 วินาที ตั้งขึ้นงานที่อุณหภูมิ 23 °C เป็นเวลา 3 วัน ก่อนนำไปทดสอบหาค่าความแข็งแรงของการยึดติด ซึ่งพบว่ากระบวนการคลอรีนชันบนผิวหน้ายาง SBR ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของการยึดติดสูงขึ้น โดยค่าความแข็งแรงของการยึดติดของชิ้นงานที่ไม่ได้คลอรีนชันบนผิวหน้าเท่ากับ 0.5 กิโลนิวตัน/เมตร และค่าความแข็งแรงของการยึดติด ของชิ้นงานที่ได้ทำคลอรีนชันเท่ากับ 12 กิโลนิวตัน/เมตร ซึ่งสูงขึ้นประมาณ 10 กิโลนิว

ตัน/เมตร โดย TCI/EA จะให้ค่าความแข็งแรงของการยึดติดสูงสุด อันเนื่องจาก EA จะระเหยจากผิวหน้ายางได้เร็วกว่า PA และ BA ตามลำดับ ซึ่งหากตัวทำละลายระเหยออกจากผิวหน้ายางช้าจะทำให้การนำพาน้ำมันหรือ wax จากด้านในยาง SBR จะมากขึ้นด้วย ซึ่งสารทั้ง 2 ตัวจะเป็นตัวขัดขวางของกาวบนผิวหน้ายางและหลังจากบ่มเร่งขึ้นตัวอย่าง จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของการยึดติดลดลง อันเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้กาวพอลิยูรีเทนเสื่อมสลาย และน้ำมันในเนื้อยาง SBR เคลื่อนที่ออกมาที่ผิวหน้ายางทำให้เป็นตัวขัดขวางการยึดติดของกาวพอลิยูรีเทนที่ผิวหน้ายางและพบว่าปริมาณน้ำมันและพลาสติกไซเซอร์ในสูตรยาง มีผลต่อค่าความแข็งแรงของการยึดติด ซึ่งสูตรยางที่ 2 ค่าความแข็งแรงของการยึดติดลดลงเหลือประมาณ 6 กิโลนิวตัน/เมตร ส่วนความเข้มข้นที่ 0.5 % โดยน้ำหนัก และ 2 % โดยน้ำหนัก ไม่ได้มีผลต่อค่าความแข็งแรงของการยึดติดมากนัก กล่าวคือค่าความแข็งแรงของการยึดติดมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีคำแนะนำว่าหากใช้ความเข้มข้นที่สูงขึ้นต้องระวังในเรื่องการเคลื่อนตัวของน้ำมันด้านในยางออกมาที่ผิวหน้ายางมากขึ้น

Romero-Sanchez และคณะ (2003) ได้ศึกษาสมบัติการยึดติดของยาง SBR/กาวพอลิยูรีเทน/ยาง SBR โดยใช้ TCI/MEK และ TCI/EA ที่ความเข้มข้น 2 % โดยน้ำหนัก เป็นสารเคมีสำหรับทำคลอรีนชั้นบนผิวหน้ายาง โดยศึกษาผลของระยะเวลาหลังจากเตรียมเสร็จพบว่า TCI/EA 2 % โดยน้ำหนัก ระยะเวลามากกว่า 6 สัปดาห์ ปริมาณคลอรีนยังมีค่าคงที่ แต่ในขณะที่ TCI/MEK 2 % โดยน้ำหนัก ปริมาณคลอรีนลดลงตามระยะเวลาและที่ระยะเวลา 6 สัปดาห์ ปริมาณคลอรีนลดลงเหลือครึ่งหนึ่งซึ่งปริมาณคลอรีนมีผลต่อประสิทธิภาพคลอรีนชั้น กล่าวคือหากปริมาณคลอรีนน้อยจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของการยึดติดลดลงด้วย ทั้ง TCI/EA และ TCI/MEK ช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงของการยึดติดขึ้นจากเดิมประมาณ 10 กิโลนิวตัน/เมตร โดยมีการเตรียมชิ้นงานโดยการทำคลอรีนชั้นบนผิวหน้ายางที่มีขนาด 150 มม × 30 มม × 6 มม ตั้งให้แห้งและใช้กาวทาบนผิวหน้ายางประมาณ 1 มิลลิกรัม/หนึ่งชิ้นงาน วางให้ตัวทำละลายระเหยที่อุณหภูมิ 100 °C ภายใต้อินฟราเรดเป็นเวลา 45 นาที หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาประกบกันที่ความดัน 0.8 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 10 วินาที ตั้งทิ้งไว้ 3 วัน ก่อนนำไปทดสอบค่าความแข็งแรงของการยึดติด

Romero-Sanchez และคณะ (2003) เพื่อกำจัดข้อด้อยของการทำคลอรีนชั้นบนผิวหน้ายางที่อาจทำให้ยางเสียหายและสมบัติทางกายภาพของยางเปลี่ยนไปหากใช้ TCI ความเข้มข้นสูงขึ้น อีกทั้ง TCI ยังเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม Romero-Sanchez ได้ศึกษาสมบัติการยึดติดของยาง SBS/กาวพอลิยูรีเทน/หนัง chromium-tanned bovine ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมรองเท้า และด้วยยาง SBS เป็นยางที่ไม่มีขั้วจึงจำเป็นต้องมีการปรับพื้นผิวยางให้มีขั้วเพื่อเพิ่มการยึดติดกับกาวพอลิยูรีเทน ซึ่งงานวิจัยได้ใช้วิธีการ corona discharge ซึ่งใช้หลักการอิเล็กโตรด

เปรียบเทียบกับการทำคลอรีนชั้นบนผิวยางด้วย TCI/MEK 2 % โดยน้ำหนัก ซึ่งมีการเตรียมตัวอย่าง ชีงงานดังนี้คือนำไปตากวาทันทีหลังจากทำ corona discharge หรือภายใน 1 ชั่วโมง หลังจากทำ คลอรีนชั้น และอบขึ้นตัวอย่างที่ 100 °C ภายใต้แสงอินฟราเรดหลังจากนั้นนำชีงงานมาประกบกัน ที่ความดัน 0.8 เมกกะปาสกาล เป็นเวลา 10 วินาที ตั้งทิ้งไว้ 3 วันก่อนนำไปทดสอบค่าความ แข็งแรงของการยึดติด (ใช้ความเร็วในการทดสอบเท่ากับ 0.1 เมตร/นาที) ซึ่งพบว่าค่าความแข็งแรง ของการยึดติดของยาง SBS ที่ยังไม่ได้เตรียมผิวหน้ายาง เท่ากับ 0.5 กิโลนิวตัน/เมตร และเมื่อทำ corona discharge ที่ 80 และ 900 เซนติเมตร/นาที ค่าความแข็งแรงของการยึดติด มีค่าเท่ากับ 2.6 และ 1.9 กิโลนิวตัน/เมตร ตามลำดับซึ่งเป็นค่าที่ต่ำในขณะที่ยางที่ทำคลอรีนชั้นให้ค่าความแข็งแรง ของการยึดติด เท่ากับ 7.9 กิโลนิวตัน/เมตร ซึ่งผลการทดลองด้วยการทำ corona discharge ไม่เป็นไป ตามที่คาดไว้ ซึ่งหากดูสัดส่วนอะตอมบนผิวหน้ายางหลังจากทำ corona discharge แล้วปริมาณของ อะตอมไนโตรเจนและออกซิเจนเกิดขึ้นน้อยมาก นั่นหมายความว่าโอกาสที่จะเกิดหมู่ $-COH$, $-COOH$, $-CO$, $-COC$ ขึ้นที่ผิวหน้ายางก็น้อยด้วย ทั้งนี้อาจเกิดจากความเคลื่อนจากการทดลอง

Romero-Sanchez และคณะ (2005) สืบเนื่องจากยาง SBS ใช้มากในอุตสาหกรรม รองเท้า แต่ยาง SBS จะมีความสามารถในการยึดติดต่ำ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการเตรียมผิวหน้า ยาง SBS เพื่อเพิ่มค่าการยึดติดระหว่าง ยาง SBS/กาวพอลิยูรีเทน/หนัง chromium-tanned bovine ด้วยการ ใช้ O_3 , UV และ UV/ O_3 โดยใช้ ATR-IR, XPS, SEM เป็นเทคนิคในการศึกษาและสำหรับการ ทดสอบค่าความแข็งแรงของการยึดติด เตรียมชีงงานของยางขนาด 100 มม × 30 มม × 5 มม ส่วน หนังเตรียมชีงงานขนาด 100 มม × 30 มม × 2 มม เฉพาะหนังจะต้องขัดผิวหน้าหนังออก ความลึก ประมาณ 0.5 มม หลังจากนั้นนำชีงยาง (เฉพาะยาง SBS) ไปปรับพื้นผิวโดยใช้ O_3 , UV และ UV/ O_3 หลังจากนั้นใช้กาวประมาณ 0.8 มิลลิกรัม ทาที่ผิวหน้าหนังและตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นใช้กาว ประมาณ 0.8 มิลลิกรัม ทาซ้ำอีกครั้ง ส่วนชีงยางใช้กาวทาประมาณ 0.8 มิลลิกรัม เพียงแค่ชั้นเดียว และนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C ภายใต้แสงอินฟราเรด เป็นเวลา 45 นาที หลังจากนั้นนำชีงงานมา ประกบกันที่ความดัน 0.8 เมกกะปาสกาล เป็นเวลา 10 วินาที ตั้งทิ้งไว้ 3 วันก่อนนำไปทดสอบค่า ความแข็งแรงของการยึดติด พบว่าการใช้ O_3 , UV และ UV/ O_3 ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของการยึด ติดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามระยะการเตรียมพื้นผิว กล่าวคือหากไม่มีการเตรียมพื้นผิวยางค่าความแข็งแรง ของการยึดติด เท่ากับ 0.2 กิโลนิวตัน/เมตร เมื่อมีการเตรียมผิวหน้ายาง ด้วย O_3 เป็นเวลา 2 และ 30 นาที ค่าความแข็งแรงของการยึดติด เพิ่มขึ้นเป็น 2.1 กิโลนิวตัน/เมตร และ 3.0 กิโลนิวตัน/เมตร เมื่อ มีการเตรียมผิวหน้ายาง ด้วย UV เป็นเวลา 2 , 30 นาที ค่าความแข็งแรงของการยึดติด เพิ่มขึ้นเป็น 6 กิโลนิวตัน/เมตร และ 9 กิโลนิวตัน/เมตร ตามลำดับ และเมื่อมีการเตรียมผิวหน้ายาง ด้วย UV/ O_3

เป็นเวลา 2 และ 30 นาที ค่าความแข็งแรงของการยึดติด เพิ่มขึ้นเป็น 6.5 กิโลนิวตัน/เมตร และ 10.5 กิโลนิวตัน/เมตร ตามลำดับ ซึ่งการปรับผิวหน้าอย่างด้วย UV/O₃ จะมีประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ SEM ที่ผิวหน้าที่มีความขรุขระมากขึ้น และผลการทดสอบ ATR-IR บนผิวหน้าอย่างหากใช้ UV และ UV/O₃ พบว่าจะมีเกิดหมู่ C=O และ COO⁻ ขึ้นบนผิวหน้าอย่าง แต่หากใช้ O₃ เพียงอย่างเดียวจะเกิดหมู่ที่มีขั้วต่ำ มีเพียงแค่หมู่ O-H เท่านั้นที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าอย่าง

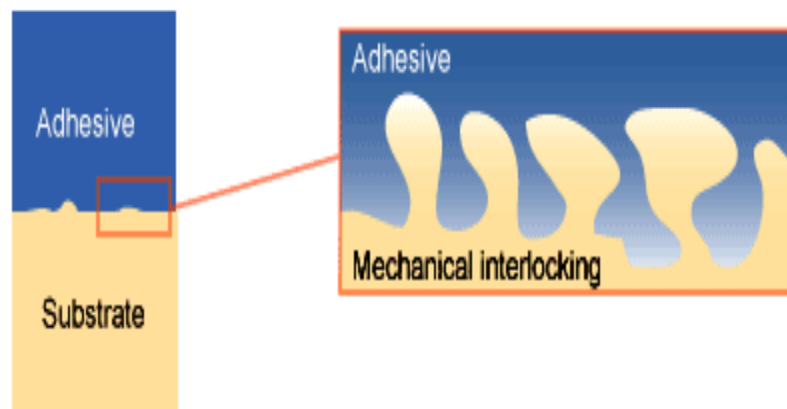
Velez-Pages และคณะ (2005) ได้ศึกษาการยึดติดของหนัง chromium- tanned bovine/กาวพอลิยูรีเทน/PVC ซึ่งขนาดของชิ้นตัวอย่างมีขนาด 150 มม × 30 มม × 6 มม โดยการเตรียมตัวอย่างเป็นดังนี้ PVC ล้างด้วย MEK เพื่อกำจัดพลาสติกไซเซอร์และสิ่งปนเปื้อนบนผิวหน้าออก ส่วนหนัง chromium –tanned bovine ทำความสะอาดฝุ่นและสิ่งปนเปื้อนออก ด้วยเครื่องเป่าลม และทา primer (เป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติกพอลิยูรีเทนพรีพอลิเมอร์) ที่แปรปริมาณ 66.7, 111.1 และ 155.6 ไมโครลิตร/ตารางเซนติเมตร ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นใช้กาวทาสองชั้น (เฉพาะ PVC ทากาวชั้นเดียว) และนำตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ 80 °C ภายใต้แสงอินฟราเรดจนกาวแห้งและนำชิ้นตัวอย่างมาประกบกันทันที และอัดด้วยความดัน 0.8 เมกะปาสกาล เป็นเวลา 10 วินาที ตั้งทิ้งไว้ 1 และ 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบค่าความแข็งแรงของการยึดติด (ทดสอบที่ความเร็ว 0.1 เมตร/นาที) พบว่าค่าความแข็งแรงของการยึดติด เมื่อใช้หนังที่มีการเพิ่มความขรุขระบนผิวหน้าเพียงอย่างเดียวมีค่าเท่ากับ 5±0.1 กิโลนิวตัน/เมตร และจะค่าความแข็งแรงของการยึดติดเพิ่มขึ้นเป็น 6.5-7.5 ± 0.1 กิโลนิวตัน/เมตร เมื่อใช้ primer 66.7 ไมโครลิตร/ตารางเซนติเมตร แต่เมื่อใช้ primer ปริมาณมากขึ้น ค่าความแข็งแรงของการยึดติดกลับลดลง ซึ่งเป็นเหมือนกันทั้งที่ตั้งตัวอย่างไว้ 1 และ 24 ชั่วโมง ที่เป็นอย่างนั้นเพราะเมื่อใช้ primer ปริมาณมากขึ้น primer ที่ยังไม่ cure ยังเหลืออยู่ ส่วนการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของ primer บนหนัง ค่าความแข็งแรงของการยึดติดจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา

2.1.8 ทฤษฎีการยึดติดของกาว

กลไกการยึดติดของกาวกับวัสดุมีด้วยกันหลายทฤษฎี คือ

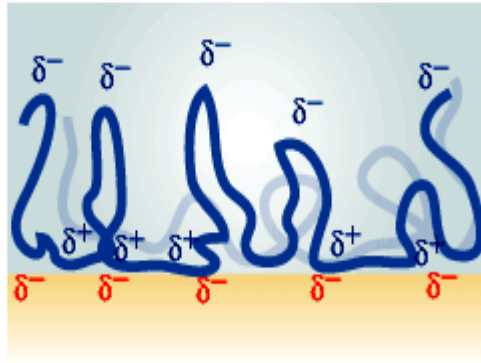
1. Mechanical Interlocking เป็นแรงยึดติดทางกลซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากการยึดติดระหว่างโมเลกุลของกาวกับวัสดุ เนื่องจากการไหลของกาวเข้าไปแทนที่อากาศในช่องว่างบนพื้นผิวของวัสดุ หรือมีการแพร่ผ่านลงไปในพื้นที่ผิวของวัสดุซึ่งการยึดติดทางกลนี้ จะเกิดขึ้นได้เมื่อผิวหน้าของวัสดุมีความขรุขระ ทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของกาวและวัสดุแสดงได้ดังภาพประกอบ

2.26



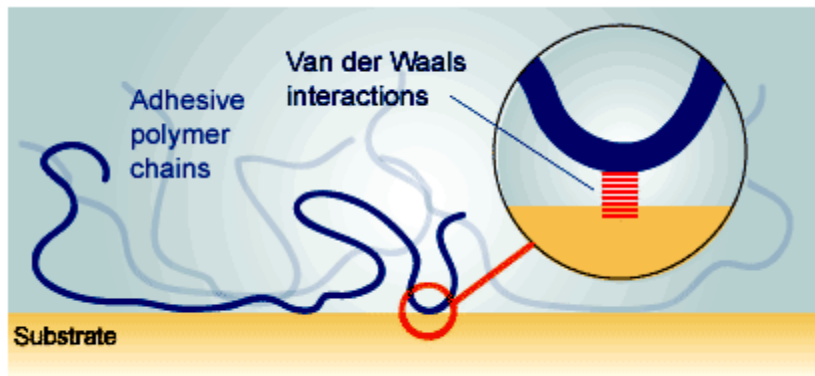
ภาพประกอบ 2.26 แรงยึดติดทางกล (<http://www.special4adhesive.com>, 2005)

2. Electrostatic Theory เป็นการยึดติดด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า ซึ่งเป็นแรงดึงดูดจากการแยกชั้นของประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างกาวกับวัสดุ เช่น การยึดติดของพอลิเมอร์กับโลหะ อิเล็กตรอนจากโลหะจะเคลื่อนย้ายไปยังพอลิเมอร์เกิดเป็นประจุไฟฟ้าที่ต่างกันขึ้นที่ผิววัสดุ ทั้งสองชนิด แสดงได้ดังภาพประกอบ 2.27



ภาพประกอบ 2.27 แรงยึดติดด้วยแรงทางไฟฟ้า (<http://www.special4adhesive.com>, 2005)

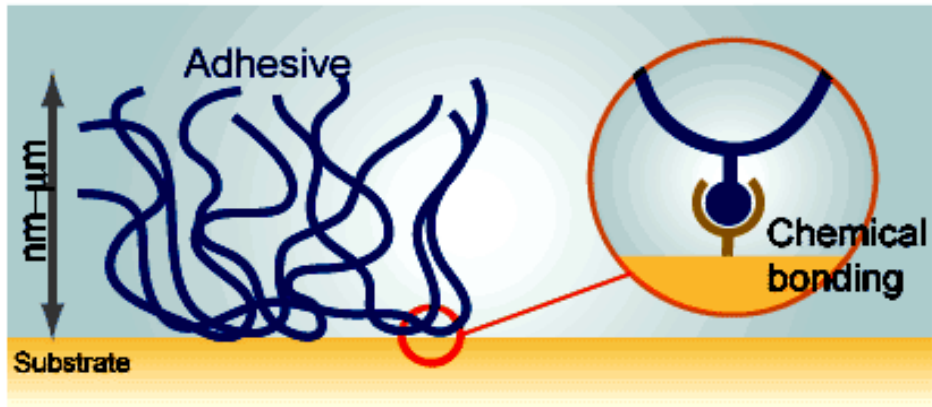
3. Adsorption Mechanism เป็นการยึดติดด้วยแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของกาวและวัสดุ เช่น เนื่องจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waal) แรงกระทำที่เกิดจากความแตกต่างหรือ ความสามารถในการเปียกผิวของกาวบนผิวสัมผัสของผิววัสดุ แสดงได้ดังภาพประกอบ 2.28



ภาพประกอบ 2.28 การยึดติดด้วยแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของกาวและวัสดุ

(<http://www.special4adhesive.com>, 2005)

4. Chemisorption Theory การยึดติดที่เกิดจากพันธะเคมีระหว่างผิวสัมผัสระหว่างกาวกับวัสดุ ซึ่งพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างกาวและผิวสัมผัสมีด้วยกันหลายแบบ และพลังงานพันธะไม่เท่ากัน ส่งผลต่อความแข็งแรงของการยึดติด โดยหากพลังงานพันธะสูงแสดงว่าพันธะมีความแข็งแรงมาก แสดงลักษณะการยึดติดที่เกิดจากพันธะเคมี ได้ดังภาพประกอบ 2.29 และแสดงค่าพลังงานพันธะของพันธะเคมีชนิดต่างๆ ได้ดังตารางที่ 2.1



ภาพประกอบ 2.29 การยึดติดที่เกิดจากพันธะเคมี (<http://www.special4adhesive.com>, 2005)

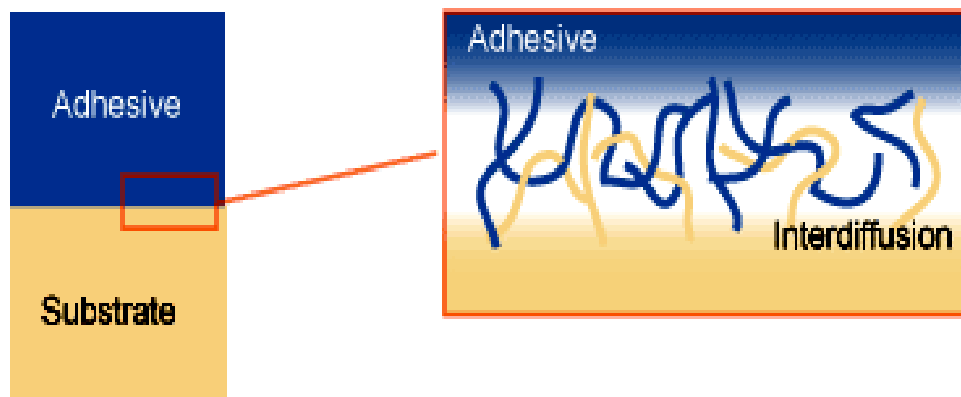
ตารางที่ 2.1 พลังงานพันธะของพันธะเคมีชนิดต่างๆ

ชนิดของพันธะ	พลังงานพันธะ (กิโลจูล/โมล)
Primary bond	
-Ionic	600-1100
-Covalent	60-700
-Metallic	110-350
Donor-acceptor bonds	
-Bronsted acid-base interaction	Up to 1000
-Lewis acid-base interaction	Up to 80
Secondary bonds	
- Hydrogen bonds	
Hydrogen bonds involving fluorine	Up to 40
Hydrogen bonds excluding fluorine	10-25
-Van der waals bonds	
Permanent dipole-dipole interaction	4-20
Dipole-induced dipole interaction	Less than 2
Dispersion(London) force	0.08-40

ที่มา: (<http://www.special4adhesive.com>, 2005)

5. Diffusion Theory เป็นการยึดติดที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของโมเลกุลแทรกผ่านรวมเข้าอยู่ด้วยกันของโมเลกุลที่อยู่ระหว่างพื้นผิวของกาวและวัสดุ แสดงได้ดังภาพประกอบ 2.30 ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการแทรกผ่านของโมเลกุล คือ

- เวลาที่ใช้ในการเชื่อมติด
- อุณหภูมิ
- น้ำหนักโมเลกุล
- ความมีขั้วของโมเลกุล



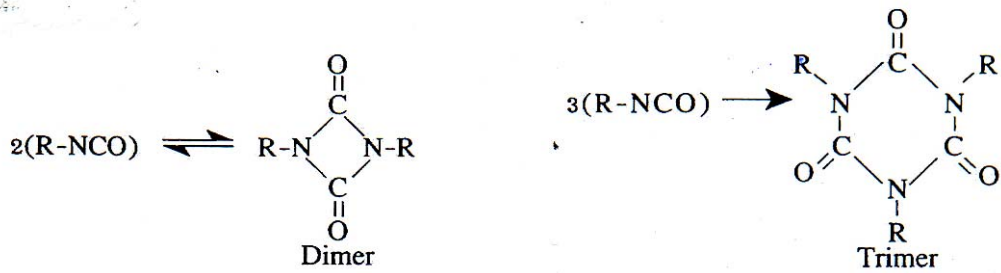
ภาพประกอบ 2.30 การยึดติดที่เกิดจากการแทรกผ่านรวมเข้ากันของโมเลกุล

(<http://www.special4adhesive.com>, 2005)

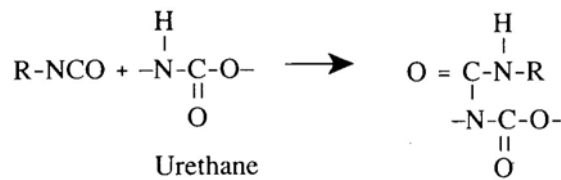
2.1.9 กาวพอลิยูรีเทน

พอลิยูรีเทน เป็นพอลิเมอร์ที่มีความหลากหลายและมีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้ในรูปต่างๆ กัน ได้แก่ โฟม (foams), เส้นใย (fibers), พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (elastomer), กาว (adhesive) และสารเคลือบ (coating materials) สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการเติมแบบขั้น สเตป-แอดดิชัน (step-addition) โดยไดไอโซไซยานต (diisocyanates) หรือพอลิไอโซไซยานต (polyisocyanates) ทำปฏิกิริยากับ ไดออล (diols) หรือพอลิออล (polyols)

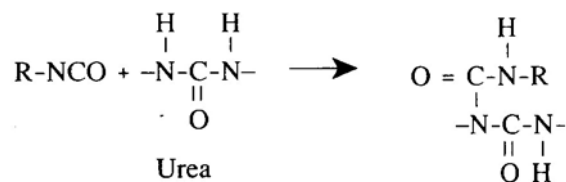
กาวพอลิยูรีเทน กาวพอลิยูรีเทนที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมปัจจุบัน จะประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนที่ทำปฏิกิริยาเป็นกาวเหลว ซึ่งมีลักษณะคล้ายพรีพอลิเมอร์ ซึ่งองค์ประกอบหนึ่งนั้นจะมีรูปแบบเป็นพอลิออล และอีกองค์ประกอบหนึ่งจะเป็นไดไอโซไซยานต เวลาจะใช้งาน จะนำสองส่วนมาผสมกัน ปฏิกิริยาเกิดขึ้นตามภาพประกอบ 2.31



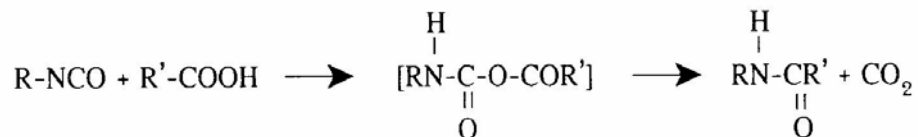
4. ทำปฏิกิริยากับยูรีเทน (urethane) เกิดเป็น อัลโลฟานเตต (allophanate)



5. ทำปฏิกิริยากับยูเรีย เกิดเป็นไบยูเรต (biuret)



6. ทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอกซิลิก เกิดเป็นเอไมด์ (amide)



ข้อเด่นของกาวพอลิยูรีเทน

1. ราคาไม่แพงมากจนเกินไป
2. มีสมบัติการเชื่อมติดที่ทนทาน (toughness) และมีความยืดหยุ่น (flexibility) ที่ดีมากถึงใช้ติดแผ่นฟิล์ม แผ่น foil และวัสดุยืดหยุ่น (elastomer) อื่นๆ ได้

3. มีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิเย็นเยือกได้ดีมาก
4. มีสมบัติการเกาะติดกับวัสดุได้หลากหลายชนิด รวมทั้งพลาสติกที่ติดยาก

ข้อดีของกาวพอลิยูรีเทน

1. ใช้งานที่อุณหภูมิสูงไม่ได้ สามารถทนความร้อนได้ประมาณ 90 °C เท่านั้น (วิริยะ, 2540)
2. ไม่เหมาะสมกับการใช้งานที่มีความชื้นสูง
3. สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ด้วยความร้อนและความชื้น
4. การผสมกาว 2 component หรือ 1 component จะอันตราย
5. ระยะเวลาที่กาวสามารถอยู่ในสถานะของเหลวในระหว่างการผสม (Pot life) สั้น
6. ต้องใช้เครื่องมือพิเศษในการผสม (<http://www.gluguru.com>, 2005)

2.1.10 กาวน้ำยางธรรมชาติ

เป็นกาวที่เตรียมอยู่ในรูปน้ำยางมีการผลิตโดยเริ่มจากการนำน้ำยางสด (field latex) จากต้นยางพารา ซึ่งมีเนื้อยางแห้งประมาณ 35 % มาทำการปั่นแยกให้มีความเข้มข้นของเนื้อยางเพิ่มขึ้นประมาณ 60 %DRC แล้วจึงนำไปผสมพวกรสชาติเติมแต่ง (additive) เพื่อเพิ่มสมบัติของกาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องเติมสารเติมแต่งประเภทที่เพิ่ม bonding strength ทั้งนี้เพราะกาวที่ทำจากยางธรรมชาติจะมี bonding strength ต่ำ

ตัวอย่างสูตรทำกาวลาเท็กซ์จากน้ำยางธรรมชาติขึ้น 60 %DRC (นิตยา, 2521)

สูตรที่ 1

น้ำสะอาด	50	ส่วนโดยน้ำหนัก
น้ำแอมโมเนีย	1	ส่วนโดยน้ำหนัก
กรดโอเลอิก (oleic acid)	2	ส่วนโดยน้ำหนัก
แนปทา (naptha)	25	ส่วนโดยน้ำหนัก
น้ำยางขึ้น	50	ส่วนโดยน้ำหนัก

จากสูตรนี้จะเห็นว่า น้ำยางเป็นสารที่ทำให้เป็นกาว (binder) น้ำสะอาดเป็นตัวทำละลาย (solvent) แอมโมเนียเป็นสารใส่เข้าไปเพื่อไม่ให้กาวบูด กรดโอเลอิกเป็นสารที่ใส่เข้าไปเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แนปทาเป็นสารที่ใส่เข้าไปเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (antioxidant)

สูตรที่ 2

น้ำยางข้น	10	ส่วนโดยน้ำหนัก
Sulphur dispersion 50 %	0.2	ส่วนโดยน้ำหนัก
ตัวเร่งในรูปของ dispersion 50 %	0.1	ส่วนโดยน้ำหนัก
KOH	0.1	ส่วนโดยน้ำหนัก
KOH จะเป็นตัวทำให้น้ำยางเหลวอยู่ตลอดเวลา		

สูตรที่ 3

น้ำยางข้น	10	ส่วนโดยน้ำหนัก
ZnO ในรูป dispersion 50 %	0.3	ส่วนโดยน้ำหนัก
Sulphur ในรูปของ dispersion 50%	0.1	ส่วนโดยน้ำหนัก
Casein	0.1	ส่วนโดยน้ำหนัก
สารตัวเร่งพวก ultra	0.1	ส่วนโดยน้ำหนัก

สูตรนี้ใช้ casein เป็นตัวช่วยให้เกิดการกระจายของสาร ใช้ ZnO เป็นตัวกระตุ้น ตัวเร่งและกำมะถันใส่เข้าไปเพื่อให้เกิดวัลคาไนซ์

กาวที่ทำจากยางพารามีความทนทานต่อน้ำดี มีความยืดหยุ่นดี ใช้ประโยชน์ได้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ใช้ในการติดยางกับยาง หนังกบยาง หนังกบหนังในการทำรองเท้า กระเป๋า และเครื่องหนังอื่นๆ ใช้ติดเครื่องกระเบื้อง ผ้า กระดาษ ไม้ และ พลาสติก เป็นต้น ถึงแม้ว่ากาวที่ทำจากยางพาราจะมีรอยต่อไม่แข็งแรงเท่ากาวที่ทำจากสารสังเคราะห์ก็ตาม แต่อุตสาหกรรมบางประเภทไม่ต้องการรอยต่อที่แข็งแรงมากนัก

2.1.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกาว

เรวดี (2544) ศึกษาการเตรียมกาวน้ำยางธรรมชาติโดยใช้ แทลคิไฟเออร์ ที่เตรียมอยู่ในรูปอิมัลชันจาก wood rosin พบว่าปริมาณ wood rosin ที่ใส่ลงไปให้น้ำยางแล้วไม่ทำให้เสียสภาพควรจะใช้ไม่เกิน 80 phr การปรับ pH ของกาวน้ำยางในช่วงเริ่มต้นควรจะปรับให้อยู่ในช่วง 12.5 -12.6 เพื่อเพิ่มความเสถียรให้กับกาวน้ำยางมากยิ่งขึ้น กาวที่เตรียมได้จะสามารถเก็บไว้

ได้นานมากกว่า 4 เดือน ปริมาณ wood rosin ที่ใช้ไม่ควรเกิน 30 phr หากใช้ปริมาณสูงกว่านี้จะทำให้สมบัติด้าน shear strength ตามมาตรฐาน ASTM D2339 และ cleavage peel strength ตามมาตรฐาน ASTM D3807 ลดลง และจะทำให้สมบัติดังกล่าวลดลงมาก เมื่ออายุการเก็บกาวนานขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกาวที่ใช้ coumarone indene resin และ wood rosin เป็น แทคคิไฟเออร์ กับกาวทางการค้า พบว่ากาวทางการค้าจะมีสมบัติด้าน Shear Strength และ Cleavage Peel Strength ดีกว่า และกาวที่ใช้ wood rosin จะใช้เวลาในการเซ็ตตัวเร็วกว่าการใช้ coumarone indene resin ร่วมกับ chlorinated alkyl phosphate oil

ศุภชัย (2543) ศึกษาการเตรียมกาวน้ำยางธรรมชาติ พบว่าการเตรียมแทคคิไฟเออร์ จาก coumarone indene resin เพื่อใช้เตรียมกาวน้ำยางธรรมชาติไม่สามารถใช้ในรูป 50 % dispersion ได้เนื่องจากทำให้น้ำยางเสียสภาพ ต้องเตรียมในรูปอิมัลชันและใช้ poly(vinyl alcohol) เป็นสารเพิ่มความเสถียร การใช้ KOH ปรับ pH ในตอนเริ่มต้นของกาว ทำให้กาวมีอายุการเก็บที่นานขึ้นและสมบัติด้าน shear strength และ cleavage peel strength เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกาวน้ำยางธรรมชาติกับกาวลาเท็กซ์ทางการค้า พบว่ากาวน้ำยางธรรมชาติมีสมบัติด้าน shear strength และ cleavage peel strength ใกล้เคียงกับกาวลาเท็กซ์ทางการค้า แต่มีสมบัติความทนทานต่อน้ำดีกว่า

Adam และคณะ (1998) ได้จดสิทธิบัตรการปรับปรุงกาวน้ำยางธรรมชาติเพื่อให้ระยะเวลาเซ็ตตัวให้เร็วขึ้น สำหรับการใช้งานกับวัสดุที่มีรูพรุนโดยการใส่ chlorinated alkyl phosphate oil (เช่น tri (2 -chloro isopropyl) phosphate, tri (1,3 -dichloro isopropyl) phosphate, tri(2-chloroethyl)phosphate แปรปริมาณในช่วง 1-12 % โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถเติมได้โดยตรงภายใต้สภาวะที่มีการกวน โดยกำหนดสมบัติของน้ำยางธรรมชาติครั้งนี้คือปริมาณแอมโมเนียน้อยกว่า หรือเท่ากับ 0.8 % โดยน้ำหนัก และปริมาณของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วง 61-62 %

Desai และคณะ (2003) เตรียมพอลิเอสเทอร์ โดยการสังเคราะห์มาจากแป้งมันฝรั่ง และน้ำมันพืช ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งพอลิเอสเทอร์ที่ได้จะนำไปผสมกับ toluene 2,4-diisocyanate เพื่อให้ได้กาวพอลิยูรีเทน ศึกษาคุณลักษณะของกาวพอลิยูรีเทนและพอลิออล โดยใช้เทคนิค FTIR แปรอัตราส่วน NCO/OH ในช่วง 1.0-1.7 พบว่าที่อัตราส่วน NCO/OH เท่ากับ 1.3 จะให้ค่า lab shear strength ดีที่สุดเท่ากับ $50.9 \pm 0.4 \times 10^5$ นิวตัน/ตารางเมตร โดยวัดการยึดติดของกาวระหว่างไม้กับไม้ ตามมาตรฐาน ASTM 906 ก่อนและหลังวางตัวอย่างในน้ำเย็น (30 °C เวลา 24 ชั่วโมง) น้ำร้อน (100 °C เวลา 1 ชั่วโมง สภาวะที่เป็นกรด (pH 2 อุณหภูมิ 80 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง) และสภาวะที่เป็นด่าง (pH 10 อุณหภูมิ 80 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง) พบว่ากาวสามารถทนต่อ

สภาวะที่เป็นน้ำเย็นและน้ำร้อนได้ดี แต่ไม่ทนต่อสภาวะที่เป็นกรดและด่าง เนื่องจากพอลิเอสเทอร์ ถูกไฮโดรไลส์ได้ง่ายในสภาวะที่เป็นกรดและด่าง ส่วนผลการศึกษาค่า green strength ของกาว พบว่าในช่วงระยะเวลา 1-7 วัน ค่า lab shear strength จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและหลังจากนั้น ค่าจะเริ่มคงที่และเมื่อเปรียบเทียบค่า lab shear strength กับกาวในท้องตลาด ปรากฏว่ากาวจากการสังเคราะห์นี้มีค่าการยึดติดที่ดีกว่ากาวในท้องตลาด กล่าวคือค่า lab shear strength ของกาวสังเคราะห์เท่ากับ $63.1 \pm 1.7 \times 10^5$ นิวตัน/ตารางเมตร ในขณะที่กาว Dunlop, Fevicol และ Araldite มีค่าเท่ากับ $12.0 \pm 0.4 \times 10^5$, $20.2 \pm 0.7 \times 10^5$ และ $28.3 \pm 0.9 \times 10^5$ นิวตัน/ตารางเมตร ตามลำดับ

Griffith และคณะ (2002) ได้จดสิทธิบัตรการเตรียมกาวอยู่ในรูปแถบกาว (Pressure sensitive adhesive) จากน้ำยางธรรมชาติโดยมีขั้นตอนคือ ลง primer พวก crosslinked polymer เช่น crosslinked acrylic polymers, crosslinked ethylene-vinyl acetate copolymers ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายน้ำลงบนพอลิเมอร์ฟิล์มจะเป็นพวกพอลิเอสเทอร์ และพีวีซีฟิล์มและหลังจากนั้นใช้สารละลายกาวที่ประกอบด้วยน้ำยางธรรมชาติที่มีแทลคิไฟเบอร์ เช่น เรซินและสารประกอบของเรซิน และสารตัวเติมอื่นทาชั้นบนและทำให้แห้ง ซึ่งกาวที่ได้จะมีสมบัติที่สมดุลและเวลาคลี่ออกเสียงจะเบา

Okamoto และคณะ (1996) รายงานผลการผสมยูรีเทนและอะคริลิกในรูปอิมัลชัน โดยสมบัติของอะคริลิกจะมีปริมาณสารที่ไม่ระเหย 54-56 % pH 8.0-9.0 และมีขนาดอนุภาค 100-150 นาโนเมตร ส่วนพอลิยูรีเทน มีปริมาณสารที่ไม่ระเหย 23-25 % pH 8.0-9.0 โดยกวนให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าระบบที่ประกอบด้วยพอลิยูรีเทนที่ใช้ไฮดราซีนเป็น chain extender ส่วนอะคริลิกมีหมู่คีโตน เป็นระบบที่ก่อให้เกิดประโยชน์มากที่สุด และการวัลคาไนซ์เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อเก็บพอลิเมอร์ผสมที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นระยะเวลา 3 เดือน พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงยังคงสภาพเป็นอิมัลชัน ทั้งนี้เป็นเพราะน้ำเป็นตัวขยับยั้งไม่ให้หมู่คีโตนและหมู่ไฮดราซีนเกิดปฏิกิริยา ส่วนผลการทดสอบของฟิล์มยางให้ค่าที่เสริมกันระหว่างพอลิยูรีเทนและอะคริลิก เช่น มีสมบัติการทนต่อตัวทำละลายดี ความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำได้ดี เพราะที่อุณหภูมิสูงและมีความต้านทานต่อการสึกหรอดี ซึ่งพอลิเมอร์ผสมนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น งานที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น ปูพื้นสนามเทนนิส สารเคลือบพื้นห้อง

Somani และคณะ (2003) ได้ศึกษาการเตรียมกาวพอลิยูรีเทน จากวัตถุดิบตัวใหม่ที่มีต้นทุนต่ำและต้านทานการเสื่อมสลายโดยชีวภาพ โดยใช้พอลิออลที่ต่างชนิดกัน โดยการสกัดมาจากอนุพันธ์น้ำมันละหุ่ง และไกลคอลกับไดไอโซไซยานต โดยศึกษาผลของการใช้อัตราส่วนระหว่าง NCO/OH ที่ต่างกัน ชนิดของไอโซไซยานต ความยาวของสายโซ่ไกลคอล โดยวัดความ

แข็งแรงของการยึดติดระหว่างไม้กับไม้ ก่อนและหลังวางตัวอย่างในน้ำเย็น (30 °C เวลา 24 ชั่วโมง) น้ำร้อน (100 °C เวลา 1 ชั่วโมง) สภาพที่เป็นกรด (pH 2 อุณหภูมิ 80 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง) และ สภาพที่เป็นด่าง (pH 10 อุณหภูมิ 80 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง) พบว่ากาวสามารถทนต่อสภาพที่เป็น น้ำเย็นและน้ำร้อนได้ดี แต่ไม่ทนต่อสภาพที่เป็นกรดและด่าง เนื่องจากพอลิเอสเทอร์ถูกไฮโดรไลส์ ได้ง่ายในสภาพที่เป็นกรดและด่าง และศึกษาลักษณะของพอลิเอทิลและกาวพอลิยูรีเทน โดยใช้ เทคนิค FTIR พบว่าสเปกตรัมอินฟราเรดแสดงถึงตำแหน่งเลขคลื่น 1735 cm^{-1} แสดงถึงการมีหมู่ C=O stretching บ่งชี้ถึงหมู่ยูรีเทนและที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3330 cm^{-1} แสดงถึงการมีหมู่ -NH stretching ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1560 cm^{-1} แสดงถึงการมี -NH bending ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2273 cm^{-1} แสดงถึงการมี NCO ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาและที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3400 cm^{-1} แสดงถึงการมี -OH ที่ ไม่ได้เกิดปฏิกิริยา และทั้งนี้พบว่ากาวพอลิยูรีเทนที่ใช้อะโรมาติกไอโซไซยานตจะเกิดพันธะ เชื่อมโยงได้เร็วกว่าอะลิฟาติกไอโซไซยานต และการเกิดพันธะเชื่อมโยงจะช้าลงเมื่ออัตราส่วน NCO/OH เพิ่มมากขึ้น ส่วนผลการศึกษาค่า green strength ของกาวพบว่าในช่วงระยะเวลา 1-7 วัน ค่า lab shear strength จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและหลังจากนั้นค่าจะเริ่มคงที่ และยังพบอีกว่า อัตราส่วนของ NCO/OH เท่ากับ 1.3 โดยใช้อะโรมาติกไอโซไซยานตจะให้ค่าการยึดติดระหว่างไม้ กับไม้ดีที่สุด

Travinska และคณะ (1999) ได้เตรียมพอลิยูรีเทนและพอลิเอทิลผสม โดยการ เตรียมในสถานะน้ำยาง เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมในสถานะน้ำยางจะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อเพิ่มสมบัติของพอลิเมอร์และเพื่อสนองความต้องการของผู้ใช้งานให้ตรงกับความต้องการมากที่สุด ซึ่งมีวิธีการเตรียมโดยผสม TDI (toluene diisocyanate(TDI-blend of 2,4- and 2,6-isomer) POPG (poly(oxypropylene)glycol MW 1000) และ DEG (diethylene glycol) ลงในหลอดสำหรับ ทำปฏิกิริยาพร้อมทั้งกวนตลอดเวลาที่อุณหภูมิ 75 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนปล่อยให้ เกิดปฏิกิริยาจนกระทั่งได้ค่า NCO ตามต้องการหลังจากนั้นเติม SA (sulfuric acid) TEA (triethylamine) และโซ่ซีโตนเพื่อลดความหนืดของปฏิกิริยาตั้งให้เย็นที่อุณหภูมิ 15 °C และเติม พอลิเอทิลที่มีการแปรปรมาณและไฮดราซีน เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง NCO อีสระ กับน้ำ พร้อมกันนี้ได้ศึกษาสมบัติของคอลลอยด์สมบัติด้านการไหลเทอร์โมไดนามิก และวิสโคสิลา สติคของพอลิเมอร์ผสม พบว่าค่า pH ค่าความหนืด %TSC และขนาดอนุภาค มีแนวโน้มที่ เหมือนกันทุกอัตราส่วนการผสมของ PU/PA ยกเว้นค่าแรงดึงผิวที่มีแนวโน้มไม่เหมือนค่าอื่นๆ ช้างต้น กล่าวคือที่อัตราส่วน PU/PA เท่ากับ 90/10 ค่าแรงดึงผิวมีค่าสูงที่สุด ที่เป็นเช่นนี้เพราะ อัตราส่วนดังกล่าวจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลแข็งแรงที่สุด ส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรง และ

ผลการทดลองข้างต้นสอดคล้องกับค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มที่ให้ค่าสูงสุด เช่นเดียวกัน และเมื่อติดตามการแยกเฟสของพอลิเมอร์ผสม พบว่าไม่มีแยกเฟสภายในระยะเวลา 5 เดือน

Varghese และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาสมบัติของยางผสมระหว่างน้ำยางธรรมชาติ (NR) น้ำยางพอลิยูรีเทน (PU) และน้ำยางผสมระหว่างน้ำยางธรรมชาติและน้ำยางพอลิยูรีเทน (NR/PU) ในอัตราส่วน 1:1 กับ ซิลิเกตสังเคราะห์ (LS; sodium fluorohectorite) ในปริมาณ 10 phr โดย LS ที่จะนำไปผสมเตรียมอยู่ในรูปของคิสเพอร์ซัน และศึกษาสมบัติโดยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) และ transmission electron microscopy (TEM) และได้ศึกษาถึงปฏิริยาระหว่างยาง/LS ด้วย transform infrared spectroscopy (FTIR) และ dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) พบว่าความเข้ากันได้ระหว่าง LS กับน้ำยางพอลิยูรีเทนจะดีกว่าน้ำยางธรรมชาติส่วนความเข้ากันได้ระหว่างน้ำยางธรรมชาติและน้ำยางพอลิยูรีเทน ด้วยเครื่อง TEM พบว่าไม่สามารถเข้ากันได้ดีนัก

2.2 ยางธรรมชาติ

2.2.1 เศรษฐกิจและการตลาดยางของไทย

ประเทศไทยผลิตยางธรรมชาติมากที่สุดในโลก มีปริมาณการผลิต การส่งออก และการใช้เพิ่มมากขึ้นทุกปี ปัจจุบันมีศักยภาพการผลิตอยู่ในระดับ 2.87 ล้านตันต่อปี (ตารางที่ 2.2) การส่งออกมีประมาณ 2.57 ล้านตัน ที่เหลืออีกประมาณ 0.29 ล้านตัน ใช้ภายในประเทศ ส่วนการส่งออกผลิตภัณฑ์ยางปี 2546 มีมูลค่า 64,717 ล้านบาท

ตารางที่ 2.2 การผลิต การส่งออก การใช้ยางธรรมชาติของประเทศไทย ปี 2542-2546

หน่วยปริมาณ : ตัน

ปี	การผลิต	การส่งออก	ใช้ในประเทศ	สต็อก
2542	2,154,560	1,886,339	226,917	250,850
2543	2,346,487	2,166,153	242,549	188,635
2544	2,319,549	2,042,079	253,105	213,000
2545	2,615,104	2,354,416	278,355	196,680
2546	2,876,005	2,573,450	298,699	202,240

ที่มา: (<http://www.rubberthai.com>, 2006)

ประเทศไทยเป็นประเทศส่งออกยางมากที่สุดของโลก และมีสัดส่วนการส่งออกประมาณร้อยละ 40 ของการส่งออกยางทั้งหมดของโลก ซึ่งส่วนใหญ่ส่งออกไปยังจีน ญี่ปุ่น มาเลเซีย และสหรัฐอเมริกา (ตารางที่ 2.3) สำหรับชนิดของยางที่ส่งออกนั้น ส่วนใหญ่ยังเป็นการส่งออกยางแผ่นรมควัน และมีแนวโน้มส่งออกจากแท่งเพิ่มมากขึ้น และกว่าครึ่งหนึ่งส่งออกผ่านจังหวัดสงขลา ท่าเรือสงขลา ด่านปาดังเบซาร์ และด่านสะเดา เช่นเดียวกับการใช้ยางในประเทศที่มีการใช้น้ำยางข้นที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 2.3 ตลาดส่งออกยางที่สำคัญของไทย

หน่วยปริมาณ : ตัน

ประเทศ	2542	2543	2544	2545	2546
1. จีน	243,318	417,638	368,114	436,637	650,898
2. ญี่ปุ่น	509,701	505,233	435,453	498,854	542,837
3. มาเลเซีย	154,913	243,708	296,989	363,651	365,486
4. สหรัฐอเมริกา	236,382	329,504	302,174	382,317	278,693
5. เกาหลีใต้	157,215	136,387	139,295	138,756	165,832
6. ยุโรป	240,700	231,178	233,390	266,392	294,239
7. อื่นๆ	344,110	302,505	266,664	267,809	275,465
รวม	1,886,339	2,166,153	2,042,079	2,354,416	2,573,450

ที่มา: (<http://www.rubberthai.com>, 2006)

2.2.2 ส่วนประกอบของน้ำยาง

น้ำยางสดที่กรีดยกจากต้นยางพารามีลักษณะเป็น ของเหลวสีขาวขุ่น มีความหนาแน่น 0.975-0.98 กรัม/มิลลิลิตร มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5-7.0 และขนาดอนุภาคของเม็ดยางอยู่ระหว่าง 400-25,000 อังสตรอม โดยอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดเกิน 4,000 อังสตรอม และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 10,000 อังสตรอม น้ำยางอยู่ในสภาวะแขวนลอยและมีประจุเป็นลบ จึงลึกลับกันตลอดเวลาทำให้คงสภาพอยู่ได้จนกว่าสภาวะแวดล้อมและปัจจัยต่างๆที่มารบกวน เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรด ซึ่งทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนของน้ำยาง ซึ่งน้ำยางสดประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบของน้ำยางสด

ส่วนประกอบ	% โดยน้ำหนัก
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด	27 – 48
เนื้อมะพร้าวแห้ง	25 – 45
สารพวกโปรตีน	1 – 1.5
สารพวกเรซิน	1 – 2.5
ซีลีล่า	สูงถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำ	ส่วนที่เหลือจนครบ 100

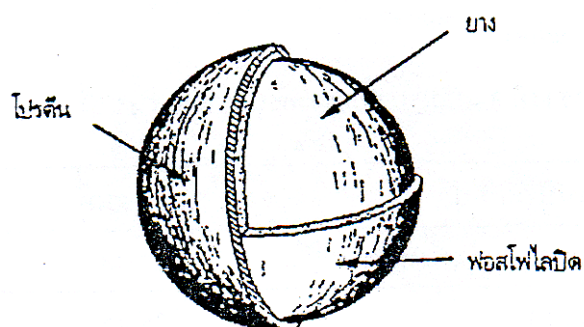
ที่มา: (Blackley, 1997)

ซึ่งน้ำยางสดหลังจากปั่นแยก จะประกอบด้วย

1. ส่วนของเนื้อมะพร้าว ประกอบด้วย

1.1 อนุภาคยาง

อนุภาคยางถูกห่อหุ้มด้วยสารจำพวกไขมันและโปรตีน โดยโปรตีนนี้จะอยู่ชั้นนอก และอาจมีโลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียม โพแทสเซียม และทองแดงปะปนอยู่ปริมาณเล็กน้อยประมาณ 0.5 % แสดงลักษณะอนุภาคยางธรรมชาติได้ดังภาพประกอบ 2.32



ภาพประกอบ 2.32 ลักษณะอนุภาคยางธรรมชาติ (Blackley, 1997)

โดยปกติอนุภาคยางจะแขวนลอยในน้ำ ประกอบด้วย สารพวกไฮโดรคาร์บอน มีชื่อโครงสร้างทางเคมีว่า พอลิไอโซพรีน (cis-1,4 polyisoprene) มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.92 กรัม/มิลลิลิตร ลักษณะอนุภาคยางเป็นรูปค่อนข้างกลม มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันมาก คืออยู่ระหว่าง 0.02 ไมครอน จนถึง 2 ไมครอน (200 -20,000 อังสตรอม) อนุภาคยางส่วนใหญ่จะมีขนาดเกิน 0.4 ไมครอน (4000 อังสตรอม) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 1.2 ไมครอน เมื่อนำน้ำยางสดมาปั่นด้วยความเร็วสูงพบว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะแยกตัวออกจากชั้นน้ำขุ่นมาอยู่ด้านบนซึ่งสามารถแยกออกได้เป็นน้ำยางชั้น ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะปนอยู่กับหางน้ำยาง สามารถแยกออกโดยการทำให้จับตัวเป็นก้อนด้วยกรด

1.2 โปรตีน

ส่วนของสารพวกโปรตีนที่ห่อหุ้มตรงผิวรอบนอกของอนุภาคยาง มีอยู่ประมาณ 25 % ของโปรตีนทั้งหมดที่อยู่ในน้ำยาง อีก 50 % อยู่ในชั้นน้ำ และอีก 25% จะปะปนในส่วนของสารลูทอยด์ โปรตีนส่วนที่อยู่ในน้ำยางส่วนใหญ่จะเป็นชนิดแอลฟาไกลบูลินและฮีวิน (α - globulin and hevein) ส่วนนอกสุดของอนุภาคยาง มีโปรตีนห่อหุ้มอยู่ประมาณ 1 % ของอนุภาคยาง โปรตีนบนผิวอนุภาคยางนี้ มีส่วนประกอบของกำมะถัน (cystine disulphide linkage) อยู่ประมาณ 5 % ดังนั้นขณะที่น้ำยางเกิดการสูญเสียสภาพ จะเกิดการบูดเน่า โดยโปรตีนส่วนนี้จะสลายตัวให้สารประกอบพวกไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารเมอร์แคปแทน (mercaptan) ทำให้มีกลิ่นเหม็น

1.3 ไขมัน

ไขมันซึ่งจะอยู่ระหว่างผิวของอนุภาคยางและโปรตีน ส่วนใหญ่เป็นสารพวกฟอสโฟไลปิด ชนิดแอลฟาเลซิทิน (α -lecithin) เชื่อว่าทำหน้าที่ยึดโปรตีนให้เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคยาง น้ำยางในสถานะที่เป็นต่าง เช่น มีแอมโมเนียอยู่ (ประมาณ 0.6 % ขึ้นไป) ฟอสโฟไลปิดจะถูกไฮโดรไลซ์ เป็นกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาว (long chain fatty acid) ซึ่งจะรวมตัวกับแอมโมเนียกลายเป็นสบู่ ทำให้น้ำยางมีความเสถียรยิ่งขึ้น แต่ในกรณีที่แอมโมเนียปริมาณน้อย (ประมาณ 0.2 % ในน้ำยาง) การไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นน้อย การเพิ่มความเสถียรของน้ำยางจึงจำเป็นต้องเติมสบู่ หรือสารอื่นที่ช่วยในการเก็บรักษาน้ำยางเพิ่มลงไป

2. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง

2.1 ส่วนที่เป็นน้ำหรือเซรัม

เซรัม (serum) ของน้ำยาง มีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัม/มิลลิลิตร ประกอบด้วยสารชนิดต่างๆ คือ

ก. คาร์โบไฮเดรต

คาร์โบไฮเดรตเป็นสารพวกแป้งและน้ำตาลมีอยู่ประมาณ 1 % น้ำตาลส่วนใหญ่เป็นชนิดคิวบาซินอล มีน้ำตาลชนิด กลูโคส ซูโครส ฟรุคโตส ปริมาณเล็กน้อย

ข. โปรตีน และกรดอะมิโน

โปรตีนและกรดอะมิโนเป็นส่วนที่อยู่ในเซรัมของน้ำยาง มีค่า isoelectric point หลายค่า โปรตีนที่มีค่า isoelectric point สูงสามารถสลายตัวให้ประจุบวกได้ เป็นสาเหตุให้น้ำยางสูญเสียสภาพ โปรตีนที่พบมากในน้ำยางสด ส่วนใหญ่เป็นโปรตีนประเภท อัลฟาไกลูโบลิน ซึ่งมีสมบัติของสารตรงผิวของโมเลกุลมีความว่องไว (surface active) ดังนั้นโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่างรอยเชื่อมต่อของน้ำ-อากาศ และน้ำมัน-น้ำ

2.2 ส่วนของลูทอยด์และสารอื่นๆ

ก. ลูทอยด์

ลูทอยด์เป็นอนุภาคค่อนข้างกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5-30 ไมครอน ห่อหุ้มด้วยเนื้อเยื่อต่างๆ ภายในเนื้อเยื่อนี้จะมีทั้งสารละลายและสารแขวนลอย มีค่า pH เท่ากับ 5.5 ส่วนใหญ่ประกอบด้วยโปรตีน โดยมีโปรตีนละลายน้ำอยู่ประมาณ 3 % และมีโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำอยู่ประมาณ 2 % นอกจากนี้ยังมีสารพวกฟอสโฟไลปิดแขวนลอยอยู่ประมาณ 0.5 % และมีสารโพลีฟีนอลอ็อกซิเดส ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ยางมีสีเหลือง หรือสีคล้ำเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ลูทอยด์ห่อหุ้มด้วยเนื้อเยื่อชั้นเดียว สามารถเกิดการออสโมซิส (osmosis) ได้ง่าย ดังนั้นการเติมน้ำลงในน้ำยางสดจะทำให้ลูทอยด์บวมและแตกง่าย ขณะที่ลูทอยด์เกิดการพองตัวมีผลทำให้น้ำยางมีความหนืดเพิ่มขึ้น และเมื่อลูทอยด์แตกความหนืดก็จะลดลง

ข. อนุภาคเฟรย์-วิสลิง (frey wyssling)

อนุภาคเฟรย์-วิสลิง เป็นสารที่ไม่ใช่ยางมีอนุภาคใหญ่กว่ายาง แต่ความหนาแน่นน้อยกว่า มีรูปร่างค่อนข้างกลม มีผนังล้อมรอบสองชั้น มีปริมาณไม่มากนัก ประกอบด้วยสารเม็ดสีพวกคาโรทีนอยด์ ซึ่งทำให้ยางมีสีเหลืองเข้ม สามารถรวมตัวกับแอมโมเนียและแยกตัวออกจากยางมาอยู่ในส่วนของเซรัม (Blackley, 1997)

2.2.3 การปรับปรุงทางเคมีของยางธรรมชาติ

การปรับปรุงทางเคมีของยางธรรมชาติจะทำให้หลายวิธีด้วยกัน ดังนี้

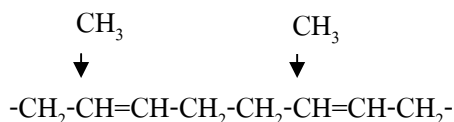
ก. เปลี่ยนแปลงการจัดพันธะใหม่ในโมเลกุลยางธรรมชาติ (ไม่มีการเพิ่ม อะตอมใหม่) ตัวอย่างเช่น การเชื่อมโยงพันธะคาร์บอน-คาร์บอน ปฏิกริยาการทำให้เกิดวงแหวน (cyclization) ซิส, ทราน-ไอโซเมอไรเซชัน (cis,trans-isomerization) และดีพอลิเมอไรเซชัน (depolymerization

ข. การเกาะติดหมู่เคมีใหม่ลงบนสายโซ่ยางโดยปฏิกิริยาการเติม หรือการแทนที่บนพันธะคู่โอเลฟินิก

ค. การกราฟต์พอลิเมอร์ชนิดที่สองลงบนสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ (เสาวนีย์และคณะ, 2543)

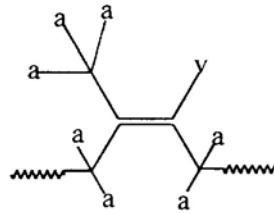
2.2.4 ความว่องไวทางเคมีทั่วไป (General chemical reactivity)

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่ว่องไวมาก เนื่องจากมีพันธะคู่สูง ทุกๆ 4 คาร์บอนอะตอมในสายโซ่จะมีพันธะคู่อยู่ 1 อัน ดังโครงสร้างตามภาพประกอบ 2.33



ภาพประกอบ 2.33 คาร์บอนอะตอมในสายโซ่ยางธรรมชาติ

และในการเกิดปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาแทนที่/การเติม คาร์บอนทั้ง 5 อะตอมสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ เพราะในโครงสร้างของยางธรรมชาติจะมี allylic hydrogen ทั้งหมด 7 ตัว (allylic hydrogen เป็นไฮโดรเจนที่เมื่อเกิดเป็นอนุมูลเสรีแล้วจะเสถียร และเกิดได้ง่าย เกาะติดอยู่กับคาร์บอนอะตอมที่ถัดไปจากพันธะคู่) และมีไฮโดรเจนจำนวน 1 ตัว เท่านั้นที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา คือ เป็น vinylic hydrogen แสดงได้ดังภาพประกอบ 2.34



a = allylic hydrogen

v = vinylic hydrogen

ภาพประกอบ 2.34 อะตอมไฮโดรเจนที่ว่องไวบนยางธรรมชาติ

(Campell, D.S.,1998)

ยางธรรมชาติว่องไวมากที่สุดในบรรดายางได้อื่นด้วยกัน โดยมีเหตุผลสองประการคือ

ประการแรก มีอนุมูล CH_3 จำนวน 1 หมู่ที่ส่งอิเล็กตรอนเข้าไปที่พันธะคู่ เสริมพันธะคู่ ทำให้อนุมูลเสรีที่เกิดขึ้นมีความว่องไวมากยิ่งขึ้น

ประการที่สอง หมู่อัลคิลจำนวน 3 หมู่ในโครงสร้างช่วยเพิ่มความเสถียรของไอออน และอนุมูลเสรี (เช่น โครงสร้าง 3 และ 4) และอนุมูลเสรีสามารถเกิดโครงสร้างไฮเปอร์คอนจูเกทีฟ (hyperconjugative structures) ระหว่างโครงสร้าง 3 และ 5 และระหว่างโครงสร้าง 4 และ 6 สันนิษฐานให้เกิดเรโซแนนซ์ไฮบริด (resonance hybrid) แสดงได้ดังภาพประกอบ 2.35



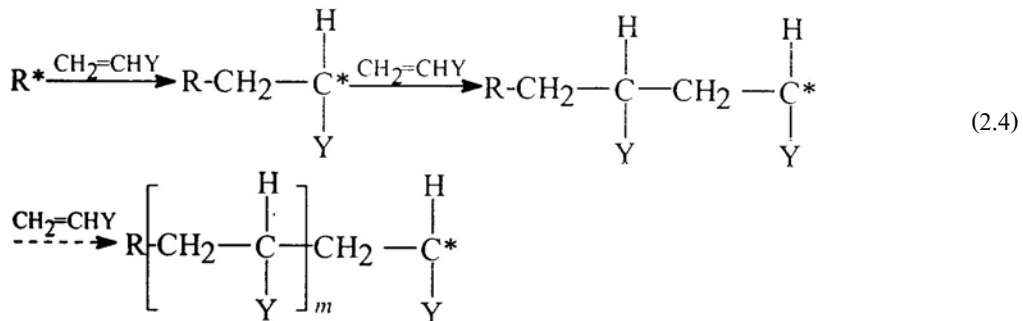
ภาพประกอบ 2.35 เรโซแนนซ์ไฮบริดของยางธรรมชาติ (Campell, D.S., 1998)

2.2.5 การพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลเสรี

การพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลเสรีจะเริ่มจากการแตกตัวของตัวเริ่มต้น I แยกตัวให้อนุมูลเสรี R*



ชนิดของตัวอ่อนไว เป็นอนุมูลเสรี เต็มลงบนโมเลกุลโดยการเปิดพันธะ π -bond เกิดเป็นอนุมูลเสรีตัวใหม่ แล้วส่วนของตัวอ่อนไวจะเติบโตอย่างต่อเนื่อง



พอลิเมอร์ที่กำลังเติบโตจะสิ้นสุดจากการทำลายส่วนที่อ่อนไวโดยปฏิกิริยา ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอ่อนไวและสภาวะปฏิกิริยาบางส่วน

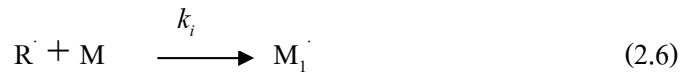
อัตราเร็วของการพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลเสรี (rate of free radical polymerization)

การพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลเสรี เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ที่ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ ขั้นเริ่มต้น (initiation step) ขั้นการแผ่ขยาย (propagation step) ขั้นสิ้นสุด (termination step)

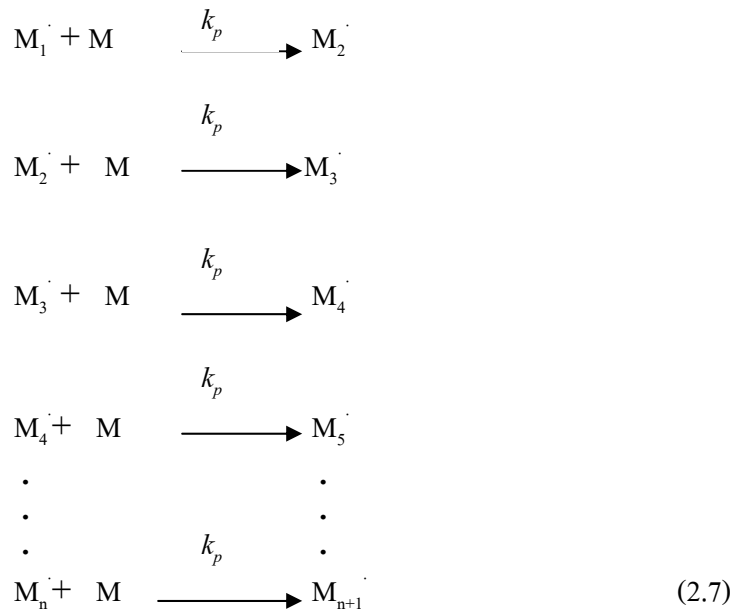
ขั้นเริ่มต้นจะประกอบไปด้วย 2 ปฏิกิริยาปฏิกิริยาแรกเป็นการสร้างอนุมูลเสรี โดยการแตกตัวของตัวเริ่มต้น I เป็นอนุมูลเสรีหนึ่งคู่ R*



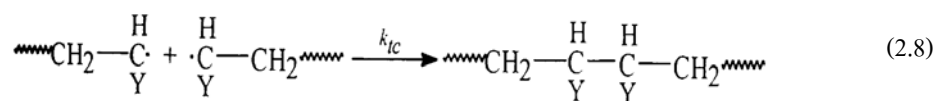
โดยที่ k_d เป็นค่าคงที่ของอัตราเร็วสำหรับการแตกตัวของตัวเริ่มต้น ในปฏิกิริยาส่วนที่ 2 คือ การเติมของอนุมูลเสรีไปยังโมเลกุลของมอนอเมอร์ตัวแรก ทำให้เกิดตัวเริ่มสายโซ่ $M_1\cdot$



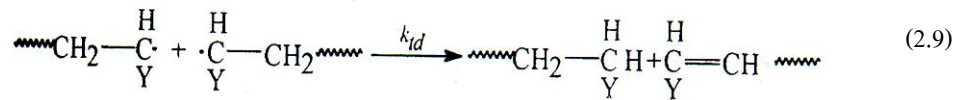
โดย M เป็นโมเลกุลของมอนอเมอร์ และ k_i คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็วสำหรับขั้นการเริ่มต้น การแผ่ขยาย (propagation step) ประกอบไปด้วยมอนอเมอร์ที่กำลังเจริญเติบโต $M_1\cdot$ เติมโมเลกุลมอนอเมอร์ในปริมาณมาก (หลักร้อย หรือ พัน)



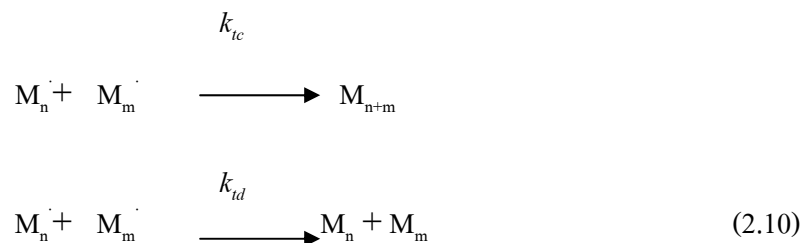
โดย k_p คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็วสำหรับการแผ่ขยายการแผ่ขยายของสายโซ่ไปเป็นพอลิเมอร์ เกิดขึ้นรวดเร็วมาก โดยทั่วไปค่า k_p ของมอนอเมอร์อยู่ในช่วง 10^2 - 10^4 ลิตร/โมล-นาที่ พอลิเมอร์ที่กำลังแผ่ขยายจะหยุดการเจริญเติบโตและสิ้นสุดการสิ้นสุดเกิดจาก ความว่องไวของอนุมูลเสรีหมดไปโดยปฏิกิริยาระหว่างสองโมเลกุลของอนุมูลเสรี อนุมูลเสรีสองตัวจะทำปฏิกิริยา โดยการรวมตัวกัน (combination coupling)



หรือเกิดการแลกเปลี่ยนอนุมูลเสรีไฮโดรเจน เป็นการถ่ายโอนไปยังอนุมูลเสรีตัวอื่น เป็นผลมาจากการเกิดโมเลกุลพอลิเมอร์สองตัว และได้ส่วนที่ไม่อิ่มตัวหนึ่งส่วน



การสิ้นสุดสามารถเกิดขึ้นได้ โดยการรวมตัวกัน (combination) หรือการแลกเปลี่ยนอนุมูลเสรี อย่างไม่ได้สัดส่วน (disproportionation) โดยอาจจะเขียนทั้งสองแบบนี้ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายดังนี้



โดย k_{tc} และ k_{id} เป็นค่าคงที่ของอัตราเร็วในการสิ้นสุดโดยการแลกเปลี่ยนอนุมูลเสรีอย่างไม่ได้สัดส่วนตามลำดับ หรืออาจเขียนปฏิกิริยาลิ้นสุดอย่างง่ายได้ดังนี้



สมการอัตราเร็ว (rate expression)

การหายไปของมอนอเมอร์จะเกิดจากปฏิกิริยาเริ่มต้นและปฏิกิริยาการแผ่ขยาย อัตราเร็วของการหายไปของมอนอเมอร์ ซึ่งเป็นเสมือนปฏิกิริยาการพอลิเมอร์ไรเซชัน จะเป็นดังนี้

$$\frac{-dt[M]}{dt} = R_i + R_p \quad (2.12)$$

โดย R_i และ R_p คือ อัตราเร็วของการเริ่มต้นและการแผ่ขยายตามลำดับ อย่างไรก็ตามก็ ตามจำนวนของโมเลกุลของมอนอเมอร์ที่ทำปฏิกิริยาในขั้นของการเริ่มต้นนั้นต่ำกว่ามากเมื่อเทียบกับใน ขั้นตอนการแผ่ขยายสำหรับกระบวนการผลิตพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลสูง ดังนั้นจึงสามารถที่จะละ ทิ้งขั้นตอนการเริ่มต้นได้ ทำให้อัตราเร็วในการพอลิเมอร์ไรเซชันง่ายขึ้น นั่นคือ

$$\frac{-dt[M]}{dt} = R_p \quad (2.13)$$

ในอัตราเร็วในการแผ่ขยายหรืออัตราเร็วในการพอลิเมอร์ไรเซชันคือการรวมกัน ของขั้นตอนการแผ่ขยายเป็นจำนวนมากโดยค่าคงที่ปฏิกิริยาในขั้นการแผ่ขยายทั้งหมดเหมือนกัน และสามารถที่จะเขียนอัตราเร็วได้ดังนี้

$$R_p = k_p [M] [M] \quad (2.14)$$

โดยที่ $[M]$ คือ ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ และ $[M]$ คือ ความเข้มข้นรวมของ อนุมูลเสรี $M\cdot$ ทั้งหมดสมการ 2.14 เป็นสมการที่ไม่สามารถใช้ได้โดยตรงเพราะมีเทอมความเข้มข้น ของอนุมูลเสรี ความเข้มข้นของอนุมูลเสรีวัดได้ยากมาก โดยจะมีค่าต่ำมาก ($\sim 10^{-8}$ M) ดังนั้นจึงต้อง กำจัดออก โดยใช้สมมติฐานการหายไปและการเกิดขึ้นของอนุมูลเสรีเท่ากัน (steady state hypothesis, SSA) ซึ่งหมายความว่าอัตราเร็วในการเริ่มต้น R_i และสิ้นสุด R_t ของอนุมูลเสรีเท่ากัน

$$R_i = 2k_t [M]^2 \quad (2.15)$$

ด้านขวามือของสมการที่ 2.15 แสดงถึง อัตราเร็วของปฏิกิริยาการสิ้นสุด โดยการ ยกกำลังสองในสมการอัตราเร็วการสิ้นสุด เนื่องจากเป็นที่ยอมรับว่าปฏิกิริยาโดยทั่วไปเป็นการ ทำลาย อนุมูลเสรี โดยคู่ของอนุมูลเสรีการจับคู่ใหม่ ของสมการที่ 2.15 ได้เป็นสมการ 2.16

$$[M] = (R_i / 2k_t)^{1/2} \quad (2.16)$$

และแทนที่ลงในสมการที่ 2.14 ได้เป็น

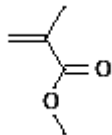
$$R_p = k_p [M](R_i/2k_t)^{1/2} \quad (2.17)$$

สำหรับอัตราเร็วในการพอลิเมอไรเซชันจากสมการที่ 2.17 พบว่าอัตราเร็วในการพอลิเมอไรเซชันขึ้นอยู่กับรากที่สองของอัตราเร็วของปฏิกิริยาเริ่มต้น

2.2.6 การเตรียมการกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับเมทิลเมทาคริเลท

2.2.6.1 พอลิเมทิลเมทาคริเลท (polymethyl methacrylate)

พอลิเมทิลเมทาคริเลท มีสถานะเป็นของเหลว, ไม่มีสี, มีกลิ่นเฉพาะตัว, มีจุดเดือด $100.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีสมบัติเชิงกล และความคงทนต่อความร้อนดี ส่วนสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าดีปานกลาง มีโครงสร้างดังด้านล่าง



PMMA (polymethyl methacrylate) หรือที่รู้จักกันดีในนาม “อะคริลิก” เป็นพลาสติกที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ด้วยสมบัติโดดเด่นในด้านความใสเทียบเคียงกระจก มีความมันเงา และทนทานต่อสภาพแวดล้อม PMMA สามารถนำมาใช้ทั้งในงานฉีดขึ้นรูป (injection) และงานอัดรีด (extrusion) ได้เป็นอย่างดี โดยชิ้นงานที่เห็นกันอยู่ทั่วไปในปัจจุบันไม่ว่าจะเป็น รถยนต์ หน้าปัทม์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ฝาครอบไฟก๊อคน้ำคริสตัล เครื่องใช้ในครัวเรือนที่คล้ายเครื่องแก้ว เลนส์ กรอบแว่นตา ฯลฯ ล้วนแต่ทำจาก PMMA ทั้งสิ้น

2.2.6.2 การเตรียมการกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับเมทิลเมทาคริเลท

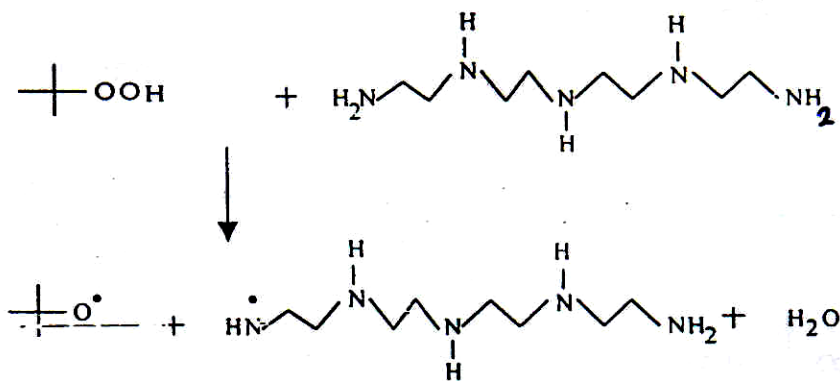
จะใช้วิธีการพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลเสรี (free radical polymerization) ในสถานะสารละลาย หรือในสถานะน้ำยาง โดยใช้คิวมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่ม (initiator) งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมการกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับเมทิลเมทาคริเลทในสถานะน้ำยาง โดยใช้เทคนิคการเตรียมแบบอิมัลชัน (emulsion polymerization technique) ใช้ระบบการเริ่มต้นปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ ชนิดไบโพลาร์ (bipolar redox initiation system) ซึ่งใช้สารเคมี 2

ชนิดทำปฏิกิริยากัน ตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาชนิดแรก คือ เตตราเอทิลีนเพนตามีน (tetraethylene pentamine , TEPA) ละลายในน้ำ และอีกชนิดคือ คิวมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (cumene hydroperoxide) ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ตัวเริ่มตัวปฏิกิริยาทั้งสองชนิดนี้ เกิดปฏิกิริยาแล้วแตกตัวได้อนุมูลเสรีที่อินเทอร์เฟสของน้ำกับตัวทำละลายอินทรีย์ ระบบการเริ่มต้นปฏิกิริยานี้เหมาะสมกับการทำปฏิกิริยาในสภาวะน้ำอย่างมาก เนื่องจากไม่่วงไวต่อออกซิเจนทำให้มีประสิทธิภาพการเกิดอนุมูลเสรี และประสิทธิภาพของปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ในสภาวะที่มีแอมโมเนียสูง

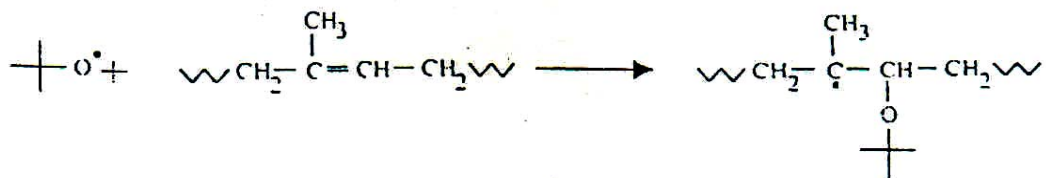
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างยางกับเมทิลเมทาคริเลท

ซึ่งใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาในระบบรี-คอกซ์ มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังนี้

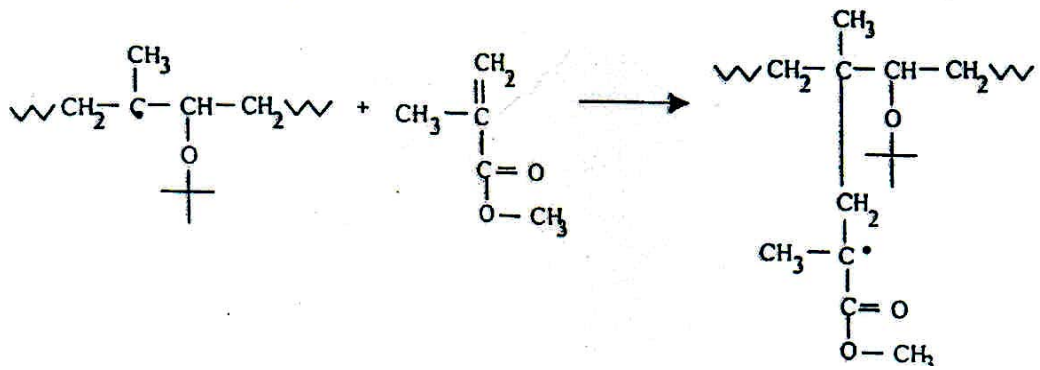
1. สารประกอบระหว่างคิวมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์และเตตระเอทิลีนเพนตามีนทำปฏิกิริยากัน



2. สารประกอบร่วมที่แตกตัวเข้าทำปฏิกิริยากับยาง

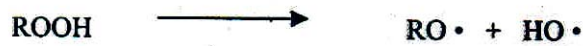


3. ยางที่มีอนุมูลเสรีเข้าทำปฏิกิริยากับเมทิลเมทาคริเลท

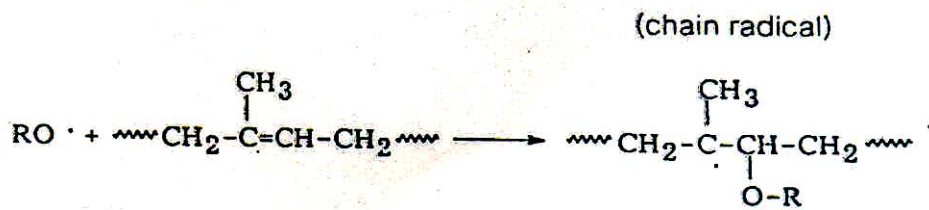


หรือปฏิกิริยาการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ ระหว่างยางธรรมชาติ กับเมทิลเมทาคริเลท โดยมีไฮโดรเปอร์ออกไซด์ เป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา ซึ่งคาดว่าเป็นดังนี้

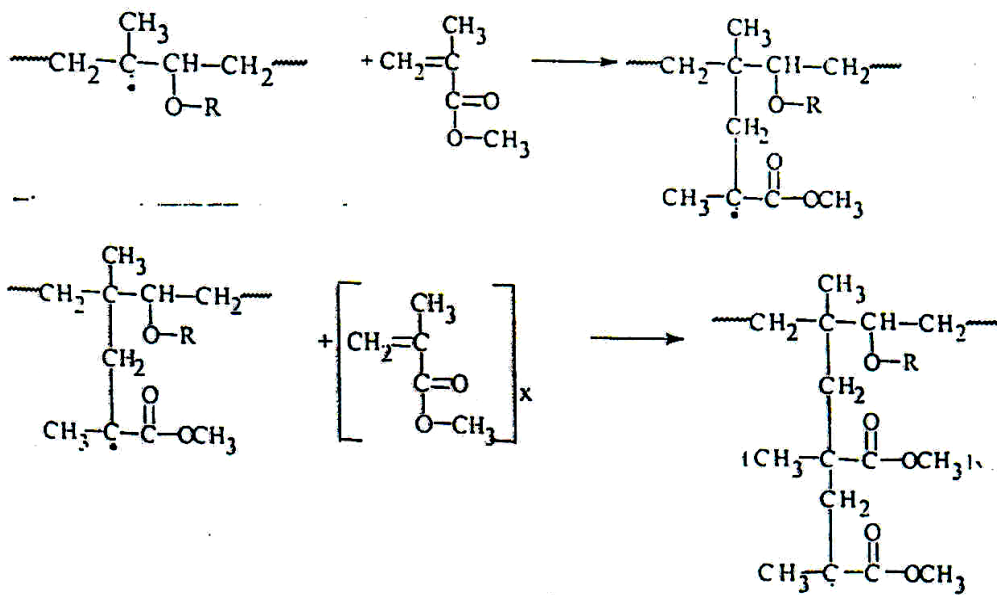
1. Hydroperoxide แตกตัว



2. Peroxide ทำปฏิกิริยากับยาง



3. เมทิลเมทาคริเลทมอนอเมอร์เข้าทำปฏิกิริยาต่อไป



2.2.6.3 สมบัติและการใช้งานของยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยเมทิลเมทาคริเลต

ยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยเมทิลเมทาคริเลตมีสมบัติที่สำคัญคือ

1. ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีส่วนของเทอร์โมพลาสติกที่แข็งต่ออยู่ในโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ
2. พอลิเมอร์เมทิลเมทาคริเลตมีความเป็นขั้วส่วนยางธรรมชาติไม่มีขั้ว ทำให้สามารถนำยางชนิดนี้มาใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

การใช้งาน

มีการใช้งานในรูปแบบของแข็งและกาว เช่น

1. ใช้ในอุตสาหกรรมรองเท้า อุตสาหกรรมรถยนต์ ทำยางพื้นรถ
2. ใช้ผสมกับยางธรรมชาติทำให้ยางแข็งขึ้น
3. ใช้ทำยางพองน้ำชนิดแข็ง แต่ความหนาแน่นต่ำ
4. ใช้เป็นกาวติดประสาน ระหว่างสารที่มีขั้วและไม่มีขั้ว
5. ใช้เป็นกาวติดยางและพลาสติก (เสาวนีย์, 2540)

2.2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกราฟต์ยางธรรมชาติ

จรัญ (2547) ปรับปรุงสมบัติการทนต่อน้ำมันของยางธรรมชาติ โดยการกราฟต์โคพอลิเมอร์เซชันของอะครีโลไนไตรล์บนยางธรรมชาติ โดยกระบวนการอิมัลชัน โดยใช้ควมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ และเตตระเอธิลีนเพนตะมีนเป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา สำหรับการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน โดยใช้ HPLC นั้นสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนได้จากการศึกษาผลกระทบของเวลาของปฏิกิริยา ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ อุณหภูมิของปฏิกิริยา และความเข้มข้นของตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน เปอร์เซ็นต์การกราฟต์ และประสิทธิภาพในการกราฟต์ พื้นที่ได้กราฟของหมู่ไนไตรล์ อัตราการพอลิเมอร์เซชัน และสมบัติของกราฟต์โคพอลิเมอร์ พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน เปอร์เซ็นต์การกราฟต์ พื้นที่ได้กราฟของหมู่ไนไตรล์ อัตราเร็วของการพอลิเมอร์เซชัน ขนาดของอนุภาคน้ำยาง และการทนต่อน้ำมันเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของความเข้มข้นของมอนอเมอร์ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา อย่างไรก็ตาม พบว่าค่าเหล่านี้จะมีจุดสูงสุดที่ค่าหนึ่งของอุณหภูมิและความเข้มข้นของตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา สำหรับประสิทธิภาพในการกราฟต์นั้นจะเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ค่าหนึ่งของอุณหภูมิและความเข้มข้นของตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา แต่ลดลงกับความเข้มข้นของมอนอเมอร์ที่เพิ่มขึ้นการกระจายตัวของขนาดอนุภาคจะกว้างขึ้น เมื่อความเข้มข้นของมอนอเมอร์เพิ่มขึ้นอุณหภูมิและความเข้มข้นของตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา แต่จะแคบลงเมื่อความเข้มข้นของตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาเกิน 0.016 โมล/ลิตร ค่าของ 300 %โมดูลัส ของกราฟต์โคพอลิเมอร์มากกว่ายางธรรมชาติและลดลงตามความเข้มข้นของมอนอเมอร์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความเข้มข้นของตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาไม่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการกราฟต์ อัตราเร็วในการพอลิเมอร์เซชันแสดงให้เห็นว่ากลไกปฏิกิริยาที่เสนอขึ้นสามารถนำไปใช้อธิบายปฏิกิริยาการกราฟต์ได้ ดังนั้นการทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายไม่มีขี้้ว สามารถปรับปรุงได้โดยการกราฟต์ของอะครีโลไนไตรล์บนยางธรรมชาติ

เสาวนีย์ และคณะ (2543) นำน้ำยางชนิดแอมโมเนียต่ำ (NR – LA) ที่ถูกปรับสมบัติให้เป็นน้ำยางชั้นโปรตีนต่ำ (DPNR) โดยการย่อยสลายโปรตีนด้วยเอนไซม์อัลคาเลส ที่ 40 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที จำนวน 2 ครั้ง ทำให้ปริมาณไนโตรเจนถูกลดจาก 0.408 % เป็น 0.039 % (ลดลง 90 %) สังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลท PMMA ลาเท็กซ์ และกราฟต์โคพอลิเมอร์ (DPNR-g-PMMA) ด้วยวิธีการแบบอิมัลชัน เพื่อใช้ผสมหรือเคลือบบนผิวของยาง DPNR และ NR-LA สักส่วนของ DPNR หรือ

NR-LA ผสมกับ PMMA ที่เหมาะสมในการเกิดเป็นแผ่นฟิล์มเนื้อเดียวกันเท่ากับ 85:15 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) และสัดส่วนสูงสุดของ DPNR-g-PMMA ในการสังเคราะห์ ซึ่งเหมาะสมในการเกิดเป็นแผ่นฟิล์มเนื้อเดียวกัน เพื่อใช้เคลือบบนผิวของยาง DPNR หรือ NR-LA เท่ากับ 85:15 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) สำหรับแผ่นฟิล์มยาง DPNR มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยางต่ำลง แต่การเคลือบ DPNR - g - PMMA บนยาง DPNR และ NR-LA จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยางต่ำกว่า และยางมีสมบัติโมดูลัส ความทนต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ผ่านมาตรฐาน ASTM 3577 - 78a และ ASTM 3378 - 99

Arayaprance และคณะ (2002) ได้ศึกษาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไซแนซของ สไตรีนและเมทิลเมทาคริเลตสัดส่วน 50/50 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) ลงบนยางธรรมชาติ ที่เตรียมจากกระบวนการพอลิเมอร์ไซแนซแบบอิมัลชัน โดยใช้ควิมีนไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (CHPO)/sodium formaldehyde sulfoxylate dehydrate/EDTA-chelated Fe^{2+} เป็นตัวเริ่มต้น วิเคราะห์การกราฟต์ด้วย 1H NMR พบว่าประสิทธิภาพการกราฟต์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวเริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นมากกว่า 2 phr ประสิทธิภาพการกราฟต์กลับมีค่าลดลงและประสิทธิภาพการกราฟต์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิของปฏิกิริยาที่สูงขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงเกินกว่า 70 °C จะทำให้ประสิทธิภาพการกราฟต์ลดลงและประสิทธิภาพการกราฟต์มีค่าลดลงตามปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ที่เพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพการกราฟต์มีค่าลดลง เมื่อสัดส่วนของมอนอเมอร์/ยาง และปริมาณสารย้ายสายโซ่มีค่ามากขึ้น

Arayaprance และคณะ (2003) ได้รายงานถึงการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไซแนซของ สไตรีนและเมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติ ที่เตรียมจากกระบวนการพอลิเมอร์ไซแนซแบบอิมัลชัน โดยในหม้อปฏิกรณ์ใส่น้ำอย่างชัน 60 %DRC, เตตระเอทิลีนเพนทาเมทีน (TEPA) กวนด้วยความเร็ว 200 รอบ/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนการเติมมอนอเมอร์ โดยใช้ควิมีนไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (CHPO) เป็นตัวเริ่มต้น วิเคราะห์การกราฟต์ด้วย 1H NMR ซึ่งพบว่าที่สัญญาณ 6.5-7.5 ppm แสดงถึงหมู่ฟีนิล (phenyl group) ของพอลิสไตรีน และสัญญาณ 3.7 ppm แสดงถึงหมู่เมทอกซี (methoxy group) ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งยืนยันให้เห็นว่ามีกราฟต์ของสไตรีนและเมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติ โดยศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของตัวเริ่มต้น อุณหภูมิของปฏิกิริยา ปริมาณสารย้ายสายโซ่ อัตราส่วนโมล ST/MMA และอัตราส่วนมอนอเมอร์/ยาง ซึ่งหากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง %conversion และเวลาในการทำปฏิกิริยา พบว่า %conversion เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกราฟต์ กับ %conversion พบว่าประสิทธิภาพการกราฟต์เริ่มมีค่าเพิ่มสูงขึ้นที่ %conversion >80%

ในขณะที่ช่วง 10-80 ของ %conversion ประสิทธิภาพการกราฟต์เกิดขึ้นน้อยมากและนอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงปริมาณสไตรีนและเมทิลเมทาคริเลทกับ %conversion พบว่าปริมาณสไตรีนและเมทิลเมทาคริเลทใน free copolymer มีค่าเพิ่มขึ้นตาม %conversion แต่เมื่อมี %conversion เท่ากับ 80 % ปริมาณสไตรีน และเมทิลเมทาคริเลท ใน free copolymer ลดลงอย่างชัดเจน ในขณะที่ในกราฟต์โคพอลิเมอร์ มีปริมาณสไตรีนและเมทิลเมทาคริเลทเพิ่มมากขึ้นตาม %conversion ที่เพิ่มขึ้น

Chuayjuljit และคณะ (2004) ศึกษาการนำน้ำยางธรรมชาติมาผสมกับ UPE resin ในสถานะน้ำยาง ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงข้อด้อยของ UPE resin ที่มีความเปราะสูง (UPE resin (unsaturated polyester resin) เป็นวัสดุที่ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ภาชนะ และรถยนต์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่ใส มีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนของสารเคมีที่ดี) แต่เพื่อความเข้ากันได้ดีขึ้นระหว่างน้ำยางธรรมชาติและ UPE resin งานวิจัยนี้จึงได้ดัดแปรยางธรรมชาติโดยการกราฟต์กับโพลีสไตรีน เพื่อให้โพลีสไตรีนในโคพอลิเมอร์ทำปฏิกิริยากับสไตรีนมอนอเมอร์ใน UPE resin โดยเตรียมน้ำยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยโพลีสไตรีน ด้วยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน โดยในหม้อปฏิกรณ์ใส่น้ำยางชั้น 60 %DRC, เตตระเอทิลลิทเพนเทน และโพแตสเซียมลอเรต เพื่อรักษาสภาพน้ำยางและน้ำเพื่อเจือจางน้ำยางชั้นให้มีเนื้อยางแห้งลดต่ำลงกวนด้วยความเร็ว 100 รอบ/นาที และควบคุมอุณหภูมิ 50 °C ส่วนในส่วนแท่งเคมีใช้มอนอเมอร์สไตรีน, เทอร์บิวทิลเปอร์ออกไซด์ (*t*-BHPO) เป็นตัวเริ่มต้น และโพแตสเซียมลอเรต เพื่อรักษาสภาพน้ำยางและน้ำ โดยกวนสารเคมีในส่วนมอนอเมอร์เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นค่อยๆ เติมลงในหม้อปฏิกรณ์ใช้เวลา 1 ชั่วโมง และทำปฏิกิริยาจนครบ 2 ชั่วโมง พบว่าน้ำยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยโพลีสไตรีนมีความสามารถเข้ากันได้กับ UPE resin ได้ดีกว่าน้ำยางธรรมชาติที่ไม่ได้กราฟต์ด้วยโพลีสไตรีน และความเข้ากันได้ดีมากขึ้นเมื่อสัดส่วนโพลีสไตรีนในน้ำยางธรรมชาติกราฟต์โพลีสไตรีนมีค่ามากขึ้น

Deng และคณะ (2002) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการกราฟต์พอลิเมอไรเซชันแบบหลอมเหลว และใช้แสงของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) บนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ นั่นคืออุณหภูมิของการฉายแสงตัวเริ่มต้นที่แตกตัวด้วยแสง (photo initiators) ความเข้มแสงอุลตราไวโอเลต (intensity of UV radiation) และระยะห่างของรังสีอุลตราไวโอเลต ที่มีต่อการกราฟต์พอลิเมอไรเซชัน %conversion และประสิทธิภาพการกราฟต์ของการพอลิเมอไรเซชันถูกวิเคราะห์ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก (gravimetric method) รวมทั้งมุมสัมผัส (contact angle) ของน้ำมันบนแผ่นฟิล์มกราฟต์พอลิเมอร์ PE-g-PMMAH และสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มกราฟต์พอลิเมอร์ได้ถูกวิเคราะห์ ซึ่งพบว่า %conversion เพิ่มขึ้นตาม

อุณหภูมิของการฉายแสงที่เพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วรอบๆ จุดหลอมเหลวของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ (maleic anhydride)

George และคณะ (2003) ได้ทำการทดลอง graft methyl methacrylate ลงบนยางธรรมชาติซึ่งอยู่ในรูปของน้ำยาง โดยใช้รังสีแกมมา เพื่อปรับปรุงสมบัติของ dry film การผสมทางกายภาพของน้ำยางธรรมชาติที่กราฟต์ โดย MMA โดยใช้รังสีในการวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติ (radiation vulcanize natural rubber latex (RVNRL)) หรือการฉายรังสีไปพร้อมกับการกราฟต์ และการเกิดพันธะเชื่อมโยง ซึ่งพบว่าเป็นเทคนิคที่มีประโยชน์สำหรับการปรับปรุงสมบัติของ latex film การปรับปรุงค่ามอดูลัส ของฟิล์มสามารถทำได้ โดยเพิ่มปริมาณของ MMA แต่ค่าความทนต่อแรงดึงจะลดลง การมีค่ามอดูลัสสูงแต่ไม่ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงลดลง ได้มาจากปริมาณ MMA 50 – 60 ส่วนในน้ำยางธรรมชาติ 100 ส่วน (50 – 60 phr)

Hoang และคณะ (2001) ได้รายงานถึงการปรับปรุงความเข้ากัน ใน พอลิเมอร์ผสมสองชนิด คือ พอลิสไตรีน-โค-อะครีโลไนไตรล์ (poly(styrene-co-acrylonitrile) (SAN)) และยางอีพีดีเอ็ม (ethylene-propylene-diene terpolymer(EPDM)) โดยใช้การกราฟต์เมทิลเมทาคริเลต (methyl methacrylate (MMA)) บนยางอีพีดีเอ็ม (EPDM-g-methylmethacrylate (EPMMA) ซึ่งพบว่ายางอีพีดีเอ็มที่ได้ทำการกราฟต์เมทิลเมทาคริเลตแล้วนั้น สามารถช่วยในการเข้ากันของ SAN และยาง EPDM ได้ดี สำหรับ EPMMA สมบัติด้านการมีความเป็นขั้ว การติด ความต้านทานต่อน้ำมัน และความทนต่อการดึง เมื่อเปรียบเทียบกับ EPDM โดยความเข้ากันของ SAN/EPDM สามารถวิเคราะห์ได้จาก light scattering และ FT-IR spectra.

Hourston และคณะ (1990) กล่าวถึงอนุภาคของส่วนประกอบที่อยู่ ในรูปน้ำยาง เกี่ยวกับการสังเคราะห์น้ำยางธรรมชาติ เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ซึ่งอาจจะพิจารณาการกระจายของการเชื่อมโยงพอลิเมอร์ methyl methacrylate เป็นตัวเติมเพื่อให้ น้ำยางธรรมชาติมีความเสถียร และการสังเคราะห์จะใช้ amine เป็นตัวกระตุ้น และใช้ tert - butyl hydroperoxide เป็นตัวริเริ่มผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหล่อจะ ได้เป็นแผ่นแข็ง รูปร่างของวัสดุถูกค้นหาโดย transmission electron microscopy และ dynamic mechanical analysis และทำการศึกษาพฤติกรรมของ stress – strain

Izumi และคณะ (2001) ปรับปรุงความเสถียรต่อรังสีของพอลิเมอร์สายโซ่ตรง โดยศึกษาการฉายรังสี เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์พอลิเมโรเลฟินของสไตรีนบนพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) งานวิจัยครั้งนี้ศึกษาการฉายรังสีอย่างต่อเนื่อง และการฉายรังสีในตอนต้น %การกราฟต์แปรผันตามความเข้มข้นของมอนอเมอร์และความเข้มของรังสี โดยที่ประสิทธิภาพ

การกราฟต์จะลดลงจากการเพิ่มของการพอลิเมอไรซ์ สไตรีนอย่างเดียวนในช่วงความเข้มข้นของมอนอเมอร์ (<3 %โดยน้ำหนัก) %การกราฟต์ค่อนข้างเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสไตรีน อย่างไรก็ตามเปอร์เซ็นต์กราฟต์จะเพิ่มขึ้นและคงที่ที่ความเข้มข้นของสไตรีนสูง ในทางตรงกันข้ามพอลิเมอร์ที่มีการกราฟต์สูงมากสามารถเตรียมได้ จากการฉายรังสีในคอนตัน กราฟต์โคพอลิเมอร์สามารถวิเคราะห์ปริมาณของวงแหวนฟีนิล (phenyl ring) ของสไตรีนมอนอเมอร์ทำได้โดยใช้ FT-IR spectroscopy.

Kim และคณะ (2002) รายงานถึงการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมันชัน (seeded emulsion polymerization) ของเมทิลเมทาคริเลท (methyl methacrylate (MMA)) โดยใช้พอลิยูรีเทนชนิดที่กระจายในน้ำ โดยศึกษาผลของส่วนของแข็งที่ต่อประสิทธิภาพการกราฟต์ ซึ่งส่วนของแข็งนี้ประกอบด้วย ไอโซฟอโรนไดไอโซไซยานาต (isophorone diisocyanate (IPDI)) และไดเมทิลโพรไพออนิก (dimethylol propionic acid (DMPA)) และแปรปริมาณจาก 19.6 ถึง 35.4 % ผลของส่วนของแข็ง (IPDI และ DMPA) ที่มีต่อประสิทธิภาพการกราฟต์ ยืนยันด้วยสเปกตรัมการกราฟต์จาก FTIR และโครมาโตกราฟฟีแบบแผ่นบาง พร้อมทั้งเครื่องวัดแบบเฟรมไอออนไนซ์ (thin layer chromatograph equipped with flame ionization detector (TLC/FID)) ประสิทธิภาพการกราฟต์เพิ่มขึ้นกับปริมาณของส่วนแข็งที่เพิ่มขึ้น นั่นคือ IPDI และ DMPA จากการวิเคราะห์เชิงปริมาณของสเปกตรัม FT-IR และการวิเคราะห์ TLC-FID พบว่าพื้นที่สัมพัทธ์ของยอดแหลมของหมู่ N-H (1550 cm^{-1}) เปลี่ยนแปลงกับปริมาณของ IPDI อย่างเป็นนัยสำคัญ ซึ่งจากผลการทดลองพันธะ N-H ในส่วนแข็งนั้นเป็นตัวสำคัญในปฏิกิริยาการกราฟต์ของ MMA

Kumar และคณะ (2002) ได้ทดลองเตรียมโคพอลิเมอร์ตัวใหม่ของไวนิลออกซีอะมิโนไซเลน กราฟต์บนเอทิลีน-โพรพิลีน-ไดอีนเทอร์พอลิเมอร์ (vinyl oxyaminosilane grafted ethylene propylene diene terpolymer (EPDM-g-VOS)) ในโทลูอีนโดยใช้ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide) เป็นตัวเริ่มต้น ประสิทธิภาพการกราฟต์ของไวนิลออกซีอะมิโนไซเลนบนเอทิลีน-โพรพิลีน-ไดอีน เทอร์พอลิเมอร์ (ethylene-propylene-diene terpolymer (EPDM)) ได้ถูกศึกษาโดยเป็นฟังก์ชันของปริมาณ EPDM ระยะเวลาของปฏิกิริยา อุณหภูมิของปฏิกิริยา และความเข้มข้นของตัวเริ่มต้น และใช้สภาวะที่ให้ประสิทธิภาพที่สูงที่สุด การกราฟต์จะกระทำใน Haake Rheocord-90 torque rheometer การกราฟต์ของ EPDM-g-VOS จะถูกยืนยันโดยใช้เทคนิค FTIR (fourier transform infrared spectroscopy) สมบัติทางเชิงกล ความร้อน และไฟฟ้าของ EPDM-g-VOS ที่วัลคาไนซ์ด้วยน้ำร้อน และ EPDM ที่วัลคาไนซ์เปอร์ออกไซด์ถูกนำมาเปรียบเทียบ ซึ่งสมบัติทางเชิงกลของ EPDM-g-VOS ลดลงกับความสามารถในการหักงอในส่วนของ VOS บน EPDM

อย่างไรก็ตามสมบัติทางอุณหภูมิและไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นกับการกราฟต์ของ VOS บน EPDM เช่นเดียวกับรูปแบบของความเสถียรทางอุณหภูมิในโครงสร้างทางสามมิติผ่านจุดเชื่อมโยง Si-O-Si Lehrle และคณะ (1997) ได้ศึกษาการใช้ vinyl acetate (VAc) radical เพื่อช่วยการกราฟต์ของมอนอเมอร์อื่นๆ ลงบนยางธรรมชาติ โดยแปรปริมาณ เมทิลเมทาคริเลทมอนอเมอร์ VAc radical และปริมาณน้ำ โดยสกัด PMMA ที่ไม่ได้กราฟต์บนยางธรรมชาติออกโดยใช้อะซิโตน และสกัดโมเลกุลยางธรรมชาติที่ไม่ได้กราฟต์ออกโดยใช้ปิโตรเลียมอีเทอร์ จากการศึกษาพบว่า ปริมาณ VAc radical ที่มากขึ้นไม่ได้ช่วยให้ประสิทธิภาพการกราฟต์เมทิลเมทาคริเลทลงบนยางธรรมชาติมากขึ้นตามที่คาดหวังไว้ อันเนื่องมาจาก VAc radical ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ เพราะ VAc radical ละลายน้ำได้ดี แต่ไม่ละลายในน้ำมัน จึงอาจส่งผลให้มีความสามารถเข้าถึงได้กับตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา ซึ่งเป็นน้ำมันได้ไม่ดีเท่าที่ควร

Liu และคณะ (2002) ศึกษาเกี่ยวกับระบบรีดอกซ์แบบใหม่ ซึ่งประกอบด้วย โปแตสเซียม ไดเพอริโอดาต-คาซิอิน (potassium diperiodato nickelate(Ni(IV))casein) ซึ่งใช้ในการเริ่มต้นปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์เซชันของบิวทิลอะคริเลต (butyl acrylate) บนหางนม (casein) ภายใต้สภาวะของผสม (heterogeneous condition) ในสารละลายโพแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 5% ซึ่งพบว่าให้ประสิทธิภาพการกราฟต์และเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ที่สูงการวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติการกราฟต์โคพอลิเมอร์ ใช้วิธีทางสเปกโตรสโคปี โดยใช้เครื่อง FTIR (FTIR spectroscopy) การวิเคราะห์ทางความร้อน (thermal analysis) และภาพถ่ายทางกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy) อิทธิพลของตัวแปรในการสังเคราะห์ในการกราฟต์โคพอลิเมอร์เซชัน ได้แก่ ผลของแสงที่มีต่อประสิทธิภาพการกราฟต์ %การกราฟต์ และอัตราเร็วในการพอลิเมอร์เซชัน (R_p) ผลของความเข้มข้น ซึ่งเป็นตัวเริ่มต้น (initiator) ในการกราฟต์โคพอลิเมอร์เซชัน พบว่าเมื่อความเข้มข้น Ni(IV) เพิ่มขึ้น R_p จะเพิ่มขึ้นด้วย จนกระทั่งสูงสุดของความเข้มข้นของ Ni(IV) เท่ากับ 5.3×10^{-4} โมล/ลิตร R_p จะลดลง และสำหรับผลของอุณหภูมิของปฏิกิริยานั้น R_p เพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิของปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 40°C ค่าของ R_p จะลดลง

Nakason และคณะ (2003) ทำการสกัดโปรตีนที่มีอยู่ในน้ำยาง ธรรมชาติออกโดยการใช้น้ำ opticlean ในระบบที่มีอัลซัลไฟเออร์ พบว่าสามารถลดปริมาณไนโตรเจนจากเดิม 0.9 % เหลือ 0.07 % หลังจากนั้นนำน้ำยางธรรมชาติโปรตีนต่ำ (DPNR) ที่เตรียมได้ใช้ในการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์กับเมทิลเมทาคริเลท (MMA) แล้วศึกษาลักษณะการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ และสมบัติของกราฟต์โคพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับกราฟต์น้ำยางธรรมชาติที่ไม่ได้

สกัดโปรตีนออก (ใช้น้ำยั้งขันแอมโมเนียสูง) ผลการศึกษาพบว่าเปอร์เซ็นต์การ เปลี่ยนของมอนอเมอร์ (MMA) เป็นพอลิเมอร์ (PMMA) ของปฏิกิริยาที่ใช้น้ำยั้งขันธรรมชาติโปรตีนต่ำมีค่าสูงกว่าการใช้น้ำยั้งขันแอมโมเนียสูงทุกปริมาณของเมทิลเมทาคริเลทที่ใช้ในปฏิกิริยา (ทดลองโดยใช้ค่าอัตราส่วนโดยโมลของยาง/MMA คือ 95/5, 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 ตามลำดับ) ประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงเปอร์เซ็นต์โมเลกุลยางธรรมชาติและโมเลกุล MMA ที่เกิดการกราฟต์ มีค่าลดต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณ MMA ทั้งนี้เนื่องจากเกิด PMMA ที่ไม่กราฟต์บนโมเลกุลยางธรรมชาติในปริมาณที่มากขึ้น ค่าประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยากราฟต์พอลิเมอร์ไรซ์ของการใช้น้ำยั้งขันธรรมชาติโปรตีนต่ำ จะสูงกว่าระบบปฏิกิริยาที่ใช้น้ำยั้งขันแอมโมเนียสูงที่ทุกปริมาณของ MMA แม้ว่าประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาตกลง แต่ปริมาณ PMMA ที่เกาะบนโมเลกุลยางธรรมชาติจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ MMA (ปริมาณ PMMA วิเคราะห์โดยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย และการใช้อัตราส่วนการดูดกลืนของแสงอินฟราเรด ที่ค่าเลขคลื่น 1730 cm^{-1} ต่อ 835 cm^{-1}) นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางธรรมชาติโปรตีนต่ำ มีขนาดใหญ่มากกว่าขนาดอนุภาคของน้ำยั้งขันแอมโมเนียสูง หลังจากปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรซ์ พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของทั้งสองระบบเพิ่มขึ้นตามปริมาณ MMA และพบว่าระบบที่ใช้น้ำยั้งขันธรรมชาติโปรตีนต่ำมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าระบบที่ใช้น้ำยั้งขันแอมโมเนียสูง เหตุผลที่ปฏิกิริยากราฟต์พอลิเมอร์ไรซ์ของน้ำยั้งขันธรรมชาติโปรตีนต่ำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณ PMMA ที่กราฟต์บนโมเลกุลยางธรรมชาติสูงกว่าระบบปฏิกิริยาที่ใช้น้ำยั้งขันแอมโมเนียสูง อาจเนื่องมาจากการดึงเอาโปรตีนออกจากอนุภาคของยางธรรมชาติ ทำให้อนุมูลเสรีที่เกิดขึ้น มีโอกาสในการเข้าทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ในโมเลกุลยางธรรมชาติมากขึ้น เนื่องจากโปรตีนมีผลในการหยุดปฏิกิริยาของอนุมูลเสรีในกระบวนการเริ่มต้นปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์

Oommen และคณะ (1996) ศึกษาลักษณะและสมบัติของการผสม ระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลทและยางธรรมชาติ โดยการเติมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลทและยางธรรมชาติ (NR-g-PMMA) รูปร่างลักษณะของพอลิเมอร์ผสมขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโคพอลิเมอร์ โดยขนาดของจุดที่กระจายพบว่าลดลงอย่างมาก เมื่อเติมโคพอลิเมอร์ลงไปปริมาณเล็กน้อย จากนั้นจึงเริ่มคงที่ที่ความเข้มข้นสูง สารช่วยในการเข้ากันเพื่อความสามารถในการเชื่อมต่อระหว่างกัน โดยเกิดเป็นลักษณะของสะพานขนาดเล็กมากกับเมตริกซ์อิทธิพลของน้ำหนักโมเลกุลของไฮโปพอลิเมอร์ นำผลการทดลองเปรียบเทียบกับการทำงานทางทฤษฎีของ Noolandi and Hong ทำให้สามารถอธิบายลักษณะการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์บริเวณรอยเชื่อมระหว่างพอลิเมอร์ การ

เปลี่ยนแปลงในสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมที่เติมตัวช่วยในการเข้ากัน (compatibilizer) จะสัมพันธ์กับรูปร่างลักษณะของพอลิเมอร์ผสม

Prasassarakich และคณะ (2001) ได้รายงานถึงการกราฟต์โคพอลิเมอร์เซชันของสไตรีนและอะคริโลไนไตรล์ บนยางธรรมชาติที่เตรียมจากกระบวนการพอลิเมอร์เซชันแบบอิมัลชัน ใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวเริ่มต้น โดยศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของตัวเริ่มต้น อุณหภูมิของปฏิกิริยา และความดันที่มีต่อการเปลี่ยนของมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ และสมบัติการกราฟต์ของยางธรรมชาติการเปลี่ยนของมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของตัวเริ่มต้น ปริมาณการกราฟต์จะสูงขึ้นเมื่อพอลิเมอร์ไรซ์ที่อุณหภูมิ 70 °C ความดัน 3.1 บาร์ ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง และความเข้มข้นของตัวเริ่มต้น 1.5 ส่วนโดยน้ำหนัก สเปกตรัม FTIR ของยางกราฟต์ได้ถูกศึกษา และแสดงให้เห็นว่ามีกลุ่มไนไตรล์ (C≡N stretching) เกิดขึ้นที่ 2238 cm⁻¹ และพันธะคู่คาร์บอน (C=C stretching) ของวงแหวนเบนซีนในสไตรีนปรากฏที่ 1510 cm⁻¹ ซึ่งยืนยันให้เห็นว่ามีกราฟต์ของอะคริโลไนไตรล์และสไตรีนบนยางธรรมชาติองค์ประกอบของโคพอลิเมอร์ สามารถวิเคราะห์จากผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบเมื่อผสมยางธรรมชาติที่กราฟต์แล้วกับสไตรีนอะคริโลไนไตรล์โคพอลิเมอร์ (SAN) และนำยางผสมที่ได้มาศึกษาผลขององค์ประกอบการผสมที่มีต่อความทนต่อแรงดึงความทนต่อแรงกระแทกและความแข็งซึ่งพบว่ายางธรรมชาติที่กราฟต์แล้วนั้นสามารถปรับปรุงสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของโคพอลิเมอร์ SAN ได้

Thiraphattaraphun และคณะ (2001) การกราฟต์ของ เมทิลเมทาคริเลท (MMA) มอนอเมอร์ลงบนน้ำยางธรรมชาติ โดยใช้ potassium persulfate เป็นตัวริเริ่ม (initiation) ใช้เทคนิคการเตรียมแบบอิมัลชัน อนุพลของยางทำปฏิกิริยากับ MMA เพื่อเกิดการกราฟต์โคพอลิเมอร์ โครงสร้างของการกราฟต์ยางธรรมชาติตรวจหาโดย transmission electron microscopy และโครงสร้างยางธรรมชาติที่ถูกกราฟต์ยืนยันถึงปฏิกิริยาการ graft copolymerization เป็นกระบวนการควบคุมที่ผิวการทดลองจะทำการตรวจหาผลกระทบของความเข้มข้นตัวริเริ่ม อุณหภูมิ การเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ และเวลาการเกิดปฏิกิริยาโดยการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ และตรวจหาประสิทธิภาพการกราฟต์ประสิทธิภาพการกราฟต์ยางธรรมชาติถูกกำหนดโดยเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลาย ยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วย MMA ถูกเตรียมโดย a melt-mixing system สมบัติทางกายภาพและพฤติกรรมกรเลื่อม (การแตก) ของยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วย PMMA เป็นการประเมินฟังก์ชันที่ประกอบในกราฟต์โคพอลิเมอร์ และอัตราส่วนการผสมค่า tensile strength ค่า tear strength และค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ PMMA การ

ตรวจสอบการขาดโดยการดึงยึดโดยการ scanning electron microscopy การเกิดกราฟต์ โคพอลิเมอร์จะเกิดขึ้น โดย interfacial agent และให้สมบัติการติดที่ดีระหว่าง 2 เฟสของส่วนผสมที่ทำให้เข้ากันได้

Zhou และคณะ (2001) ศึกษาการกราฟต์โคพอลิเมอร์เซชันของกรดออลิกบนอะครีโลไนไตรล์-บิวตะไดอิน-สไตรีนเทอร์พอลิเมอร์ (acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) terpolymer) ซึ่งเริ่มต้นปฏิกิริยาโดยบิวทิลเปอร์ออกไซด์ (butyl peroxide (BPO)) ในสารละลาย 1,2 ไดคลอโรอีเทน (1,2 dichloroethane) โดยใช้การวิเคราะห์ทางสเปกตรัมอินฟราเรด IR เพื่อยืนยันการกราฟต์ของกรดออลิกบนสายโซ่ ABS และศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดออลิก บิวทิลเปอร์ออกไซด์ และ ABS ที่มีต่อการกราฟต์ โดยการกราฟต์ พบว่าเกิดบริเวณของบิวตะไดอินที่มีใน ABS กลไกปฏิกิริยาได้ถูกสร้างขึ้น โดยให้การกราฟต์ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นโดยการสิ้นสุดระหว่างอนุมูลเสรีกรดออลิกกับอนุมูลเสรีของ ABS อัตราเร็วของการกราฟต์เพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของกรดออลิกจนกระทั่งถึงจุดสูงสุดที่ 0.3 โมล/ลิตร จากนั้นจึงลดลง