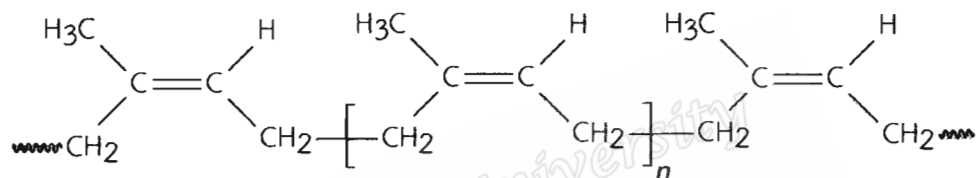


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้าง มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 g/cm^3 ที่ 20°C และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อยางถูกยืดหรือเย็นตัวลง มีดัชนีหักเหแสงเท่ากับ 1.5215 ถึง 1.5238 ที่ 20°C โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมี ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) กล่าวคือมีหน่วยย่อยไอโซพรีน (isoprene unit, C_5H_8) โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 5,000 ถึง 50,000 มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 50,000 ถึง 3,000,000 g/mol และประมาณร้อยละ 60 ของโมเลกุลเหล่านี้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 1,300,000 (ชัยวัฒน์, 2527) ส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนไม่มีขั้ว ดังนั้นยางธรรมชาติจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดี นั่นคือยางจะมีความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อแรงฉีกขาด (Tear strength) และความทนต่อการขัดสี (Abrasion resistance) สูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างเดิมหรือใกล้เคียงอย่างรวดเร็ว

สมบัติของยางธรรมชาติอันเนื่องมาจากโครงสร้างทางเคมี

1. ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน ไม่มีหมู่หรืออะตอมที่มีสภาพขั้วในโครงสร้าง ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนน้ำมันปิโตรเลียม

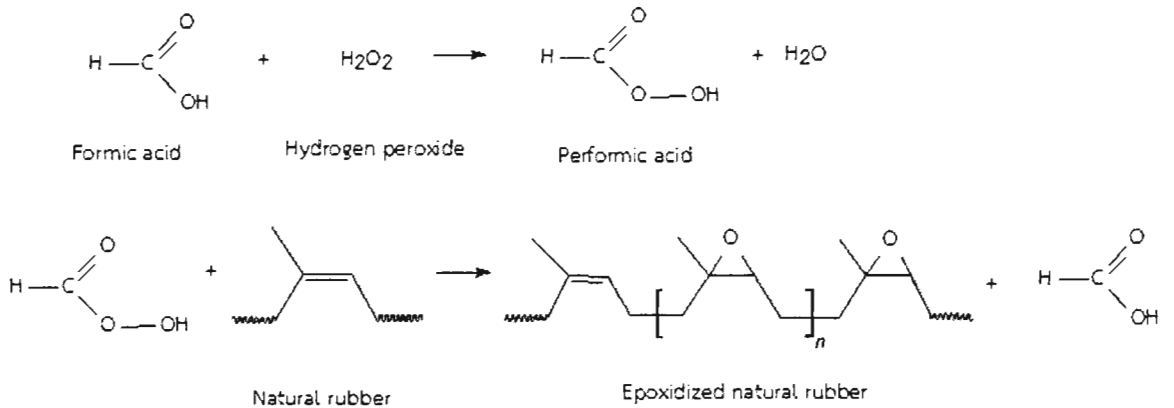
2. มีพันธะที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ทำให้วัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน และทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกับออกซิเจน และโอโซน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมของยาง

3. การมีพันธะคู่และพันธะเดี่ยวในโมเลกุล ทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติมีสภาพยืดหยุ่น และมีความกระด้างตัวสูง
4. ยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงสามารถตกผลึกได้เมื่อยืด โดยผลึกที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวเสริมแรงส่งผลให้ยางธรรมชาติ มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงมาก
5. ยางธรรมชาติมีความกระด้างตัวสูง มีความร้อนสะสม (Heat build up) ต่ำ ทำให้ยางธรรมชาตินิยมใช้ในการทำยางรถบรรทุก ซึ่งต้องรับน้ำหนักมาก
6. มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้ยางมีความหนืดสูง และแปรรูปได้ยาก ดังนั้นจึงต้องมีการบดเพื่อตัดสายโซ่โมเลกุล ให้ยางธรรมชาติมีความหนืด และน้ำหนักโมเลกุลลดลงก่อนทำการบดผสม สารเคมีและแปรรูป

2.2 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์สามารถเตรียมได้จากการตัดแปรรูปโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยผ่านกระบวนการที่เรียกว่าปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxidation) ทำให้เกิดวงแหวนอีพอกไซด์หรือวงแหวนออกซิเรน (Oxirane ring) ตรงตำแหน่งพันธะคู่ของโมเลกุลยางธรรมชาติบางตำแหน่งกระจายอยู่ในสายโซ่โมเลกุลยางธรรมชาติ ซึ่งสามารถปรับปรุงหรือเพิ่มสมบัติความทนต่อตัวทำละลายที่มีขี้ผึ้งมากขึ้น มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg) เพิ่มขึ้น ทนทานต่อการเสื่อมสลายจากความร้อนมากขึ้น และความต้านทานต่อการซึมผ่านของอากาศเพิ่มขึ้นทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานยางธรรมชาติในอุตสาหกรรมต่างๆได้กว้างขึ้น (Baker and Gelling, 1987) พบว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีหมู่ปริมาณอีพอกไซด์ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ (ENR-50) สามารถทนทานต่อน้ำมัน และต้านทานต่อการซึมผ่านของอากาศได้เทียบเท่ากับยางสังเคราะห์บางชนิด เช่น ยางไนไตรล์ ยางบิวทิล และยางคลอโรพรีน นอกจากนี้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ยังสามารถเกิดการจัดเรียงตัวขณะดึงยืดได้เป็นผลให้เกิดผลึกได้เช่นเดียวกับยางธรรมชาติที่ไม่ตัดแปรรูปโมเลกุล ทำให้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีความต้านทานต่อแรงดึง และทนทานต่อการฉีกขาดได้ดีด้วย

การเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์จากปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันโดยการทำให้เกิดเปอร์เอซิด ในขณะที่ทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (*In-situ* peracid) ดังปฏิกิริยาแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งอัตราส่วนโดยโมลของกรดฟอร์มิคกับไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้อยู่ในช่วง 0.2 - 0.5 (Baker and Gelling, 1987) ปฏิกิริยาเริ่มจากกรดฟอร์มิคจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เกิดกรดเปอร์ฟอร์มิค จากนั้นกรดเปอร์ฟอร์มิคจะเข้าทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติตรงตำแหน่งพันธะคู่เกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาอีพอกซิเดชันแบบ *In-situ* (ดัดแปลงจาก Baker and Gelling, 1987)

2.2.1 สมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

สมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์โดยรวมจะขึ้นอยู่กับปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ โดยเมื่อปริมาณหมู่อีพอกไซด์เพิ่มขึ้นความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง เนื่องจากปริมาณหมู่อีพอกไซด์สูงจะทำให้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีโอกาสเกิดผลึกได้น้อยลง ทั้งนี้การเพิ่มปริมาณหมู่อีพอกไซด์เป็นการเพิ่มสภาพขั้วในโมเลกุลของยางส่งผลให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น ขณะที่ความสามารถในการละลายของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ขึ้นอยู่กับระดับของการเกิดอีพอกซิเดชัน และชนิดของตัวทำละลาย โดยยางธรรมชาติอีพอกไซด์สามารถละลายได้ง่ายขึ้นหากมีการบดขยี้ก่อน ตัวทำละลายที่เหมาะสมได้แก่ โทลูอีน คลอโรฟอร์ม และเตตระไฮโดรฟิวแรน เป็นต้น สำหรับค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ พบว่าการเกิดหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมลในโมเลกุลยางธรรมชาติทำให้ค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วเพิ่มขึ้น 1°C ซึ่งพบว่า ENR-25 มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ -47°C และ ENR-50 มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ -22°C (Baker and Gelling, 1987) นอกจากนี้ Chuayjuljit *et al.*, (2006) ได้พบว่า ยาง ENR-20 มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ -38.2°C ยาง ENR-45 มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ -27.8°C และยาง ENR-65 มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ -19.7°C

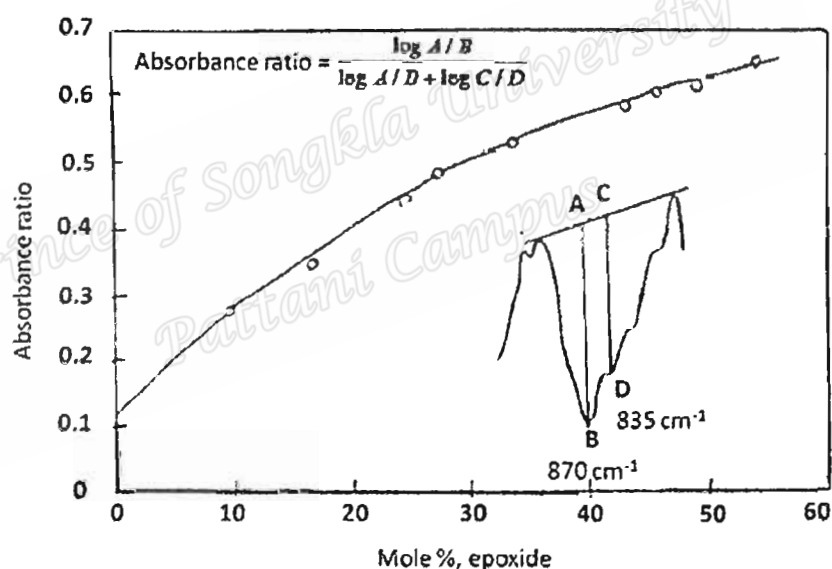
2.2.2 การวิเคราะห์ยางธรรมชาติอีพอกไซด์

การวิเคราะห์โครงสร้างของโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ด้วยเทคนิค FTIR จะได้สเปกตรัมของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่แตกต่างจากสเปกตรัมของยางธรรมชาติ สามารถคำนวณหา (Absorbance ratio, Ar) ของพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm⁻¹ ซึ่งเกิดจากการดูดกลืนแสง

อินฟราเรดของหมู่เอพอกไซด์หรือวงแหวนออกซิเรน เปรียบเทียบกับตำแหน่งเลขคลื่นที่ 835 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบอนอกระนาบของพันธะ C-H ที่ต่อกับ C=C ของพอลิไอโซพรีน ดังสมการที่ 2.1 แล้วเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.3

$$\text{Absorbance ratio, Ar} = \frac{\log A/B}{\log A/B + \log C/D} \quad (2.1)$$

โดยที่ A/B และ C/D เป็นความสูงของพีคการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm^{-1} และ 835 cm^{-1} ตามลำดับ

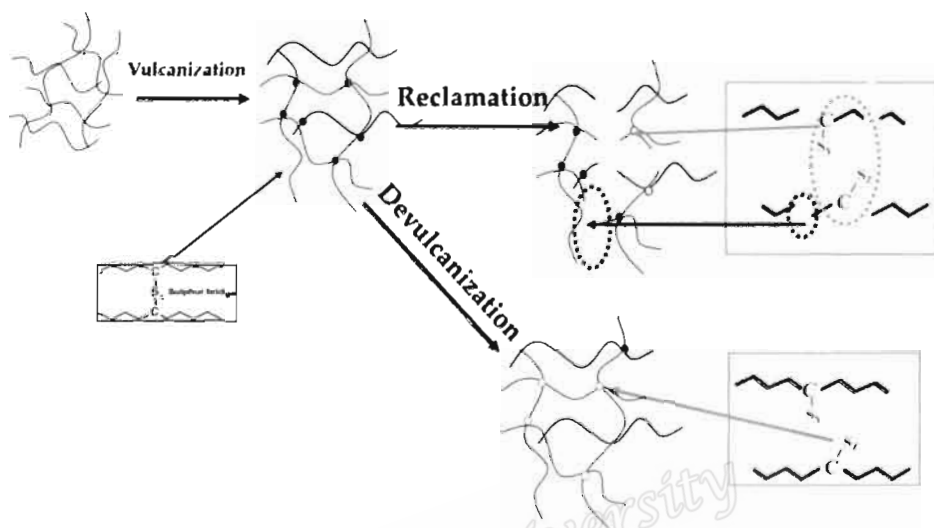


รูปที่ 2.3 กราฟมาตรฐานเปอร์เซ็นต์โมลอีพอกไซด์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR (Davey and Loadman, 1984)

2.3 ยางรีเคลม (Reclaimed Rubber)

ยางรีเคลม คือ ยางที่ได้จากการนำยางวัลคาไนซ์มาผ่านกระบวนการรีเคลม (Reclamation) เพื่อให้สามารถนำยางวัลคาไนซ์ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการตัดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางโดยอาศัยวิธีทางความร้อน ทางเคมี และทางกล เพื่อให้สามารถกลับเข้าสู่กระบวนการผสม และวัลคาไนซ์ได้อีกครั้ง อย่างไรก็ตามในกระบวนการทำยางรีเคลมไม่สามารถควบคุมตำแหน่งในการตัดพันธะได้ ฉะนั้นการตัดพันธะด้วยกระบวนการรีเคลม จะเกิดการตัดพันธะที่ตำแหน่งพันธะ

เชื่อมขวางและตำแหน่งสายโซ่ตัวเอง (ชิตีไซยิตะห์ และคณะ, 2551) ลักษณะการตัดโครงสร้างตาข่ายของโมเลกุลยางด้วยวิธีทั้งสองแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการรีไซเคิลยางด้วยการรีเคลมและการดีวัลคาไนซ์ (Saiwari, 2013)

กระบวนการรีเคลมเป็นกระบวนการทำให้ยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อน วิธีทางเคมี หรือวิธีทางกล โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการรีเคลม คือโครงสร้างตาข่ายของโมเลกุลยางถูกตัดแบบสุ่ม อาจเกิดการตัดหรือทำลายพันธะเคมีทั้งบริเวณพันธะเชื่อมขวางที่เกิดจากสารวัลคาไนซ์ (C-S, S-S) หรือบริเวณสายโซ่หลักของโมเลกุลยาง ยางรีเคลมที่ได้จึงมีสมบัติทางกลต่ำ

กระบวนการรีเคลมทำได้หลายวิธี สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ (Myhre *et al.*, 2012) คือวิธีทางกายภาพ (Physical process) และวิธีทางเคมี (Chemical process) การรีเคลมโดยใช้วิธีทางกายภาพ (Adhikari *et al.*, 2000) เช่น วิธีทางกล (Mechanical reclaiming process) การใช้ความร้อนร่วมกับวิธีทางกล (Thermo-mechanical reclaiming process) การใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic method) และคลื่นไมโครเวฟ (Microwave method) เป็นต้น การรีเคลมโดยใช้วิธีทางเคมี คือการใช้สารเคมีเพื่อช่วยให้ประสิทธิภาพการรีเคลมสูงขึ้นเรียกสารเคมีดังกล่าวว่า สารรีเคลมมิ่งเอเจนต์ (Reclaiming agents) เช่น ไดอัลลิสไดซัลไฟด์ (Diallyldisulfide), 2,3-ไดเมทิล-2-บิวทีน (2,3-Dimethyl-2-butene), ไดฟีนิลไดซัลไฟด์ (Diphenyldisulfide, DPDS), เฮกซะเดคซิลามีน (Hexadecylaminine), เตตระเมทิลไทอูรัมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulfide, TMTD) และ ไดเบนซามิโดไดฟีนิลไดซัลไฟด์ (Dibenzamido diphenyldisulfide) เป็นต้น

2.3.1 ตัวอย่างกระบวนการเตรียมยางรีเคลม

2.3.1.1 กระบวนการรีเคลมโดยใช้ความร้อน (พรพรรณ, 2540)

- Heater หรือ pan process กระบวนการนี้เป็นหนึ่งในกระบวนการเตรียมยางรีเคลม โดยยางที่ถูกบดเป็นอนุภาคเล็กๆ และกำจัดเส้นใยออกไปแล้วจะถูกนำไปผสมเข้ากับน้ำมันและสารรีเคลมมิ่งเอเจนต์ แล้วจึงเทลงบนถาด ซึ่งถาดที่ใช้ได้ถูกออกแบบให้สามารถแผ่กระจายความร้อนได้อย่างทั่วถึง โดยการฝังขดลวดความร้อนตลอดแนว การให้ความร้อนด้วยไอน้ำภายในถาดที่อุณหภูมิประมาณ 180°C เป็นเวลา 5 ถึง 10 ชั่วโมง สารรีเคลมมิ่งเอเจนต์ที่ใช้คืออะโรมาติกไทออล ไคซัลไฟด์ และน้ำมันอะโรมาติก ซึ่งช่วยลดอุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาโดยยังคงให้สมบัติเชิงกลที่เหนือกว่า

- Digester process วิธีนี้ยังที่ผ่านการบดถูกผสมเข้ากับสารเคมี ส่วนผสมทั้งหมดจะถูกใส่เข้าไปในตู้อบความดันที่ประกอบด้วย ชุดกวน และให้ความร้อนที่ 180 ถึง 210°C ที่ 5 ถึง 24 ชั่วโมง โดยการใช้ไอน้ำ หลังจากนั้นวัสดุที่ได้จะถูกล้างทำความสะอาด อบแห้งและบดให้ละเอียด จากนั้นจึงกรองเป็นขั้นตอนสุดท้าย



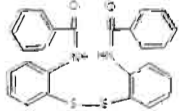
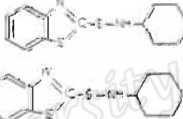
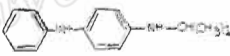



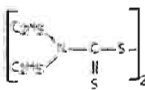

2.3.2.2 กระบวนการรีเคลมโดยใช้ความร้อนร่วมกับวิธีทางกล (Thermo-mechanical process) (Adhikari *et al.*, 2000; Myhre *et al.*, 2012)

ในกระบวนการรีเคลมโดยใช้ความร้อนร่วมกับวิธีทางกล โดยอาศัยแรงเฉือนทำให้เกิดความร้อนขึ้น โดยเมื่อวัสดุได้รับแรงเฉือนจะส่งผลให้มีอุณหภูมิ และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของพันธะเชื่อมขวางในยาง และเนื่องจากกระบวนการนี้ไม่มีการใช้สารเคมีแต่อาศัยความร้อนที่เกิดจากกระบวนการทางกลทำให้วิธีนี้มีข้อเสียคือจะเกิดการตัดสายโซ่ที่ตำแหน่งของสายโซ่หลัก

2.3.3.3 กระบวนการรีเคลมโดยใช้วิธีทางกลร่วมกับวิธีทางเคมี (Mechano-chemical methods) (Rajan *et al.*, 2006)

การทำให้ยางนิ่ม สามารถปรับปรุงโดยใช้ Reclaiming accelerator ในขณะที่ให้แรงทางกลแก่ยาง ในสภาวะบรรยากาศที่อุณหภูมิห้อง โดยทั่วไปแล้วการทำยางรีเคลมที่อุณหภูมิต่ำจะมีการใช้สาร Reclaiming catalyst, Reclaiming oil และ Process oil ร่วมกับการใช้สารรีเคลมมิ่งเอเจนต์ (Reclaiming agent) ตัวอย่างการใช้สารเคมีแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารรีเคลมมิ่งเอเจนต์ที่ใช้ในกระบวนการรีเคลมโดยใช้วิธีทางกลร่วมกับวิธีทางเคมี (Rajan *et al.*, 2006)

No	Chemical name/abbreviation	Reclaiming accelerator	Reclaiming cataly:
1	Peroxide-methyl halides	ROOR	Me_nX_m
2	Phenyl hydrazine-ferrous chloride (PH-FeCl ₂)		FeCl ₂ ·4H ₂ O
3	Tributylamine-cuprous chloride (TBA-CuCl)	(nC ₄ H ₉) ₃ N	Cu ₂ Cl ₂
4	Dixylyldisulfide		
5	2,2'-Dibenzamidodipheyl disulfide		
6	N-cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide (CBS)		
7	N-isopropyl-N'-phenyl-p-phenylenediamine (IPPD)		
8	Thiophenol-n-butylamine (TP-BA)		n-BuNH ₂
9	Toluene sulfonic acid-1,8-diazabicyclo 5,4,0undec-7-ene (TS-DBU)		
10	Tetraethylthiuramdisulfide-triphenyl phosphine (TETD-TPP)		

2.3.4.4 กระบวนการรีเคลมโดยใช้สารเคมี (Chemical reclaiming processes)

(Adhikari *et al.*, 2006)

กระบวนการรีเคลมโดยใช้สารเคมี จะใช้สารเคมีช่วยในการสลายพันธะซัลเฟอร์ สารเคมีที่นิยมใช้คือ ไดซัลไฟด์ (Disulfides) หรือ เมอร์แคปแทน (Mercaptans) หรือสารเคมีอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งมีหน้าที่ในการทำลายพันธะซัลเฟอร์ที่เกิดจากกระบวนการคงรูปที่แตกต่างกัน ซึ่งกระบวนการนี้สามารถเตรียมโดยการนำยางที่ใช้แล้วมาแช่ในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น โทลูอีน เบนซีน หรือไซโคลเฮกเซน เพื่อให้โมเลกุลของยางเกิดการบวมตัว และง่ายต่อการซึมผ่านของสารเคมีที่ช่วยในการสลายพันธะซัลเฟอร์ในโครงสร้างสามมิติ แม้ว่าการใช้สารเคมีในการเตรียมยางรีเคลมจะมีความจำเพาะเจาะจงในการทำลายพันธะโควาเลนต์ระหว่างพันธะคาร์บอน-ซัลเฟอร์ และซัลเฟอร์-ซัลเฟอร์ แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้มีข้อเสียคือความยากในการพาดตัวทำละลายออกจากเนื้อยางและความเสี่ยงที่เกิดจากสารเคมีที่ใช้

ตารางที่ 2.2 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการรีเคลมโดยใช้สารเคมี (Adhikari *et al.*, 2006)

Name of the chemical probes	Attacking position of the crosslink bonds
Triphenylphosphine	Polysulfide links into monosulfide and to a lesser extent disulfide links
Sodium di-n-butyl phosphite	Di and polysulfide crosslinks
Propane-thiol/piperidine	Polysulfide linkages
Hexane-1-thiol	Both polysulfide and disulfide linkages
Dithiothreitol	Disulfide bonds into two thiol groups
Lithium aluminium hydride	Disulfide and polysulfide bonds
Phenyl lithium in benzene	Polysulfide and disulfide bonds
Methyl iodide	Monosulfide linkages

2.3.2 สมบัติของยางรีเคลม (พรพรรณ, 2540)

ยางรีเคลมที่นำมาวัลคาไนซ์โดยทั่วไปจะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความกระด้างตัว และความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำกว่ายางใหม่ที่ไม่ผ่านกระบวนการรีเคลม นอกจากนี้ยางรีเคลมจะวัลคาไนซ์ได้เร็วกว่ายางปกติ และมีความทนทานต่อการออกซิไดซ์ที่ดี อาจเป็นเพราะในกระบวนการทำยางรีเคลมต้องผ่านกระบวนการออกซิเดชัน การให้ความร้อน และการล้าง เป็นต้น

2.3.3 การใช้งานยางรีเคลม (วราภรณ์, 2552)

การใช้งานยางรีเคลมโดยส่วนใหญ่จะใช้เพื่อลดต้นทุน แต่นอกจากลดต้นทุนแล้วยางรีเคลมยังมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการใช้ยางใหม่ในด้านกระบวนการผลิต กล่าวคือในกระบวนการเตรียมยางรีเคลมจะมีขั้นตอนการบดย่อยพันธะเชื่อมโมเลกุลยาง แต่ก็ยังคงมีพันธะเชื่อมขวางของ Sulfur crosslink ที่มีส่วนทำให้คอมพาวนด์มีความหยุ่นน้อย (Reduce nerve) ดังนั้นการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยกระบวนการอัดผ่านตาย (Extrude) หรือการฉีดยาจะมีผิวที่เรียบ ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดแน่นอนทำให้ช่วยเพิ่มอัตราการผสมได้ นอกจากนี้การใช้ยางรีเคลมเพื่อเตรียมคอมพาวนด์จะใช้เวลาบดผสมและพลังงานน้อยกว่ากรณีการใช้ยางใหม่ เพราะยางรีเคลมได้ผ่านการบดมาแล้วในกระบวนการเตรียมยางรีเคลม อย่างไรก็ตามสมบัติความแข็งแรงของยางรีเคลมจะไม่ทัดเทียมยางใหม่ ดังนั้นการใช้ยางรีเคลมจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ถ้าต้องการลดต้นทุนและใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมาก ก็สามารถใช้อย่างรีเคลมล้วนๆได้โดยไม่ต้องผสมกับยางใหม่

เช่น พื้นรองเท้า ยางปูพื้น เป็นต้น แต่ถ้าต้องการให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงระดับหนึ่งก็อาจจะผสมยางรีเคลมกับยางใหม่ เพื่อให้ส่วนของยางใหม่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงขณะที่ยางรีเคลมจะช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิต

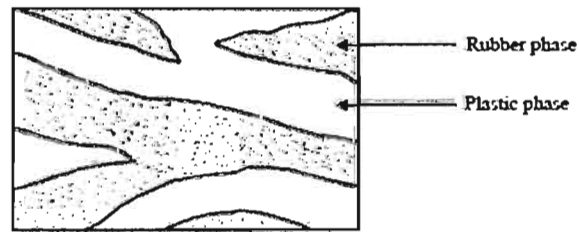
2.4 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomers, TPEs)

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ หมายถึง วัสดุอีลาสโตเมอร์ที่มีพฤติกรรมแปรรูปของเทอร์โมพลาสติก โดยจะแสดงสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) หรือการมีสมบัติยืดหยุ่นคล้ายยางที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิการใช้งาน และมีพฤติกรรมไหลแบบพลาสติกที่อุณหภูมิการแปรรูป การเปลี่ยนแปลงระหว่างสภาวะหลอมกับของแข็งที่ยืดหยุ่นแบบยางเมื่อให้อุณหภูมิหลอมหรือทำให้เย็นตัวเป็นแบบผันกลับได้ (Reversible process) ทำให้สามารถแปรรูปเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ซ้ำได้ เช่นเดียวกับการแปรรูปเทอร์โมพลาสติก

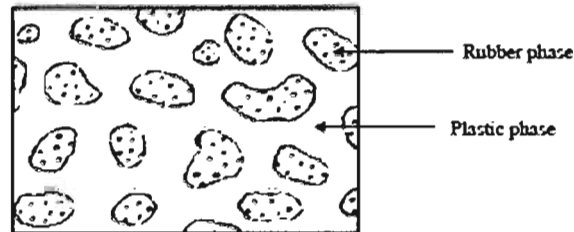
เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์และการเตรียมโคพอลิเมอร์มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาแบบเฟสคู่ (Two-Phase morphology) ประกอบด้วยเฟสแข็ง (Hard phase) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเทอร์โมพลาสติก และเฟสนิ่ม (Soft phase) หรือเฟสของยางมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาระหว่างเฟสที่สามารถเกิดได้ 2 แบบ คือ สัณฐานวิทยาแบบเฟสร่วม (Co-continuous phase morphology) คือเกิดการกระจายซึ่งกันและกันของทั้ง 2 เฟส และ สัณฐานวิทยาแบบเฟสกระจาย (Dispersed phase morphology) กล่าวคือเกิดการกระจายตัวของเฟสหนึ่ง ในเมทริกซ์ต่อเนื่องของอีกเฟสหนึ่ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมดังแสดงในรูปที่ 2.5

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากการเบลนด์ยางกับเทอร์โมพลาสติกทั้งการ เบลนด์แบบปกติ (Simple blend) และการเบลนด์แบบไดนามิกส์วัลคาไนซ์ (Dynamic vulcanization) ส่วนของเฟสแข็งทั้งที่เป็นเฟสร่วมและเฟสต่อเนื่อง ให้คุณสมบัติด้านความแข็งแรง และควบคุมไม่ให้เฟสนิ่มเกิดการไหลเมื่อได้รับแรงหรือความร้อน แต่เมื่อได้รับแรงหรือความร้อนที่เหมาะสมเฟสแข็งก็จะเกิดการหลอมไหล (ขึ้นรูปได้) เมื่อเย็นตัวก็จะกลับสู่สภาวะที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นอีกครั้ง

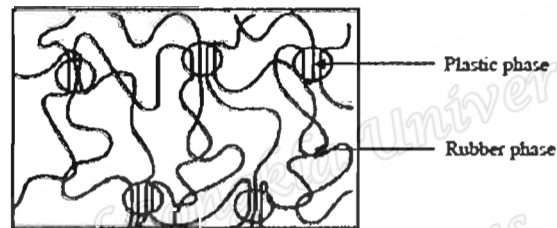
เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ได้จากการเตรียมโคพอลิเมอร์นั้นส่วนของเฟสแข็งที่เกิดการรวมกลุ่มกันของผลึกเป็นโดเมนของแข็ง (Hard domain) จะกระจายตัวต่อเนื่องอยู่ในเฟสยาง และทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical crosslink) ควบคุมไม่ให้เฟสนิ่มเกิดการไหล และเนื่องจากการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลเป็นการเชื่อมขวางทางกายภาพ หรือการมีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลไม่ได้เกิดการเชื่อมขวางทางเคมี ดังนั้นเมื่อได้รับพลังงานที่เหมาะสมก็จะสูญเสียการเชื่อมขวาง โขโมเลกุลจะเกิดการเคลื่อนไหวหรือสั่นไถลผ่านกันได้ (ขึ้นรูปได้) แต่เมื่อกลับสู่สภาวะที่มีพลังงานต่ำอีกครั้งการเชื่อมขวางทางกายภาพก็จะเกิดขึ้นใหม่ เรียกการเชื่อมขวางที่มีลักษณะดังกล่าวว่า การเชื่อมขวางแบบผันกลับได้ (Physical reversible crosslink)



(a) Co-Continuous rubber and plastic phases



(b) Rubber particles dispersed in the continuous phase



(c) Hard domains dispersed in the amorphous polymer phase

รูปที่ 2.5 สันฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมด้วย (a) วิธีเบลนด์แบบปกติ (b) ไดนามิกส์วัลคาไนซ์ และ (c) การเตรียมโคพอลิเมอร์ (Holden, 2000)

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่สำคัญ 2 ช่วง คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมผลึก โดยที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิการใช้งาน คือ ระหว่างช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมผลึก วัสดุจะมีสมบัติเป็นยาง คือ มีความสามารถในการคืนกลับรูปเดิมหลังจากสิ้นสุดแรงกระทำ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากลักษณะของเฟสแข็งควบคุมไม่ให้เฟสของยางเกิดการไหลเสมือนการมีพันธะเชื่อมขวางในยางวัลคาไนซ์ ส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมผลึก เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จะอยู่ในสภาวะหลอม (Molten state) และมีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic behavior) คือ ความหนืดของวัสดุจะขึ้นกับอัตราเฉือน (Shear rate) ทำให้เหมาะแก่การขึ้นรูปแบบฉีด หรือการเอกทрудซ์ที่มีอัตราเฉือนสูง เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จะไหลได้ดีเพราะมีความหนืดต่ำ และเมื่อเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์กลับสู่สภาวะที่มีพลังงานต่ำก็จะมีความสามารถในการคงรูปใหม่ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเหนือยางวัลคาไนซ์ที่เกิดการคงรูปถาวรด้วยพันธะทางเคมี ทำให้มีความนิยมในการผลิต

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากขึ้น ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ เช่น ชิ้นส่วนยาง ประกอบเครื่องจักร ท่อ ปะเก็น อุปกรณ์อุดรอยรั่ว สายไฟ และฉนวนไฟฟ้า เป็นต้น

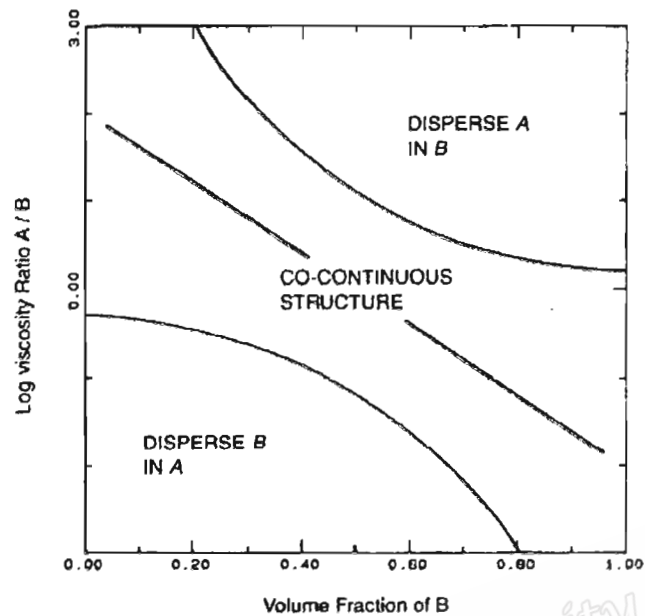
2.4.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ยางและพลาสติก

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากการเบลนด์พลาสติกกับยางจัดเป็นกลุ่มเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีความนิยมทางการค้า เนื่องด้วยมีสมบัติเป็นที่ยอมรับและมีความสะดวกในการเตรียม โดยสามารถแบ่งลักษณะการเบลนด์เป็น 2 ประเภท คือ

ก. เทคนิคการเบลนด์แบบปกติ (Simple blend)

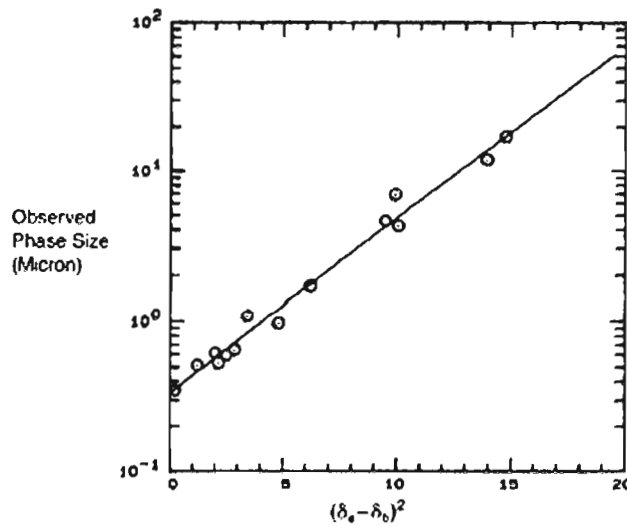
การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากการเบลนด์แบบปกติทำได้โดยการเบลนด์เทอร์โมพลาสติกกับยางโดยไม่เติมสารวัลคาไนซ์ ซึ่งการเบลนด์จะทำในสภาวะที่มีแรงเฉือนสูง และให้ความร้อนเพียงพอให้เกิดการหลอมในพลาสติกโดยไม่ทำให้เฟสของยางเสื่อมสภาพ ซึ่งการเบลนด์แบบปกติมีโอกาสการเกิดลักษณะทางสัณฐานวิทยาได้ 2 ลักษณะ คือ พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งกระจายตัวในเฟสต่อเนื่อง (หรือเมทริกซ์) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จะแสดงสมบัติเด่นของพอลิเมอร์ชนิดที่เป็นเมทริกซ์ และลักษณะทางสัณฐานวิทยาอีกลักษณะ คือ เกิดจากการกระจายตัวซึ่งกันและกันเป็นแบบเฟสร่วม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (a) ซึ่งในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ด้วยวิธีเบลนด์แบบปกติต้องควบคุมลักษณะทางสัณฐานวิทยาให้เป็นแบบเฟสร่วม เนื่องจากการสมบัติที่ผสมกันระหว่าง 2 เฟส โดยปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดลักษณะทางสัณฐานวิทยาของการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยวิธีการเบลนด์แบบปกติ คือ อิทธิพลของความหนืด อัตราส่วนการเบลนด์ และความเข้ากันของพอลิเมอร์เบลนด์

พอลิเมอร์ที่นำมาเบลนด์กันต้องมีค่าความหนืดใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิ และอัตราเฉือนที่ทำการเบลนด์ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า \log ของอัตราส่วนความหนืดระหว่างเฟสทั้ง 2 (A และ B) กับสัดส่วนโดยปริมาตรของเฟส B (อาจจะเป็นเฟสอีลาสโตเมอร์หรือพลาสติก) แสดงดังรูปที่ 2.6 พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์มีความหนืดใกล้เคียงกัน (ค่า \log ของอัตราส่วนความหนืดระหว่างพอลิเมอร์ A กับ พอลิเมอร์ B มีค่าใกล้ 0) จะให้ลักษณะสัณฐานวิทยาแบบเฟสร่วมที่ทุกสัดส่วนการเบลนด์ และที่อัตราส่วนความหนืดค่าอื่นๆ การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ให้ได้สัณฐานวิทยาแบบเฟสร่วมจะต้องคำนึงถึงสัดส่วนการเบลนด์ซึ่งจะมีสัดส่วนช่วงหนึ่งๆ เท่านั้นที่จะให้สัณฐานวิทยาแบบดังกล่าว



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนืดที่ใช้ในการเบลนด์กับสัดส่วนในการผสมของพอลิเมอร์ 2 องค์ประกอบ (Holden, 2000)

ความเข้ากันได้ของการเบลนด์ซึ่งพิจารณาจากความแตกต่างระหว่างค่าความสามารถในการละลาย (Solubility parameter) ซึ่งค่าความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดเกี่ยวข้องกับแรงตึงผิวประจัญ (Interfacial tension) กล่าวคือ ถ้าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีค่าแรงตึงผิวสูงจะทำให้เกิดเป็นระบบสองเฟส (Two phase system) ที่มีเฟสขนาดใหญ่ (Coarse dispersion) โดยการเกิดเฟสขนาดใหญ่จะไปลดพื้นที่ผิวประจัญ (Interfacial area) และพลังงานผิวประจัญ (Interfacial energy) ในทางกลับกันถ้าพอลิเมอร์มีค่าความสามารถในการละลายใกล้เคียงกันทำให้เกิดการกระจายตัวของเฟสที่มีขนาดเล็กมากกว่า (Finer dispersion) ทำให้พื้นที่ผิวประจัญและพลังงานผิวประจัญมีค่าสูง พอลิเมอร์เบลนด์จึงมีความเข้ากันได้เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์เบลนด์กับค่าความแตกต่างของความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่นำมาเบลนด์กัน พบว่าขนาดอนุภาคของ พอลิเมอร์เบลนด์มีขนาดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความแตกต่างระหว่างค่าความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ที่ใช้ ซึ่งถ้าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีค่าความสามารถในการละลายต่างกันมาก เช่น พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งมีขั้วในขณะที่พอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งไม่มีขั้วก็จะเกิดเฟสขนาดใหญ่



รูปที่ 2.7 อิทธิพลของค่าความสามารถในการละลายต่อขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์เบลนด์ (Holden, 2000)

ข. เทคนิคการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมโดยกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ หรือที่เรียกว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ หรือไดนามิกส์วัลคาไนซ์ มีหลักการในการเตรียม คือ การปรับปรุงสัณฐานวิทยาของอนุภาคยางที่กระจายตัวในเฟสต่อเนื่องของพลาสติกให้มีความเสถียรโดยการผสมสารวัลคาไนซ์ในขณะเบลนด์หรือการนำยางมาผ่านกระบวนการผสมสารเคมีแล้วนำมาทำการเบลนด์ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งแบบแบช (Batch process) ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) หรือแบบต่อเนื่อง (Continuous process) ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ (Co-Rotating twin screw extruder) เป็นต้น การวัลคาไนซ์จะเกิดขึ้นในระหว่างการบดผสมภายใต้อุณหภูมิสูง เมื่อเกิดการวัลคาไนซ์ในเฟสยาง ความหนืดของเฟสยางจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดที่ความหนืดระหว่างเฟสยางกับเฟสพลาสติกต่างกันมาก (Viscosity mismatch) เมื่อทำการผสมต่อเนื่องไปเฟสของยางที่หนืดได้รับแรงเฉือนจากกลไกของเครื่องมือกลก็จะเกิดการแตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กระดับไมครอนกระจายตัวในเมทริกซ์ของพลาสติก โดยต้องให้แรงเฉือน และอุณหภูมิจนกระทั่งเกิดการวัลคาไนซ์ที่สมบูรณ์ เพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคยางกลับมารวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กที่เกิดขึ้นระหว่างทำการผสมทำให้เกิดการปรับปรุงสมบัติทางฟิสิกส์ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติด้านการคืนตัว ความทนทานต่อความล้า และความทนทานต่อน้ำมัน เป็นต้น

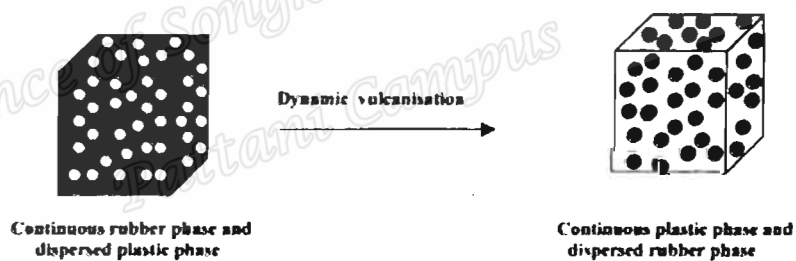
สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ที่เตรียมด้วยกระบวนการเบลนด์แบบปกติจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลของความหนืดและสัดส่วนการเบลนด์ แต่ในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ด้วย

กระบวนการเบลนด์แบบไดนามิกส์วัลคาไนซ์ พอลิเมอร์ที่นำมาเบลนด์กันจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด และเทอร์โมไดนามิกส์ที่อุณหภูมิและอัตราเฉือนที่ทำการเบลนด์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาได้หลายแบบดังแสดงในรูปที่ 2.8 กล่าวคือ มีการเปลี่ยนจากเฟสรวมกลายเป็นเฟสกระจาย การเปลี่ยนในลักษณะของการกลับเฟส (เปลี่ยนจากเฟสพลาสติกที่กระจายตัวในเฟสยางกลายเป็นเฟสยางกระจายตัวในเฟสพลาสติก) และการลดลงของขนาดอนุภาคยางที่กระจายตัวในเทอร์โมพลาสติก

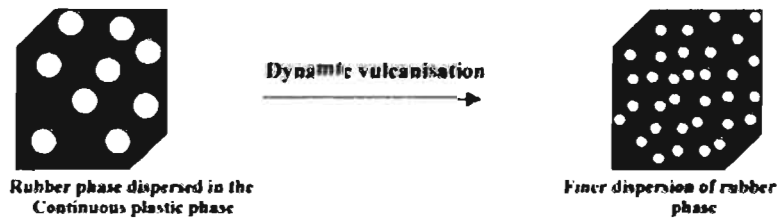
Co-continuous morphology could be transferred in to Matrix /dispersed phase morphology



Possibility of phase inversion



Finer dispersion of dispersed rubber domains



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ (John *et al.*, 2003)

2.4.2 การแปรรูปและการประยุกต์ใช้งานเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

ด้วยสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีพฤติกรรมเหมือนเทอร์โมพลาสติกในสถานะหลอม (Molten state) มีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก จึงสามารถแปรรูปเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ด้วยเครื่องแปรรูปพลาสติกทั่วไปและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.4.2.1 การขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดเข้าเบ้า (Injection Molding)

การขึ้นรูปโดยการฉีดเข้าเบ้าเป็นเทคนิคการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่สำคัญที่สุด เนื่องจากมีระยะเวลาต่อรอบการผลิต (Cycle time) สั้นและสามารถนำเศษวัสดุ (Scrap) จากการขึ้นรูปมาใช้ได้อีก เครื่องฉีดเข้าเบ้าทั่วไปที่ใช้ในการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสามารถนำมาใช้กับเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ได้ โดยแรงดันประกบแม่พิมพ์ (Clamping pressure) ควรจะอยู่ในช่วง 40-70 MPa หัวฉีด (Nozzle) กรวยนำฉีด (Sprue cone) และประตู (gates) ควรใช้ขนาดกลาง อุณหภูมิที่ใช้ควรมากกว่าอุณหภูมิหลอมของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ เนื่องจากระบบท่อวิ่งที่ร้อน (Hot runner system) จะลดการเสียหายของวัสดุทำให้ประหยัดวัสดุและระยะเวลาต่อรอบการผลิต ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่และขนาดเล็ก โดยจะต้องใช้ช่องว่างของเบ้า (Cavities) มากกว่า 1 หรือ 2 ช่องสำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่

2.4.2.2 การขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดรีด (Extrusion Molding)

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยการอัดรีดร้อนให้มีรูปทรงต่าง ๆ กัน เช่น เป็นท่อ แผ่นพลาสติก หรือโพรไฟล์พลาสติกได้โดยใช้เครื่องอัดรีดร้อนสกรูเดี่ยวหรือสกรูคู่ที่ใช้สำหรับเทอร์โมพลาสติกทั่วไป การควบคุมขนาดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผ่านกระบวนการอัดรีดร้อนนั้นทำได้โดยการควบคุมการบวมพองที่หัวตาย (Die swell) ซึ่งสำหรับเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์โดยทั่วไปแล้วจะเกิดการบวมพองน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกชนิดแข็งหรือยางวัลคาไนซ์ที่ผสมเขม่าดำ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการบวมพอง คือ อัตราเฉือน กล่าวคือจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการอัดรีดร้อนเพิ่มขึ้น ตัวเครื่องจะมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) ของสกรู (Screw) อย่างน้อย 20/1 (โดยทั่วไปแล้วนิยมให้อยู่ในช่วง 24/1 ถึง 30/1) สกรูที่ใช้กับเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ โดยทั่วไปแล้วจะเป็นแบบเดียวกันกับที่ใช้สำหรับพอลิโอเลฟินด์และอาจใช้สกรูที่ออกแบบพิเศษเพื่อช่วยในการผสมได้เช่นกัน

2.4.2.3 การประยุกต์ใช้งานเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

เนื่องจากการใช้งานวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาวัสดุดังกล่าวให้มีสมบัติที่ดีขึ้น เช่น สมบัติด้านความต้านทานต่อน้ำมันร้อน สมบัติ

ความต้านทานต่ออุณหภูมิสูง เป็นต้น โดยในปัจจุบันนิยมนำวัสดุเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ไปใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เช่น

(1) การนำไปใช้เป็นสินค้าที่ใช้ในเครื่องจักรที่เป็นยาง เช่น ลูกกลิ้งที่ติดไว้ที่ขาโต๊ะไดอะเฟรมที่ยืดหยุ่นได้ ปะเก็น ท่อ เครื่องกันชน อุปกรณ์อุดรูรั่ว วาล์ว และปลั๊ก เป็นต้น

(2) การนำไปใช้ภายใต้ฝากระโปรงรถ เช่น เป็นที่ครอบท่อเครื่องปรับอากาศ ครอบท่อน้ำมัน ท่อดูดสูญญากาศ ตัวต่อเครื่องดูดสูญญากาศ ตัวปลั๊ก อุปกรณ์อุดรูรั่ว วงแหวน ส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น

(3) การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมทอผ้าใบ เช่น สเปรย์ในงานเกษตรกรรม สเปรย์ในงานสี อุตสาหกรรมทอ เป็นต้น

(4) การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมไฟฟ้า เช่น ปลั๊ก สายไฟ และสายเคเบิล เป็นต้น

2.5 การเข้ากันได้ของการเบลนด์ (Blend compatibilization) (เจริญ, 2546)

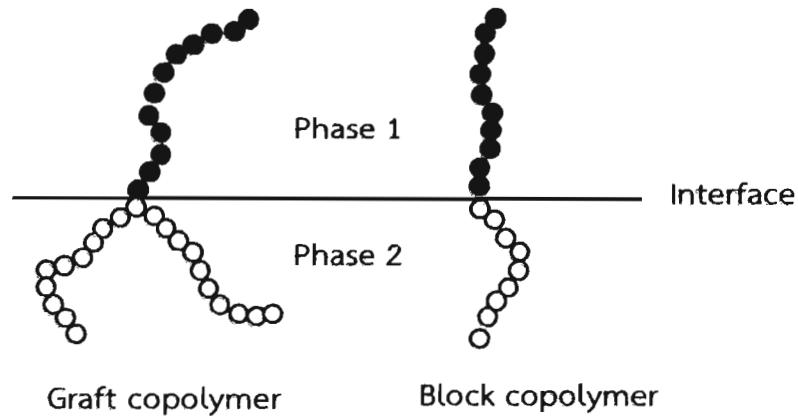
การเข้ากันได้ (Compatibilization) ของการเบลนด์เป็นปัจจัยหลักในการพัฒนาพอลิเมอร์เบลนด์ การเข้ากันได้หมายถึง การผสมเข้ากันได้ (Miscibility) ในระดับของโมเลกุลพอลิเมอร์ที่นำมาผสมไม่มีการแยกเฟสขององค์ประกอบที่ต่างกัน และสามารถเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานรูปแบบต่างๆ

2.5.1 การใช้โคพอลิเมอร์แบบกราฟต์และบล็อกเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้

การเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ โดยใช้โคพอลิเมอร์แบบกราฟต์และบล็อกเป็นตัวประสาน เป็นวิธีการที่มีการศึกษาวิจัยและมีการผลิตพอลิเมอร์เบลนด์กันมากที่สุด โดยทั่วไปจะนิยมใช้โคพอลิเมอร์แบบบล็อกมากกว่า โดยเฉพาะโคพอลิเมอร์แบบบล็อกที่มีส่วนของโมเลกุลที่มีลักษณะทางเคมีเหมือนกับพอลิเมอร์ที่ต้องการผสม โคพอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานจะมีตำแหน่งอยู่ที่ผิวประจัญ (Interface) ของพอลิเมอร์ที่ผสม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 โคพอลิเมอร์จะผสมส่วนที่มีธรรมชาติทางเคมีเหมือนกันกับพอลิเมอร์

2.5.2 การใช้พอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันก็เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้

เตรียมโดยการนำพอลิเมอร์ที่มีลักษณะทางเคมีเหมือนกับพอลิเมอร์ที่จะทำการเบลนด์ มาทำการดัดแปรโมเลกุลโดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีลงบนโมเลกุล ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มเข้าไปจะสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์ชนิดที่สองที่นำมาทำการเบลนด์ได้ การดัดแปรโมเลกุลทำได้โดยการทำปฏิกิริยาในปฏิกรณ์เคมี (Reactor) ซึ่งมักจะทำในสภาวะที่เป็นสารละลายหรือทำโดยการใช้กระบวนการเอ็กซ์ทรูดดัดแปรโมเลกุลในสภาวะหลอม



รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงการประสานของโคพอลิเมอร์แบบกราฟต์และบล็อกในการเพิ่มความเข้ากันได้ (Bonner and Hope, 1993 อ้างถึงโดย เจริญ, 2546)

2.5.3 รีเอกทีฟเบลนด์ (Reactive blending)

เทคนิครีเอกทีฟเบลนด์ จะเตรียมโดยการปรับสภาวะให้พอลิเมอร์ที่นำมาเบลนด์ให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลต่างชนิดในสภาวะหลอม (Melt blending) เทคนิคนี้ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์ในเชิงพาณิชย์หลายชนิด เช่น การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จากพอลิเอไมด์กับยางเอทิลีนโพรพิลีน ที่มีการตัดแปรรวมด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่อะมิโนของพอลิเอไมด์กับหมู่คาร์บอนิลอิสระบนโมเลกุลของยางเอทิลีนโพรพิลีน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ยางรีเคลมเป็นวัตถุดิบยางในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางประเภทหนึ่ง มีลักษณะแบบกึ่งของแข็งและของเหลว มีส่วนของสารตัวเติม น้ำมัน และสารวัลคาไนซ์อยู่ภายใน รวมถึงมีการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลคงเหลืออยู่บางส่วน ในการใช้งานโดยทั่วไปมักนำยางรีเคลมมาเบลนด์ร่วมกับยางหรือเทอร์โมพลาสติก สมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น องค์ประกอบของยางรีเคลม ความเข้ากันได้ของยางรีเคลมกับวัสดุใหม่ ปริมาณของยางรีเคลม และระบบวัลคาไนซ์ เป็นต้น

2.6.1 กระบวนการรีเคลม

กระบวนการรีเคลม เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสภาพยางวัลคาไนซ์หรือยางเทอร์โมเซตให้มีความสามารถในการแปรรูปและสามารถวัลคาไนซ์ได้อีกครั้ง โดยการทำให้พันธะเชื่อมขวางระหว่างโซ่โมเลกุลยางวัลคาไนซ์นั้นขาดออกด้วยการใช้แรงเชิงกลร่วมกับความร้อน และ/หรือปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น (พรพรรณ, 2528) อย่างไรก็ตามในกระบวนการรีเคลมนอกจากพันธะเชื่อมขวางแล้ว ยังมีโซ่โมเลกุลบางส่วนที่สามารถขาดออกได้ด้วย เป็นผลให้ยางรีเคลมที่นำมาวัลคาไนซ์ใหม่มีค่าความ

ต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความกระด้างตัว และความต้านทานการสึกหรอต่ำกว่ายางวัลคาไนซ์ทั่วไป (พรพรรณ, 2528) ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษากระบวนการรีไซเคิล เช่น De *et al.* (2005) ได้ศึกษาการเตรียมยางรีไซเคิลจากยางครัมป์ (Crumb rubber) ที่ได้จากล้อรถยนต์เก่า โดยเตรียมยางรีไซเคิลบนเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง แปรเวลาการบดผสม 20-40 นาที และแปรปริมาณสารช่วยรีไซเคิล (Reclaiming agent) ชนิด Tetramethyl thiuram disulfide (TMTD) ปริมาณ 1.5-3.25 phr โดยใช้น้ำมันสปีนเดิลคิงที่ 10 มิลลิลิตร ต่อยาง 100 กรัม นำยางรีไซเคิลที่ได้มาวัลคาไนซ์ใหม่ที่อุณหภูมิ 160°C จากการศึกษาพบว่าการใช้สารช่วยรีไซเคิลที่ปริมาณ 2.75 phr ร่วมกับการบดผสม 40 นาที เป็นสภาวะการเตรียมยางรีไซเคิลที่ทำให้ยางรีไซเคิลวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลโดยรวม ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด โมดูลัส และความแข็งที่ดีที่สุด ต่อมา อัญชลี (2551) ได้ศึกษาการเตรียมยางรีไซเคิลจากยางครัมป์ที่ได้จากผิวหน้ายางล้อรถบรรทุกในกระบวนการหล่อตอกด้วยกระบวนการทางกลร่วมกับการใช้สารช่วยรีไซเคิลบนเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิบดผสมเริ่มต้น 40°C ทำการแปรชนิดสารช่วยรีไซเคิล 4 ชนิด ได้แก่ Tetramethyl thiuram monosulfide (TMTM), TMTD, Dipentamethylene thiuramtetrasulfide (DPTS) และ Mercaptobenzothiazole disulfide (MBTS) แปรปริมาณสารช่วยรีไซเคิลในช่วง 0-2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของยางครัมป์ แปรระยะเวลาการบดผสมที่ 40 และ 120 นาที และนำยางรีไซเคิลที่ได้กลับมาวัลคาไนซ์ใหม่ที่อุณหภูมิ 142°C ผลการศึกษาพบว่าการใช้ MBTS ที่ปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของยางครัมป์ ที่ระยะเวลาการบดผสม 40 นาที จะให้ยางรีไซเคิลวัลคาไนซ์ที่มีสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด 100% โมดูลัส และความแข็ง ที่ดีที่สุด การเพิ่มเวลาในการบดผสมเป็น 120 นาที จะทำให้สมบัติเชิงกลดังกล่าวของยางรีไซเคิลวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ในการศึกษาของ ปฎิญา (2556) ได้ศึกษาการเตรียมยางรีไซเคิลจากยางครัมป์ที่ได้จากผิวหน้ายางล้อรถบรรทุกในกระบวนการหล่อตอกด้วยกระบวนการทางกลร่วมกับการใช้สารช่วยรีไซเคิลที่อุณหภูมิ 60°C และทำการแปรปริมาณน้ำมันสปีนเดิล (Spindle oil) ที่ 0-30 phr พบว่ายางรีไซเคิลวัลคาไนซ์ ที่ใช้อุณหภูมิวัลคาไนซ์ 160°C จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณน้ำมันจนถึงที่ 5 phr การใช้ปริมาณน้ำมันมากกว่านี้จะมีผลให้สมบัติดังกล่าวลดลงตามปริมาณน้ำมันที่มากขึ้น

2.6.2 การใช้ยางรีไซเคิลเป็นองค์ประกอบเบลนด์

การใช้งานยางรีไซเคิลในปัจจุบันค่อนข้างมีข้อจำกัดเนื่องจากยางรีไซเคิลมีสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างต่ำ โดยทั่วไปจะนิยมใช้ยางรีไซเคิลเติมลงในยางคอมพาวด์เพื่อลดต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ทั้งนี้เนื่องจากยางรีไซเคิลมีราคาถูกเมื่อเทียบกับวัตถุดิบยางอื่นๆ ประกอบกับการใช้งานยาง

รีเคลมยังมีข้อได้เปรียบบางประการเช่น ช่วยให้เพิ่มอัตราการผลิต ลดการบวมพอง (Die swell) ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยกระบวนการอัดรีด (Extrusion) เนื่องจากยางรีเคลมมีพันธะเชื่อมขวางคงเหลืออยู่บางส่วน เป็นผลให้ยางคอมพาวนด์มีความยืดหยุ่นน้อยลง จึงสามารถได้ชิ้นงานที่มีขนาดแน่นอน (วารสาร, 2552) เป็นต้น งานวิจัยที่ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีองค์ประกอบของยางรีเคลม เช่น Sombatsompop and Kumnuantip (2003) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณยางรีเคลมในยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลม จากการทดสอบสมบัติของยางคอมพาวนด์พบว่าค่าพลาสติกซิตี และค่าความหนืดเฉือน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลของเคมีค่าที่เป็นองค์ประกอบของยางรีเคลม และในการศึกษาสมบัติของยางวัลคาไนซ์พบว่ามอดูลัส ความแข็ง และปริมาณพันธะเชื่อมขวางของยางเบลนด์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณยางรีเคลม เนื่องจากในยางรีเคลมมีเคมีค่าซึ่งเป็นสารตัวเติมเสริมแรง และการมีพันธะเชื่อมขวางที่คงอยู่ในยางรีเคลมซึ่งไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลิเมอร์ ในขณะที่ยังมีความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณยางรีเคลม ซึ่งเป็นผลมาจากความเป็นเนื้อเดียวกันของยางเบลนด์จากยางธรรมชาติและยางรีเคลมลดลงเมื่อมีปริมาณยางรีเคลมในองค์ประกอบเบลนด์เพิ่มมากขึ้น รวมถึงการเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของยางรีเคลมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในการศึกษาของ Kumnuantip and Sombatsompop (2003) แสดงให้เห็นอีกว่าการเพิ่มสัดส่วนยางรีเคลมในยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลมมีผลทำให้แนวโน้มพีคของค่าแทนเจนต์สูญเสียเลื่อนไปที่อุณหภูมิสูงขึ้นและมีค่าแทนเจนต์สูญเสียสูงสุดลดลงตามปริมาณยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเคมีค่าที่อยู่ในยางรีเคลม โดยเคมีค่าเป็นสารที่มี loss angle ต่ำมาก การผสมยางรีเคลมลงในยางเบลนด์จะทำให้ยางเบลนด์มีค่าแทนเจนต์สูญเสียลดลงได้ ต่อมา Tantayanon and Juikham (2004) ศึกษาการแปรอัตราส่วนระหว่างยางรีเคลมกับพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วนเท่ากับ 20/80, 25/75, 30/70, 35/65 และ 40/60 ส่วนโดยน้ำหนัก พบว่าความต้านทานต่อการกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณยางรีเคลม เนื่องจากยางรีเคลมช่วยในการดูดซับแรงได้มากขึ้น ร่วมกับการเกิดพันธะเชื่อมขวางในเฟสยางทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความสามารถในการรับแรงตีขึ้น ที่ระดับสัดส่วนของยางรีเคลมมากกว่า 30 ส่วนโดยน้ำหนักในองค์ประกอบเบลนด์ ความต้านทานต่อการกระแทกมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสัดส่วนยางรีเคลมที่มากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณเคมีค่าจากยางรีเคลมเพิ่มมากขึ้น ทำให้เคมีค่าเกิดการแยกชั้นออกมา (Layer like structure) ส่งผลให้ความต่อเนื่องของเฟสลดลงทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีความต้านทานต่อการกระแทกลดลง ต่อมา Farahani *et al.* (2006) ศึกษาความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) และสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ระหว่างธรรมชาติกับยางรีเคลม โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์เท่ากับ 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 ส่วนโดยน้ำหนัก พบว่าความหนืดมูนนี่ของยางเบลนด์มีค่าต่ำกว่าความหนืดมูนนี่ของยาง

ธรรมชาติเนื่องจากยางรีเคลมมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจากผลของการตัดขาดสายโซ่ในระหว่างกระบวนการรีเคลม และความหนืดมูนนี้ของยางเบลนด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางรีเคลมที่อยู่ในยางเบลนด์ จากผลของสารตัวเติมในยางรีเคลมและความไม่เข้ากันระหว่างเฟสในยางเบลนด์ ขณะที่สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความต้านทานต่อการล้า และความกระด้างตัว มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสัดส่วนยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่ามอดูลัส ความแข็ง และการผิดรูปเนื่องจากการกด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนยางรีเคลมที่มากขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับผลของน้ำหนักโมเลกุลยางรีเคลมที่ต่ำ การมีสารตัวเติมและการเชื่อมขวางภายในโมเลกุลของยางรีเคลมบางส่วน จึงทำให้ยางเบลนด์เกิดการแยกเฟสจากผลของความไม่เข้ากันขององค์ประกอบ นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Mandal *et al.* (2014) ได้ศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงกลพลวัตของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลม โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลมที่ 100/0, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ส่วนโดยน้ำหนัก ในการศึกษาสมบัติของยางวัลคาไนซ์พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาด มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสัดส่วนยางรีเคลมที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในยางรีเคลมจะมีส่วนพันธะเชื่อมขวางเป็นองค์ประกอบ ทำให้เมื่อนำยางรีเคลมมาเบลนด์ร่วมกับยางธรรมชาติ ส่วนของพันธะเชื่อมขวางที่อยู่ในยางรีเคลมจะทำให้ยางรีเคลมไม่สามารถกระจายตัวอย่างต่อเนื่องในยางธรรมชาติได้ และส่วนของพันธะเชื่อมขวางในยางรีเคลมเป็นจุดอ่อนแอในการส่งผ่านแรงไปยังเฟสยางธรรมชาติทำให้ความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าด้อยลง ขณะที่ความแข็ง และมอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนยางรีเคลมที่เพิ่มมากขึ้น แสดงถึงการมีปริมาณพันธะเชื่อมขวางในยางเบลนด์วัลคาไนซ์เพิ่มมากขึ้นนอกเหนือจากพันธะเชื่อมขวางเดิมที่อยู่ในยางรีเคลม และการที่มีเขม่าดำทำให้ยางเบลนด์วัลคาไนซ์มีความแข็งในโมเลกุลเพิ่มขึ้น ในการศึกษาสมบัติเชิงกลพลวัตพบว่าที่อัตราส่วนการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเท่ากับ 80/20 ให้ค่ามอดูลัสสะสม มอดูลัสสูญเสีย และค่าแทนเจนต์สูญเสียที่สูงที่สุด

2.6.3 ระบบวัลคาไนซ์ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบ

การวัลคาไนซ์ยางเบลนด์ที่มีองค์ประกอบของยางรีเคลมจะแตกต่างไปจากกรณีการใช้ยางใหม่ที่ไม่ผสมยางรีเคลม มีความจำเป็นต้องพิจารณาการใช้สารในระบบวัลคาไนซ์ที่เหมาะสม (วรภรณ์, 2552) งานวิจัยที่ศึกษาผลของการวัลคาไนซ์ขั้นต่อสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบ เช่น Sombatsompop and Kumnuantip (2003) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณยางรีเคลมในยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลม ในการทดสอบพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์พบว่าอัตราการวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากในยางรีเคลมมีสารวัลคาไนซ์และสารตัวเร่งหลงเหลืออยู่ ในขณะที่เวลาสกอซมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณยางรีเคลม

ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ายางรีเคลมยังมีส่วนที่ว่องไวในการเกิดพันธะเชื่อมขวางเหลืออยู่ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mandal *et al.* (2014) ซึ่งศึกษาพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ และปริมาณพันธะเชื่อมขวางของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลม ที่อัตราส่วนการเบลนด์แตกต่างกัน พบว่าค่าทอร์กสูงสุด ดัชนีอัตราการวัลคาไนซ์ และความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางของยางเบลนด์ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของยางรีเคลมที่เพิ่มมากขึ้น ขณะที่เวลาการวัลคาไนซ์ลดลง เป็นผลมาจากปริมาณพันธะเชื่อมขวางที่คงอยู่ในยางรีเคลมซึ่งเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางรีเคลม ต่อมา Tantayanon and Juikham (2004) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการใช้ยางรีเคลมและยางครีမ်เบลนด์ร่วมกับพอลิโพรพิลีนเพื่อปรับปรุงความต้านทานต่อการกระแทกของพอลิโพรพิลีน ร่วมกับการศึกษาการใช้สารวัลคาไนซ์ในพอลิเมอร์เบลนด์ ผลการศึกษาพบว่าการใช้ยางรีเคลมจะช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการกระแทกของพอลิโพรพิลีนได้ดีกว่ายางครีမ် และพบว่าการใช้สารวัลคาไนซ์ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีค่าความต้านทานต่อการกระแทกสูงกว่ากรณีที่ไม่ใช้สารวัลคาไนซ์ โดยการใช้สารวัลคาไนซ์ผสมระหว่างมาลิกอิกแอนไฮไดรด์ร่วมกับเปอร์ออกไซด์จะให้พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสมบัติความต้านทานต่อการกระแทกสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการกราฟต์ของมาลิกอิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลของพอลิโพรพิลีน และยาง ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสของยางรีเคลมกับพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น โดยสารวัลคาไนซ์ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสมบัติความต้านทานต่อการกระแทกสูงรองลงมาคือ เปอร์ออกไซด์ กำมะถัน และมาลิกอิกแอนไฮไดรด์ ตามลำดับ ส่วนในงานวิจัยของ Rattanasom *et al.* (2005) ศึกษาอิทธิพลของระบบวัลคาไนซ์กำมะถันแบบปกติ และแบบประสิทธิภาพ ต่อสมบัติเชิงกลและความต้านทานต่อการบ่มเร่งของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลม ผลการศึกษาพบว่ายางเบลนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันแบบปกติมีความแข็ง โมดูลัส และความต้านทานต่อการสึกหรอ สูงกว่ากรณียางเบลนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันแบบประสิทธิภาพ ยกเว้นความสามารถในการยืดจนขาดที่มีค่าต่ำกว่า เนื่องจากการใช้ระบบกำมะถันแบบปกติจะให้ปริมาณพันธะเชื่อมขวางในยางเบลนด์มากกว่าการใช้ระบบกำมะถันแบบประสิทธิภาพ เพราะระบบกำมะถันแบบปกติจะมีปริมาณกำมะถันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางได้มากกว่า ในขณะที่ความต้านทานต่อแรงดึงจะไม่ขึ้นกับระบบวัลคาไนซ์ นอกจากนี้ในการศึกษาความต้านทานต่อการบ่มเร่งของยางเบลนด์ พบว่ายางเบลนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันแบบปกติจะมีความต้านทานต่อการบ่มเร่งที่ต่ำกว่าการใช้ระบบกำมะถันแบบประสิทธิภาพ เนื่องจากพันธะเชื่อมขวางในการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันแบบประสิทธิภาพจะเป็นแบบ โมโนซัลฟิดิก และไดซัลฟิดิก ซึ่งจะมีความเสถียรมากกว่าพันธะเชื่อมขวางแบบโพลีซัลฟิดิกในการใช้ระบบกำมะถันแบบปกติ

2.6.4 การใช้ยางรีเคลมเป็นองค์ประกอบเบลนด์ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

นอกจากใช้งานยางรีเคลมในการเบลนด์ร่วมกับยางหรือเทอร์โมพลาสติกดังที่กล่าวผ่านมา นี้ ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้ยางรีเคลมเป็นองค์ประกอบเบลนด์ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ เช่น ในการศึกษาของ Magioli *et al.* (2010) ได้ศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene butadiene rubber, SBR) ยางรีเคลม และพอลิพรพิลีน โดยใช้ระบบวัลคาไนซ์เปอร์ออกไซด์ ทำการแปรอัตราส่วนระหว่างไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) และสารโคเอเจนท์ *N,N*-m-phenylene-bis-maleimide (BMI) และศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีและไม่มียางสไตรีนบิวทาไดอีนเป็นองค์ประกอบเบลนด์ จากผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณสารโคเอเจนท์ในระบบเปอร์ออกไซด์ ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และความแข็งที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก BMI สามารถช่วยในการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์เบลนด์โดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพันธะคู่ของ BMI กับอนุมูลอิสระในยางรีเคลมและพอลิพรพิลีน และพบว่าสูตรที่มีองค์ประกอบของยางสไตรีนบิวทาไดอีนทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีสมบัติเด่นด้านความสามารถในการยืดจนขาด นูรอัสวาริ (2557) พบว่าการใช้ยางรีเคลมเป็นองค์ประกอบในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และพอลิพรพิลีน มีผลทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมขวางในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของยางรีเคลมเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการใช้สารวัลคาไนซ์ในปริมาณคงที่แทนที่จะไปวัลคาไนซ์โมเลกุลยางธรรมชาติเพียงอย่างเดียว สารวัลคาไนซ์บางส่วนสามารถเข้าไปวัลคาไนซ์ยางรีเคลมได้ด้วยทำให้ระดับการวัลคาไนซ์ในยางธรรมชาติลดลง เป็นผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่ามอดุลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และสมบัติการไหลลดลง เนื่องจากความแตกต่างระหว่างเฟสและความเข้ากันได้ขององค์ประกอบ รวมถึงการที่ยางรีเคลมมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเนื่องจากโมเลกุลถูกตัดในกระบวนการเตรียมยางรีเคลม ในขณะที่ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของยางรีเคลมที่มากขึ้น และในการศึกษาอิทธิพลของระดับของหมู่ไอพอกไซด์ในยางธรรมชาติไอพอกไซด์ต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติไอพอกไซด์ ยางรีเคลม และพอลิพรพิลีน โดยแปรระดับของหมู่ไอพอกไซด์ในยางธรรมชาติไอพอกไซด์เท่ากับ 25 และ 50 เปอร์เซนต์โมล พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และสมบัติการไหลมีค่าลดลง ตามปริมาณหมู่ไอพอกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และพอลิพรพิลีนที่ลดลง เนื่องจากยางธรรมชาติไอพอกไซด์มีสภาพขั้วที่แตกต่างจากเฟสยางรีเคลมและพอลิพรพิลีน

2.6.5 การปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบ

ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบ โดยทั่วไปนิยมทำโดยการตัดแปรพื้นผิวของยางรีเคลมและการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ เพื่อให้มีหมู่ฟังก์ชันที่เข้ากันได้กับคู่เบลนด์ได้มากขึ้น ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาในหัวข้อนี้ เช่น Shanmugharaj *et al.* (2007) ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จากการเบลนด์ระหว่างยางรีเคลมกับพอลิโพรพิลีนโดยใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ คือ พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิกอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene grafted maleic anhydride, PP-g-MA) ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการใช้ยางรีเคลมที่ไม่ตัดแปรพื้นผิว และยางรีเคลมที่ตัดแปรพื้นผิวด้วยอัลลิลเอมีน (Allylamine) พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีองค์ประกอบของยางรีเคลมตัดแปรพื้นผิวจะมีความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยึดจนขาดสูงกว่ากรณีของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ใช้ยางรีเคลมที่ไม่ตัดแปรพื้นผิว ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความเข้ากันได้ระหว่างยางรีเคลมตัดแปรพื้นผิวกับพอลิโพรพิลีน เนื่องจากยางรีเคลมที่ตัดแปรพื้นผิวด้วยอัลลิลเอมีนทำให้มีหมู่เอมีนอยู่ที่ผิว ซึ่งหมู่เอมีนสามารถเกิดอันตรกิริยากับมาลิกอิกแอนไฮไดรด์จากสารเพิ่มความเข้ากันได้ PP-g-MA ทำให้ยางรีเคลมที่ตัดแปรพื้นผิวด้วยอัลลิลเอมีนถูกเคลือบด้วย PP-g-MA ซึ่งช่วยในการเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ และปรับปรุงการกระจายตัวของยางรีเคลมในเฟสพอลิโพรพิลีน ต่อมา Zhang *et al.* (2009b) ศึกษาการตัดแปรพื้นผิวยางรีเคลมด้วยน้ำมันดิน (Bitumen) ร่วมกับการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ 3 ชนิดคือ styrene-ethylene/butylene-styrene (SEBS), Maleic anhydride grafted styrene-ethylene/butylene-styrene (SEBS-g-MA) และ Maleic anhydride grafted Ethylene propylene diene (EPDM-g-MA) ในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จากการเบลนด์ระหว่างยางรีเคลมกับพอลิโพรพิลีน พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีองค์ประกอบของยางรีเคลมที่ตัดแปรพื้นผิวด้วยน้ำมันดินจะมีค่าความสามารถในการยึดจนขาดและความเสถียรต่อความร้อนที่สูงกว่ากรณีการใช้ยางรีเคลมที่ไม่ได้ตัดแปรพื้นผิว เนื่องจากน้ำมันดินสามารถเกิดปฏิกิริยากับกำมะถันในยางรีเคลม ทำให้ลดโอกาสที่พันธะเชื่อมขวางที่ถูกตัดขาดสามารถกลับมารวมตัวกันใหม่ จึงทำให้ยางรีเคลมมีพันธะเชื่อมขวางน้อยลง และมีโอกาสที่สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนไหวได้มากขึ้น (เกิดการเกี่ยวพันของโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น) และในการศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ร่วมกับยางรีเคลมที่ตัดแปรพื้นผิวด้วยน้ำมันดินพบว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้จะช่วยปรับปรุงความสามารถในการยึดจนขาด และความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ได้ โดยสามารถเรียงลำดับประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวจากมากไปน้อย ดังนี้ SEBS>SEBS-g-MA>EPDM-g-MA เนื่องจากจะมีส่วนของเอทิลีนบิวทาไดอีนที่สามารถเข้ากับพอลิโพรพิลีนได้ นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยที่ทำการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีองค์ประกอบของยางรีเคลมโดยใช้รังสี เช่น การศึกษาของ Zhang *et al.* (2009a) ได้ศึกษาการใช้พลาสมาในการตัดแปรพื้นผิวของยางรีเคลมเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้

ระหว่างยางรีเคลมกับยางไนไตรล์ พบว่ายางรีเคลมมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH groups) ปรากฏอยู่บนพื้นผิวภายหลังจากทำทรีทเมนต์ด้วยพลาสมา (Plasma treatment) และในการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์พบว่าการใช้ยางรีเคลมที่ตัดแปรพื้นผิว ค่ามอดุลัส ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาด สูงกว่ากรณียางเบลนด์ที่ผสมยางรีเคลมที่ไม่ตัดแปรพื้นผิว เนื่องจากยางรีเคลมที่ตัดแปรพื้นผิวจะมีออกซิเจนที่ผิวของยางรีเคลมซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างผิวของยางรีเคลมตัดแปรพื้นผิวและยางไนไตรล์

Prince of Songkla University
Pattani Campus