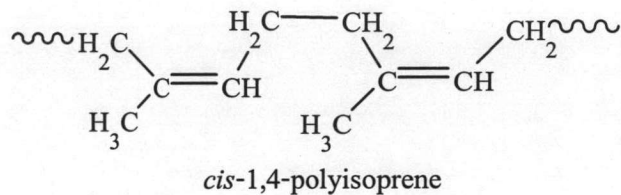
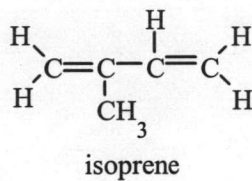


บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)⁸

ยางธรรมชาติที่นำมาใช้ในทางการค้าได้จากต้นยางพารา ซึ่งมีชื่อเรียกทางพฤกษศาสตร์ว่า '*Hevea Brasiliensis*' ที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็น *cis*-1,4-พอลิไอโซพรีน ซึ่งประกอบด้วยหน่วยไอโซพรีนต่อกันเป็นสายโซ่ยาวที่มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของไอโซพรีนและ *cis*-1,4-พอลิไอโซพรีน⁸

2.1.1 น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex)^{9, 10}

น้ำยางที่กรีตได้จากต้นยางพารา (*Hevea Brasiliensis*) มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่น คล้ายน้ำนม มีความหนาแน่น 0.98 g/cm³ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ประมาณ 6.8 ประกอบด้วยอนุภาคขนาดต่างๆ กัน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 5 ไมครอน แขนงลอยกระจัดกระจายอยู่ในของเหลวที่เรียกว่า 'เซรัม' (serum) อนุภาคเหล่านี้มีประจุเป็นลบซึ่งผลึกกันตลอดเวลา จึงทำให้อนุภาคเหล่านี้แขวนลอยและคงสภาพเป็นยางเหลวอยู่ได้จนกว่าจะมีสภาพแวดล้อมและปัจจัยต่างๆ มารบกวน

น้ำยางธรรมชาติยังประกอบด้วยส่วนที่ไม่ใช่ยาง เช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และอนุมูลของโลหะ เป็นต้น ปริมาณเนื้อยางในน้ำยางธรรมชาติอาจเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 25-45% ขึ้นกับชนิดของต้นยาง วิธีการกรีตยาง คุณภาพของดินที่ใช้ปลูก สภาพภูมิอากาศ และภูมิประเทศที่ใช้ปลูกยาง เป็นต้น เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติมีเนื้อยางเพียง 30-40% นอกนั้นเป็นน้ำ และสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยาง จึงมีการนำน้ำยางธรรมชาติไปใช้ประโยชน์โดยตรงน้อยมาก เนื่องจากมีปริมาณน้ำสูงและไม่สามารถเก็บรักษาน้ำยางสดเอาไว้ได้นาน เพราะเกิดการเน่าเสียเนื่องจากเชื้อราและแบคทีเรีย

และจับตัวเป็นก้อนก่อนส่งถึงโรงงานอุตสาหกรรม ตลอดจนสิ้นเปลืองค่าขนส่งน้ำยางจากแหล่งต้นยางไปยังโรงงานผลิตวัตถุดิบสำเร็จรูป จึงจำเป็นต้องแปลงสภาพน้ำยางสดให้เป็นน้ำยางข้นเสียก่อน

2.1.2 น้ำยางข้น (Concentrated Latex)

น้ำยางข้น หมายถึง น้ำยางที่ได้ผ่านการไล่น้ำออกไปบางส่วน เพื่อให้มีเนื้อยางเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 60% ของน้ำหนักยางทั้งหมด เพื่อให้ง่ายต่อการเก็บรักษา และขนส่ง อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่ใช้น้ำยางข้นเป็นวัตถุดิบจะมีความเสถียรมากขึ้น โดยน้ำยางข้นจะถูกจำแนกตามวิธีการผลิตน้ำยางข้น และชนิดของสารรักษาสภาพที่ใช้

การผลิตน้ำยางข้นในทางการค้ามี 4 วิธี ดังนี้

- วิธีทำให้เกิดครีม (Creaming)
- วิธีใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuging Machine)
- วิธีแยกด้วยไฟฟ้า (Electrodecandation)
- วิธีทำให้น้ำระเหย (Evaporation)

วิธีทำให้เกิดครีม (Creaming)

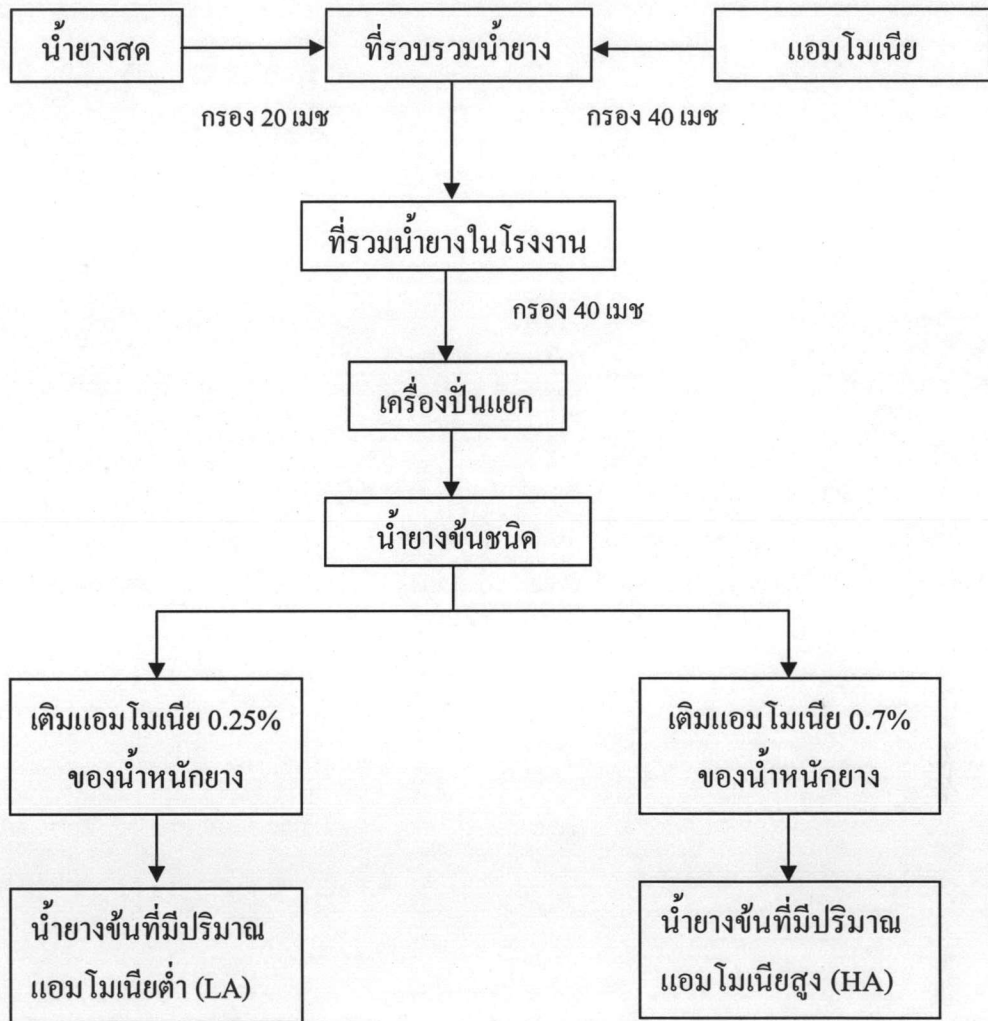
โดยใช้สารทำให้เกิดครีม (creaming agent) เช่น โซเดียมหรือแอมโมเนียมอัลจิเนต (sodium or ammonium alginate) เติมลงในน้ำยางสด แล้วคนให้เข้ากัน ทิ้งไว้ระยะหนึ่งจะพบว่าน้ำยางแยกเป็น 2 ชั้น ชั้นล่างเป็นของเหลวที่มีส่วนของยางเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะถูกแยกออกไป ชั้นบนเป็นครีมที่มีเนื้อยางสูง ประกอบด้วยปริมาณของแข็งทั้งหมด (% total solid content, %TSC) ประมาณ 61.5% และมีปริมาณเนื้อยางแห้ง (% dry rubber content, %DRC) 60% หลังจากนั้นเติมแอมโมเนีย 0.6–0.8% ของน้ำหนักยาง ลงไปเพื่อรักษาสภาพน้ำยางข้น แล้วจึงบรรจุลงถังที่มีความจุ 200 ลิตร แต่วิธีนี้ไม่นิยมทำเพราะยุ่งยาก และสิ้นเปลืองเวลา

วิธีใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuging Machine)

เป็นวิธีที่ใช้ผลิตน้ำยางข้นในทางการค้า (ประมาณ 95% ของผลผลิตรวม) เครื่องหมุนเหวี่ยงประกอบด้วยถังเหวี่ยงที่หมุนด้วยความเร็ว 7,000–8,000 รอบ/นาที ส่วนประกอบของเครื่อง ส่วนที่สัมผัสกับน้ำยางควรมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของแอมโมเนีย ซึ่งควรทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) ไม่ควรใช้โลหะทองแดง ทองเหลือง ทองสัมฤทธิ์ และแมงกานีส เพราะจะทำให้เนื้อยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น น้ำยางข้นที่ได้มี %TSC ประมาณ 61.5% และมี %DRC 60–62% ส่วนที่เหลือเป็นของเหลวเจือจางเรียกว่า ‘หางน้ำยาง’ (skim latex) ซึ่งจะถูกแยกออกไป เมื่อได้

น้ำยางข้นแล้วจะปรับระดับแอมโมเนียในน้ำยางข้นโดยผ่านแก๊สแอมโมเนียลงไป 0.6–0.8% ของน้ำหนักยาง จะได้น้ำยางที่มีความถ่วงจำเพาะ 0.94–0.95 แล้วจึงบรรจุถังเพื่อจำหน่ายต่อไป

น้ำยางข้นที่ผลิตด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงมี 2 ชนิด คือ ชนิดแอมโมเนียสูง (high ammonia, HA) และชนิดแอมโมเนียต่ำ (low ammonia, LA หรือ LA-TZ) ขั้นตอนการผลิตแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การผลิตน้ำยางข้นชนิด 60%

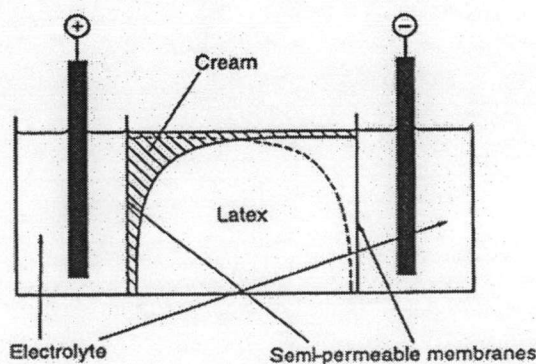
น้ำยางข้นที่ผลิตด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงในทางการค้ายังจำแนกออกเป็น 4 ชนิด ตามระบบรักษาสภาพน้ำยางที่ใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 น้ำยางข้นที่ผลิตด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงในทางการค้า⁹

ชื่อเต็ม	ชื่อย่อ	ส่วนแบ่งทางการค้า (%)	ระบบรักษาสภาพน้ำยาง (%โดยน้ำหนัก)
High or Full Ammonia	HA	66	0.7% แอมโมเนีย
Low Ammonia	LA-TZ	17	0.2% แอมโมเนีย 0.025% ซิงก์ออกไซด์ 0.025% เตตระเมทิลไทอูเรมไดซัลไฟด์ 0.2% แอมโมเนีย
Low Ammonia	LA-SPP	6	0.2% โซเดียมเพนตะคลอโรฟีเนต
Pentachlorophenate			0.2% แอมโมเนีย
Low Ammonia Boric Acid	LA-BA	5	0.24% กรดบอริก

วิธีแยกด้วยกระแสไฟฟ้า

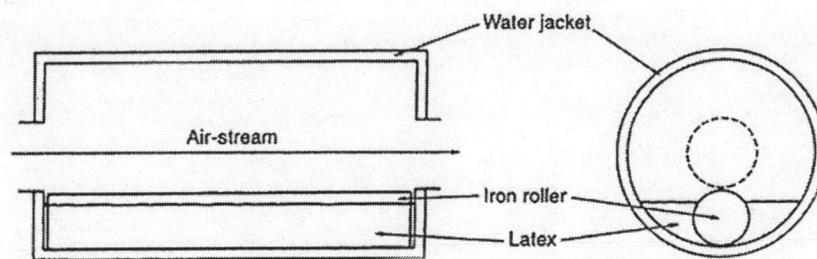
วิธีแยกด้วยกระแสไฟฟ้าทำโดยผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในน้ำยาง ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นภายในเซลล์ อนุภาคของยางจะเคลื่อนเข้าหาจากที่เป็นขั้วบวกซึ่งอยู่ใกล้ที่สุด ทำให้อนุภาคของยางอยู่รวมกันหนาแน่นจนเกิดเป็นน้ำยางข้นขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 นอกจากนี้ ยังสามารถลอยตัวขึ้นสู่ข้างบนจึงสามารถช้อนน้ำยางข้นส่วนนี้ออกจากถังได้ วิธีนี้จะได้น้ำยางข้นที่มี %TSC 62–63% และมี %DRC ประมาณ 60% หลังจากนั้นจึงเติมแอมโมเนีย 0.7% ของน้ำหนักน้ำยาง



รูปที่ 2.3 หลักการของวิธีแยกด้วยกระแสไฟฟ้า¹⁰

วิธีทำให้น้ำระเหย (Evaporation)

การผลิตน้ำยางข้นโดยวิธีระเหยนํ้าเป็นเพียงการระเหยนํ้าออกไปจากนํ้ายางสดเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องเติมสารที่ทำให้นํ้ายางคงตัวและไม่ระเหิดลงไป ได้แก่ กาว (glue) โปแทสหรือสบู่ เพื่อป้องกันไม่ให้นํ้ายางที่ผิวหน้าหรือบริเวณที่นํ้าระเหยจับตัว การผลิตทำโดยกรองนํ้ายางตามปกติ พร้อมทั้งเติมสารที่ทำให้นํ้ายางคงตัวลงไป เช่น โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 0.05% สบู่โปแทสเซียมที่ทำจากนํ้ามันมะพร้าว (potassium coconut oil soap) 2% หลังจากนั้นทำให้นํ้าระเหยด้วยความร้อน โดยผ่านนํ้าร้อนเข้าไปในถัง 2 ชั้น ที่มีนํ้ายางอยู่ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ขณะที่ถังบรรจุนํ้ายางหมุนไปรอบๆ อากาศภายในถังจะถูกดูดออกไป พร้อมกับพานํ้าที่ระเหยจากนํ้ายางออกไปให้เร็วที่สุด วิธีนี้จะได้นํ้ายางข้นที่มี %TSC 70-75% นํ้ายางข้นที่ได้มีความคงตัวสูงสามารถนำไปใช้ประโยชน์โดยผสมกับสารที่มีความหนืดสูง เช่น การทำกาว และซีเมนต์ราดถนน เป็นต้น



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมนํ้ายางข้นโดยวิธีทำให้นํ้าระเหย¹⁰

2.1.3 องค์ประกอบของนํ้ายางข้น

นํ้ายางข้นประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นเนื้อยาง และส่วนเซรุ่มซึ่งเป็นของเหลว โดยเซรุ่มจะมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นโปรตีนและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวของโปรตีน กรดไขมัน เกลืออินทรีย์ และเกลืออนินทรีย์ โดยตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบของนํ้ายางข้นชนิดแอมโมเนียสูง และแอมโมเนียต่ำ ทั้งในส่วนของนํ้ายาง และส่วนของแข็งทั้งหมด

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของน้ำยางข้นและปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยางข้น⁹

องค์ประกอบ	HA		LA-TZ	
	น้ำยางข้น	TSC	น้ำยางข้น	TSC
เนื้อยาง	59.67	97.61	59.61	97.62
โปรตีน	1.06	1.73	1.03	1.69
กรดไขมัน	0.23	0.38	0.23	0.38
เกลือ	0.40	0.28	0.38	0.32
แอมโมเนีย	0.68	—	0.21	—
น้ำ	37.59	—	38.54	—

2.2 ระบบวัลคาไนเซชัน (Vulcanization Systems)¹¹

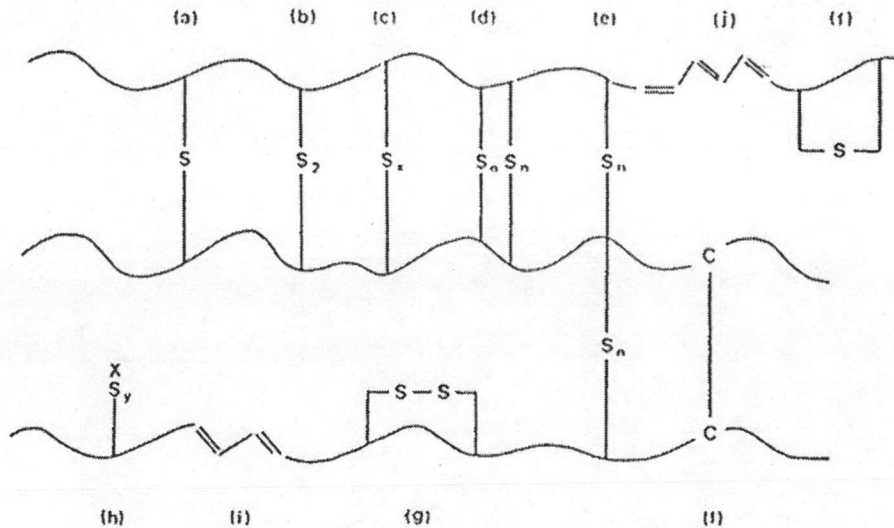
ระบบวัลคาไนเซชันของยาง หมายถึง ระบบที่ประกอบด้วยสารเคมีต่างๆ ที่ทำใหยางคงรูปด้วยการเกิดโครงสร้างเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของยาง แม้ว่าจะประกอบด้วยสารเพียง 0.5–5% โดยน้ำหนักของยางผสม แต่ปริมาณเพียงเล็กน้อยนี้จะมีผลสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และต่อต้นทุนการผลิต ระบบที่มีความสำคัญเป็นระบบที่มีซัลเฟอร์เชื่อมขวางโมเลกุลของยาง โดยใช้ซัลเฟอร์ร่วมกับสารเร่งอินทรีย์ (organic accelerators) ระบบการทำใหยางคงรูปในปัจจุบันจะใช้ปริมาณซัลเฟอร์ลดลง และเพิ่มปริมาณสารเร่งวัลคาไนซ์ หรือการใช้ระบบของสารประกอบที่สลายตัวให้ซัลเฟอร์ (sulphur donors) เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านเสถียรภาพทางความร้อนและต่อการออกซิเดชันของผลิตภัณฑ์ ระบบการคงรูปแบบอื่นๆ ที่ไม่ใช่ซัลเฟอร์หรือสารที่สลายตัวให้ซัลเฟอร์ มีใช้น้อย ระบบเหล่านี้ ได้แก่ การใช้ยูรีเทน (urethanes), เปอร์ออกไซด์ (peroxides), โลหะออกไซด์ (metal oxides) และเรซิน เป็นต้น

2.2.1 วัลคาไนเซชันด้วยซัลเฟอร์ (Sulphur Vulcanization)

ซัลเฟอร์เป็นสารชนิดแรกที่ใช้ในเชิงการค้าเพื่อทำใหยางคงรูป โดยเริ่มจากใช้ซัลเฟอร์เพียงอย่างเดียวผสมกับยางธรรมชาติในสัดส่วนมากถึง 8 ส่วน ต่ออย่าง 100 ส่วน (parts per hundred of rubber, phr) ใช้เวลาถึง 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เพื่อทำใหยางคงรูป การเติมโลหะออกไซด์ (ซิงก์ออกไซด์ 5 phr) กรดไขมันและสารตัวเร่งอินทรีย์ (0.5–2.0 phr) สามารถทำใหยางวัลคาไนซ์ภายในเวลาอันสั้น (2–5 นาที) และการใช้สารที่สลายตัวให้ซัลเฟอร์ได้ (2–3 phr) สามารถทำใหยางที่วัลคาไนซ์แล้วมีสมบัติทางกายภาพ และการใช้งานดีขึ้น

2.2.2 โครงสร้างการเชื่อมขวางโมเลกุล (Cross-link Structure)

สมบัติของยางที่วัลคาไนซ์แล้วขึ้นกับจำนวนหรือความหนาแน่น และรูปแบบของการเชื่อมขวาง ซึ่งเป็นผลมาจากระบบของการวัลคาไนซ์ สำหรับการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยซัลเฟอร์จะมีรูปแบบของการเชื่อมขวางแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะสายเชื่อมขวางโมเลกุล (Network structure)¹¹

- (a) monosulphide (C-S-C); (b) disulphide (C-S-S-C); (c) polysulphide (C-S_x-C);
 (d) parallel vicinal (C-S_n-C), n = 1 - 6; (e) crosslinks attached to common or adjacent carbon atoms; (f) intra ; chain cyclic monosulphide; (g) intra-chain cyclic disulphide;
 (h) pendent sulphidic group terminated by accelerator fragment (x); (i) conjugated diene;
 (j) conjugated triene; (l) carbon-carbon crosslink

โครงสร้าง (a)-(e) เป็นโครงสร้างที่ส่งเสริมสมบัติต่างๆ ของยางที่วัลคาไนซ์แล้ว ส่วนโครงสร้าง (f)-(h) เป็นรูปแบบของการตัดแปรรายโมเลกุลหลักของยาง (main-chain modification) ซึ่งเชื่อว่าเป็นส่วนที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพเช่นเดียวกับโครงสร้าง (i) และ (j) (conjugated dienes and trienes) การเลือกชนิดและปริมาณของสารตัวเร่งวัลคาไนซ์ และการเลือกปริมาณของซัลเฟอร์ มีผลต่อการใช้ซัลเฟอร์อย่างมีประสิทธิภาพในปฏิกิริยาทำให้ยางคงรูป ซึ่งมีผลต่อชนิดและการกระจายของสายเชื่อมขวางโมเลกุลยาง ระบบวัลคาไนเซชันที่มีประสิทธิภาพ (efficient vulcanization, EV) จะมีส่วนของ mono- และ disulphide crosslinks มาก และมี polysulphides น้อย ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน (thermal

aging) และระบบที่มีปริมาณซัลเฟอร์มากกว่าปริมาณสารเร่งวัลคาไนซ์ ที่เรียกว่า 'conventional vulcanization' (CV) จะเกิดการเชื่อมขวางแบบ polysulphide และไซคลิกซัลเฟอร์มาก (cyclic sulphur) ซึ่งส่งผลให้ยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลลดลง และการทนต่อความร้อน ไม่ดี ยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยระบบ semi-EV (มีสัดส่วนความเข้มข้นของซัลเฟอร์กับสารเร่งวัลคาไนซ์ในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน) จะมีสมบัติความทนทานต่อการล้าที่ดีทั้งก่อนและหลังบ่มเร่งด้วยความร้อน

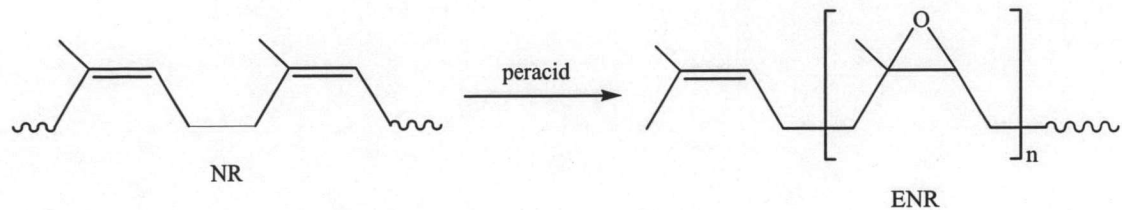
การเชื่อมขวางโมเลกุลทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้ภายหลังการวัลคาไนซ์จะมีสมบัติเปลี่ยนไป เช่น ไม่หลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน และไม่แข็งตัวเมื่อได้รับความเย็น ความสามารถในการละลายลดลง อาจมีเพียงการบวมตัว (swell) เท่านั้น ความทนแรงดึง (tensile strength) ความแข็ง (hardness) ความต้านทานการสึกหรอ (abrasion resistance) และการหักงอที่อุณหภูมิต่ำๆ (low temperature flexibility) เพิ่มขึ้น แก๊สซึมผ่านได้น้อยลง และช่วงอุณหภูมิการใช้งานกว้างขึ้น ถึงแม้ว่าการวัลคาไนซ์มีหลายวิธี แต่กระบวนการดั้งเดิมของกูดเยียร์ก็ยังคงเป็นที่นิยมใช้มากที่สุด ในอุตสาหกรรม

ยางธรรมชาติมีสมบัติทั่วไปที่ดี เช่น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น ความทนแรงดึง และความสะดวกในการนำไปทำผลิตภัณฑ์ เป็นต้น ทำให้ยางธรรมชาติสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวาง แต่ยางธรรมชาติยังมีข้อจำกัดของการใช้งานบางอย่าง เช่น งานที่ต้องการความทนทานตัวทำละลายและน้ำมัน และงานที่ต้องการความต้านทานการซึมผ่านของอากาศ เป็นต้น ในกรณีเหล่านี้ไม่สามารถใช้ยางธรรมชาติได้ จึงหันไปใช้ยางสังเคราะห์แทน เช่น ใช้ยางไนไตรล์ (nitrile rubber, NBR) เมื่อต้องการสมบัติด้านความทนทานตัวทำละลายและน้ำมัน หรือใช้ ยางบิวทิล (butyl rubber, IIR) เมื่อต้องการสมบัติความต้านทานการซึมผ่านของอากาศ (คือสามารถเก็บอากาศได้ดี)

โครงสร้างของยางธรรมชาติจะมีพันธะคู่อยู่ตลอดสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งเป็นพันธะที่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับสารต่างๆ ได้ จึงเป็นจุดสนใจที่จะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของยางเพื่อให้ได้อนุพันธ์ของยางธรรมชาติที่มีสมบัติดีขึ้น และสามารถใช้งานได้กว้างมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ การคัดแปรยางธรรมชาติด้วยกระบวนการอิมพอกซิเคชัน จึงเป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้ดีขึ้น ยางธรรมชาติที่ถูกคัดแปรให้มีหมู่อิมพอกไซด์ในโมเลกุลจะมีสมบัติความทนทานตัวทำละลายและน้ำมันเพิ่มขึ้น ความต้านทานการซึมผ่านของอากาศดีขึ้น การยึดติดกับโลหะ เซรามิก และสิ่งทอดีขึ้น และความต้านทานการฉีก ไกลบนพื้นเปียกดีขึ้นเช่นกัน

2.3 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized Natural Rubber; ENR)⁶

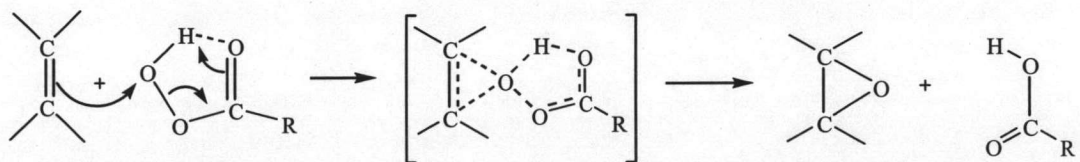
กระบวนการอีพอกซิเดชันยางธรรมชาติถูกค้นพบโดย Pummerer และ Burkard ในปี ค.ศ. 1922 ซึ่งการทำปฏิกิริยากับเปอร์ออกไซด์ได้หมู่อีพอกไซด์บนโซ่โมเลกุลของยาง ดังแสดงในรูปที่ 2.6



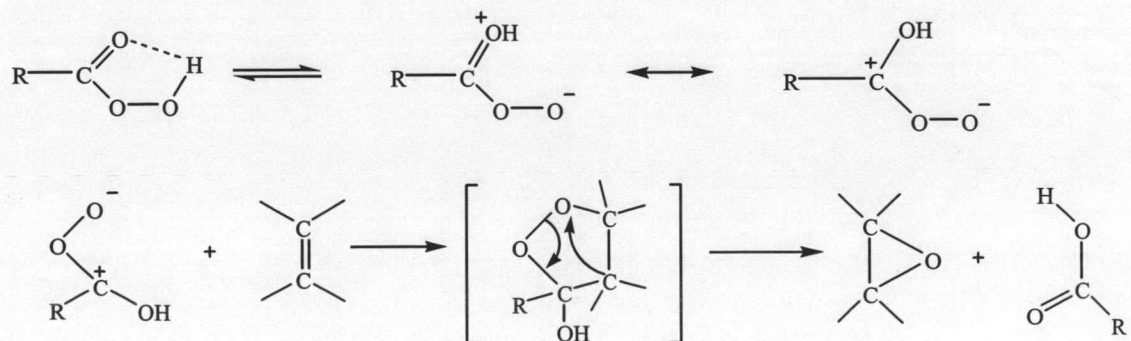
รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันของยางธรรมชาติ⁶

กลไกปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันของยางธรรมชาติด้วยกรดเปอร์ออกไซด์ อาจเป็นได้ 2 กลไก คือ

1. **Molecular mechanism** (หรือ 1,1-addition mechanism) เสนอครั้งแรกโดย Bartlett⁷ เป็นกลไกที่เกี่ยวกับการเข้าเกาะของกรดเปอร์ออกไซด์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติ ดังนี้ :

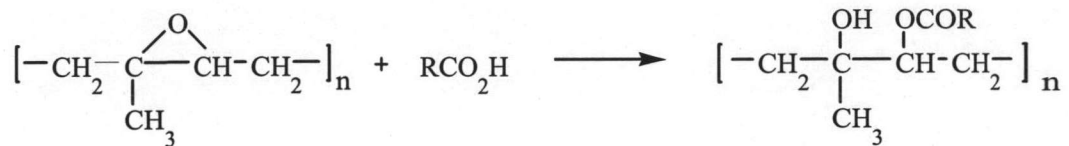


2. **1,3-Dipolar mechanism** (หรือ 1,3-addition mechanism) เสนอโดย Kwart และ Hoffman⁸ กลไกนี้เกี่ยวกับปฏิกิริยาการเติมแบบ 1,3-dipolar ของไฮดรอกซีคาร์บอนิลออกไซด์ (จากการเกิดพันธะไฮโดรเจนในโมเลกุลของกรดเปอร์ออกไซด์) บนโมเลกุลของยางธรรมชาติ ดังนี้ :



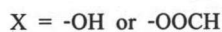
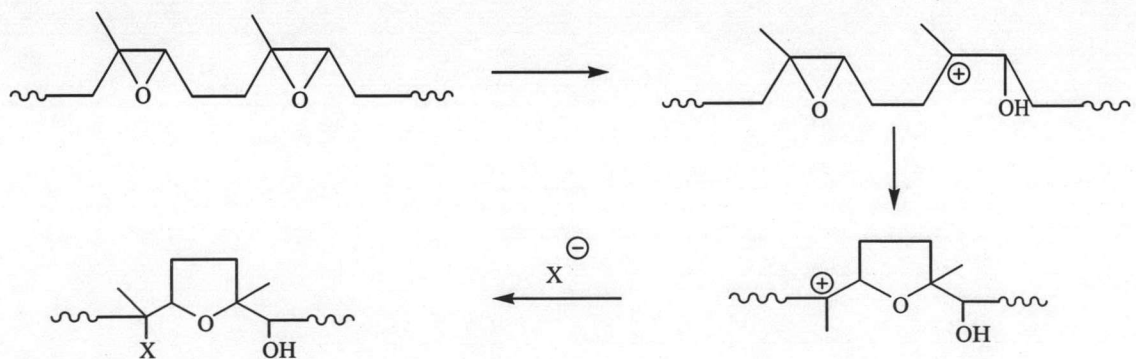
แต่ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่บริสุทธิ์ เนื่องจากการเปิดออกของวงแหวน หมู่อิพอกไซด์ วิธีนี้จึงไม่เป็นที่สนใจมากนัก และในช่วงยุคที่ 80 จึงเริ่มมีกระบวนการอิพอกซิเดชัน โดยใช้กรดเปอร์แอซิดิก และกรดเปอร์ฟอร์มิก ซึ่งวิธีการนี้ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่บริสุทธิ์ปราศจากการเปิดออกของวงแหวนอิพอกไซด์

ในปี ค.ศ. 1985 Gelling¹² พบว่าความเข้มข้นของกรด และอุณหภูมิของปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันเป็นตัวควบคุมปริมาณการเปิดวงที่เกิดขึ้น ซึ่งส่งผลถึงสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น เมื่อความเป็นกรด และ/หรืออุณหภูมิที่ใช้สูง ยาง ENR ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับกรด (ผลพลอยได้จากปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน) ทำให้วงแหวนอิพอกไซด์เปิดออก กลายเป็นสารประกอบไฮดรอกซี-เอสเทอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

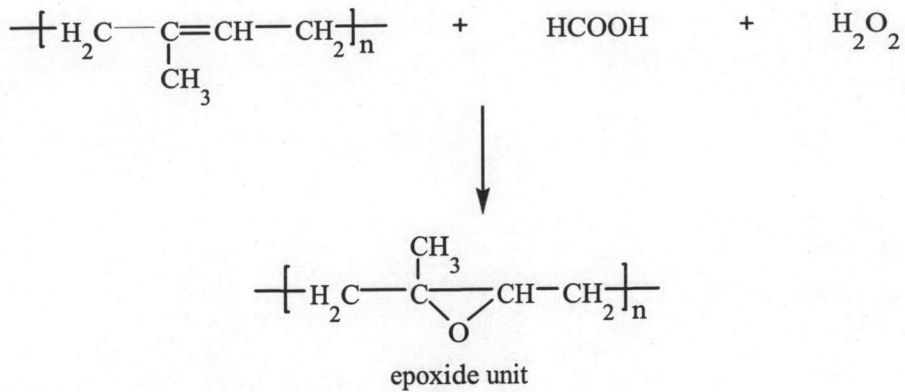


รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบไฮดรอกซีเอสเทอร์¹²

ปฏิกิริยาอีกปฏิกิริยาหนึ่งที่สามารถเกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะกรณีที่มีหมู่อิพอกไซด์มากๆ คือ หมู่อิพอกไซด์ที่อยู่ติดกัน (เมื่อมีกรดอยู่ด้วย) จะเกิดปฏิกิริยาซึ่งกันและกันกลายเป็นสารอนุพันธ์เตตระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran) ดังนี้



วิธี 'in situ' epoxidation นี้ยังธรรมชาติด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และกรดฟอร์มิก เพื่อให้ได้ยาง ENR ถูกคิดค้นขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1982 (สิทธิบัตรของประเทศอังกฤษเลขที่ 2113692) ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้องหรือที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



หลังจากที่ค้นพบวิธีนี้ ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ได้กลายเป็นที่สนใจอีกครั้ง ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1988 เป็นต้นมา ประเทศมาเลเซียได้เริ่มผลิตยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ในเชิงการค้าขึ้นมา 2 เกรด คือ ENR 25 และ ENR 50 ซึ่งมีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ประมาณ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2.3.1 การวิเคราะห์ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์^{2,5}

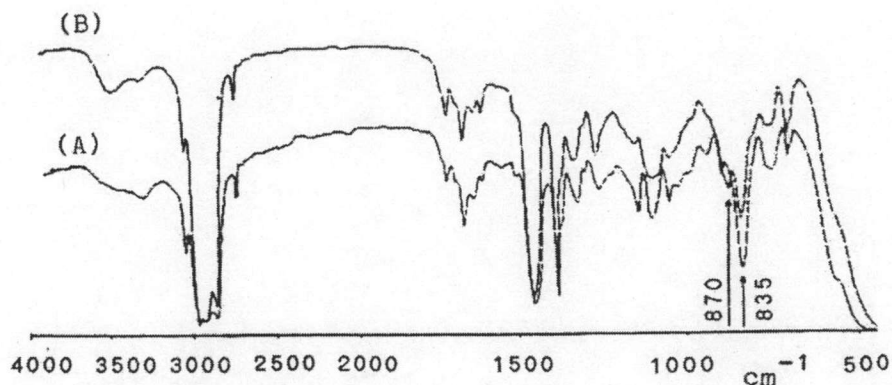
การวิเคราะห์ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ จะใช้เทคนิคต่างๆ ดังนี้

อินฟราเรด (IR) สเปกตรัม

ใช้วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (functional group) หากเกิดหมู่อีพอกไซด์จะปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 870 และ 1240 cm^{-1} (การสั่นแบบเส้นของ C-O ในหมู่อีพอกไซด์) ในขณะที่ตำแหน่ง 835 cm^{-1} (จากการสั่นแบบงอของ C-H ใน *cis*-1,4-polyisoprene) ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เปอร์เซ็นต์การเกิดอีพอกซีเดชันอาจคำนวณได้โดยอาศัยวิธีของ Davey และ Loadman¹⁶ ดังนี้

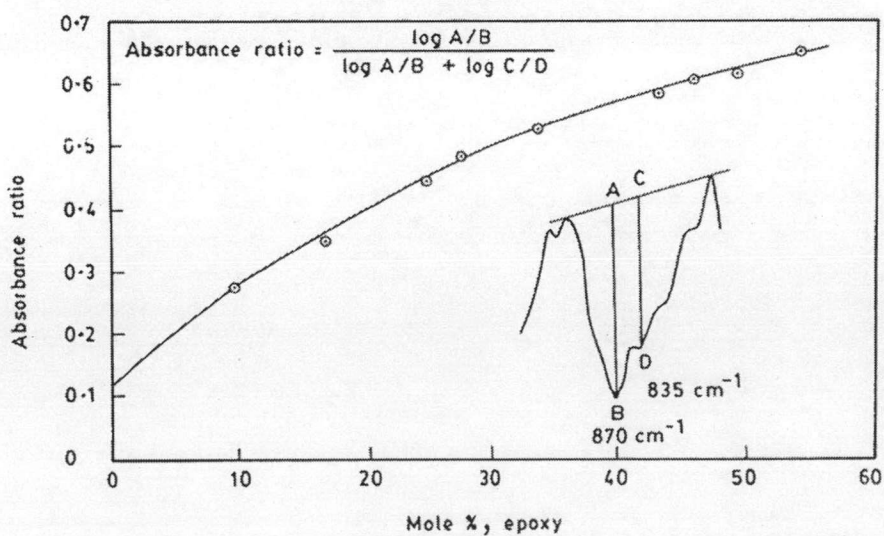
$$\text{Ar} = \frac{a_{870}}{a_{835} + a_{870}}$$

- เมื่อ Ar : ค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสง
 a_{835} : ค่าการดูดกลืนแสงที่เลขคลื่น 835 cm^{-1}
 a_{870} : ค่าการดูดกลืนแสงที่เลขคลื่น 870 cm^{-1}



รูปที่ 2.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (A) ยางธรรมชาติ (B) ยางธรรมชาติอีพอกซีไคซ์

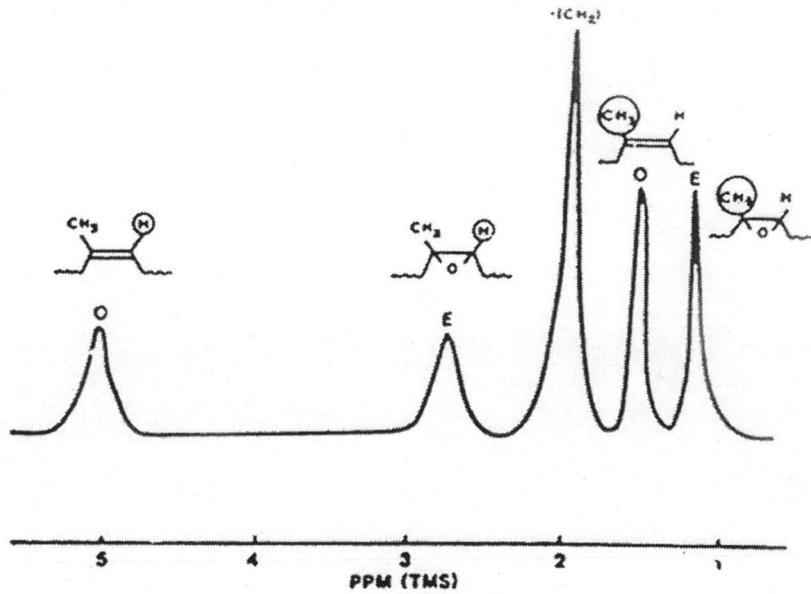
นำค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณปริมาณหมู่อีพอกไซด์ โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานที่พล็อตระหว่างค่าโมลเปอร์เซ็นต์อีพอกไซด์กับอัตราส่วนการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมที่ตำแหน่งเลขคลื่น $870/835 \text{ cm}^{-1}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟมาตรฐานสำหรับหาโมลเปอร์เซ็นต์อีพอกไซด์ของ ENR จากการวิเคราะห์ด้วย IR⁵

นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ของโปรตอน (Proton Nuclear Magnetic Resonance; ¹H-NMR)

วิธี ¹H-NMR เป็นวิธีที่รวดเร็ว และให้ข้อมูลทางโครงสร้างที่เป็นประโยชน์อีกด้วย วิธีการวิเคราะห์คอมพาวด์อ็อกไซค์ โดยเทคนิค ¹H-NMR ถูกพัฒนาเป็นครั้งแรกโดย Dubertaki⁵ และ Miles¹⁷ วิธีนี้ใช้วิเคราะห์หาตำแหน่งของโปรตอน และยังใช้หาจำนวน โมลเปอร์เซ็นต์ของอ็อกไซค์ได้อีกด้วย ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงไว้ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ¹H-NMR สเปกตรัมของ ENR-50²

¹H-NMR สเปกตรัม เป็นการสนับสนุนตำแหน่งของโปรตอนในโครงสร้างของยาง ENR เพื่อยืนยันว่าเป็นยางธรรมชาติอ็อกไซค์ไคซ์จริง การคำนวณหาจำนวน โมลเปอร์เซ็นต์ของอ็อกไซค์ ทำโดยเปรียบเทียบพื้นที่ใต้เส้นโค้งระหว่างสัญญาณที่ตำแหน่ง δ 2.70 ppm (CH₂-CH-O-CH₂-) และที่ตำแหน่ง δ 5.14 ppm ซึ่งเป็นโปรตอนโอเลฟินส์ของโมเลกุล *cis*-พอลิไอโซพรีน (CH₂-C=CH-) โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

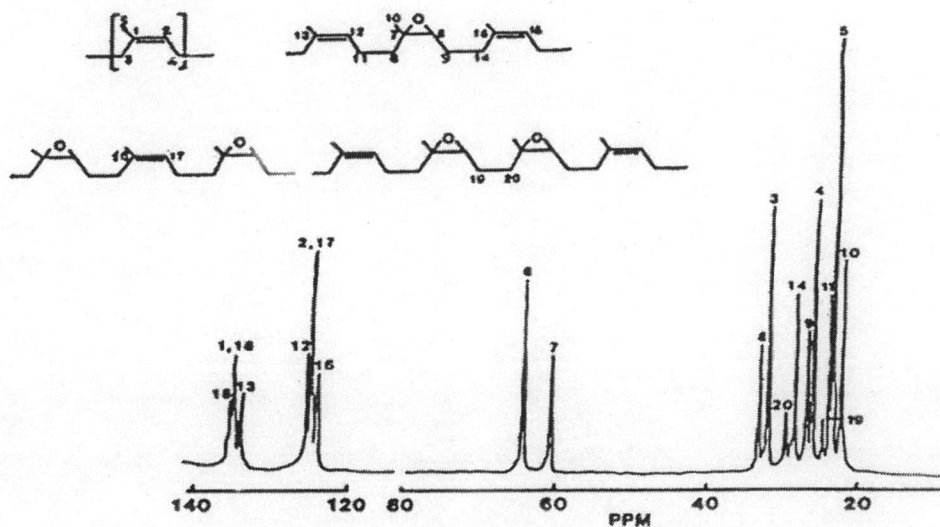
$$\text{Mol\%epoxide} = \frac{A_{2.70}}{A_{5.14} \times A_{2.70}} \times 100$$

- เมื่อ A_{2.70} : พื้นที่ใต้เส้นโค้งของสัญญาณที่ตำแหน่ง 2.70 ppm
- A_{5.14} : พื้นที่ใต้เส้นโค้งของสัญญาณที่ตำแหน่ง 5.14 ppm

จากตัวอย่างในรูปที่ 2.10 เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ใต้เส้นโค้งที่ตำแหน่งทั้งสองจะมีค่าเท่ากัน แสดงว่าเป็นผลผลิตของยาง ENR-50 คือ มีพันธะคู่ที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นวงแหวนอ็อกไซค์เท่ากับพันธะคู่ที่ยังไม่ได้เกิดปฏิกิริยาอ็อกไซค์เดชัน

นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ของคาร์บอน-13 (^{13}C -NMR) สเปกตรัม

ใช้วิเคราะห์เพื่อศึกษาหาตำแหน่งของคาร์บอนใน โครงสร้างของยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ^{13}C -NMR สเปกตรัมของ ENR-20²

จากรูปที่ 2.11 จะสังเกตได้ว่า คาร์บอนแต่ละตำแหน่งในโครงสร้างของยาง ENR นั้นมีความแตกต่างกันอย่างมาก ซึ่งการแปรผลได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 ด้วยแล้ว จากผลของ ^{13}C -NMR สามารถสรุปได้ว่า การเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันมีการกระจายทั่วไปในโครงสร้างของยาง ENR และกระจายเป็นแบบสุ่ม (random) คือ ไม่เป็นระเบียบ

2.3.2 สมบัติของยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์

ในปี ค.ศ. 1985 Baker, Gelling และ Newell¹² ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของยาง ENR ที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว โดยใช้ระดับอีพอกไซด์ 50 25 และ 10 โมลเปอร์เซ็นต์ พบว่าเมื่อปริมาณของอีพอกไซด์เพิ่มขึ้น จะทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส โดยประมาณต่อโมลเปอร์เซ็นต์อีพอกไซด์ ซึ่งส่งผลให้สมบัติการกระดอนของ ENR-50 ลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งจะแสดงสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ ชนิดต่างๆ ที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ และยางไนไตรล์ เมื่อระดับอีพอกซิเดชันเพิ่มขึ้นสมบัติการกระดอนที่อุณหภูมิห้องจะลดลงทำให้ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์เป็นยางที่

มี damp สูง และที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันจะมีสมบัติการกระดอนสูงเหมือนยางธรรมชาติ

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์ชนิดต่างๆ ที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติและยางไนไตรล์⁶

	NR	ENR-50	ENR-25	ENR-10	NBR
Cure, min at 150°C	45	22	40	50	50
Tensile strength, MPa	27.0	27.3	25.6	25.4	15.3
Elongation at break, %	550	565	580	515	365
Modulus at 300%, MPa	7.7	8.7	6.7	8.0	9.0
Hardness, IRHD	59	58	52	54	61
Resilience at 23°C, %	78	24	59	73	32
Fatigue, 50-150% extension, kcs	1300	317	615	>1380	35
Goodrich HBU, °C	43	51	45	32	88

ถึงแม้ยางธรรมชาติจะถูกดัดแปรทำให้ได้ยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์ที่มี 50 โมลเปอร์เซ็นต์ แต่ยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์ยังสามารถเกิด strain crystallization ได้ ดังนั้น จึงทำให้ยาง ENR มีความทนแรงดึงสูง ในปีค.ศ. 1983 Davies และคณะ¹³ ได้ทำการศึกษายาง ENR ด้วย X-ray diffraction พบว่ายาง ENR สามารถเกิด strain crystallization ได้ ปฏิกริยาอิพอกซีเคชันเป็น stereospecific จึงทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มี cis-1,4 configuration โดยออกซิเจนอะตอมของยาง ENR สามารถใส่ลงได้พอดีกับ crystal lattice ของยางธรรมชาติโดยไม่ทำให้เกิดความเครียดขึ้น อย่งไรก็ตาม เมื่อมีโมลเปอร์เซ็นต์มากกว่า 50 โมลเปอร์เซ็นต์ปริมาณความเป็นผลึกจะลดลง

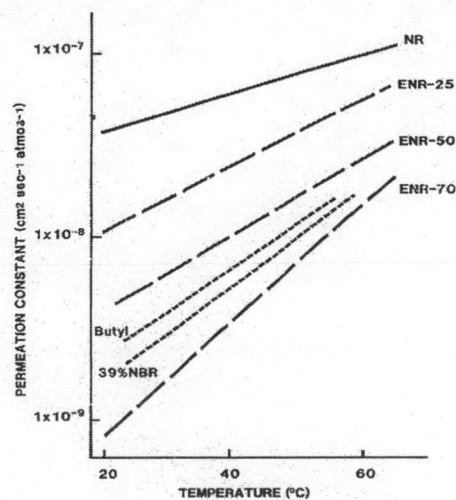
จากตารางที่ 2.4 จะเห็นว่า กระบวนการอิพอกซีเคชันช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อตัวทำละลาย และน้ำมันของยางธรรมชาติ

ตารางที่ 2.4 ความทนน้ำมันของยาง ENR เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ และยางไนไตรล์⁶

	% ของปริมาตรที่เพิ่มขึ้น (4 วัน ที่ 23°C)			
	NR	ENR-25	ENR-50	NBR
ASTM No. 1 oil	15	12	0.1	0.2
ASTM No. 2 oil	28	3	0.6	0.3
ASTM No. 3 oil	78	40	1.1	0.7

ตารางที่ 2.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยาง ENR-25 และ ENR-50 ในน้ำมัน ASTM No. 1-3 พบว่าที่การตัดแปร 25 โมลเปอร์เซ็นต์ เหมาะที่จะนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งานที่ไม่ต้องสัมผัสกับน้ำมันมากนัก ส่วนยาง ENR-50 มีความต้านทานน้ำมันเทียบได้กับยางไนไตรล์ (ระดับกลาง) ดังนั้น จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ดังนี้ สายยางดูดน้ำมัน, seal, oil-well pipe protector และอื่นๆ

นอกจากนี้ กระบวนการออกซิเดชันยังลดความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ เพื่อศึกษาถึงศักยภาพของยาง ENR ในการนำไปใช้เป็นยางในรูปที่ 2.12 แสดงค่าคงที่ของการซึมผ่านของอากาศผ่านยาง ENR-25, ENR-50 และ ENR-70 เปรียบเทียบกับยางบิวทิล และยางไนไตรล์ที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ 39 เปอร์เซ็นต์ ที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 20-60 องศาเซลเซียส (สำหรับการนำไปใช้งานในด้าน tire tube และ liner การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึง) ถึงแม้ว่าที่ 70 โมลเปอร์เซ็นต์ออกซิเดชันจะปรับปรุงความสามารถในการซึมผ่านของอากาศจนมีความสามารถใกล้เคียงกับยางบิวทิล ในทางปฏิบัติการตัดแปรที่ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ก็เพียงพอแล้ว



รูปที่ 2.12 ค่าคงที่ของการซึมผ่านของอากาศที่อุณหภูมิต่างๆ ของยางแต่ละชนิด⁶

ยาง ENR สามารถใช้ซิลิกาเสริมแรงได้ (ไม่ต้องใช้ coupling agents) มีการรายงานว่าทั้งยาง ENR 25 และ ENR 50 จะให้สมบัติที่เหมือนกันเมื่อเสริมแรงด้วยซิลิกา และกับคาร์บอนแบล็ก เช่น N330 ดังแสดงในตารางที่ 2.5 (สูตรการเตรียมแสดงในตารางที่ 2.6) โดยความแข็ง โมดูลัส และสมบัติความทนแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับสารตัวเติมทั้ง 2 ตัว นอกจากนี้ ยังมีความคล้ายกันทางด้านลักษณะความทนต่อการสึกหรอ และความร้อนสะสม ซึ่งเป็นส่วนสำคัญสำหรับการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบยาง ENR ซึ่งผ่านการวัลคาไนซ์แล้วที่มีซิลิกาและคาร์บอนแบล็ก เป็นสารตัวเติม^a

	ENR-25		ENR-50	
	คาร์บอนแบล็ก ^a	ซิลิกา ^a	คาร์บอนแบล็ก ^a	ซิลิกา ^a
Hardness, IRHD	69	67	73	68
Modulus at 300%, MPa	12.4	12.8	13.5	12.6
Tensile strength, MPa	25.4	21.0	24.5	22.4
Elongation at break, MPa	435	405	500	435
Abrasion, Akron, min/500rev	14	15	11	14
DIN, mm	272	250	278	289
Goodrich heat build-up, from 100°C, °C	7	7	23	19

^a50 phr คาร์บอนแบล็ก (N330) หรือ 50 phr ซิลิกา (Hi-Sil 233)

ตารางที่ 2.6 สูตรการเตรียมยาง ENR ซึ่งผ่านการวัลคาไนซ์แล้วที่มีซิลิกาและคาร์บอนแบล็ก เป็นสารตัวเติม¹⁴

	NR		ENR-25		ENR-50	
	Black	Silica	Black	Silica	Black	Silica
Rubber	100	100	100	100	100	100
Sodium carbonate	-	-	0.3	0.3	0.3	0.3
Black (N330)	50	-	50	-	50	-
Silica (Hi-sil 233)	-	50	-	50	-	50
Process oil	4	4	4	4	4	4
Zinc oxide	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2	2
Antioxidant	2	2	2	2	2	2
Sulphur	2	2	2	2	2	2
MBS	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
DPG	-	0.5	-	0.5	-	0.5

ความต้านทานการลื่นไถลเป็นสมบัติที่สำคัญสำหรับนํายางไปใช้ทำยางรถยนต์ การทดสอบจะนํายางผสมสารเคมีไปทำยางรถยนต์ แล้วนำไปทดสอบการลื่นไถลบนพื้นผิวที่เปียก และพื้นผิวที่เป็นน้ำแข็ง โดยเปรียบเทียบยาง ENR ที่ระดับต่างๆ กับยางธรรมชาติ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่ายาง ENR-25 เป็นระดับที่ดีที่สุดเพื่อให้ได้สมบัติด้านความต้านทานการลื่นไถลบนพื้นผิวทั้งสองแบบ

ตารางที่ 2.7 ความต้านทานการลื่นไถลของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว²

	การลื่นไถลบนพื้นเปียก (20°C)		การลื่นไถลบนพื้นน้ำแข็ง (-10°C)
	พื้นคอนกรีตผิวเรียบ	พื้นคอนกรีตผิวขรุขระ	
NR	100	100	100
ENR-25	141	130	91
ENR-50	156	132	48
ENR-75	121	117	25

2.4 สารตัวเติมหรือฟิลเลอร์ (Fillers)¹⁵

การใช้สารตัวเติมในยาง เพื่อทำผลิตภัณฑ์ยางสำเร็จรูปเป็นที่รู้จักกันมานานพอๆ กับการนำยางมาใช้ประโยชน์ ในสมัยเริ่มแรกที่เริ่มใช้ประโยชน์จากยาง ได้มีการใช้คาร์บอนแบล็กสำหรับปรับปรุงการเสื่อมสภาพของยางอันเนื่องจากแสง ซึ่งการใช้สารตัวเติมในสมัยแรกมีจุดประสงค์เพื่อส่งเสริมสมบัติบางอย่างของยาง และนอกจากนี้ยังได้ปรากฏว่ามีการใช้สารตัวเติมที่ไม่ใช่คาร์บอนแบล็ก (non-black filler) เพื่อลดต้นทุนการผลิต การใช้พวกสารตัวเติมที่ไม่ใช่คาร์บอนแบล็กนี้ได้ปฏิบัติกันมาช้านานตั้งแต่ที่ Hancock ได้ทำการประดิษฐ์เครื่องบดยางขึ้น ซึ่งพบว่า การเพิ่มสารตัวเติมในยางไม่ทำให้ยางมีสมบัติเสื่อมลงนัก

2.4.1 คาร์บอนแบล็ก (Carbon Black)

คาร์บอนแบล็กที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางสำเร็จรูปมี 4 ประเภท คือ คาร์บอนแบล็กเฟอเนส (furnace black) คาร์บอนแบล็กเทอร์มอล (thermal black) คาร์บอนแบล็กชาเนล (channel black) และคาร์บอนแบล็กแลมป์ (lampblack)

คาร์บอนแบล็กที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ คาร์บอนแบล็กเฟอเนส ซึ่งผลิตโดยกระบวนการเฟอเนส (furnance process) โดยการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของแก๊สธรรมชาติ หรือน้ำมันพวก heavy aromatic ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมถ่านหินหรือน้ำมัน คาร์บอนแบล็กที่ได้โดยกระบวนการนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคตั้งแต่ 20–80 นาโนเมตร

คาร์บอนแบล็กเทอร์มอลได้จากกระบวนการเทอร์มอล (thermal process) จะประกอบด้วย การแยกสลายแก๊สธรรมชาติโดยใช้ความร้อนสูงถึง 1,300°C ในภาวะที่ปราศจากอากาศ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคมีขนาดตั้งแต่ 120–500 นาโนเมตร

คาร์บอนแบล็กชาเนลได้จากกระบวนการชาเนล (channel process) โดยอาศัยการเผาไหม้แก๊สธรรมชาติ และเปลวไฟจากการเผาไหม้จะกระทบกับท่อเหล็ก (channel iron) ซึ่งเคลื่อนมาเหนือเปลวไฟ เมื่อเกิดเขม่าหรือผงถ่านขึ้นก็จะมีอุปกรณ์ทำหน้าที่กวาดคาร์บอนแบล็กลงช่องเก็บและส่งต่อไปยังที่รวบรวมโดยสายพาน คาร์บอนแบล็กชาเนลมีราคาสูงมากเมื่อเทียบกับคาร์บอนแบล็กเฟอเนส

คาร์บอนแบล็กแลมป์ได้ทำกันมานานแล้วโดยวิธีเผาไหม้พวกปิโตรเลียมหรือพวก coaltar คว้นที่เกิดขึ้นจะถูกทำให้เกิดการจับตัวของคาร์บอน อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่เกินที่จะมีผลต่อการส่งเสริมสมบัติความแข็งแรงของยางได้

การเสริมความแข็งแรงโดยคาร์บอนแบล็ก (Reinforcement by Carbon Black)

คาร์บอนแบล็กมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงให้กับยางได้มากกว่าสารอื่นๆ โดยจะช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพให้กับยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์

Colton, Scott และ Parkinson¹³ ได้ให้ความหมายของการเสริมแรงว่า หมายถึง การเพิ่มหรือการเติมสารลงในยางแล้วทำให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติความทนแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาด และความทนต่อการสึกหรอดีขึ้น ดังนั้น สารที่ทำให้สมบัติดังกล่าวเพิ่มขึ้นจะได้ชื่อว่าเป็นสารเสริมแรง (reinforcing agent)

สมบัติของคาร์บอนแบล็ก

ปัจจัยที่มีผลต่อการเสริมแรงของคาร์บอนแบล็ก คือ

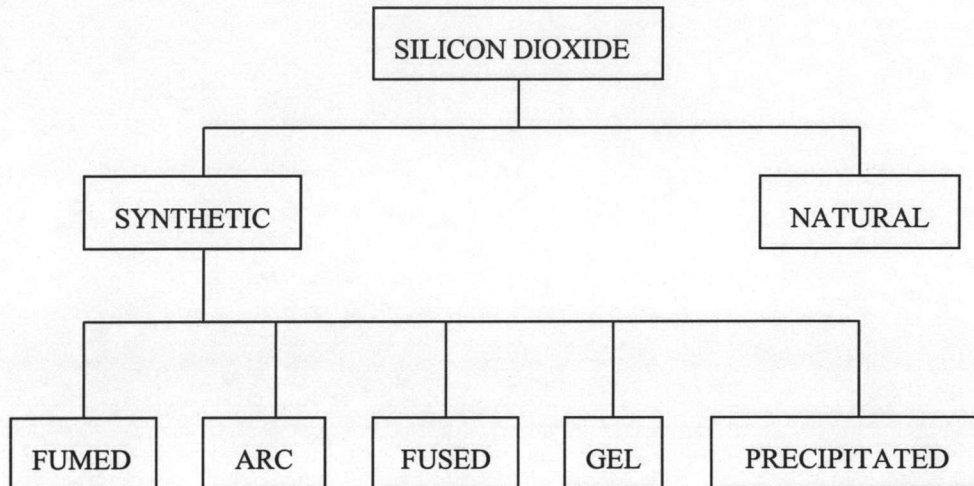
ขนาดของอนุภาค (particle size) : การเสริมแรงขึ้นกับขนาดอนุภาคของคาร์บอนแบล็ก โดยทั่วไปขนาดยิ่งเล็กลงยิ่งมีประสิทธิภาพเสริมความแข็งแรงได้มาก เพราะขนาดอนุภาคยิ่งเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวกับยางได้มากขึ้น แต่ถ้าขนาดอนุภาคยิ่งเล็กจะใช้เวลานานมากขึ้นในการบดผสมเพื่อให้คาร์บอนแบล็กกระจายตัวได้ดีในยาง ซึ่งส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมและมีผลทำให้ยางแข็งขึ้น หรือมีความเป็นพลาสติกน้อยลง

สมบัติทางเคมีของผิวหน้า (surface chemistry) : สภาพกรดต่าง (pH) จะมีผลต่อการวัลคาไนซ์ ดังนั้น คาร์บอนแบล็กชนิดที่มีสภาพเป็นกรดมีแนวโน้มที่จะชะลอการวัลคาไนซ์ ส่วนคาร์บอนแบล็กเฟอเนสมีสภาพเป็นด่างจะเร่งการวัลคาไนซ์ ดังนั้น จึงทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ก่อนกำหนดเวลาได้

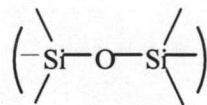
การกระจาย (dispersion) : การที่ผลิตภัณฑ์จะมีความแข็งแรงตามต้องการจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องบดผสมให้คาร์บอนแบล็กกระจายในเนื้ออย่างสม่ำเสมอ ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่า การกระจายตัวที่ดีของคาร์บอนแบล็กในเนื้อยางจะช่วยปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึง ความทนต่อการสึกหรอ ความทนต่อการฉีกขาด และความทนต่อการเกิดรอยแตกอันเนื่องมาจากการบิดงอของยาง

2.4.2 ซิลิกา¹⁶

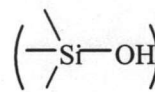
ซิลิกาสังเคราะห์ที่มีจำหน่ายทั่วไปมี 5 ชนิด คือ ซิลิกาชนิดไอ (fumed), electric arc, fused, เจล (gel) และชนิดตกตะกอน (precipitated) ดังแสดงในแผนภาพต่อไปนี้



ซิลิกาสังเคราะห์เป็นสายโซ่ของ SiO_4 ที่มีโครงสร้างเป็นเตตระฮีดรัล (tetrahedral) พื้นผิวของซิลิกาประกอบไปด้วยหมู่ siloxane และหมู่ silanol ดังนี้



siloxane

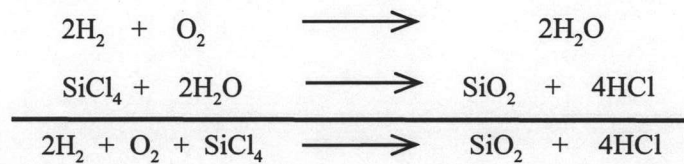


silanol

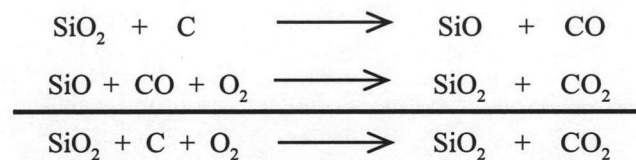
ซิลิกาสังเคราะห์มีองค์ประกอบทางเคมีเป็น SiO_2 เมื่อศึกษาด้วย X-ray พบว่ามีลักษณะที่เป็นอสัณฐาน ในการนำซิลิกาสังเคราะห์ไปใช้งานจะขึ้นกับเคมีพื้นผิว และสมบัติทางกายภาพของซิลิกาเป็นหลัก ซิลิกาสังเคราะห์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กและมีพื้นที่ผิวมาก (มากกว่า 200 ตร.ม/กรัม) สามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางได้ดี ส่วนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคใหญ่และมีพื้นที่ผิวน้อย (น้อยกว่า 200 ตร.ม/กรัม) สามารถใช้เป็นสารตัวเติมกึ่งเสริมแรง ส่วนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคใหญ่มาก และมีพื้นที่ผิวน้อยมาก (น้อยกว่า 50 ตร.ม/กรัม) ถือเป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง

การผลิตซิลิกาสังเคราะห์

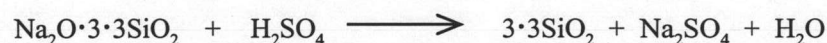
ซิลิกาชนิดไอ (fumed silica) : เตรียมโดยกระบวนการทำให้เป็นไอที่อุณหภูมิสูง ซิลิกาชนิดไอถูกเตรียมขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1941 โดย Dr. Harry Klopfer นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน เพื่อหาสารตัวเติมเสริมแรงสีขาวที่มีสมบัติเทียบได้กับคาร์บอนแบล็ก ปัจจุบัน ซิลิกาชนิดไอเตรียมได้จากวิธีไฮโดรไลซิสไอของซิลิกอนเตตระคลอไรด์ในเปลวไฟของไฮโดรเจน และออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1,000°C หรือสูงกว่า ปฏิกิริยาการเตรียมแสดงได้ดังนี้



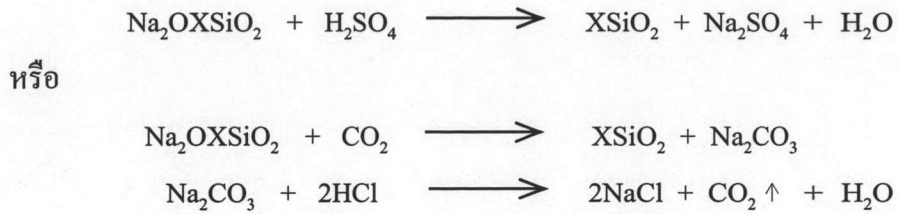
Electric Arc silica : หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “thermal silica” มีขั้นตอนการผลิตที่ต้องใช้พลังงานมาก และมีค่าใช้จ่ายสูง โดยทั่วไปใช้เป็นสารลดความเงา (matting or flattening agent) โดยเตรียมได้จากกระบวนการรีดิวซ์ควอทซ์ด้วยถ่านหินที่อุณหภูมิสูงกว่า 2,000°C โดย SiO จะถูกออกซิไดซ์ด้วยอากาศหรือไอน้ำในขั้นตอนที่ 2 ของการผลิตซิลิกา ปฏิกิริยาการเตรียมแสดงดังนี้



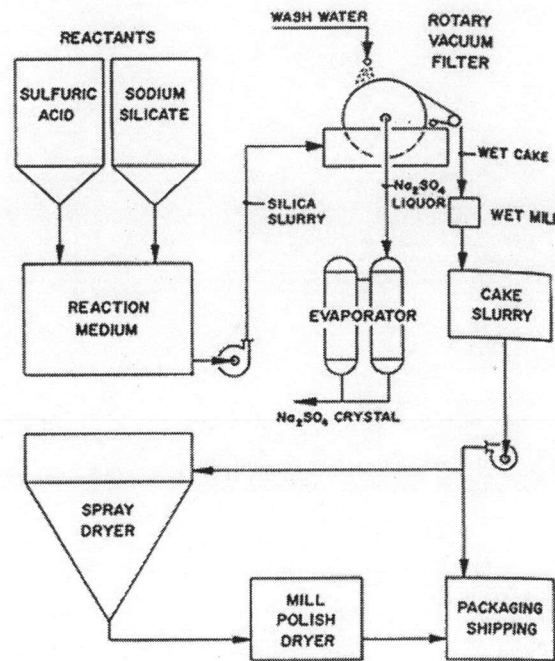
ซิลิกาเจล : เป็นซิลิกาสังเคราะห์ที่เก่าแก่ที่สุด โดยบริษัท Davison เป็นบริษัทแรกที่ผลิตขึ้นในทางการค้า เมื่อ ปี ค.ศ. 1920 โดยเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกต (sodium silicate; water glass) กับกรดซัลฟิวริก ภายใต้ภาวะที่เป็นกรด ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



ซิลิกาชนิดตกตะกอน : เตรียมโดยการทำ acidulation สารละลายโซเดียมซิลิเกตกับกรดซัลฟิวริก หรือของผสมของคาร์บอนไดออกไซด์และกรดคลอริก ภายใต้ภาวะที่เป็นด่าง ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



รูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพกระบวนการผลิตซิลิกาชนิดตกตะกอน



รูปที่ 2.13 กระบวนการผลิตซิลิกาชนิดตกตะกอน¹⁶

ซิลิกาชนิดตกตะกอนถูกพัฒนาขึ้นในช่วงต้นทศวรรษที่ 40 เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงสีขาวในผลิตภัณฑ์ยาง ซิลิกาชนิดนี้สามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 5 กลุ่ม ตามค่า oil absorption (ตารางที่ 2.8) ได้ดังนี้

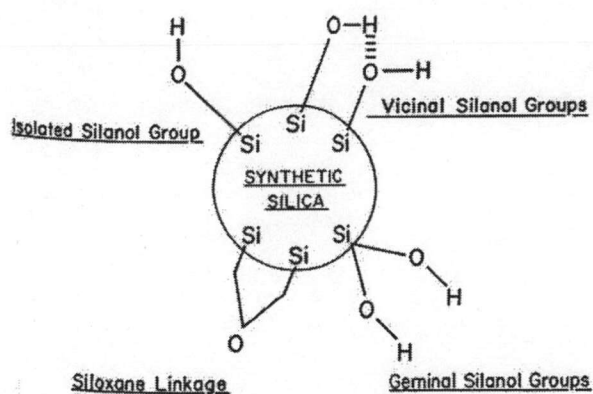
- VHS (Very high structure)
- HS (High structure)
- MS (Medium structure)
- LS (Low structure)
- VLS (Very low structure)

ตารางที่ 2.8 การแบ่งโครงสร้างของซิลิกาตามค่า oil absorption¹⁶

Silica structure level	Oil absorption (cc / 100g)
VHS	Above 200
HS	175 – 200
MS	125 – 175
LS	75 – 125
VLS	Less than 75

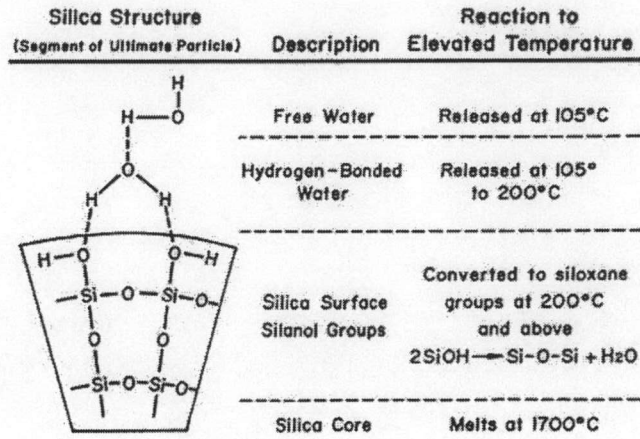
สมบัติพื้นผิวของซิลิกา

พื้นผิวของซิลิกาสังเคราะห์จะมีหมู่ไฮดรอกซิลปรากฏอยู่ 3 ชนิด คือ หมู่ silanol, vicinal silanols (silanol ที่อยู่บนซิลิกอนอะตอมข้างๆ) และ geminal silanols (silanol 2 ตัวที่อยู่บนซิลิกอนอะตอมเดียวกัน) ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ชนิดของหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกาสังเคราะห์¹⁶

แต่ละอนุภาคของซิลิกาประกอบด้วย 4 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยชั้นแรก (inner core) เป็นชั้นของพอลิเมอร์ที่มีหน่วยเป็น SiO_2 มาต่อกันและเรียงตัวแบบ 3 มิติอย่างสลับ ชั้นที่ 2 คือ หมู่ silanol ชั้นที่ 3 ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำที่เกาะกับหมู่ silanol ด้วยพันธะไฮโดรเจน ชั้นนอกสุดเรียกว่า “free water หรือ free moisture” ซึ่งเป็นชั้นที่เกิดเนื่องจากลักษณะไฮโดรฟิลิกของซิลิกา



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของซิลิกา¹⁶

การใช้งาน

การใช้งานของซิลิกาสังเคราะห์แสดงไว้ในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 การใช้งานของซิลิกาสังเคราะห์¹⁶

Function	Application area
Reinforcement	Silicone rubber, natural and synthetic rubber, polymers and plastic
Thixotrope	Unsaturated polyester, epoxy, phenolic, and PVC diersion resins
Thickening	Paints, coating, inks, wire cable jacketing
Rheology control	Cosmetics, pharmaceuticals, toothpaste, and liquids Paints, coatings, PVC and plastics
Matting	Flavor, fragrances, foods, cosmetics
Dry-up liquids	Plastics
Filler	Thermoplastics
Plate-out	Foods, plastics, resins
Anti-blocking	Toothpaste
Abrasive and polishing agent	

2.4.3 แคลเซียมคาร์บอเนต¹⁷

แคลเซียมคาร์บอเนตมีชื่อเรียกหลายชื่อ เช่น marble, limestone, calcite, chalk, aragonite, dolomite ($\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$), coral, shell และ whiting โดยใช้เป็นสารตัวเติมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากความขาว และราคาถูก

Limestone และ dolomite เป็น primary carbonaceous rocks ที่ได้จากธรรมชาติ limestone ประกอบด้วยแร่ calcite ซึ่งเป็นอัญรูปที่มีเสถียรภาพของแคลเซียมคาร์บอเนต ส่วน aragonite เป็น metastable polymorph ซึ่งสามารถเปลี่ยนอัญรูปเป็น calcite โดยการให้ความร้อนด้วยอากาศแห้งที่อุณหภูมิ 400°C โดยมีน้ำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนอัญรูป ผลึกของ calcite เป็น hexagonal ส่วนผลึกของ aragonite เป็น orthorhombic

ความขาวของแคลเซียมคาร์บอเนตขึ้นกับแหล่งที่มาอย่างมาก เนื่องจากแต่ละแหล่งจะมีสิ่งเจือปน เช่น กราไฟต์ (graphite) ไพไรต์ (pyrite) และซิลิเกต (silicate) ในปริมาณต่างๆ กัน ซึ่งมีความสำคัญมาก เพราะอาจทำให้เกิดผลเสียต่อเครื่องจักรได้ โดยเฉพาะปริมาณซิลิเกตเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงสำหรับผู้ผลิตและผู้ใช้ ซึ่งการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต จะแบ่งเป็นกระบวนการทางกายภาพ และกระบวนการทางเคมี

กระบวนการทางกายภาพ

บดแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดในธรรมชาติให้มีขนาดอนุภาคเล็กกลง เรียกผลิตภัณฑ์ที่ได้ว่า แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบด (ground calcium carbonate) กระบวนการนี้แบ่งเป็น 2 วิธี คือ

กระบวนการบดแห้ง (dry grinding process) : ขั้นตอนจะประกอบด้วยการบดหยาบ (crushing) การบดละเอียด (pulverizing) และการแยกขนาดอนุภาคด้วยอากาศ (air classification)

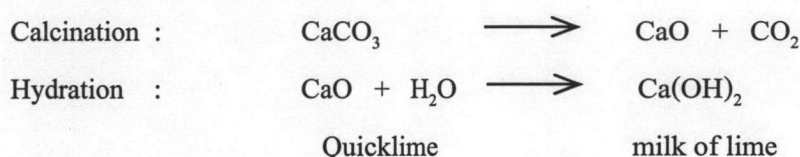
กระบวนการบดเปียก (wet grinding process) : วิธีนี้ต่างจากกระบวนการบดแห้ง คือ มีการล้างสิ่งเจือปนที่มีลักษณะหยาบๆ ก่อน เช่น โคลน แล้วน้ำจะเป็นตัวพาและแยกแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ กัน แล้วทิ้งไว้ให้หนอนกันในถังแยกขนาดอนุภาคที่เตรียมไว้ เรียกขั้นตอนนี้ว่า “centrifuging technique” หลังจากนั้นทำให้แห้ง และบดให้ละเอียดต่อไป

กระบวนการทางเคมี

นำสารประกอบแคลเซียมที่มีในธรรมชาติ หรือ limestone มาทำปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น มีลักษณะผลึก ขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคต่างๆ กัน ขึ้นกับภาวะของการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิระหว่างทำปฏิกิริยา อัตราการบ่ม ความเป็นกรด-ด่าง และความเข้มข้นของสารที่ทำปฏิกิริยา เป็นต้น และเรียก

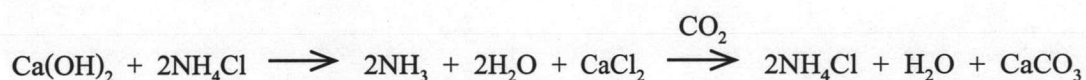
ผลิตภัณฑ์ที่ได้ว่า “แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน” (precipitated calcium carbonate) ซึ่งในทางการค้าส่วนใหญ่อยู่ในรูป aragonite

กระบวนการทางเคมีดังกล่าวที่ใช้กันทั่วไป ประกอบด้วยขั้นตอนการเผา (calcination) และการทำปฏิกิริยากับน้ำ (hydration) ตามลำดับ ซึ่งแสดงได้ดังนี้ :



ขั้นตอนการเปลี่ยน Ca(OH)_2 หรือ milk of lime ให้เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตมีหลายวิธี ดังนี้ :

กระบวนการโซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate process) : โดยนำแอมโมเนียมคลอไรด์มาทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 หรือ milk of lime ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



กระบวนการโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide process) : โดยนำโซเดียมคาร์บอเนตมาทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



กระบวนการรีคาร์บอเนชัน (recarbonation process) : โดยนำคาร์บอนไดออกไซด์มาทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จะถูกนำไปกรอง และทำให้แห้ง โดยเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนกับแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดละเอียด (finely ground calcium carbonate) พบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ขณะที่ชนิดบดละเอียดมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 94 แต่ชนิดตกตะกอนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า และใช้พลังงานในการผลิตมากกว่า จึงทำให้มีราคาสูงกว่า

ตารางที่ 2.10 และ 2.11 แสดงสมบัติและองค์ประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดในทางการค้า ส่วนรูปที่ 2.16 และ 2.17 แสดงการกระจายขนาดอนุภาค และภาพถ่ายด้วยเครื่อง SEM ของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดในทางการค้า

ตารางที่ 2.10 สมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนต¹⁷

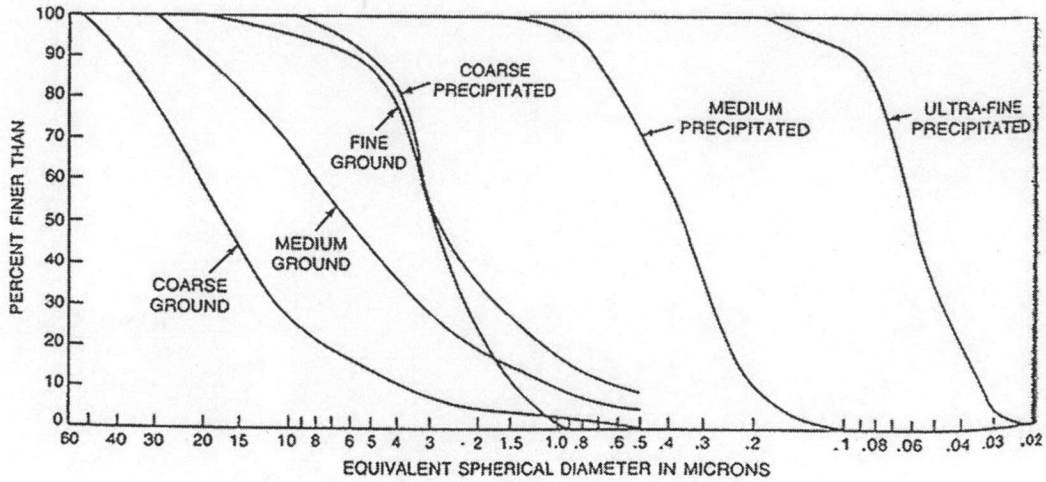
Properties	Ground		Ultra-Fine Precipitated
	Fine	Coarse	
Average particle size (microns, esd ^a)	3 – 14	17	0.07
Specific gravity (g/cm ³)	2.71	2.71	2.55 – 2.65
Surface area, BET N ₂ (m ² /g)	0.9 – 2.2	–	11 – 26
Oil absorption, ASTM D281	5 – 21	5-6	28 – 58
Mohs hardness	2.5 – 3.0	3	2.5 – 3.0
Thermal conductivity × 10 ³ (cal/g s °C)	5.6	–	5.6
Specific heat (cal/ g °C)	0.205	–	0.21
Coefficient of thermal expansion (lin unit/unit °C × 10 ⁻⁶)	10	9-12	10

^a esd = equivalent spherical diameter

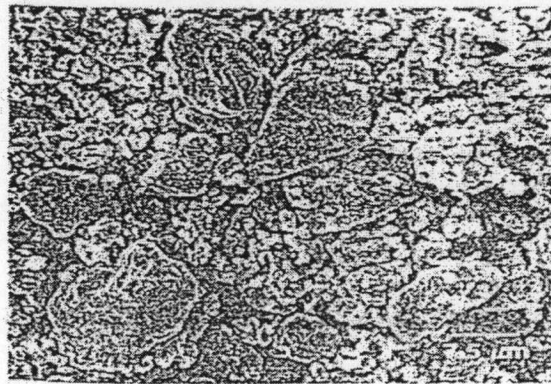
ตารางที่ 2.11 องค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (%) ทางการค้า¹⁷

Chemical	Ground		Dolomite ^a	Precipitated
	Fine	Coarse		
CaCO ₃	97.40	96.50	58.20	9900
MgCO ₃	1.50	2.30	41.16	0.20
SiO ₂	0.60	0.90	0.34	0.10
Al ₂ O ₃	0.18	0.18	0.19	0.20
Fe ₂ O ₃	0.08	0.08	0.28	0.02
CaSO ₄	–	0.02	–	–

^a MnO, Pb, As, F, Cl – trace<0.01



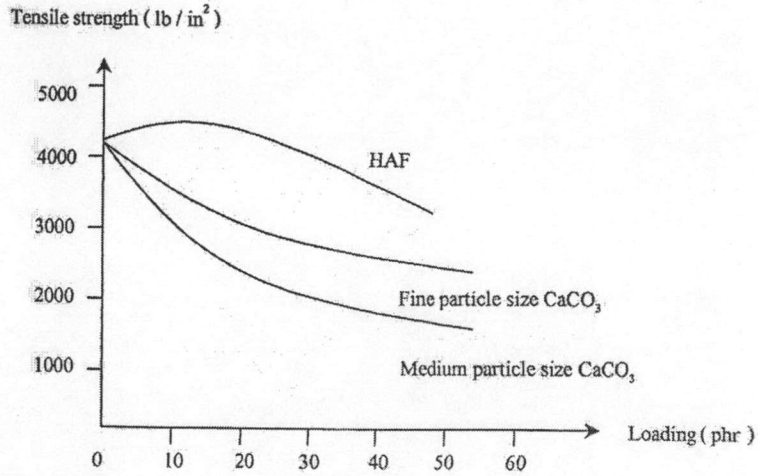
รูปที่ 2.16 การกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต¹⁷



รูปที่ 2.20 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดเคลือบผิว¹⁷

นอกจากนี้ ยังมีการใช้สารที่ไม่ละลายน้ำ เช่น น้ำมัน และกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น กรดสเตียริก หรือ metallic stearate ไปเคลือบผิวแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อช่วยปรับปรุงการกระจายตัว ลดการเกิด agglomerate โดยเฉพาะเกรดที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก ทำให้ผสมในยางได้ง่าย เรียกแคลเซียมคาร์บอเนตที่ผ่านกรรมวิธีนี้ว่า “แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดเคลือบผิว (surface-treated calcium carbonate)” และยังมีสารอื่นๆ ในการเคลือบผิวด้วย เช่น ไททาเนต (titanate) เซอร์โคอะลูมินาต (zirconium aluminate) และสารทำให้เปียก (wetting agent) อื่นๆ

การใส่แคลเซียมคาร์บอเนตในยางธรรมชาติทำให้ความทนแรงดึงลดลงเมื่อใส่ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.18 แต่แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะให้ความทนแรงดึงของยางสูงกว่าที่มีขนาดอนุภาคปานกลาง



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณสารตัวเติมต่างๆ ในยางธรรมชาติ¹⁷

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S.C. NG และ L.H. Gan¹⁸ พบว่า เมื่อนำน้ำยางธรรมชาติมาทำปฏิกิริยา *in situ* epoxidation กับกรดเปอร์ฟอร์มิก จะได้ยาง ENR ออกมา แต่เนื่องจากกรดฟอร์มิกมีความเป็นกรดสูง ดังนั้นวงแหวนออกซิเรน (oxirane) ที่อยู่ในยาง ENR จึงพร้อมจะเปิดออกเกิดเป็นไฮดรอกซีฟอร์มเมท และไกลคอล (hydroxyformate and glycol) ในกรณีนี้ น้ำยาง ENR ที่ได้จะจับตัวเป็นก้อนภายในเวลา 2 ชั่วโมง และถ้าทำปฏิกิริยาต่อไปอีกจะเกิดวงแหวนเตตระไฮโดรฟูแรนขึ้น ส่งผลให้เกิดการเชื่อมขวางด้วยพันธะอีเทอร์ของเตตระไฮโดรฟูแรน

Davies และคณะ¹³ พบว่า *cis*-1,4-polyisoprene สามารถถูกตัดแปรทางเคมีด้วยกรดเปอร์-แอซติก ซึ่งวิธีนี้ทำให้ได้หมู่พอกไซค์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติแบบสุ่ม โดยวัสดุที่ได้มีสมบัติที่น่าสนใจหลายประการ เช่น มีความต้านทานน้ำมันปิโตรเลียม และมีความแข็งแรงสูง จากการศึกษาด้วยเทคนิค X-ray พบว่าวัสดุนี้สามารถเกิด strain crystallization ได้ และความสามารถในการเกิดผลึกเมื่อถูกดึงจะยังคงอยู่ แม้จะมีหมู่พอกไซค์ถึง 95 โมลเปอร์เซ็นต์ จากการที่สามารถเกิดผลึกนี้ทำให้วัสดุมีความทนแรงดึงสูง และมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพิ่มขึ้นอีกด้วย

Baker และคณะ¹⁴ ได้ศึกษาสมบัติของยาง ENR โดยใช้ยาง ENR-50, ENR-25 และ ENR-10 พบว่า ENR-50 สามารถเกิด strain crystallization ได้เหมือนยางธรรมชาติ แต่มีความต้านทานต่อน้ำมันเหมือนยางไนไตรล์ที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ระดับปานกลาง นอกจากนี้ ยังมีความต้านทานการซึมผ่านของอากาศเหมือนยางบิวทิล ทั้งยาง ENR-50 และ ENR-25 แสดงลักษณะ wet

grip ที่ดี โดยเฉพาะคอมปาวด์ของ ENR-25 ที่มีซิลิกา หรือซิลิกา/คาร์บอนแบล็กเป็นสารตัวเติมจะ ให้ rolling resistance ต่ำกว่ายางธรรมชาติ และเขายังพบว่ายาง ENR-50 และ ENR-25 ที่ใช้ซิลิกา เป็นสารตัวเติมนั้น ถึงแม้ไม่ได้ coupling agent ก็ยังมีความสามารถในการเสริมแรงเทียบเท่ากับการ ใช้คาร์บอนแบล็กเป็นสารตัวเติมเสริมแรง

B.T Poh และ B.K. Tan¹⁹ จากการศึกษาสมบัติสคอ์ชของระบบวัลคาไนซ์ที่ใช้ซิลเฟอร์เป็น เป็นสารวัลคาไนซ์กับยาง ENR 3 เกรด (ENR-10 ENR-25 และ ENR-50) โดยใช้เครื่อง Mooney Viscometer ในช่วงอุณหภูมิ 100–180°C นอกจากนี้ ยังศึกษาผลของของสารเร่งวัลคาไนซ์ที่มีต่อยาง ENR-10 พบว่า เวลาเริ่มคงรูปของยาง ENR และยางธรรมชาติมีความแตกต่างกัน เนื่องมาจาก พันธะคู่ในยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ถูกกระตุ้นโดยหมู่อีพอกไซด์ที่อยู่ข้างเคียง และจะยิ่งแตกต่าง มากขึ้นเมื่อระดับอีพอกซิเดชันเพิ่มขึ้น

เจริญ นาคะสรรค์ และคณะ⁴ ได้เตรียมยาง ENR โดยให้น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูงทำ กับกรดฟอร์มิก โดยใช้สบู่นอนไอออนิก (Emulwin W) เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพของน้ำยาง โดยเขา ได้พิสูจน์การเกิดหมู่อีพอกไซด์ใน โมเลกุลยางธรรมชาติ และวิเคราะห์หาปริมาณหมู่อีพอกไซด์ด้วย เทคนิค FT-IR และพบตำแหน่งของการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่เลขคลื่น 870 และ 1240 cm^{-1} ซึ่ง แสดงถึงการมีหมู่อีพอกไซด์บน โมเลกุลยางธรรมชาติ นอกจากนี้ ยังพบว่าปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่ เกิดขึ้นบน โมเลกุลของยางธรรมชาติขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ส่วนอุณหภูมิ กลาสทรานซิชันของยาง ENR มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ปริมาณหมู่อีพอกไซด์

เจริญ นาคะสรรค์ และคณะ²⁰ ได้ศึกษาพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ และความต้านทานการฉีก ขาดของยาง ENR (33% โดยโมล) เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ โดยใช้ซิลเฟอร์เป็นสารวัลคาไนซ์ ร่วมกับสารเร่งวัลคาไนซ์ 3 ชนิด คือ MBT, MBS และ TBBS แล้วทดสอบพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบงานหมุน (ODR) ที่อุณหภูมิ 150°C และทดสอบความต้านทานต่อการฉีก ขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ซึ่งพบว่ายาง ธรรมชาติมีเวลาเริ่มคงรูป และเวลาการคงรูปนานกว่ายาง ENR นอกจากนี้ ยางธรรมชาติมีความ ต้านทานการฉีกขาดต่ำกว่ายาง ENR แต่หลังการบ่มเร่งยาง ENR ด้วยอากาศร้อนมีการเปลี่ยนแปลง ความต้านทานการฉีกขาดมากกว่ายางธรรมชาติ

จริญญา เชาว์แสง²¹ ได้ทำการศึกษาความต้านทานน้ำมันและสมบัติเชิงกลของยาง ENR-20, ENR-45 และ ENR-65 พบว่า ยาง ENR บวมตัวในน้ำมันได้น้อยกว่ายางธรรมชาติ โดยยาง ENR-65 มีความต้านทานน้ำมันใกล้เคียงยางไนไตรล์ นอกจากนี้ ยังมีค่าความแข็งแรงสูงกว่ายาง ENR ชนิดอื่นๆ แต่ยาง ENR-20 มีค่าความทนแรงดึงสูงกว่ายาง ENR ชนิดอื่นๆ