

ยางธรรมชาติด้วยประวัติ

พร้อมศึกษา สงวนลิขสิทธิ์

บทนำ

ยางธรรมชาติ นอกจจากจะเป็นยางที่มีความยืดหยุ่นสูงและมีราคาถูกแล้ว ยังจัดเป็นยางที่มีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี ด้วยเหตุนี้ ยางธรรมชาติจึงถูกนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์หลักหลายชนิด เช่น ยางรถยก ยางรองกระ做好 ยางกันกระแทกท่าเรือ ถุงมือยาง เส้นยางยืด ถุงป้องกันรักษา เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโครงสร้างของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่ในปริมาณมาก ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ออกซิเจน โซเดียม และแสงแดดต่ำ ซึ่งนับเป็นข้อด้อยหลักของยางธรรมชาติ นอกจานนี้ การที่ ยางธรรมชาติเป็น

ประกอบไปโดยสารบอนที่มีความเป็นข้าวต่ำ ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อความร้อนที่ไม่มีข้าวและน้ำมันปิโตรเลียม [1] จากข้อด้อยดังกล่าวข้างต้นจึงทำให้การประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติยังคงมีข้อจำกัดด้วยเหตุนี้ จึงได้มีความพยายามที่จะศึกษาและตัดแปลงเคมีของยางธรรมชาติเพื่อช่วยในการปรับปรุงสมบัติที่เป็นข้อด้อยเหล่านี้ การตัดแปลงเคมีสามารถทำได้ทั้งในรูปของน้ำยา สารละลายยาง และยางแห้ง โดยสามารถแบ่งประเภทของการตัดแปลงเคมีได้เป็น 3 ประเภทหลัก [2] ได้แก่

1. การตัดแปลงโครงสร้างทางเคมี โดยไม่มีการเพิ่มน้ำพิษเข้าไปในยาง

2. การเพิ่มกลุ่มอะตอมผ่านปฏิกิริยาการเพิ่มน้ำหรือการแทนที่บริเวณพันธะคู่ในเมลกุลยาง

3. การกราฟต์โพลิเมอร์ลงบนสายไฟเมลกุลยาง

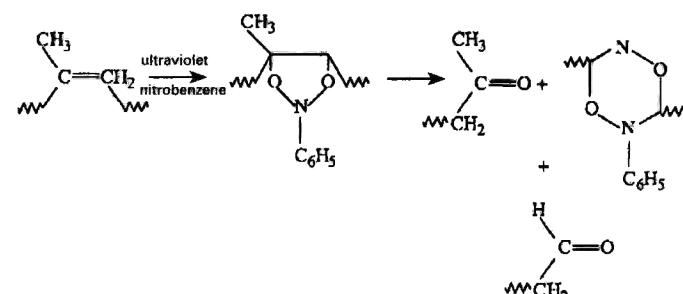
1. การตัดแปลงโครงสร้างทางเคมีโดยไม่มีการเพิ่มน้ำพิษเข้าไปในยาง

การตัดแปลงโครงสร้างของยางธรรมชาติประเภทนี้เป็นการปฏิกิริยาเคมีที่ดำเนินการในยาง ด้วยการตัดสายไฟเมลกุล (depolymerization) และการทำให้โครงสร้างไม่เมลกุลยางเกิดเป็นวง (cyclization)

1.1 ยางธรรมชาติเหลว (Liquid natural rubber)

ยางธรรมชาติเหลวเป็นยางที่มีน้ำหนักไม่เมลกุลทำให้เกิดจาก การตัดสายไฟเมลกุลยางจนยางเปลี่ยนสภาพจากของแข็งกลายเป็นของเหลว โดยทั่วไป ยางธรรมชาติเหลวจะมีน้ำหนักไม่เมลกุลตั้งแต่หลักพันจนถึงหลักหมื่น มีความหนืดต่ำ สามารถไหลได้ที่อุณหภูมิห้อง ส่วนสมบัติอื่นๆ ของยางธรรมชาติเหลวจะขึ้นอยู่กับเทคนิคที่ใช้ในการเตรียม ซึ่งมีหลายวิธี เช่น การตัดยอดไม่เมลกุลยางด้วยแรงเชิงกล ความร้อน รังสี สารเคมี หรืออาจใช้หลักของคปประกอบร่วมกัน

การผลิตยางธรรมชาติเหลวครั้งแรกนั้น เกิดจากการตัดย่อยไม่เมลกุลยางด้วยแรงเชิงกลร่วมกับสารเคมี โดยมีจุดประสงค์ที่จะนำยางเหลวที่ได้ไปใช้ในการทำงาน หลังจากนั้น จึงได้มีการพัฒนาโดยใช้แรงเชิงกลร่วมกับความร้อน เพื่อปรับปรุงขั้นตอนการเตรียมยางธรรมชาติเหลวให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้แรงเชิงกลร่วมกับความร้อนจะส่งผลทำให้การควบคุมการกระจายตัวของน้ำหนักไม่เมลกุลของยางเป็นไปได้ยาก เนื่องจากยางสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งการตัดย่อยไม่เมลกุล การกลับมารวมกันใหม่ และการซึมอยู่ไม่เมลกุลได้ ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาเทคนิคการเตรียมยางธรรมชาติเหลวโดยการใช้พลาสติกและแสง (เช่น แสงอาทิตย์ และแสงอัลตราไวโอเลต เป็นต้น) ร่วมกับสารเริ่มปฏิกิริยาหรือสารที่ว่องไวต่อแสง เช่น ในไตรเบนชีน ไอก็อกซิเจนเพอร์ออกไซด์ รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างของปฏิกิริยาการตัดสายไฟเมลกุลด้วยแสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไตรเบนชีน

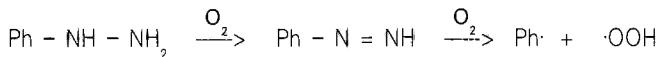


รูปที่ 1 ปฏิกิริยาการตัดสายไฟเมลกุลของยางธรรมชาติ โดยใช้แสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไตรเบนชีน

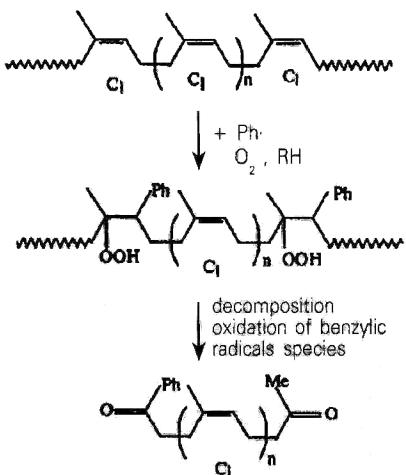
นอกจากปฏิกิริยาข้างต้นแล้ว ยังได้มีการพัฒนาวิธีการเตรียมยางธรรมชาติเหลวโดยใช้ปฏิกิริยาเริดออกซ์ ซึ่งในการนี้จะใช้พารา-เมทิลเบนซีนซัลฟอนิกแอซิด พินิลไอก็อกซิด โซเดียมคลอโรไฮด์ โซเดียมในไตรท์ หรือโซเดียมไอก็อกซิคลอโรไฮด์ เป็นตัวเริ่ด化 และใช้ไอก็อกซิเจนเพอร์ออกไซด์ หรืออนุพันธุ์ของสารเพอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาแสดงได้ดังรูปที่ 2



- พินิลไอกราเซ็นจะถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจน



- การเกิดปฏิกิริยาการตัดสายโซ่ไม่เลกุล โดยอนุมูล Ph-

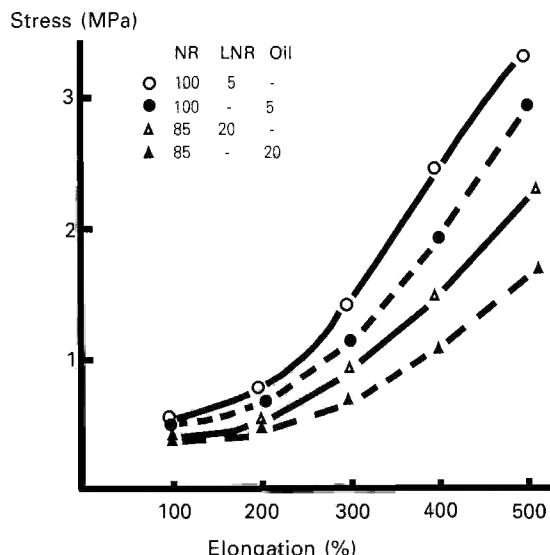


รูปที่ 2 ปฏิกิริยาการตัดสายโซ่ไม่เลกุลของยางธรรมชาติ โดยปฏิกิริยาตัวฟรีรังสีของพันธุ์ไม้ด่างพันธุ์ไม้ด่างพันธุ์ไม้ด่าง [3]

พินิลไอกราเซ็นจะถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจน เกิดเป็นอนุมูล ของอนุมูลอิสระของหมู่ฟินิล ($\text{Ph}-$) จากนั้นอนุมูลอิสระของหมู่ฟินิลและออกซิเจน จะทำปฏิกิริยากับ carbonyl ของตอมที่บีรีเก้นพันธุ์ไม้ด่างของไม่เลกุลยาง เกิดการแตกตัวของหมู่เพอร์ออกไซด์บนไม่เลกุลยาง ทำให้สายโซ่ไม่เลกุลถูกตัดขาด เกิดเป็นหมู่เมทธิลคิโนนและฟินิลคิโนนบนปลายสายโซ่ไม่เลกุล

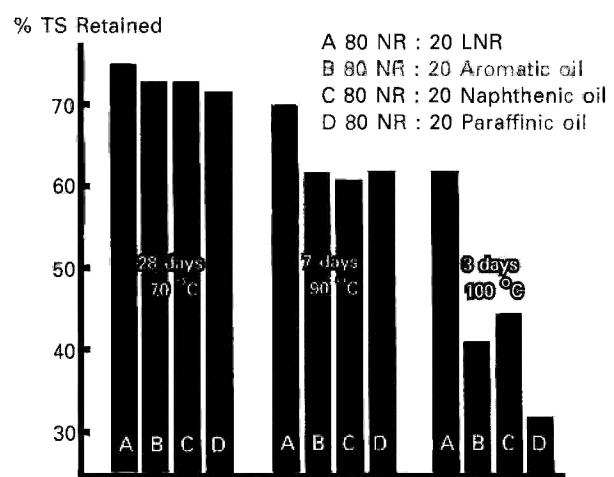
ยางธรรมชาติเหลว สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นสารปรับความหนืด ทำการตัวประسانการยึดติด และเป็นพลาสติกไซซ์ (plasticizer) เพื่อช่วยในการผสานยางสำหรับผลิตยางรถยนต์ นอกจากนี้ ยังสามารถใช้เป็นสารช่วยให้เข้ากันใน การผสานยางกับพลาสติก เช่น การผสานโพลิไพรพีลีนกับยางธรรมชาติ หรือการผสานโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับยางธรรมชาติ เพื่อรวมร่วมกัน ว่ายางธรรมชาติเหลวช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างวัสดุภาชนะของโพลิเมอร์ผสม ทำให้โพลิเมอร์ผสมมีค่าความหนาต่อแรงดึงและการยึดตัว ณ จุดขาดสูงขึ้น

จากการศึกษาประสีห์ภาพในการทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซซ์ ของยางธรรมชาติเหลวในสูตรด้อย่างล้อรถยนต์ของ Bristow และคณะ [4] พบว่า ยางธรรมชาติเหลวจะทำให้การผสานและการขันรูปเป็นไปได้่ายยิ่งขึ้น ซึ่งทั้งยางคอมพาวด์ที่ได้ก็ยังมีความแข็งแรง (green strength) ที่สูงกว่าการใช้น้ำมันอะโรมาติกเป็นพลาสติกไซซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความแข็งแรง (green strength) ของยางคอมพาวด์ เมื่อใช้ยางธรรมชาติเหลว และน้ำมันอะโรมาติกเป็นพลาสติกไซซ์ [4]

นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่าการใช้ยางธรรมชาติเหลวเป็นพลาสติกไซซ์ นอกจากราคาไม่สูงผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของยางวัลคaine แล้ว (ดูตารางที่ 1 ประกอบ) ยังมีส่วนช่วยให้ยางวัลคaine มีความทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องมาจากความร้อนสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความกันต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของยางธรรมชาติวัลคain ที่ใช้พลาสติกไซซ์ ต่างๆ เปิดกัน

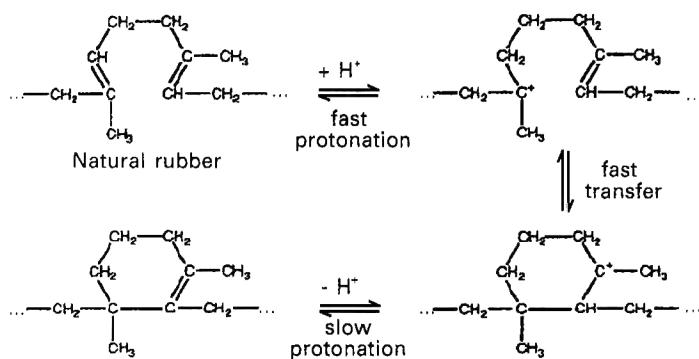
ตารางที่ 1 สบบัตของยางวัลคาไนซ์ เมื่อใช้ยางธรรมชาติเหลวและน้ำมันอ่อน化塑料ก็ใช้เชอร์

สูตร	ปริมาณ (phr)			
ยางธรรมชาติ	100	100	85	85
น้ำมันอะโรมาติก	5	-	20	-
ยางธรรมชาติเหลว	-	5	-	20
สมบูรณ์ของยางวัลคาไนซ์				
ความหนาต่อแรงดึง (MPa)	28.4	27.2	24.4	23.1
300% มोดูลัส (MPa)	12.4	11.9	9.9	9.0
การยึดตัว ณ จุดขาด (%)	560	556	583	578
การกรายดึงตัว (%)	62.5	65.1	59.3	58.9
การบ่มเงาที่ 100 °C เป็นเวลา 3 วัน				
- ความหนาต่อแรงดึง (MPa)	12.7	13.4	8.8	11.0

ยางธรรมชาติเหลวยางสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบอื่นๆ ได้อีก เช่น นำไปใช้เป็นสารเชื่อมยึด (binder) สำหรับสารเคมีที่เป็นผง เพื่อลดการฟุ้งกระจายและช่วยให้สารเคมีแทรกตัวและกระจายตัวในเนื้อยางได้ดียิ่งขึ้น หรืออาจนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อทำปฏิกิริยา กับ 4 ใน troxide ไดพินิลเอฟฟิล เกิดเป็นพารา-พินิลสีดำเมื่อที่เชื่อมติดอยู่บนโมเลกุลยาง ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงได้

1.2 ยางธรรมชาติไซคลิซ (Cyclized natural rubber)

ยางธรรมชาติไซคลิซ คือ ยางที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นวง (ring-like structure) ซึ่งการเกิดวงตั้งกล่าวจะส่งผลทำให้จำนวนพันธะในโมเลกุลยางลดลง โดยทั่วไป สามารถเตรียมยางธรรมชาติไซคลิซ ด้วยการนำยางธรรมชาติมาทำปฏิกิริยา กับสารที่ให้ปรตตอนที่อุณหภูมิสูง เช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดซัลฟอนิก (H_2SO_3) หรือสารที่เป็นกรดลิวอิส (Lewis acid) เช่น สแตนนิกคลอไรด์ ($SnCl_4$) โนรอนไทรฟลูออโรไรด์ (BF_3) หรือโดยการให้ความร้อนกับยางธรรมชาติปฏิกิริยา การเกิดวงแห่งความสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในรูปยางแห้งบนเดร่องผสมแบบเปิดหรือในรูปของน้ำยางโดยการเติมกรดลงไปทำปฏิกิริยา กับสารละลายยางหรือน้ำยางที่มีสารเพิ่มความเสถียรชนิดประจุบวกหรือชนิดไม่มีประจุ ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดได้ที่อุณหภูมิ 70-100 °C โดยที่ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ยางธรรมชาติไซคลิซจะมีปริมาณพันธะคู่เหลืออยู่ประมาณ 40-50 เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณพันธะคู่ในยางธรรมชาติทั่วไป รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างและกลไกการเกิดปฏิกิริยาไซคลิซ

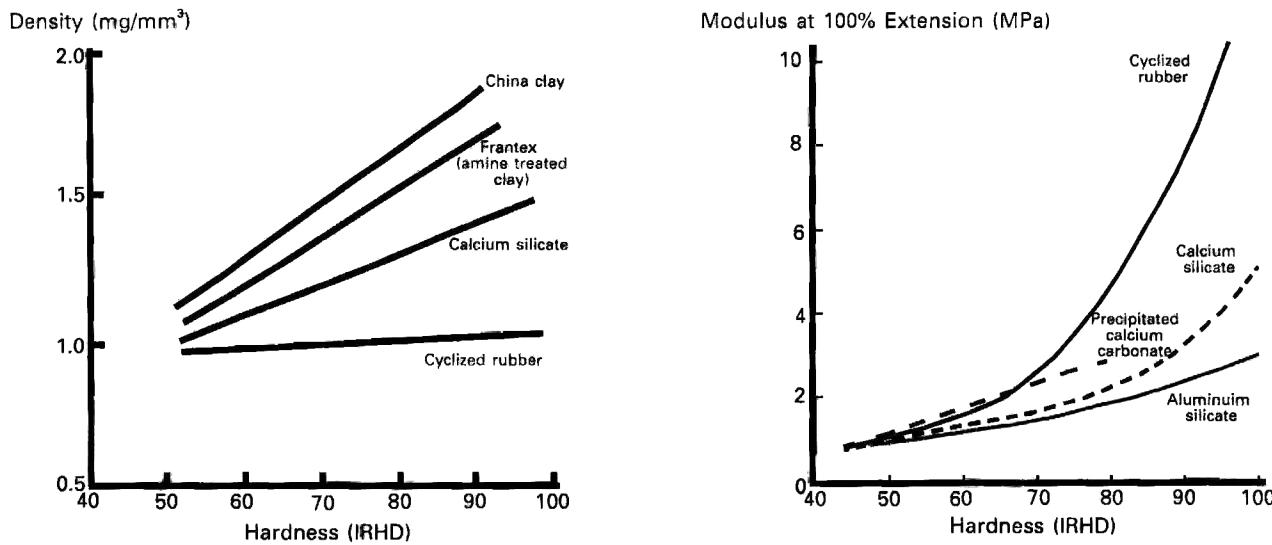


รูปที่ 5 โครงสร้างและกลไกการเกิดปฏิกิริยาไซคลิซ

ยางธรรมชาติไซคลิซ มีลักษณะเป็นผง หรือเรซินที่มีสีน้ำตาลอ่อน และมีสมบัติโดยรวมคล้ายพลาสติก กล่าวคือ มีความแข็งเปราะ แต่ยังมีความยืดหยุ่นอยู่บ้างคล้าย High Styrene Resin ยางชนิดนี้จึงมีความหนาต่อการสึกกร่อนที่ดี สามารถนำมาใช้ในงานพื้นรองเท้า กาว ลูกกลิ้งสำหรับหมึกพิมพ์ นอกจากนี้ ยางธรรมชาติไซคลิซยังสามารถนำไปใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งให้แก่ายางธรรมชาติโดยที่ไม่ส่งผลทำให้ความหนาแน่นของยางเปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งแตกต่างจากการเพิ่มความแข็งหรือมอดูลัสของยางโดยการใช้สารตัวเติมชนิดอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 6 [5] และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่ามอดูลัสของยาง (รูปที่ 7) จะพบว่าการเพิ่มความแข็งจะส่งผลทำให้ยางมีค่ามอดูลัสสูงขึ้นตามไปด้วย และเมื่อทำการเปรียบเทียบที่ความแข็งเดียว กับพ่วง

ที่ระดับความแข็งต่ำกว่า 70 IRHD ยางธรรมชาติไช้คลอร์จะทำให้ยางธรรมชาติที่ได้มีค่าโมดูลัสใกล้เคียงกับการเสริมแรงด้วยสารตัวเติมชนิดอื่นๆ แต่เมื่อพิจารณาที่ความแข็งสูงกว่า 70 IRHD กลับพบว่ายางธรรมชาติไช้คลอร์จะทำให้ยางธรรมชาติมีค่าโมดูลัสสูงกว่าการเสริมแรงด้วยสารตัวเติมชนิดอื่นๆ ค่อนข้างมาก อาจถือได้ว่าเป็นสมบัติเฉพาะของยางไช้คลอร์ เมื่อเทียบกับสารเพิ่มความแข็งอื่น

อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบัน ยางธรรมชาติไช้คลอร์มีความสำคัญในเชิงพาณิชย์น้อยลง เนื่องจากมีต้นทุนในการผลิตสูง เพราะต้องใช้การตลาดเพิ่มความเสถียรปริมาณมากในการผลิต ยางชนิดนี้จึงถูกแทนที่ด้วยเรซินอื่นๆ ที่มีราคาถูกกว่า



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความแข็งของยางธรรมชาติที่บีการเติมสารเพิ่มความแข็งบัดต่างๆ

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 100% โมดูลัสกับความแข็งของยางธรรมชาติที่บีการเติมสารเพิ่มความแข็งบัดต่างๆ

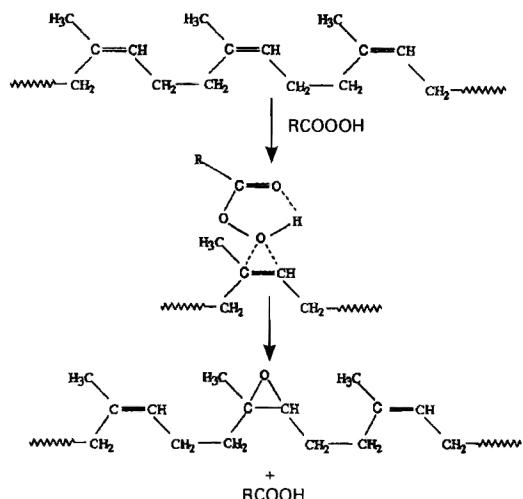
2. การเพิ่มกลุ่มอะตอนฟ่านปูร์กิริยาการเพิ่มหรือการแกนเก็บรีเวนฟันธ์ในใบเลกุลยาง

การเพิ่มกลุ่มอะตอนฟานเข้าไปเพิ่มรีเวนฟันธ์ของยางธรรมชาติจะทำให้โมเดลของยางมีจำนวนพันธะคู่น้อยลง ยางที่ได้จะมีความร่องไวต่อแสงแดด ออกซิเจน ความร้อน และออกไซน์น้อยลง นั่นคือมีความทนต่อการเสื่อมสภาพอ่อนเนื่องมาจากแสงแดด ความร้อนสูงขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น หากอะตอนฟานที่เพิ่มเข้าไปนั้นมีความเป็น้ำ เช่น อะตอนฟอนออกซิเจนหรือคลอรินก็จะส่งผลทำให้ยางที่ได้จากการตัดแปลงมีความเป็น้ำสูงขึ้น ยางก็จะมีความทนต่อความชื้นสูงขึ้นด้วย ด้วยสาเหตุของการตัดแปลงประเภทนี้ ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน คลอรินชัน ไฮดรคลอรินชัน และไฮดรอกซิลินชัน

2.1 ยางธรรมชาติอิพอกซิเดช (Epoxidised Natural Rubber: ENR)

การทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันในยางธรรมชาติ เริ่มมาตั้งแต่ปี ค.ศ.1922 แต่เพิ่งจะมีศักยภาพและนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์เมื่อประมาณปี ค.ศ.1980 แม้ว่าปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันสามารถเกิดได้ทั้งในรูปของสารละลายยางและในรูปของน้ำยาง แต่ในทางปฏิบัติแล้วผู้ประกอบการส่วนใหญ่ยังคงใช้กระบวนการอิพอกซิเดชันในรูปของน้ำยางมากกว่า

ในการเกิดปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน ส่วนใหญ่จะใช้เพอร์อิโซชิดในการทำปฏิกิริยาเนื่องจากมีความเข้ากันได้กับระบบที่มีน้ำเป็นตัวกลาง กลไกการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดผ่านสภาวะทรานซิชัน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 8 โดยปริมาณการเกิดอิพอกซิเดชันบนสายโซ่โมเดลของยางธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับสภาวะในการเกิดปฏิกิริยา ยางธรรมชาติอิพอกซิเดชันที่ผลิตในเชิงการค้าจะมีอยู่ 2 เกรด คือ เกรดที่มีปริมาณอิพอกซิเดชันร้อยละ 25 โดยไมล์และร้อยละ 50 โดยไมล์ ส่วนค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของยางธรรมชาติอิพอกซิเดชันจะขึ้นอยู่โดยตรงกับระดับของการเกิดอิพอกซิเดชัน กล่าวคือ ค่า T_g จะสูงขึ้นตามปริมาณการเกิดอิพอกซิเดชัน ซึ่งการเพิ่มน้ำของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว แม้ว่าจะส่งผลทำให้ยางสูญเสียสมบัติความยืดหยุ่นไปแต่ก็ทำให้สมบัติบางประการดีขึ้น ได้แก่ สมบัติเชิงกล การรับแรง การซึมติดกับโลหะ และการเกาะติดบนพื้นผิวเปลี่ยน เป็นต้น



รูปที่ 8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาอิพอกซิดย์บันด์ด้วยเพอร์อะเซต [6]

ยางธรรมชาติอิพอกซิไดร์ฟสามารถวัลคานาไซด์ได้ด้วยกำมะถัน ในกรณีที่พบว่ามีการดักแด้ของอุ่นในยางซึ่งอาจส่งผลเสียต่ออัตราเร็วในการวัลคานาไซด์ด้วยกำมะถัน ผู้ประกอบการก็สามารถกำจัดกรดเหล่านี้ออกໄไปได้โดยการใช้โซเดียมคาร์บอเนต แมgnีเซียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ หรือแคลเซียมสเตียเรต ยางธรรมชาติอิพอกซิไดร์ฟจะเหมาะสมกับการวัลคานาไซด์ด้วยระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และระบบประสิทธิภาพ (EV) นอกจากนี้ยางธรรมชาติอิพอกซิไดร์ฟยังสามารถเกิดการวัลคานาไซด์ได้โดยใช้สารประกอบเอมีนหรืออะมิโนไซเลน ทั้งนี้เพราะในโครงสร้างไม่เลกูลของยางธรรมชาติอิพอกซิไดร์ฟมีหมู่อิพอกซิที่ว่องไวน์ที่ตอบปฏิกิริยากับสารเคมีดังกล่าว

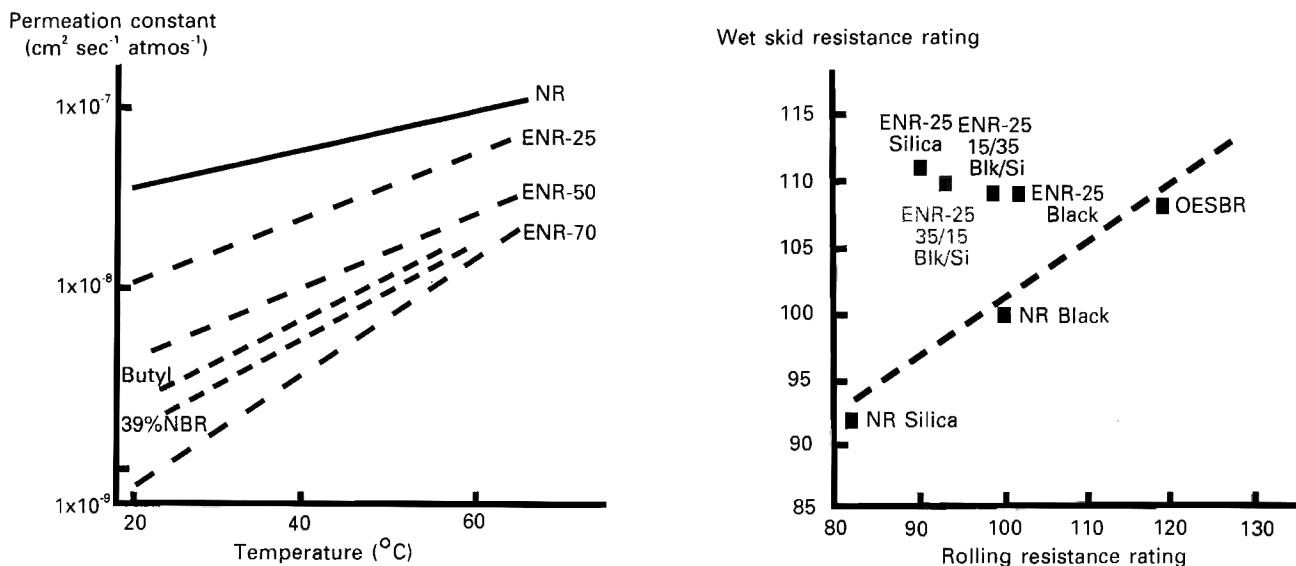
จากการศึกษาเกี่ยวกับการใช้เข้มข้นในการเสริมแรงยาง ENR 50 ที่วัลคานาไซด์โดยใช้พารา-ฟินิลลีนไดเอมีน (p-PDA) และมีบิสฟินอล-เอ (bisphenol A) เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา พบร่วมกับการวัลคานาไซด์ที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 30-75 นาที จะได้ยางวัลคานาไซด์ที่มีค่าความทนต่อแรงดึง扯งนาน 12-15 เมกะพาสคอล ซึ่งการวัลคานาไซด์ด้วยเอมีนจะทำให้ยางมีความแข็งและมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่สูงกว่าการใช้กำมะถัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนของหมู่บิสฟินอล-เอกับไมเลกูลยางนั้นเอง

เนื่องจากการทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันส่งผลทำให้ยางมีความเป็นข้าวสูงขึ้น ดังนั้น ยางธรรมชาติอิพอกซิไดร์ฟซึ่งมีความทนต่อน้ำมันสูงกว่ายางธรรมชาติเกรดที่เป็นก้อนข้างมาก (ดังแสดงในตารางที่ 2) ซึ่งระดับความทนต่อน้ำมันของยางธรรมชาติอิพอกซิไดร์ฟจะสูงอยู่โดยตรงกับปริมาณของหมู่อิพอกซิไดร์ฟ จากข้อมูลในตารางจะเห็นวายางธรรมชาติอิพอกซิไดร์ฟที่มีหมู่อิพอกซิไดร์ฟสูงถึงร้อยละ 50 (ENR50) จะมีความทนต่อน้ำมันอยู่ในระดับที่สูงใกล้เคียงกับยางในไทรอล ทั้งนี้การเพิ่มน้ำมันของปริมาณหมู่อิพอกซิไดร์ฟในไมเลกูลของยางธรรมชาติ นอกจากจะทำให้ยางมีความทนต่อน้ำมันสูงขึ้นแล้ว ยังทำให้ยางมีค่าการซึมผ่านของก๊าซที่ต่ำลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 9

ตารางที่ 2 ความกบต่อเบ้าบันของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอิพอกซิดช์ และยางไบรเกลส์

ชนิดของน้ำมัน	ร้อยละการเพิ่มน้ำมันของปริมาตรยาง หลังการแช่ในน้ำมันที่ 23°C เป็นเวลา 4 วัน			
	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

จากการศึกษาผลของยางธรรมชาติอิพอกซีไดร์ต์ต่อมนบดีบางประการของยางล้อรถยนต์พบว่ายางธรรมชาติอิพอกซีไดร์ท์ที่ได้รับการเสริมแรงด้วยสารตัวเติมบางชนิด เช่น เขม่าดำเนิน ชีลิกา จะมีสมบัติการยึดเกาะบนพื้นผิวน้ำเปียก (wet grip) ที่ดีและมีค่าความต้านทานต่อการหมุน (rolling resistance) ต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 10 จากนี้จะปะพบร่วมกันว่ายางธรรมชาติอิพอกซีไดร์ท์ที่ผสมเขม่าดำเนิน หรือชีลิกา หรือทั้งสองอย่างมีความต้านทานต่อการลื่นไถลบนพื้นผิวน้ำเปียกที่สูงกว่ายางธรรมชาติที่ผสมชีลิกาหรือเขม่าดำเนินอย่างมากในขณะที่ยังคงรักษาสมบัติความต้านทานต่อการหมุนให้อยู่ในระดับที่ต่ำได้



รูปที่ 9 ค่าคงที่ในการซึมพ่านของก้าชของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอิพอกซีไดร์ท์ ยางบีวีกีล ยางไนโตรส ที่อุณหภูมิต่างๆ

รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อการลื่นไถลบนพื้นผิวน้ำเปียกกับความต้านทานต่อการหมุนของยางเป็นต่างๆ

ดังนั้น ยางธรรมชาติอิพอกซีไดร์ท์ จึงสามารถนำไปใช้งานได้ในหลายรูปแบบ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 3 นอกจากนี้ยังสามารถนำยางชนิดนี้ไปผสมกับโพลิเมอร์ชนิดต่างๆ เช่น โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) เพื่อปรับปรุงสมบัติความเหนียวของโพลีไวนิลคลอไรด์ให้สูงขึ้น หรืออาจนำไปผสมกับยางธรรมชาติ ยางสไตรีนบิวทาไดอีน โพลิอะคริลิกแอซิด และโพลิคิโน่แลคโทน เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของโพลิเมอร์เหล่านี้ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใช้งานยางธรรมชาติอิพอกซีไดร์ท์ยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพยาง ซึ่งเกิดจากหมุนอิพอกซีไดร์ท์ที่สามารถถลายตัวได้เมื่อเก็บไว้เป็นเวลานาน

ตารางที่ 3 การใช้ประโยชน์ของยางธรรมชาติอิพอกซีไดร์ท์

สมบัติเด่น	การใช้งาน	เกรดของยาง ENR
ความทนต่อน้ำมัน ความทนต่อแรงดึง	ท่อยาง ปะเก็น ข้อต่อ	ENR 25, ENR 50
การซึมผ่านของก้าช	ถุงลม ยางใน ยางชั้นในของยางรถยนต์	ENR 25
การเสริมแรงด้วยชีลิกา	ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการซึมดำเนิน หรือชีลิกา	ENR 25
การยึดเกาะพื้นผิวน้ำเปียก ความต้านทานต่อการลื่นไถล	หน้ายางรถยนต์ พื้นกันลื่น พื้นรองเท้ากีฬา	ENR 25, ENR 50
การรับแรง การดูดซับแรง	ยางรองกันการสั่นสะเทือน ยางที่ใช้ในงานวิศวกรรม	ENR 25, ENR 50
การยึดเกาะ การติดกัน	การเคลือบบน PVC สำหรับสายพานลำเลียง	ENR 25, ENR 50

2.2 ยางธรรมชาติคลอรีนated (Chlorinated natural rubber)

ยางธรรมชาติคลอรีนเป็นยางที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับก๊าซคลอรีนในสภาวะที่เป็นกรด โดยผลผลิตที่ได้จากการทำปฏิกิริยาจะมีปริมาณคลอรีนสูงถึงร้อยละ 60 ทำให้ลักษณะความเป็นยางหายไป (non-rubbery) เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่า ถ้าบีร์มาณ์คลอรีนในไมเลกุลสูงขึ้น ความยืดหยุ่นหรือความเป็นยางจะลดลง ปฏิกิริยาคลอรีนเข้านของยางธรรมชาติสามารถเกิดขึ้นได้ทั้ง ในสภาพยางแห้ง สารละลาย หรือน้ำยา แต่โดยทั่วไปผู้ผลิตส่วนใหญ่นิยมเตรียมยางธรรมชาติคลอรีนatedในรูปของสารละลายมากกว่า วิธีการเติมโดยการนำยางธรรมชาติไปละลายในตัวทำละลายก่อน และจึงทำปฏิกิริยาคลอรีนเข้า ซึ่งในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมจะเติมยามนี้ด้วย โดยการนำยางธรรมชาติไปละลายในคาร์บอนเทหะคลอร์ไวร์ จากนั้นจึงเติมสารเพิ่มความเสียร้ายและเปนไฮคล珮อร์ออกไซด์ลงไป เหล้าพ่นสารละลายนี้ลงในหอยให้คลอรีน (chlorinating tower) เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับคลอรีน ท้ายสุดจึงทำการระเหยเพื่อกำจัดตัวทำละลายออกไป ยางธรรมชาติคลอรีนatedที่ได้จะถูกนำไปล้าง ปั่น ทำให้แห้ง และบดให้เป็นผงต่อไป

ปฏิกิริยาคลอรีนเข้าจะเกิดได้ดีที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่ำกว่า 1 เพราะสภาวะที่มีความเป็นกรดสูงเข่นี้จะช่วยหลีกเลี่ยงการเกิดกรดไฮโดรคลอริกหรือไฮโปคลอริได้ โดยมีรายงานว่าเมื่อเวลาผ่านไป 45 ชั่วโมง จะเกิดปฏิกิริยาคลอรีนเข้าได้มากถึงร้อยละ 60 ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วในช่วง 30 เปอร์เซ็นต์แรก จากนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้าลงและพบว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาคลอรีนเข้าไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอย่างมั่นคงสำคัญ

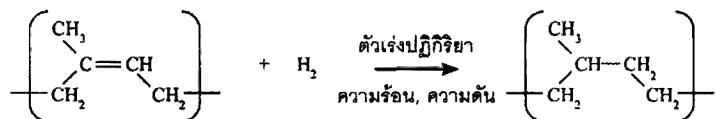
จากการวิเคราะห์ทางความร้อน พบว่าการสีอมสภาพของยางธรรมชาติคลอรีนatedภายใต้สภาวะของก๊าซในไทรเจนจะเป็นแบบขั้นตอนเดียว ซึ่งจะยังคงมีโครงสร้างcarbonในตัวที่เสถียรอยู่ถึงร้อยละ 30 ที่อุณหภูมิระหว่าง 360-700 °C ในขณะที่การสีอมสภาพภายใต้

ภาวะอากาศปกติจะเป็นแบบหลายขั้นตอน โดยจะมีการสีอมสภาพไปทั้งหมด 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 560 °C และจากการรายงาน การวิจัยล่าสุด พบว่าการสีอมสภาพของยางธรรมชาติคลอรีนatedภายใต้ความร้อนและออกซิเจน จะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกเป็นปฏิกิริยาด้วยไฮโดรคลอรีน (dehydrochlorination) ซึ่งก็คือ ปฏิกิริยาการปลดปล่อยก๊าซไฮโดรเจนคลอร์ (HCl) ออกจากโครงสร้างของไมเลกุล และขั้นที่สองเป็นการสลายตัวของสายโซ่ไมเลกุลหลักขึ้นเนื่องมาจากออกซิเจน [7]

ยางธรรมชาติคลอรีนatedสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุดูบสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตสี เนื่องจากมีความทนต่อกรด-ด่างที่ดี รวมไปถึงความทนต่อการสึกกร่อน ทนต่อการสีอมสภาพ ทนต่อการกัดกร่อนของน้ำทะเล และสามารถนำมาใช้เป็นภาชนะ เช่น ชาม ถ้วย หรือช้อน ออกไซด์ได้

2.3 ยางธรรมชาติไฮโดรเจนated (Hydrogenated natural rubber)

ยางธรรมชาติไฮโดรเจนated เติมได้โดยนำยางธรรมชาติซึ่งอยู่ในรูปสารละลาย (โดยใช้ตัวทำละลาย เช่น โซเดียม หรือโซดาโซดา) มาทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิและความดันสูง ยางธรรมชาติไฮโดรเจนatedเป็นยางที่ไม่มีสี โปร่งแสง มีความเสียร้ายต่อการสีอมสภาพเนื่องจากความร้อน แสงแดด ออกซิเจน และรังสีค่อนข้างสูงมาก เพราะมีปริมาณพันธะคู่อยู่ในไมเลกุลน้อย ยางธรรมชาติไฮโดรเจนatedเป็นยางที่มีโครงสร้างเหมือนเป็นโพลีเมอร์ของหนูเทิลินต่อสลับกันกับหนูโพราฟลีน ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 โครงสร้างและการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนของยางธรรมชาติ [8]

การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนเข้นในยางธรรมชาติ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเกิดปฏิกิริยาแบบเป็นเนื้อเดียวกัน การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเกิดปฏิกิริยาแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และปฏิกิริยาที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (ดูตารางที่ 4 ประกอบ)

ตารางที่ 4 วิธีการกำ่ปั๊กิริยาให้โดดเด่นเป็นกลางธรรมชาติ

วิธีการทำปั๊กิริยา	ผลผลิต	ปั๊กิริยาข้างเคียง	ความเป็นพิษของตัวเร่งปั๊กิริยาและการกำจัด
ใช้ตัวเร่งปั๊กิริยาโดยการเกิดปั๊กิริยาแบบเป็นเนื้อเดียวกัน	ปริมาณการเกิดไออกอิเจนสูง (ตัวมากถึง 100%)	สามารถเกิดปั๊กิริยา การเติมสภาพได้ แต่แก้ไขโดยการใช้ตัวเร่งปั๊กิริยานิกเกิล	ตัวเร่งปั๊กิริยานิกเกิล มีความเป็นพิษและกำจัดได้ยาก
ใช้ตัวเร่งปั๊กิริยาโดยการเกิดปั๊กิริยาแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	ปริมาณการเกิดไออกอิเจนสูง ได้ผลผลิตที่มีความบริสุทธิ์มาก	ไม่เกิดปั๊กิริยาหากการเติมสภาพ	ตัวเร่งปั๊กิริยามีความเป็นพิษ
ไม่ใช้ตัวเร่งปั๊กิริยา	ปริมาณการเกิดไออกอิเจนต่ำ	สามารถเกิดปั๊กิริยาใช้ไฮคลอเรชัน ไฮโซเมอไรเชชัน ดีโพลิเมอไรเชชัน	ไม่มีความเป็นพิษ ไม่ต้องกำจัด ตัวเร่งปั๊กิริยา

ตัวเร่งปั๊กิริยาที่ใช้ในการเกิดปั๊กิริยาแบบเป็นเนื้อเดียวกัน ได้แก่ สารอินทรีย์ของโลหะทรานสิชัน เช่น สารประกอบบินทريย์ของโคบัลต์ หรือนิกเกิล โดยใช้ร่วมกับตัวเริตาร์ช เซน R₃Al และ R-Bu₂ ที่สามารถละลายได้ในตัวทำละลาย นอกจากนี้ยังสามารถใช้ตัวเร่งปั๊กิริยาที่เป็นสารประกอบของโรเดียม เช่น RhCl(PPh₃)₃ ซึ่งตัวเร่งชนิดนี้มีราคาแพงกว่าสารประกอบของโคบัลต์และนิกเกิล โดยกลไกของ การเกิดปั๊กิริยาจะเริ่มต้นจากการเข้าทำปั๊กิริยาระหว่างสารประกอบของโรเดียมและไออกอิเจน เกิดเป็นสารประกอบเชิงช้อน RhClH₂(PPh₃)₂ จากนั้นจึงมีการแลกเปลี่ยนลิแกนด์กับตัวทำละลาย (S) เกิดเป็น RhClH₂(PPh₃)₂(S) ซึ่งสามารถทำปั๊กิริยา กับพันธุ์คุณในไมเลกุลยาง เกิดเป็นสารประกอบเชิงช้อนของมูอัลลิค กับโลหะทรานสิชันบนไมเลกุลยาง และเมื่อสารประกอบเชิงช้อนนี้เกิดการแตกตัวจะเกิดเป็นยางธรรมชาติที่อิ่มตัวขึ้น

สำหรับตัวเร่งปั๊กิริยาที่นิยมใช้ในการเกิดปั๊กิริยาแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน คือ สารประกอบของโลหะที่ไม่ละลายในตัวทำละลาย เช่น แพลเลเดียมในแคลเซียมคาร์บอนেต การเกิดปั๊กิริยาแบบนี้จะให้ผลผลิตที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยไม่เกิดปั๊กิริยาข้างเคียง เช่น การตัดสายโซ่ในเลกุล อย่างไรก็ตาม ปั๊กิริยานี้มีวิธีการเตรียมที่ยุ่งยาก อีกทั้งสารเคมีที่ใช้มีความเป็นพิษสูง เมื่อบริสุทธิ์เทียบกับการเกิดปั๊กิริยาแบบเป็นเนื้อเดียวกัน จะพบว่า อัตราการเกิดปั๊กิริยาแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกันจะเกิดได้ช้ากว่าและต้องการสภาวะของการเกิดปั๊กิริยาที่อุ่นแรงกว่า ส่วนวิธีการใช้โคโรจีเนชันโดยไม่ใช้ตัวเร่งปั๊กิริยานั้น สรวนใหญ่จะใช้ไดเมิต (diimide) ซึ่งเกิดจากพารา-ໂගลูอีนชัลฟอนิลไอกราเซน (TSH) ในการทำปั๊กิริยา วิธีนี้อาจก่อให้เกิดปั๊กิริยาข้างเคียงได้ง่ายจึงทำให้มีปริมาณการเกิดไออกอิเจนต่ำ

ยางธรรมชาติไออกอิเจน มีปริมาณพันธุ์คุณอยู่น้อยมาก (หรืออาจไม่มีพันธุ์คุณอยู่เลย) จึงส่งผลทำให้ยางชนิดนี้มีสมบัติความทนต่อความร้อนและโคลนที่สูงมาก ในทางทฤษฎีจึงสามารถนำยางชนิดนี้ไปใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูงมากๆ ได้ เช่นเดียวกับยางสังเคราะห์ที่ทนความร้อน เช่น ยางเอทธิลีนโพลิลีนไดอีน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การเตรียมยางธรรมชาติไออกอิเจนตยังคงจำกัดอยู่เพียงแค่ในระดับห้องปฏิบัติการ ยังไม่สามารถพัฒนาต่อยอดไปในระดับการผลิตเชิงพาณิชย์ได้ ทั้งนี้ เนื่องจากข้อขั้นตอนในการเตรียมยางชนิดนี้ค่อนข้างยุ่งยาก ปั๊กิริยาที่เกิดได้ค่อนข้างช้าและจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปั๊กิริยาที่มีราคาแพง ด้วยเหตุนี้ความสนใจในการเตรียมยางธรรมชาติไออกอิเจนจึงมุ่งไปที่การพัฒนาตัวเร่งปั๊กิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาถูก

3. การกราฟต์โพลีเมอร์ลงบนสายโซ่ไมเลกุลยาง

การตัดแพร์มิโนเลกุลด้วยวิธีนี้เริ่มต้นมาตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1930 ปั๊กิริยากราฟต์ในยางธรรมชาติสามารถทำได้ทั้งในรูปยางแห้ง สารละลายยาง และน้ำยาง โดยการทำปั๊กิริยาท่ออยู่ในรูปปั๊กิริยาที่มีวิธีที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์มากที่สุด ปัจจุบัน ได้มีการศึกษาการเตรียมวิเคราะห์ และทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วยไมโนเมอร์ประเภทไวนิลชนิดต่างๆ มากมาย เช่น อะคริลิคในไทรล์ เมทิลเมทาควิเลต เมทิลไนโตรคิโนน สโตรีน และคาโปแลคโทน แต่ปั๊กิริยากราฟต์โพลีเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก เพราะได้เปอร์เซนต์กราฟต์สูง คือ กราฟต์ด้วยเมทิลเมทาควิเลตหรือสโตรีน ซึ่งกลไกการกราฟต์ไวนิลโมโนเมอร์ลงบนสายโซ่ไมเลกุลยางมักเกิดผ่านอนุมูลิสระ ดังแสดงตัวอย่างสมการในรูปที่ 12

1. ปฏิกิริยาการเริ่ม

- การแตกตัวของสารเริ่มปฏิกิริยา



- การทำปฏิกิริยา กับ มโนเมอร์



- การทำปฏิกิริยา กับ ยางธรรมชาติ

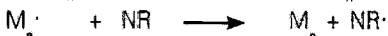
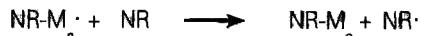


3. ปฏิกิริยาการถ่ายอนอนุคลอิสระ

- ไปยังโนโนเมอร์



- ไปยังยางธรรมชาติ



- ไปยัง chain transfer agent



2. ปฏิกิริยาการเติมโพลิเมอร์

- การเกิดโพลิเมอร์ระหว่างของโนโนเมอร์



- การเกิดกราฟต์โพลิเมอร์ระหว่าง



4. ปฏิกิริยาการสิ้นสุด

- ระหว่างโนโนเมอร์



- ระหว่างกราฟต์โพลิเมอร์กับโนโนเมอร์



- ระหว่างกราฟต์โพลิเมอร์



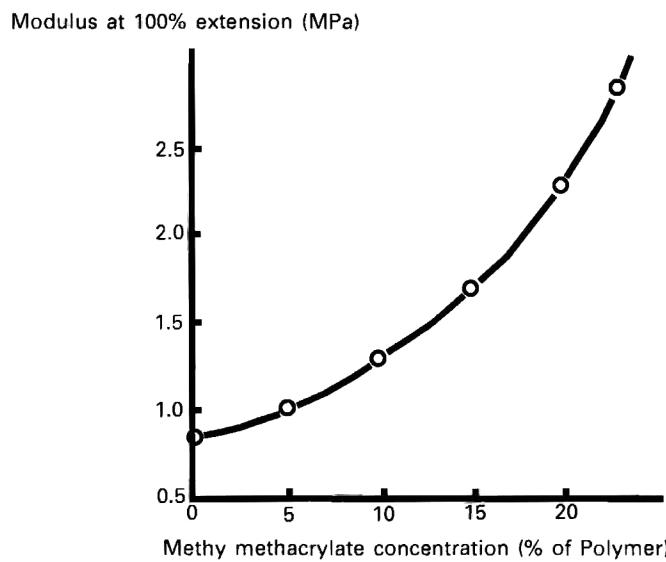
รูปที่ 12 การเกิดกราฟต์โพลิเมอร์เมื่อบนเบื้องธรรมชาติ [9]

คิวมนพอร์ออกไซด์ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายเจือจางที่มี Fe^{2+} เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะถลวยตัวให้ออนุคลอิสระของอนุอัลคลอกอชี (RO \cdot) จากนั้นจะทำปฏิกิริยากับโนโนเมอร์หรือในสิ่งของเล็กๆ น้อยๆ ที่ต่ำแห่งจะลดลงและทิ่ลเดนิกไอก็ได้รับเจนได้เป็นอนุคลอิสระของโนโนเมอร์ (M \cdot) และอนุคลอิสระของโพลีไครพริน (NR \cdot) ซึ่งเป็นตัวเริ่มต้นในการเกิดกราฟต์ และเมื่อมีอนุคลอิสระของโพลีไครพรินนี้ทำปฏิกิริยากับโนโนเมอร์ก็จะทำให้เกิดกราฟต์ขึ้น เป็นกราฟต์โพลิเมอร์ที่มีหมุปลาบเป็นอนุคลอิสระ (NR-M $_n\cdot$) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาการถ่ายอนอนุคลอิสระไปยังยางธรรมชาติ หรือโนโนเมอร์ หรือ chain-transfer agent ได้ และอาจเกิดการสิ้นสุดปฏิกิริยากับตัวเอง หรืออนุคลอิสระของโนโนเมอร์ได้ ทั้งนี้อนุคลอิสระของโพลิเมอร์ (M $_n\cdot$) ที่สามารถสิ้นสุดปฏิกิริยาจากการทำปฏิกิริยากับอนุคลอิสระของโพลิเมอร์ตัวอื่น (M $_{n+m}\cdot$) เกิดเป็นโพลิเมอร์อิสระได้

กราฟต์โพลิเมอร์ของยางธรรมชาติในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ ยางธรรมชาติกราฟต์โพลิเมทธิคิล (PMMA) ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้ วิทยาลัยพอลล์สเอ็มจี (Hevea Plus MG) ซึ่งโดยทั่วไปมี 2 เกรด ได้แก่ MG30 และ MG49 น้ำมันโค เกรดที่มีโพลิเมทธิคิลเดตอยู่ร้อยละ 30 และร้อยละ 49 ตามลำดับ โดยทั่วไป ยางชีวีเยียพอลล์สเอ็มจี จะมีค่าความแข็ง และโมดูลัสสูงขึ้นตามนิร�านของเมทิคิลเมทธิคิล ดังแสดงในรูปที่ 13

ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ระหว่างเมทิคิลเมทธิคิลเดตส่วนใหญ่จะเกิดในรูปของอิมลัลชน ซึ่งได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น ความเข้มข้นของตัวเริ่มปฏิกิริยาและโนโนเมอร์ เวลา และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เพราะปัจจัยเหล่านี้อาจส่งผลทำให้บริมาณการเปลี่ยนเป็นโพลิเมอร์และประสิทธิภาพในการกราฟต์มีความแตกต่างกันไป เช่น ที่อุณหภูมิ 55 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมงจะให้ผลการทดลองที่ดี กล่าวคือ มีเปอร์เซนต์การเปลี่ยนเป็นโพลิเมอร์สูงถึงร้อยละ 75.9 และมีประสิทธิภาพในการกราฟต์ร้อยละ 64.1

ยางชีวีเยียพอลล์สเอ็มจี มีสมบัติเด่น คือ มีความแข็งและไม่ดลลสสูง มีความทนต่อการสึกกร่อนดี และมีสีอ่อน สามารถนำไปใช้เพิ่มความทนต่อแรงกระแทกในพลาสติกบางชนิด เช่น โพลิสโตรีน หรืออาจนำไปใช้ผสมกับยางธรรมชาติเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งให้แก่ยางโดยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อความหนืดหรือกระบวนการกราฟต์ซึ่งยางสูงเนื่องเป็นในกรณีของการใช้เข็มม่าดำเนินการเพิ่มความแข็ง อย่างไรก็ตาม ยางชีวีเยียพอลล์สเอ็มจีสามารถนำไปใช้ทดแทนเข็มม่าได้ทั้งหมด เพราะยางวัลภาในที่ได้ยังคงมีสมบัติความทนต่อการสึกกร่อนที่ค่อนข้างดี ด้วยเหตุนี้ ในการออกแบบยางบางครั้งจึงต้องใช้ยางธรรมชาติผสมกับยางชีวีเยียพอลล์สเอ็มจีและใช้เข็มม่าดำเนินการตัวเดิมเพื่อบรรบปูรูสมบัติทางกายภาพอื่นๆ นอกเหนือจากความแข็ง [5] ตารางที่ 5 แสดงตัวอย่างสมบัติของยางมสมที่มีสัดส่วนของการผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางชีวีเยียพอลล์สเอ็มจีแตกต่างกันโดยมีเข็มม่าดำเนินการตัวเดิมเสริมแรง



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโนดูลัสและความขับขันของ
เบกิลเมากอริเลตทีกราฟต์บุนยางธรรมชาติ

ตารางที่ 5 สมบัติของยางธรรมชาติ เบกิลเมากอริเลตทีกราฟต์บุนยางธรรมชาติ ยางเอรี่เพลสเริมจี 49

ส่วนผสม	ปริมาณ (phr)		
ยางธรรมชาติ	70	50	30
ยางเอรี่เพลสเริมจี 49	30	50	70
เชมาร์ดาเกอร์ N326	50	50	50
ซิงก์ออกไซด์	5	5	5
กรดสเตียริก	2	2	2
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ	1	1	1
สารตัวเร่งปฏิกิริยา CBS	0.5	0.5	0.5
กำมะถัน	2.5	2.5	2.5
สารหน่วงปฏิกิริยา	0.4	0.6	0.6
สมบัติของยางวัลคาไนซ์ (180°C , 2 นาที)			
ความแข็ง (IRHD)	78	89	98
การยึดตัว ณ จุดขาด (%)	430	270	130
พลังงานสะสม (MJ/m)	52	28	10
การกระเด้งตัว (%)	49	42	38

สำหรับน้ำยางชีวีพลัสมีมี ส่วนใหญ่จะนำไปใช้เป็นวัสดุดีบในการผลิตการห่อหุ้นสุดในการเชื่อมติดกับเครื่องหนัง สีงทอง โลหะ และโพลีไวนิลคลอไรด์ นอกจากนี้ยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟฟ์มักถูกนำไปใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ในการเตรียมโพลีเมอร์ผสม ตัวอย่างเช่น ในกรณีของยางธรรมชาติที่กราฟฟ์ด้วยเมทิลเมทาคริเลต (MMA) ได้มีการนำไปใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติ และโพลีเมทธิลเมทาคริเลต (PMMA) ซึ่งพบว่า การเพิ่มปริมาณของยางธรรมชาติที่กราฟฟ์ด้วยเมทิลเมทาคริเลต จะส่งผลทำให้โพลีเมอร์ผสม มีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้ดีขึ้น ทั้งนี้ เพราะยางธรรมชาติที่กราฟฟ์ด้วยเมทิลเมทาคริเลตสามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยทำให้ เข้ากันได้ นั่นคือทำให้แรงยืดติดระหว่างวัสดุคายางและพลาสติกสูงขึ้น

การตัดแบ่งทางเคมีจากน้ำยางธรรมชาติไปรตินต่อ

เนื่องจากสารประกอบที่ไม่ใช่ยางในยางธรรมชาติ เช่น โปรตีน ไขมัน สามารถยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดโพลีเมอร์แบบอนุมูลอิสระได้ ดังนั้น ปัจจุบันจึงได้มีการนำน้ำยางธรรมชาติไปรตินต่อ (Deproteinized Natural Rubber: DPNR) มาใช้ในการตัดแบ่งทางเคมีมากขึ้น น้ำยางธรรมชาติไปรตินต่อ สามารถเตรียมได้จากการใช้เอนไซม์ในการย่อยไปรติน แล้วนำไปปั่นแยก

จากการศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติเหลวจากน้ำยางไปรตินต่อ [10] พบว่า น้ำยางธรรมชาติไปรตินต่อสามารถเกิดการสลายตัว ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนได้เร็วกว่า น้ำยางธรรมชาติแบบปกติ เมื่อจากไม่มีสารต้านอนุมูลอิสระในยางธรรมชาติและมีสิ่งเจือปนน้อยกว่า โดยสามารถเตรียมยางเหลวให้มีน้ำหนักโมลเกลต์ในช่วงเดียวกับยางเหลวที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติปกติ คือประมาณ 1.7×10^5 ยางเหลวนี้ สามารถนำไปใช้เป็นตัวปรับความหนืดสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดปัญหาการแพ็คไปรติน

จากการศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกซีได้จากน้ำยางธรรมชาติไปรตินต่อ เบรเยลเทียบกับน้ำยางธรรมชาติปกติ พบว่า

ของไปรตินไม่มีผลต่อปฏิกิริยาการอิพอกซีได้ ดังนั้น อัตราเริ่มต้นของการเกิดอิพอกซ์ในน้ำยางธรรมชาติทั้ง 2 ชนิดจึงไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ยางธรรมชาติอิพอกซีได้ที่เตรียมจากน้ำยางไปรตินต่อจะมีปริมาณเจลและปริมาณเน่าที่ต่ำกว่า ทั้งนี้ ยางธรรมชาติอิพอกซีได้ที่เตรียมจากน้ำยางไปรตินต่อสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เหมือนกับยางที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติปกติ

เมื่อทำการศึกษาการเตรียมกราฟฟ์โดยโพลีเมอร์ของสีตีเร็นกับน้ำยางธรรมชาติ พบว่า ถ้าใช้น้ำยางธรรมชาติไปรตินต่อจะทำให้ได้ เปอร์เซนต์การเปลี่ยนเป็นโพลีเมอร์สูงถึงร้อยละ 97 และมีปริมาณการกราฟฟ์ร้อยละ 80 ในขณะที่การใช้น้ำยางธรรมชาติปกติจะให้ เปอร์เซนต์การเปลี่ยนเป็นโพลีเมอร์และปริมาณการกราฟฟ์ที่ต่ำกว่า คือ ร้อยละ 67 และร้อยละ 24 ตามลำดับ ยางธรรมชาติไปรตินต่อ กราฟฟ์สีตีเร็น สามารถนำไปใช้เป็นสารช่วยให้เข้ากันในการผสมระหว่างโพลีโพลีลีกับยางธรรมชาติ นอกจากนี้การกราฟฟ์เมทิลเมทาคริเลต บนน้ำยางธรรมชาติไปรตินต่อที่ให้ผลการกราฟฟ์สูงสุนเดียวกัน

เอกสารอ้างอิง

- Gelling, I.R., Porter, M., Chemical Modification of Natural Rubber, Ch.10, Robert A.D., "Natural Rubber Science and Technology", Oxford: Oxford University Press, 359, 1988.
- Hashim, A.S., Ong, S.K., Jessy, R.S., A general review of recent developments on chemical modification of NR, *Natuur Rubber*, 28, 39 02.
- Brosse J.C., Campistron L., Derouet D., Hamdaoui A.EI., Houdayer S., Reyx D., Ritoit-Giller S., *J Appl Polym Sci.*, 78, 1461 (2000).
- Bristow G.M., Sears A.G., Wheelans M.A., Some Possible New Applications for Liquid Natural Rubber, p.65-78
- Baker, C.S.L., Modified Natural Rubber, Ch.2, Bhowmick, A.K., Stephens, H.L. "Handbook of Elastomers", Marcel Dekker (1988).
- Azamam S., Hashim S.K., *Kautsch Gummi Kunstst*, 46, .208 (1993).
- Zhong J.P., Li S.D., Yu H.P., Wei Y.C., Peng Z., Qu J.A., Guo C.K., *J Appl Polym Sci.*, 81, 1305 (2001).
- Kroschwitz J.I., "Encyclopedia of Polymer Science and Engineering", New York: John Wiley & Sons, 765, 1987.
- Arayapranee W., Prasassarakich P., Rempel G.L., *J Appl Polym Sci.*, 84, 1872 (2002).
- Tangpakdee J., Mizokoshi M., Endo A., Kawahara S., Tanaka Y., *Rubber Chem Technol.*, 71, 795 (1998).