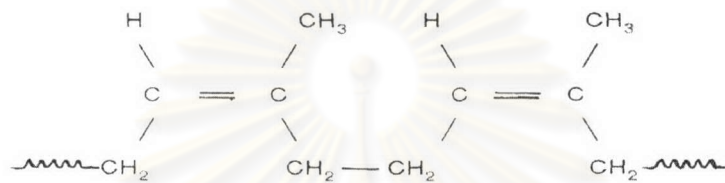


บทที่ 2 วารสารปริทัศน์

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางธรรมชาติ โดยทั่วไปหมายถึงยางที่ได้จากต้นยางพารา (*Hevea Brasiliensis*)⁽⁴⁾ ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีเป็น “พอลิไอโซพรีน” (polyisoprene) โดยหน่วยย่อยๆ จะต่อกันในลักษณะของ *cis*-configuration ดังนี้



2.1.1 น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex)

น้ำยางที่กรี๊ดได้จากต้นยางพารามีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นข้นคล้ายน้ำนม มีกลิ่นหอมเล็กน้อย มีความหนาแน่น 0.98 g/cm^3 มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ประมาณ 6.8 ประกอบด้วยอนุภาคขนาดต่างๆ กัน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 5 ไมครอน แขนงลอยกระจายอยู่ภายในของเหลวที่เรียกว่า “เซรัม” (serum) อนุภาคเหล่านี้มีประจุเป็นลบ ซึ่งผลักกันตลอดเวลา จึงทำให้อนุภาคเหล่านี้สามารถแขวนลอยและคงสภาพเป็นยางเหลวอยู่ได้นานจนกว่าจะมีสภาวะแวดล้อมและปัจจัยต่างๆ มารบกวนจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง⁽⁵⁾

ยางเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีนเชื่อมต่อกัน 2,000–5,000 หน่วย ใน 1 โมเลกุล น้ำยางสดจากต้นยางไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมโดยตรง เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางต่ำ คือ ประมาณ 25–40 % โดยน้ำหนัก ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเนื้อยางในน้ำยาง ได้แก่ ชนิดของต้นยาง วิธีการกรี๊ดยาง คุณภาพของดินที่ใช้ในการปลูกยาง และสภาพภูมิอากาศ ภูมิประเทศที่ใช้ปลูกยาง เป็นต้น

มีการนำน้ำยางธรรมชาติไปใช้ประโยชน์โดยตรงน้อยมาก เนื่องจากมีปริมาณน้ำสูง และไม่สามารถเก็บรักษาน้ำยางสดได้นาน เพราะเกิดการเน่าเสียเนื่องจากเชื้อราและแบคทีเรีย และจับตัวเป็นก้อนก่อนที่จะถึงโรงงานอุตสาหกรรม ตลอดจนถึงเปลืองค่าขนส่งน้ำยางจากแหล่งต้นยางไปยังโรงงานผลิตวัตถุดิบสำเร็จรูป เพราะน้ำยางสดจะมีเนื้อยางอยู่ประมาณ 30% เท่านั้น นอกนั้นเป็นน้ำและสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยาง ดังนั้น จึงต้องมีการแปลงสภาพน้ำยางสดให้อยู่ในรูปที่สามารถนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้สะดวกขึ้น เช่น แปลงเป็นน้ำยางข้น และยางแห้งชนิดต่างๆ เป็นต้น

2.1.2 การรักษาสภาพน้ำยาง

น้ำยางสดที่ได้จากต้นยางคงสภาพอยู่ได้ไม่เกิน 3 ชั่วโมง แล้วเริ่มจับตัวเป็นเม็ดเล็กๆ ที่เรียกว่า "เม็ดพริก" และจับตัวเป็นก้อนใหญ่ขึ้น อันเนื่องจากสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนไป ปัจจัยสำคัญ คือ ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นในน้ำยาง อุณหภูมิ และสมบัติความคงตัวของน้ำยางแต่ละพันธุ์ ในการเสีสภาพของ น้ำยางนั้น พบว่าน้ำยางถูกแยกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง และส่วนที่เป็นเซรุ่ม ซึ่งภายหลังจะเกิดการบูด และมีกลิ่นเหม็น เนื่องจากการใช้อาหารของจุลินทรีย์ในน้ำยาง จึงต้องเติมสารเคมีเพื่อป้องกันการจับตัวของเม็ดยาง

การรักษาสภาพน้ำยางสดมี 2 ลักษณะ คือ เพื่อสามารถเก็บน้ำยางสดไว้ได้ในระยะเวลาสั้นและเหมาะสมก่อนที่จะนำส่งโรงงานแปรรูปยางดิบประเภทต่างๆ ซึ่งสารเคมีที่รักษาสภาพน้ำยางสดได้แก่

แอมโมเนีย เป็นสารเคมีที่รักษาสภาพน้ำยางกันมานานแล้ว โดยการเติมสารละลายแอมโมเนีย (ทำให้เจือจางประมาณ 25%) ลงไป 0.03–0.06 % ของน้ำหนักน้ำยาง ขึ้นอยู่กับระยะเวลาและระยะทางจากสวนยางไปยังโรงงานแปรรูปยาง ซึ่งจะป้องกันการจับตัวของน้ำยางได้ 5–11 ชั่วโมง แอมโมเนียที่เติมลงในน้ำยางนอกจากช่วยรักษาสภาพของน้ำยางแล้ว ยังช่วยหยุดการเพิ่มปริมาณของจุลินทรีย์ในน้ำยางอีกด้วย⁽⁵⁾

โซเดียมซัลไฟด์ เป็นสารเคมีที่ช่วยรักษาสภาพน้ำยางในช่วงระยะเวลาสั้น โดยเติมสารละลายลงในถ้วยรองน้ำยางหรือถังรวบรวมน้ำยาง โดยใช้ 0.05% ต่อน้ำหนักน้ำยาง โดยการหยดสารละลายเข้มข้น 3% ลงในถ้วยรองน้ำยาง 2–3 หยด แล้วเติมส่วนที่เหลือลงในถังรวบรวมน้ำยาง

2.1.3 การผลิตน้ำยางข้น

น้ำยางสดจากต้นยางไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางต่ำ ซึ่งปริมาณเนื้อยางในน้ำยางที่ใช้ในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์จะต้องมีอย่างน้อย 60% และเนื่องจากความต้องการน้ำยางข้นได้เพิ่มมากขึ้น จึงได้มีวิธีที่จะผลิตน้ำยางข้นเพื่อแยกเอาส่วนที่ไม่ใช่ยางออกไป ซึ่งทำให้ปริมาณเนื้อยางเพิ่มขึ้นและง่ายต่อการเก็บรักษาน้ำยาง นอกจากนี้ ยังช่วยลดสารเคมี และค่าใช้จ่ายในการรักษาสภาพน้ำยางอีกด้วย

ในการผลิตน้ำยางข้นได้มีการรักษาสภาพน้ำยางข้นเพื่อเก็บน้ำยางให้ได้เป็นระยะเวลาสั้นสำหรับบรรจุถังไว้ในโรงงานอุตสาหกรรมไว้ในโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ และการส่ง

ออกนํ้ายางชั้นไปจำหน่ายยังต่างประเทศ โดยพบว่ามีการเคมีหลายชนิดที่สามารถรักษาสภาพนํ้ายางไว้ได้นานซึ่งอาจใช้ร่วมกับสารอื่น หรือใช้ชนิดเดียวก็ได้ ดังนี้

1. โดยทั่วไปจะใช้แอมโมเนียเป็นสารเคมีหลัก ส่วนสารอื่นที่ใช้ร่วมด้วยจะเป็นสารช่วยเสริมเท่านั้น ถึงแม้ว่าการใช้แอมโมเนียเพียงอย่างเดียวจะมีข้อเสียอยู่บ้าง แต่ยังคงนิยมใช้แอมโมเนียกันอยู่ เพราะไม่สามารถหาสารอื่นที่ดีกว่ามาทดแทนได้ ประมาณ 95% ของนํ้ายางชั้นที่ส่งไปจำหน่ายต่างประเทศใช้แอมโมเนียเป็นสารรักษาสภาพนํ้ายาง และสารที่นิยมใช้ร่วม ได้แก่ กรดบอริก โดยใช้กรดบอริก 0.2% ร่วมกับแอมโมเนีย 0.2% และกรดลอริก 0.05% สำหรับกรดลอริกที่ใช้เพื่อลดปฏิกิริยาของกรดบอริกลงบ้าง ซึ่งจะช่วยให้การรักษาสภาพนํ้ายางดีขึ้น ผลของการรักษาสภาพนํ้ายางอาจเนื่องมาจากการเกิด carboxylate-boric acid chelate ซึ่งจุลินทรีย์ไม่สามารถใช้เป็นอาหารได้

2. สารเคมีชนิดเดียว ที่นิยมใช้ ได้แก่ แอมโมเนีย และโซเดียมซัลไฟด์

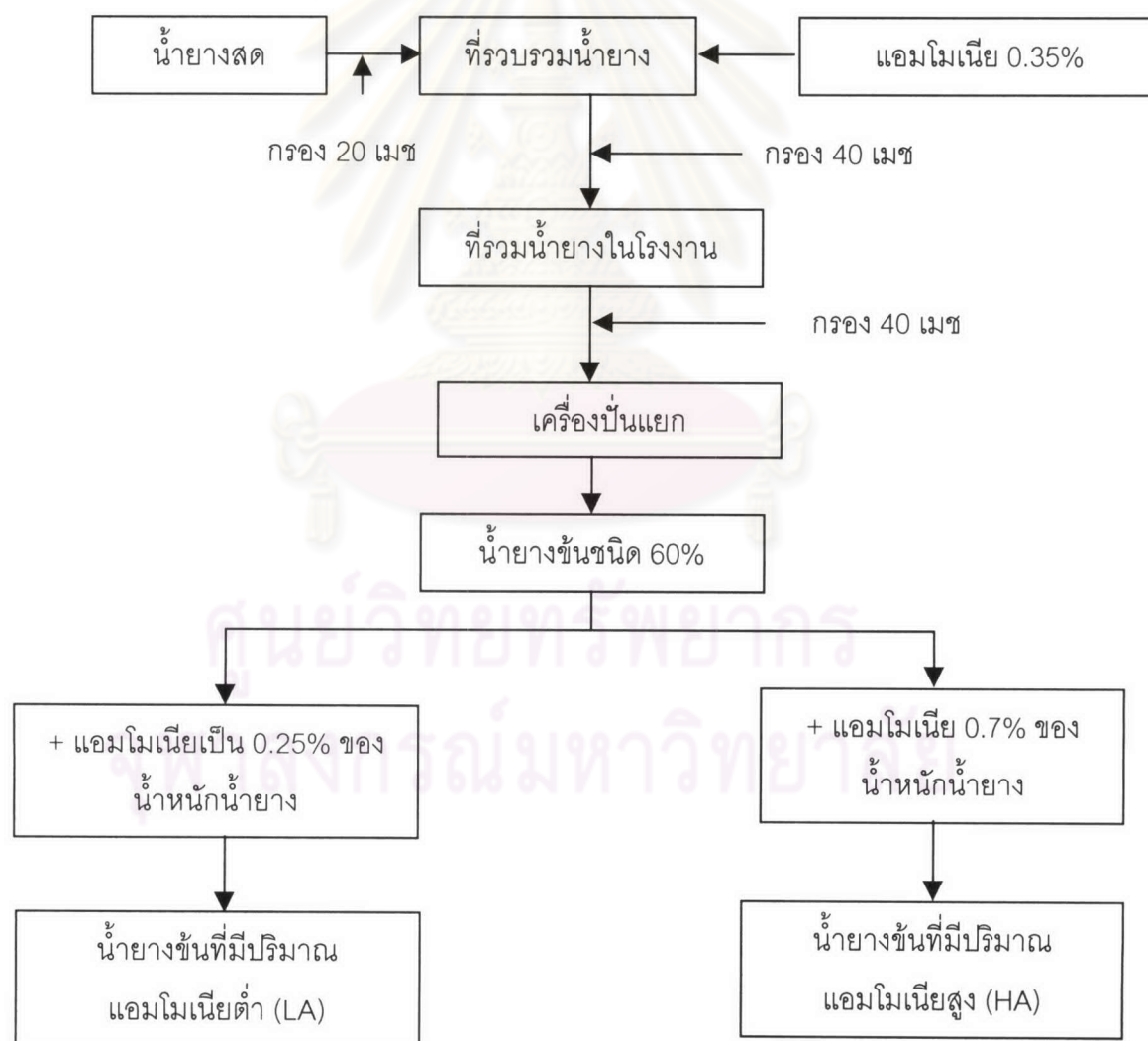
การผลิตนํ้ายางชั้นมีหลายวิธี ^(2, 5) ดังนี้

วิธีทำให้เกิดครีม (creaming) ซึ่งเป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุด โดยในปี ค.ศ. 1924 Traube ได้ทดลองผลิตนํ้ายางชั้นโดยใช้สารที่ทำให้เกิดครีม (creaming agent) ซึ่งได้แก่ โซเดียม หรือแอมโมเนียมอัลจินต (sodium or ammonium alginate) เติมลงในนํ้ายางสด และคนให้เข้ากับนํ้ายาง ทั้งไว้ระยะหนึ่งจะพบว่านํ้ายางแยกออกเป็น 2 ชั้น ชั้นล่างเป็นของเหลวที่มีส่วนของยางเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะถูกแยกออกไป ส่วนชั้นบนเป็นครีมที่มีเนื้อยางสูง ประกอบด้วยปริมาณของแข็งทั้งหมด (% total solid content; %TSC) ประมาณ 61.5% และมีปริมาณเนื้อยางแห้ง (% dry rubber content; %DRC) 60% หลังจากนั้นเติมแอมโมเนียลงไป 0.6–0.8 % ของนํ้าหนักนํ้ายาง เพื่อรักษาสภาพนํ้ายางชั้นแล้วจึงบรรจุลงในถังที่มีความจุประมาณ 200 ลิตร

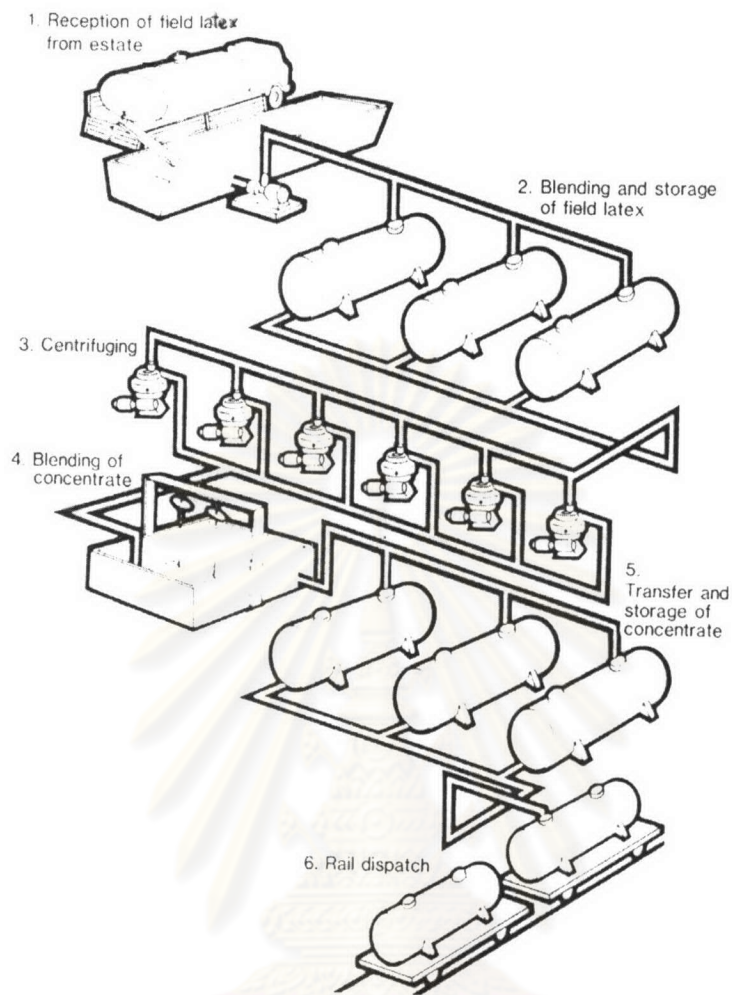
วิธีใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuging machine) ในปี ค.ศ. 1923 Utermark ได้ทดลองผลิตนํ้ายางชั้นโดยวิธีหมุนเหวี่ยง (centrifuging) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ผลิตนํ้ายางชั้นในการค้าอย่างกว้างขวางประมาณ 95% ของผลผลิตรวม และสามารถนํ้ายางชั้นที่ได้ไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางสำเร็จรูปได้แทบทุกชนิด โดยทั่วไปเครื่องหมุนเหวี่ยงประกอบด้วยถ้วยเหวี่ยงแยกที่หมุนด้วยความเร็วประมาณ 7,000–8,000 รอบ/นาที ส่วนประกอบของเครื่องส่วนที่สัมผัสกับนํ้ายางควรมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของแอมโมเนียด้วย ซึ่งควรทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) ไม่ควรใช้โลหะพวก

ทองแดง ทองเหลือง ทองสัมฤทธิ์ และแมงกานีส เพราะจะทำให้น้ำยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น น้ำยางชั้นที่ได้จะมีปริมาณของแข็งทั้งหมด (%TSC) ประมาณ 61.5% และมีปริมาณเนื้อยางแห้ง (%DRC) 60–62 % ส่วนที่เหลือเป็นของเหลวเจือจาง เรียกว่า “หางน้ำยาง” (skim latex) ซึ่งมีเนื้อยางน้อยมาก และจะถูกแยกออกไป เมื่อได้น้ำยางชั้นแล้วจะปรับระดับแอมโมเนียในน้ำยางชั้นโดยผ่านแก๊สแอมโมเนียลงไป 0.6–0.8 % ของน้ำหนักน้ำยาง จะได้น้ำยางที่มีความถ่วงจำเพาะ 0.94–0.95 แล้วจึงบรรจุถังเพื่อจำหน่ายต่อไป

การผลิตน้ำยางชั้นโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงนี้สามารถผลิตน้ำยางชั้นได้ 2 ชนิด คือ น้ำยางชั้นแอมโมเนียสูง (high ammonia, HA) และชนิดแอมโมเนียต่ำ (low ammonia, LA หรือ LA-TZ) ซึ่งขั้นตอนการผลิตแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 และแสดงประเภทของน้ำยางชั้นที่ผลิตโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงในทางการค้าดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การผลิตน้ำยางชั้นชนิด 60 %



รูปที่ 2.2 การผลิตน้ำยางข้นโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงในโรงงานผลิตน้ำยางข้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 น้ำยางชั้นที่ผลิตโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงในทางการค้า⁽⁵⁾

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% เตตระเมทิลไทยูแรม-ไดซิลไฟด์
Low Ammonia	LA-SPP	6	0.2% แอมโมเนีย
Pentachlorophenate			0.2% โซเดียมเพนตะคลอไรไฟเนต
Low Ammonia Boric Acid	LA-BA	5	0.2% แอมโมเนีย 0.24% กรดบอริก

วิธีแยกด้วยกระแสไฟฟ้า (electrodecantation) ปี ค.ศ. 1937 Semperit ทดลองผลิตน้ำยางชั้นโดยใช้วิธีแยกด้วยกระแสไฟฟ้า เนื่องจากน้ำยางสดเป็นของเหลวประเภทคอลลอยด์ ประกอบด้วยสารแขวนลอยหรืออิมัลชันของอนุภาคยางลอยตัวอยู่ในของเหลวที่เป็นตัวกลาง การเคลื่อนไหวของอนุภาคเหล่านี้จะเกิดอย่างต่อเนื่องตามประจุไฟฟ้าที่มีอยู่ เนื่องจากอนุภาคยางมีประจุเป็นลบ จึงวิ่งเข้าหาขั้วบวก

วิธีแยกน้ำยางด้วยกระแสไฟฟ้านี้ทำโดยผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในน้ำยาง ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นภายในเซลล์ อนุภาคของยางจะเคลื่อนเข้าหาขั้วบวกที่อยู่ใกล้ที่สุด ทำให้อนุภาคยางอยู่รวมกันหนาแน่นจนเกิดเป็นน้ำยางชั้นขึ้น นอกจากนี้ ยังสามารถลอยตัวขึ้นสู่ข้างบนซึ่งสามารถช้อนน้ำยางชั้นส่วนนี้ออกจากถังได้ วิธีนี้จะได้น้ำยางชั้นที่มี %TSC 62-63 % และ % DRC 60% หลังจากนั้นก็เก็บรักษาโดยเติมแอมโมเนีย 0.7% ของน้ำหนักน้ำยาง

วิธีทำให้น้ำระเหย (evaporation) ในปี ค.ศ. 1938 Revertex ได้ทดลองผลิตน้ำยางชั้นโดยวิธีการระเหยน้ำ ซึ่งมีเพียงการระเหยน้ำออกไปจากน้ำยางสดเท่านั้น ดังนั้น จึงต้องเติมสารที่ทำให้น้ำยางคงตัวและไม่ระเหิดลงไป ได้แก่ กลู (glue) โฟแทสหรือสบู่ และป้องกันมิให้น้ำยางที่ผิวหน้าหรือบริเวณที่มีการระเหยน้ำเกิดการจับตัว การผลิตทำโดยกรองน้ำยางตามปกติ พร้อมทั้งเติมสารที่ทำให้คงตัวลงไป เช่น โฟแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 0.05% สบู่โฟแทสเซียมที่ทำจากน้ำมัน

มะพร้าว (potassium coconut oil soap) 2% หลังจากนั้นทำให้น้ำระเหยด้วยความร้อน โดยผ่านน้ำร้อนเข้าไปในถัง 2 ชั้น ที่มีน้ำยางอยู่ภายใน ขณะที่ถังบรรจุน้ำยางหมุนไปรอบๆ อากาศภายในถังจะถูกดูดออกไป พร้อมกับพ่นน้ำที่ระเหยจากน้ำยางออกไปให้เร็วที่สุด วิธีการนี้จะได้น้ำยางชั้นที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (%TSC) 70–75% น้ำยางชั้นที่ได้มีความคงตัวสูง สามารถนำไปใช้ประโยชน์โดยการผสมกับสารที่มีความหนืดสูง เช่น การทำกาว และซีเมนต์ลาดถนน เป็นต้น

2.1.4 องค์ประกอบของน้ำยางชั้น

ตารางที่ 2.2 แสดงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขององค์ประกอบทั้งหมดของน้ำยางชั้น และเปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมดในน้ำยางชั้นทั้งชนิดแอมโมเนียสูงและแอมโมเนียต่ำ

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของน้ำยางชั้นและปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยางชั้น⁽⁵⁾

องค์ประกอบ	HA		LA-TZ	
	น้ำยางชั้น	TSC	น้ำยางชั้น	TSC
เนื้อยาง ^ก	59.67	97.61	59.61	97.62
โปรตีน ^ข	1.06	1.73	1.03	1.69
กรดไขมัน ^ค	0.23	0.38	0.23	0.38
เกลือ	0.40	0.28 ^ง	0.38	0.32 ^ง
แอมโมเนีย	0.68	-	0.21	-
น้ำ	37.59	-	38.54	-

ก : ทดสอบด้วยวิธีทดสอบ DRC

ข : รวมทั้ง คาร์โบไฮเดรต, อะมิโนแอซิด และน้ำตาล

ค : ค่าที่ได้มาจาก ammonium stearate

ง : คัดจากการระเหยของ คาร์บอนเนต, อะซิเทท และฟอร์เมท

ส่วนที่ไม่ใช่ยางในเซรุ่มของน้ำยางชั้น ส่วนใหญ่ประกอบด้วย คือ โพรตีน กรดไขมัน กลีเซอีนอินทรีย์ และกลีเซอีนอินทรีย์ สำหรับกลีเซอีนที่พบในน้ำยางชั้นจะเป็นกลีเซอีนของแอนไอออน 14 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณแอนไอออนโดยเฉลี่ยที่พบในเซรุ่มของน้ำยางชั้นที่บ่มแล้ว⁽⁵⁾

แอนไอออน	ชนิดของน้ำยางชั้น	
	HA	LA-TZ
คาร์บอเนต	22.25	22.0
แอสซิเทต	12.81	8.74
มาเลต	9.28	10.14
ซักซิเนต	5.45	2.03 ^ก
ซิเทรต	5.04	6.94
ฟอร์มเมต	4.67	3.13
แอลฟา – ไกลโคฟอสเฟต	2.81	4.24
กลูโคส-1-ฟอสเฟต	2.24	0.31
ฟอสเฟต	2.01	2.22
ออกซาเลต	1.16	1.22
คลอไรด์	1.10	2.01
ซัลเฟต	0.58	0.63
ไฮดรอกไซด์	0.51	0.14
โพรพิอเนต	-	5.34 ^ข

ก : ไม่ปรากฏ

ข : พบเฉพาะน้ำยางชั้นชนิดนี้

2.1.5 สมบัติของน้ำยางชั้น

การตรวจสอบสมบัติของน้ำยางธรรมชาติจะใช้การวัดและทดสอบภายใต้มาตรฐานเดียวกัน คือ มาตรฐานของ International Organisation for Standardization (ISO) ซึ่งตารางที่ 2.4 และ 2.5 เป็นตารางที่สรุปข้อกำหนดมาตรฐานของน้ำยางชั้นภายใต้มาตรฐาน ISO

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดคุณภาพมาตรฐานน้ำยางชั้นภายใต้ ISO 2004 สำหรับน้ำยางชั้นที่ผลิตโดยวิธีใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง และทำให้เกิดครีม⁽⁵⁾

	Centrifuging latex		Creaming latex	
	HA	LA	HA	LA
Total solids content (%) (min)	61.50	61.50	66.00	66.00
Dry rubber content (%) (min)	60.00	60.00	64.00	64.00
Non-rubber solids (%) (max)	2.00	2.00	2.00	2.00
Alkalinity (as NH ₃) (on latex)	0.60 (min)	0.29 (max)	0.55 (min)	0.35 (min)
Mechanical stability (s) (min)	650	650	650	650
Coagulum content (mgkg ⁻¹ of solid) (max)	0.05	0.05	0.05	0.05
Copper content (mgkg ⁻¹ of solid) (max)	8	8	8	8
Manganese content (mgkg ⁻¹ of solid) (max)	8	8	8	8
sludge content (%) (max)	0.10	0.10	0.10	0.10
Volatile fatty acid number	>0.20	>0.20	>0.20	>0.20
Potassium hydroxide number	>1.00	>1.00	>1.00	>1.00
Colour on visual inspection	No pronounced blue or grey			
Odour after neutralization with boric acid	No pronounced of putrefaction			

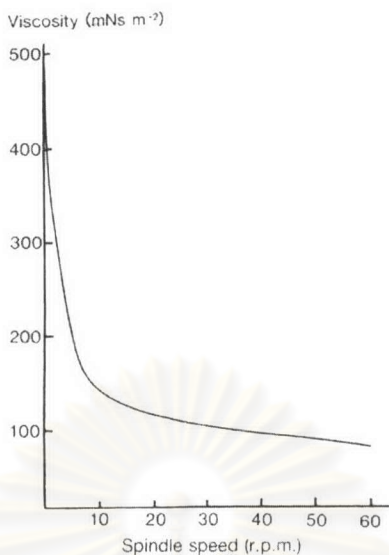
ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดภายใต้มาตรฐาน ISO 2027 สำหรับน้ำยางชั้นที่ผลิตด้วยวิธีทำให้น้ำ
ระเหย⁽⁵⁾

	HA	KHS	KLS
Total solids content (%) (min)	61.50	72.00	67.00
Non-rubber solids (%) (max)	5.50	8.00	7.50
Alkalinity, as NH ₃ (%) on latex (min)	0.60	-	-
Alkalinity, as KOH (%) on latex (min)	-	0.75	0.80
Mechanical stability (s) (min)	540	-	-
Coagulum content (%) (max)	0.05	0.05	0.05
Copper content (mg.kg ⁻¹ of solids) (max)	8	8	8
Manganese content (mg.kg ⁻¹ of solids) (max)	8	8	8
Sludge content (%) (max)	0.40	0.40	0.40
Volatile fatty acid number	>0.20	>0.20	>0.20
Colour on visual inspection	No pronounce blue or grey		
Odour after neutralization with boric acid	No pronounce odour of putrefaction		

สมบัติหลักที่จำเป็นต้องมีการตรวจสอบน้ำยาง ได้แก่ ปริมาณเนื้อยางแห้ง (dry rubber content, DRC) ปริมาณส่วนที่ไม่ใช่ยาง (non-rubber solid content, NRS) เวลาการคงตัวเชิงกล (mechanical stability time, MST) จำนวนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide, KOH No.) และค่าความเป็นด่าง (alkalinity)⁽⁶⁾

ความหนืด (viscosity)

โดยปกติน้ำยางธรรมชาติจะแสดงพฤติกรรมการไหลเป็นแบบนอน-นิวโตเนียน (non-newtonian fluid) ประเภท shear-thinning กล่าวคือ ความหนืดจะลดลงพร้อมกับอัตราการเฉือน (shear rate) ที่เพิ่มขึ้น⁽⁷⁾ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำยางชั้น 60 %DRC ที่วัดด้วย 'Brookfield viscometer' เมื่ออัตราการหมุนเพิ่มขึ้น (อัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น) โดย Gorton และ Swinyard ได้กล่าวว่า ค่าความหนืดขึ้นกับวิธีที่ใช้ทดสอบ ส่วนน้ำยางชั้นที่ยังไม่ได้ผสมสารเคมีจะมีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบ 'thixotropic' กล่าวคือ ความหนืดลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

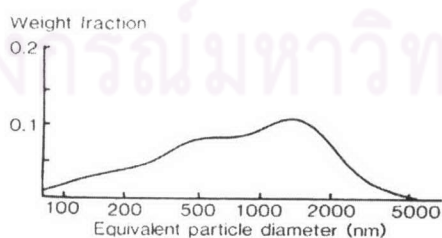


รูปที่ 2.3 ผลของอัตราการเกิดแรงเฉือนกับความหนืดของน้ำยางชั้นที่อุณหภูมิ 20°C

ขนาดของอนุภาค (particle size)

อนุภาคของยางในน้ำยางธรรมชาติมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงกว้าง คือ ประมาณ 0.01–5 ไมโครเมตร โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยระหว่าง 0.25 และ 0.8 ไมโครเมตร การกระจายขนาดของอนุภาคยังเป็นปัจจัยหลักที่ใช้คำนวณค่าความหนืดของน้ำยางธรรมชาติ โดยน้ำยางที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันมากจะมีความหนืดต่ำ และมีปริมาณเนื้อยางแห้งสูง นอกจากนี้ การกระจายขนาดอนุภาคยังสามารถนำไปคำนวณหาเวลาการคงตัวเชิงกล (MST) ของน้ำยางได้

รูปที่ 2.4 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของน้ำยางชั้น วัดโดยการตรวจสอบด้วยวิธี photon correlation spectroscopy



รูปที่ 2.4 การกระจายขนาดอนุภาคของน้ำยางชั้น วัดโดย photon correlation spectroscopy (MALVERN 4600, การกระเจิง 50°)

การเกิดคริมของน้ำยางชั้น

ยางที่กระจายอยู่ในน้ำยางจะมีความหนาแน่น 0.93 Mgm^{-3} ซึ่งต่ำกว่าเซรุ่มที่มีความหนาแน่น 1.02 Mgm^{-3} อนุภาคของยางจะเคลื่อนที่ไปมาบนผิวหน้าของน้ำยาง โดยอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมแขวนลอยภายใต้ความถ่วงจำเพาะคำนวณสามารถได้จากกฎของสโตก (Stoke's Law) ดังนี้

$$V = \frac{(d_1 - d_2)gx^2}{18\eta} \quad (2.1)$$

เมื่อ V = ความเร็วของอนุภาค

d_1 = ความหนาแน่นของเซรุ่ม

d_2 = ความหนาแน่นของอนุภาค

x = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

η = ความหนืดของเซรุ่ม

ผลของการเกิดคริมจะปรากฏในน้ำยางชั้นที่ถูกทิ้งไว้โดยไม่ถูกนำไปใช้งานหรือถูกรบกวนเป็นเวลามากกว่า 1 สัปดาห์ หรือนานกว่านั้น อัตราการเกิดคริมจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนืดภายใต้ภาวะอุณหภูมิเดียวกัน^(10, 11) ดังนั้น การเก็บน้ำยางชั้นที่อุณหภูมิห้องจะทำให้อัตราการเกิดคริมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ้าความหนืดเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเย็น หรือกรณีของน้ำยางชั้นที่ผสมสารเพิ่มความเหนียวที่ละลายน้ำได้ อัตราการเกิดคริมจะลดลงตามไปด้วย

2.2 ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ (Epoxidized Natural Rubber ; ENR)

การอีพอกซีไดซ์สารประกอบโอเลฟินส์ด้วยกรดเปอร์ออกซีอินทรีย์^(12, 13) ได้เริ่มมีการศึกษาตั้งแต่ Preleschajew ได้เตรียมอีพอกไซด์ (epoxide) หรือออกซิเรน (oxirane) จากปฏิกิริยาระหว่างเมทิลีนกับกรดเปอร์เบนโซอิก ซึ่งพบว่าสารอีพอกไซด์จะเกิดได้ดีเมื่อใช้กรดเบนโซอิก กรดเมตาคลอโรเปอร์เบนโซอิก และกรดออร์โทโมโนเปอร์ฟทาลิก แต่ถ้าใช้กรดแอซิติค ผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นกับตัวกลางของปฏิกิริยา ซึ่งในตัวทำละลายอินทรีย์ที่เฉื่อยจะเกิดอีพอกไซด์ได้ดี และถ้ามีกรดแอซิติคอยู่ด้วยจะเกิดสารประกอบไฮดรอกซีฟอร์มเมตขึ้นด้วย เนื่องจากวงแหวนอีพอกไซด์จะเปิดได้ง่ายในภาวะที่เป็นกรด

การอีพอกซีไดซ์พอลิเมอไรด์มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะการอีพอกซีไดซ์พอลิไดอิน เช่น พอลิบิวตะไดอิน พอลิไอโซพรีน ด้วยกรดออร์โทโมโนเปอร์ฟทาลิก กรดเปอร์เบนโซอิก กรดเปอร์แอซิติค และกรดเปอร์ฟอร์มิก⁽¹⁴⁾

ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ถูกเตรียมขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1962 ซึ่งในขณะนั้นผลิตผลที่ได้ยังมีคุณภาพไม่ดี คือ ได้ออกมาในรูปของผสม เนื่องจากการแตกของวงแหวนอิพอกไซด์บางส่วน ทำให้ผลิตผลที่ได้ไม่บริสุทธิ์ แต่ปัจจุบันได้มีการศึกษาทดลองจนกระทั่งสามารถควบคุมภาวะการเกิดปฏิกิริยาเป็นผลสำเร็จ ทำให้ได้ผลิตผลที่เป็นยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่บริสุทธิ์⁽³⁾

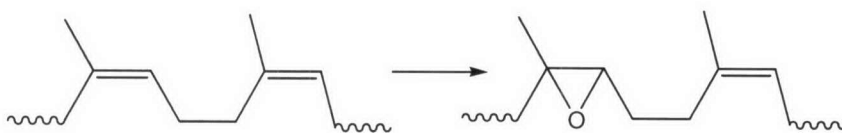
การอิพอกซีไดซ์ยางธรรมชาติมีความสำคัญ และเป็นวิธีที่ดีวิธีหนึ่งเพื่อให้ได้วัสดุพอลิเมอร์ชนิดใหม่ ซึ่งวิธีเตรียมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้กรดเปอร์แอซิดิก กรดฟอร์มิคหรือกรดแอซิดิกกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือการทำเพิ่มอะตอมโบรมีนเข้าไปในสายโมเลกุลยางธรรมชาติ (bromination of natural rubber)

การเตรียมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ด้วยการทำโบรมิเนชันของน้ำยางธรรมชาติได้มาจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหมู่อะมิโนและหมู่อิพอกไซด์ ซึ่งพบว่าการเติมโบรมีนในน้ำยางชั้นจะเกิดรวมตัวกันเป็นยางโบรมไฮดริน ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาเป็นหมู่อิพอกซี การเตรียมด้วยวิธีนี้มีข้อดี คือ ไม่ต้องใส่สารที่ทำให้น้ำยางคงตัว เนื่องจากภาวะที่ทำการทดลองเป็นต่าง ทำให้น้ำยางไม่จับตัวเป็นก้อน

ปี ค.ศ.1984⁽¹⁵⁾ I.R. Gelling ได้ศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ด้วยการเติมสารเปอร์แอซิดิกให้ได้ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีปริมาณอิพอกไซด์ 25 – 100 มิลลิเปอร์เซ็นต์ ซึ่งพบว่ามี การกระจายของวงแหวนอิพอกไซด์บนโครงสร้างของยางธรรมชาติแบบสุ่ม ซึ่งเมื่อนำยางที่สังเคราะห์ได้ไปหาน้ำหนักโมเลกุลจะพบว่ายางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลลดลงเมื่อปริมาณอิพอกไซด์เพิ่มขึ้น ในปีเดียวกัน⁽¹⁶⁾ David R. Burfield และคณะได้ทำการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ด้วยวิธีเดียวกัน พบว่าที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 30°C) การเกิดปฏิกิริยาของเปอร์แอซิดิกจะเกิดช้า แต่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ดี ส่วนเจริญ นาคะสรรค์ และคณะ⁽¹⁷⁾ ปี ค.ศ.2001 พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำให้ปฏิกิริยาเกิดสูงสุด คือ 50°C โดยจะได้ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีปริมาณอิพอกไซด์สูง และยางจะเสียสภาพเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปเป็นเวลาประมาณ 10 ชั่วโมง ขณะที่ยางจะเสียสภาพที่เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง ถ้าปฏิกิริยาเกิดที่ 60°C

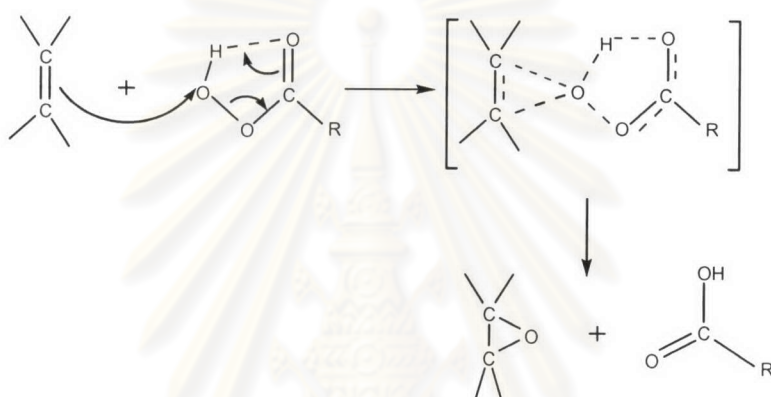
'in situ' epoxidation คือ การทำให้เกิดกรดเปอร์ออกซีอินทรีย์ ซึ่งจะถูกใช้ทั้งหมดในการทำปฏิกิริยากับหน่วยไอโซพรีนในน้ำยางเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอิพอกซีเดชัน โดยจะป้องกันการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่อาจให้สารอันตราย และป้องกันการแตกสลายของออกซิเจน กรดเปอร์ออกซีที่เกิดในการทำ 'in situ' epoxidation ได้แก่ กรดเปอร์ออกซีฟอร์มิก และกรดเปอร์ออกซีแอซิดิก เป็นต้น โดยกรดเปอร์ออกซีฟอร์มิกเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับกรดฟอร์มิกในน้ำยาง ซึ่งปฏิกิริยาเกิดอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้องหรือต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะไม่สมบูรณ์

ปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันของกรดเปอร์ออกซี⁽¹⁸⁾ แสดงได้ ดังนี้

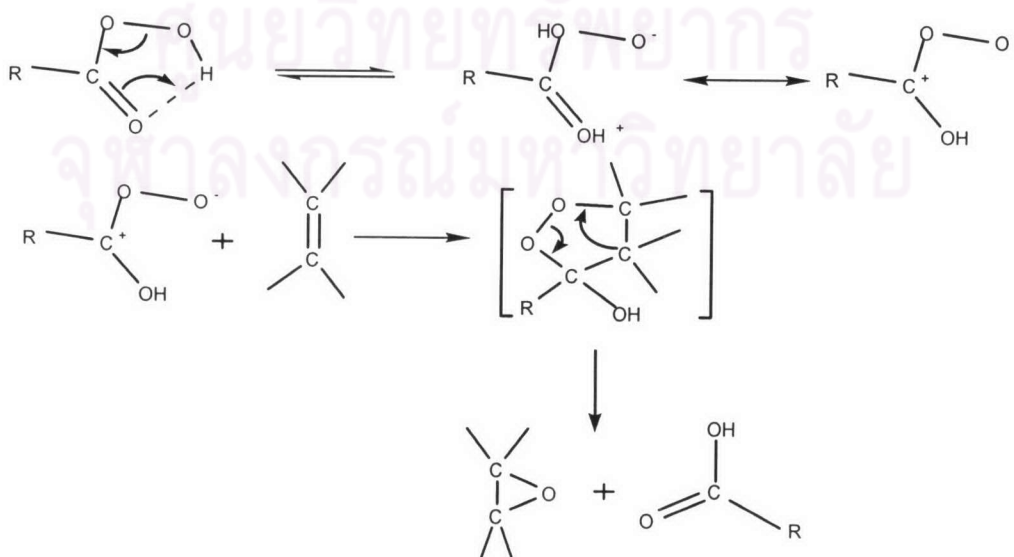


กลไกการเกิดปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันของโอเลฟินส์ด้วยกรดเปอร์ออกซี มี 2 กลไก คือ

1. **Molecular mechanism** (หรือ 1,1-addition mechanism) เสนอครั้งแรกโดย Bartlett เป็นกลไกที่เกี่ยวกับการเข้าเกาะของโอเลฟินส์บนโมเลกุลของกรดเปอร์ออกซี ดังนี้



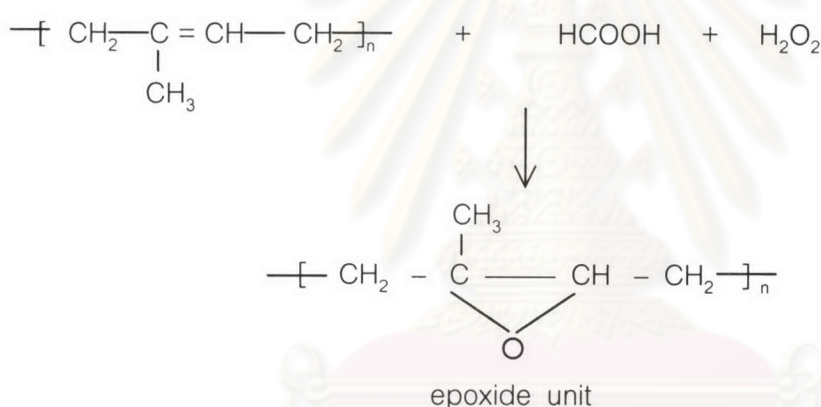
2. **1,3-Dipolar mechanism** (หรือ 1,3-addition mechanism) เสนอโดย Kwart และ Hoffmann กลไกนี้เกี่ยวกับปฏิกิริยาการเข้าเติมแบบ 1,3-dipolar ของไฮดรอกซีคาร์บอนิลออกไซด์ (ได้จากการเกิดพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของกรดเปอร์ออกซี) บนโมเลกุลของโอเลฟินส์ ดังนี้



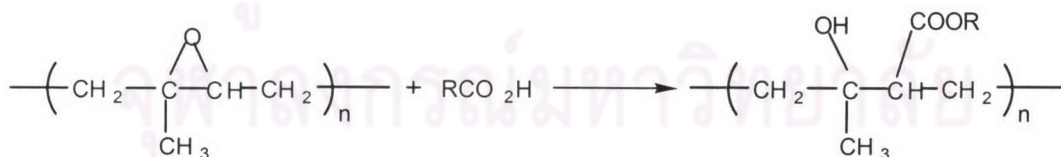
ในปี ค.ศ. 1981 ได้มีการศึกษา 'in situ' epoxidation ซึ่งใช้กรดเปอร์ฟอร์มิกทำปฏิกิริยากับน้ำยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว (surfactant) และเกิดอีพอกไซด์ 6-7 % โมล ต่อมา มีผู้นำวิธีนี้มาใช้กับน้ำยางที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวประเภทแคตไอออนิกหรือประเภทแอนไอออนิกเพื่อให้เสถียร

ปีค.ศ. 1993 ⁽¹⁹⁾ Bac และคณะ พบว่า 'in situ' epoxidation จะเกิดในภาวะที่สายโซ่โมเลกุลเกิดการขาด อัตราเร็วและปริมาณการเกิดอีพอกไซด์เพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิ สภาพความเป็นกรด-ด่าง และอัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อหน่วยไอโซพรีน ที่ค่า pH 2.2-3.0 จะเกิดการอีพอกไซด์ที่สมบูรณ์ในเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม

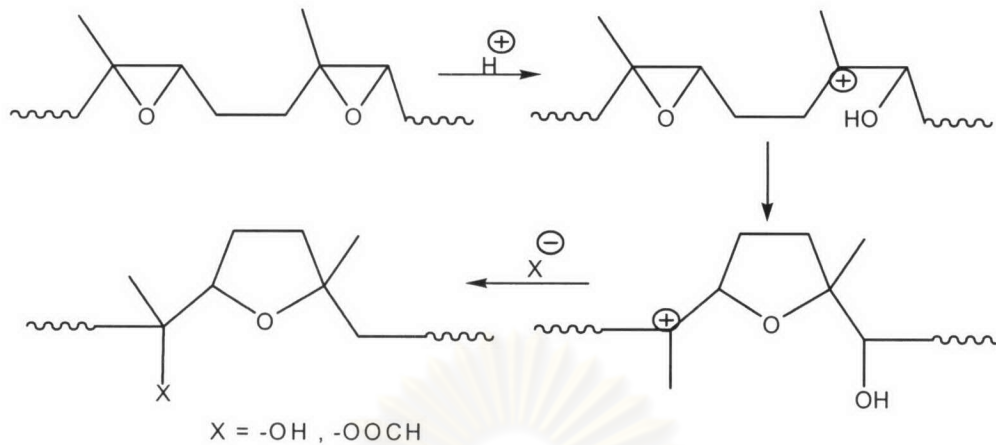
ปฏิกิริยาการเตรียม 'in situ' epoxidation เป็นดังนี้



ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับกรด (ผลพลอยได้จากปฏิกิริยาอีพอกไซด์เดชัน) ทำให้วงแหวนอีพอกไซด์เปิดออกกลายเป็นสารประกอบไฮดรอกซีเอสเทอร์ได้ดังนี้

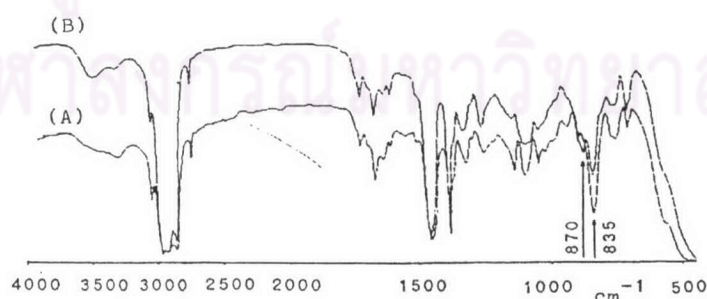


ปฏิกิริยาอีกปฏิกิริยาหนึ่งที่สามารถเกิดขึ้นได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่มีปริมาณอีพอกไซด์สูงคือ หมู่อีพอกไซด์ที่อยู่ติดกัน (เมื่อมีกรดอยู่ด้วย) จะเกิดปฏิกิริยาต่อกันกลายเป็นสารอนุพันธ์เตตระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran) ดังนี้



ในการทำปฏิกิริยาจะให้ยางธรรมชาติในรูปน้ำยางข้นหรือน้ำยางสดก็ได้ ขึ้นกับเงื่อนไขในการทดลอง และจะต้องมีการควบคุมภาวะการเกิดปฏิกิริยาเป็นอย่างดี เพื่อไม่ให้เกิดการเปิดวงแหวนอีพอกไซด์ สิ่งที่ต้องระวัง คือ อุณหภูมิและสภาพความเป็นกรดของระบบการเกิดปฏิกิริยา เมื่อความเป็นกรดสูงและ/หรืออุณหภูมิสูง จะเกิดการเปิดวงแหวนอีพอกไซด์ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ แต่เมื่อใช้ภาวะของการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรง จะได้ยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ที่บริสุทธิ์เพียงอย่างเดียว และสามารถวิเคราะห์หาปริมาณหมู่อีพอกไซด์ได้ ดังนี้

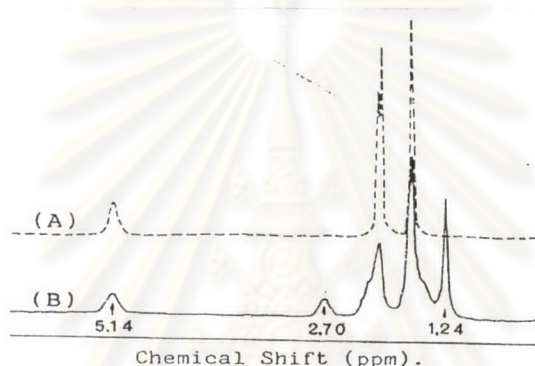
1. อินฟราเรดสเปกตรัม (Infrared spectrum) ใช้วิเคราะห์เพื่อหาหมู่เฉพาะตัว⁽¹⁸⁾ ซึ่งการเกิดอีพอกไซด์สามารถพิสูจน์ได้จากการปรากฏของพีกที่เลขคลื่น 870 cm^{-1} และ 1240 cm^{-1} (การสั่นแบบเส้นของ C-O ของหมู่อีพอกไซด์) ในขณะที่พีกที่เลขคลื่น 835 cm^{-1} (การสั่นแบบงอของ C-H ใน cis-1,4-polyisoprene) จะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และเปอร์เซ็นต์อีพอกซิเดชันอาจคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใต้กราฟที่ 870 ต่อ 835 cm^{-1}



รูปที่ 2.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (A) ยางธรรมชาติ (B) ยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์

2. โปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Proton Nuclear Magnetic Resonance, ^1H NMR) ใช้ศึกษาตำแหน่งของโปรตอน⁽¹⁸⁾ ซึ่งสารอียพอกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถพิสูจน์ได้จากการลดลงของสัญญาณเรโซแนนซ์ของโปรตอนที่ 5.14 ppm ซึ่งเป็นโปรตอนของโอเลฟินส์ของโมเลกุล cis-1,4-polyisoprene ($\text{CH}_3\text{-C}=\text{CH}$) ในขณะที่เกิดสัญญาณปรากฏที่ 2.70 ppm (สัญญาณวงแหวนอียพอกไซด์ -CH- ที่ต่อกับ -O-) นอกจากนี้ ยังปรากฏพีกที่ 1.24 ppm ซึ่งเป็นโปรตอนของหมู่เมทิลของอียพอกไซด์ (สัญญาณ $\text{CH}_3\text{-}$ ที่ต่อกับ -C- ที่ต่อกับ -O-) อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.6

เปอร์เซ็นต์อียพอกซิเดชันคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่าง $I_{2.70}$ (อินทิเกรชันของหมู่ อียพอกไซด์) ต่อ $I_{5.14}$ (อินทิเกรชันของโปรตอนโอเลฟินส์)



รูปที่ 2.6 สเปกตรัม ^1H NMR ของ (A) ยางธรรมชาติ และ (B) ยางธรรมชาติอียพอกซิไดซ์

เมื่อเทียบสมบัติของยางธรรมชาติอียพอกซิไดซ์กับยางธรรมชาติที่ไม่ได้ถูกดัดแปรโครงสร้าง จะพบว่าโมดูลมิกลาสทรานซิชัน (T_g) สูงกว่ายางธรรมชาติ ซึ่งเมื่อเป็นยางวัลคาไนซ์และถูกดึงยืดจะพบว่ายางธรรมชาติอียพอกซิไดซ์มีความเป็นผลึกสูงกว่า สามารถต้านทานการซึมผ่านของแก๊สได้ดีกว่า และต้านทานการบวมตัวในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนสูงกว่ายางธรรมชาติ^(5, 20)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับยางธรรมชาติอียพอกซิไดซ์

ปี ค.ศ. 1982⁽²¹⁾ คณะของ C.K.L. Davies และคณะของ I.R. Gelling ได้ศึกษาสมบัติความทนแรงดึงของยางธรรมชาติที่ถูกอียพอกซิไดซ์แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 25, 50, 70 และ 95 โมลเปอร์เซ็นต์ เทียบกับยางธรรมชาติพบว่าที่ปริมาณอียพอกไซด์ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ มีสมบัติทนแรงดึงสูงสุด และที่ปริมาณอียพอกไซด์ 95 โมลเปอร์เซ็นต์ มีสมบัติทนแรงดึงต่ำสุด เนื่องจากปริมาณอียพอกไซด์สูงมากๆ จะมีผลทำให้ความเป็นผลึกลดลง และความแข็งแรงลดลงด้วย

ปี ค.ศ. 1984⁽¹⁵⁾ I.R. Gelling ได้ศึกษาอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางธรรมชาติ อีพอกซีไดซ์ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ต่างๆ กัน พบว่าเมื่อมีปริมาณอีพอกไซด์สูงขึ้น T_g จะเพิ่มขึ้น และในปีเดียวกัน⁽²²⁾ I.R. Gelling และ N.J. Morison ได้ศึกษาพบว่าการวัลคาไนซ์ยางด้วยซัลเฟอร์จะ เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันเร็วกว่าการใช้ซัลเฟอร์ร่วมกับสารอื่นๆ ซึ่งซัลเฟอร์จะทำปฏิกิริยาที่หมู่ ไอเลฟินส์มากกว่าหมู่อีพอกไซด์ ทำให้การเชื่อมขวางยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์เกิดได้ดี และยังพบว่าเวลาในการคงรูปยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์จะสั้นกว่ายางธรรมชาติ

ปี ค.ศ. 1989⁽²³⁾ M.Nasir และคณะ ได้ศึกษาเวลาในการคงรูป (t_{90}) ยางธรรมชาติ อีพอกซีไดซ์ที่เติมสารตัวเติมซิลิกา โดยเติมซิลิกา 20 ส่วน พบว่าทำให้ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์มี อัตราการคงรูปเร็วขึ้นในระบบ semi-EV แต่ถ้าเติมสารประกอบซิลเลน (silane) 2% จะไปหน่วง อัตราการคงรูปให้เกิดช้าลง และ B.T. Poh⁽²⁴⁾ ได้ศึกษาพบว่าเวลามูนีสคอร์ช (Mooney scorch time) จะลดลงเมื่อปริมาณอีพอกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากหมู่อีพอกไซด์จะกระตุ้นพันธะคู่ที่อยู่ติดกัน ทำให้เพิ่มอัตราการเชื่อมขวางในยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ จึงทำให้เวลามูนีสคอร์ชสั้นลง

การศึกษานปรากฏการณ์รีเวอร์ชัน (reversion phenomena) ของสารเร่งวัลคาไนซ์ (accelerator) และการวัลคาไนซ์ยางด้วยซัลเฟอร์โดย Chen และคณะ พบว่าปรากฏการณ์ รีเวอร์ชันขึ้นกับระบบของการคงรูป สารเร่งวัลคาไนซ์ อุณหภูมิ และเวลา ซึ่ง B.T. Poh และ คณะ⁽²⁵⁾ ได้ศึกษาการเกิดรีเวอร์ชันในยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ พบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส การเกิดรีเวอร์ชันในยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์จะเกิดจากการสลายตัวของพันธะเชื่อม ขวางของไดและพอลิซัลไฟดิก

การศึกษายางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์มักมุ่งเน้นในการหาลักษณะเฉพาะการคง รูป พฤติกรรมการเกิดสคอร์ชเป็นส่วนใหญ่^(26, 27) เพื่อหาสารเคมีที่เหมาะสมในการเตรียมยางผสม สารเคมี (rubber compounding) และการเตรียมยางวัลคาไนซ์ให้ได้สมบัติที่เหมาะสมกับการนำไป ทำผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ แต่เนื่องจากการผลิตยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ยังไม่แพร่หลาย เพราะ มีข้อจำกัดต่างๆ มากมาย ดังนั้น การศึกษายางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์มักผสมกับยางชนิดอื่นๆ ให้ ได้สมบัติที่ต่างไปจากสมบัติเฉพาะตัวของยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ ตัวอย่างเช่น การทำยางผสม ENR/SBR โดย Hanafi Ismail และคณะในปี ค.ศ. 2001⁽²⁸⁾ พบว่าเวลาการเกิดสคอร์ช (scorch time, t_s) และเวลาการคงรูป (cure time, t_{90}) จะลดลงเมื่อการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น และการบวมตัว ในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนจะลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์เพิ่มขึ้น ดังนั้น การ ผสมยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์กับยางเอสปีอาร์จะช่วยเสริมสมบัติของยางเอสปีอาร์ให้เด่นขึ้น

การผสมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์กับยางธรรมชาติ⁽²⁹⁾ จะมีค่าความทนแรงดึงสูงสุดเมื่อผสมในอัตราส่วน 50/50 เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงในเชิงสัณฐานวิทยาในยางผสม ENR/NR ทำให้มีการเสริมแรงซึ่งกันและกัน เป็นผลให้สมบัติความทนแรงดึงสูงขึ้น (ผลเหมือนกันทั้งกับ ENR-25/NR และ ENR-50/NR)

2.3 การหาลักษณะเฉพาะของยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์

2.3.1 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy : IR)⁽³⁰⁾

รังสีอินฟราเรดเป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่น 100-0.8 ไมโครเมตร และอยู่ระหว่างย่านแสงมองเห็น และย่านไมโครเวฟ ซึ่งจะแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ รังสีอินฟราเรดช่วงใกล้ กลาง และไกล ซึ่งนักเคมีอินทรีย์ให้ความสนใจรังสีเฉพาะช่วง 650–4000 cm^{-1} (15.0–2.5 ไมโครเมตร) ซึ่งเป็นรังสีอินฟราเรดช่วงกลาง โดยโมเลกุลของสารอินทรีย์เมื่อดูดกลืนพลังงานในช่วงนี้ จะทำให้เกิดการสั่นของพันธะที่อยู่ภายในโมเลกุล รังสีที่ถูกดูดกลืนมีค่าที่แน่นอน แต่สเปกตรัมที่ได้ปรากฏเป็นแถบดูดกลืนมากกว่าเป็นเส้น เพราะการเปลี่ยนแปลงพลังงานการสั่นค่าเดียว มักตามด้วยการเปลี่ยนแปลงพลังงานการหมุน

เครื่องวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีปัจจุบันเป็นชนิดที่ใช้ลำรังสีคู่ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ คือ แหล่งกำเนิดรังสี โมโนโครเมเตอร์ และเครื่องตรวจวัดพร้อมเครื่องบันทึก

1. **แหล่งกำเนิดรังสี** : ทำจากวัสดุต่างๆ ที่ต้องถูกเผาให้ร้อนถึง 1,000–1,800°C แหล่งกำเนิดรังสีที่นิยมใช้ คือ โกลบาร์ และเส้นใยเนนสท์ ซึ่งโกลบาร์จะเป็นท่อนซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาดเล็ก ส่วนเส้นใยเนนสท์เป็นออกไซด์ผสมของเซอร์โคเนียม ทอเรียม และซีเรียม

2. **โมโนโครเมเตอร์** : อาจเป็นปริซึมหรือเกรตติง แต่ปัจจุบันนิยมใช้เกรตติงมากกว่า เนื่องจากเกรตติงให้กำลังแยกที่ดีกว่าปริซึมที่เลขคลื่นสูง

3. **เครื่องตรวจวัด** : เครื่องมือปัจจุบันใช้เครื่องตรวจวัดแบบเทอร์โมคัพเปิล (thermocouple) ประกอบด้วยลวดโลหะที่ต่างกัน 2 เส้น ปลายทั้งสองของลวดเหล่านี้ถูกต่อเข้าด้วยกัน รังสีที่กระทบจะทำให้จุดต่อด้านหนึ่งร้อนขึ้น ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดต่อทั้งสองจะทำให้กระแสไหลผ่านลวด ปริมาณของกระแสแปรผันตามความเข้มของรังสีที่ตกบนเทอร์โมคัพเปิล

การทำงานของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

รังสีจากแหล่งกำเนิดแสงจะถูกแยกเป็น 2 ลำ ที่มีความเข้มเท่ากัน ลำรังสีลำหนึ่งผ่านเข้าสู่เซลล์สารตัวอย่างขณะที่รังสีอีกลำหนึ่งเข้าสู่เซลล์สารอ้างอิง ต่อจากนั้นลำรังสีทั้งสองจะผ่านอุปกรณ์ตัดแสงซึ่งเป็นกระจก 2 เลี้ยว ที่หมุนด้วยความเร็ว 10 รอบต่อวินาที เมื่อสารดูดกลืนรังสีที่เลขคลื่นค่าหนึ่ง เครื่องตรวจวัดรังสีที่มีความเข้มสูงจากเซลล์สารอ้างอิงสลับกับลำรังสีที่มีความเข้มต่ำจากเซลล์สารตัวอย่างซึ่งนำไปสู่การไหลของกระแสจากเทอร์โมคัปเปิลไปยังเครื่องขยายและปรากฏเป็นสัญญาณที่แอมพลิฟายด์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความเข้มของลำรังสีทั้งสองนี้ แต่ถ้าสารตัวอย่างไม่มีการดูดกลืนรังสี ลำแสงที่ออกจากเซลล์สารตัวอย่างและเซลล์สารอ้างอิงจะมีความเข้มเท่ากัน จากนั้นจะปรากฏแถบดูดกลืนขึ้นบนสเปกตรัม ซึ่งสเปกตรัมที่ได้เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างทรานสมิตเทนซ์กับความยาวคลื่น และเลขคลื่น

2.3.2 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (Differential scanning calorimetry : DSC)

เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (DSC) เป็นเทคนิคที่วัดความแตกต่างของพลังงานที่ให้เข้าไปในระบบเทียบกับสารอ้างอิงที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ขณะเดียวกันสารที่ต้องการวัดและสารอ้างอิงจะขึ้นกับการควบคุมอุณหภูมิของระบบ ซึ่ง DSC เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงความร้อนที่วัดความแตกต่างของความร้อนที่ไหลในระบบขึ้นกับอุณหภูมิ เวลา สภาพบรรยากาศ และความดัน

DSC ใช้วัดสัญญาณต่างๆ ดังนี้ คือ ความร้อนที่ไหลในระบบที่แตกต่างกัน : การคายความร้อน หรือการดูดความร้อน อุณหภูมิ และ เวลา

เครื่องมือที่ใช้แบ่งเป็น

1. Heat-flux DSC : เป็นเครื่องที่วัดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสารที่วัดและสารอ้างอิง ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนที่ไหลในระบบที่ต่างกัน คล้ายกับหลักการไหลของกระแสไฟในกฎของโอห์ม

ภาวะสมดุลอัตราการไหลของความร้อน วัดสัญญาณความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของการไหลของความร้อนที่ให้กับสาร

2. Power-Compensation DSC : เป็นเครื่องที่วัดความแตกต่างของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปกับสารที่วัดและสารอ้างอิง และจะเปลี่ยนเป็นการไหลของความร้อนที่วัดโดยการให้พลังงานที่ต้องการในการเปลี่ยนอุณหภูมิให้เป็นค่าที่คงที่ (มีค่าใกล้เคียงศูนย์)

ในกรณีของความร้อนในอุดมคติ อุณหภูมิที่เตาหลอมทั้งสองตัวจะมีค่าเดียวกัน เมื่อเกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่างที่วัดจะถูกรบกวนด้วยความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเตาหลอมทั้งสองตัว

ความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นช่วงเวลาเดียวกันกับการวัดสัญญาณและสัญญาณที่ให้เข้าไปเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการควบคุมกระแสไฟ ซึ่งพยายามที่จะควบคุมกับอัตราการไหลของความร้อนด้วยการเพิ่มหรือการลดพลังงานความร้อนที่ให้ไป

2.4 พารามิเตอร์การคงรูป (Curing Parameter) ⁽³¹⁾

สคอรัช (Scorch) : เป็นการวัดคาไนซ์ที่เกิดขึ้นก่อน โดยยางจะเกิดการวัลคาไนซ์บางส่วนก่อนที่จะเปลี่ยนรูปไปในท้ายที่สุด การเกิดสคอรัชจะลดสมบัติความเป็นพลาสติกที่อยู่ในยางผสมสารเคมีและเป็นผลที่เกิดจากอุณหภูมิที่เข้าใกล้กับช่วงเริ่มกระบวนการ และช่วงเวลาที่ยางผสมสารเคมีสัมผัสกับอุณหภูมิสูงๆ ช่วงเวลาก่อนเกิดการวัลคาไนซ์โดยทั่วไปเรียกว่า “เวลาการเกิดสคอรัช” (scorch time) ถ้ามีเวลาที่สั้นจะทำให้ยางเสียจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องให้มีการวัลคาไนซ์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

อัตราการคงรูป (Rate of cure) : เป็นอัตราที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (crosslink) และทำให้ยางแข็งขึ้น (มอดุลัสเพิ่มขึ้น) หลังจากผ่านจุดสคอรัช เมื่อยางผสมสารเคมีถูกให้ความร้อนจนผ่านจุดที่เกิดสคอรัชจะทำให้สมบัติของยางผสมสารเคมีเปลี่ยนจากวัสดุอ่อนนุ่มเป็นวัสดุพลาสติกที่เหนียวขึ้น ในช่วงขั้นตอนที่เกิดการคงรูปจะเริ่มเกิดการเชื่อมขวางภายในโมเลกุลตลอดความยาวของสายโซ่โมเลกุล ซึ่งยังเกิดการเชื่อมขวางภายในสายโซ่โมเลกุลมากเท่าใดยางผสมสารเคมีจะมีความแข็งหรือมอดุลัสเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น อัตราการคงรูปจึงเป็นพารามิเตอร์การวัลคาไนซ์ที่สำคัญที่สุด และเวลาที่เกิดในช่วงนี้เรียกว่า “เวลาการคงรูป” (cure time)

ภาวะของการคงรูป (State of cure) : โดยทั่วไปภาวะของการคงรูปเป็นค่าที่ใช้อ้างถึงการพัฒนาสมบัติของยางหรือความก้าวหน้าของการคงรูป เมื่อการเชื่อมขวางหรือการวัลคาไนซ์สมบูรณ์ ค่ามอดุลัสของยางผสมสารเคมีจะเพิ่มขึ้นที่สภาวะการคงรูปที่แตกต่างกัน ในเชิงเทคนิคภาวะสำคัญที่สุด คือ จุดออปติมัม (optimum) ในกรณีที่ระดับของการคงรูปแตกต่างกันทำให้สมบัติของยาง วัลคาไนซ์ต่างกัน และจุดออปติมัมอาจไม่ได้เป็นจุดที่ดีที่สุดสำหรับสมบัตินั้นๆ

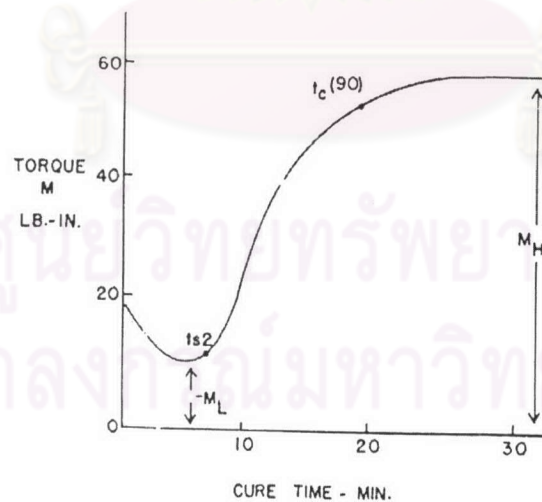
เวลาการคงรูป (Cure Time) : เป็นเวลาที่อยู่ในช่วงของขั้นตอนการวัลคาไนซ์ของยางผสมสารเคมีเพื่อให้ได้ภาวะการคงรูปที่ต้องการ

การคงรูปมากเกินไป (Overcure) : เป็นการคงรูปซึ่งมากกว่าจุดออปติ멈 ซึ่งมอดุลัสของยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะสูงขึ้นเมื่อผ่านกึ่งขั้นตอนการคงรูปเต็มที่แล้ว แต่กับยางธรรมชาติมอดุลัสจะลดลง (เกิดรีเวอร์ชัน)

2.5 เครื่องวัดการคงรูป (Cure Meters)

การคงรูปยางผสมสารเคมีแต่ละประเภทเพื่อหาเวลาการคงรูปในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบจำเป็นต้องใช้เครื่องวัดการคงรูป ซึ่งได้พัฒนาขึ้นหลายประเภท ด้วยการใช้เครื่องมือเหล่านี้จึงสามารถวัดความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการคงรูป หลายๆ สมบัติสามารถตรวจสอบได้โดยทั่วไป ได้แก่ ค่าความแข็งสูงสุดและต่ำสุด เวลาในการเกิดสคอรัช เวลาการคงรูปที่ 90% หรือ 95% ที่เกิดความแข็งสูงสุด และดัชนีการคงรูป

รีโอมิเตอร์ (Rheometer) : เป็นเครื่องวัดการคงรูปที่ใช้กันกว้างขวางที่สุด ซึ่งขึ้นทดสอบจะถูกบรรจุในโพรงทดสอบที่ปิดผนึกได้ภายใต้ความดัน และอุณหภูมิสูง (อุณหภูมิคงที่) ขึ้นทดสอบจะถูกฝังอยู่ในจานรูปกรวยซึ่งสามารถเกิดการสั่นเป็นคลื่นเล็กๆ และจะบันทึกแรงที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับมอดุลัสเฉือนของยาง กราฟของการคงรูปแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงค่าทอร์คต่ำสุด (M_L) ทอร์คสูงสุด (M_{HF}) เวลาการเกิดสคอรัช (t_{s2}) และเวลาการคงรูปที่ 90% (t_{c90})



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างกราฟรีโอมิเตอร์การคงรูป

2.6 สมบัติเชิงกลและสมบัติความต้านทานน้ำมัน

2.6.1 สมบัติความแข็ง (Hardness properties) ⁽³²⁾

ความแข็งของยาง หมายถึง ความต้านทานของยางต่อการกด ยางยิ่งแข็งมากจะมีความต้านทานแรงกดมาก ความแข็งของยางมีความสัมพันธ์กับมอดุลัสของยางเป็นอย่างมาก ซึ่งการวัดความแข็งของยางอาจถือเป็นวิธีการง่ายๆ ที่จะวัดมอดุลัสของยาง

วิธีหาความแข็งของยางทำโดยใช้แรงกดขึ้นส่วนของโลหะลงบนยางแล้วดูความลึกที่สามารถกดลงไปได้ ถ้าใช้แรงเท่ากันยางที่มีความแข็งมากกว่าจะกดลึกลงไปได้น้อยกว่า และถ้าโลหะที่กดมีลักษณะเป็นทรงกลม จะได้ว่าความลึกที่กดลงไปจะเป็นไปตามสมการ ดังนี้

$$P = K_1(F/E)0.74R - 0.48 \quad (2.2)$$

โดย P = ความลึกที่กดลงไปนยาง

F = แรงที่ใช้กด

E = ค่าอิลาสติกมอดุลัส

R = รัศมีของลูกโลหะที่ใช้กด

K_1 = ค่าคงที่

แต่ถ้าโลหะกดเป็นแบบแท่งทรงกระบอก สมการจะเป็น ดังนี้

$$P = K_2(F/E)d^{-1} \quad (2.3)$$

โดย P = ความลึกที่กดลงไปนยาง

F = แรงที่ใช้กด

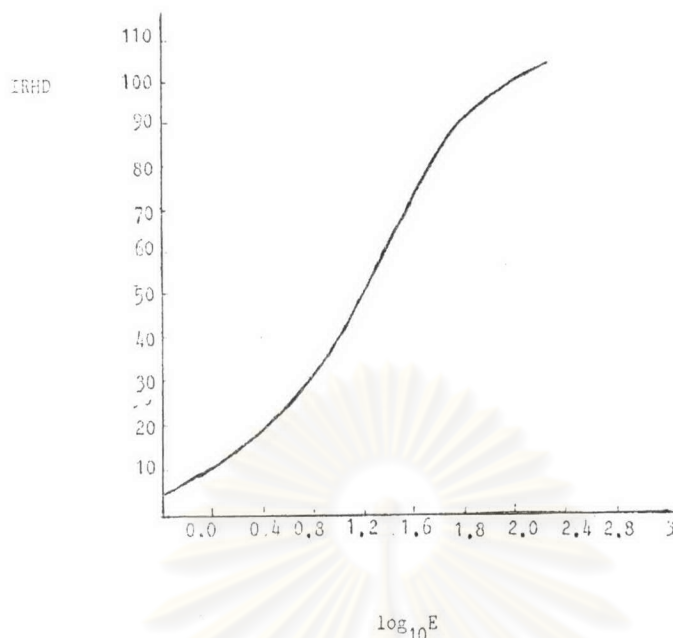
E = ค่าอิลาสติกมอดุลัส

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งทรงกระบอก

K_2 = ค่าคงที่

มาตรฐานการวัดความแข็งของยางนิยมใช้ 2 มาตรฐาน คือ มาตรฐาน ISO 48 หรือ 1400 หรือ 1818 (IRHD) และ ASTM D2240 (Durometer Test)

1. มาตรฐาน ISO จะวัดความแข็งออกมาเป็นหน่วย IRHD (International Rubber Hardness Degrees) โดยยางนิ่มจะมีค่า IRHD ต่ำ และยางแข็งมีค่า IRHD สูง ซึ่งความแข็งของยางตามหน่วย IRHD มีความสัมพันธ์กับค่าอิลาสติกมอดุลัส ดังแสดงในรูปที่ 2.8



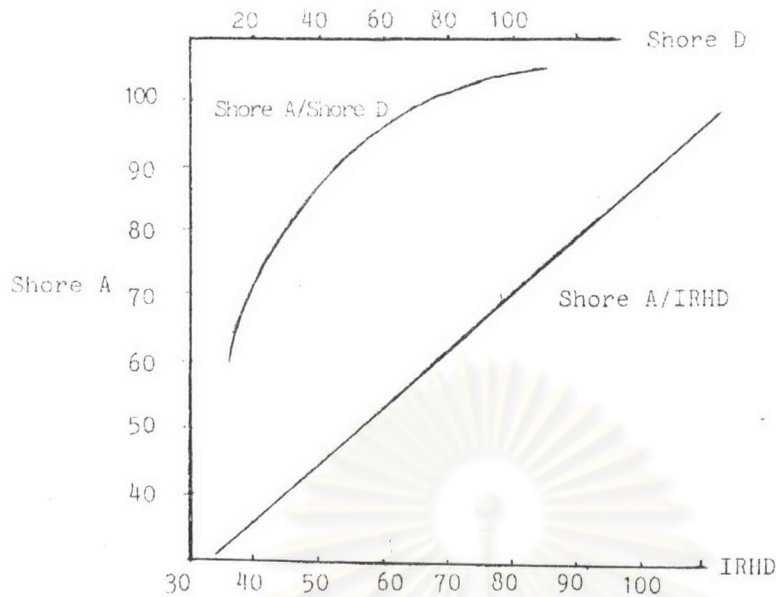
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง IRHD กับค่าอิลาสติกมอดุลัส ($\log_{10} E$)

การวัดความแข็งของยางตามมาตรฐาน ISO จะใช้โลหะกลมกดยาง (dead load) ซึ่ง ISO 48 กำหนดให้ใช้โลหะกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มม. กดด้วยแรง 5.7 นิวตัน ลงบนยาง โดย ISO 48 ใช้วัดยางที่มีความแข็งอยู่ในช่วง 30 IRHD ถึง 85 IRHD และเมื่อความแข็งของยางสูงหรือต่ำกว่านี้ ค่าที่ได้มักไม่ค่อยถูกต้อง

2. มาตรฐาน ASTM จะวัดความแข็งของยางด้วยเครื่อง Shore Durometer ซึ่งเป็นแบบที่ใช้มาแต่เดิม โดยการใช้สปริงเป็นตัวกด (spring load) ซึ่งทำโดยกดเครื่องมือลงบนชั้นทดสอบจนพื้นของเครื่องมือติดกับยาง และอ่านค่าตามสเกล การใช้มือกดเช่นนี้อาจผิดพลาดได้ถึง 5 หน่วย

การทดสอบด้วยเครื่อง Shore Durometer กำหนดในมาตรฐาน ASTM D2240 ซึ่งมี 2 สเกล คือ สเกล A และ D สำหรับสเกล A ใช้วัดยางนิ่มธรรมดา และสเกล D ใช้วัดยางแข็ง อย่างไรก็ตาม ความแข็งของยางในหน่วย IRHD และ Shore A มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ข้อดีของแบบ Shore A คือ ราคาถูก และสามารถนำติดตัวไปทดสอบในสถานที่ต่าง ๆ ได้สะดวก

รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shore A, Shore D และ IRHD



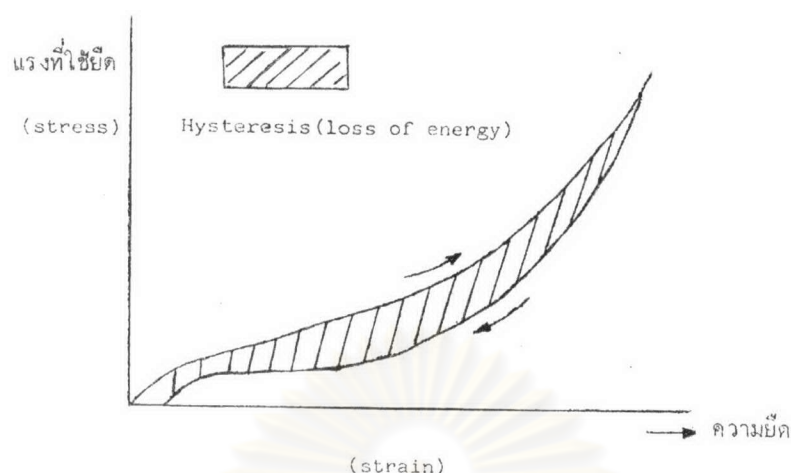
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shore A, Shore D และ IRHD (ชั้นทดสอบหนา 10 มม.)

2.6.2 สมบัติด้านการดึง (Tensile properties)

ยางมีสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างจากวัสดุอื่น คือ ยางที่คงรูปแล้วสามารถยืดออกได้หลายเท่าของความยาวเดิม และเมื่อปล่อยให้เป็นอิสระจะสามารถกลับคืนสภาพเดิมได้เกือบสมบูรณ์ แม้ว่าการใช้ยางจะอยู่ในรูปของการยืดค่อนข้างน้อย แต่สมบัติการยืดหรือดึงของยางเป็นสมบัติพื้นฐานที่ใช้กันโดยอุตสาหกรรมยางเพื่อบ่งชี้ถึงคุณภาพของยาง เนื่องจากสมบัตินี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตัวเติมและน้ำมัน หรือการเปลี่ยนแปลงสารในระบบการคงรูป

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางส่วนใหญ่จะเกี่ยวกับแรงที่ส่งไปกระทำต่อชิ้นทดสอบ และวัดผลในรูปของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือในทางกลับกันทำได้โดยการทำให้ชิ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปแล้ววัดผลในรูปของค่าแรงที่ใช้ในการกระทำนั้นๆ

ยางเป็นวัสดุที่เมื่อได้รับความเค้นดึง (tensile stress) จะสามารถเกิดความเครียด (strain) ได้หลายเท่าของความยาวเดิม ซึ่งเป็นลักษณะที่เห็นได้ง่าย ดังนั้น เมื่อมีการทดสอบสมบัติของยางจึงมักทดสอบสมบัติความเค้นและความเครียดในลักษณะของการดึงในแนวตั้ง รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างกราฟความเค้นและความเครียดของยาง



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างกราฟความเค้น-ความเครียดของยาง

จากรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดิ่งกับความเครียดไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งการทดสอบสมบัติความทนแรงดิ่งของยางมีค่าพื้นฐาน ดังนี้

1. โมดูลัส (modulus) เป็นการวัดอัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียดของยางที่ถูกดึง ณ ความยาวที่กำหนด เช่น การหาค่าโมดูลัสของยางที่ยืดออกจนมีความเครียด 100% เป็นต้น
2. ความทนแรงดิ่ง (tensile strength : TS) เป็นการวัดค่าความเค้นของยางที่ถูกดึงจนขาด
3. ระยะเวลาที่ยืดขาด (elongation at break : EB) เป็นการวัดค่าความยาวของชิ้นทดสอบที่ยืดออกได้มากที่สุด ค่านี้แสดงเป็นร้อยละของความยาวเดิม เช่น ยางชิ้นหนึ่งมีค่า EB 675% แสดงว่ายางชิ้นนี้สามารถยืดออกได้ 7.75 เท่า ของความยาวเดิมก่อนที่ยางจะขาด

เครื่องทดสอบการดึงยาง

เครื่องทดสอบการดึงยางประกอบด้วยอุปกรณ์สำหรับยึดชิ้นทดสอบให้เคลื่อนที่จากกันด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอตามมาตรฐาน ซึ่งปกติจะดึงด้วยอัตราเร็ว 500 มิลลิเมตร/นาที และเครื่องทดสอบจะแสดงค่าความเค้นสูงสุดที่ทำให้ยางขาด นอกจากนี้ เครื่องทดสอบควรมีอุปกรณ์ที่สามารถวัดระยะยืดของยาง (extensometer) ได้อีกด้วย

ในการทดสอบสมบัติด้านการดึงยังต้องใช้เครื่องมือประกอบอื่นๆ ที่จำเป็น ดังนี้

1. เครื่องวัดความหนาของชิ้นทดสอบ ซึ่งควรวัดได้ละเอียดถูกต้อง และผิดพลาดได้ไม่เกิน ± 0.025 มิลลิเมตร
2. แบบตัดชิ้นทดสอบ (dies cutter) ซึ่งมีขนาดตามมาตรฐานการทดสอบ ในการตัดชิ้นทดสอบต้องใช้หัวตัดที่คม ไม่มีรอยบิน และวางใบมีดให้ตั้งฉากกับแผ่นยางเพื่อป้องกันไม่ให้ขอบยางมีรอยตัดเป็นริ้ว และมีตำหนิ ซึ่งจะเป็นจุดบกพร่องของชิ้นทดสอบ

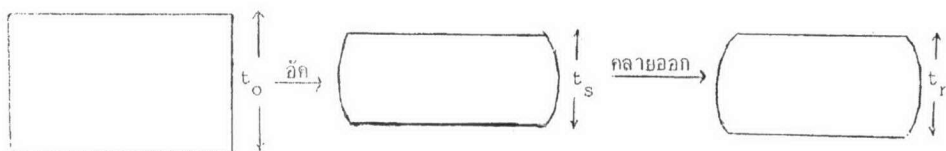
การเตรียมชิ้นทดสอบ

เนื่องจากทิศทางของแผ่นยางทดสอบที่ถูกรีดออกมาจากลูกกลิ้งจะมีผลต่อค่าความเค้นและความเครียดของยาง ดังนั้น เมื่อนำยางผสมสารเคมีที่ผ่านการคงรูปออกจากเครื่องอัดมาตัดเป็นชิ้นทดสอบ จำเป็นต้องตัดให้แนวความยาวของชิ้นทดสอบขนานกับทิศทางของยางที่รีดออกจากลูกกลิ้ง

ชิ้นทดสอบที่ใช้วัดสมบัติด้านการดึงจะสามารถเตรียมได้ 2 ลักษณะ คือ เป็นรูปดัมเบลล์และรูปวงแหวน ขนาดต่างๆ ตามมาตรฐาน ซึ่งชิ้นทดสอบทั้ง 2 ลักษณะ จะมีความหนาระหว่าง 1.5–3.0 มม. โดยจะต้องวัดทั้งความหนาและความกว้างของส่วนที่คอดที่สุดของชิ้นทดสอบ และจดบันทึกไว้เพื่อใช้ในการคำนวณ ให้ทำเครื่องหมายบนชิ้นทดสอบเพื่อแสดงระยะความยาวเริ่มแรกก่อนดึง เมื่อนำชิ้นทดสอบไปยึดกับเครื่องทดสอบด้วยหัวจับ (grip) แล้วจึงเริ่มทำการดึงให้ยืดออกด้วยอัตราความเร็วที่กำหนดตามมาตรฐาน ซึ่งสมบัติด้านการดึงต่างๆ จะถูกบันทึกด้วยเครื่องบันทึกอัตโนมัติ

2.6.3 สมบัติการคืนตัว (Compression set properties)

สมบัติการคืนตัวเป็นการวัดความสามารถของยางผสมสารเคมีที่จะคงสภาพยืดหดได้ภายใต้ความเค้นอัด (compression stress) เป็นเวลาช่วงหนึ่งภายใต้ภาวะที่กำหนด ซึ่งเมื่อปล่อยแรงที่กดออก จะพบว่ายางไม่สามารถคืนรูปมา มีความหนาเท่าเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และการวัดค่าความหนาที่เปลี่ยนไปนี้ เรียกว่า compression set



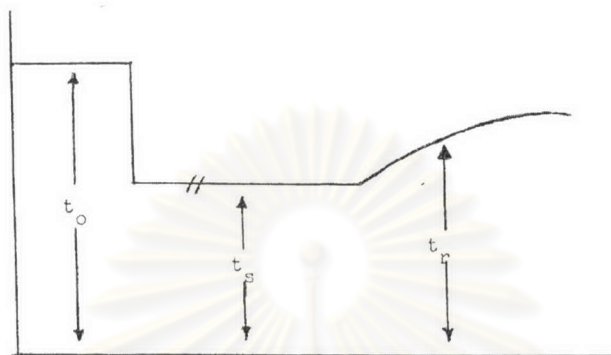
รูปที่ 2.11 ลักษณะการคืนตัวเมื่อได้รับความเค้นอัดเป็นเวลาช่วงหนึ่ง

จากรูปที่ 2.11 และ 2.12 จะได้ว่า

t_0 = ความหนาเดิมของชั้นทดสอบ

t_s = ความหนาของชั้นทดสอบที่ถูกกด

t_r = ความหนาของชั้นทดสอบเมื่อปล่อยแรงออก



รูปที่ 2.12 แสดงความหนาของชั้นทดสอบขณะทดสอบหาค่า compression set

จากรูปที่ 2.12 จะเห็นว่าค่า t_r เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งในทางปฏิบัติจะวัดความหนาของชั้นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที หลังจากหยุดให้ความเค้นอัด โดยค่า compression set คำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$\text{compression set (\%)} = (t_0 - t_r) / (t_0 - t_s) \times 100 \quad (2.4)$$

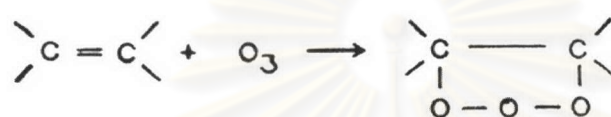
2.6.4 สมบัติความต้านทานโอโซน (Ozone resistance properties) ^(32, 33)

ถึงแม้ว่าในบรรยากาศจะมีโอโซนอยู่เพียงเล็กน้อย แต่ปริมาณโอโซนที่ต่ำกว่า 1 ส่วนในร้อยล้านส่วน ก็สามารถทำให้ยางที่อยู่ในสภาพยืดดึง และไม่ได้ใส่สารแอนติโอโซนแนนต์ (antiozonant) เกิดรอยแตกได้ ดังนั้น การทดสอบสมบัติความต้านทานโอโซนจึงมีความสำคัญมาก

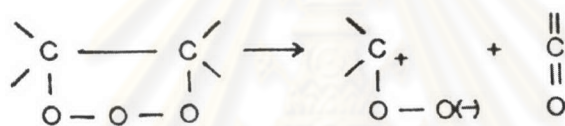
โอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับพื้นผิวยางได้เร็วกว่าออกซิเจน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดรอยแตกเล็กๆ ตั้งฉากกับความเค้นที่มากกระทำ และเมื่อระยะเวลาของยางลดลงจะทำให้เกิดรอยแตกน้อย หากแต่จะเป็นรอยลึก โดยยังมีรอยแตกลึกมากเท่าไรก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์ยางเสื่อมสภาพเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งการเติมสารแอนติโอโซนแนนต์จะช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพของยางจากโอโซนได้

Kendall และ Hann พบว่าโอโซนจะทำปฏิกิริยากับยางที่ไม่อิมัตัวได้ ถึงแม้ว่ายางจะไม่ได้ถูกดึงก็ตาม ซึ่งเป็นการเสื่อมสภาพด้วยโอโซนในระยะแรก นอกจากนี้ โอโซนยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อิมัตัวและพันธะเชื่อมขวางด้วยซัลเฟอร์ด้วยอัตราที่ช้าลง

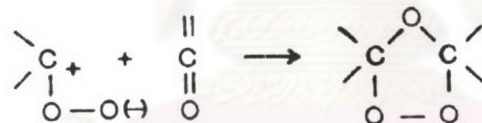
กลไกของปฏิกิริยาระหว่างยางกับโอโซนแสดงไว้ในรูปที่ 2.13 การที่ยางเกิดรอยแตกเมื่อถูกตั้งในบรรยากาศที่มีโอโซน เนื่องจากเกิดวงแหวนโอโซน (cyclic ozonide) ที่เรียกว่า โมโลโซน (molozone) ที่ยึดตัวไม่ได้ ทำให้เกิดรอยแตกที่ผิวของยาง ซึ่งผิวยางใหม่จะทำปฏิกิริยากับโอโซนต่อไป และรอยแตกจะยิ่งลึกถ้ามีการดึงมาก สารที่ใช้ป้องกันโอโซน เรียกว่า สารแอนติโอโซนแนนต์ ซึ่งได้แก่ อนุพันธ์ของพาราฟีนิลีนไดอะมีน (*p*-phenylene diamine) โดยสารแอนติโอโซนแนนต์จะทำปฏิกิริยากับสวิตเทอร์ไอออน (zwitterion) หรือโอโซนเกิดเป็นฟิล์มที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา และทุกครั้งฟิล์มถูกทำลายจะเกิดฟิล์มขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาระหว่างยางโอโซน และสารแอนติ-ออกซิแดนต์



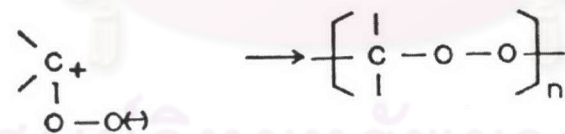
(a)



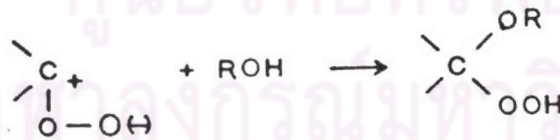
(b)



(c)



(d)



(e)

รูปที่ 2.13 กลไกของปฏิกิริยาระหว่างยางกับโอโซน (a) โมโลโซน (b) สวิตเทอร์ไอออน และหมู่คาร์บอนิล (c) โอโซนที่เสถียร (d) พอลิเมอร์ออกไซด์ (e) ไฮโดรเปอร์ออกไซด์

2.6.5 สมบัติความต้านทานน้ำมัน (Oil resistance properties) ⁽⁵⁾

เมื่อยางที่ผ่านการคงรูปแล้วแช่อยู่ในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนหรือน้ำมัน ยางจะดูดซับตัวทำละลายเหล่านั้น และยางจะบวมขึ้น ซึ่งปริมาตรของแผ่นยางที่บวมตัวมีค่าเท่ากับผลรวมของปริมาตรยางแห้ง (ยางที่ยังไม่ได้แช่อยู่ในตัวทำละลาย) กับปริมาตรของตัวทำละลายที่ดูดซับเข้าไป

การทดสอบสมบัติความต้านทานน้ำมันของยางที่ผ่านการคงรูปแล้วเป็นวิธีที่จะทดสอบผลของตัวทำละลายต่อผิวสัมผัสของยางภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลา โดยวิเคราะห์จากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพก่อนและหลังแช่ยางในตัวทำละลายที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบจะใช้น้ำมันมาตรฐานที่เรียกว่า ASTM oils ซึ่งเป็นน้ำมันที่มีจุดอะนิลีน (aniline point) ดังแสดงในตารางที่ 2.6 โดยจุดอะนิลีนของน้ำมันจะสามารถบอกถึงการบวมตัวของยาง ซึ่งน้ำมันที่มีจุดอะนิลีนต่ำจะมีขั้วหรือเป็นอะโรมาติกมากกว่าน้ำมันที่มีจุดอะนิลีนสูง จึงทำให้ยางที่มีขั้วบวมตัวได้มากกว่ายางที่ไม่มีขั้ว และจากตารางที่ 2.7 จะเห็นว่า ASTM oil No. 3 มีจุดอะนิลีนต่ำจึงทำให้ยางที่มีขั้วบวมตัวได้มากกว่า ASTM oil No. 1 ที่มีจุดอะนิลีนสูงกว่า การทดสอบยางในน้ำมันเหล่านี้เป็นไปตาม ASTM D 471-79 ซึ่งจะแช่ยางในน้ำมันเป็นเวลาประมาณ 72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.6 สมบัติของน้ำมันมาตรฐาน (ASTM oils)

	ASTM oil No.1	ASTM oil No.2	ASTM oil No.3 ⁿ	ASTM oil No.5
Aniline point, °C	124.0±1.0	93.0±3.0	70.0±1.0	115.0±1.0
Kinetic Viscosity, mm ² /s (cSt)	18.7-21.0 ^a	19.2±21.5 ^a	31.9-34.1 ^a	10.8-11.9 ^a
Flash point minimum, °C	243	240	163	243

ก : ปัจจุบันเปลี่ยนเป็นน้ำมัน IRM 903

ข : ทดสอบที่ 99 °C

ค : ทดสอบที่ 37.8 °C