



บทที่ 2

คุณสมบัติและวิธีการผลิตโฟมยางชนิดท่อ

2.1 คุณสมบัติทั่วไปโฟมยางชนิดท่อ

โฟมยางชนิดท่อมักมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกกลวง (ดูรูปที่ 1.1) ประกอบไปด้วยเซลล์อิสระซึ่งมีผนังกันไม่ทะลุถึงกัน ภายในเซลล์ประกอบด้วยแก๊สแห้ง โฟมยางโดยทั่วไปมีคุณสมบัติดังนี้ [10]

1. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) อยู่ในช่วง 0.24 - 0.32 Btu in hr⁻¹ ft⁻² °F⁻¹ ที่ 75 °F ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C 177 เพื่อการเป็นฉนวนที่ดี

2. ค่าการดูดซึมน้ำ (water absorption) ต่ำกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 1056 เพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าสม่ำเสมอ และเพื่อให้โฟมยางชนิดท่อมีอายุการใช้งานนานมากขึ้น

3. ค่าการซึมผ่านไอน้ำ (water vapor permeability) ต่ำกว่า 0.3 g Pa⁻¹ s⁻¹ m⁻² ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM E 96 เพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าสม่ำเสมอ และเพื่อให้โฟมยางชนิดท่อมีอายุการใช้งานนานมากขึ้น

4. ความหนาแน่น (density) อยู่ในช่วง 3 - 10 lbm ft⁻³ (48 - 160 kg m⁻³) ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 1667 โดยความหนาแน่นมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับความหนา

5. ขนาดความหนาและเส้นผ่าศูนย์กลางวงในตามมาตรฐานผู้ผลิต

2.2 วิธีการผลิตโฟมยางชนิดท่อ

การผลิตโฟมยางชนิดท่อประกอบด้วยขั้นตอนการผลิตหลัก 3 ขั้นตอนคือ

2.2.1 การผสมวัตถุดิบ

2.2.2 การแปรรูปให้เป็นโฟมยางชนิดท่อ

2.2.3 การทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาเชื่อม โยงสายโซ่และการพองตัว

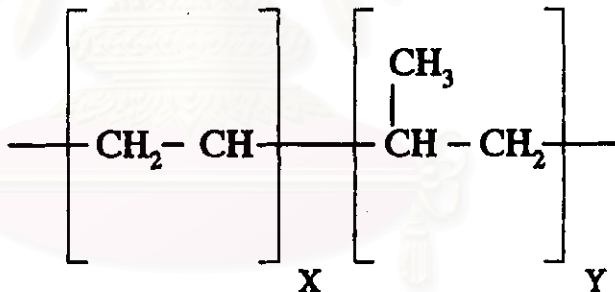
2.2.1 การผสมวัตถุดิบ

ขั้นตอนการผสมวัตถุดิบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

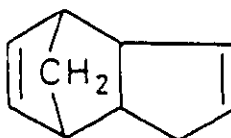
2.2.1.1 การผสมในเครื่องผสมระบบปิด (internal mixer) ขั้นตอนนี้เป็นการผสมวัตถุดิบซึ่งประกอบด้วย

ก. ยางเอทิลีน - โพรพิลีน ไดอีน โมโนเมอร์ (Ethylene - Propylene Diene Monomer, EPDM)

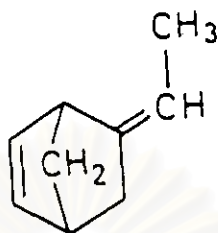
ยางอีพีดีเอ็มพัฒนาจากยางเอทิลีน - โพรพิลีนหรือยางอีพีโอาร์ (EPR) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 โดยใส่สารไดอีนประมาณร้อยละ 2 - 5 โดยน้ำหนัก ได้แก่ ไดไซโคลเพนตะไดอีน (dicyclopentadiene, $C_{10}H_{12}$) เอทิลิดีนนอร์บอเมน (ethylidene norbornene, C_9H_{12}) หรือ ทราน - 1,4 เฮกซะไดอีน (trans - 1,4 hexadiene, C_6H_{10}) เป็นต้น (สูตรโครงสร้างของสารเหล่านี้แสดงในรูปที่ 2.2 ถึง 2.4 ตามลำดับ)



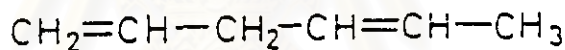
รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างโคพอลิเมอร์เอทิลีน-โพรพิลีน (EPR) [1]



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างไดไซโคลเพนตะไดอีน ($C_{10}H_{12}$) [1]



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างเอทิลดีนอร์บอนีน (C_9H_{12}) [1]



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้าง ทราน-1,4 เฮกซะไดอีน (C_6H_{10}) [1]

วัตถุประสงค์การใส่สารไดอีนเพื่อให้สามารถใช้กำมะถัน (sulphur) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงสายโซ่ (vulcanization) ในยางอีพิตีเอ็มได้ แต่ยังคงทำให้ยางอีพิตีเอ็มมีคุณสมบัติที่ดีด้านความทนต่อแสง ความร้อน สารเคมี ออกซิเจน และโอโซน ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของยางอีพีโอาร์

ชนิดของไดอีนมีผลต่ออัตราการเชื่อมโยงสายโซ่ โดยเอทิลดีนอร์บอนีนทำให้มีอัตราการเชื่อมโยงสายโซ่เร็วที่สุด และโคไซโคลเพนตะไดอีนทำให้มีอัตราการเชื่อมโยงสายโซ่ช้าที่สุด [5]

ข. สารตัวเติม (filler) [4, 5]

สารตัวเติมหมายถึงสารที่ใส่เพื่อวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนการผลิตเนื่องจากสารตัวเติมมีราคาถูกกว่ายาง เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของยาง เพื่อช่วยใน

ขบวนการผลิต เช่น ช่วยให้ผิวเรียบในการแปรรูปด้วยเครื่องอัดรีด (extrusion) และเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยาง

สารตัวเติมที่ใช้มากที่สุดในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางคือเขม่าดำ ชนิดที่ใช้มากที่สุดคือ channel black และ furnace black

รายละเอียดเพิ่มเติมอยู่ในภาคผนวก จ

ก. สารต่อต้านการติดไฟ (flame retardant)

สารต่อต้านการติดไฟเป็นสารที่ช่วยให้ยางมีความทนทานต่อการถูกไหม้ เช่น แอนติโมนีไตรออกไซด์ (antimony trioxide, Sb_2O_3) ซึ่งจะทำงานร่วมกับสารพวกฮาโลเจน (halogen) และอลูมินาไฮเดรท (alumina hydrate, $Al(OH)_3$) ซึ่งจะสูญเสียน้ำที่อุณหภูมิประมาณ $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ น้ำจะทำให้เปลวไฟจางพร้อม ๆ กับอุณหภูมิเปลวไฟลดลง นอกจากนี้อลูมินายังดูดความร้อนทำให้ยางเย็นลงและติดไฟได้ยาก

ง. สารพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer)

สารพลาสติกไซเซอร์มีชื่อเรียกต่างกันขึ้นอยู่กับหน้าที่และปริมาณที่ใช้ดังนี้ คือ processing aid หมายถึงสารพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ในปริมาณไม่เกิน 5 ส่วนในร้อยส่วน ยางโดยน้ำหนัก (phr) เพื่อช่วยในการแปรรูปยาง และช่วยให้การผสมสารเคมีเข้าไปในยางง่ายขึ้น softener หมายถึงสารพลาสติกไซเซอร์ที่ช่วยให้ยางนิ่ม ใช้ในปริมาณ 5 - 15 phr และเรียกว่า extender ซึ่งใช้ในปริมาณ 15 phr เพื่อลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้สารพลาสติกไซเซอร์ยังช่วยเปลี่ยนแปลงสมบัติของยางโดยทำให้ความแข็ง (hardness) โมดูลัส (modulus) และแรงยึดของขนาด (tensile strength) ลดลง แต่ทำให้ความยืดหยุ่น (elasticity) สูงขึ้น รวมทั้งช่วยลดพลังงานในการแปรรูปเนื่องจากสารพลาสติกไซเซอร์ทำให้ยางนิ่มลง ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการผสมยาง การแปรรูปยาง รวมทั้งอุณหภูมิในการแปรรูปยางจึงลดลง

สารพลาสติกไซเซอร์แบ่งออกได้ 2 ประเภทคือสารพลาสติกไซเซอร์เชิงเคมี (chemical plasticizer) และสารพลาสติกไซเซอร์ทางกายภาพ (physical plasticizer)

รายละเอียดเพิ่มเติมอยู่ในภาคผนวก ฉ

วัตถุดิบทั้ง 4 ชนิดถูกผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด โดย Femley H. Banbury เป็นคนแรกที่คิดค้นประดิษฐ์เครื่องผสมระบบปิด (internal mixer) [4] เครื่องผสมระบบปิดที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางได้แก่ banbury mixer และ shaw intermix ซึ่งมีหลักการทำงานที่แตกต่างกัน

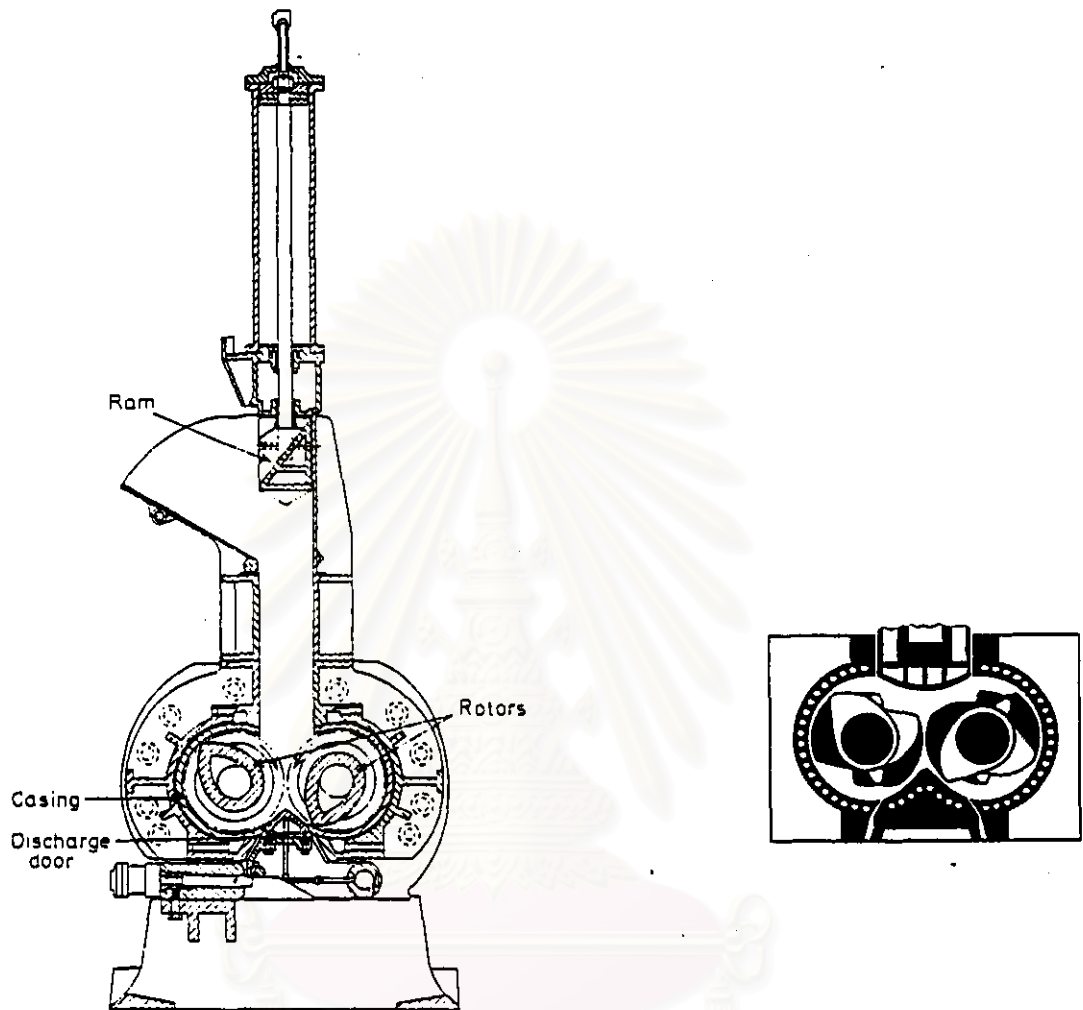
ก. banbury (farrel-bridge F series)

เครื่องผสม banbury ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ ส่วนรับยางเข้าเครื่อง (feed module) ส่วนบดผสมยาง (mixing module) และส่วนขับเครื่อง (drive module) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

ส่วนรับยางเข้าเครื่องประกอบด้วยช่องป้อนยาง (feed hopper) เข้าไปผสมโดยมีกระบอกสวมแรม (ram) ที่มีน้ำหนักเคลื่อนขึ้น-ลงเพื่อกดยางและสารต่างๆ ให้บดผสมกันในห้องผสม (mixing chamber)

ส่วนบดผสมยางประกอบด้วยห้องบดภายในมีโรเตอร์ (rotor) 2 ตัววางขนานกัน และมีประตู (drop-door) เพื่อเปิดให้ยางที่ผสมแล้วถูกนำออกจากส่วนบดผสมยาง โรเตอร์ทั้ง 2 ตัวหมุนในทิศทางตรงกันข้ามและด้วยความเร็วที่ต่างกันเพื่อให้ยางและวัตถุดิบอื่น ๆ ถูกเหวี่ยงหมุนอย่างสม่ำเสมอ ที่ผิวของโรเตอร์มีลักษณะเป็นใบมีด (rotor blades) ทำหน้าที่เคลื่อนยางและวัตถุดิบอื่น ๆ ให้ถูกบดที่กลางห้องผสม และใบมีดที่โรเตอร์จะตัดยางตามยาว นอกจากนี้การที่โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่ต่างกันทำให้เกิดการบดยางอย่างรุนแรง (intensive kneading action) ในห้องผสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



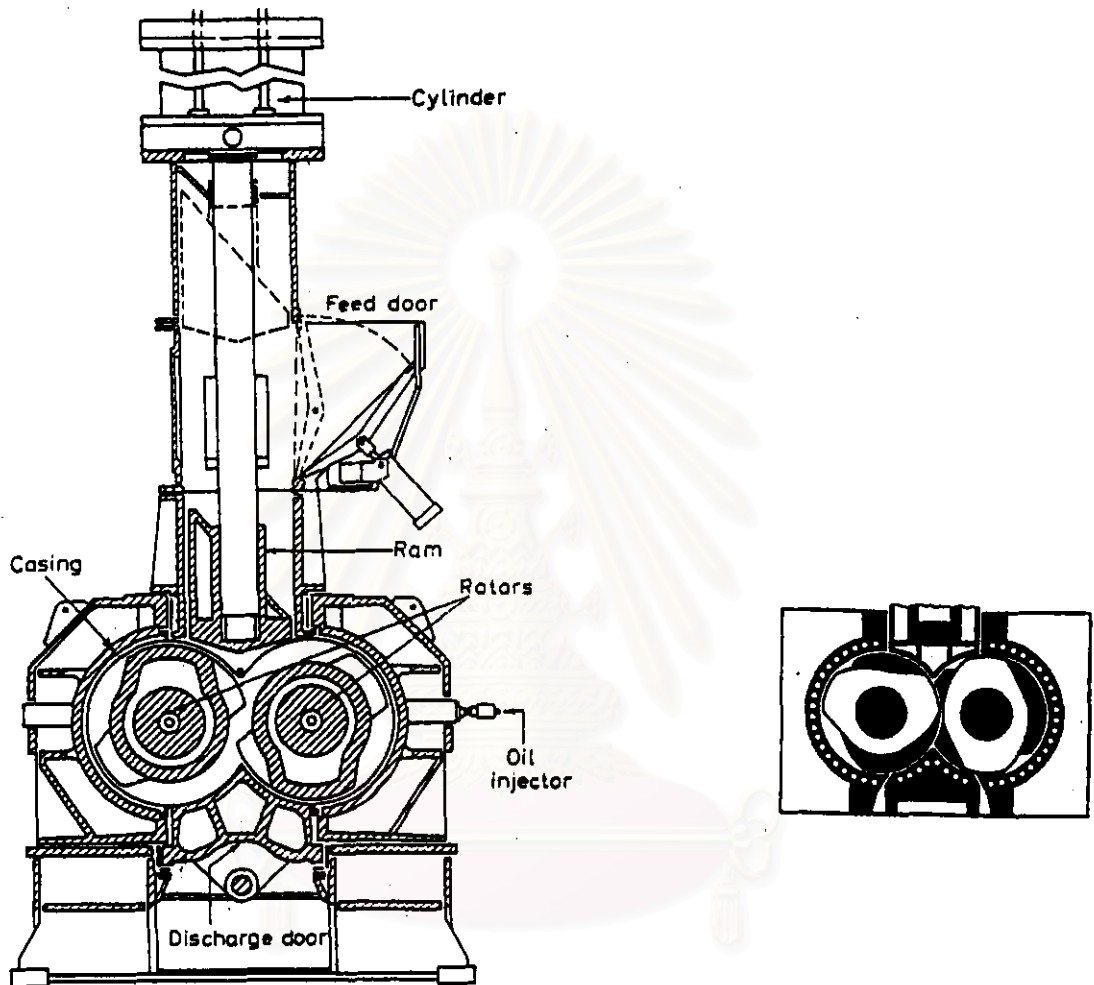
สถาบันวิทยบริการ
 รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบเครื่องผสม Banbury และลักษณะการทำงานของโรเตอร์ [4]
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บ. shaw intermix

เครื่องผสมระบบเปิดแบบ shaw intermix ดังแสดงในรูปที่ 2.6 มีโรเตอร์ 2 ตัว โดยแต่ละโรเตอร์มีใบมีดใหญ่ 1 อันและเล็ก 2 อัน และส่วนอื่นหรือใบมีดเหล่านี้ล็อกเข้ากันอย่างพอดี (interlocking projections) โรเตอร์มีการหมุนแบบสกรู (screw action) การหมุนแบบสกรูของใบมีดและสัดส่วนความเสียดทานต่ำ (small friction ratio) ที่เกิดขึ้นตรงช่องว่างระหว่างโรเตอร์ทั้ง 2 ทำให้เกิดการแผ่กระจายของยางและวัตถุดิบอื่น ๆ และเกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกันเนื่องจากการตัดและม้วนยางกลับเข้าไปผสม

เครื่องผสมระบบปิดทั้ง 2 แบบจะมีน้ำหล่อเย็นที่บริเวณห้องผสม ที่โรเตอร์และที่เปิดนำยางออกจากห้องผสม

ภาวะการผสมในเครื่องผสมระบบปิดภาวะหนึ่งที่น่าสนใจคือผสมที่อุณหภูมิ 130 - 170 °C ระยะเวลาการผสม 5 - 10 นาทีและพักสารประกอบยางที่ได้ไว้ 24 ชั่วโมงหรือมากกว่า จากนั้นจะนำสารประกอบยางเข้าสู่การผสมในเครื่องผสมระบบเปิด (open mill mixer)



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของเครื่อง shaw intermix และลักษณะการทำงานของโรเตอร์
[4]

2.2.1.2 การผสมในเครื่องผสมระบบเปิด (open mill mixer) เป็นการผสมสารประกอบอย่างจากขั้นตอนการผสมในเครื่องผสมระบบปิดกับวัตถุดิบซึ่งประกอบด้วย

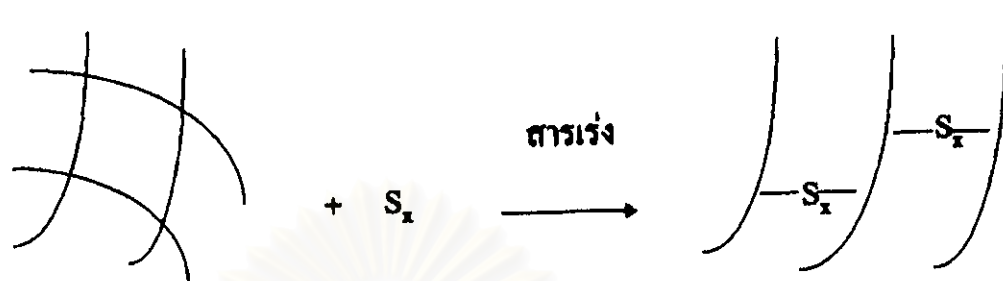
ก. สารเชื่อมโยงสายโซ่ (vulcanizing agent)

สารเชื่อมโยงสายโซ่เป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลของยาง เพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางให้ดีขึ้นได้แก่

1. ลดความเป็นพลาสติก (plasticity) และเพิ่มความเป็นอีลาสติก (elasticity)
2. เพิ่มความแข็งแรง (hardness) โมดูลัส (modulus) และเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอ
3. เปลี่ยนสภาพจากยางที่ละลายได้ดีในสารละลาย เป็นยางที่ไม่ละลายในสารละลายและไม่พองตัว
4. เปลี่ยนยางจากสภาพเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) เป็นเทอร์โมเซตติง (thermosetting)

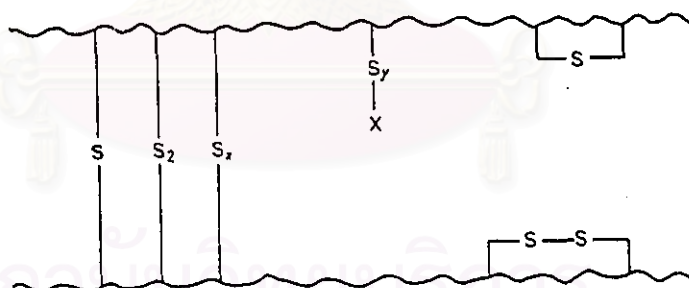
สารเชื่อมโยงสายโซ่แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือกำมะถัน (sulfur) และธาตุคล้ายกำมะถัน สารที่ให้กำมะถัน (sulfur donor) และสารอื่นๆที่ไม่ใช่กำมะถัน โดยกำมะถันเป็นสารที่นิยมใช้มากที่สุดประมาณร้อยละ 90 โดยนิยมใช้กับยางที่ไม่อิ่มตัว (unsaturated rubber) ได้แก่ยางธรรมชาติ ยางอีพิตีเอ็ม ยางเอสปีอาร์ เมื่อใส่กำมะถันแล้วให้ความร้อนจะเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่เรียกว่า crosslink ดังแสดงในรูปที่ 2.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลยาง [8]

การเชื่อมโยงสายโซ่อาจเกิดเป็นแบบโมโนซัลไฟด์ (monosulphide) ไดซัลไฟด์ (disulphide) ไซคลิกโมโนซัลไฟด์ (cyclic monosulphide) และไซคลิกไดซัลไฟด์ (cyclic disulphide) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะการเชื่อมโยงสายโซ่ด้วยกำมะถัน [1]

รายละเอียดเพิ่มเติมอยู่ในภาคผนวก ข

ข. สารเร่ง (accelerator)

การใช้สารเร่งให้เกิดการเชื่อมโยงสายโซ่จะช่วยลดเวลา ถดถอยหนุมิ และช่วยปรับปรุงคุณสมบัติให้กับผลิตภัณฑ์

สารเร่งปฏิกิริยาจัดแบ่งตามลักษณะ โครงสร้างออกได้เป็น 7 ประเภทคือ

1. กลุ่มกัวนิติน (guanidine)
2. กลุ่มอัลดีไฮด์อะมีน (aldehyde amine)
3. กลุ่มซัลฟีนามิด (sulphenamide)
4. กลุ่มไธอาโซล (thiazole)
5. กลุ่มไธยูเรม (thiuram)
6. กลุ่มไดไธโอคาร์บาเมต (dithiocarbamate)
7. กลุ่มแซนเทท (xanthate)

การผลิตผลิตภัณฑ์โฟมยางชนิดที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ใช้สารเร่งกลุ่มไธอาโซล (thiazole) คือ MBTS (2,2 - dibenzothiazyl disulphide, $C_{14}H_{9}S_4$) โดยเป็นสารเร่งที่มีปฏิกิริยาเร็วปานกลาง ให้ยางที่มีคุณสมบัติหลัง ageing คือ ความต้านทานต่อแรงดึงดี ขึ้นและ โมดูลัส (modulus) สูงขึ้น

รายละเอียดเพิ่มเติมอยู่ในภาคผนวก ข

ค. สารกระตุ้นสารเร่ง (activator)

สารกระตุ้นสารเร่งเป็นสารที่ช่วยเร่งอัตราการเชื่อมโยงสายโซ่ให้เร็วขึ้น สารนี้จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขั้นกลาง (intermediate complexes) กับสารเร่ง ทำให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

ชนิดของสารกระตุ้นสารเร่งแบ่งได้ 2 ประเภทคือ

1. พวกอนินทรีย์ (inorganic) ส่วนใหญ่เป็นโลหะออกไซด์ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) แคดเมียมออกไซด์ (cadmium oxide, CdO) แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide, MgO) โดยซิงค์ออกไซด์เป็นสารที่นิยมใช้กันทั่วไป

2. พวกอินทรีย์ (organic) สารกระตุ้นสารเร่งที่สำคัญคือกรดสเตียริก (stearic acid, $C_{18}H_{32}O_2$) กรดลอริก (lauric acid, $C_{12}H_{24}O_2$) กรดปาล์มมิติก (palmitic acid, $C_{16}H_{32}O_2$)

ง. ตัวฟู (blowing agent)

ตัวฟูคือสารที่ใส่ลงในยางเพื่อให้เกิดรูพรุนโดยโมเลกุลของสารจะสลายให้แก๊สออกมา ตัวฟูแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. ชนิดอนินทรีย์ (inorganic) มีประสิทธิภาพต่ำต้องใช้ในปริมาณมาก การกระจายตัวในสารประกอบยางไม่ดี ราคาค่อนข้างถูก ได้แก่ แอมโมเนียมคาร์บอเนต (ammonium carbonate, $(NH_4)_2CO_3$) แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (ammonium bicarbonate, NH_4CO_3) โซเดียมไบคาร์บอเนต (sodium bicarbonate, $NaHCO_3$) โดยตัวฟูเหล่านี้จะให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สแอมโมเนีย

2. ชนิดอินทรีย์ (organic) เป็นสารที่ให้แก๊สในโตรเจน มีประสิทธิภาพสูง สามารถละลายในยางได้ดี การกระจายตัวดีทำให้เกิดฟองขนาดเล็กและสม่ำเสมอ มีราคาแพง แบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

2.1 ชนิด azocompound ได้แก่ DAB (diazoaminobenzene, $C_{12}H_{11}N_3$) AZDN (azo-diisobutyronitrile, $C_8H_{12}N_4$) ABFA (azo-bisformamide, $C_2H_4N_4O_2$)

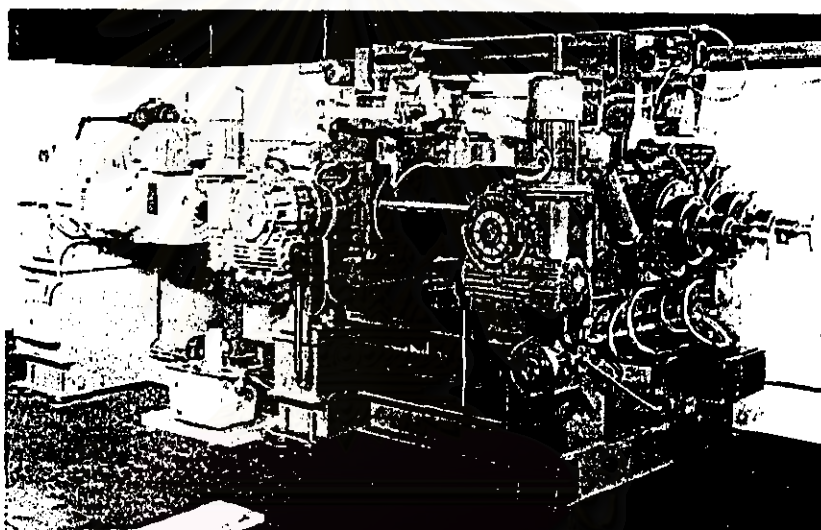
2.2 ชนิด nitroso compound ได้แก่ DPT (dinitroso pentamethylene tetramine)

2.3 ชนิด sulfonyl hydrazide ได้แก่ BSH (benzene sulfonyl hydrazide)

วัตถุดิบทั้ง 4 ชนิดนี้ได้แก่สารเชื่อมโยงสายโซ่ สารเร่ง สารกระตุ้นสารเร่งและตัวฟูถูกผสมเข้าด้วยเครื่องผสมระบบเปิด (open mill mixer) กับสารประกอบยางที่ได้จากการผสมในเครื่องผสมระบบปิด โดยเครื่องผสมระบบเปิดถูกคิดค้นขึ้นโดย Thomas Hancock [4] เครื่องผสมระบบเปิดประกอบด้วยลูกกิ้ง 2 ลูกเรียงในแนวนอนและขนานกัน ลูกกิ้งด้านหน้าจะมีสกรูสำหรับปรับช่องว่างระหว่างลูกกิ้งทั้งสอง ลูกกิ้งลูกหน้าหมุนช้ากว่าลูกกิ้งลูกหลัง เพื่อให้สามารถผสมสารประกอบยางกับวัตถุดิบ

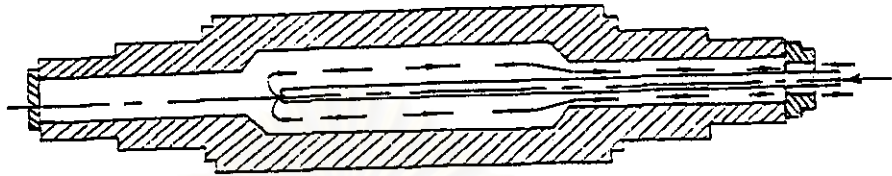
อื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลูกกิ้งทำจากเหล็กหล่อ ผิวหน้าจะเรียบ การควบคุม อุณหภูมิของลูกกิ้งใช้ระบบน้ำหล่อเย็นภายในลูกกิ้ง ตัวอย่างเครื่องผสมระบบเปิด แสดงในรูปที่ 2.9 และระบบน้ำหล่อเย็นในลูกกิ้งแสดงในรูปที่ 2.10

ภาวะการผสมมาตรฐานในเครื่องผสมระบบเปิดผสมที่อุณหภูมิ 78°C เป็น เวลา 10 นาที



รูปที่ 2.9 เครื่องผสมระบบเปิด [4]

สถาบันวิจัยนวัตกรรม
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



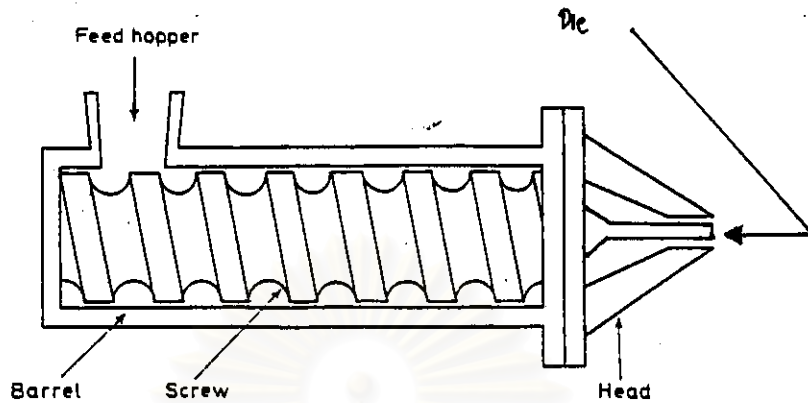
รูปที่ 2.10 ระบบน้ำหล่อเย็นในลูกกึ่ง [7]

2.2.2 การแปรรูปให้เป็นโฟมยางชนิดท่อ

หลังจากการผสมยางกับวัตถุดิบในเครื่องผสมระบบเปิดเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือขั้นตอนการทำสารประกอบยางให้เป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ วิธีที่ใช้มี 4 วิธี ได้แก่ การใช้แม่พิมพ์ (molding) การอัดรีดผ่านได (extruding) การใช้เครื่องอัดบดเป็นแผ่น (calendering) และการฉาบสารละลายยางบนผ้า (spreading on fabric from rubber solution) สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์โฟมยางชนิดท่อใช้วิธีการอัดรีดผ่านได

การอัดรีดผ่านได (extruding) ทำได้โดยใช้เครื่องอัดรีดผ่านได (extruder) ซึ่งทำงานโดยการอัดหรือดันยางไปยังส่วนหัวของเครื่องซึ่งมีโครงร่างตามลักษณะผลิตภัณฑ์ที่คิดอยู่ ชนิดของเครื่องแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ ชนิดอาศัยแรงดันยางจากแรม (ram) และชนิดอาศัยแรงอัดยางจากการหมุนของสกรู สำหรับการผลิตโฟมยางชนิดท่อที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องแบบอาศัยแรงอัดยางจากการหมุนของสกรู [6]

เครื่องอัดรีดผ่านไดแบบอาศัยแรงอัดยางจากการหมุนของสกรู ประกอบด้วย ส่วนต่าง ๆ คือช่องป้อน (feed hopper) สกรู (screw) หมุนอยู่ในตัวถังทรงกระบอก (barrel หรือ cylinder) หัวเครื่อง (head) และ ได (die) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 [1]



รูปที่ 2.11 ภาพตัดเครื่องอัดรีดขางผ่านไคแบบอาศัยแรงอัดขางจากการหมุนของตกรู [1]

ตกรู (screw) ของเครื่องถูกทำให้หมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าและถูกควบคุมความเร็วของการหมุนด้วยเกียร์ทดกำลัง (reduction gear) ตกรูหมุนในตัวถังทรงกระบอกและอยู่ห่างจากผิวตัวถังประมาณ 0.4 มิลลิเมตร

หัวเครื่อง (head) เป็นที่ปรับแรงอัดที่ขางได้รับขณะตกรูหมุนและเป็นที่ที่ขางจะผ่านออกไปยังไค หัวเครื่องเป็นส่วนที่สำคัญโดยขางจะต้องเคลื่อนออกอย่างสม่ำเสมอไปที่ไคและเคลื่อนด้วยแรงอัดและความเร็วที่สม่ำเสมอ หากเกิดหยุดขงก็จะทำให้ปรากฏรอยตำหนิในขางที่ออกจากไค

ไค (die) เป็นส่วนที่ทำให้ขางมีรูปร่างตามรูปร่างของไค โดยเมื่อขางออกจากไคจะมีการขยายหรือบวม (expansion หรือ swell) ดังนั้นในการออกแบบรูปร่างของไคจะต้องคำนวณเพื่อการขยายหรือบวมของขางด้วย

2.2.3 การทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่

การทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่ทำโดยการใส่พลังงานเข้าไปเพื่อให้ยางเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุล โดยมีกำมะถันเป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง ในการผลิตผลิตภัณฑ์โฟมยางชนิดท่อซึ่งมีตัวฟุ้งผสมอยู่ ถ้าเลือกใช้ขุยมะพร้าวและระยะเวลาที่เหมาะสม ตัวฟุ้งจะให้แก๊สเพื่อให้เกิดรูพรุนในโฟมยางในระหว่างการเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลยางได้

การทำให้เกิดการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีอัด (compression molding) วิธีฉีด (injection molding) วิธีใช้ไอน้ำ (open steam) วิธีใช้ลมร้อน (hot air) และวิธีใช้ไมโครเวฟ (microwave) สำหรับการผลิตโฟมยางที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ใช้ลมร้อนในการทำให้เกิดการเชื่อมโยงสายโซ่

2.3 การทดสอบคุณสมบัติสารประกอบยาง

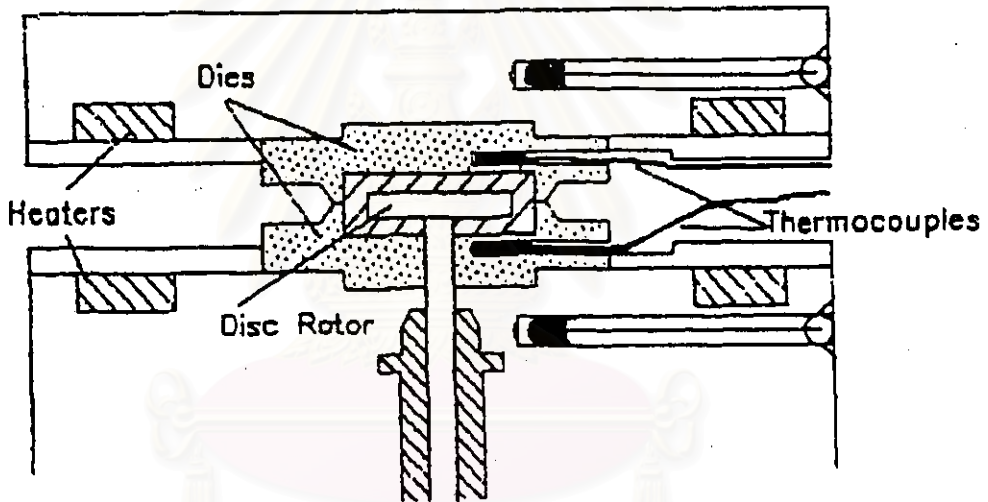
เครื่องวัดความหนืดมูนนี่สามารถใช้วัดความหนืดมูนนี่ (mooney viscosity) ของสารประกอบยางที่ได้จากการผสมวัตถุดิบในเครื่องผสมระบบปิดและระบบเปิด โดยค่าที่ได้จากการวัดสารประกอบยางที่ได้จากการผสมวัตถุดิบในเครื่องผสมระบบปิดด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ คือค่าความหนืดมูนนี่เริ่มต้น (initial mooney viscosity) และค่าความหนืดมูนนี่ต่ำสุด (minimum mooney viscosity) ซึ่งเป็นข้อมูลบอกถึงความสม่ำเสมอด้านคุณภาพ

สำหรับการวัดสารประกอบยางที่ได้จากการผสมวัตถุดิบในเครื่องผสมระบบเปิดด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ นอกเหนือจากค่าความหนืดมูนนี่ทั้งสองแบบแล้ว ยังได้ข้อมูลที่บอกถึงลักษณะการเชื่อมโยงสายโซ่ (cure characteristic) ได้แก่ ระยะเวลาก่อนเริ่มเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่ (mooney scorch time, T5) ระยะเวลาเมื่อความหนืดมูนนี่เพิ่มจากค่าต่ำสุด 35 หน่วย (T35)

ความหนืดมูนนี่เป็นทอร์คหรือแรงบิดระหว่างจานโรเตอร์ (rotor) ของเครื่องกับยางตัวอย่างโดยความหนืด 1 หน่วยมูนนี่คือค่าทอร์ค 0.083 นิวตันเมตร ที่ยางตัวอย่างกระทำต่อจานโรเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็ว 2 รอบต่อนาที เมื่อยางตัวอย่างถูกอัดอยู่ในห้องใส่ยาง (die cavity) ด้วยแรง 11,500 นิวตัน [2]

2.8.1 หลักการทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนืดหมุน

เครื่องวัดความหนืดหมุนนี้เป็นเครื่องวัดความหนืดประเภทหมุน โดยมีงานโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่ที่อยู่ในห้องใส่ยางที่ใส่ยางตัวอย่างไว้พร้อมกับให้ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ เมื่องานโรเตอร์หมุนจะเกิดแรงเฉือนขึ้นที่ผิวงานโรเตอร์เนื่องจากความหนืดของยาง ทอร์กที่เกิดขึ้นระหว่างงานโรเตอร์กับยางจะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนืดของยางที่อุณหภูมิทดสอบ รูปที่ 2.12 แสดงตำแหน่งงานโรเตอร์ในห้องใส่ยางของเครื่องวัดความหนืดหมุนนี้ [11]

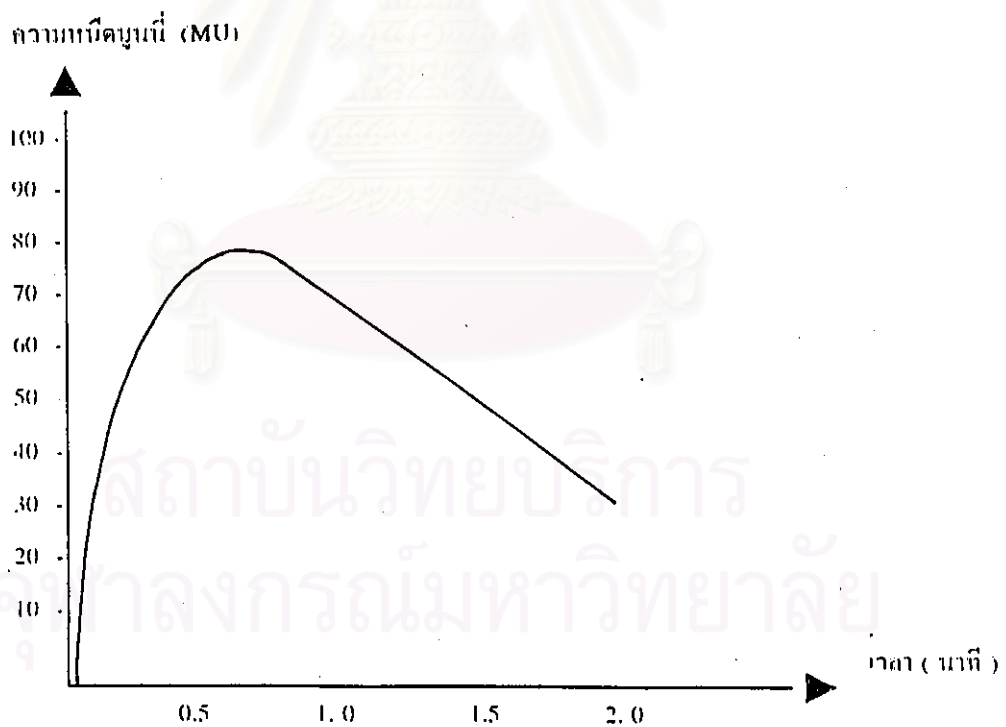


รูปที่ 2.12 ตำแหน่งงานโรเตอร์ในห้องใส่ยางของเครื่องวัดความหนืดหมุนนี้ [11]

โดยปกติขั้นตอนการทดสอบความหนืดมุนีของสารประกอบยางจะเป็น
ขั้นตอนดังนี้

- ก. ตั้งเครื่องที่อุณหภูมิที่ต้องการทดสอบ
- ข. บรรจุยางตัวอย่างลงในห้องใส่ยางตัวอย่าง (die cavity)
- ค. ย่นยางโดยปล่อยให้สารประกอบยางได้รับความร้อนเป็นเวลา 1 นาที
- ง. เดินมอเตอร์ให้งานโรเตอร์หมุนที่ความเร็ว 2 รอบต่อนาที
- จ. หลังจากเดินมอเตอร์ไปแล้ว 2 นาทีจึงอ่านค่าความหนืดมุนี

ตัวอย่างผลการทดสอบความหนืดมุนีของสารประกอบยางที่ไม่มีสารเชื่อมโยง
สายโซ่แสดงในรูปที่ 2.13 [11]



รูปที่ 2.13 ผลทดสอบความหนืดมุนีของสารประกอบยางที่ไม่มีสารเชื่อมโยงสายโซ่
[11]

หลังจากอุ่นยางโคปปล่อยให้สารประกอบยางได้รับความร้อนเป็นเวลา 1 นาที แล้วจึงเริ่มเดินมอเตอร์ให้จานโรเตอร์หมุน และเริ่มบันทึกข้อมูล จากรูปที่ 2.13 เห็นได้ว่าในช่วงต้นสารประกอบยางยังเย็นจึงมีความแข็ง ทอร์กที่อ่านได้จะเป็นค่าสูงสุด เมื่อยางร้อนขึ้นยางจะนิ่มลง และทอร์กจะลดลงเรื่อย ๆ การรายงานผลการทดสอบจะเขียนในลักษณะ $ML 1 + 2 (100^\circ C) = X$

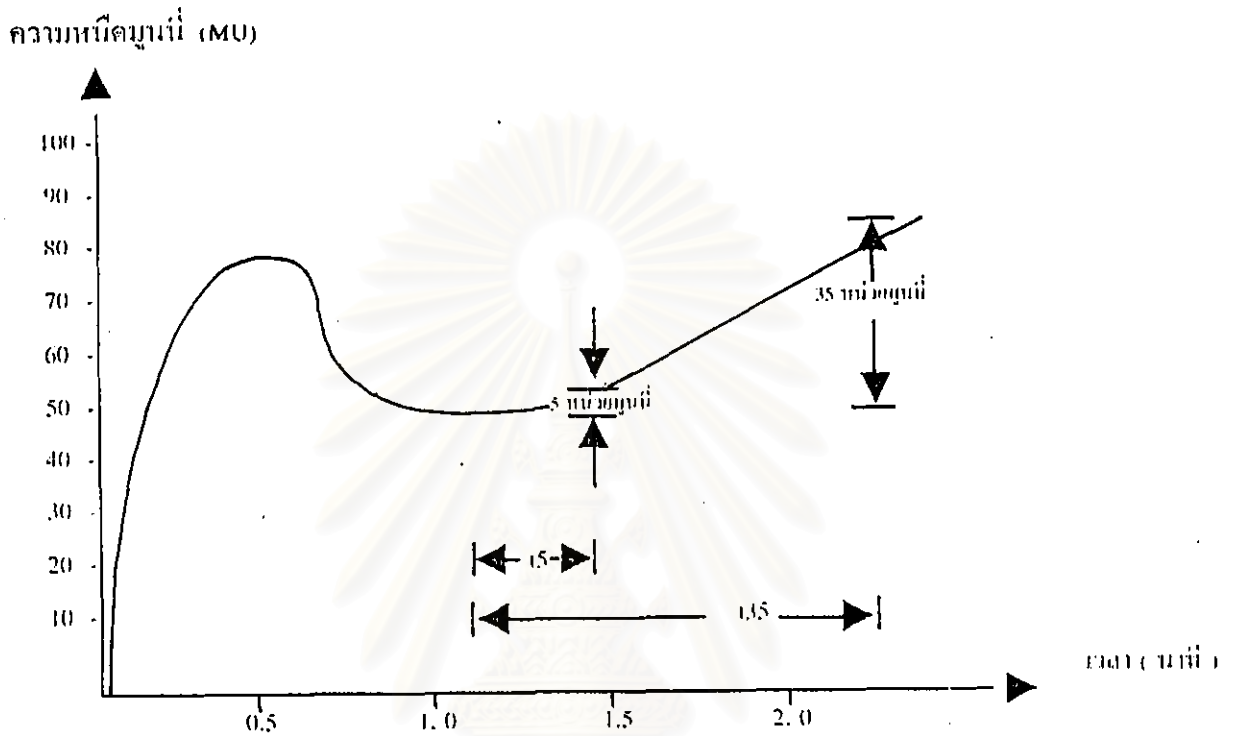
โดยที่ X แสดงค่าความหนืดมูนนี่ที่อ่านได้จากเครื่องเมื่อสิ้นสุดเวลาทดสอบ โดยที่ความหนืด 1 หน่วยมูนนี่ (MU) คือค่าทอร์ก 0.083 นิวตันเมตร (ตัวอย่างจากรูปที่ 2.13 ค่า X เท่ากับ 30 MU)

L แสดงว่าโรเตอร์ขนาดใหญ่ถูกใช้ในการทดสอบ หากโรเตอร์ขนาดเล็กถูกใช้ในการทดสอบจะใช้อักษร S แทนโรเตอร์ขนาดเล็กเหมาะสำหรับยางที่แข็งมาก

- 1 แสดงเวลาเป็นนาทีที่ให้ยางได้รับความร้อนก่อนการทดสอบ (preheat)
- 2 แสดงเวลาเป็นนาทีที่กำหนดว่าจะอ่านค่าความหนืดมูนนี่ $100^\circ C$ แสดงอุณหภูมิของการทดสอบ

สำหรับสารประกอบยางที่มีสารเชื่อม โยงสายโซ่ซึ่งได้จากการผสมในเครื่องผสมระบบเปิดเมื่อนำมาทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่จะ ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.14 [9]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างผลทดสอบความหนืดของสารประกอบยางที่มีสารเชื่อมโงสายโซ่ [9]

หลังจากอุ่นยางโดยปล่อยให้สารประกอบยางได้รับความร้อนเป็นเวลา 1 นาที แล้ว จึงเริ่มเดินมอเตอร์ให้จานโรเตอร์หมุน และเริ่มบันทึกข้อมูล จากรูปที่ 2.14 เห็นได้ว่าในช่วงต้นสารประกอบยางยังเย็นจึงมีความแข็ง ทอร์คที่อ่านได้จะเป็นค่าสูงสุด เมื่อยางร้อนขึ้นยางจะนิ่มลง และทอร์คจะลดลงเรื่อย ๆ แต่เมื่อจานโรเตอร์หมุนอยู่ในสารประกอบยางนานขึ้น ทอร์คจะกลับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากการเกิดการเชื่อมโงสายโซ่ภายในสารประกอบยาง

ค่าที่ได้จากการทดสอบสารประกอบยางที่มีสารเชื่อมโงสายโซ่ประกอบด้วย (ดูรูปที่ 2.14)

ก. ค่าความหนืดมูนนี่เริ่มต้นซึ่งเป็นค่าสูงสุดก่อนที่ความหนืดจะลดลงแล้วกลับเพิ่มขึ้น (จากรูปที่ 2.14 ค่านี้เท่ากับ 80 MU)

ข. ค่าความหนืดมูนนี่ต่ำสุด ซึ่งเป็นค่าความหนืดมูนนี่ต่ำสุดก่อนที่ความหนืดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่ (จากรูปที่ 2.14 ค่านี้เท่ากับ 50 MU)

ค. ระยะเวลาก่อนเริ่มเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่ (mooney scorch time, T5) ซึ่งถูกนิยามเป็นเวลาที่ค่าความหนืดมูนนี่ของสารประกอบยางเพิ่มขึ้น 5 MU จากค่าความหนืดมูนนี่ต่ำสุด

ง. ระยะเวลาเมื่อความหนืดมูนนี่เพิ่มจากค่าต่ำสุด 35 หน่วย (T35)

จ. ดัชนีการเชื่อมโยงสายโซ่ (mooney cure index, TΔ30) คือผลต่างระหว่าง T35 และ T5 ดังสมการ (1)

$$T\Delta 30 = T35 - T5 \quad (1)$$

ฉ. เวลาเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่ (mooney optimum cure, T_c) ซึ่งคำนวณจากค่า T5 และ TΔ30 ดังสมการ (2)

$$T_c = T5 + (10 \times T\Delta 30) \quad (2)$$

นอกจากวิธีการทดสอบสารประกอบยางที่มีสารเชื่อมโยงสายโซ่ด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่แล้ว ยังสามารถใช้วิธีการทดสอบโดยวิธีทางเคมีและการทดสอบโดยวิธีทางกายภาพ

2.8.2 การทดสอบสารประกอบยางที่มีสารเชื่อมโยงสายโซ่โดยวิธีทางเคมี [7]

วิธีนี้เป็นการทดสอบทางอ้อมโดยยึดหลักการหาปริมาณกำมะถันอิสระ (free sulfur) ซึ่งจะลดลงเมื่อเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุล วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากการทดสอบปริมาณกำมะถันอิสระ ไม่ได้ให้ความสัมพันธ์โดยตรงกับการเพิ่มระดับปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่ และยังเป็นวิธีการที่ใช้เวลาในการทดสอบมากถึง 5 ชั่วโมงโดยสกัดกำมะถันด้วยโซเดียมซัลไฟต์ (sodium sulfite) แล้วนำมาโคเคอร์คกับไรโอซัลเฟต(thiosulfate)

2.3.3 การทดสอบสารประกอบยางที่มีสารเชื่อมโยงสายโซ่โดยวิธีทางกายภาพ

[8]

การเชื่อมโยงสายโซ่เป็นวิธีการเปลี่ยนสภาพยางจาก raw elastic rubber เป็น elastomeric elastic rubber คุณสมบัติของ elastomeric elastic rubber เช่น โมดูลัส (modulus) ความแข็ง (hardness) จะเปลี่ยนไปตามปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่ (degree of crosslink) การทดสอบสารประกอบยางที่มีสารเชื่อมโยงสายโซ่โดยวิธีทางกายภาพ นิยมวัดค่าโมดูลัสเพื่อโยงความสัมพันธ์ไปถึงปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่

2.4 ผลของการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลต่อสมบัติทางกายภาพของยาง

2.4.1 ค่าโมดูลัส (modulus)

ค่าโมดูลัสคืออัตราส่วนระหว่างความเค้นดึง (tensile stress) ซึ่งใช้ดึงยางออกที่ความเครียด (strain) ที่กำหนด ค่าโมดูลัส f ค่าความเครียดหนึ่ง ๆ เป็นสัดส่วนกับจำนวนการเชื่อมโยงสายโซ่ (degree of vulcanization or crosslinking) ดังสมการ (3)

$$f = PRTA_c^{-1}M_c^{-1}(X - X^2) \quad (3)$$

โดยที่ f คือ ค่าแรงที่ใช้ยึดยางออกยาว X ซึ่งเท่ากับปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่ (crosslink density)

P คือ ความหนาแน่นของยาง

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบก่อนดึง

M_c คือ น้ำหนักโมเลกุลยางในบริเวณระหว่างจุดเชื่อมโยงโมเลกุล 2

จุด (two crosslinks)

เมื่อความหนาแน่นของยาง อุณหภูมิทดสอบ ขนาดชิ้นทดสอบ และความยาวที่ยึดยางออกคงที่ ค่าแรงที่ใช้ยึดยางออกจะขึ้นอยู่กับน้ำหนัก โมเลกุลยางในบริเวณ

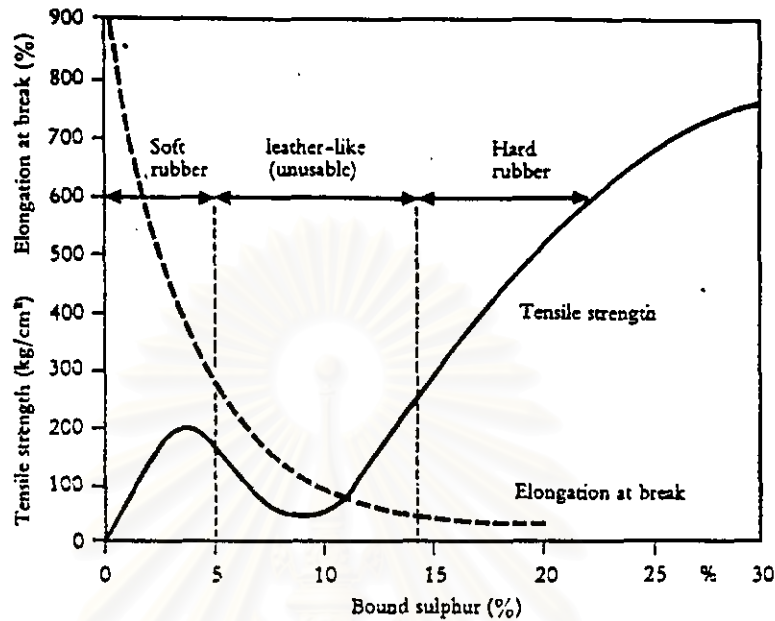
ระหว่างจุดเชื่อมโยงโมเลกุล 2 จุด เมื่อการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลยิ่งใกล้กัน น้ำหนักโมเลกุลระหว่างจุดเชื่อมโยงโมเลกุล 2 จุดก็จะน้อยลง โดยทั้งนี้จะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสไม่ขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ยางและลักษณะการเชื่อมโยงสายโซ่ (ดังแสดงในรูปที่ 2.8)

2.4.2 ความแข็ง (hardness)

ในทำนองเดียวกับค่าโมดูลัส ยางจะมีความแข็งมากขึ้นเมื่อปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่ยางเปลี่ยนเป็น ebonite หรือจุดที่เรียกว่าสถานะ steel-elastic ซึ่งเป็นสถานะที่ยางเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โดยสมบูรณ์ ในอุตสาหกรรมยาง ความแข็งวัดด้วยเครื่องวัดแบบ durometer ซึ่งเป็นวิธีวัดหาแรงที่ทำให้ยางเสียรูป

2.4.3 แรงดึงยางจนขาด (tensile strength)

แรงดึงยางจนขาดไม่สัมพันธ์กับปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่ในลักษณะเดียวกับค่าโมดูลัสและความแข็ง โดยเมื่อปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่เพิ่มมากขึ้น แรงดึงยางจนขาดจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง จากจุดนี้หากยังมีการเชื่อมโยงสายโซ่เพิ่มขึ้น แรงดึงยางจนขาดจะลดลง และสำหรับยางบางชนิดแรงนี้จะกลับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเรียงตัวเป็นระเบียบของโมเลกุลของยางที่ถูกขี้ออก (crystallisation due to the orientation of the molecular chains) ทำให้แรงดึงยางจนขาดไม่เหมาะสมที่จะนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงยางจนขาดและระยะยืดยางจนขาด (elongation at break) กับปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่แสดงได้ดังรูปที่ 2.15 [3]



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงยางจนขาด (tensile strength) และระยะยืดยางจนขาด (elongation at break) กับปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่ [3]

2.4.4 ระยะยืดยางจนขาด (elongation at break)

ระยะยืดยางจนขาดลดลงเมื่อปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.15 [3]

2.4.5 elasticity

elastomer-elasticity เกิดจากการเคลื่อนย้ายของสายโซ่โมเลกุล โดยโมเลกุลของยางใน plastic state จะไม่กลับคืนสู่ตำแหน่งเดิม ในทางตรงกันข้ามถ้ามีการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลยาง จะกลับเข้าสู่ตำแหน่งเดิมได้ หากปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่เพิ่มขึ้น พอลิเมอร์มีแนวโน้มจะกลับสู่ตำแหน่งเดิมหลังได้รับแรงกระทำ ความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ (4)

$$W = \frac{1}{2} P R T M_c^{-1} (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 - 3) \quad (4)$$

โดยที่ W คือ elasticity ซึ่งเท่ากับปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่ (crosslink density)

P คือ ความหนาแน่นของยาง

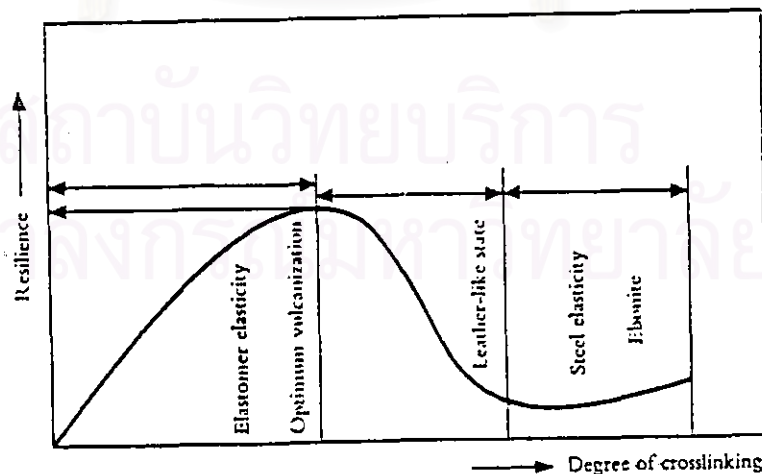
R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

M_c คือ น้ำหนักโมเลกุลในบริเวณระหว่างจุดเชื่อมโยงโมเลกุล 2 จุด (two crosslinks)

X คือ ระยะยืดยางออกใน 3 ทิศทาง

ค่าของ f และ W ขึ้นกับ M_c หรือปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่ในลักษณะเดียวกัน (ดูสมการ (3) และ (4)) แต่ความสัมพันธ์จะไม่ใช่ไปตามสมการ (3) และ (4) หากปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่อยู่ในระดับมากเกินไป (overcured) โดยจะลดลงในช่วง leather like elasticity และกลับเพิ่มขึ้นช้า ๆ ในช่วง steel elasticity ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง resilience กับปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่ [3]

2.4.6 การบวมหรือพอง (swelling)

ยางที่ไม่มีการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลจะมีสมบัติเหมือนกับพอลิเมอร์อื่น ๆ คือจะบวมหรือพองในตัวทำละลายชนิดใดชนิดหนึ่ง เนื่องจากตัวทำละลายจะถูกดูดซึมเข้าไปในยางหรือพอลิเมอร์จนกระทั่งโมเลกุลยางหรือพอลิเมอร์สูญเสียแรงยึดเหนี่ยวภายใน (inner cohesion) และโมเลกุลก็จะรวมตัวกับตัวทำละลาย

การบวมหรือพองของยางที่มีการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลจะไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณการเชื่อม โยงสายโซ่แต่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของยางและของตัวทำละลาย

2.4.7 การซึมผ่านของแก๊ส (gas permeability)

เมื่อปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลของยางเพิ่มขึ้น ความสามารถที่แก๊สจะซึมผ่านลดลง นอกจากนี้การซึมผ่านของแก๊สยังขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวเติม และชนิดของแก๊สด้วย

2.4.8 ความทนต่อความร้อน (heat stability)

ความทนต่อความร้อนไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณการเชื่อม โยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุล แต่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของยาง และขึ้นอยู่กับพันธะเคมีของการเชื่อม โยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุล พลังงานพันธะ (bond energy) ของพันธะเคมี (chemical bonds) ชนิดต่าง ๆ เป็นปัจจัยสำคัญต่อสมบัติความทนต่อความร้อน โดยที่พันธะชนิดคาร์บอน-คาร์บอนจะมีความทนต่อความร้อนสูงกว่าพันธะเคมีชนิดอื่น ๆ

พลังงานพันธะของพันธะเคมีที่เชื่อม โยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุลของยางแสดงในตารางที่ 2.1 [3]

ตารางที่ 2.1 พลังงานพันธะของชนิดพันธะเคมีที่เชื่อมโยงสายโซ่ระหว่างโมเลกุล [3]

ชนิดพันธะเคมี	ลักษณะพันธะ	พลังงานพันธะ (kcal/mol)
polysulphidic crosslink	-C-S _x -C-	64
di-sulphidic crosslink	-C-S-S-C-	64
mono-sulphidic crosslink	-C-S-C-	68
carbon-carbon crosslink	-C-C-	84

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย