

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำมันแก๊สโซฮอล์ (Gasohol)

น้ำมันแก๊สโซฮอล์ คือ น้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากการผสมระหว่างน้ำมันเบนซินกับแอลกอฮอล์ โดยเรียกชื่อจาก “แก๊สโซลิน” (Gasoline ซึ่งเรียกน้ำมันเบนซิน) กับ “แอลกอฮอล์” (Alcohol) และที่มีส่วนผสมของเอทานอลในสัดส่วนต่างๆ เพื่อใช้กับเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยประกายไฟ (เครื่องยนต์เบนซิน) เช่น E10, E20 และ E85 เป็นต้น

2.1.1 เอทานอล (Ethanol)

เอทานอล (Ethanol) มีชื่อสามัญว่า เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) เป็นสารอินทรีย์ที่มีสูตรทางเคมี $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ซึ่งมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 46.07 จุดเดือดประมาณ 78 องศาเซลเซียส และความหนาแน่นประมาณ 0.789 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นของเหลวใส ระเหยง่าย ติดไฟง่าย ให้เปลวไฟสีน้ำเงินไม่มีควัน [6] โดยปกติสามารถรวมตัวกับน้ำ อีเทอร์ หรือ คลอโรฟอร์มได้ทุกส่วน เอทานอลผลิตได้จากการหมักพืชผลทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด เป็นต้น เพื่อเปลี่ยนแป้งจากพืชเป็นน้ำตาลแล้วเปลี่ยนจากน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์ มีคุณสมบัติช่วยเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมันเบนซิน ทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยทั่วไปแอลกอฮอล์บริสุทธิ์มีน้ำปนไม่เกินร้อยละ 0.5 และมีปริมาณออกซิเจนสูง ทำให้สามารถนำมาผสมกับน้ำมันเบนซินเพื่อเพิ่มค่าออกเทน ป้องกันการกระตุกของเครื่องยนต์ในรถยนต์ได้ หากเอทานอลที่ใช้มีน้ำปะปนอยู่มาก ทำให้เกิดปัญหาเครื่องยนต์น็อค และชิ้นส่วนและอุปกรณ์ของเครื่องยนต์เกิดสนิม

เอทานอล ผลิตได้ทั้งจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี โดยใช้เอทิลีนเป็นวัตถุดิบ และกระบวนการทางชีวเคมี โดยใช้พืชผลหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาลในปริมาณสูงเป็นวัตถุดิบ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมและมีวัตถุดิบที่สามารถเลือกใช้ได้หลากหลายชนิด ตามความเหมาะสมของแต่ละประเทศ เช่น ข้าวโพด ข้าวฟ่าง มันสำปะหลัง อ้อย กากน้ำตาล สาหร่าย ฯลฯ นอกจากนั้นยังมีความพยายามพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบที่มีเซลลูโลสสูง เช่น ฟางข้าว จีเลื้อย หย้า เป็นต้น สำหรับประเทศไทยวัตถุดิบที่ได้รับการพิจารณาจากคณะกรรมการเอทานอลแห่งชาติว่ามีความเหมาะสมที่นำมาผลิตเอทานอลมีเพียง 3 ชนิด ดังนี้ อ้อย กากน้ำตาล และมันสำปะหลังสด เนื่องจากเอทานอลมีออกซิเจนประกอบอยู่ในโมเลกุล ออกซิเจนสามารถจับตัวอยู่ใน

รูปของอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl; OH) ทำให้โมเลกุลของเอทานอลมีสมบัติความเป็นขั้ว (Polar) ซึ่งมีปฏิกิริยาสูงกว่าเบนซิน จึงทำให้เอทานอลมีอำนาจการกัดกร่อนมากกว่าเบนซิน สมบัติการกัดกร่อนของเอทานอลป้องกันได้ โดยใช้สารเคลือบที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนไว้ที่ถึงน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งเอทานอลอย่างเดียวไม่สามารถผสมเข้ากับน้ำมันเบนซินได้นัก ต้องเติมสารพิเศษเข้าไปเพื่อให้ผสมเข้ากันได้ดี เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในการจุดระเบิด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือ สามารถลดปริมาณไฮโดรคาร์บอนลงได้ถึง 20-40 เปอร์เซ็นต์ ลดปริมาณฝุ่น และควันดำลงได้ถึง 0-40 เปอร์เซ็นต์ การใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงไม่ส่งผลทำให้วาล์วในเครื่องยนต์ไหม้ เนื่องจากเอทานอลให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าน้ำมันเบนซิน จึงทำให้วาล์วมีอุณหภูมิต่ำกว่าใช้น้ำมันเบนซิน

การนำเอทานอลไปใช้งาน

การนำเอทานอลใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ 3 รูปแบบ

1. ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง ทดแทนน้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซล โดยเครื่องยนต์ของรถยนต์ต้องได้รับการออกแบบเป็นพิเศษ ให้สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เนื่องจากเอทานอลสามารถกัดกร่อนโลหะ ยาง และพลาสติกบางชนิดที่ใช้เป็นชิ้นส่วนของเครื่องยนต์
2. นำไปผสมกับน้ำมันเบนซิน หรือน้ำมันดีเซลในสัดส่วนต่างๆ ตามการเลือกใช้ของแต่ละประเทศ ซึ่งหากผสมกับน้ำมันเบนซินในสัดส่วนร้อยละ 10 โดยปริมาตร เรียกว่า น้ำมันแก๊สโซฮอล์ (Gasohol) แต่ถ้าผสมในสัดส่วนที่เกินกว่าร้อยละ 10 โดยปริมาตร เช่น ผสมในสัดส่วนร้อยละ 85 เรียกว่าน้ำมัน E85 ส่วนเอทานอลที่ผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วนร้อยละ 15 โดยปริมาตร เรียกว่า ดีโซฮอล์ (Diesohol)
3. ใช้เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมันเบนซิน เนื่องจากเอทานอลมีค่าออกเทนสูง โดยค่าออกเทนเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเอทานอลที่ใช้ผสมในน้ำมันเบนซิน

การใช้เอทานอลช่วยพัฒนาสภาพแวดล้อม เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่ไร้สารมลพิษ เช่น ซัลเฟอร์ และมีโมเลกุลของออกซิเจนเป็นส่วนประกอบถึงร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์จึงเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าเชื้อเพลิงทั่วไป ระบบเครื่องยนต์ที่ใช้เอทานอลจึงสะอาดกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินหรือดีเซล อย่างไรก็ตามการนำเอทานอลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์นั้น สามารถดำเนินการได้ดีในประเทศที่มีการผลิตพืชผลทางการเกษตรมากเพียงพอที่สามารถผลิตเอทานอลใช้กับยานพาหนะ เช่น ประเทศบราซิลใช้เอทานอลที่ผลิตจากอ้อย ส่วนในประเทศสหรัฐอเมริกา เอทานอลส่วนใหญ่ผลิตจากข้าวโพด นอกจากการใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์แล้ว ปัจจุบันยังมีความพยายามทดลองใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินอีกด้วย [7]

สมบัติการกลายเป็นไอ

เชื้อเพลิงน้ำมันเบนซินมีความสามารถในการระเหยเป็นไอได้ เช่น ความดันไอ (Reid vapor pressure; REV) อัตราส่วนไอล่ต่อของเหลว (Vapor-liquid ratio) และค่าความร้อนแฝงในการระเหย (Latent heat of vaporization) เป็นต้น ค่าความดันไอของเชื้อเพลิงมีอิทธิพลต่อการระเหยของเชื้อเพลิงและสมรรถนะของเครื่องยนต์ ถ้าความดันไอน้ำมันมีค่าต่ำ ส่งผลให้การสตาร์ทเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิต่ำสตาร์ทติดยาก แต่ถ้าความดันไอน้ำมันมีค่าสูงเกินไป ส่งผลให้น้ำมันเชื้อเพลิงระเหยเป็นไอในท่อส่งน้ำมันทำให้ปั๊มไม่สามารถสูบให้ไหลได้ ในกรณีบรรยากาศโดยรอบมีอุณหภูมิสูง ทั้งสองกรณีส่งผลเสียต่อสมรรถนะและการใช้งานของรถยนต์ทั้งสิ้น การมีสมบัติการกลายเป็นไอต่ำ (ระเหยยาก) มีผลเสียต่อเครื่องยนต์ในด้านการสตาร์ทยากในขณะเครื่องเย็น (Cold starting) เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพลดลงในการใช้งานในสถานที่อากาศเย็นจัด และการมีน้ำมันเชื้อเพลิงตกค้างหรือล้นในห้องเผาไหม้ ซึมเข้าไปยังห้องเพลาช้อเหวี่ยงผ่านทางแหวนลูกสูบ และจับติดที่หัวเทียนมากเกินไป เพราะน้ำมันเชื้อเพลิงไม่กลายเป็นไอ ส่วนสมบัติการกลายเป็นไอสูง (ระเหยง่าย) ทำให้เกิดการระเหยเป็นไอในระบบส่งน้ำมันเชื้อเพลิงและปั๊มน้ำมันเชื้อเพลิงไม่สามารถสูบน้ำมันได้ เรียกว่า Vapor lock การกลายเป็นไอได้ง่ายทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของไอน้ำมันออกสู่บรรยากาศได้สูง และมีปัญหาในขณะสตาร์ทเครื่องยนต์ในขณะร้อน (Hot starting)

2.1.2 น้ำมันเบนซิน (Gasoline)

น้ำมันเบนซินหรือแก๊สโซลีน (Gasoline) เป็นเชื้อเพลิงที่ระเหยได้ง่าย มีจุดเดือดอยู่ในช่วงระหว่าง 30-200 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่นประมาณ 0.737 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ได้มาจากการกลั่นน้ำมันดิบในโรงกลั่น แล้วเอามาผสมกันและปรุงแต่งด้วยสารเพิ่มคุณภาพต่างๆ เช่น แนฟธา (Naphtha), Isomerate, Reformate และสารเติมแต่ง (Additives) เช่น MTBE (Methyl Tertiary Butyl Ether), เอทานอล เป็นต้น เพื่อให้เหมาะสมแก่การใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์เบนซินชนิดสันดาปภายใน โดยมีหัวเทียนเป็นเครื่องจุดระเบิด (Spark Ignition Internal Combustion Engine) ความสามารถในการระเหยน้ำมันต้องพอเหมาะกับการเผาไหม้ในกระบอกสูบและสม่ำเสมออย่างต่อเนื่อง น้ำมันเบนซินเป็นที่รู้จักกันในชื่อ Aliphatic Hydrocarbon หรือโมเลกุลที่ประกอบด้วยไฮโดรเจน (Hydrogen) และ คาร์บอน (Carbon) ที่ต่อกันเป็นสายโซ่

น้ำมันเบนซิน ผลิตมาจากน้ำมันดิบ (Crude oil) ที่ได้จากฟอสซิล มีลักษณะเป็นของเหลวสีดำ เรียกว่าปิโตรเลียม (Petroleum) ของเหลวชนิดนี้ประกอบไปด้วยไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) และคาร์บอนอะตอมในน้ำมันดิบเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ที่มีความยาวแตกต่างกัน โมเลกุลของ

ไฮโดรคาร์บอนที่มีความยาวแตกต่างกัน มีคุณสมบัติและพฤติกรรมที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น สายโซ่ที่มีคาร์บอนเพียง 1 อะตอม (CH_4) เป็นสายโซ่ที่เบาที่สุด คือ มีเทน (Methane) มีเทนเป็นก๊าซที่มีน้ำหนักเบาเหมือนกับฮีเลียม (Helium) และเมื่อสายโซ่มีความยาวมากขึ้น ส่งผลให้มีน้ำหนักมากขึ้นด้วย สายโซ่ 4 สายแรกคือ CH_4 (Methane), C_2H_6 (Ethane), C_3H_8 (Propane) และ C_4H_{10} (Butane) ทั้งหมดนี้อยู่ในรูปของก๊าซ และมีจุดเดือดอยู่ที่ -107 , -67 , -43 และ -18 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สายโซ่ที่มีความยาวมากขึ้นถึง $\text{C}_{18}\text{H}_{32}$ มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง และสายโซ่ที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 19 ตัวขึ้นไปมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความแตกต่างของความยาวของสายโซ่มีผลต่อจุดเดือดของมันด้วย โดยสายโซ่ที่มีความยาวมาก ก็มีจุดเดือดที่สูงขึ้นด้วย ดังนั้นสามารถแยกสายโซ่แต่ละความยาวออกจากกันในรูปแบบของ "การกลั่นน้ำมัน" (Oil refinery) โดยน้ำมันดิบได้รับความร้อนและสายโซ่ที่มีความยาวแตกต่างกันถูกดึงออกมาตามลำดับ ของช่วงอุณหภูมิในการกลายเป็นไอของมัน สายโซ่ที่มีคาร์บอนอะตอม 5, 6 และ 7 มีน้ำหนักเบาและสามารถกลายเป็นไอได้ง่าย ของเหลวประเภทนี้เรียกว่า แนฟธา (Naphtha) ซึ่งใช้เป็นตัวทำละลายในน้ำยาซักแห้ง ตัวทำละลายในสีทำให้แห้งเร็ว และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ต้องการการระเหยที่เร็ว สายโซ่ที่มีคาร์บอนอะตอม 7 ตัว (C_7H_{16}) ถึง 11 ตัว ($\text{C}_{11}\text{H}_{24}$) ถูกนำมาผสมกันและใช้เป็นน้ำมันเบนซิน (Gasoline) ซึ่งมีการระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ [8]

การเพิ่มออกเทนในน้ำมันเบนซิน

ค่าออกเทนเป็นตัวเลขที่บอกถึงความสามารถในการต้านทานการน็อก (Antiknock quality) ของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เบนซิน โดยในสภาพการทำงานของเครื่องยนต์ เมื่อส่วนผสมของอากาศและน้ำมันเบนซินถูกจุดระเบิดจากประกายไฟ หัวเทียนก็ติดไฟ เกิดเปลวไฟลุกลามเผาไหม้จนหมด และระเบิดให้พลังงานขับเคลื่อนลูกสูบต่อไป แต่ถ้าบางส่วนของเชื้อเพลิงที่เปลวไฟไม่ถึงเกิดจุดระเบิดขึ้นก่อน (Pre-ignition) อันเนื่องมาจากความร้อนและความดัน ก็ทำให้เครื่องยนต์เกิดการน็อกขึ้น สังเกตจากมีเสียงเหมือนเสียงเคาะโลหะเกิดขึ้น การใช้ น้ำมันเบนซินที่มีค่าออกเทนที่เหมาะสมจึงมีผลดีต่อการทำงานของเครื่องยนต์ เช่น การเผาไหม้สมบูรณ์ เครื่องยนต์สะอาดปราศจากเขม่า ประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง ลดมลภาวะในสิ่งแวดล้อม และยืดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์ และน้ำมันเครื่อง ฯลฯ ดังนั้น ค่าออกเทนในน้ำมันเบนซินจึงเป็นสมบัติที่สำคัญที่ผู้ผลิตที่ต้องปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันให้เหมาะสมกับการใช้งานของเครื่องยนต์ เพื่อให้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ในกระบวนการผลิตน้ำมันเบนซินของโรงกลั่นน้ำมัน ในเบื้องต้นยังมีคุณภาพในการป้องกันการน็อกต่ำ ไม่เหมาะสำหรับใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง จึงต้องมีการเพิ่มค่าออกเทน โดยวิธีการเพิ่มค่าออกเทนสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การปรับปรุงกระบวนการกลั่น การเติมสารตะกั่ว การเติมสารเมกานีส และการเติมสารที่มีค่าออกเทนสูง เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ

(Oxygenate) เป็นต้น วิธีที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย คือ การใช้สาร Oxygenate มาผสมในน้ำมันเบนซิน เพราะนอกจากช่วยเพิ่มค่าออกเทนแล้ว ช่วยลดมลพิษที่ออกจากไอเสียรถยนต์ด้วย เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และช่วยลดการเกิดโอโซน เป็นผลมาจากการระเหยของน้ำมันเบนซิน

ในปัจจุบันรัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมและสนับสนุนการใช้เอทานอล จากวัตถุดิบผลิตผลทางการเกษตร ใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยเอทานอลที่ใช้เป็นชนิดที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 เพื่อทดแทนการใช้สาร MTBE (Methyl Tertiary Butyl Ether) ที่ผสมในน้ำมันเบนซินเพื่อเพิ่มค่าออกเทน ในอัตราส่วนเอทานอลในน้ำมันเบนซินออกเทน 91 ที่ 10 ส่วนในน้ำมันเบนซิน 90 ส่วน เพื่อให้เป็นน้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่มีค่าออกเทน 95 นอกจากนี้ ไข่กลไกด้านการตลาดกำหนดราคาจำหน่ายน้ำมันแก๊สโซฮอล์ต่ำกว่าน้ำมันเบนซินออกเทน 95

2.1.3 สมบัติของน้ำมันแก๊สโซฮอล์

น้ำมันแก๊สโซฮอล์ส่วนใหญ่ที่จำหน่ายในประเทศไทย มีค่าออกเทน 95 มีคุณลักษณะทางเคมีและกายภาพเป็นไปตามข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน สามารถใช้ได้กับรถยนต์ทุกรุ่นตามที่คุณผลิตแนะนำโดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ แต่โดยทั่วไปสามารถใช้กับรถยนต์ที่มีระบบเชื้อเพลิงแบบหัวฉีด ไม่แนะนำให้ใช้กับรถยนต์รุ่นเก่าที่มีระบบจ่ายเชื้อเพลิงแบบคาร์บูเรเตอร์ น้ำมันแก๊สโซฮอล์มีการกำหนดเกณฑ์คุณภาพ ดังนี้ [7]

- มีค่าออกเทนไม่ต่ำกว่า 95 ค่าออกเทนของน้ำมันเบนซินบ่งบอกถึงคุณภาพในการต้านทานการน็อก หรือความสามารถของน้ำมันเบนซินที่เผาไหม้โดยปราศจากการน็อกในเครื่องยนต์
- มีค่าความดันไอ ณ อุณหภูมิ 37.8 องศาเซลเซียส ไม่เกินกว่า 62 กิโลปาสกาล (kPa) ค่าความดันไอเป็นคุณลักษณะที่แสดงถึงความสามารถในการระเหย และการเกิดฟองอากาศในระบบจ่ายเชื้อเพลิง ซึ่งมีผลต่อการสตาร์ทเครื่องยนต์
- มีคุณภาพเช่นเดียวกับน้ำมันเบนซินออกเทน 95 ทุกประการโดยไม่มีความแตกต่างกันในเชิงสมบัติของน้ำมัน ยกเว้นสารเพิ่มค่าออกเทนที่กำหนดให้มีการเติมในน้ำมันเบนซินไร้สารตะกั่วออกเทน 95 ซึ่งโดยทั่วไปใช้สาร MTBE (Methyl Tertiary-Butyl Ether) แต่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ เอทานอลทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนโดยยังคงมีสมบัติการใช้งานกับเครื่องยนต์เหมือนกับน้ำมันเบนซินออกเทน 95

ตารางที่ 2.1 ข้อดีของการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ [7]

ผลดีต่อเครื่องยนต์	ผลดีต่อประเทศ
• การเผาไหม้สมบูรณ์กว่า เมื่อเทียบกับน้ำมันเบนซิน ออกเทน 95 • ไม่มีผลกระทบต่อสมรรถนะการใช้งาน และอัตราการเร่งดีกว่าหรือไม่แตกต่างจากน้ำมันเบนซิน ออกเทน 95 • ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการปรับแต่งเครื่องยนต์ • สามารถเติมผสมกับน้ำมันที่เหลืออยู่ในถังได้ตลอดเวลา	• ลดการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ ลดการขาดดุลทางการค้า • ใช้ประโยชน์จากพืชผลทางการเกษตรสูงสุด และยกระดับราคาพืชผลทางการเกษตร • ช่วยลดมลพิษไอเสียทางอากาศ และแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยสามารถลดปริมาณไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนมอนอกไซด์เฉลี่ยร้อยละ 20-25 • ทำให้เกิดการลงทุนที่หลากหลายทั้งภาคการเกษตร และภาคอุตสาหกรรม

2.1.4 คุณสมบัติของน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85

- **E10** คือ น้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่ได้จากการผสมน้ำมันเบนซินกับเอทานอลอัตราส่วน 90:10 แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E10 ออกเทน 91 และออกเทน 95
- **E20** คือ น้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่ได้จากการผสมน้ำมันเบนซินกับเอทานอลอัตราส่วน 80:20
- **E85** คือ น้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่ได้จากการผสมน้ำมันเบนซินกับเอทานอลอัตราส่วน 15:85

2.1.5 การใช้งานน้ำมันแก๊สโซฮอล์กับยานพาหนะ [9]

รถยนต์ในปัจจุบัน (ผลิตตั้งแต่ปี 1995 เป็นต้นมา) ถังน้ำมันในรถยนต์และท่อทางเดินน้ำมันจากถังน้ำมันเข้าสู่เครื่องยนต์ ทำจากวัสดุที่ทำจากยาง หรือพลาสติกชนิดพิเศษเพื่อแก้ไขปัญหาน้ำมันไร้สารตะกั่วทำปฏิกิริยากับถังน้ำมันเหล็กของรถยนต์รุ่นก่อนหน้า (รถยนต์รุ่นเก่ากว่าปี 1994 ลงไป) ซึ่งไม่สามารถใช้น้ำมันเบนซินไร้สารตะกั่วได้เนื่องจากถังน้ำมัน และท่อทางเดินเป็นสนิมอย่างรวดเร็วหากใช้น้ำมันไร้สารตะกั่ว ทำให้ถังน้ำมันและท่อทางเดินน้ำมันรั่วซึมก่อนเวลาอันควร น้ำมันแก๊สโซฮอล์ซึ่งมีส่วนผสมของเอทานอลร้อยละ 10 และน้ำมันเบนซิน 91 ร้อยละ 90 หรือ E10 สามารถทำปฏิกิริยากับถังน้ำมันรถยนต์ และท่อทางเดินน้ำมันรถยนต์ที่ผลิตจากวัสดุที่ทำจากยาง หรือพลาสติกชนิดพิเศษ ทำให้เกิดเป็นตะกอนสะสมในถังน้ำมัน เมื่อปริมาณตะกอนมากส่งผลกระทบต่อดังนี้

1. ปั๊มน้ำมันไฟฟ้าต้องทำงานหนักขึ้นเพื่อดูดเอาน้ำมันเข้าไปเผาไหม้ในห้องเครื่องยนต์ ทำให้อายุการใช้งานของปั๊มน้ำมันไฟฟ้าสั้นลงอย่างรวดเร็ว
2. ใ้กรองน้ำมันเชื้อเพลิงหรือกรองเบนซินอุดตันเร็วกว่าปกติ ทำให้อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถยนต์เพิ่มขึ้น และทำให้เครื่องยนต์กำลังตกลงเนื่องจากปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงไม่ได้สัดส่วนกับปริมาณของอากาศ เมื่อกล่องสมองกล (Electronic Control Unit; ECU) สั่งจุดระเบิด ทำให้กำลังของเครื่องยนต์ต่ำกว่ามาตรฐานส่งผลให้เครื่องยนต์เร่งไม่ขึ้น
3. ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์มีตะกอนของยางและพลาสติกชนิดพิเศษไปเกาะตามบ่าวาล์ว ลูกสูบ แหวนลูกสูบ ส่งผลทำให้แหวนลูกสูบสึกหรอ แหวนลูกสูบบิ่น ทำให้เครื่องยนต์เริ่มมีปัญหาเนื่องจากแหวน ลูกสูบไม่สามารถกวาดน้ำมันเครื่องลงก้นอ่างได้หมดทำให้รถยนต์มีปัญหาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์
4. คาตาไลติกคอนเวอร์เตอร์หรือตัวกรองไอเสียของรถยนต์ในปัจจุบัน ไม่ได้รับการออกแบบมาเพื่อรองรับการใช้งานกับเชื้อเพลิงชนิดเอทานอลผสม การใช้งานเชื้อเพลิงชนิดอื่นนอกจาก RON (น้ำมันไร้สารตะกั่ว) ย่อมทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ลดลง (คาตาไลติกคอนเวอร์เตอร์อายุใช้งานเฉลี่ยประมาณ 10 ปี)
5. น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E10 ที่ใช้กันในปัจจุบันบริษัทผู้ผลิตเอทานอลในประเทศไทยแต่ละราย ยังไม่สามารถส่งมอบเอทานอลได้มาตรฐานตามข้อกำหนด ทำให้คุณภาพของน้ำมันแก๊สโซฮอล์ในปัจจุบัน แปรเปลี่ยนไปตามวัตถุดิบของแต่ละโรงงานผลิต ส่งผลให้การผสมน้ำมันเบนซินไม่ได้สัดส่วนที่แน่นอน
6. น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E10 ไม่สามารถให้พลังงานได้เทียบเท่าน้ำมันเบนซิน 95 เดิม ทำให้ต้องเติมจำนวนมากกว่า เทียบกับระยะทางการใช้งานที่เท่ากัน เนื่องจากน้ำมันแก๊สโซฮอล์มีค่าความร้อนต่ำกว่าน้ำมันเบนซินเล็กน้อย โดยมีก๊าซออกซิเจนเป็นสารไม่ให้พลังงานความร้อนแต่ช่วยทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์เป็นองค์ประกอบ

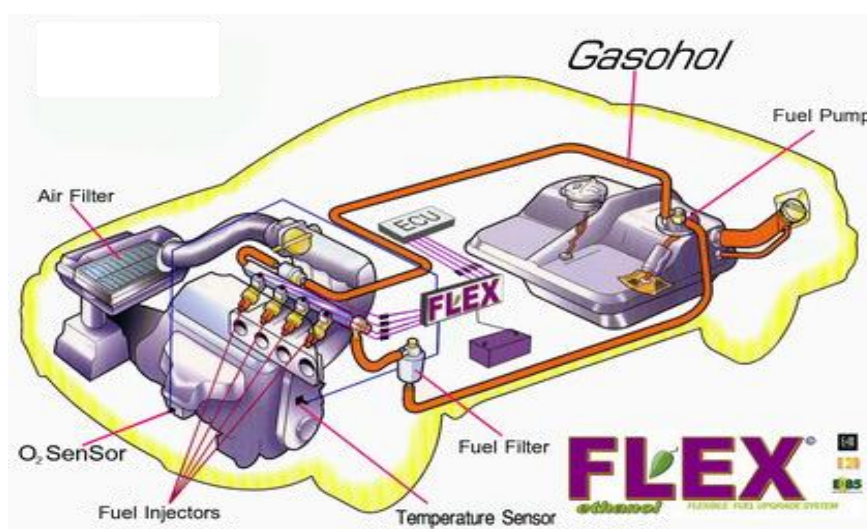
2.2 รถยนต์ที่สามารถรองรับการใช้เชื้อเพลิงได้อย่างหลากหลาย (Flexible Fuel Vehicle; FFV)

รถยนต์ที่สามารถรองรับการใช้เชื้อเพลิงได้อย่างหลากหลาย (Flexible Fuel Vehicle) หรือรถยนต์ FFV คือรถยนต์ที่ถูกออกแบบมาให้สามารถใช้กับน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 (เอทานอลร้อยละ 85 ผสมกับน้ำมันเบนซินร้อยละ 15) หรือ M85 (เมทานอลร้อยละ 85 ผสมกับน้ำมันเบนซินร้อยละ 15) หรือเชื้อเพลิงที่มีเอทานอลในสัดส่วนได้ตั้งแต่ 0 ถึงร้อยละ 85 (รถยนต์บางค่ายอาจได้ถึงร้อยละ 100) และสามารถใช้ได้กับน้ำมันเบนซินบริสุทธิ์ได้ด้วย จึงเรียกว่า Flexible Fuel Vehicle [10]



รูปที่ 2.1 รถยนต์ที่สามารถใช้เชื้อเพลิงได้อย่างหลากหลาย [10]

รถยนต์ FFV มีอุปกรณ์กล่องสมองกล (Electronic Control Unit; ECU) ที่แตกต่างจากรถยนต์ทั่วไป สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ตรวจวัดออกซิเจน (Oxygen sensor) ในการคำนวณปริมาณเอทานอลในเชื้อเพลิงได้สูงถึงร้อยละ 85 และสั่งการหัวฉีด (Injector) ให้ปรับการจ่ายเชื้อเพลิงและค่าการจุดระเบิดที่เหมาะสมต่อสัดส่วนของเอทานอล ซึ่งการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 2.2 ในขณะที่กล่องสมองกล (ECU) ในรถยนต์ทั่วไปสามารถคำนวณปริมาณเอทานอลได้เพียงร้อยละ 10 - 20 เท่านั้น นอกจากนี้ ชิ้นส่วนอื่นๆในระบบเชื้อเพลิง เช่น ถังน้ำมัน หัวฉีด ท่อน้ำมัน ท่อยางและแหวนยางต่างๆ ได้ออกแบบและใช้วัสดุที่สามารถทนทานและใช้งานได้นานกับน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 ด้วยเช่นกัน สำหรับรถยนต์ FFV ที่ใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 นั้น มีบริษัทรถยนต์ที่ผลิตจำหน่ายทางการค้า เช่น Ford, Volvo, SAAB, Volkswagen และ Honda เป็นต้น



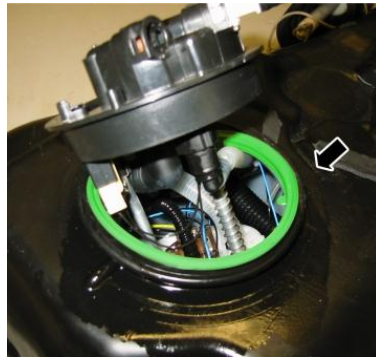
รูปที่ 2.2 การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ในรถยนต์ FFV [11]

หลักการทำงานของรถยนต์ FFV มีดังนี้ รถยนต์มีระบบเชื้อเพลิงสองระบบ คือ ถังเชื้อเพลิงสองถัง ถังแรกเป็นถังบรรจุเชื้อเพลิงเอทานอลบริสุทธิ์ ส่วนอีกถังหนึ่งบรรจุน้ำมันเบนซินล้วนๆ ถังเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดมีท่อส่งเชื้อเพลิงแยกจากกัน เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดนำมาผสมกันก่อนส่งเข้าหัวฉีด ซึ่งผสมกับอากาศเป็นไอดีก่อนจะเปิดเหมือนเครื่องยนต์เบนซินทั่วไป สัดส่วนของเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดที่ผสมกัน ถูกควบคุมโดยระบบคอมพิวเตอร์ โดยผู้ใช้งานสามารถกำหนดให้เป็นสัดส่วนได้ตามความต้องการ ตั้งแต่เอทานอลร้อยละ 0 ถึงเอทานอลร้อยละ 85 ซึ่งเป็นอัตราผสมสูงสุดของเอทานอลที่สามารถกำหนดได้ การที่รถยนต์ FFV สามารถปรับเปลี่ยนอัตราผสมได้ ทำให้เครื่องยนต์ของรถยนต์ประเภทนี้มีความคล่องตัว เนื่องจากผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงชนิดใดก็ได้ ขึ้นกับว่าราคาของเชื้อเพลิงชนิดไหน ช่วงไหน ถูกแพงกว่ากัน โดยภาพรวมรถยนต์ FFV มีข้อดีดังต่อไปนี้

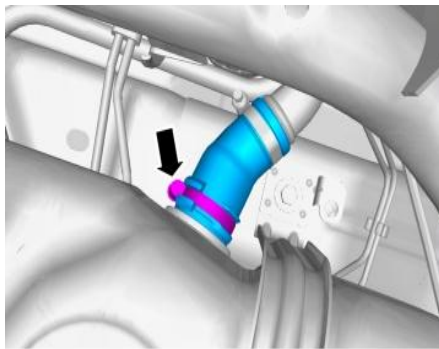
- สามารถลดการใช้ น้ำมันปิโตรเลียมได้ โดยการหันมาใช้เอทานอลหรือเมทานอลทดแทน ซึ่งเป็นพลังงานทางเลือกอีกรูปแบบหนึ่ง
- หากต้องการดัดแปลงเครื่องยนต์ธรรมดาให้เป็นเครื่องยนต์ FFV ต้องลงทุนเพิ่มแต่ไม่สูงมากจนเกินไป
- มลพิษที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำมาก
- มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานโดยรวมต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันเบนซินล้วนๆ
- มีความยืดหยุ่นในการใช้เชื้อเพลิงสูง สามารถใช้กับน้ำมันเบนซินได้ โดยติดตั้งอุปกรณ์ ที่มีราคาไม่แพงจนเกินไป
- เชื้อเพลิงน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 มีราคาต่ำกว่าน้ำมันเบนซินมาก

ความแตกต่างของรถยนต์ FFV กับรถยนต์เครื่องยนต์เบนซินทั่วไป คือ ชิ้นส่วนประเภถถังน้ำมัน ท่อยาง โอริง และปะเก็น ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.3 ทำจากวัสดุที่ทนการกัดกร่อนของแอลกอฮอล์ ได้ดีกว่าชิ้นส่วนสำหรับเครื่องยนต์เบนซินทั่วไป นอกจากนั้นชิ้นส่วนต้องทำจากวัสดุที่ปลอดภัยจากการเกิดไฟฟ้าสถิต เพราะเอทานอลมีสมบัติค่าความนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) สูงกว่าน้ำมันเบนซิน (Gasoline) มาก เพื่อป้องกันอันตรายจากการมีโอกาสดังกล่าวได้ ชิ้นส่วนโลหะสึกหรอ คือ ลูกสูบ แหวนลูกสูบ กระบอกสูบ วาล์ว บ่าวาล์ว และก้านวาล์วที่สัมผัสน้ำมันเชื้อเพลิงในกระบอกสูบ เมื่อใช้แก๊สโซฮอล์ E85 ซึ่งมีสมบัติทำละลาย (Soluble) สูงกว่าเบนซิน ไปชำระล้างน้ำมันหล่อลื่นซึ่งเคลือบเป็นฟิล์มบางๆ อยู่ผิวของชิ้นส่วน ทำให้มีการหล่อลื่นน้อยลง ดังนั้นต้องเป็นชิ้นส่วนที่มีคุณสมบัติสามารถหล่อลื่นด้วยตัวเองได้ดีกว่า ซึ่งออกแบบมาสำหรับใช้กับน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 ได้ ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงถูกออกแบบให้ฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงปริมาณแตกต่างจากระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงของรถยนต์เบนซินทั่วไป เพราะค่าพลังงานความร้อนของเบนซิน และเอทานอล มีความแตกต่างกัน ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงต้องมีระบบปรับเปลี่ยนองศาจุดระเบิด เพื่อให้

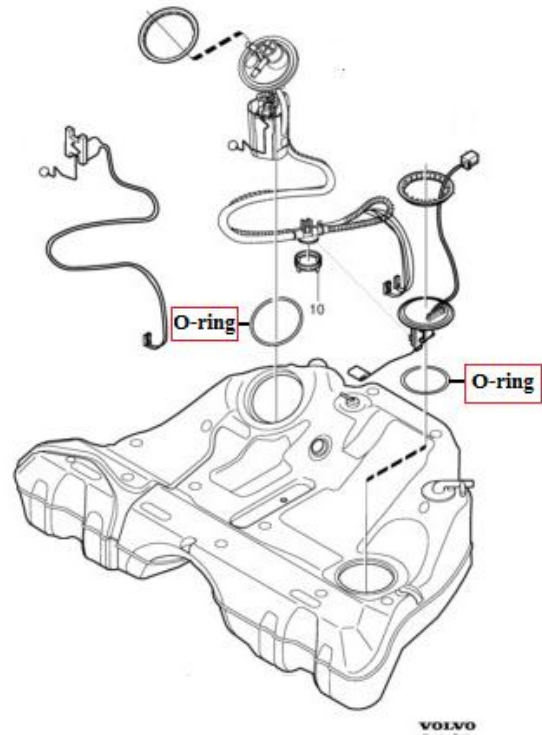
เหมาะสมกับสมบัติของเชื้อเพลิงที่อาจมีการใช้ทั้งแก๊สโซฮอล์ E85, E20 และ E10 หรือสัดส่วนอื่นๆ ซึ่งให้ค่าพลังงานไม่เท่ากัน จึงต้องปรับเปลี่ยนองศาจุดระเบิดให้เหมาะสม ในระบบต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดของเชื้อเพลิง แล้วส่งข้อมูลไปควบคุมการจุดระเบิด [12]



(ก)



(ข)



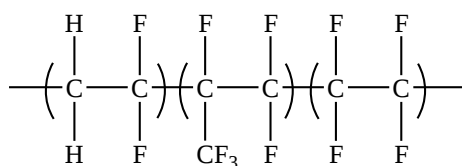
(ค)

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างวัสดุระบบเชื้อเพลิงที่สัมผัสน้ำมันแก๊สโซฮอล์ (ก) ปะเก็น (ข) ท่อยาง (ค) โอริง [13]

2.3 วัสดุยางทนน้ำมัน

โดยทั่วไป ยางที่ทนต่อน้ำมันได้ดีต้องเป็นยางที่มีขี้ผึ้ง ซึ่งทำให้ยางมีความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมันได้ดี ยางที่ไม่ทนน้ำมันส่วนใหญ่เป็นยางประเภทไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีหมู่มีขี้ผึ้งอยู่ในสายโซ่โมเลกุล นอกจากนี้ ผลึกภัณฑ์ยางแต่ละชนิดมีสถานะของการทำงานแตกต่างกันไป การเลือกชนิดของยางให้เหมาะสมกับสถานะการใช้งานของผลิตภัณฑ์นอกจากต้องพิจารณาสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของยางแล้ว ต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น ราคาของยางดิบ เป็นต้น

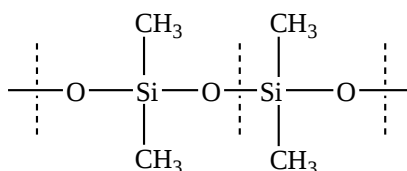
2.3.1 ยางฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon Rubber; FPM หรือ FKM)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของยางฟลูออโรคาร์บอน [2]

ยางฟลูออโรคาร์บอน หรือยางไวดันเป็นยางสังเคราะห์ที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุล ทำให้ยางมีความเป็นขี้และความเสถียรสูงมาก ทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากสภาพอากาศ ความร้อน ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เปลวไฟ และสารเคมีได้ดีเยี่ยม ถึงแม้ว่ายางชนิดนี้สามารถทนสารเคมีต่างๆ ได้ดีแต่ไม่ควรนำไปผลิตผลิตภัณฑ์ที่สัมผัสกับตัวทำละลายที่มีขี้ เช่น คีโตน อีเธอร์ และเอสเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สารประกอบเอมีน กรดไฮโดรฟลูออริกและกรดคลอโรซัลโฟนิก ที่ร้อน น้ำร้อน ไอน้ำ เมทานอล และน้ำมันเบรกที่มีไกลคอลเป็นองค์ประกอบ ยางฟลูออโรคาร์บอนมีหลายเกรดแตกต่างกันตามโครงสร้างทางเคมีและปริมาณของฟลูออรีนในยาง การใช้งานค่อนข้างจำกัดเนื่องจากมีราคาสูงมาก ส่วนมากนำไปผลิตปลอกหุ้มสายไฟหรือสายเคเบิล โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการความทนทานต่อความร้อน โอโซน สารเคมี และเปลวไฟสูงเป็นพิเศษ นอกจากนี้ สามารถนำไปผลิตผลิตภัณฑ์อื่นๆ โดยเฉพาะชิ้นส่วนยานยนต์ เครื่องบิน จรวด เช่น ท่อน้ำมันเชื้อเพลิง ยางโอริง ปะเก็น ยางซีล เป็นต้น [14]

2.3.2 ยางซิลิโคน (Silicone Rubber; Q)



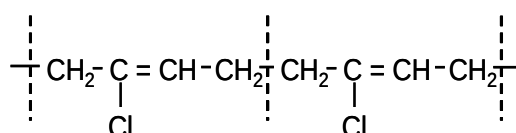
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของยางซิลิโคน [2]

ยางซิลิโคนเป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่งซึ่งในแกนสายโซ่หลักของโมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นพอลิซิลอกเซน (polysiloxane) มีหลายเกรด ที่ใช้กันมากที่สุดเป็นพอลิเมอร์ของ Dimethyl siloxane ยางซิลิโคนเป็นยางที่มีแรงดึงดูระหว่างโมเลกุลต่ำ ส่วนใหญ่จึงไม่อยู่ในรูปของแข็ง แต่อยู่ในรูปของเหลวที่มีความหนืดสูงมาก และค่า

ความเหนียวขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ยางซิลิโคนมีสมบัติความยืดหยุ่นที่สูง จึงต้องคงรูปโดยกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากความแข็งแรงของพันธะระหว่าง Si-O สูงกว่า C-C และไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล ยางซิลิโคนจึงทนต่อสภาพอากาศ โอโซน แสงแดด และความร้อนได้ดีกว่ายางที่เป็นพวกไฮโดรคาร์บอน ยางชนิดนี้จึงเป็นยางชนิดพิเศษที่สามารถใช้งานได้ ในที่อุณหภูมิสูง และต่ำได้ดี อย่างไรก็ตาม ยางซิลิโคนมีค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) และความทนต่อแรงกระแทก (Impact resistance) ต่ำมาก ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารเสริมแรงชนิดซิลิกาเข้าช่วย ยางซิลิโคนมีความเป็นฉนวนที่ดีมาก มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซและของเหลวสูง (ประมาณ 100 เท่าของยางบิวไทล์) แต่ยางชนิดนี้ไม่ทนต่อ กรดและด่าง สารเคมีจำพวกเอสเทอร์ คีโตน และอีเทอร์ การใช้งานของยางซิลิโคนถูกจำกัดอยู่ใน ผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถใช้ยางชนิดอื่นได้ เพราะยางชนิดนี้มีราคาสูงมาก ส่วนใหญ่ใช้ในการผลิตยางที่เป็นชิ้นส่วนของเครื่องบินและรถยนต์ ใช้ทำฉนวนหุ้มสายเคเบิล ใช้ในงานทางการแพทย์และ เกษตรกรรม รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร

2.3.3 ยางคลอโรพรีน (Chloroprene Rubber; CR)

ยางคลอโรพรีน เป็นยางสังเคราะห์ที่ได้จากมอนอเมอร์ของคลอโรพรีน มีทั้งประเภทที่ใช้งานทั่วไป และประเภทใช้งานพิเศษ เช่น ทำกาวยาง ยางใช้เคลือบ และวัสดุอุดรอยรั่ว เป็นต้น เนื่องจากโมเลกุลของยางคลอโรพรีน ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.6 สามารถจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ยางชนิดนี้จึงสามารถตกผลึกได้เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ มีค่าความทนต่อแรงดึงสูง มีความทนต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อการขัดถูสูง ยางคลอโรพรีนมีสมบัติทนต่อน้ำมันได้ปานกลางถึงดี และทนต่อความร้อน แสงแดด และโอโซนได้ค่อนข้างดี และมีสมบัติการหน่วงไฟ จึงนิยมนำไปใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานภายนอกอาคาร เช่น ยางขอบหน้าต่าง ยางรองคอสะพาน ยางปลอกสายเคเบิล เป็นต้น

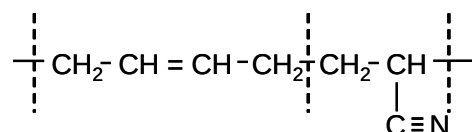


รูปที่ 2.6 โครงสร้างของยางคลอโรพรีน [2]

2.3.4 ยางอะคริโลไนไตรล์บิวทาไดอิน (Acrylonitrile Butadiene Rubber; NBR)

2.3.4.1 โครงสร้างของยางเอ็นบีอาร์

ยางอะคริโลไนไตรล์บิวทาไดอิน (Acrylonitrile Butadiene Rubber; NBR) หรือยางไนไตรล์เป็นยางสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยโคพอลิเมอร์ของอะคริโลไนไตรล์และบิวทาไดอิน มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ตั้งแต่ร้อยละ 18-51 ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของยางเอ็นบีอาร์ [2]

จากโครงสร้างโมเลกุลของยางเอ็นบีอาร์ ดังรูปที่ 2.7 พบว่าส่วนของอะคริโลไนไตรล์มีหมู่ฟังก์ชันไซยาไนด์ (-CN) ทำให้โมเลกุลของยางเอ็นบีอาร์มีความเป็นขั้วสูง ยางชนิดนี้จึงมีสมบัติเด่นด้านทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ ได้ดี นอกจากนี้ทนต่อความร้อนและต้านทานต่อการขูดขีดได้ดี จึงนิยมนำไปผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน เช่น ปะเก็นน้ำมัน ยางโอริง ยางซีล ยางข้อต่อ เป็นต้น ในขณะที่ส่วนของบิวทาไดอินที่มีอยู่ในโมเลกุลเป็นส่วนที่ให้ความยืดหยุ่น และเป็นตำแหน่งที่โมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงในปฏิกิริยาขวางรูป

สมบัติของยางเอ็นบีอาร์แปรผันตามสัดส่วนของอะคริโลไนไตรล์ที่มีอยู่ในโมเลกุล โดยทั่วไป เมื่อปริมาณของอะคริโลไนไตรล์เพิ่มขึ้นทำให้สมบัติของยางเอ็นบีอาร์เปลี่ยนไป ดังนี้

- ความทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนสูง
- การกระเด็นกระดอนต่ำลง
- การกลับคืนตัวถาวรหลังได้รับแรงอัดด้อยลง
- อัตราการซึมผ่านของก๊าซลดลง
- สมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำด้อยลง
- ความทนทานต่อความร้อนและโอโซนสูงขึ้น
- ความต้านทานต่อการขูดขีดสูงขึ้น
- ความแข็งแรงและความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น
- ความหนาแน่นสูงขึ้น

นอกจากสมบัติต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ปริมาณอะคริโลไนไตรล์ส่งผลโดยตรงต่อค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; T_g) ด้วย โดยทำให้ค่า T_g สูงขึ้นตามปริมาณอะคริโลไนไตรล์ที่เพิ่มขึ้น โดยทั่วไป ค่า T_g ของยางเอ็นบีอาร์อยู่ในช่วง -35 ถึง 0 องศาเซลเซียส [2]

2.3.4.2 สมบัติทั่วไปของยางเอ็นบีอาร์

ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางเอ็นบีอาร์มีความยืดหยุ่นน้อยกว่ายางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ เนื่องจากความยืดหยุ่นของยางลดลงตามปริมาณของอะคริโลไนไตรล์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ถ้าต้องการยางเอ็นบีอาร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง ควรเลือกใช้ยางเกรดที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ต่ำๆ นอกจากปริมาณของอะคริโลไนไตรล์แล้ว ความยืดหยุ่นของยางขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นยางเอ็นบีอาร์ที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์สูงมีความแข็งแรงลดลงอย่างรวดเร็ว

ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) เนื่องจากยางเอ็นบีอาร์ไม่สามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางชนิดนี้มีความทนทานต่อแรงดึงต่ำ จำเป็นต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย

ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ยางเอ็นบีอาร์สามารถเพิ่มสมบัติทางด้านความต้านทานต่อการขัดถูเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติมสารเสริมแรงเข้าช่วย ยางคงรูปที่ได้มีความต้านทานต่อการขัดถูสูงกว่ายางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ที่มีสูตรการผสมเคมีเหมือนกันประมาณร้อยละ 30 และร้อยละ 18 ตามลำดับ

ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging properties) ยางเอ็นบีอาร์มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ แต่ดีกว่ายางเอชเอ็นบีอาร์ โดยทั่วไปความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องมาจากความร้อน ขึ้นอยู่กับสูตรการผสมสารเคมียาง แม้ว่ายางเอ็นบีอาร์สามารถทนต่อความร้อนได้ดี แต่ยางชนิดนี้ไม่ทนต่อโอโซนและสภาพอากาศ เช่นเดียวกับยางไม่อิ่มตัวชนิดอื่นๆ จึงต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ เช่น P-Phenylene Diamine เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของยาง

ความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี (Oil and chemical resistance) ยางเอ็นบีอาร์เป็นยางที่มีขั้วค่อนข้างสูง จึงทนต่อน้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ น้ำมันเชื้อเพลิง น้ำ และตัวทำละลายไม่มีขั้วอื่นๆ แต่ไม่ทนต่อการกัดแ่และของเหลวที่มีขั้ว เช่น คีโตน (Ketone) เอสเทอร์ (Ether) ตัวทำละลายที่มีคลอรีน (Chlorinated solvent) เป็นองค์ประกอบ และตัวทำละลายที่มีวงแหวนไฮโดรคาร์บอน (Highly aromatic solvent) เช่น เบนซีน (Benzene) โทลูอิน (Toluene) และ ซิลีน (Silene) เป็นต้น นอกจากนี้

ระดับความทนต่อน้ำมันและสารเคมีของยางเอ็นบีอาร์ ขึ้นอยู่กับปริมาณของอะคริโลไนไตรล์ที่มีอยู่ในโมเลกุลแล้ว ขึ้นอยู่กับสูตรการผสมเคมียางด้วย โดยเฉพาะปริมาณสารตัวเติมที่มีอยู่ในโมเลกุลและปริมาณของสารทำให้ยางนิ่ม รวมไปถึงความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะข้ามอีกด้วย

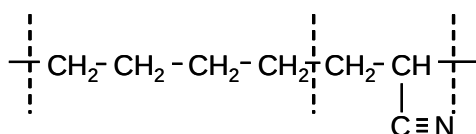
อุณหภูมิการใช้งาน (Service temperature) ยางเอ็นบีอาร์มีช่วงอุณหภูมิการใช้งานตั้งแต่ประมาณ -40 องศาเซลเซียส (ขึ้นอยู่กับปริมาณอะคริโลไนไตรล์) ถึง 100 องศาเซลเซียส สำหรับยางที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่อง และถึง 120 องศาเซลเซียส สำหรับยางที่ไม่ได้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไป เมื่อปริมาณของอะคริโลไนไตรล์สูงขึ้นทำให้สมบัติต่างๆ ของยางเอ็นบีอาร์เปลี่ยนไป

2.3.5 ยางไฮโดรเจนเนตอะคริโลไนไตรล์บิวทาไดอินหรือยางเอชเอ็นบีอาร์

(Hydrogenated Acrylonitrile Butadiene Rubber; HNBR)

2.3.5.1 โครงสร้างของยางเอชเอ็นบีอาร์

ยางไฮโดรเจนเนตอะคริโลไนไตรล์บิวทาไดอิน หรือยางเอชเอ็นบีอาร์ เป็นยางสังเคราะห์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) ของยางเอ็นบีอาร์ โดยทำให้ยางชนิดนี้มีสายโซ่หลักเป็นพอลิเมทิลีน (Polymethylene) ที่มีปริมาณพันธะคู่อยู่เพียงเล็กน้อย ยางชนิดนี้จึงมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (รวมถึงน้ำร้อนและไอน้ำ) สภาพอากาศ รังสีที่มีพลังงานสูง และโอโซนสูงมาก เนื่องจากมีหมู่ไซยาไนด์ (CN) อยู่ในโมเลกุลทำให้ยางชนิดนี้ทนต่อน้ำมันได้ดี



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของยางเอชเอ็นบีอาร์ [2]

2.3.5.2 การคงรูปและสมบัติของยางเอชเอ็นบีอาร์

โดยทั่วไปยางเอชเอ็นบีอาร์มีการแบ่งเกรด ดังนี้ ยางเกรดที่มีปริมาณพันธะคู่อยู่น้อยมาก (น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 เปอร์เซนต์ ของพันธะคู่ที่เคยมีอยู่เดิมในยางเอ็นบีอาร์) ซึ่งสามารถทำให้ยางคงรูปได้ด้วยเปอร์ออกไซด์เท่านั้น และยางเกรดที่มีปริมาณพันธะคู่อยู่ค่อนข้างมาก (ประมาณร้อยละ 5-10 ของ

พันธะคู่ที่เคยมีอยู่เดิมในยางเอ็นบีอาร์) ซึ่งสามารถทำให้ยางคงรูปได้ด้วยเปอร์ออกไซด์หรือกำมะถัน แต่การคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ทำให้ยางคงรูปที่ได้มีค่าการยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัด (Compression set) และมีความทนทานต่อความร้อนที่ดีกว่าการคงรูปด้วยกำมะถัน สำหรับยางเอชเอ็นบีอาร์เกรดที่มีพันธะคู่อยู่น้อยมากหรือไม่มีพันธะคู่ เมื่อได้รับการคงรูปแล้วมีสมบัติเด่นหลายประการ คือ มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน น้ำมันร้อน ออกซิเจน โอโซน สารเคมีต่างๆ รวมถึงน้ำมันที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบหรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดี นอกจากนี้ มีความทนทานต่อแรงดึงสูง มีสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำที่ดี และมีความต้านทานต่อการขัดถูสูงอีกด้วย สำหรับยางเอชเอ็นบีอาร์เกรดที่มีพันธะคู่มาก พันธะคู่ทำให้สมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากสภาพอากาศ (ออกซิเจน โอโซน และแสงแดด) ลดลงอย่างรวดเร็ว สมบัติความทนทานต่อน้ำมันของยางเอชเอ็นบีอาร์ ขึ้นอยู่กับปริมาณอะคริโลไนไตรล์เช่นเดียวกับยางเอ็นบีอาร์ แต่ที่ปริมาณอะคริโลไนไตรล์เท่ากัน ยางเอชเอ็นบีอาร์มีความทนทานต่อน้ำมันดีกว่ายางเอ็นบีอาร์เล็กน้อย ยางเอชเอ็นบีอาร์มีสมบัติอยู่ระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางฟลูออโรคาร์บอน เนื่องจากยางชนิดนี้มีราคาสูงกว่าเอ็นบีอาร์มาก จึงนิยมใช้ยางเอชเอ็นบีอาร์แทนยางเอ็นบีอาร์ในกรณีที่ต้องการใช้งานในสภาวะที่รุนแรงหรือที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น นอกจากนี้ ยางชนิดนี้มีข้อดีเหนือกว่ายางฟลูออโรคาร์บอน คือ มีความทนทานต่อสารตัวเดิมที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น สารประกอบเอมีนได้ดี จึงนิยมใช้ในการผลิตชิ้นส่วนยางที่ใช้ในแท่นขุดเจาะน้ำมัน [2]

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบสมบัติระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ [4]

สมบัติ	ยาง NBR	ยาง HNBR
การทนน้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์	ดีเยี่ยม	ดีเยี่ยม
ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน	ดี	ดีเยี่ยม
การทนต่อโอโซน	พอใช้	ดีเยี่ยม
ความต้านทานต่อการขัดสี	ดี	ดีเยี่ยม
การคืนตัวเมื่อได้รับแรงอัด	ดี	ดีเยี่ยม
อุณหภูมิการใช้งาน (°C)	-30°C ถึง +105°C	-30°C ถึง +150°C
ราคา* (บาท/kg)	ประมาณ 190 - 200	ประมาณ 900 - 1000

* ราคาขางเมื่อวันที่ 30 พฤษภาคม 2555 บริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด

2.4 ยางโอริง

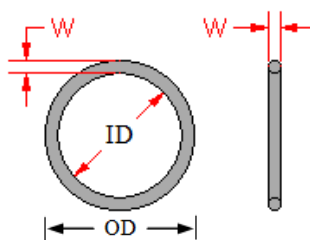
ยางโอริงเป็นยางที่มีลักษณะวงแหวน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 นำไปใช้งานในอุปกรณ์และเครื่องใช้ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ สุขภัณฑ์ และเครื่องยนต์ เป็นต้น โดยส่วนมากโอริงที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไปเป็นยางไนไตรล์ โอริงต้องสามารถทนความร้อนในอุณหภูมิระหว่างการทำงานตั้งแต่ -40 องศาเซลเซียส ถึง 110 องศาเซลเซียส โดยมีความแข็งตามมาตรฐาน ที่ 70 Shore A ถ้าต้องการโอริงที่ทนความร้อนได้ถึง 230 องศาเซลเซียส ต้องเป็นยางชนิดไวตันที่นิยมใช้กันมาก ชนิดของยางมีให้เลือกมากกว่า 10 ชนิด เพื่อให้เหมาะสมตามลักษณะการใช้งาน และสามารถใช้ได้ตามความต้องการ [15]



รูปที่ 2.9 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ยางโอริง [16]

2.4.1 ขนาดของโอริง

ขนาดของโอริงพิจารณาจากเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (Outside diameter; OD) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (Inside diameter; ID) และความหนา (O-ring cross section; W) หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลบเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโอริง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยมีขนาดวงใน (ID) ตั้งแต่ 0.74 มิลลิเมตร จนถึง 1,560 มิลลิเมตร และมีขนาดความหนา (W) ให้เลือกตั้งแต่ 0.8 มิลลิเมตร ถึง 12 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.10 การระบุขนาดของโอริง [17]

2.4.2 หน้าทีและกลไกการทำงานของโอริง

โอริงทำหน้าที่เป็นซีลกันรั่วไหลของของเหลวหรืออากาศในอุปกรณ์หรือเครื่องจักร ในระบบลม (Pneumatic) และระบบน้ำมัน (Hydraulic) ทำหน้าที่ปิดกั้นการรั่วซึมตามข้อต่อจุดต่างๆ ของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งสามารถติดตั้งทั้งแบบเคลื่อนที่ได้และแบบอยู่กับที่ ป้องกันการรั่วไหลของของเหลว หรือแก๊ส ตามจุดข้อต่อต่างๆ ของเครื่องจักร ทำหน้าที่รับแรงดันตามข้อต่อ โอริงถูกแรงดันกระทำดันให้โอริงถูกดันไปติดแน่นกับผนังร่องในโอริง เพราะโอริงมีความยืดหยุ่น จึงสามารถเปลี่ยนรูปตามผนังร่องปิดจุดที่ไม่สนิทเมื่อโอริงถูกแรงดันกระทำ ซึ่งการหมุนของยางโอริง จะดึงน้ำมันไฮดรอลิกให้ติดอยู่บนผิวยาง เกิดเป็นชั้นฟิล์มบางมาก ช่วยหล่อลื่นระหว่างผนังร่องกับขอบกับเนื้อยาง และคอยปกป้องยางโอริงจากการสึกกร่อน ช่วยให้ยางมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ซึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการหล่อลื่น คือ ความกว้างของร่องชิ้นงาน หากร่องมีขนาดแคบเกินไปยางโอริง หมุนไม่ได้ ทำให้ไม่เกิดการหล่อลื่น ตรงกันข้ามร่องที่มีขนาดกว้างมาก ส่งผลให้ยางโอริงมีพื้นที่ในการหมุนมากเกินไป ทำให้ยางโอริงสึกหรองง่ายขึ้น [18]

2.4.3 วัสดุที่ใช้ผลิตโอริง

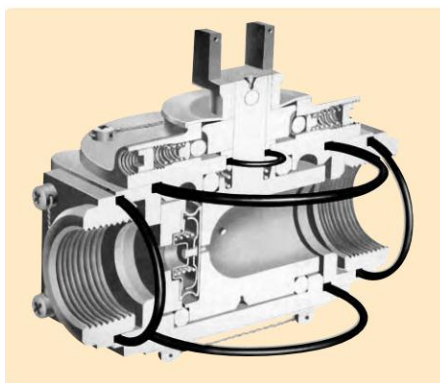
การเลือกยางโอริงต้องพิจารณาหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ความทนสารเคมีของวัสดุ แรงดันในการใช้งาน และราคา เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งยางโอริงตามประเภทวัสดุได้ 2 ประเภท คือ

1. **ประเภทเทอร์โมเซต (Thermoset)** เช่น ยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber, BR) ยางบิวทิล (Butyl rubber) คลอโรซัลโฟเนต โพลีเอทิลีน (Chlorosulfonate polyethylene) ยางอีพิกไฮโดรไฮดริน (Epichlorohydrin rubber, ECH) ยางเอทิลีนโพรพิลีน (Ethylene propylene rubber, EPR) ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ (Fluoroelastomer, FKM) ยางไนไตรล์ (Nitrile rubber) เป็นต้น
2. **ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)** เช่น เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer) สไตรีนิกส์ (Styrenics) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) โพลียูรีเทน (Polyurethane) โพลีเอเทอร์ (Polyether) โพลีเอสเตอร์ (Polyester) เป็นต้น

2.4.4 การแบ่งชนิดของยางโอริงตามลักษณะการใช้งาน

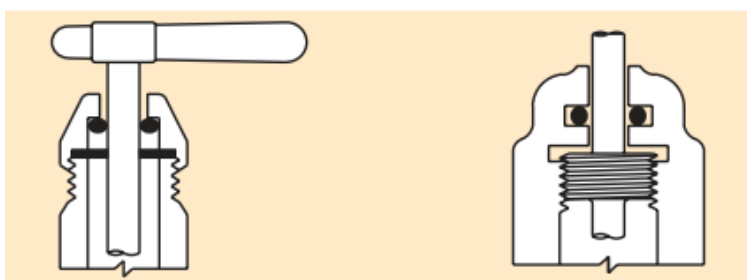
โดยทั่วไปสามารถแบ่งชนิดของยางโอริงตามลักษณะการใช้งานออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

1. **ซีลแบบอยู่กับที่ (Static seal)** คือซีลที่ใช้กันรั่วของไหลระหว่างผิวหน้าที่ไม่เคลื่อนที่ของชิ้นงานที่สัมผัสกันอยู่ โดยโอริงอยู่ระหว่างอุปกรณ์สองชิ้นที่อยู่กับที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 การใช้งานลักษณะนี้สามารถใช้งานความดันสูงสามารถกันรั่วได้ 100 บาร์เซ็นต์



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการใช้งานโอริงแบบอยู่กับที่ [17]

2. **ซีลแบบเคลื่อนที่ได้ (Dynamic seal)** คือซีลที่ใช้กันรั่วของไหลระหว่างผิวหน้าของชิ้นงานที่เคลื่อนที่สัมผัสกับชิ้นงานอีกอันหนึ่งที่สัมผัสกันอยู่หรือเกือบจะสัมผัสกัน ซีลมีการเคลื่อนที่ระหว่างเพลาลูกหมุน (Shaft) กับตัวกระบอก ดังรูปที่ 2.12 การใช้งานลักษณะนี้สามารถกันรั่วได้จนถึงความดันของของเหลว 5,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว การที่ซีลติดอยู่ระหว่างชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ไปมาได้ ทำให้ซีลชนิดนี้มีอายุการใช้งานสั้นกว่าซีลแบบอยู่กับที่ (Static Seal)



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการใช้งานโอริงแบบเคลื่อนที่ได้ [17]

2.4.5 การเลือกใช้อย่างโอริง

การเลือกใช้งานโอริงต้องคำนึงถึงความเหมาะสม เช่น การเกี่ยวข้องกับความดันถ้าใช้โอริงแข็งเกินไป ความดันไม่สามารถทำให้โอริงขยายตัวได้ทำให้รั่ว แต่ถ้าแข็งน้อยเกินไปก็ทำให้รั่วได้เช่นกัน เพราะทำให้ถูกอัดเสียรูปไม่สามารถคืนตัวได้ จึงต้องเลือกความแข็งที่เหมาะสมกับการใช้งาน อุณหภูมิการใช้งานก็เช่นกัน เพราะเครื่องจักรแต่ละตัวทำงานในสถานะและอุณหภูมิแตกต่างกันไป เพราะโอริงแบ่งแยกตามสมบัติที่นำไปใช้ โดยตัวอย่างการเลือกใช้อย่างในการผลิตโอริง ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการเลือกใช้อย่างในการผลิตโอริง [17]

ยาง	เกรดการค้า	ความแข็ง (Shore A)	อุณหภูมิใช้งาน (°C)	การประยุกต์ใช้งาน
ยางไนไตรล์ (Buna N)	N7	70	-40 ถึง 110	ทนต่อน้ำ แอลกอฮอล์ น้ำมันไฮดรอลิก ได้ดี สำหรับเกรด N9 เหมาะกับการใช้งานที่ความดันสูง
	N9	90		
ยางฟลูออโรคาร์บอน (Viton)	V7	75	-35 ถึง 205	ทนต่อสารเคมีดีกว่าอีลาสโตเมอร์ชนิดอื่น สำหรับเกรด V9 เหมาะกับการใช้งานที่ความดันสูง
	V9	90		
ยางคลอโรพรีน (นีโอพรีน)	C7	70	-55 ถึง 140	ทนต่อน้ำมันไฮดรอลิกและสภาพอากาศ (โอโซน แสง ออกซิเจน) ปานกลาง ทนต่อสารทำความสะอาด และกรดอ่อนได้ดี
ยางเอทิลีนโพรพิลีน	E7	70	-55 ถึง 150	ทนต่อน้ำ ไขมัน กรด เบส ฟอสเฟต เอสเทอร์ และกลีโกลได้ดี แต่ทนต่อน้ำมันไฮดรอลิกได้ต่ำ
ยางซิลิโคน	S7	70	-85 ถึง 230	การใช้งานจำกัดเฉพาะด้านอยู่กับที่ (Static) เหมาะสำหรับของไหล (Fluid)

2.5 การเลือกชนิดยางให้เหมาะสมกับการใช้งาน

ปัจจัยสำคัญอีกอย่างที่มีผลอย่างมากต่อการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ยาง คือ ของเหลวหรือสารเคมี ต่างๆ ดังนี้ น้ำมัน กรด ด่าง และตัวทำละลาย เป็นต้น สารเคมีเหล่านี้มีผลต่อการเสื่อมสภาพของยาง ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและองค์ประกอบต่างๆ ที่เติมลงไป ดังนั้น การเลือกใช้ชนิดของยางให้เหมาะสมกับการใช้งานจึงเป็นเรื่องที่สำคัญอย่างยิ่ง

2.5.1 ความต้านทานต่อของเหลว (Liquid resistance)

เมื่อยางสัมผัสกับของเหลว ยางดูดซึม (Absorb) ของเหลว ทำให้ปริมาตรและสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ของยางเปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดของของเหลว อุณหภูมิ และเวลา ของเหลว แต่ละชนิดถูกดูดซึมเข้าไปในยาง ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์การละลาย (Solubility parameter) ถ้ายาง และของเหลวชนิดนั้นๆ มีค่าพารามิเตอร์การละลายใกล้เคียงกันแสดงว่ายางและของเหลวเข้ากันได้ดี (Compatible) ยางดูดซึมของเหลวได้มาก อย่างไรก็ตาม ความเข้ากันได้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น พันธะไฮโดรเจนระหว่างยางกับของเหลว เป็นต้น ยางดิบหรือยางคอมปาวด์ละลายในของเหลวหรือ ตัวทำละลายที่เข้ากับยางได้ดี แต่ยางคงรูปไม่ละลาย เกิดเพียงแค่การบวมตัว (Swelling) เท่านั้น ตัวแปรหลักที่ควบคุมปริมาณของการบวมตัว ได้แก่ ระดับความหนาแน่นของการเชื่อมขวางพันธะ ข้าม (Crosslink density) โดยยางที่มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางสูงมีระดับของการบวมตัวต่ำ โดยทั่วไป การเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมส่งผลทำให้ยางคงรูปมีระดับของการบวมตัวลดลง เพราะ สารตัวเติมไม่เกิดการบวมตัวในของเหลว (เฉพาะส่วนที่เป็นเนื้อยางเท่านั้นที่เกิดการบวมตัว) ดังนั้น การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมในเนื้อยางจึงเปรียบเสมือนการลดสัดส่วนของเนื้อยางที่มีอยู่ในยางคงรูป นอกจากนี้ อัตราเร็วในการแพร่ของของเหลวเข้าไปในยางขึ้นอยู่กับทั้งชนิดของยางและชนิดของ ของเหลว รวมถึงความหนืดของของเหลวด้วย เพราะถ้าของเหลวมีความหนืดสูง อัตราเร็วในการแพร่ เข้าไปในยางมีค่าต่ำ [19]

2.5.2 พารามิเตอร์การละลาย (Solubility parameter; δ)

พารามิเตอร์การละลาย (Solubility parameter; δ) คือ ค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลายเข้าด้วยกันของสาร 2 ประเภท โดยสารตัวหนึ่งหรือสารทั้งสองนั้นเป็นพอลิเมอร์ และเป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงของแรงระหว่างโมเลกุล ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานในการดึงดูดระหว่างโมเลกุล ค่าพารามิเตอร์การละลายสามารถนำไปใช้ในการพิจารณาการละลายของพอลิเมอร์ และสามารถใช้อธิบายความมีขีดของตัวทำละลาย เป็นต้น

การประมาณค่าพารามิเตอร์การละลาย เป็นวิธีการหนึ่งในการพิจารณาความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย ซึ่งความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การละลาย ดังในสมการที่ 2.1 สามารถใช้ในการประมาณการละลายของพอลิเมอร์ในตัวทำละลายได้ โดยถ้ารากที่สองของผลต่างพารามิเตอร์การละลายของพอลิเมอร์กับตัวทำละลายมีค่าน้อยกว่า 1 เมื่อนั้นพอลิเมอร์สามารถละลายในตัวทำละลาย [20]

$$\text{ถ้า} \quad (\delta_{\text{solvent}} - \delta_{\text{polymer}})^{1/2} < 1 \quad ; \text{พอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลาย} \quad (2.1)$$

การใช้การกระจายตัวแบบกลุ่ม (Group contribution) วิเคราะห์พารามิเตอร์การละลายของวัสดุ สามารถประมาณค่าได้โดยใช้สมการที่ 2.2 ดังนี้

$$\delta = \frac{\rho \Sigma G}{M} \quad (2.2)$$

เมื่อ δ = พารามิเตอร์การละลาย (Solubility parameter), $(\text{cal}/\text{cm}^3)^{1/2}$

ρ = ความหนาแน่นของวัสดุ (Density of the material), g/cm^3

G = ค่าคงที่การดึงดูดเชิงโมลแบบกลุ่ม (Group molar attraction constants), $(\text{cal} \cdot \text{cm}^3)^{1/2}/\text{mol}$

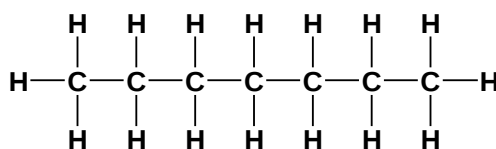
M = น้ำหนักโมเลกุลของวัสดุ (Molecular weight of the material), g/mol

โดยสามารถหาค่าคงที่การดึงดูดเชิงโมลแบบกลุ่ม (Group molar attraction constants; G) ได้จากตารางที่ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่การดึงดูดเชิงโมลแบบกลุ่ม (Group molar attraction constants) [20]

Group		G	Group		G	Group		G
CH ₃	Single-bonded	214	Ring	5-membered	105 - 115	Br	Single	340
CH ₂		133	Ring	6-membered	95-105	I	Single	425
CH<		28	Conjugation		20-30	CF ₂	n-fluorocarbons	150
>C<		-93	H	Variable	80-100	CF ₃		274
CH ₂ =	Double-bonded	190	O	Ethers	70	S	Sulfides	225
-CH=		111	CO	Ketones	275	SH	Thiols	315
>CH=		19	COO	Esters	310	ONO	Nitrates	~440
-CH=C<		285	CN		410	NO ₂	Nitro-compounds	~440
>C=C<		222	Cl	Mean	260	PO ₄	Organic-phosphates	~500
Phenyl		735	Cl	Single	270	Si	Silicones	-38
Phenylene	o,m,p	658	Cl	Twin (>CCl ₂)	260			
Naphthanyl		1146	Cl	Triple (-CCl ₃)	250			

ตัวอย่างการคำนวณพารามิเตอร์การละลายของน้ำมันเบนซินหรือแก๊สโซลีนโดยใช้สมการที่ 2.2



รูปที่ 2.13 สูตรโครงสร้างของแก๊สโซลีน [8]

จาก
$$\delta = \frac{\rho \Sigma G}{M}$$

เมื่อ ความหนาแน่น (ρ) ของแก๊สโซลีน = 0.737 g/cm³

น้ำหนักโมเลกุล (M) ของแก๊สโซลีน = (7 x 12.01) + (16 x 1.01) = 100.23 g/mol

ค่าคงที่การดึงดูดเชิงโมลแบบกลุ่ม (G) ได้จากตารางที่ 2.4 ดังนี้

Group	G	Number of Group	ΣG
CH ₃	214	2	428
CH ₂	133	5	665
			$\Sigma G = 1093$

ดังนั้น ค่าคงที่การดึงดูดเชิงโมลแบบกลุ่ม (G) = 1,093 (cal*cm³)^{1/2}/mol

แทนค่าต่างๆ ในสมการพารามิเตอร์การละลาย ได้ดังนี้

$$\delta = \frac{(0.737 \text{ g/cm}^3)(1,093 \text{ (cal}^{1/2}\text{cm}^{3/2}\text{/mol)})}{100.23 \text{ g/mol}} = 8.04 \text{ (cal/cm}^3\text{)}^{1/2}$$

เพราะฉะนั้น พารามิเตอร์การละลาย (δ) ของแก๊สโซลีน มีค่าเท่ากับ 8.04 (cal/cm³)^{1/2}

การเปลี่ยนหน่วยพารามิเตอร์การละลายจาก (cal/cm³)^{1/2} ในหน่วยของระบบ SI (MPa^{1/2}) สามารถเปลี่ยนได้ ดังนี้

$$\delta \text{ (MPa}^{1/2}\text{)} = 2.0455 \times \delta \text{ (cal/cm}^3\text{)}^{1/2}$$

ดังนั้น พารามิเตอร์การละลาย (δ) ของแก๊สโซลีนในระบบ SI มีค่าเท่ากับ 16.45 MPa^{1/2}

2.6 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend)

พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) เป็นการนำพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดหรือมากกว่าผสมกันเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่หรือเพื่อปรับปรุงสมบัติที่ด้อยของพอลิเมอร์เดิมซึ่งไม่สามารถใช้สารเติมแต่ง (Additives) ในการปรับปรุงได้ โดยในปัจจุบันมีผู้ให้ความสนใจพอลิเมอร์ผสมมากขึ้นและมีการผลิตทางการค้ากันอย่างกว้างขวาง สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการทำพอลิเมอร์ผสมคือวิธีการผสม เครื่องมือและเทคนิคในการผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิด หรือมากกว่าให้ผสมเข้ากันได้ดี เป็นปัจจัยในการควบคุมสมบัติของพอลิเมอร์ผสม และการเลือกพอลิเมอร์ที่นำมาผสมต้องคำนึงถึงข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ในการปรับปรุงสมบัติให้ได้ตามที่ต้องการ [21]

2.6.1 ประเภทของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสมแบ่งตามพื้นฐานวิทยาได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียว (Miscible blends)

พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้มีโมเลกุลของพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B อยู่รวมกัน มองเห็นเป็นวัฏภาคเดียว โดยมีโมเลกุลของพอลิเมอร์ A มีหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ B ทำให้เกิดแรงดึงดูดกัน สมบัติของพอลิเมอร์ผสมประเภทนี้มีลักษณะคล้ายกับพอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม ซึ่งพอลิเมอร์ผสมประเภทนี้มีน้อย เช่น ยางธรรมชาติกับพอลิบิวทาไดอิน พอลิสไตรีนกับพอลิฟีนิลีนออกไซด์

2. พอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blends)

พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้แยกออกจากกันเป็น 2 วัฏภาคอย่างเห็นได้ชัดเจนในระดับจุลภาค โดยที่พอลิเมอร์ที่มีปริมาณน้อยเป็นวัฏภาคกระจาย พอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่จัดอยู่ในประเภทนี้

3. พอลิเมอร์ผสมที่สามารถเข้ากันได้บางส่วน (Partially miscible blends)

พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้อาจรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ ถ้ามีปริมาณของพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งน้อยกว่ามากๆ เนื่องจากถ้าอัตราส่วนของพอลิเมอร์เท่ากันเกิดการแยกออกเป็นสองวัฏภาค ซึ่งในพอลิเมอร์ผสมประเภทนี้พอลิเมอร์ A อาจเข้าไปแทรกอยู่ในระหว่างผิวหน้าของพอลิเมอร์ B ซึ่งช่วยให้วัฏภาคมีแรงยึดติดที่มากขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติที่ดี เช่น พอลิเอทิลีนกับพอลิไอโซบิวทิลีน

2.6.2 วัตถุประสงค์ของการทำพอลิเมอร์ผสม

ในการเลือกพอลิเมอร์ที่นำมาผสมต้องคำนึงถึงข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์แต่ละชนิด เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงสมบัติให้ได้ตามที่ต้องการ เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งต้องชดเชยข้อเสียของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง วัตถุประสงค์ของการทำพอลิเมอร์ผสม คือ

- เพื่อทำให้สมบัติดีขึ้นแต่มีราคาถูกลง
- เพื่อพัฒนาสมบัติให้ได้ตามที่ต้องการ เช่น เพิ่มความแข็งแรง
- เพื่อปรับปรุงส่วนประกอบของการผสมตามที่ลูกค้าต้องการ
- เพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการอุตสาหกรรม เช่น การนำเศษพลาสติกกลับมาขึ้นรูปใหม่

2.6.3 ความสามารถในการละลายเข้ากันได้และความสามารถในการผสมเข้ากันได้

ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ระดับโมเลกุล (Miscibility) ด้านทางเทอร์โมไดนามิกส์ คือ เมื่อเกิดขึ้นทำให้เกิดระบบวัฏภาคเดียวเนื้อเดียว (Homogeneous single-phase system) มีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด และโดยทั่วไปเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของพอลิเมอร์ ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ระดับโมเลกุล (Molecular miscibility) ดังนี้

- น้ำหนักโมเลกุลต่ำ
- ความเป็นผลึกซึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์
- ความมีขั้วคล้ายกัน
- พันธะไฮโดรเจนร่วมกัน

ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Compatibility) เป็นสมบัติในทางปฏิบัติของพอลิเมอร์ผสมบางชนิดที่เข้ากันได้ในระดับโมเลกุลและมีประโยชน์ต่อการการค้า อย่างไรก็ตาม ระบบพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ในทางการค้าเป็นระบบที่เข้ากันไม่ได้ (Immiscible) ในระดับโมเลกุล และแยกออกเป็นระบบหลายวัฏภาค (Multi-phase system) ทำให้เกิดการปรับปรุงระบบผสม เพื่อให้แต่ละวัฏภาคมีการยึดเกาะกันดีขึ้น เป็นการรวมสมบัติที่ดีของแต่ละวัฏภาคและเกิดเป็นความสมดุลของสมบัติโดยรวมที่ไม่สามารถได้จากสมบัติของพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียว

2.7 สารตัวเติมสำหรับยาง (Additive for Rubber)

สารเติมแต่งที่ผสมเข้าไปในยาง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการในระหว่างการผลิต การคงรูป และการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งาน ยางที่ผสมสารเคมี ยังไม่สามารถนำไปใช้ได้จนกว่าสารเคมี เข้าทำปฏิกิริยากับยาง ซึ่งอาจเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้นด้วยการให้ความร้อน ยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมี เรียกว่า ยางไม่คงรูป (Green compound) หรือ Uncured compound) ส่วนยางที่สารเคมีเข้า ทำปฏิกิริยากับยางแล้ว เรียกว่า ยางคงรูป (Vulcanization rubber) การแสดงปริมาณสารเติมแต่งทุก ชนิดที่เติมเข้าไปในยางเทียบกับยาง 100 ส่วน โดยมีหน่วยเป็น phr (Part per hundred of rubber) [22]

2.7.1 สารทำให้ยางคงรูป หรือ สารวัลคาไนซ์ (Curing or vulcanizing agents)

สารทำให้ยางคงรูปเป็นองค์ประกอบสำคัญในสารประกอบยาง เพื่อให้ยางเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ เรียกว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน หรือปฏิกิริยาการคงรูป ส่งผลทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยง กันเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจากอ่อน เหนียวหนืด (Tacky) และไหลได้แบบ เทอร์โมพลาสติกเปลี่ยนไปเป็นยางที่มีความยืดหยุ่นสูง ทนทาน และมีสมบัติเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงไป ตามอุณหภูมิ ระบบการคงรูปที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ดังนี้

2.7.1.1 ระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน

ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันเป็นระบบที่นิยมใช้กันมาก เพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ การคงรูป สามารถเกิดขึ้นได้เร็วเมื่อใช้ร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เหมาะสม และยางคงรูปที่ได้มี สมบัติเชิงกลที่ดี ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันจึงนิยมใช้ในการคงรูปยางทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ใน โมเลกุล โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ เช่น ยางเอสปีอาร์ ยางบิวทาไดอีน และยาง ไนไตรล์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันมีข้อจำกัดหลัก คือ ไม่สามารถใช้ในการ คงรูปยางที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล เช่น ยางซิลิโคนหรือยางอีพีเอ็ม เนื่องจากพันธะคู่เป็นตำแหน่งที่ กำมะถันเข้าไปทำปฏิกิริยาและทำให้เกิดการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้น ดังนั้น อัตราการคงรูปด้วยกำมะถัน ขึ้นกับปริมาณพันธะคู่ที่มีอยู่ในสายโซ่โมเลกุลของยาง

2.7.1.2 ระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์

สารเปอร์ออกไซด์สามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงในโมเลกุลยางได้ และมีความสำคัญมากสำหรับยางที่ไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล เช่น ยางซิลิโคน ยางอีพ็อกซี ยางยูรีเทน และยางอีวีเอ หรือยางที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลต่ำมาก เช่น ยางเอชเอ็นบีอาร์ และยางอีพีดีเอ็ม ในขณะที่ยางอื่นสารเปอร์ออกไซด์สามารถใช้กับยางพวกไดอีน (Diene) เช่น ยางธรรมชาติ ยางเอสบีอาร์ และยางไนไตรล์ ทำให้ยางดังกล่าวสามารถทนต่อความร้อนได้ดี และมีการเสถียรภาพหลังการกดอัดที่ต่ำ

วิธีการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีจุดเด่น ดังนี้

1. สามารถใช้ได้ทั้งยางที่อิ่มตัว (Saturated rubber) และยางที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated rubber) นิยมใช้โดยเฉพาะกับยางอิ่มตัวที่ไม่มีฟังก์ชันที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเชื่อมโยง
2. ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีเสถียรภาพมากกว่า มีสมบัติการทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat-aging properties) ดีกว่า
3. ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ มีการเปลี่ยนรูปร่างถาวรหรือเซต (Permanent Set) น้อยกว่า
4. ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ มีสมบัติความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำดีกว่า
5. สามารถใช้เชื่อมโยงผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีธรรมชาติ ยางใส หรือยางขาว ไม่เป็นสีเหลืองเนื่องจากกำมะถัน และสีที่ได้มีความเสถียร มีการเปลี่ยนสีผลิตภัณฑ์เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลตน้อยกว่า

เนื่องจากพันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ เป็นพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอน (C-C bonds) ซึ่งมีพลังงานพันธะสูง มีความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่าพันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันทั้งแบบโมโนซัลไฟดิกและพอลิซัลไฟดิก (C-S bonds และ S-S bonds ตามลำดับ) ทำให้ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีความเสถียรมากกว่า การเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีข้อจำกัดบางประการคือ

1. การเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์มีกลิ่นเหม็นที่ปลดปล่อยออกมา เช่น อะซิโดฟีโนน ในระหว่างเชื่อมโยงและในผลิตภัณฑ์ยาง
2. เปอร์ออกไซด์เป็นสารเคมีอันตราย ต้องเพิ่มความระมัดระวังในการใช้และการเก็บรักษา
3. สารประกอบเปอร์ออกไซด์ว่องไวต่อปฏิกิริยากับสารเติมแต่งชนิดอื่นในยางมากกว่ากำมะถัน

4. ไม่ควรเลือกใช้เทคนิคการให้ความร้อนที่มีบรรยากาศของออกซิเจนในการเชื่อมโยงยาง เนื่องจากอนุมูลอิสระที่เคลื่อนย้ายจากเปอร์ออกไซด์ไปยังสายโซ่พอลิเมอร์ในปฏิกิริยาเชื่อมโยงอาจถูกออกซิไดซ์เนื่องจากออกซิเจนในบรรยากาศ ทำให้เกิดหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์และไม่เกิดการเชื่อมโยง ยางเกิดการเสื่อมสภาพสลายตัวเนื่องจากความร้อน

กลไกการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์เริ่มต้นจากปฏิกิริยาโฮโมไลติก-ดีคอมโพสิชัน (Homolytic decomposition) คือการสลายตัวเนื่องจากความร้อน ทำให้เปอร์ออกไซด์เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระอัลคอกซี (Alkoxy radicals, RO $\cdot$) สองตัว ซึ่งเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชื่อมโยง ในกรณีใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เชื่อมโยงในยางที่ไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ (NR) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับพันธะคู่บนสายโซ่เกิดเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระ (Polymer radicals หรือ Macro-radicals) จากนั้นเกิดการรวมกันของอนุมูลอิสระที่ต่างสายโซ่ เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยง

2.7.2 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา คือสารเคมีที่เติมในยางเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการคงรูป สารกระตุ้นปฏิกิริยามีสมบัติสำคัญ คือ เมื่อใส่เข้าไปในยางปริมาณเล็กน้อย ทำให้อย่างมีมอดุลัสเพิ่มขึ้น ช่วยไม่ให้อายุการใช้งานติดกับดักกิ้งที่ใช้ในการบดผสมยาง ช่วยในการกระจายตัวของสารเคมีในเนื้อยาง สารกระตุ้นปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยาง คือ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เนื่องจากมีราคาไม่แพงและมีประสิทธิภาพสูงในการทำงาน สามารถใช้ได้กับยางทั่วไป การใช้ซิงค์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวก็สามารถเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปได้ แต่ประสิทธิภาพในการกระตุ้นปฏิกิริยาสูงขึ้นหากใช้ซิงค์ออกไซด์ร่วมกับกรดไขมัน เพราะเมื่อสารเคมีทั้งสองทำปฏิกิริยากัน เกิดเป็นสารประกอบที่สามารถละลายในยางได้ง่าย

โดยทั่วไปนิยมใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้น ปริมาณตั้งแต่ 3-5 phr แต่ถ้าซิงค์ออกไซด์มีอนุภาคขนาดเล็ก สามารถลดปริมาณการใช้เหลือเพียง 1 phr ได้ ซึ่งทำให้ได้ยางมีมอดุลัสสูง และได้ยางมีลักษณะโปร่งใส ซิงค์ออกไซด์ถ้าปริมาณเกิน 1 phr ไม่สามารถละลายในยาง และทำให้ยางขาวขุ่นได้ ถ้าใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณมากกว่า 5 phr ถ้าซิงค์ออกไซด์มีขนาดเล็กทำให้ยางมีมอดุลัสสูงขึ้น สามารถรักษารูปทรงขณะทำการเชื่อมโยงในแม่แบบเปิดได้ (Open cure) นอกจากนั้นการใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณสูง ทำให้การถ่ายเทความร้อนในยางรวดเร็วขึ้นเหมาะสำหรับยางหนาๆ โดยเฉพาะการเชื่อมโยงแบบใช้อากาศร้อน

2.7.3 สารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizers)

สารเสริมสภาพพลาสติก คือ สารเติมแต่งที่ใส่เพื่อเพิ่มความนิ่มให้กับยาง และยังช่วยลดความหนืด ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น สารเสริมสภาพพลาสติกเป็นสารโมเลกุลเล็กที่แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ช่วยเพิ่มปริมาตรอิสระ (Free volume) ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; Tg) ลดลง ทำให้วัสดุมีสมบัติความยืดหยุ่นดีขึ้น และเพิ่มสมบัติความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) สารเสริมสภาพพลาสติกที่ดีต้องเข้ากันได้ดีกับยาง ไม่แพร่ออกที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ยาง การเลือกสารเสริมสภาพพลาสติกที่เหมาะสมสำหรับยาง โดยการพิจารณาค่าพารามิเตอร์การละลาย (Solubility parameter) ของสารเสริมสภาพพลาสติกและยางที่ใกล้เคียงกัน หน้าที่ของสารเสริมสภาพพลาสติกสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ช่วยกระบวนการขึ้นรูป การเติมสารตัวเติมต่างๆ ในยางทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้น สารเสริมสภาพพลาสติกทำให้ยางทั้งก่อนและหลังการคงรูปนิ่มตัว ความหนืดลดลง ทำให้การไหลของยางสู่แม่แบบง่ายขึ้น
2. เปลี่ยนสมบัติของยาง ยางที่ใส่สารเสริมสภาพพลาสติกนิ่มขึ้น ความแข็งแรงลดลง ยางมีค่ามอดูลัสลดลง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น
3. ลดต้นทุนการผลิต การใส่สารตัวเติมในปริมาณมากทำให้ยางแข็ง ไหลยาก จนไม่สามารถใส่สารตัวเติมลงไปได้อีก การเติมสารเสริมสภาพพลาสติกช่วยให้สามารถเพิ่มปริมาณสารตัวเติมในยาง
4. เพิ่มความสามารถการใช้งานยางที่อุณหภูมิต่ำ ยางบางชนิดแข็งตัว ไม่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; Tg) ไม่ต่ำมาก เช่น ยางไนไตรล์ การเพิ่มปริมาณสารเสริมสภาพพลาสติกในยาง ทำให้ยางมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำดีขึ้น สามารถขยายขอบเขตการใช้งานยางที่อุณหภูมิต่ำได้
5. ลดพลังงานในกระบวนการขึ้นรูปยาง การใส่สารเสริมสภาพพลาสติกในยาง ทำให้ยางนิ่มขึ้น ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการผสมยาง และอุณหภูมิในการผสมยางลดลง

2.7.4 สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant)

สารแอนติออกซิแดนท์ เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง เนื่องจากออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับยาง ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) การเสื่อมสภาพของยางมักพบในยางคงรูปที่มีพันธะคู่หลงเหลืออยู่ในโมเลกุลสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดผ่านอนุมูลอิสระ (Free radical) ผลิตภัณฑ์ชนิดแรกที่เกิด

ในระหว่างที่เกิดออกซิเดชัน คือ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ซึ่งแตกตัวให้อนุมูลอิสระที่พร้อมทำปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไป การหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่สามารถทำได้โดยการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไปเพื่อจับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น หรือเพื่อให้ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นแตกตัวต่อไปเป็นส่วนที่ไม่เป็นอันตรายต่อการเสื่อมสภาพของยาง อุนหนุมิเป็นปัจจัยที่สำคัญที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจนไม่เพียงเกิดขึ้นที่ผิวยางเท่านั้นแต่สามารถเกิดขึ้นได้ทั่วทั้งก้อนยาง โดยทั่วไปการเสื่อมสภาพจากออกซิเจนอาจทำให้ยางอ่อนลง เพราะโมเลกุลของยางถูกตัดขาด

2.7.5 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติม คือ องค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เพื่อเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อให้ยางคอมปาวด์มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต หรือเพื่อลดต้นทุน ฯลฯ สารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ตามประสิทธิภาพของการเสริมแรง คือ สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing fillers) และสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงหรือที่เรียกว่าสารตัวเติมเฉื่อย (Non-rein-forcing หรือ Inert fillers) หรืออาจแบ่งตามสีของสารตัวเติมได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนี้ ผงเขม่าดำ และสารตัวเติมสีอ่อน เช่น ซิลิกา เป็นต้น [23]

หลักการของการเสริมแรง หมายถึง ความสามารถของสารตัวเติมในการเพิ่มความหนืดของยางคอมปาวด์และปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของยางคงรูป เช่น โมดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขูดเป็นต้น ในทำนองเดียวกัน ค่าโมดูลัสและความแข็งแรงของยางก็เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่การยืดตัว ณ จุดขาดและสมบัติการกระด้างกระดอนของยางลดลง ดังนั้น สารตัวเติมเสริมแรง คือสารตัวเติมเมื่อเติมในยางทำให้สมบัติของยางเกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวข้างต้น ตัวอย่างที่สำคัญของสารตัวเติมเสริมแรง ได้แก่ ผงเขม่าดำ (Carbon black) และซิลิกา (Silica) แต่สำหรับสารตัวเติมบางชนิดเมื่อใส่ลงไปในยางแล้ว ทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆ ของยางคงรูปด้อยลง (หรือเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย) เรียกสารตัวเติมประเภทนี้ว่า สารตัวเติมไม่เสริมแรงหรือสารตัวเติมเฉื่อย เช่น ทัลคัม (Talc) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และดินขาว (Clay) เป็นต้น สารตัวเติมเพื่อวัตถุประสงค์ ดังนี้

- เพื่อลดต้นทุน โดยทั่วไปสารตัวเติมมีราคาถูกกว่ายาง จึงเป็นการลดต้นทุนการผลิต ทำได้โดยเติมสารตัวเติมผสมลงไปในยางนั้น
- เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของยาง โดยทั่วไปการใส่สารตัวเติมเข้าไปในยางสามารถทำให้ความแข็งแรงและโมดูลัสของยางเพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติอื่นๆ เช่น ความทนทาน

ต่อแรงดึง ความทนทานต่อการสึกหรอ อาจเพิ่มหรือลดลง ขึ้นกับชนิดของยางและชนิดของสารตัวเติม

- **เพื่อช่วยในกระบวนการผลิต** ในกระบวนการผลิตยางถ้าไม่มีสารตัวเติมอาจทำให้กระบวนการผสมยาง และกระบวนการขึ้นรูปยาก การเติมสารตัวเติมสามารถช่วยแก้ปัญหาได้
- **ลดการบวมตัวของยางในน้ำมัน** ยางสามารถบวมตัวได้ดีในน้ำมัน แต่เมื่อใส่สารตัวเติมเข้าไปในยางทำให้การบวมตัวของยางในน้ำมันลดลง
- **เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า** ยางบางชนิดเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี ซึ่งอาจทำให้เกิดเพลิงไหม้ได้ถ้ามีประกายไฟฟ้าสถิตในตัวยาง การใส่สารตัวเติมประเภทเขม่าดำลงไปในยางทำให้ยางมีสมบัติในการป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิตย์หรือนำไฟฟ้าได้
- **เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยาง** เนื่องจากการเติมสารตัวเติมประเภทเขม่าดำ สามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของยางได้ เนื่องจากเขม่าดำป้องกันแสงส่องผ่านเข้าไปในยาง ป้องกันการสลายตัวเนื่องจากแสงอุลตราไวโอเลต

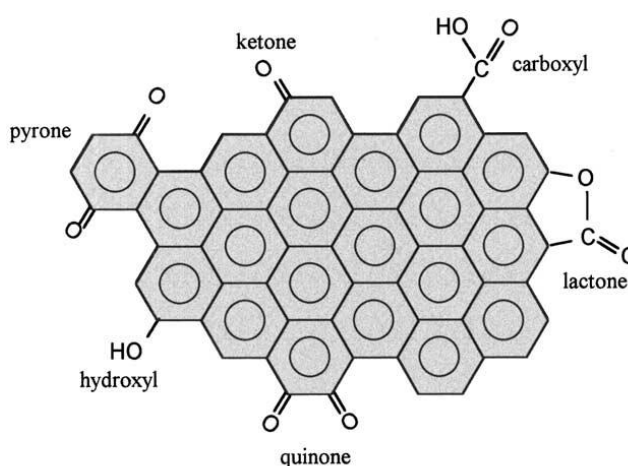
การเสริมแรงที่เกิดขึ้นในยางแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน โดยทั่วไป ผลของการเสริมแรงเห็นได้เด่นชัดในยางสังเคราะห์ (เช่น ยางบียอร์ ยางเอสบียอร์ และยางเอ็นบียอร์) มากกว่าในยางธรรมชาติหรือยางซีอาร์ แม้ว่ายางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่ดีโดยไม่ต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรง เพราะยางสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด (Strain-induced crystallization) อย่างไรก็ตาม การใช้งานทางวิศวกรรมส่วนใหญ่ การเติมสารตัวเติมเสริมแรงช่วยในการปรับปรุงสมบัติของยางให้ดียิ่งขึ้น แต่สำหรับยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่ไม่สามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด การเติมสารตัวเติมเสริมแรงเป็นสิ่งที่จำเป็นในผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องถูกนำไปใช้งานในเชิงวิศวกรรม เพราะยางเหล่านี้มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำมากถ้าไม่มีการเติมสารตัวเติมเสริมแรง

เป็นที่ทราบกันดีว่าทั้งเขม่าดำและซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรง ที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมยาง เพราะการเติมสารตัวเติมดังกล่าวลงไปช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลต่างๆ ของยางให้ดีขึ้น โดยเฉพาะค่าความแข็ง (Hardness) โมดูลัส (Modulus) ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) และความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) เป็นต้น [24] ปัจจุบันเขม่าดำได้ถูกนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง ทั้งนี้เนื่องจากเขม่าดำเสริมแรงให้แก่ยางได้ดี มีราคาถูก และสามารถผสมให้เข้ากับยางได้ง่าย อย่างไรก็ตาม เขม่าดำก็มีข้อจำกัดด้านการใช้งาน กล่าวคือ ผลิตภัณฑ์ที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมมีสีดำ ด้วยเหตุนี้เขม่าดำจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติที่ดีและความมีสีสัน ซึ่งในกรณีนี้ การใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมแทนเขม่าดำจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้

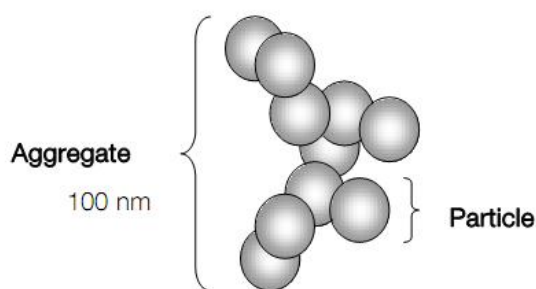
2.7.5.1 ผงเขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำหรือคาร์บอนแบล็ค ได้จากขบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete combustion) หรือการแตกตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal cracking) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ เขม่าดำจัดเป็นสารตัวเติมที่สำคัญ และมีปริมาณการใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากเขม่าดำมีราคาถูก สามารถใส่เขม่าดำในยางได้ในปริมาณมากกว่า 50 phr และที่สำคัญคือ เขม่าดำสามารถช่วยเสริมแรงให้กับยาง อาจทำให้ความแข็งแรง (Strength) ของยางเพิ่มมากกว่า 10 เท่า นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) ของยางให้ง่ายขึ้นด้วย เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล (Melt elasticity) ลดการหดตัว (Shrinkage) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ของผลิตภัณฑ์หลังการขึ้นรูป เป็นต้น ผงเขม่าดำทำให้ผลิตภัณฑ์ยางที่ใส่สารตัวเติมเขม่าดำมีสีดำ เช่น ยางรถยนต์ สายพาน ฯลฯ [23]

องค์ประกอบหลักของผงเขม่าดำคือธาตุคาร์บอน ซึ่งมีประมาณ 90-95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของผิว ได้แก่ ออกซิเจน และไฮโดรเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 อนุภาคของผงเขม่าดำมีโครงสร้างกึ่งแกรไฟต์ คืออะตอมของคาร์บอนจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ ขนานกัน บางส่วนก็เกิดการเชื่อมล้ำกันเล็กน้อย ทำให้อนุภาคมีโครงสร้างแบบกึ่งแกรไฟต์ เขม่าดำที่ใช้กันในอุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-100 นาโนเมตร (รูปที่ 2.15)



รูปที่ 2.14 องค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิวเขม่าดำ [25]



รูปที่ 2.15 การรวมตัวเป็นแอกริเกตของผงเขม่าดำ [26]

1) การผลิตผงเขม่าดำ

ผงเขม่าดำแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดหลักๆ ตามกรรมวิธีการผลิต ดังนี้

1. **เฟอร์เนซแบล็ค (Furnace black)** เป็นผงเขม่าดำชนิดที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน ผงเขม่าดำชนิดนี้ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันที่มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นวงแหวน (Highly aromatic oils) เขม่าดำชนิดเฟอร์เนซแบล็คมีโครงสร้างเป็นก้อนกลมติดกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ที่เรียกว่า แอกริเกต (Aggregates) มีโครงสร้างมาก อนุภาคปฐมภูมิมีขนาดค่อนข้างเล็ก โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 20-80 นาโนเมตร มีปริมาณออกซิเจนต่ำ พื้นผิวของเขม่าดำเป็นกลางหรือเป็นด่างเล็กน้อย (pH ประมาณ 8)

2. **เทอร์มอลแบล็ค (Thermal black)** เป็นผงเขม่าดำชนิดที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อน ที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส ในสถานะที่ไม่มีอากาศของก๊าซธรรมชาติ ผงเขม่าดำชนิดนี้มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิค่อนข้างใหญ่โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 120-500 นาโนเมตร และที่พื้นผิวของเขม่าดำชนิดนี้ไม่มีรูพรุน เขม่าดำชนิดนี้จึงมีพื้นที่ผิวที่จำเพาะไม่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำชนิดอื่นๆ ปัจจุบันมีการนำเทอร์มอลแบล็คมาใช้ในอุตสาหกรรมค่อนข้างน้อย เนื่องจากสามารถใช้เฟอร์เนซแบล็คที่มีราคาถูกกว่าทดแทนได้

3. **ชาแนลแบล็ค (Channel black)** เป็นผงเขม่าดำจากการเผาไหม้บางส่วน (Partial combustion) โดยผ่านก๊าซธรรมชาติไปยังช่องเปลวไฟ (Burner channel) เขม่าที่เกิดขึ้นไปเกาะบนฝาเหล็กด้านบน จากนั้นก็ทำการเก็บรวบรวมผงเขม่าดำที่ได้ อนุภาคปฐมภูมิของชาแนลแบล็คมีขนาดเล็กมาก (มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 9-30 นาโนเมตร) และมีความเป็นกรดค่อนข้างสูงจึงมีฤทธิ์หน่วงปฏิกิริยาการรูป ปัจจุบันมีการนำผงเขม่าดำชนิดนี้ไปใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมน้อยมาก

2) ปัจจัยของเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติการเสริมแรง

ในการเติมสารตัวเติมเขม่าดำเพื่อเสริมแรงให้กับยาง มีหลายปัจจัยที่ต้องพิจารณา เนื่องจากมีผลอย่างมากต่อสมบัติของยาง ปัจจัยที่สำคัญ ดังนี้

▶ ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ

อนุภาคปฐภูมิของเขม่าดำมีรูปร่างเป็นทรงกลมและไม่อยู่อย่างเดี่ยวๆ แต่ถูกหลอมอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนเรียกว่าแอกกรีเกต ขอบเขตการเสริมแรงของเขม่าดำไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของแอกกรีเกตแต่ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคปฐภูมิ ผงเขม่าดำที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมยางทั่วไปมีขนาดของอนุภาคปฐภูมิในช่วง 19-95 นาโนเมตร โดยทั่วไป ผงเขม่าดำเกรดที่มีขนาดอนุภาคปฐภูมิเล็กมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง สามารถเสริมแรงให้ยางได้ดี

▶ โครงสร้าง

โครงสร้างของเขม่าดำบ่งบอกถึงลักษณะการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเขม่าดำ นอกจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคปฐภูมิเกิดเป็นแอกกรีเกตเป็นโครงสร้างปฐภูมิแล้ว แอกกรีเกตแต่ละกลุ่มสามารถเกาะกลุ่มกันได้อย่างหลวมๆ ด้วยแรงดึงดูดอย่างอ่อน (แรงแวนเดอร์วาลส์) เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิที่เรียกว่าแอกโกลเมอเรต ซึ่งถูกทำลายได้ง่ายด้วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผสม

▶ สมบัติทางเคมีของพื้นผิว

เขม่าดำประกอบด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอนประมาณ 90-95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนองค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ ออกซิเจน และไฮโดรเจน ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเขม่าดำค่อนข้างแตกต่างกันมาก เพราะพื้นผิวของเขม่าดำประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันเคมีมากมาย และการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้บนพื้นผิวก็แตกต่างกันด้วย หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวเหล่านี้มีผลต่อความว่องไวทางปฏิกิริยา (Surface activity) และมีผลต่ออัตราเร็วของการคงรูปยางอีกด้วย การเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนในเขม่าดำทำให้ยางมีเวลาการไหลตัวที่นานขึ้น มีอัตราเร็วในการคงรูปและค่ามอดูลัสที่ต่ำลง

▶ ความเป็นรูพรุนของอนุภาค

พื้นผิวของเขม่าดำไม่เรียบ แต่มีลักษณะเป็นรูพรุนจึงมีพื้นที่ผิวมากขึ้นกว่าสารตัวเติมชนิดอื่นๆ ที่มีผิวเรียบ จึงทำให้เขม่าดำมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เขม่าดำจึงสามารถเสริมแรงให้ยางได้ดี

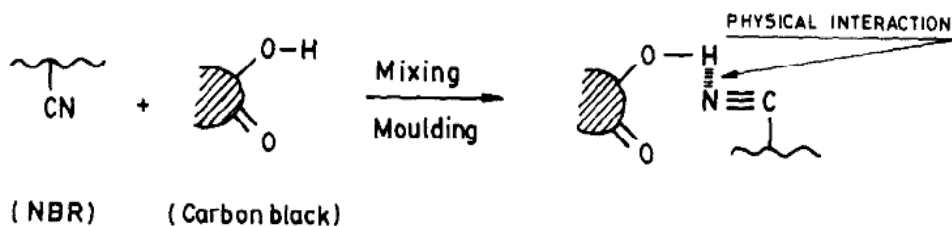
► การนำไฟฟ้าและความร้อน

เขม่าดำสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้เป็นอย่างดี ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามโครงสร้างและพื้นที่ผิวของเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น หมู่ฟังก์ชันเคมีที่อยู่บนพื้นผิวโดยเฉพาะหมู่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเขม่าดำเช่นกัน เพราะมีการศึกษาพบว่า การกำจัดหมู่มฟังก์ชันเหล่านี้โดยการให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของเขม่าดำลดลง

3) อันตรกิริยาระหว่างเขม่าดำและยาง (Black-Rubber Interactions)

อันตรกิริยา (Interactions) ระหว่างเขม่าดำและยางมีความสำคัญ เนื่องจากส่งผลต่อความสามารถในการเสริมแรง (Reinforcement) ของเขม่าดำในยาง กล่าวคือ ถ้าเขม่าดำมีอันตรกิริยากับยางมาก ทำให้ยางผสมเขม่าดำมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่ายางผสมเขม่าดำ ที่มีอันตรกิริยาระหว่างกันน้อย ตัวอย่างอันตรกิริยาระหว่างเขม่าดำและยางเอ็นบีอาร์ แสดงดังในรูปที่ 2.16 อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเขม่าดำและยางมีหลายลักษณะ ดังนี้

- การยึดเกาะทางกายภาพ (Physical adsorption) เนื่องจากเขม่าดำโดยเฉพาะชนิดที่มีโครงสร้างมาก (High structure) มีความซับซ้อนเป็นกึ่งก้อน และมีช่องว่างระหว่างอนุภาคเขม่าดำ ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางสามารถแทรกตัวระหว่างโครงสร้างและเกิดการยึดติดที่ดีกับเขม่าดำ เช่น เกิดการยึดติดกันทางเชิงกล (Mechanical interlocking)
- การยึดเกาะด้วยพันธะเคมี (Chemical bonding) ที่บริเวณพื้นผิวของเขม่าดำมีหมู่มฟังก์ชัน เช่น ที่บริเวณริมแผ่นแกรไฟต์ (Graphite basal planes) โดยเฉพาะในเขม่าดำบางชนิด เช่น เขม่าดำชนิดเฟอร์เนส (Furnace blacks) และชันแนล (Channel blacks) มีหมู่มฟังก์ชันที่มีอะตอมของออกซิเจน เช่น หมู่มคาร์บอกซิล (Carboxyl) ฟีนอล (Phenol) ควิโนน (Quinone) และแลคโตน (Lactone) หมู่มฟังก์ชันเหล่านี้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อกิ่ง (Grafting) ทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมต่อระหว่างเขม่าดำกับสายโซ่โมเลกุลของยาง อาจเกิดปฏิกิริยาในระหว่างการผสม (Compounding) การขึ้นรูป (Processing) หรือระหว่างการเชื่อมโยง (Vulcanization) เนื่องจากการผสมที่เกิดแรงเฉือนสูง (High shear stress) อาจเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของยาง เกิดอนุมูลอิสระเกิดปฏิกิริยาต่อกิ่ง ทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางกับหมู่มฟังก์ชันบนพื้นผิวเขม่าดำ



รูปที่ 2.16 กลไกการเกิดพันธะยึดเกาะระหว่างเขม่าดำกับยางเอ็นपीอาร์ [27]

4) การเปลี่ยนแปลงของเขม่าดำเมื่อผสมกับยาง

เมื่อผสมเขม่าดำกับยาง เริ่มแรกของการผสมเกิดการแทรกตัวของสายโซ่โมเลกุลยางในช่องว่างระหว่างอนุภาค โครงสร้างกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ของเขม่าดำในขั้นนี้ถ้ายางมีอันตรกิริยามากกับเขม่าดำหรือเกิดเป็นยางบาวด์ปริมาณมากทำให้เขม่าดำเกิดการกระจายตัวในยางได้ยาก เนื่องจากยางบาวด์ยึดแอกกรีเกตของเขม่าดำไว้ด้วยกัน จึงเป็นสาเหตุทำให้เขม่าดำโครงสร้างน้อยอัดตัวกันแน่น หรือเขม่าดำขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวมาก เกิดการผสมยากกระจายตัวในยางได้ยาก การผสมที่ดีทำให้เกิดการแตกของกลุ่มก้อนผงเขม่าดำ ในขณะที่การผสมยางกับเขม่าดำด้วยแรงเฉือนสูง กลายเป็นเขม่าดำแอกกรีเกตที่เป็น โครงสร้างแบบปฐุมภูมิ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในยาง ความยากง่ายหรือปริมาณในการทำให้กลุ่มก้อนเขม่าดำแตกออกจากกันและกระจายในยาง ขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ยางมีความหนืดสูงมากพอที่ทำให้เกิดแรงเฉือนสูง แรงยึดเหนี่ยวในกลุ่มก้อนแอกกรีเกตต่ำ เครื่องผสมทำให้เกิดแรงเฉือนขณะผสมสูง เป็นต้น

การผสมที่ดีทำให้เขม่าดำกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จากการศึกษาพบว่า โครงสร้างของเขม่าดำมีแนวโน้มที่เกิดการต่อกันของอนุภาคเขม่าดำ เป็น โครงร่างคล้ายร่างแหภายในยาง หลักฐานของการเกิดโครงร่างคล้ายร่างแหของอนุภาคเขม่าดำ ได้แก่ ความสามารถในการนำไฟฟ้าของยางผสมเขม่าดำสูงขึ้นเมื่อเขม่าดำกระจายตัวได้ดีในยาง เมื่อทำการดิ่งยัดเพียงเล็กน้อย พบว่า ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของยางผสมเขม่าดำลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้คาดว่าเนื่องมาจากการดิ่งยัดทำลายความต่อเนื่องของโครงร่างร่างแหของเขม่าดำ นอกจากนี้พบว่า อุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางผสมเขม่าดำ เพิ่มขึ้น 2-3 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลยางลดลง โดยเฉพาะยางบริเวณใกล้อนุภาคเขม่าดำ

5) ความปลอดภัยในการใช้งาน

เขม่าดำจัดมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีความปลอดภัยในการใช้งานสูง เขม่าดำไม่เกิดการระเบิดและติดไฟได้ยาก (การเผาไหม้เกิดขึ้นได้ช้ามากในบรรยากาศปกติ) นอกจากนี้ เขม่าดำยังจัดเป็นสารที่ไม่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งอีกด้วย เพราะบนพื้นผิวของเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชันเคมีที่สามารถก่อให้เกิดโรคมะเร็งในปริมาณที่ต่ำ

2.7.5.2 ซิลิกา (Silica)

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงได้ดีเมื่อเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำอื่นๆ โดยเฉพาะซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ซิลิกามีสูตรโครงสร้างเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ในการใช้งานของซิลิกานิยมปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบ (Coupling agents) เช่น สารประกอบไฮโดรเจน คลือบผิวอนุภาคซิลิกา เพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างวัสดุภาค ทำให้สมบัติของยางดีขึ้น

1) ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเสริมแรงของซิลิกา

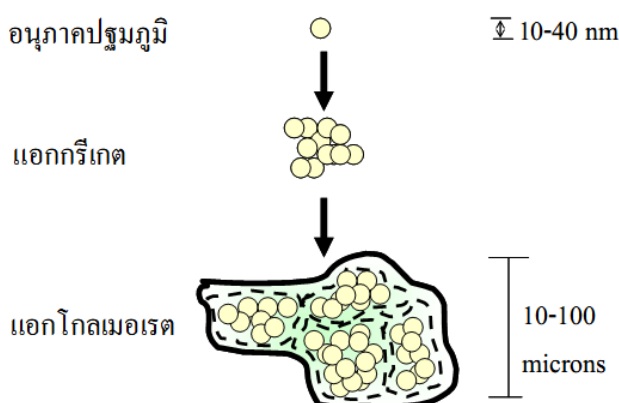
ปัจจุบัน ซิลิกาที่นิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางคือ ชนิดพรีซิพิเตตซิลิกา (Precipitated silica; PSi) หรือซิลิกาแบบตกตะกอน ซิลิกาแต่ละเกรดแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาคปฐภูมิ หรือพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยทั่วไป ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคปฐภูมิเล็กหรือมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงช่วยเสริมแรงให้ยางได้ดีกว่าซิลิกาเกรดที่มีขนาดอนุภาคปฐภูมิใหญ่หรือมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเสริมแรงของซิลิกา นั่นคือ ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวซิลิกา เพราะซิลิกาที่นำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางแล้วแต่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) อยู่บนพื้นผิวในปริมาณมาก ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลนี้ค่อนข้างว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีและมีความเป็นขั้วค่อนข้างสูง จึงส่งผลทำให้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีความเป็นขั้วสูง ด้วยเหตุนี้ ซิลิกาจึงผสมให้เข้ากับยางชนิดต่างๆ ได้ยากเพราะยางส่วนใหญ่ไม่มีขั้วหรือมีความเป็นขั้วต่ำ เมื่อผสมซิลิกาในยางทำให้อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างยางกับซิลิกาค่อนข้างต่ำ ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาจึงด้อยกว่าเขม่าดำเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวเท่ากัน

2) ลักษณะโดยทั่วไปของซิลิกา

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมยาง นอกเหนือจากเขม่าดำที่มีสีขาวและมีขนาดอนุภาคเล็กมาก เมื่อเติมในยางทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น มักใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีอ่อน เช่น ยางพื้นรองเท้ากีฬา เป็นต้น

► โครงสร้าง

ซิลิกาที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยางมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-40 นาโนเมตร ซิลิกาไม่อยู่อย่างเดี่ยวๆ ในรูปของอนุภาคปฐมภูมิ แต่จับกลุ่มรวมกันเป็นก้อนที่เรียกว่า แอ็กกรีเกต (Aggregate) เกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary structure) ซึ่งโครงสร้างนี้ไม่สามารถถูกทำลายได้ในระหว่างกระบวนการผสม นอกจากนี้ แอ็กกรีเกตของซิลิกามีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดใหญ่มากขึ้น เรียกว่า แอ็กโกลเมอเรต (Agglomerate) เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.17



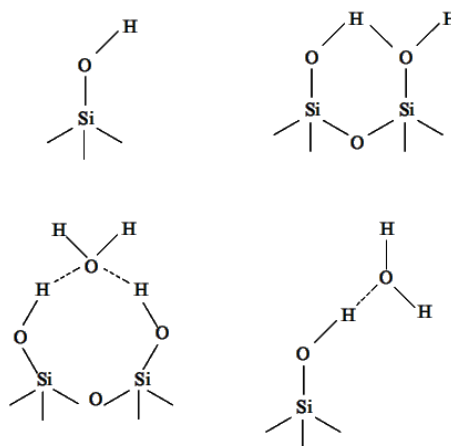
รูปที่ 2.17 โมเดลแสดงลักษณะโครงสร้างของซิลิกา [24]

► พื้นที่ผิวจำเพาะ

พื้นที่ผิวจำเพาะเป็นปัจจัยที่สำคัญในการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการเสริมแรงในยาง ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิเล็กมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและให้การเสริมแรงที่ดี เทคนิคที่นิยมใช้ในการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด (Total specific surface area) ของสารตัวเติมคือเทคนิคการดูดซับไนโตรเจนหรือที่รู้จักกันดีว่าเทคนิค BET (พัฒนาขึ้น โดย Brunauer Emmett และ Teller)

► ลักษณะทางเคมีของพื้นผิว

ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเป็นปัจจัยในการควบคุมระดับการเสริมแรงของซิลิกา เพราะลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเป็นตัวบ่งชี้ระดับของอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา โดยทั่วไป พื้นผิวของซิลิกาประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลกลุ่มอยู่อย่างหนาแน่น (4-5 หมู่ ต่อ $100 \text{ \AA}^2$) ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกาเกาะอยู่ในหลายลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.18 หมู่ไฮดรอกซิลทำให้พื้นผิวซิลิกามีความเป็นกรดและมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น หมู่ไฮดรอกซิลสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่างๆ ที่มีอยู่ในยางคอมปาวด์ได้ เช่น สารคู่ควบไฮดรอกซิล น้ำ หรือไกลคอล เป็นต้น



รูปที่ 2.18 ลักษณะของหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกา [24]

3) ผลของการเสริมแรง

ซิลิกาสามารถเสริมแรงในยางได้ดีเพราะมีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิเล็ก และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เมื่อเติมลงไปในยางทำให้ยางคงรูปมีความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง และความต้านทานต่อการขัดถูสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำที่มีพื้นที่ผิวเท่ากันแล้ว ซิลิกาให้ยางคงรูปที่มีสมบัติเชิงกลดีกว่าเขม่าดำโดยเฉพาะค่ามอดุลัสและค่าความต้านทานต่อการขัดถู ทั้งนี้ เนื่องจากซิลิกามีอันตรกิริยากับยางต่ำกว่าเขม่าดำ การเติมสารคู่ควบไฮเลลงไปในปริมาณเพียงเล็กน้อย (5-15% โดยน้ำหนักของซิลิกา) ช่วยทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ซิลิกาให้สมบัติทางไฟฟ้า (ความเป็นฉนวน) ที่ดีกว่าเขม่าดำเล็กน้อย เพราะซิลิกาไม่นำไฟฟ้าในขณะที่เขม่าดำนำไฟฟ้าได้ดี สำหรับในกรณีที่ต้องการใช้ซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากๆ หรือต้องการเติมซิลิกาลงไปปริมาณมาก ยางคอมปาวด์ที่ได้มีความหนืดสูง ส่งผลทำให้กระบวนการผลิตยางเป็นไปด้วยความยากและสิ้นเปลืองพลังงานสูง

4) การใช้งานในผลิตภัณฑ์ยาง

ซิลิกาใช้กันมากในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความโปร่งแสง และมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ยางพื้นรองเท้า เป็นต้น นอกจากนี้ ในบางกรณียังใช้ซิลิการ่วมกับเขม่าดำเพื่อเพิ่มความทนทานต่อการฉีกขาดและเพิ่มความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางกับสิ่งทอ ปัจจุบัน ได้มีการนำซิลิกาไปใช้ในการผลิตยางล้อรถยนต์ เพราะซิลิกาทำให้ยางมีค่าความต้านทานต่อการหมุน (Rolling resistance) ต่ำลงจึงช่วยประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง

5) ปัญหาของการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

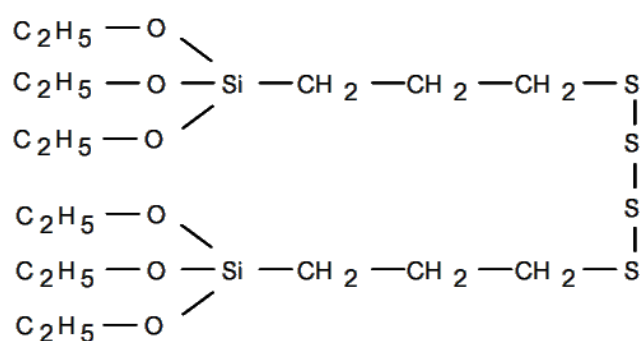
เนื่องจากบนพื้นผิวซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลทำให้อนุภาคของซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกัน (Filler-filler interaction) สูง ซิลิกาจึงอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (ที่เรียกว่าแอกโกลเมอเรต) อย่างเหนียวแน่นเพราะอันตรกิริยาหรือแรงดึงดูดที่ยึดกลุ่มก้อนซิลิกาเข้าด้วยกันคือพันธะไฮโดรเจน (H-bonds) ซึ่งมีความแข็งแรงค่อนข้างมาก ด้วยเหตุนี้ ซิลิกาจึงแตกตัว (Disperse) และกระจายตัว (Distribute) ในยางได้ยากกว่าเขม่าดำ สำหรับในกรณีที่เติมซิลิกาลงไป ในยางในปริมาณค่อนข้างมาก กลุ่มก้อนของซิลิกาก็เข้ามาอยู่ใกล้กันมากจนทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างกลุ่มก้อนของซิลิกาด้วยตัวเอง เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายที่เรียกกันว่า “โครงสร้างตาข่ายของสารตัวเติม (Filler-filler network)” ซึ่งโครงสร้างตาข่ายของสารตัวเติมนี้ทำให้ยางคอมปาวด์มีความหนืดสูงขึ้น ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปด้วยความยากลำบากและทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการผลิตมากยิ่งขึ้น การเติมสารเติมแต่งบางชนิดที่สามารถเข้าไปจับกับหมู่ไฮดรอกซิล ช่วยทำให้กลุ่มก้อนของซิลิกาแตกตัวออกได้ง่ายยิ่งขึ้น ความหนืดของยางคอมปาวด์ลดลง ทำให้กระบวนการผสมและการขึ้นรูปเป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น ตัวอย่างของสารเติมแต่งดังกล่าว ได้แก่ ซิงค์ออกโตเอต (Zinc octoate) หรือ เฮกซะเมทิลินเตตราซีน (HEXA) รวมถึงสารตัวเร่งปฏิกิริยาของรูปในกลุ่มกัวนิดีน เช่น ไดฟีนิลกัวนิดีน (Diphenylguanidine; DPG) เป็นต้น

นอกจากนี้ หมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวซิลิกายังสามารถดูดความชื้นจากอากาศได้ดี โดยทั่วไปแล้ว ซิลิกามีความชื้นประมาณ 4-7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งความชื้นที่จับกับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวซิลิกาทำให้ซิลิกาแตกตัว และกระจายตัวในยางได้ยากขึ้น และส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาของรูปของยางได้อีกด้วย โดยทั่วไป ถ้าปริมาณความชื้นในซิลิกาสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการคงรูปยางในระบบที่ใช้กำมะถัน (ทั้ง Scorch time และ Vulcanization time) นานขึ้น เพราะซิลิกาที่อึดตัวด้วยน้ำหน่วงปฏิกิริยาของรูป ทำให้ต้องใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น อย่างไรก็ดี ความชื้นบางส่วนถูกไล่ออกไปในระหว่างกระบวนการผสมเคมียาง เพราะอุณหภูมิของยางในระหว่างการผลิตสูงมาก ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$) ทำให้น้ำหรือความชื้นบางส่วนระเหยออกไป ด้วยเหตุนี้ การผสมยางที่อุณหภูมิแตกต่างกันสามารถทำให้เกิดความแปรปรวนของอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของรูปได้เช่นกัน อนึ่ง ปัญหาสำคัญที่พบเมื่อใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมคือ เรื่องเวลาในการบ่มสุกยางที่นาน เพราะบนพื้นผิวซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาของรูปที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น ไดฟีนิลกัวนิดีน รวมถึงสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสี (Zn complex) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถัน การดูดซับดังกล่าวทำให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีมีปริมาณลดลง ซึ่งส่งผลทำให้ยางมีเวลาในการบ่มสุกลดลงด้วยเช่นกัน โดยการผสมเคมียางสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้โดยการเติมสารประกอบในกลุ่มไกลคอลหรือกลุ่มเอมีน เพราะสารประกอบเหล่านี้เข้าทำปฏิกิริยากับหมู่

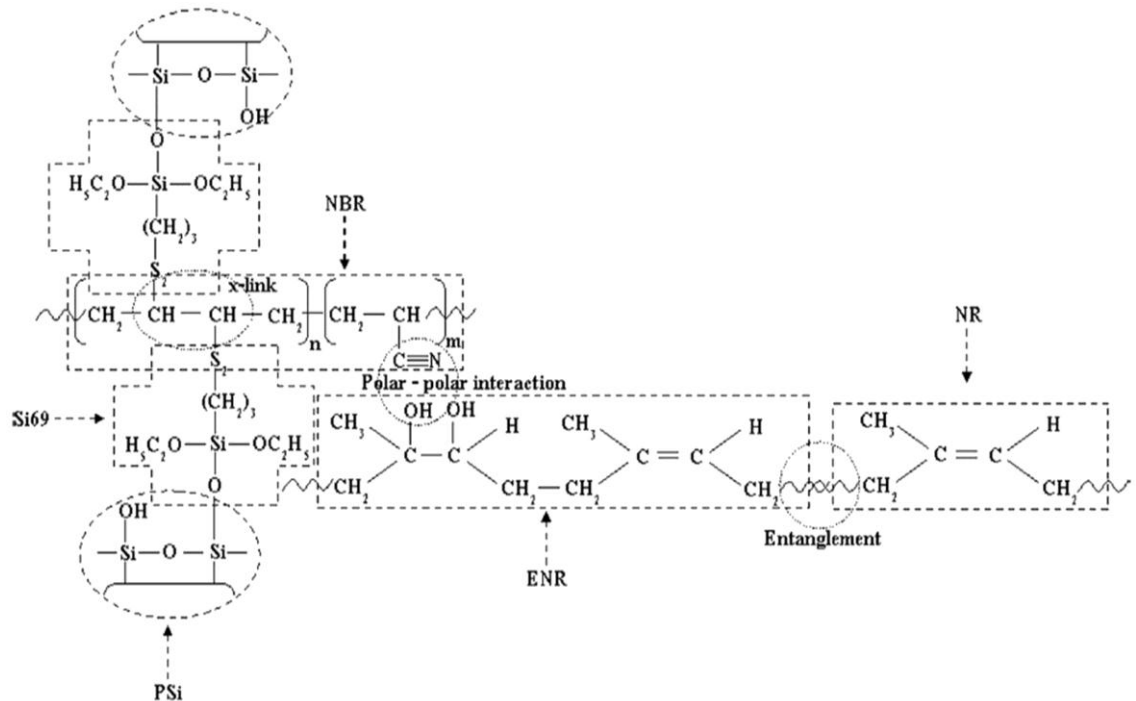
ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกา ทำให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีที่ถูกดูดซับโดยหมู่ไซลานอลมีปริมาณลดลง ปฏิกิริยาการเกิดได้เร็วขึ้น ได้แก่ ไดเอทิลีนไกลคอล (DEG) พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ไตรเอทานอลามีน และเฮกซะเมทิลีนเตตรามิน (HEXA) เป็นต้น นอกจากการเติมสารประกอบดังกล่าวแล้ว การปรับลำดับการเติมสารเคมีลงไปในเรื่องผสม เช่น การเติม ZnO ลงในช่วงท้ายของการผสม ช่วยลดปัญหาการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีได้เช่นกัน การเติมสารประกอบในกลุ่มดังกล่าวนอกจากช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการเกิดแล้ว ช่วยลดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกาอีกด้วย (ช่วยให้โครงสร้างทุดีของซิลิกาถูกทำลายได้ง่ายขึ้น) ซิลิกาจึงแตกตัวและกระจายตัวได้ง่ายขึ้น ความหนืดของยางคอมปาวด์ลดลง ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างง่ายขึ้น ปริมาณของสารเคมีขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิกา เช่น ใช้ PEG ประมาณ 8-10 ส่วนโดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับปริมาณของซิลิกา [24]

6) บทบาทของสารคู่ควบไซเลน

การเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมแรงและลดการเกาะกลุ่มของซิลิกา เทคโนโลยีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือ การใช้สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) โดยทั่วไป การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางและซิลิกาสูงขึ้นเพราะสารคู่ควบไซเลนประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันเคมี 2 หมู่ที่แตกต่างกัน คือหมู่แอลคอกซี (Alkoxy group) เช่น หมู่เมทอกซี ($-\text{OCH}_3$) หรือหมู่เอทอกซี ($-\text{OC}_2\text{H}_5$) และหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ (Organo-functional group) ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 โครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน Si-69 [24]



รูปที่ 2.20 อันตรกิริยาระหว่างซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนและยาง [5]

เมื่อเติมสารคู่ควบไซเลนลงไป หมู่อัลคอกซีที่ปลายด้านหนึ่งของโมเลกุลเข้าทำปฏิกิริยากับ หมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกาในระหว่างกระบวนการผสม เกิดเป็นพันธะไซลอกเซนที่มีความเสถียรและมีการปลดปล่อยแอลกอฮอล์ออกมา ทำให้ซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกันลดลง ซิลิกาจึงสามารถแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่ายยิ่งขึ้น ยางคอมปาวด์ที่ได้มีความหนืดลดลง สามารถไหลและขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น ส่วนหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่งช่วยทำให้ซิลิกาเข้ากับยางได้ง่ายในระหว่างกระบวนการผสม เพราะหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์มีความเป็นขั้วต่ำจึงเข้ากับยางได้ง่าย นอกจากนี้ หมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ของสารคู่ควบไซเลนส่วนใหญ่ยังมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งในระหว่างกระบวนการอบรูป กำมะถันในสารคู่ควบไซเลนมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization reaction) เกิดเป็นการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้น สารคู่ควบไซเลนจึงทำหน้าที่เปรียบเสมือนสะพานเชื่อมระหว่างซิลิกากับยาง ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกาสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาจึงสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้น การเติมสารคู่ควบไซเลนส่งผลทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลต่างๆ ดีขึ้น โดยเฉพาะค่ามอดุลัส ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขัดถู เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ว การเติมสารคู่ควบไซเลนในปริมาณเล็กน้อยช่วยให้ยางคงรูปมีความต้านทานต่อการขยายตัวของรอยแตก (Cut growth resistance) สูง นอกจากนี้ สารคู่ควบไซเลนยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ของยางคงรูปอีกด้วย โดยเฉพาะการลดความร้อนสะสม (Heat build up) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน ตัวอย่างสารคู่ควบไซเลนที่นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนี้

ไตรเอทอกรอกซีไซิลโพรพิลเตตราซัลไฟด์ (Bis-(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide, Si-69) เมอร์แคปโตโพรพิลไตรเมทอกรอกซีไซิลเลน (Mercaptopropyl-trimethoxysilane, A-189) และไรโอไซยานาโพรพิลไตรเอทอกรอกซีไซิลเลน (3-thiocyanato-propyl-triethoxysilane, Si-264) เป็นต้น [24]

2.8 การผสมยางกับสารเคมี (Mixing)

การผสมยางหรือการคอมปาวด์ (Rubber compounding) คือขั้นตอนการผสมยางดิบ (ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์) ที่ยังไม่ผ่านขบวนการเชื่อมโยง (Vulcanization) กับสารเติมแต่งต่างๆ ของยาง ซึ่งการผลิตผลิตภัณฑ์ยางชนิดหนึ่ง ต้องใช้สารเติมแต่งหลายชนิดและมีจำนวนมาก ต้องมีการผสมสารเชื่อมโยงและสารตัวเติม การผสมยางเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญยิ่งต่อกระบวนการผลิตและมีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากการผสมยางไม่ดีหรือไม่มีประสิทธิภาพอาจทำให้สารเติมแต่งไม่กระจายตัว หรือเกิดการเชื่อมโยงก่อนเวลา ทำให้ไม่ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ

2.8.1 การบดย่อยยางหรือมาสติเคชัน (Mastication)

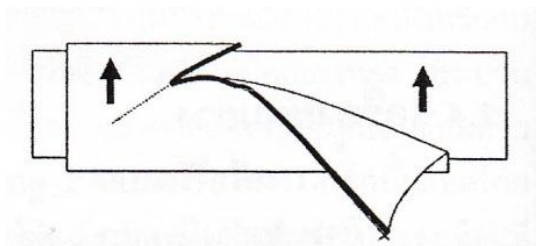
การบดย่อยยางเป็นการลดความหนืดของยางก่อนที่ทำการเติมสารเติมแต่ง (Additives) ต่างๆ ของยางลงไป ขั้นตอนการบดย่อยยางนี้มีชื่อเรียกทางเทคนิคว่า “มาสติเคชัน” (Mastication) การบดย่อยยางเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากในการผสมยางที่มีความหนืดสูง การบดย่อยยางให้มีความหนืดต่ำลงหรือทำให้ยางอ่อนและไหลได้มากขึ้น ทำให้ห้อยประกอบต่างๆ สามารถเข้าไปรวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Incorporation) กับเนื้อยางได้ง่ายยิ่งขึ้น โดยในระหว่างการบดย่อยยาง โมเลกุลของยางถูกตัดขาดด้วยแรงเชิงกลหรือแรงเฉือน

2.8.2 เครื่องผสม

เครื่องที่ใช้บดผสมยางโดยทั่วไปมี 2 ระบบ คือ เครื่องบดผสมระบบเปิด (Open mill) หรือที่เรียกตามลักษณะของเครื่องว่า เครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และเครื่องบดผสมระบบปิด (Internal mixer)

2.8.2.1 เครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill)

เครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง ประกอบด้วยลูกกลิ้งทรงกระบอก 2 ลูกขนานกัน มีช่องว่างเล็กๆ ตรงกลางหมุนในทิศทางตรงข้ามกัน สามารถปรับขนาดของช่องว่างตรงกลางได้ อัตราเร็วของการหมุนของลูกกลิ้งแตกต่างกัน โดยที่ลูกกลิ้งด้านหน้าหมุนด้วยอัตราเร็วที่ต่ำกว่าลูกกลิ้งด้านหลัง การที่ลูกกลิ้งทั้ง 2 หมุนด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน ทำให้เกิดแรงเฉือนขึ้นบริเวณช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งทั้งสอง นอกจากนี้ภายในบริเวณด้านในของลูกกลิ้งมีน้ำหรือน้ำมันไหลผ่าน เพื่อระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการขัดสี (Frictional heat) การผสมยางเริ่มต้นจากการนำยางไปปรีดผ่านลูกกลิ้งหลายๆ รอบ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นตรงช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง ทำให้โมเลกุลของยางถูกตัดขาด ส่งผลให้ความหนืดของยางลดลง สามารถหุ้มติดกับลูกกลิ้งด้านหน้าได้ จากนั้นเริ่มทำการปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งทั้งสอง เพื่อให้มียางบางส่วนเหลืออยู่ที่บริเวณเหนือช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง เรียกยางส่วนนี้ว่า ยางแบงก์ (Bank) โดยปกติแล้วในระหว่างที่ทำการผสม ยางแบงก์หมุนเวียนผ่านเข้าไปในช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งอยู่ตลอดเวลา สารเติมแต่งต่างๆ ถูกเติมเข้าไปในยาง ส่วนสารเสริมสภาพพลาสติกถูกเติมหลังจากที่สารตัวเติมบางส่วนได้ถูกเติมเข้าไปในยาง หลังจากที่ได้เติมสารเคมีแต่ละชนิดในยางแล้ว ต้องทำการกรีดยางที่เป็นแถบอยู่บนผิวด้านหน้าของลูกกลิ้งแล้วทำการสลับไขว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 เพื่อให้สารเคมีที่เป็นองค์ประกอบต่างๆ กระจายตัวในยางได้อย่างสม่ำเสมอ และเมื่อสิ้นสุดการผสมก็ทำการรีดยางคอมปาวด์ให้เป็นแผ่น จากนั้นลดอุณหภูมิให้ยางเย็นลงก่อนนำไปขึ้นรูปต่อไป



รูปที่ 2.21 การกรีดยางและสลับไขว้เพื่อให้สารเคมีกระจายตัวได้ดี [19]

ข้อดีของเครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง คือ สามารถมองเห็นลักษณะและระดับการผสมเข้ากันของสารเคมีกับยางได้ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นตรงช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งค่อนข้างสูง การปรับช่องว่างของลูกกลิ้งลดลง ซึ่งทำให้องค์ประกอบสารเติมแต่งผสมเข้าไปในยางได้ดีและทำให้สารตัวเติมเกิดการแตกตัวที่ดี นอกจากนี้ ในระหว่างการผสมนั้นยางมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศสูงมาก ดังนั้น การระบายความร้อนจึงเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้อย่างมีความหนืดสูงในระหว่างการผสม และยังมีความสะดวกในการทำความสะอาดเครื่องผสม การผสมแบบนี้ได้ผลิตภัณฑ์ในลักษณะแผ่น ซึ่งเหมาะสำหรับการ

ขึ้นรูปต่อโดยเทคนิคอื่นๆ เช่น การอัดขึ้นรูป (Compression molding) ส่วนข้อเสียของเครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง คือ ต้องมีทักษะในการใช้เครื่องและมีความรู้เรื่องการคอมปาวด์สูง ในกรณีที่ต้องการผสมให้มีสมบัติในแต่ละแบบที่เหมือนกันทำได้ยากมาก เนื่องจากอาจมีการสูญเสียสารเคมีบางส่วนในขณะทำการผสม นอกจากนี้ การผสมโดยใช้เครื่องผสมเป็นระบบเปิด ดังนั้นจึงมีโอกาสที่ฝุ่นละออง และสิ่งปนเปื้อนชนิดต่างๆ เข้ามาปะปนกับคอมปาวด์ และมีโอกาสที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคอมปาวด์ได้ง่าย และการผสมทำได้ช้ากว่ากรณีการใช้เครื่องผสมแบบปิด

2.8.2.2 เครื่องบดผสมระบบปิด (Internal mixer)

เครื่องบดผสมยาระบบปิดเป็นเครื่องผสมยางที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน โดยการหมุนของโรเตอร์ (Rotor) ภายในห้องผสม (Mixing chamber) เพื่อผสมสารเคมีกับยางเข้าด้วยกัน ลักษณะของโรเตอร์ที่เป็นเหมือนเกลียวไม่เรียบเหมือนของลูกกลิ้ง ทำให้ในขณะหมุนเกิดแรงเฉือนภายในของผสมสูงมาก ส่งผลให้การกระจายตัวของสารเคมีในยางดีกว่า และใช้เวลาในการผสมน้อยกว่ามาก องค์ประกอบหลักของเครื่องคือ โรเตอร์สองชุดหมุนในทิศสวนทางกันและสามารถปรับความเร็วได้ ห้องผสมซึ่งโดยทั่วไปปรับอุณหภูมิโดยใช้น้ำมันร้อนและน้ำไหลหมุนเวียน ซึ่งระบบหล่อเย็นหรือระบบให้ความร้อนถูกติดตั้งที่ผนังด้านในของห้องผสมและที่โรเตอร์ เพื่อช่วยระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการขัดสีในระหว่างการผสม มีน้ำหนักรัดซึ่งใช้ในการเปิดห้องผสมขณะเดินเครื่อง มีประตูและระบบลิ้อคใช้ในการเปิดให้คอมปาวด์ออกจากห้องผสม เป็นต้น เครื่องผสมชนิดนี้ให้ประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการผสมมากกว่าเครื่องผสมระบบเปิดชนิดเครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง เพราะสารเคมีไม่ฟุ้งกระจายในระหว่างการผสมลดการสูญเสียสารเคมีขณะทำการผสม สามารถผสมยางกับสารเคมีได้ในปริมาณสูง เช่น 50 - 100 กิโลกรัม ข้อเสียของเครื่องบดผสมระบบปิด คือ โอกาสที่สารเคมีบางตัวติดภายในห้องผสม และทำให้ปริมาณของสารเคมีชนิดนั้นในคอมปาวด์ต่ำกว่าที่ต้องการ

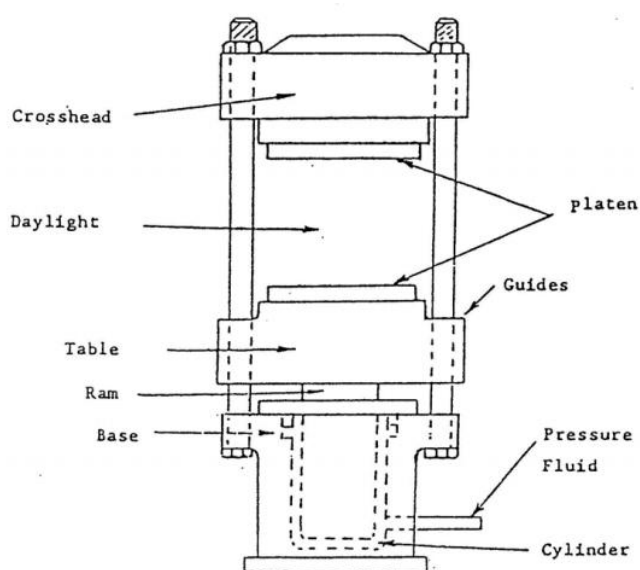
2.9 การคงรูปยาง

2.9.1 การทำให้ยางคงรูปและการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

การขึ้นรูปและการทำให้ยางคงรูปเป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง หลังจากการผสม เนื่องจากผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปต่างๆ ของยางไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ถ้ายังไม่ผ่านกระบวนการทำให้ยางคงรูปหรือวัลคาไนเซชัน เพราะยางไม่แข็งตัว ไม่คงรูป เสียวสภาพเหนียวติด (Sticky) ไม่สามารถรับแรงหรือทำให้เปลี่ยนรูปร่างอย่างมากได้ กระบวนการคงรูปยางทำให้ได้วัสดุที่มีความ

ยืดหยุ่น อันเนื่องมาจากโครงสร้างของโมเลกุลเกิดการเชื่อมโยง หรือยึดกันด้วยพันธะทางเคมีระหว่างต่างโมเลกุล ข้างที่คงรูปแล้วเมื่อถูกปล่อยให้เป็นอิสระจากแรงที่มากระทำคืนตัวสู่สภาพเดิม ดังนั้นการทำให้ยางคงรูปจึงช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและลดการเสียรูปของยาง

การทำให้ยางคงรูปโดยวิธีใช้แม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression molding) เป็นวิธีที่ใช้กับผลิตภัณฑ์ยางประเภทต้องใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูป โดยวางแม่พิมพ์ที่บรรจุยางผสมสารเคมีแล้วลงบนแท่นของเครื่องอัดระบบไฮดรอลิก ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องที่ใช้ขึ้นรูปยางโดยการอัด แสดงดังรูปที่ 2.22 จากรูปเห็นว่าเครื่องอัดประกอบด้วยแผ่นกดอัด (Platen) จำนวน 2 แผ่น คือ แผ่นบน และแผ่นล่าง หรือในบางกรณีอาจมีมากกว่า 2 แผ่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรอบการออกแบบเครื่องอัดให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิต แผ่นกดอัดแผ่นล่างทำหน้าที่เลื่อนขึ้นลงด้วยระบบไฮดรอลิกเพื่ออัดและส่งผ่านแรงดันไปสู่แม่พิมพ์ที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นกดอัดทั้งสอง นอกจากเครื่องกดอัดต้องได้รับการออกแบบให้มีแรงอัดที่สูงเพียงพอสำหรับการใช้งานแล้ว ต้องได้รับการออกแบบให้มีระบบให้ความร้อนและควบคุมอุณหภูมิของแผ่นกดอัดให้คงที่ในระหว่างการใช้งานด้วย โดยทั่วไป แหล่งให้ความร้อนแผ่นกดอัด ได้แก่ ใช้น้ำ น้ำมันร้อน หรือไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 2.22 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดไฮดรอลิก [22]

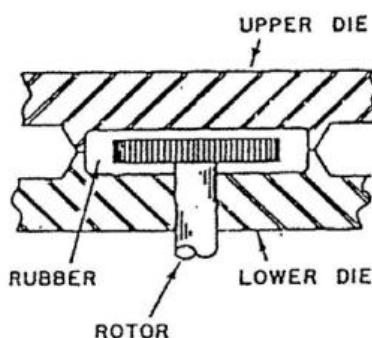
ผลิตภัณฑ์ได้จากการอัดยางที่ผสมสารเคมีแล้วเข้าไปในแม่พิมพ์ เป็นการทำให้ยางเกิดรูปร่างและคงรูปในเวลาเดียวกัน โดยอาศัยความร้อนและแรงอัด การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัดเป็นวิธีการผลิตแบบง่าย ใช้กันอย่างกว้างขวางในการแปรรูปยาง โดยนำยางที่ผสมกับสารเคมีแล้ว มาทำให้มีรูปร่างอย่างคร่าวๆ ก่อน แต่มีขนาดเล็กกว่าช่องแม่พิมพ์เล็กน้อย เพื่อจะได้แผ่กระจายเต็มช่อง

แม่พิมพ์ อุณหภูมิที่ใช้อู่ในช่วง 100 - 170 องศาเซลเซียส ส่วนของยางที่เกินความจุของช่องแม่พิมพ์ ล้นออกข้างๆ แม่พิมพ์ ไหลไปตามร่อง ซึ่งยางถูกให้ความร้อนในการคงรูปในแม่พิมพ์ชั่วระยะเวลาหนึ่ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้คงรูปไม่หลอมละลายได้อีก แล้วจึงเปิดแม่พิมพ์ ลดความดันช้าๆ นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ทำให้เย็นลง เครื่องที่ใช้มีหลายขนาดตั้งแต่ขนาดเล็กซึ่งทำงานโดยใช้มือกด จนถึงขนาดใหญ่ที่เป็นเครื่องกดอัตโนมัติระบบไฮดรอลิก

2.10 การทดสอบสมบัติของยาง

2.10.1 การวัดความหนืดของยาง

การวัดความหนืดของยาง เป็นการวัดความหนืดของยางที่เพิ่มขึ้นในขณะเกิดการคงรูป โดยอาศัยหลักการให้แรงเหวี่ยงหรือแรงบิด (Torque) แก่สารประกอบยางด้วยโรเตอร์ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วคงที่ ในสารประกอบยางประมาณ 2.00 ± 0.02 รอบต่อวินาที เครื่องมือที่ใช้วัดความหนืดของยางเรียกว่า “เครื่องมูนีวิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer)” ค่าที่วัดได้แสดงในรูปของความหนืด แสดงถึงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยาง กล่าวคือ ยางที่มีความหนืดสูงก็มีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่ำ โดยที่ยางที่มีความหนืดต่ำมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงด้วยเหตุนี้ ยางที่มีความหนืดต่ำจึงไหลได้ง่ายทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ง่าย



รูปที่ 2.23 โรเตอร์และช่องใส่ยางของเครื่องมูนีวิสโคมิเตอร์ [22]

เครื่องมูนีวิสโคมิเตอร์ประกอบด้วยโรเตอร์เป็นรูปทรงกลม ซึ่งที่ผิวของโรเตอร์เจาะเป็นร่องเพื่อป้องกันการไหลเลื่อนของยาง โดยโรเตอร์นี้อยู่ภายในช่องว่างระหว่างคายร้อน 2 อัน คือ คายบน (Upper die) และคายล่าง (Lower die) และโรเตอร์หมุนโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.23 ความหนืดของยางสัมพันธ์โดยตรงกับแรงที่ใช้ในการหมุนโรเตอร์ โดยมีหน่วยเป็น “Mooney unit

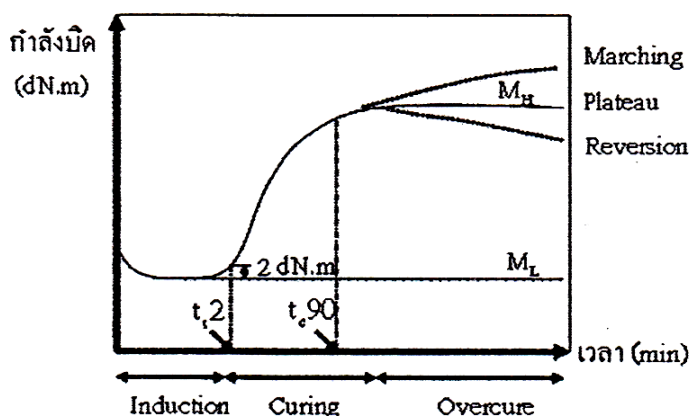
(MU)” ผลของการวัดความหนืดรายงานดังนี้ : 50 ML 1+4 (100 °C) หมายความว่า ยางมีความหนืด 50 MU วัดที่ 100 องศาเซลเซียส โดยอุ่นยางเป็นเวลา 1 นาที และอ่านความหนืดเมื่อมอเตอร์ทำงานไปแล้ว 4 นาที ส่วน L หมายถึง ขนาดของโรเตอร์ขนาดใหญ่ [22]

2.10.2 ลักษณะการคงรูปของยาง (Cure characteristics)

ภายหลังกระบวนการผสม ยางคอมปาวด์ที่ได้ต้องถูกนำไปทดสอบลักษณะการคงรูปก่อนทุกครั้ง เพราะลักษณะการคงรูปของยางสามารถบ่งชี้ได้ถึงความผิดปกติในระหว่างขั้นตอนการผสม เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบลักษณะการคงรูปของยาง ดังนี้

2.10.2.1 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating disk rheometer; ODR)

เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating disk rheometer; ODR) เป็นเครื่องมือที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับศึกษาลักษณะของการคงรูปยางโดยตรง สามารถวัดการคงรูปของยางได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ จึงเป็นเครื่องมือทดสอบการคงรูปที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมยาง และห้องปฏิบัติการทดสอบยาง เพื่อใช้ในการหาสภาวะในการคงรูปที่เหมาะสม หาเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง และใช้ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยาง หลักการทำงานของเครื่องโอดีอาร์ คือการตรวจวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยาง โดยการวัดการเปลี่ยนแรงบิด (Torque) ของจานวงกลมที่หมุนแกว่งอยู่ในตัวอย่างยางที่มีการควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นมีการบันทึกแรงที่ใช้ในการแกว่งตามเวลา ได้ผลการคงรูป (Cure curve) ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 กราฟการคงรูปที่วัดได้จากเครื่อง ODR [19]

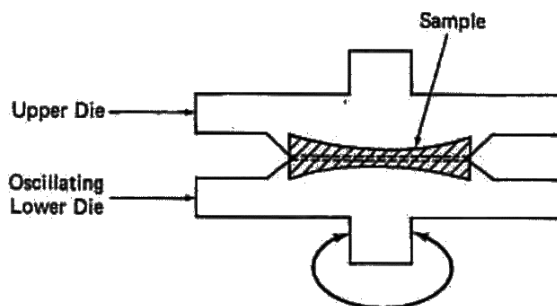
จากรูปที่ 2.22 เห็นได้ว่าลักษณะการคงรูปของยางสามารถแบ่งเป็น 3 ช่วงใหญ่ๆ ดังนี้

- ▶ **ช่วงเริ่มต้น (Induction)** เมื่อยางได้รับความร้อน ยางเริ่มอ่อนลงทำให้แรงบิดลดลงในระยะแรกๆ ของการทดสอบ จนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิของยางเริ่มเข้าสู่สมดุล ความหนืดของยางก็มีค่าต่ำสุด และมีค่าคงที่อยู่นาน จุดนี้เป็นระยะเวลาก่อนที่จะเริ่มเกิดการคงรูป โดยที่ความหนืดต่ำสุดบ่งบอกถึงความแข็งแรงของยางที่ยังไม่คงรูป (ความสามารถในการไหล) โดยใช้สัญลักษณ์ M_L
- ▶ **ช่วงการคงรูป (Curing)** ความหนืดของยางเริ่มสูงขึ้นเนื่องจากความร้อน ทำให้ยางเริ่มเกิดการคงรูป แรงบิดจึงเริ่มสูงขึ้นตามเวลา ระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มบิดตายจนถึงเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปเรียกว่า “ระยะเวลาสกอร์ช” (Scorch time) และใช้สัญลักษณ์ t_s ซึ่งระยะเวลาสกอร์ชเป็นตัวบ่งชี้ถึงระยะเวลาที่ยางยังสามารถไหลขึ้นรูปได้ ตัวแปรสำคัญอีกตัวหนึ่งที่เป็นตัวบ่งชี้ลักษณะการคงรูปของยางคือ “ระยะเวลาของการคงรูป” (Curing time) ใช้สัญลักษณ์ $t_c \times$ โดยที่ x เป็นร้อยละของการเพิ่มขึ้นของแรงบิดจากจุดต่ำสุด (M_L) เปรียบเทียบกับจุดสูงสุด (M_H) โดยทั่วไปอยู่ที่ $t_c 90$ เป็นระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้ยางคงรูปไปร้อยละ 90 และเป็นค่า “ระยะเวลาการคงรูปที่เหมาะสม” (Optimum curing time)
- ▶ **ช่วงของการคงรูปที่มากเกินไป (Overcure)** เมื่อปฏิกิริยาการคงรูปสมบูรณ์แล้ว แต่ยังคงดำเนินการทดสอบต่อไป ความร้อนที่ยางได้รับทำให้เกิด 2 ปฏิกิริยาในเวลาเดียวกัน คือ ปฏิกิริยาการคงรูป (เกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่โพลีเมอร์) และปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (เกิดการตัดขาดของสายโซ่โพลีเมอร์) ถ้า 2 ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดในอัตราเร็วใกล้เคียงกัน แรงบิดคงที่ตามเวลา (Plateau) หากเกิดปฏิกิริยาการคงรูปได้มากกว่าปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพ แรงบิดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามเวลา (Marching) แต่ถ้าปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพเกิดขึ้นได้มากกว่าปฏิกิริยาการคงรูป แรงบิดมีแนวโน้มลดลงตามเวลา เรียกว่าเกิด “Reversion”

2.10.2.2 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบค้ายเคลื่อนที่ (Moving die rheometer; MDR)

เครื่องรีโอมิเตอร์แบบค้ายเคลื่อนที่หรือเครื่องเอ็มดีอาร์ (Moving die rheometer; MDR) เป็นเครื่องวัดการคงรูปยางชนิดใหม่ที่มีการถ่ายเทอุณหภูมิรวดเร็ว เนื่องจากใช้ตัวอย่างเล็กและบางกว่า เป็นผลให้สามารถทดสอบการเชื่อมโยงได้รวดเร็วกว่า นอกจากนั้นเครื่องชนิดนี้ไม่มีข้อผิดพลาดของการทดสอบเนื่องจากแรงเสียดทานของจานหมุน ข้อมูลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำกว่า เช่น ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus, E'') อัตราการเชื่อมโยง (Cure rate) และมุมเฟส (Phase angle) เครื่องเอ็มดีอาร์

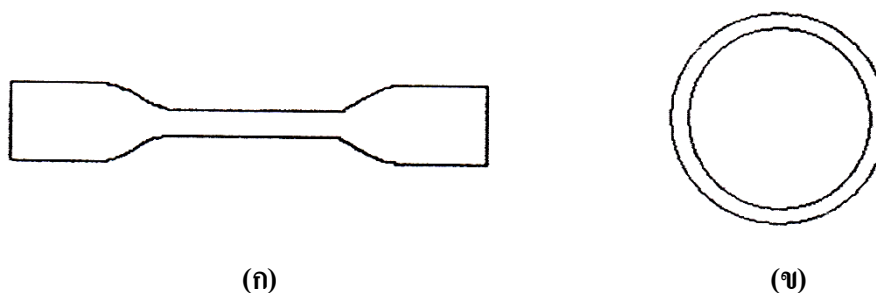
มีหลักการทำงานและวิธีการทดสอบเหมือนกับเครื่องโอคิอาร์ ยกเว้นเครื่องเอ็มคิอาร์ไม่มีโรเตอร์ มีเฉพาะคายนบนและคายนล่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องเอ็มคิอาร์ [28]

2.10.3 การทดสอบสมบัติแรงดึง (Testing of tensile properties)

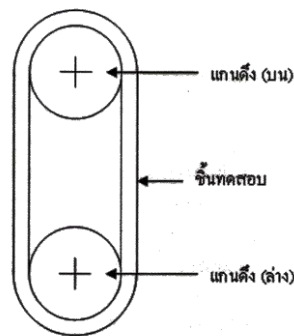
สมบัติด้านแรงดึงที่นิยมใช้ในการควบคุมคุณภาพของยาง ดังนี้ ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) การยืดตัวที่จุดขาด (Elongation at break) และมอดุลัส (Modulus) ซึ่งสามารถวัดได้โดยการดึงชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานจนขาดด้วยอัตราเร็วในการดึงคงที่ เครื่องที่ใช้ทดสอบเรียกว่าเครื่อง Universal testing machine หรือ Tensile testing machine ในระหว่างการดึง เครื่องทำการวัดและบันทึกค่าแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะการยืดตัวของยาง แล้วนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณและพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด พร้อมทั้งคำนวณความทนทานต่อแรงดึง การยืดตัวที่จุดขาด และมอดุลัสที่ความเครียดต่างๆ โดยทั่วไปชิ้นงานทดสอบต้องผ่านการคงรูปไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมง และไม่ควรเก็บชิ้นทดสอบไว้นานเกิน 28 วันหลังการคงรูป สำหรับรูปร่างของชิ้นงานทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบคัมเบลล์ และแบบวงแหวน ดังแสดงรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 รูปแบบของชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติแรงดึง

(ก) รูปคัมเบลล์ และ (ข) รูปวงแหวน [19]

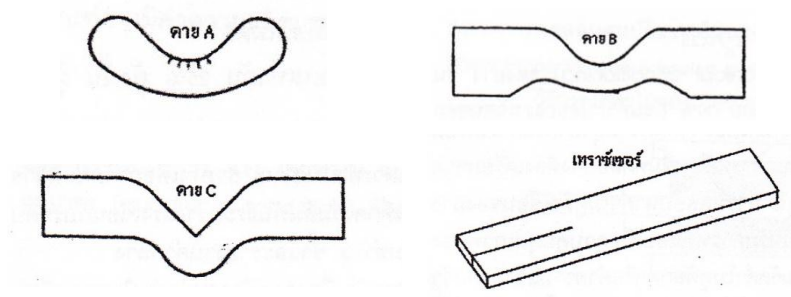
ชิ้นงานรูปวงแหวนให้ความทนทานต่อแรงดึงต่ำกว่าชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ เนื่องจากในระหว่างการดึงชิ้นทดสอบรูปวงแหวน ความเค้นและความเครียดของยางกระจายตัวไม่สม่ำเสมอบนพื้นที่หน้าตัดของยาง เพราะค่าสูงสุดที่บริเวณเส้นรอบวงด้านใน และมีค่าต่ำสุดที่บริเวณเส้นรอบวงด้านนอก ทำให้ชิ้นงานรูปวงแหวนไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากนักในห้องปฏิบัติการ แต่ชิ้นงานรูปวงแหวนมีข้อดีเหนือชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์คือ ไม่ก่อให้เกิดปัญหาการลื่นไถล (Slip) ของชิ้นทดสอบในระหว่างการดึง เพราะชิ้นทดสอบคล้องเข้ากับแกนของเครื่องดึง และสามารถวัดระยะของการดึงหรือวัดความเครียดได้โดยตรงจากระยะห่างระหว่างแกนดึงทั้งสอง แสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ลักษณะการดึงชิ้นทดสอบแบบวงแหวน [19]

2.10.4 การทดสอบความทนทานต่อการฉีกขาด (Testing of tear strength)

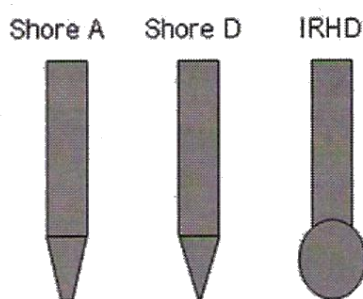
การทดสอบสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยางสามารถทำได้โดยการวัดแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน ลักษณะของการทดสอบ คล้ายคลึงกับการทดสอบสมบัติแรงดึง แต่มีรูปร่างได้หลายแบบดังแสดงในรูปที่ 2.28 ซึ่งชิ้นทดสอบทั้งหมดจัดเป็นชิ้นทดสอบที่มีรอยตำหนิตั้งต้นอยู่ เมื่อได้รับแรงดึงยางเริ่มเกิดการฉีกขาด ณ รอยตำหนิตั้งต้น ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดถูกแสดงในรูปของอัตราส่วนของแรงดึงที่ทำให้เกิดการฉีกขาดต่อความหนาของชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็นนิวตันต่อมิลลิเมตร (N/mm)



รูปที่ 2.28 ลักษณะชิ้นงานทดสอบสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาด [19]

2.10.5 การทดสอบวัดความแข็งของยาง (Hardness test)

ความแข็งเป็นการวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่บริเวณพื้นผิว ซึ่งหลักการพื้นฐาน คือนำหัวกด (Indenter) ไปกดลงบนชิ้นงานภายใต้สภาวะการทดสอบที่กำหนด ความลึกของการทะลุทะลวงของหัวกดสะท้อนให้เห็นถึงความแข็งของยาง เครื่องวัดความแข็งที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางมี 2 แบบ คือ เครื่องดูโรมิเตอร์ (Durometer) มีหลายแบบ เช่น แบบชอร์เอ (Shore A) และแบบชอร์ดี (Shore D) และเครื่องวัดความแข็งในหน่วยของ IRHD (International Rubber Hardness Degree) ดังแสดงในรูปที่ 2.29

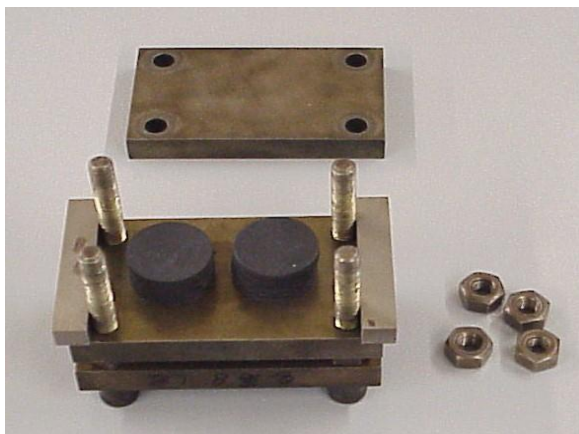


รูปที่ 2.29 ลักษณะของหัวกดแบบต่างๆ [19]

เครื่องดูโรมิเตอร์แบบชอร์เอ (Durometer shore A) นิยมใช้วัดความแข็งสำหรับยางทั่วไป ที่มีความแข็งต่ำกว่า 90 ชอร์เอ แต่สำหรับยางที่มีความแข็งสูงขึ้น นิยมใช้เครื่องวัดแบบชอร์ดี (Shore D) ชิ้นทดสอบที่นำมาทดสอบควรมีผิวแบนเรียบทั้งด้านบนและด้านล่าง และพื้นที่ทั้งสองต้องขนานกัน ค่าความแข็งที่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นทดสอบโดยเฉพาะความหนา

2.10.6 การทดสอบการยุบตัวหลังการอัด (Compression set)

การยุบตัวหลังการอัด คือการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) ที่เหลืออยู่หลังปล่อยจากความเค้นอัด (Compressive stress) หรือแรงอัดที่ทำให้ชิ้นทดสอบยุบตัว แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการคืนสู่รูปร่างเดิมของชิ้นทดสอบยาง ในการทดสอบการยุบตัวหลังการอัด ใช้ชิ้นทดสอบขนาดมาตรฐาน กดอัดด้วยอุปกรณ์สำหรับอัด ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 อุปกรณ์สำหรับทดสอบการเสีयरูปหลังการกด [29]

วิธีการทดสอบ ต้องวัดความหนาของชิ้นงานก่อนนำไปกดให้ยุบตัวด้วยเครื่องกด ระยะที่ Yang เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถูกกำหนดโดยความหนาของแผ่นรองโลหะ (Spacer bars) ที่วางคั่นอยู่ระหว่างแผ่นกดแต่ละแผ่น สำหรับชิ้นงานทดสอบขนาดใหญ่ ใช้แท่งโลหะที่มีความหนา 9.5 มิลลิเมตร แต่สำหรับชิ้นงานทดสอบขนาดเล็ก ใช้แท่งโลหะที่มีความหนา 4.5 มิลลิเมตร การใช้แท่งโลหะคั่นกลางระหว่างแหวนกด ทำให้ชิ้นงานทดสอบมีความหนาสุดท้ายเท่ากับ ความหนาของแท่งโลหะหรือ Yang เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับความหนาตั้งต้นของชิ้นงานทดสอบ จากนั้นนำชุดทดสอบไปปรับสภาวะภายใต้อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด เสร็จแล้วนำชิ้นงานออกมาวางไว้ให้เย็นเป็นเวลา 30 นาที ก่อนทำการวัดความหนาสุดท้าย และคำนวณค่าการเสีयरูปหลังการกดอัด (C) เป็นร้อยละเมื่อเทียบกับระยะที่ Yang ยุบตัวตั้งต้น โดยใช้สมการที่ 2.3

$$C = \frac{t_0 - t_f}{t_0 - t_n} \times 100 \quad (2.3)$$

เมื่อ t_n คือ ความหนาของแท่งโลหะที่ใช้ทดสอบ, มิลลิเมตร

t_0 คือ ความหนาตั้งต้น, มิลลิเมตร

t_f คือ ความหนาสุดท้าย, มิลลิเมตร

2.10.7 การทดสอบสมบัติการสึกหรอ (Testing of abrasion)

ความต้านทานต่อการสึกหรอของยาง หมายถึง ความต้านทานของยางต่อการสึกหรอเมื่อ Yang ต้องสัมผัสกับพื้นผิวขัดที่เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ซึ่งชิ้นทดสอบมาตรฐานถูกกดด้วยค่าแรงกดเฉพาะ เมื่อ Yang ได้รับการทดสอบด้วยแผ่นขัดมาตรฐาน (Abrasive cloth) ที่มีความคมหรือมีกำลังการขัดถู

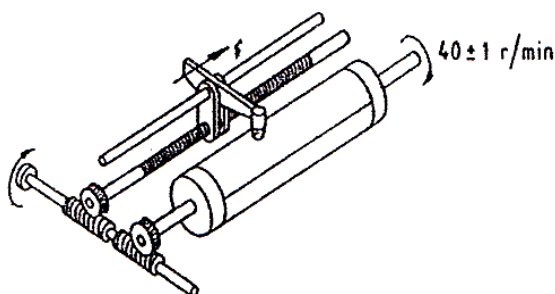
(Abrasive power, S) เท่ากับ 200 มิลลิกรัม ภายใต้ระยะทางในการทดสอบ 40 เมตร ก่อนทำการทดสอบต้องวัดปริมาตรที่สูญเสียไปของตัวอย่างมาตรฐานอย่างน้อย 3 ซ้ำทั้งก่อนและหลังการทดสอบตัวอย่าง และนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปใช้เป็นกำลังการขัดถูที่แท้จริง (Current abrasive power, S_c) ของแผ่นขัด จากนั้นจึงนำค่าปริมาตรที่สูญเสียไปของตัวอย่าง (ΔV_c) ที่วัดได้จากการใช้แผ่นขัดที่มีกำลังการขัดถูเท่ากับ S_c ไปคำนวณหาค่าปริมาตรที่สูญเสียไป ดังสมการที่ 2.4

$$\Delta V = \frac{\Delta V_c}{S_c} \times 200 \quad (2.4)$$

การทดสอบตามมาตรฐาน DIN 53516 ดังรูปที่ 2.31 ชิ้นงานทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร และมีความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร ถูกกดด้วยแรงคงที่ 10 นิวตันโดยให้สัมผัสกับพื้นผิวขัดคอร์ันดัม (Corundum) ที่พันอยู่รอบลูกกลิ้งที่หมุนด้วยอัตราเร็ว 40 รอบต่อวินาที ในระหว่างการทดสอบ ชิ้นงานถูกบังคับให้เคลื่อนที่ในแนวระนาบจากซ้ายไปขวาด้วยอัตราเร็ว 4.2 มิลลิเมตรต่อรอบการหมุนของลูกกลิ้ง จากนั้นวัดน้ำหนักของชิ้นทดสอบที่สูญเสียไป (Δm) หลังจากขัดถูเป็นระยะทาง 40 เมตร หรือ 84 รอบของลูกกลิ้ง เมื่อได้น้ำหนักที่สูญเสียไปแล้วก็สามารถคำนวณหาปริมาณของยางที่สูญเสียไป (ΔV_c) ได้จากสมการที่ 2.5

$$\Delta V_c = \frac{\Delta m}{\rho} \quad (2.5)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความหนาแน่นของยาง



รูปที่ 2.31 ลักษณะของเครื่องทดสอบตามมาตรฐาน DIN 53516 [19]

2.10.8 การทดสอบสมบัติความทนทานต่อของเหลว (Testing of resistance to fluids)

โดยทั่วไป ของเหลวที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นของเหลวชนิดเดียวกับที่ผลิตภัณฑ์ชิ้นนั้นๆ ต้องสัมผัสในสภาวะการใช้งานจริง หลักการทั่วไปของการทดสอบคือ นำชิ้นทดสอบไปแช่ในของเหลวภายใต้อุณหภูมิและระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นตรวจสอบการบวมพองของยาง หรือการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร ซึ่งการวัดการบวมพองเป็นดัชนีพื้นฐานที่บ่งบอกถึงความทนทานต่อของเหลวของยาง นอกจากนี้ ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลอื่นๆ เช่น ความแข็ง ความทนทานต่อแรงดึงควบคู่กันไปด้วย วิธีการทดสอบสมบัติความทนทานต่อของเหลวของยางสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

2.10.8.1 การวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักหรือปริมาตร

ชิ้นทดสอบสำหรับการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักหรือปริมาตรมีรูปร่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาด 25x50x2 มิลลิเมตร ผลการทดสอบแสดงในรูปของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักหรือปริมาตรดังแสดง ดังนี้

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก (\%)} = [(M_2 - M_1)/M_1] \times 100$$

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร (\%)} = [(V_2 - V_1)/V_1] \times 100$$

เมื่อ	M_1	คือน้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนแช่ในของเหลว, กรัม
	M_2	คือน้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังแช่ในของเหลว, กรัม
	V_1	คือปริมาตรของชิ้นทดสอบก่อนแช่ในของเหลว, ลูกบาศก์เซนติเมตร
	V_2	คือปริมาตรของชิ้นทดสอบหลังแช่ในของเหลว, ลูกบาศก์เซนติเมตร

2.10.8.2 การวัดการเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึง และความแข็ง

ชิ้นทดสอบที่ใช้มีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ ดายซี ตามมาตรฐาน ASTM D412 การทดสอบต้องเตรียมชิ้นทดสอบจำนวน 2 ชุด โดยชิ้นทดสอบชุดแรกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลก่อนแช่ในของเหลว ในขณะที่ชิ้นทดสอบชุดที่ 2 นำไปทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการแช่ในของเหลว และนำผลการทดสอบที่ได้ก่อนและหลังการแช่ในของเหลวมาเปรียบเทียบกัน [19]

2.10.9 การบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน (Heat aging)

การทดสอบการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน หรือสมบัติความทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนของยางนั้น ในการใช้งานจริงยางต้องสัมผัสกับทั้งออกซิเจนและความร้อน ซึ่งความร้อนเป็นตัวเร่งให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับยางได้เร็วยิ่งขึ้น ทำให้ยางเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าการทดสอบภายใต้สภาวะที่มีความร้อนเพียงอย่างเดียว ด้วยเหตุนี้ การทดสอบสมบัติความทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนของยางจึงนิยมทำภายใต้บรรยากาศปกติหรือภายใต้ ออกซิเจน ดังนั้น ผลการทดลองที่ได้จึงเป็นผลอันเนื่องมาจากทั้งความร้อนและออกซิเจน [19]

ในสภาวะอุณหภูมิที่สูง (Elevated temperature) ทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางเร็วขึ้น และเร่งการเสื่อมสภาพของยางให้เร็วขึ้น ดังนั้น จึงมีวิธีทดสอบตามมาตรฐานการเร่งอายุด้วยความร้อน หรือ อุณหภูมิสูง เพื่อประเมินสมบัติของยางเมื่อมีอายุการใช้งานมากขึ้น โดยการทดสอบคือนำยางไปอบในตู้อบที่มีอากาศไหลเวียนอย่างสม่ำเสมอ หรือ อบภายใต้บรรยากาศของออกซิเจนที่มีความดันสูง ที่อุณหภูมิต่างๆ เช่น ยางธรรมชาติ อบที่ 70 องศาเซลเซียส สำหรับยางสังเคราะห์ อบที่ 100 องศาเซลเซียส หรือ 120 องศาเซลเซียส เป็นต้น

2.11 บทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง

สุวรรณ เหลือล้ำ [30] ศึกษาอิทธิพลของสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติการทนน้ำมันและสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทธิลีน โดยทดลองใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ 3 ชนิดด้วยกันคือ ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ (ENR) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และเอทธิลีน-เมทิลอะครีเลต โคพอลิเมอร์ (EMA) เพื่อศึกษาถึงสมบัติการทนต่อน้ำมันไบโอดีเซล ดีเซลเบนซิน และแก๊สโซฮอล์ ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และศึกษาสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทธิลีน ที่อัตราส่วนผสม 50:50 พบว่าสารเพิ่มความเข้ากันได้ทั้ง 3 ชนิดไม่ส่งผลต่อความเข้ากันได้ของยางผสม แต่สารเพิ่มความเข้ากันได้ช่วยให้ยางผสมทนน้ำมันได้มากขึ้นที่อุณหภูมิห้อง โดยสมบัติการทนน้ำมันของยางผสมที่มี PVC ดีที่สุด และพบว่า สารเพิ่มความเข้ากันได้ไม่ช่วยสมบัติการทนต่อแรงฉีกขาด ความแข็ง และการคงทนต่อความร้อน

รัตนวรรณ และ ชมัยพร [31] ศึกษาสมบัติเชิงกลและการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซตระหว่างยางฟลูออโรคาร์บอน ยางธรรมชาติ และเอชดีพีอี ที่มีสัดส่วนการผสม

ของยางฟลูออโรคาร์บอนและยางธรรมชาติที่ปริมาณต่างๆ และศึกษาผลของการเติม organoclay พบว่า หลังจากแช่ชิ้นงานในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10 และ E20 ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน สูตรยางที่มีปริมาณของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น มีค่าการบวมตัวของยางในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิดต่างๆ เพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อมีการเติมออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) ในสูตรยาง ส่งผลให้ค่าการบวมตัวของยางลดลง ยางมีความทนทานต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์มากขึ้น

สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. [32] ศึกษาผลของแก๊สโซฮอล์ต่อวัฏระบบเชื้อเพลิง โดยทำการทดสอบยางสามชนิด คือ ยางเอ็นบีอาร์ ยางเอชเอ็นบีอาร์ และยางฟลูออโรคาร์บอน แช่ในน้ำมันเบนซินและน้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 42 วัน พบว่า ยางเอชเอ็นบีอาร์ กับยางฟลูออโรคาร์บอนมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรหลังการจุ่มแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่ใกล้เคียงกันมาก

G. Micalef [33] ศึกษาสมบัติเชิงกลและการทนน้ำมันแก๊สโซฮอล์ของยางฟลูออโรคาร์บอน และการใช้สารคงรูปยาง 2 ชนิด คือ Bisphenol และ Peroxide พบว่า สมบัติการทนน้ำมันของยางฟลูออโรคาร์บอนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E85 และ E22 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 168 ชั่วโมง พบว่า ยางเกิดการบวมตัว (Swelling) ในน้ำมันมีค่าระหว่าง 10-14 เปอร์เซ็นต์ และ 18-32 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพบว่า สมบัติความต้านแรงดึงโดยรวมลดลงมากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความแข็งแรงลดลงมากกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนผลการเติมสารที่ใช้คงรูปยาง พบว่า สาร Peroxide ส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงานยางมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าการใช้สาร Bisphenol หลังทำการบ่มเร่งชิ้นงานทดสอบในน้ำมัน

E. Thomas [34] ศึกษาความเข้ากันได้ของยางฟลูออโรอีลาสโตเมอร์กับเอทานอลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพในยานยนต์ สำหรับนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ยางซีลและท่อส่งน้ำมัน โดยได้เลือกใช้ยางฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ (FKM) ที่มีส่วนประกอบของฟลูออรีน (Fluorine) มอนอเมอร์ ที่ปริมาณแตกต่างกัน และทดสอบโดยการแช่ยางฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ในน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีเอทานอลอยู่ในปริมาณต่างๆ ซึ่งผสมอยู่กับเชื้อเพลิงผสมระหว่างไอโซออกเทน (Isooctane) และโทลูอีน (Toluene) ผลการทดสอบ พบว่า ยางฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่มีฟลูออรีนมอนอเมอร์อยู่ในปริมาณที่สูง ทำให้สมบัติทางกายภาพ ทางด้านความแข็ง ความต้านทานแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ดีกว่า หลังจากการจุ่มแช่ในน้ำมันเชื้อเพลิง และนอกจากนี้แล้วยางฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่มีฟลูออรีนมอนอเมอร์อยู่ในปริมาณที่สูง ทำให้ชิ้นงานบวมตัวและการแพร่ผ่านของน้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณน้อยกว่า ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเติมเอทานอล พบว่า การจุ่มแช่ชิ้นงานทดสอบลงในน้ำมันเชื้อเพลิงผสม ชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลมากกว่าการจุ่มแช่ในเอทานอล 100 เปอร์เซ็นต์

A. Hussein และคณะ [3] ศึกษาความเข้ากันได้และสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างเอ็นปีอาร์กับยางเอชเอ็นปีอาร์ ที่มีอัตราส่วน คือ 0:100, 10:90, 30:70, 50:50, 70:30, 90:10 และ 100:0 โดยใช้ยางเอชเอ็นปีอาร์กับยางเอ็นปีอาร์ที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์และความหนืดไม่แตกต่างกัน ทำการทดสอบการไหล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยา พบว่า ยางเอชเอ็นปีอาร์กับยางเอ็นปีอาร์ไม่สามารถผสมเข้ากันได้เป็นเฟสเดียวกันทางเทอร์โมไดนามิกส์ แต่สามารถผสมเข้ากันได้ทางกล โดยยางผสมที่ได้แสดงค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) 2 ค่า และในส่วนของ การทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า ยางเอชเอ็นปีอาร์มีค่ามอดุลัสต่ำกว่ายางเอ็นปีอาร์ เนื่องจากยางเอชเอ็นปีอาร์มีความยืดหยุ่นของสายโซ่โมเลกุลมากกว่ายางเอ็นปีอาร์ และพบว่า ยางเอชเอ็นปีอาร์มีค่าความเค้น (Stress) สูงกว่ายางเอ็นปีอาร์ เนื่องจากยางเอชเอ็นปีอาร์สามารถเกิด Strain hardening ได้ดีกว่ายางเอ็นปีอาร์

N. Sombatsompop และคณะ [35] ศึกษาสมบัติการไหล สมบัติเชิงกล และความสามารถในการต้านทานน้ำมันของยางเอ็นปีอาร์ที่มีผงเขม่าดำผสมอยู่ปริมาณ 60 phr รวมถึงผลของการเติมผงซิลิกาเกรดการค้าและถั่วลอยที่ปริมาณต่างๆ ในยางเอ็นปีอาร์ พบว่า ผลของการเติมผงซิลิกาเกรดการค้าในยางเอ็นปีอาร์ทำให้เวลาการไหลก่อนบ่มสุก (Scorch time) และเวลาในการบ่มสุก (Cure time) ลดลง ในขณะที่การเติมถั่วลอยส่งผลให้เพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกล พบว่า ผลของการเติมผงซิลิกาเกรดการค้าและถั่วลอยทำให้ค่าความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานยางที่ผสมผงซิลิกามีค่าดังกล่าวที่สูงกว่า นอกจากนี้ พบว่า ผลของการบ่มเร่งชิ้นงานยางในน้ำมันไฮดรอลิกที่อุณหภูมิสูง ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางลดลงอย่างชัดเจน

C. Kantala และคณะ [5] ศึกษาผลของการเติมซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาในถั่วลอยที่มีต่อสมบัติเชิงกลและการบ่มสุกของวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางเอ็นปีอาร์ โดยเปรียบเทียบสมบัติของชิ้นงานยางหลังการทดสอบด้วยการบ่มเร่งด้วยความร้อน และการบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมัน พบว่า การเติมซิลิกาเกรดการค้าในวัสดุยางผสมทำให้เวลาการไหลก่อนบ่มสุก และเวลาในการบ่มสุก ลดลง โดยเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาทำให้ความหนืดของยางผสมเพิ่มขึ้น ในส่วนของการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า การเติมซิลิกาเกรดการค้าส่งผลให้ยางผสมมีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลในทุกกรณีที่ดีกว่าการเติมซิลิกาจากถั่วลอย โดยใช้ซิลิกาเกรดการค้าเป็นสารเสริมแรงให้กับยางผสม ในขณะที่ซิลิกาในถั่วลอยทำหน้าที่กึ่งสารเสริมแรงหรือเป็นสารเพิ่มเนื้อ และเมื่อบ่มเร่งด้วยความร้อน สมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางเพิ่มขึ้น ในขณะที่การบ่มเร่งชิ้นงานด้วยความร้อนในน้ำมัน ส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมลดลงอย่างชัดเจน

L. White และ G. Severe [36] ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ และความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมของยางเอชเอ็นบีอาร์ โดยได้เลือกใช้ยางเอชเอ็นบีอาร์และยางเอ็นบีอาร์ที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ต่างกัน ตั้งแต่ 16.37 เปอร์เซ็นต์ ไปจนถึง 51.4 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบสมบัติทางความร้อน พบว่า ยางเอชเอ็นบีอาร์และยางเอ็นบีอาร์เกรดที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์สูงๆ มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ที่สูงกว่ายางเกรดที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ต่ำ โดยยางเอชเอ็นบีอาร์มีแนวโน้มที่มีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) สูงกว่ายางเอ็นบีอาร์ และจากการทดสอบ XRD พบว่า ยางเอชเอ็นบีอาร์เกรดที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์สูงมีความเป็นผลึก ส่วนที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ต่ำๆ ไม่พบผลึก ในส่วนของการทดสอบความเข้ากันได้ของวัสดุผสมระหว่างยางเอชเอ็นบีอาร์กับยางชนิดอื่นๆ พบว่า ของผสมระหว่างยางเอชเอ็นบีอาร์กับ Hydrocarbon elastomer ไม่สามารถผสมเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียว เนื่องจากความมีขั้วและโครงสร้างที่แตกต่างกัน ทำให้ขาดแรงกระทำระหว่างโมเลกุล ความเข้ากันได้พบในของผสมระหว่างยางเอชเอ็นบีอาร์กับพอลิเมอร์ที่มีปริมาณของคลอรีนสูง

Kongvasana N. และคณะ [37] ศึกษาสมบัติของวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่สัดส่วนการผสมต่างๆ โดยมีถั่วลอยและพรีซิพิตเตชันซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารกลุ่มควาไซเลนเป็นสารตัวเติม และทดสอบภายใต้สภาวะบ่มเร่งด้วยความร้อนและน้ำมัน พบว่าการปรับปรุงผิวพรีซิพิตเตชันซิลิกาและถั่วลอยด้วยสารกลุ่มควาไซเลนส่งผลให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น ยกเว้นค่าการยืดตัว ณ จุดขาด และความแข็งที่ผิว สำหรับผลของการบ่มเร่งวัสดุยางผสม พบว่า ขึ้นงานที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนมีสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่เพิ่มขึ้น ยกเว้นค่าความแข็งแรงสูงสุด และการยืดตัว ณ จุดขาด ทั้งนี้เกิดจากผลของการบ่มตัวต่อเนื่องหลังปฏิกิริยาคัลคาไนเซชันในเฟสของยาง ส่วนการบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมมีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะวัสดุยางผสมที่มีสัดส่วนปริมาณยางธรรมชาติสูง

สิทธิบัตรสหรัฐอเมริกา [38] เลขที่ 5,356,681 ชื่อ “Multi-layer rubber hose and method for producing the same” โดย Ichikawa และคณะ ศึกษาการสร้างท่อส่งน้ำมันที่ทำจาก mutli-layer rubber และศึกษากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากชั้นของยางฟลูออโรคาร์บอน (FKM) และชั้นของยางไนไตรล์ (NBR) ที่มีการทำให้เกิดการเชื่อมขวาง และการยึดเกาะกัน โดยใช้ระบบของ peroxide ในการทำให้เกิดการเชื่อมขวาง โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของสารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) ที่ใช้ในการผสม เพื่อให้ได้ FKM compound และ NBR compound ที่เหมาะสม พบว่า ทำให้ได้ท่อส่งน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับใช้กับรถยนต์ที่มีความเหมาะสมและมีความต้านทานต่อแก๊สโซฮอล์สูง

สิทธิบัตรสหรัฐอเมริกา [39] เลขที่ 4,996,264 ชื่อ “Thermoplastic and elastomeric composition” โดย Aonuma และคณะ ศึกษายางทนน้ำมันที่ใช้ในงานเกี่ยวกับยานพาหนะ ซึ่งได้ศึกษาองค์ประกอบขึ้นจากยาง NBR ที่มีเกิดการ hydrogenate ไปบางส่วนและ vinyl chloride resin โดยให้มีการเกิดการเชื่อมขวางขึ้นในยางผสม ได้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ NBR และ vinyl chloride resin ที่ใช้ในการผสมเพื่อให้ได้ยางที่เหมาะสมกับการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับรถยนต์ที่ทนน้ำมัน เช่น สายยางส่งน้ำมัน ซิล เป็นต้น โดยนำตัวอย่างที่ได้ไปจุ่มแช่ลงในน้ำมันชนิดต่างๆ แล้วดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น พบว่าปริมาณของ NBR ที่เหมาะสมคือ 10 - 70 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของของผสม และปริมาณของ vinyl chloride resin ที่เหมาะสม คือ ต้องมีน้ำหนักไม่น้อยกว่า 5 ส่วนในของผสม 100 ส่วน โดยทำให้ได้ยางที่มีความสามารถในการต้านทานโอโซนและน้ำมันเบนซินที่สูง และนอกจากนี้ ยางที่ได้สามารถต้านทานต่อแก๊สโซฮอล์ได้ด้วย