

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แกลบ ^[2,5,8]

แกลบเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการสีข้าวเปลือกนั้นนับได้ว่าสร้างปัญหาให้กับสังคมและสิ่งแวดล้อมมาก แม้ว่าจะได้มีความพยายามที่จะนำแกลบไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ แต่ยังมีแกลบอีกจำนวนมากที่ต้องนำไปกำจัด ซึ่งปัจจุบันใช้วิธีฝังกลบทำให้เกิดปัญหาหมอกควันทั้งทางน้ำและอากาศ ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงได้มีการศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างของแกลบ พบว่าแกลบมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบและสามารถสกัดออกมาเพื่อนำไปใช้ทดแทนซิลิกาทางการค้าได้จากองค์ความรู้ที่นอกจากจะลดปริมาณแกลบที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งแล้วยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับแกลบอีกด้วย

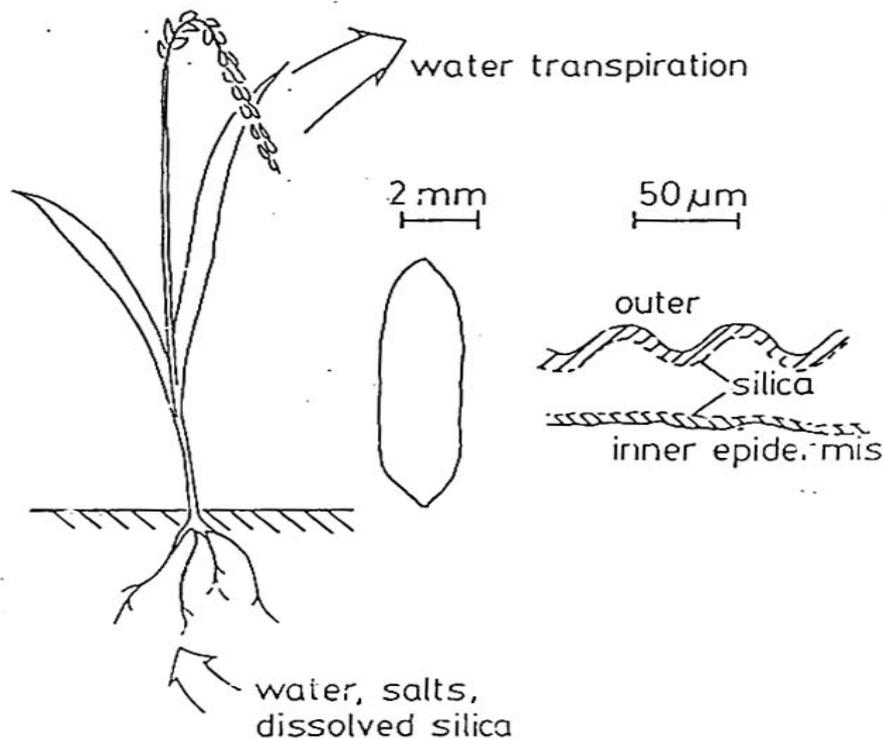
การใช้ประโยชน์จากแกลบ เช่น

1. ใช้สกัดสารซิลิกา
2. ใช้เป็นสารสำหรับใช้ในการกรอง
3. ใช้เป็นเชื้อเพลิง แกลบจะให้ปริมาณความร้อนประมาณ 3,800 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับถ่านไม้ (4,500-5,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม) จึงใช้แกลบแทนถ่านไม้ได้
4. ใช้ผสมกับดินเหนียวทำอิฐ จะทำให้อิฐที่ได้แข็งแรงและสามารถตัดเจาะรู หรือตอกตะปูได้
5. ใช้ผสมกับดินทำให้ดินร่วนซุยไม่แน่นทึบ และช่วยอุ้มน้ำได้ดี
6. ใช้ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เช่น ไก่หรือสุกร โดยใช้แกลบรองพื้น ทำให้พื้นไม่ชื้นแฉะและไม่มีกลิ่นเหม็น
7. เป็นแหล่งธาตุอาหารของพืช โดยใช้ผสมกับแอมโมเนียฟอสเฟต (16-20-0) ช่วยให้เกิดข้าวเพิ่มขึ้นจากการใช้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว 5-24 เปอร์เซ็นต์
8. ใช้เป็นฉนวนความร้อน เช่น คลุมน้ำแข็งไม่ให้ละลายง่าย แกลบที่ใช้งานแล้วสามารถนำไปใช้คลุมโคลนต้นไม้ เพื่อให้ความชุ่มชื้น เพื่อช่วยให้ความชุ่มชื้นป้องกันการสูญเสียน้ำจากดิน

2.2 ซิลิกาจากแกลบ ^[2,6]

ในธรรมชาตินั้นสามารถพบซิลิกาในพืชหลายชนิด ซึ่งซิลิกาเป็นส่วนประกอบในโครงสร้างโดยพืชเหล่านี้สามารถนำซิลิกาเข้ามาในลำต้นได้ในรูปสารละลายเท่านั้น สำหรับต้นข้าวเป็นแหล่งสะสมซิลิกาปริมาณมาก โดยสารละลายซิลิกาจะถูกดูดซึมเข้าไปยังต้นข้าว และสะสมอยู่

ทั้งในลำต้น ใบ และกลีบ ซึ่งทุกส่วนของต้นข้าวจะมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลีบจะมีซิลิกาสะสมอยู่มากที่สุดถึง 23.2%



รูปที่ 2.1 การดูดซึมและการสะสมซิลิกาในต้นข้าว^[7]

2.2.1 องค์ประกอบของกลีบ^[8]

เมื่อนำกลีบมาเผาจะได้เถ้ากลีบ ซึ่งมีปริมาณ 16.4-18.3 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบทางเคมีของเถ้ากลีบแสดงดังตารางที่ 1 และจากตารางที่ 2 จะเห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของเถ้ากลีบ คือ ซิลิกา (SiO_2) มีประมาณ 86.9-97.3 เปอร์เซ็นต์ เถ้ากลีบที่เผาได้มีลักษณะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสภาวะที่เผาคือ

1. เถ้ากลีบดำ เกิดจากการเผาเถ้ากลีบที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้มีคาร์บอนเหลืออยู่มาก (5-30 เปอร์เซ็นต์) เถ้ากลีบลักษณะนี้นำไปทำสารดูดกลิ่น
2. เถ้ากลีบสีขาว เกิดจากการที่เผาเถ้ากลีบในอุณหภูมิสูงและมีอากาศเพียงพอ เถ้ากลีบชนิดนี้ใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุทนไฟ ซึ่งทนได้ถึง $1,400^\circ\text{C}$ หรือใช้หลอมทำแก้ว แทนทรายขาวหรือใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมสารประกอบซิลิกาอื่นๆ

ตารางที่ 2.1 สมบัติและองค์ประกอบของเถ้าแกลบ^[8]

สมบัติ	เปอร์เซ็นต์
ความชื้น	8.1 – 11.5
เถ้า	16.4 – 18.3
คาร์บอน	19.2 – 20.7
สารระเหย	61.1 – 64.4
กำมะถัน	0.1 – 0.2
เซลลูโลส	42.1 – 46.6
ลิกนิน	22.1 – 22.8
เพนโทแซน	13.9 – 18.3
แป้ง	7.6 – 7.9
เส้นใย	39.1 – 41.1
โปรตีน	1.8 – 1.9
ไขมัน	0.28 – 0.31
พลังงานความร้อน(กิโลแคลอรี/กิโลกรัม)	3790 – 4000
ความหนาแน่น(กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	105 – 107

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ^[8]

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์
SiO ₂	86.9 – 97.3
K ₂ O	0.58 – 2.5
Na ₂ O	0.0 – 1.75
CaO	0.2 – 1.5
MgO	0.12 – 0.96
Fe ₂ O	0.0 – 0.54
P ₂ O ₅	0.2 – 2.85
SO ₃	0.10 – 1.13
Cl ₂	0.0 – 0.42

2.2.2 การผลิตซิลิกาจากแกลบ^[7,9,10,11] แ่้าจากแกลบประกอบไปด้วยซิลิกาที่เป็นอสัณฐานเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งการนำแกลบมาล้างทำความสะอาด เพื่อขจัดเศษดินให้หมดไป แล้วนำมาทำปฏิกิริยากับกรดซึ่งช่วยทำลายโมเลกุลของลิกนินให้เล็กลง สำหรับการนำแกลบมาทำปฏิกิริยากับกรดนั้น สามารถใช้ได้กับกรดหลายชนิด เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก นอกจากนี้ยังสามารถทำได้หลายวิธี เช่น รีฟลักซ์แกลบด้วย 1N HCl แล้วนำไปเผาที่ 800°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง มีซิลิกาอสัณฐานเป็นองค์ประกอบ 99.33 wt% หรืออาจจะนำแกลบเข้ามาแช่ด้วยสารละลายไฮโดรคลอริก แล้วนำไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 -1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิบรรยากาศ ซิลิกามีองค์ประกอบอยู่ 99.14 – 99.79 %

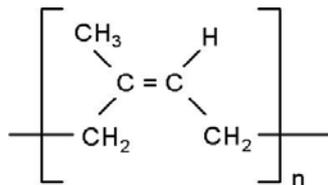
2.3 ซิลิกา (SiO₂)^[8,12,13]

เป็นผลึกไม่มีสี หรือ เป็นของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความหนาแน่น 2.635 g/cm³ จุดหลอมเหลว 1,710 °C จุดเดือด 2,230 °C ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมาก ซิลิกาเป็นสารที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่ละลายได้ในกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) และละลายในด่างได้ซิลิเกต (Silicates)



2.4 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)^[14,15]

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) กล่าวคือในโมเลกุลยาง 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C₅H₈) มาต่อกันเป็นสายยาว (แบบเส้นตรง) โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 4000,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 g/cm³ ที่อุณหภูมิ 20°C และมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ -72°C นั้นหมายความว่าหากนำยางธรรมชาติไปเก็บไว้ในที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า -72°C สมบัติของยางธรรมชาติจากเปลี่ยนจากที่เคยยืดหยุ่นไปเป็นของแข็งเปราะเช่นเดียวกับแก้ว



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ^[14]

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าใน 1 หน่วยของไอโซพรีนจะมีพันธะคู่และมีหมู่แอลฟาเมทิลีน (α -methylene) ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกัมมันต์อยู่ ดังนั้น พันธะคู่ที่มีอยู่ใน โมเลกุลของยางจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการคงรูปด้วยกัมมันต์

รูปแบบของยางธรรมชาติ

1. น้ำยาง เนื่องจากน้ำยางสดที่กรีตได้จากต้นยางมีปริมาณน้ำมากเกินไป ไม่เหมาะที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์และยังทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องนำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifugation) เพื่อลดปริมาณน้ำในน้ำยางสดจนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นจาก 30% เป็น 60 % โดยน้ำหนัก เรียกน้ำยางนี้ว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) แต่เนื่องจากในน้ำยางมีสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น โปรตีน และ ฟอสโฟไลปิด ผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อย ดังนั้น น้ำยางจึงสามารถบดเน่าส่งกลิ่นเหม็นได้ จึงต้องมีการเติมสารแอมโมเนียลงไปหรืออาจใช้แอมโมเนียร่วมกับสารเคมีอื่นๆ เพื่อช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน

2. ยางแห้ง ได้จากการนำน้ำยางสดที่กรีตได้มาเติมกรด (นิยมใช้กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก หรือ กรดซัลฟูริก) เพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็ทำการไล่ความชื้นออกจากเนื้อยางเพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา

สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

1. ความยืดหยุ่น (elasticity) ยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว

2. ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถแตกหักได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง

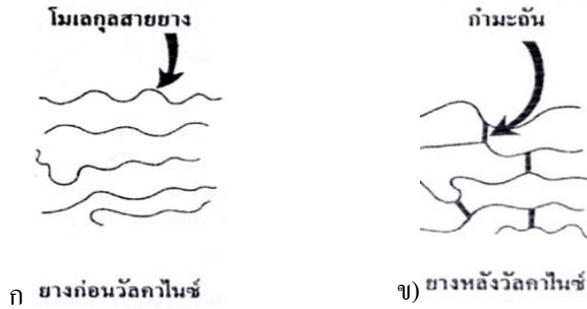
3. ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถแตกหักได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้น

4. ความเสียดทาน (friction) และความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) ความเสียดทานและการสึกหรอเป็นสิ่งที่สัมพันธ์กันเนื่องจากการสึกหรอเกิดจากกระบวนการสูญเสียเนื้อวัสดุไปในระหว่างการเกิดความเสียดทานหรือการขัดถู ถ้าไม่มีความเสียดทานเกิดขึ้น การสึกหรอก็จะไม่เกิด สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอของยางจะเรียกกันโดยทั่วไปว่าความต้านทานต่อการขัดถู

5. ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (liquid and chemical resistance) เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางดิบจึงจะละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้าเกิดการคงรูปเนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ในยางคงรูปจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเพียงแต่เกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านี้เท่านั้น อย่างไรก็ตาม การบวมตัวของยางดังกล่าวจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางค่อยลงด้วยเหตุนี้ ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรืออัลกอฮอล์ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังทนต่อกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดไนตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

6. การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซนและแสงแดด (aging properties) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดส์ได้ง่าย นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อยางถูกยืดและได้รับโอโซนนานๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยางด้วยเหตุนี้ ในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (anti-degradants) และไข (wax)) ลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

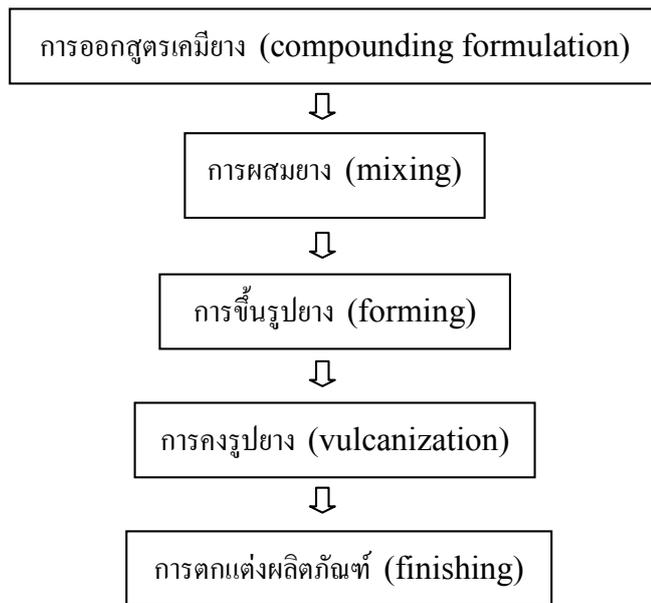
สมบัติของยางตามที่คนส่วนใหญ่เข้าใจนั้นจะเป็นสมบัติของยางคงรูป (vulcanized rubber) เท่านั้น เพราะยางดิบมีข้อจำกัดในการใช้งานต่างๆ มากมาย เช่น มีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีและสมบัติเชิงกลเหล่านี้ก็เปลี่ยนแปลงได้ง่ายตามอุณหภูมิ นอกจากนี้ ยางดิบยังมีความทนทานต่อสารเคมีและสารละลายต่างๆ ต่ำ อีกทั้งยังไม่สามารถคงรูปได้หลังจากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาหรือปรับปรุงคุณภาพของยางเพื่อให้เหมาะกับการใช้งาน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ต้องทำการเปลี่ยนสภาพจากยางดิบให้เป็นยางสุกหรือ “ยางคงรูป” ก่อนโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาคัลคาไนเซชันหรือปฏิกิริยาคงรูป (vulcanization reaction) ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจากที่เคยเป็นยางดิบ (มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก) คืออยู่ในสภาพที่สามารถไหลได้ง่ายไปเป็นยางคงรูปซึ่งไม่สามารถไหลได้อีก (มีสมบัติเป็นเทอร์โมเซต) เพราะปฏิกิริยาคงรูปจะทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างร่างแห 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ยางคงรูปที่ได้จึงมีความยืดหยุ่นและมีเสถียรภาพทางรูปร่างสูงขึ้น จึงจะสามารถนำยางดังกล่าวไปใช้งานในทางวิศวกรรมได้



รูปที่ 2.3 โมเดลแสดงลักษณะโมเลกุลของยาง ^[17]

ก) ลักษณะโมเลกุลยางก่อนการวัลคาไนซ์ ข) ลักษณะโมเลกุลยางหลังวัลคาไนซ์

ผลิตภัณฑ์ยางที่เรานำไปใช้ในชีวิตประจำวันเกือบทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นยางรัดของ ยางล้อรถ ท่อยาง ลูกโป่ง ถุงมือยาง จุกหัวนมยาง หรือแม้แต่ถุงยางอนามัย ก็ล้วนแล้วแต่เป็นยางที่ผ่านกระบวนการแปรรูปเพื่อให้ยางเกิดการคงรูปแล้วทั้งสิ้น ในภาพรวมแล้วการแปรรูปจากยางดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์ยางนั้นมีขั้นตอนหลักๆ อยู่ 5 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนผังแสดงกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ^[16]

2.4.1 การออกสูตรผลิตภัณฑ์ยาง ^[17]

สูตรการผสมเคมีพื้นฐานมักประกอบไปด้วยสารเคมีและสารตัวเติมชนิดต่างๆ มากมาย สารเคมีแต่ละชนิดเหล่านี้ล้วนมีหน้าที่เฉพาะอย่าง ดังนั้น ผู้ออกสูตรการผสมเคมียางจึงต้องเลือกใช้ชนิดและปริมาณของสารเคมีด้วยความระมัดระวัง เพราะสารเคมีเหล่านี้ไม่เพียงจะมีผลโดยตรงต่อสมบัติของยาง แต่ยังมีผลต่อกระบวนการผลิตและต้นทุนอีกด้วย ปัจจุบัน ได้มีการผลิตสารเคมีและ

สารตัวเติมชนิดต่างๆ มากมายให้เลือกใช้ตามความเหมาะสม ด้วยเหตุนี้ ในการออกสูตรการผสมเคมียางเพื่อให้ได้ยางที่มีคุณภาพดีตรงตามความต้องการและมีต้นทุนต่ำที่สุด ผู้ออกสูตรจำเป็นต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับหน้าที่และประสิทธิภาพของสารเคมีและสารตัวเติมแต่ละชนิด

โดยทั่วไป วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 8 กลุ่มหลัก ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การแบ่งกลุ่มขององค์ประกอบที่ใช้ในการผสมเคมียาง^[17]

กลุ่ม	องค์ประกอบ
1	ยาง (elastomers)
2	สารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agents)
3	สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerators)
4	สารกระตุ้นและสารหน่วงปฏิกิริยา (activators and retarders)
5	สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradants)
6	สารตัวเติม (fillers)
7	สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (plasticizers and processing aids)
8	องค์ประกอบอื่นๆ เช่น สี (pigments) สารทำให้เกิดฟอง (blowing agents) สารหน่วงการติดไฟ (flame retardants) เป็นต้น

การออกสูตรการผสมเคมียางนิยมใช้หน่วย phr (parts per hundred of rubber) นั่นคือจะใช้สารเคมีในปริมาณที่เทียบกับ 100 ส่วน (โดยน้ำหนัก) ของยาง เช่น ใช้ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) 5 phr หมายถึงถ้าใช้ยางดิบ 100 กรัม ก็จะต้องเติมซิงก์ออกไซด์ลงไป 5 กรัม เป็นต้น

2.4.1.1 ยาง^[14,18,19]

ชนิดของยางที่ใช้ในอุตสาหกรรม

1) ยางแผ่น (Rubber Sheet) ยางแผ่นได้จากการนำน้ำยางสดมาใส่ในตะกง จากนั้นจึงเติมน้ำเพื่อเจือจางน้ำยางให้มีปริมาณเนื้อยางแห้งเหลือเพียงประมาณ 12-18 % ก่อนทำการเติมกรดเพื่อให้ยางจับตัวกันและแยกตัวออกจากน้ำ หลังจากนั้นจึงนำยางที่ได้ไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง นำไปล้างน้ำ แล้วจึงทำให้ยางแห้ง ซึ่งการทำให้ยางแห้งนี้อาจทำได้ 2 วิธี คือ 1) นำไปตากแดดหรือผึ่งในอากาศร้อนเพื่อไล่ความชื้น ยางที่ได้เรียกว่า ยางแผ่นไม่รมควัน (Air Dried Sheet, ADS) และ 2) นำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 °C เป็นเวลาประมาณ 2-3 วัน (หรืออาจนานกว่านี้) ซึ่งยางที่ได้เรียกว่า ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS)

ข้อกำหนดการจัดชั้นยางแผ่นรมควันชั้นต่างๆ

ยางแผ่นรมควันชั้น 1 (No.1 RSS) ก้อนยางแต่ละก้อนต้องไม่จืดรา ไม่ปรากฏจุดหรือริ้วรอยของยางถูกรมควันมากหรือน้อยเกินไป ยางต้องแห้งดี สะอาดรมควันสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ปราศจากฟองอากาศ สิ่งสกปรก ตลอดจนสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ

ยางแผ่นรมควันชั้น 2 (No.2 RSS) ก้อนยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกินกว่า 5% (ก้อนยางตัวอย่าง) แผ่นยางมีจุดด่างและฟองอากาศบ้าง แต่ปราศจากร่องรอยของการถูกรมควันไม่สม่ำเสมอ ยางต้องแห้งดี สะอาด ไม่มีจุดด่างของสิ่งสกปรกหรือสิ่งแปลกปลอม

ยางแผ่นรมควันชั้น 3 (No.3 RSS) ก้อนยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกินกว่า 10% (ก้อนยางตัวอย่าง) แผ่นยางมีจุดด่างและฟองอากาศบ้าง แต่ต้องไม่มีร่องรอยของยางถูกรมควันไม่สม่ำเสมอ ยางต้องแห้งดี สะอาด ไม่มีสิ่งแปลกปลอม

ยางแผ่นรมควันชั้น 4 (No.4 RSS) ก้อนยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกินกว่า 20% (ก้อนยางตัวอย่าง) แผ่นยางมีจุดด่างและฟองอากาศ และร่องรอยของการถูกรมควันไม่ถูกต้องปานกลาง ยางต้องแห้งดี ไม่มีสิ่งแปลกปลอม

ยางแผ่นรมควันชั้น 5 (No.5 RSS) ก้อนยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกินกว่า 30% (ก้อนยางตัวอย่าง) แผ่นยางมีจุดด่างและฟองอากาศ และร่องรอยของการถูกรมควันไม่ถูกต้องขนาดใหญ่

2) ยางเครฟ (Crepe Rubber) ยางเครฟส่วนใหญ่เป็นยางที่ได้จากการนำเศษยาง (เช่น ยางก้นถ้วย เศษยางที่ติดบนเปลือกไม้หรือติดบนดิน หรือเศษยางจากยางแผ่นรมควัน) ไปรีดในเครื่องเครฟ (creping machine) พร้อมทั้งใช้น้ำทำความสะอาดเอาสิ่งสกปรกต่างๆ ออกไปจากยางในระหว่างการรีด จากนั้นจึงนำยางแผ่นที่ได้ไปผึ่งลมให้แห้ง ซึ่งยางเครฟเหล่านี้มีสีค่อนข้างเข้มและมีความบริสุทธิ์แตกต่างกันมากขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิต

3) ยางแท่ง (Technically Classified Rubber) เนื่องจากยางแผ่นและยางเครฟมีการจัดชั้นด้วยสายตาซึ่งให้ผลที่ไม่แน่นอน ด้วยเหตุนี้ อุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่ในปัจจุบันจึงเริ่มเปลี่ยนมาใช้ ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางแทน ทั้งนี้เนื่องจากยางแท่งเป็นยางที่มีคุณภาพสม่ำเสมอกว่ายางแผ่นและยางเครฟ ผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ การจัดชั้นของยางแท่งจะพิจารณาจากปริมาณของสิ่งสกปรกที่มีอยู่ในยางเป็นสำคัญ นอกจากนั้นก็อาจพิจารณาตัวแปรอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น ปริมาณเถ้า คำนีความอ่อนตัว ฯลฯ ปัจจุบัน ประเทศไทยมีมาตรฐานยางแท่งเรียกว่า Standard Thai Rubber (STR) ซึ่งแต่เดิมเรียกว่า Thai Tested Rubber (TTR)

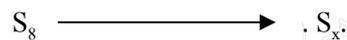
2.4.1.2 สารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agents)^[17]

แม้ว่าการทำให้ยางคงรูปจะสามารถทำได้ด้วยการใช้รังสีที่มีพลังงานสูงโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารทำให้ยางคงรูป แต่วิธีการคงรูปยางดังกล่าวก็จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง และใช้ได้เฉพาะในกรณีที่ต้องการคงรูปยางที่บางๆ เท่านั้น ด้วยเหตุนี้ การทำให้ยางคงรูปด้วยรังสีที่

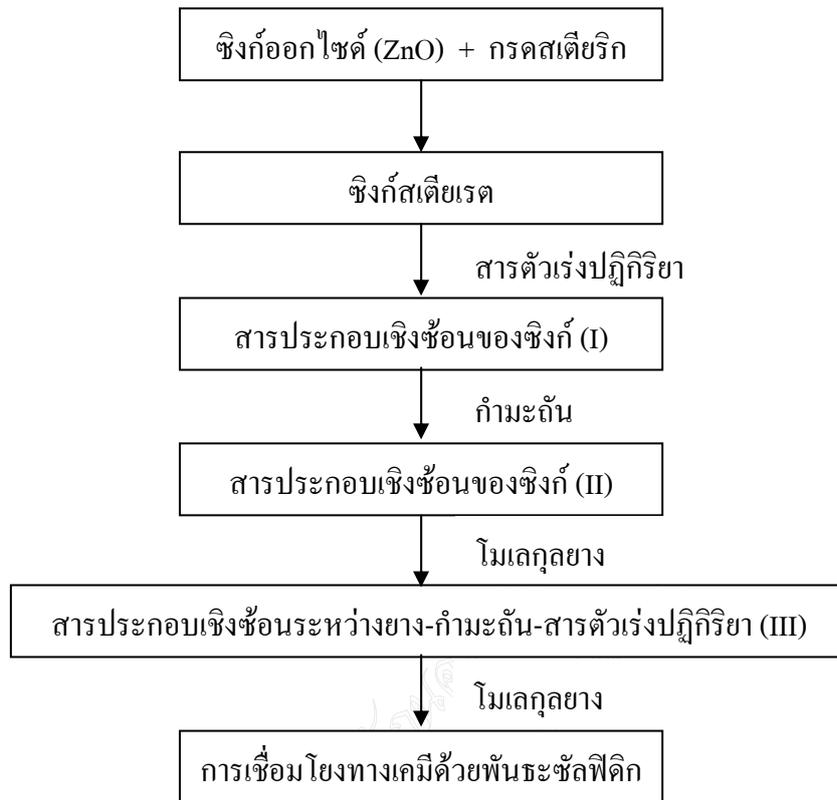
มีพลังงานสูงจึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ปัจจุบัน การคงรูปยางส่วนใหญ่เกิดจากการเติมสารกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูป โดยทั่วไป การคงรูปยางที่ใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบใหญ่ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (sulfur) ระบบที่ใช้เพอร์ออกไซด์ (peroxide) และระบบที่ใช้สารเคมีอื่นๆ เช่น โลหะออกไซด์ เป็นต้น

ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันเป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันเพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ การคงรูปเกิดขึ้นได้เร็ว (เมื่อใช้กำมะถันร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เหมาะสม) และยางคงรูปที่ได้ก็มีสมบัติเชิงกลที่ดี ด้วยเหตุนี้ ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันจึงนิยมใช้ในการคงรูปยางแทบทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเฉพาะยางธรรมชาติ เนื่องจาก พันธะคู่เป็นตำแหน่งที่กำมะถันจะเข้าไปทำปฏิกิริยาและทำให้เกิดการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้น

กลไกการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถัน ถ้านำยางที่มีพันธะคู่มาผสมกับกำมะถันและให้ความร้อน ปฏิกิริยาการคงรูปก็จะเริ่มเกิดขึ้นผ่านอนุมูลอิสระ โดยเริ่มแรกกำมะถัน (S_8) ที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นแบบวงแหวนจะแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระดังสมการ



อิเล็กตรอนของอนุมูลอิสระซึ่งอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งก็จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของยาง (สายโซ่ที่ 1) ในขณะที่อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่งของอนุมูลอิสระก็จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของยางอีกสายโซ่หนึ่ง (สายโซ่ที่ 2) เกิดเป็นการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้น แต่ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นได้ช้ามาก ปัจจุบัน จึงได้มีการพัฒนาสารเคมีชนิดต่างๆ มากมายที่สามารถทำให้ปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถันเกิดขึ้นได้เร็ว สารเคมีเหล่านี้ได้แก่ สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator) และสารกระตุ้นปฏิกิริยา (activator) ตัวอย่างที่สำคัญของสารตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล (2-mercaptobenzothiazole, MBT) ส่วนตัวอย่างที่สำคัญของสารกระตุ้นปฏิกิริยา ได้แก่ ซิงก์ออกไซด์ และกรดสเตียริก เป็นต้น เมื่อมีการเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาและสารกระตุ้นปฏิกิริยา (เช่น ซิงก์ออกไซด์ และกรดสเตียริก) ลงไปในระบบ ปฏิกิริยาการคงรูปจะเริ่มต้นด้วยการเข้าทำปฏิกิริยากันของซิงก์ออกไซด์ และกรดสเตียริกได้เป็นซิงก์สเตียเรต (เกลือ) ที่สามารถละลายในยางได้ หลังจากนั้น ซิงก์สเตียเรตจึงเข้าทำปฏิกิริยากับสารตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของซิงก์ (I) สารประกอบเชิงซ้อนของซิงก์ที่เกิดขึ้นนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกำมะถันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของซิงก์ (II) และท้ายสุดก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับยางที่ตำแหน่งพันธะคู่หรือที่คาร์บอนตรงตำแหน่ง α -methylene ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างยาง-กำมะถัน-สารตัวเร่งปฏิกิริยา (III) ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อน (III) ที่เกิดขึ้นนี้ก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของยางอีกสายโซ่หนึ่งเกิดเป็นการเชื่อมโยงทางเคมีแบบพันธะซัลฟิดิก (sulfidic) ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของรูปด้วยกำมะถัน^[17]

2.4.1.3 สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerators)^[15,17]

การใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับระบบการคงรูปร่างด้วยกำมะถัน เพราะปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันและยาง (ปฏิกิริยาของรูป) จะเกิดขึ้นได้ช้ามากแม้ที่อุณหภูมิสูงๆ โดยทั่วไปจึงต้องใช้ระยะเวลาในการคงรูปร่างนานเป็นชั่วโมงและต้องใช้กำมะถันในปริมาณที่สูงมาก อีกทั้งยางคงรูปที่ได้ก็จะมีสมบัติเชิงกลต่ำ การเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปในปริมาณเพียงเล็กน้อยจะช่วยทำให้ปฏิกิริยาระหว่างยางและกำมะถันเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น จึงช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูปร่าง ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้กำมะถันในปริมาณที่สูงเกินไปและยางคงรูปที่ได้ก็จะมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ตัวอย่างสารตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ MBTS (Mercaptobenzothiazole Disulfide) ,TMTD (Tetramethyl thiuram disulfide)

2.4.1.4 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (activators)^[17]

สารนี้จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเมื่อมีปฏิกิริยากับสารตัวเร่งให้ยางคงรูป ซึ่งจะเกิดการช่วยให้เร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ยางจะคงรูปเร็วยิ่งขึ้น และปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้นด้วย โดยทั่วไปสารกระตุ้นปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่

1) สารอนินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของโลหะ เช่น ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และออกไซด์ของตะกั่ว อย่างไรก็ตามในบรรดาสารเคมีที่กล่าวมา ซิงก์ออกไซด์จัดเป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรม แม้ว่าการใช้ซิงก์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวจะสามารถเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปได้ แต่ประสิทธิภาพในการกระตุ้นปฏิกิริยาจะสูงขึ้นหากใช้ซิงก์ออกไซด์ร่วมกับกรดไขมัน เช่น กรดสเตียริก (นิยมใช้กรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมในช่วง 12-18) เพราะเมื่อสารเคมีทั้งสองทำปฏิกิริยากันจะเกิดเป็นสารประกอบที่สามารถละลายในยางได้ง่าย (เช่น ซิงก์สเตียเรต) จึงทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น

2) กรดอินทรีย์ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่าซิงก์ออกไซด์จะทำหน้าที่ได้เต็มประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อใช้ร่วมกับกรดไขมัน โดยทั่วไป ปริมาณของกรดสเตียริกที่นิยมใช้ในการออกสูตรเคมียางมักอยู่ในช่วง 1-3 phr นอกจากกรดสเตียริกจะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาแล้ว กรดชนิดนี้ยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (lubricant) ทำให้ยางมีความเหนียวลดลง

3) สารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เมื่อเติมลงไปในการทำให้ยางมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) สูงขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่จะส่งผลทำให้ยางมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปสูงขึ้นด้วย (สารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นกรดมักหน่วงปฏิกิริยาการคงรูป) ตัวอย่างของสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ได้แก่ ไดบิวทิลอะมิโนโอเลอเตต (dibutylaminooleate) แม้ว่าการใช้สารกระตุ้นปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นด่างจะช่วยให้ยางมีอัตราเร็วในการคงรูปค่อนข้างสูงมากแต่การใช้กรดไขมันและเกลือของกรดไขมันก็มีข้อดีเหนือกว่าหลายประการ คือ นอกจากจะช่วยทำให้กระบวนการผลิตมีความปลอดภัยสูงกว่าแล้ว (ยางคอมพาวด์มีระยะเวลาสุกที่ยาวกว่า) ยังช่วยให้สารตัวเติมและสารเคมีต่างๆ กระจายตัวในยางได้ดีกว่าอีกด้วย จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติโดยรวมค่อนข้างดี

2.4.1.5 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradants) ^[17]

ยางต่างๆ ไป มีขีดจำกัดในการต่อต้านการเสื่อมสภาพ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเติมสารที่มีความสามารถป้องกันยางเสื่อมสภาพ เนื่องจากการนำผลิตภัณฑ์ยางไปใช้งาน โอกาสที่ยางจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือเกิดปฏิกิริยากับ โอโซนเป็นไปได้เสมอ และผลจากปฏิกิริยาดังกล่าว จะทำให้ผิวยางแตกสูญเสียสมบัติทางกายภาพ ใช้งานไม่ได้ ฉะนั้น จึงจำเป็นต้องใส่สารต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารต่อต้านปฏิกิริยาของยางกับ โอโซน และในการผลิตสารนี้ในเชิงการค้า จะมีทั้งชนิดที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางเปลี่ยนสีได้ และชนิดที่ไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางเปลี่ยนสี ตัวอย่างสารที่ใช้ป้องกันยางเสื่อมสภาพ ได้แก่ TMQ (2,2,4-Trimethyl-1,2-dihydroquinoline) , PBN (Phenyl-β-naphthylamine) , IPPD (N-Isopropyl-N'-phenyl-p-phenylenediamine)

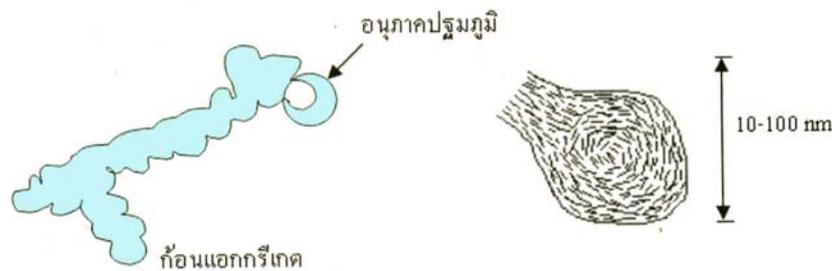
2.4.1.6 สารตัวเติม (fillers) ^[7,16,17,20,21,25]

สารตัวเติมคือองค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เพื่อเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น หรือเพื่อลดต้นทุน สารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถ

แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามประสิทธิภาพของการเสริมแรง คือ สารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing fillers) เช่น ผงเขม่าดำ (carbon black) ซิลิกา (silica) และสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงหรือที่เรียกว่าสารตัวเติมเฉื่อย (non-reinforcing หรือ inert fillers) เช่น ทัลคัม (talc) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ดินขาว (clay)

1) เขม่าดำ (carbon black)

โครงสร้างของอนุภาคเขม่าดำ ผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง องค์ประกอบหลักของผงเขม่าดำคือ อนุภาคของผงเขม่าดำมีโครงสร้างกิ่งแกรไฟต์ดังแสดงในรูปที่ 2.6 นั่นคือ อะตอมของคาร์บอนจะจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ ขนานกัน บางส่วนก็เกิดการเชื่อมล้ากันเล็กน้อย ทำให้อนุภาคมีโครงสร้างแบบกิ่งแกรไฟต์ เขม่าดำที่ใช้กันในอุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-100 นาโนเมตร



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเขม่าดำ^[17]

การผลิตเขม่าดำตามวิธีการผลิต แบ่งได้ 3 ชนิด คือ

1. Furnace black เป็นผงเขม่าดำชนิดที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน ผงเขม่าดำชนิดนี้เตรียมจากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันในเตาเผาที่มีอากาศจำกัดเขม่าดำจะปะปนอยู่กับก๊าซผสมที่ได้ซึ่งสามารถทำให้ตกตะกอนโดยวิธีหมุนเหวี่ยงหรือการตกตะกอนแบบอิเล็กโตรสแตติก (Electrostatic precipitation) เขม่าดำชนิดนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 140 – 900 Å มีฤทธิ์เป็นด่าง มี pH ตั้งแต่ 8.0 – 10.0 เขม่าดำที่ได้จากกระบวนการนี้ส่วนใหญ่จะใช้ในการผลิตยางรถยนต์ สี พลาสติก หมึกพิมพ์

2. Thermal black เป็นผงเขม่าดำที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1,300 °C ในภาวะที่ไม่มีอากาศของก๊าซธรรมชาติ ผงเขม่าดำชนิดนี้ที่พื้นผิวของเขม่าดำจะไม่มีรูพรุน จึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะไม่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำชนิดอื่นๆ ด้วยเหตุนี้ เทอร์มอลแบล็กจึงไม่เสริมแรงในยางเพราะทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางคงรูปสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เขม่าดำชนิดนี้จะทำให้ยางมีกระบวนการผลิตที่ง่ายและยางคงรูปที่ได้ก็จะมีสมบัติการกระเดื่อง กระดอนและสมบัติเชิงพลวัตที่ดีกว่าเฟอร์เนซแบล็กซึ่งมีราคาสูงกว่าแทนได้ ส่วนใหญ่จึงนำเขม่าดำชนิดนี้มาใช้เฉพาะในกรณีพิเศษเท่านั้น

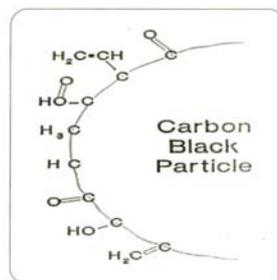
3. Channel black เขม่าดำชนิดนี้จะเตรียมได้จากการเผาก๊าซธรรมชาติในบรรยากาศที่มีอากาศจำกัดให้เปลวไฟกระทบแผ่นโลหะเย็น ซึ่งแผ่นโลหะจะมีรูปร่างต่างๆ กันอาจเป็นจานลูกกลิ้งด้วยซึ่งมีช่องแคบเรียกว่า channel เมื่อควบคุมปริมาณของอากาศในการเผาไหม้ อุณหภูมิของเตาเผา เขม่าดำและปริมาณอากาศที่ให้ออกมา ความดันของก๊าซที่ใช้ในการเผาไหม้และอื่นๆ ก็ทำให้สามารถควบคุมขนาดของเขม่าดำที่ออกมาได้ เขม่าดำที่ได้จากวิธีนี้มีฤทธิ์เป็นกรด มีค่า pH ตั้งแต่ 3.7-5.0 ฉะนั้นจะทำให้ยางสึกขาลงไปบ้างและมีขนาดตั้งแต่ 100-400 Å โดยทั่วไปเขม่าดำที่มีขนาดเล็กกว่า 150 Å จะไม่นำมาใช้กับยางเพราะผสมเข้ากับยางได้ยากและยางที่ได้จะแข็งและแปรรูปยาก ส่วนใหญ่จะใช้งานของสี

สมบัติของเขม่าดำ ขึ้นอยู่กับสิ่งสำคัญ 5 ประการดังนี้

1. ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ อนุภาคปฐมภูมิของเขม่าดำมีรูปร่างเป็นทรงกลมและจะไม่อยู่อย่างเดี่ยวๆ แต่จะถูกหลอมรวมกันเป็นกลุ่มก้อนเรียกว่าแอกกรีเกต เขม่าดำเกรดที่มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิลึกจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เขม่าดำเกรดนี้ก็จะเสริมแรงให้แก่ยางได้ดี

2. โครงสร้าง โครงสร้างของเขม่าดำจะบ่งบอกถึงลักษณะการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเขม่าดำ นอกจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคปฐมภูมิเกิดเป็นแอกกรีเกตซึ่งเป็นโครงสร้างปฐมภูมิแล้วแอกกรีเกตแต่ละกลุ่มยังสามารถเกาะกลุ่มกันได้อย่างหลวมๆ ด้วยแรงดึงดูดอย่างอ่อน (แรงแวนเดอร์วาลส์) เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิที่เรียกว่าแอกโกลเมอเรตซึ่งโครงสร้างแบบนี้จะถูกทำลายได้ง่ายด้วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผสม

3. สมบัติทางเคมีของพื้นผิว เขม่าดำประกอบด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอนประมาณ 90-95% ส่วนองค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ ออกซิเจน และ ไฮโดรเจน ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเขม่าดำค่อนข้างแตกต่างกันมากเพราะพื้นผิวของเขม่าดำประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันเคมีมากมายและการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้บนพื้นผิวก็แตกต่างกันด้วย หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวเหล่านี้ไม่เพียงจะมีผลต่อความว่องไวทางปฏิกิริยา (surface activity) ยังมีผลต่ออัตราเร็วของการคงรูปยางอีกด้วย การเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนในเขม่าดำจะทำให้ยางมีค่าระยะเวลาสกรอชที่ยาวขึ้นมีอัตราเร็วในการคงรูปและค่ามอดูลัสที่ต่ำลง



รูปที่ 2.7 หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวของเขม่าดำ ^[17]

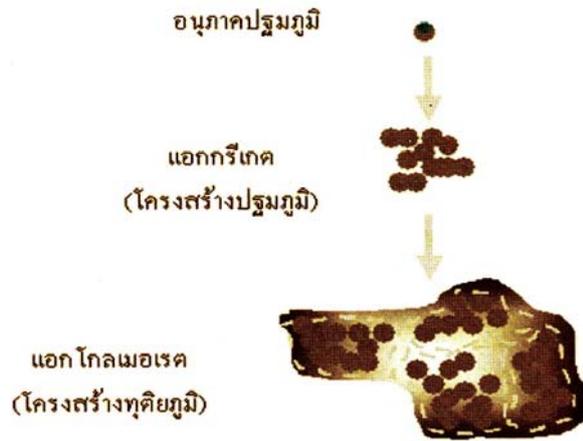
4. ความเป็นรูพรุนของอนุภาค พื้นผิวของเขม่าดำจะไม่เรียบ แต่จะมีลักษณะเป็นรูพรุน การวัดระดับความเป็นรูพรุนของเขม่าดำสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของเขม่าดำที่ได้จาก (ก) การคำนวณจากขนาดของอนุภาคที่วัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยตั้งสมมติฐานว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม และ (ข) การดูดซับก๊าซไนโตรเจนหรือที่เรียกว่าเทคนิค BET (พัฒนาขึ้นโดย Brunauer Emmett และ Teller)

5. การนำไฟฟ้าและความร้อน เขม่าดำสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้เป็นอย่างดี ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นตามโครงสร้างและพื้นที่ผิวของเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น

ผลของเขม่าดำต่อสมบัติของยาง โดยปรกติ เขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิเล็ก (หรือมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง) แม้ว่าจะให้การเสริมแรงที่ดี แต่ก็จะทำให้ยางมีกระบวนการผลิตที่ยุ่งยาก เพราะความหนืดของยางคอมพาวด์จะสูงมาก ส่วนโครงสร้างของเขม่าดำก็จะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตมากกว่าสมบัติของยางคงรูป ถ้าโครงสร้างของเขม่าดำสูงขึ้น ยางคอมพาวด์จะมีความหนืดสูงขึ้น ส่วนยางคงรูปที่ได้แม้ว่าจะมีค่ามอดูลัสและความแข็งสูงขึ้น แต่ก็ไม่มีผลต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงหรือความทนทานต่อการฉีกขาดมากนัก หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวของเขม่าดำก็มีผลกระทบต่ออัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของรูปโดยเฉพาหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่ฟีนอลิก เพราะหมู่ฟังก์ชันเคมีเหล่านี้จะทำให้เขม่าดำมีความเป็นกรดสูงขึ้นจึงส่งผลทำให้ปฏิกิริยาของรูปเกิดได้ช้าลง สำหรับเขม่าดำที่มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิใกล้เคียงกัน เขม่าดำเกรดที่มีรูพรุนของพื้นผิวสูงกว่าก็จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าและอาจมีผลทำให้ปฏิกิริยาของรูปเกิดได้ช้าลงเพราะสารตัวเร่งปฏิกิริยาอาจถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนที่พื้นผิวมากขึ้น นอกจากนี้ ถ้าพื้นผิวของเขม่าดำมีรูพรุนสูง (น้ำหนักเบา) ก็แสดงว่าเขม่าดำเกรดนี้จะมีจำนวนอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักมากขึ้นจึงทำให้ยางมีสมบัติการกระด้างกระดองลดลง แต่ยางก็จะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบการเติมเขม่าดำเกรดที่ไม่มีรูพรุนในปริมาณที่เท่ากัน

2) ซิลิกา (SiO_2)

โครงสร้าง : ซิลิกาที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยางมีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-40 นาโนเมตร อย่างไรก็ตาม ซิลิกาจะไม่อยู่อย่างเดี่ยวๆ ในรูปของอนุภาคปฐมภูมิแต่จะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนที่เรียกว่าแอกกรีเกตเกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ ซึ่งโครงสร้างปฐมภูมินี้ไม่สามารถถูกทำลายได้ในระหว่างกระบวนการผสมเพราะเกิดจากแรงดึงดูดทางเคมีที่แข็งแรง (พันธะโควาเลนต์) นอกจากนี้ แอกรีเกตของซิลิกายังชอบอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิและเรียกกลุ่มก้อนขนาดใหญ่นี้ว่าแอกโกลเมอเรตดังแสดงในรูปที่ 2.8 เมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำ โครงสร้างทุติยภูมิของซิลิกาจะมีความแข็งแรงสูงกว่าเนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของซิลิกาเกิดจากแรงดึงดูดของพันธะไฮโดรเจน (H-bond) ซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ที่พบในกรณีของเขม่าดำ

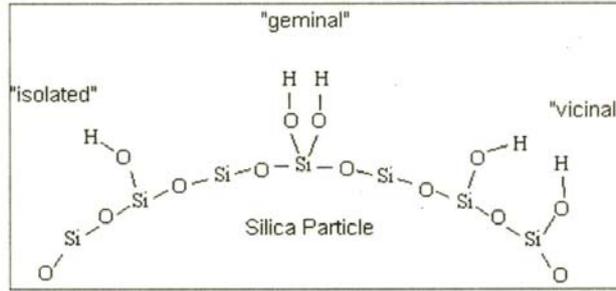


รูปที่ 2.8 โมเดลแสดงลักษณะโครงสร้างของช็อกโกแลต^[17]

พื้นที่ผิวจำเพาะ : พื้นที่ผิวจำเพาะเป็นปัจจัยสำคัญในการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการเสริมแรงในยาง ช็อกโกแลตที่มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิเล็กจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและให้การเสริมแรงที่ดี เทคนิคที่นิยมใช้ในการวัดขนาดของพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวเดิมคือเทคนิคการดูดซับไนโตรเจนหรือที่รู้จักกันดีว่าเทคนิค BET

ผลต่อกระบวนการผสม : โครงสร้างทุติยภูมิของช็อกโกแลตแม้ว่าจะค่อนข้างเสถียร แต่ก็สามารถถูกทำลายได้ด้วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผสม ดังนั้น ยางคอมพาวด์ที่มีความหนืดสูงจะทำให้ช็อกโกแลตแตกตัวได้ดีเนื่องจากมีค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผสมสูง (แรงเฉือนจะทำให้กลุ่มก้อนแอกโกลเมอเรตของช็อกโกแลตแตกตัวไปเป็นกลุ่มก้อนแอกกรีเกต) แต่สำหรับยางคอมพาวด์ที่มีความหนืดต่ำหรือในกรณีที่ต้องเติมสารทำให้ยางนิ่มลงไปปริมาณมาก ก็ควรเติมสารทำให้ยางนิ่มภายหลังจากการเติมสารตัวเดิม

การดูดซับสารเคมี : เนื่องจากบนพื้นที่ผิวของช็อกโกแลตมีหมู่ไฮดรอกซิลหรือหมู่ไฮลาโนลอยู่ในปริมาณมาก พื้นที่ผิวของช็อกโกแลตจึงมีความเป็นขี้และมีควมว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีต่างๆ สูง ดังนั้น ช็อกโกแลตจึงมีแนวโน้มที่จะดูดซับสารเคมีต่างๆ มาเกาะบนพื้นผิวได้ดี ความชื้นในช็อกโกแลตจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของยางในระหว่างกระบวนการผลิตและกระบวนการขึ้นรูป ถ้าปริมาณความชื้นในช็อกโกแลตสูงขึ้น ช็อกโกแลตก็จะแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ยากขึ้นเล็กน้อย เวลาที่ใช้ในการคงรูปยางที่คงรูปด้วยระบบก้ำมะถันโดยใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่เป็นด่างก็จะยาวนาน (ทั้งระยะเวลาสกรอร์ชและระยะเวลาในการคงรูป) เพราะช็อกโกแลตที่อ้อมด้วยน้ำจะหน่วงปฏิกิริยาของรูป ทำให้ต้องใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่สูงขึ้น



รูปที่ 2.9 รูปแบบต่างๆ ของหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกา ^[17]

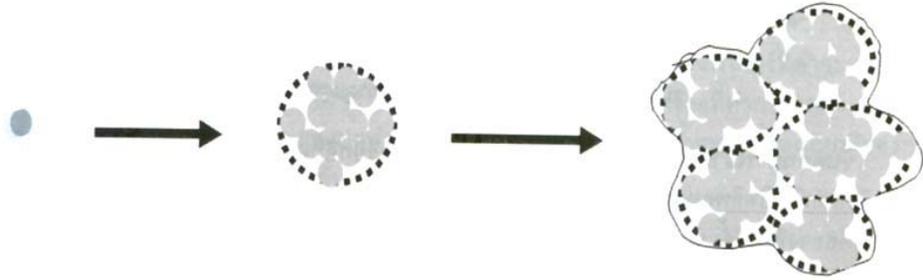
นอกจากนี้แล้ว หมู่ไฮดรอกซิลยังทำให้ซิลิกาชอบดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นด่างจึงทำให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาในยางมีปริมาณลดลง ดังนั้น จึงต้องเพิ่มปริมาณของสารตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้เพื่อชดเชยให้กับปริมาณที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของซิลิกา อย่างไรก็ตาม เนื่องจากน้ำมีความว่องไวต่อการถูกดูดซับได้ดีกว่าสารอื่นๆ ดังนั้น ถ้าซิลิกาดูดซับน้ำไว้มากในระหว่างการเก็บรักษาก็จะทำให้ปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่างถูกดูดซับน้อยลง กรณีนี้จะส่งผลให้ปฏิกิริยาของยางเกิดได้เร็วมากขึ้น ปรากฏการณ์การดูดซับสารเคมีนี้จะไม่พบในการคงรูปด้วย TMTD หรือ เพอร์ออกไซด์เพราะหมู่ไฮดรอกซิลจะไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีดังกล่าว

ผลของการเสริมแรง : ซิลิกาสามารถเสริมแรงในยางได้ดีเพราะมีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิเล็กและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เมื่อเติมลงไปในยางจะทำให้ยางคงรูปมีความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด ความแข็งและความต้านทานต่อการขัดถูสูงขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำที่มีพื้นที่ผิวเท่ากันแล้ว ซิลิกาจะให้ยางคงรูปที่มีสมบัติเชิงกลดีน้อยกว่าเขม่าดำ โดยเฉพาะค่ามอดูลัสและค่าความต้านทานต่อการขัดถู ทั้งนี้ เนื่องจากซิลิกามีอันตรกิริยากับยางต่ำกว่าเขม่าดำ การเติมสารควบคู่ไฮดรอกซิลลงไปปริมาณเพียงเล็กน้อยจะช่วยให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ซิลิกาจะให้สมบัติทางไฟฟ้า (ความเป็นฉนวน) ที่ดีกว่าเขม่าดำเล็กน้อยเพราะซิลิกาจะไม่นำไฟฟ้าในขณะที่เขม่าดำนำไฟฟ้าได้ดี

การใช้งาน : ซิลิกาใช้กันมากในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความโปร่งแสงและมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ยางพื้นรองเท้า เป็นต้น นอกจากนี้ ในบางกรณียังใช้ซิลิการ่วมกับเขม่าดำเพื่อเพิ่มความทนทานต่อการฉีกขาดและเพิ่มความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางกับสิ่งทอ ปัจจุบัน ได้มีการนำซิลิกาไปใช้ในการผลิตยางล้อรถยนต์เพราะซิลิกาจะทำให้ยางมีค่าความต้านทานต่อการหมุน (rolling resistance) ต่ำลงจึงช่วยประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง

เนื่องจากสารตัวเติมเสริมแรงชอบรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ที่เรียกว่าแอกโกเลอเรตซึ่งประกอบไปด้วยกลุ่มก้อนขนาดเล็กหลายๆ ก้อนมาเกาะกันอยู่อย่างหลวมๆ ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waal's) หรือพันธะไฮโดรเจน (H-bond) เรียกกลุ่มก้อนขนาดเล็กเหล่านี้ว่า แอ็กกรีเกต (aggregate) โดยที่แอ็กกรีเกต 1 ก้อนจะเกิดจากอนุภาคปฐมภูมิหลายๆ อนุภาคมาอยู่

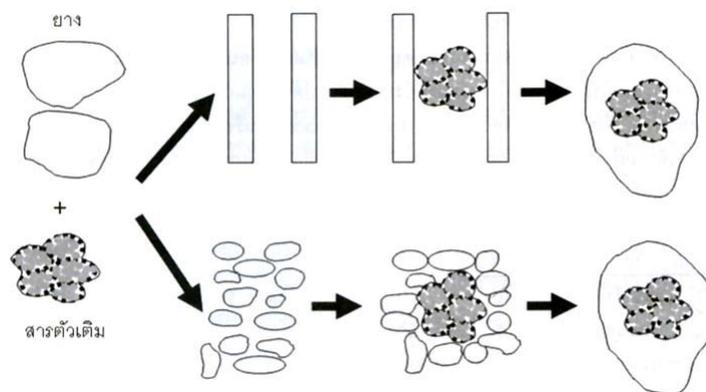
รวมกันด้วยพันธะทางเคมีที่แข็งแรงหรือเกิดการหลอมรวมกันที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคปฐุมภูมิดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แบบจำลองลักษณะของสารตัวเติมเสริมแรง^[16]

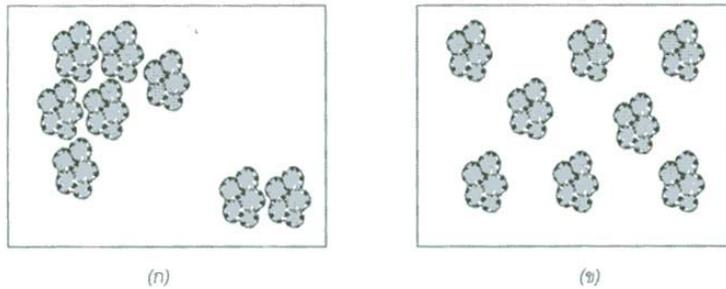
กลไกของการผสมยางกับสารตัวเติมเสริมแรงจึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ ได้แก่

1) การเข้าไปในเนื้อยางของสารตัวเติม (incorporation หรือ wetting) หลังจากที่ย่างถูกบดย่อยด้วยกระบวนการมาสดิเคชันจนมีค่าความหนืดต่ำเพียงพอที่จะรับสารตัวเติมแล้ว ผู้ผสมก็จะทำการเติมสารตัวเติมลงไป โดยที่สารตัวเติมที่เติมลงไปนี้จะเข้าไปรวมกับเนื้อยางโดยผ่านกลไก 2 แบบดังแสดงในรูปที่ 2.11 กล่าวคือ ในกลไกแรก ยางที่ได้รับแรงเฉือนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งขนาดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงเฉือน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางดังกล่าวจะทำให้ยางมีพื้นที่ที่จะสัมผัสกับสารตัวเติมสูงขึ้น และแรงเฉือนที่มากกระทำกับยางหมดไป ยางก็จะคลายตัวกลับคืนสู่สภาพที่ไม่มี การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโอบล้อมเอาสารตัวเติมไว้ภายในยาง ส่วนในกลไกที่สอง ยางขึ้นขนาดใหญ่มากที่ได้รับแรงเฉือนสูงๆ จะเกิดการฉีกขาดได้เป็นยางขึ้นที่มีขนาดเล็กกลง จากนั้นยางขึ้นเล็กๆ เหล่านี้ก็จะเข้าไปโอบล้อมเอาสารตัวเติมไว้ภายในยางเช่นกัน กลไกแบบแรกเป็นกลไกในระดับมหภาคจึงสามารถสังเกตเห็นได้โดยง่าย แต่กลไกแบบหลังเป็นกลไกระดับจุลภาคจึงไม่สามารถสังเกตเห็นได้



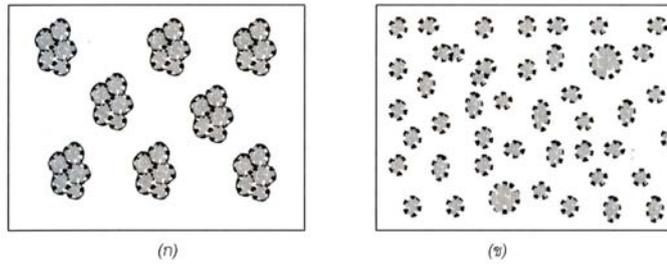
รูปที่ 2.11 กลไกการเข้าไปรวมกันระหว่างยางและสารตัวเติม^[16]

2) การกระจายตัวของสารตัวเดิมในยาง (distribution) หลังจากที่สารตัวเดิมเข้ารวมกันกับยางเรียบร้อยแล้ว แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะทำให้สารตัวเดิมที่ถูกโอบล้อมโดยยางเริ่มเกิดการกระจายตัวในเนื้อยาง กระบวนการกระจายตัวนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการผสม ในกรณีที่กระบวนการกระจายตัวเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ ยางคอมพาวด์ที่ได้จะมีสมบัติไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งจะส่งผลต่อเนื่องทำให้ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้มีคุณภาพไม่คงที่ ประสิทธิภาพในการกระจายตัวของสารตัวเดิมจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการไหลของยางในห้องผสม โดยทั่วไป ยางที่มีความหนืดต่ำจะมีความสามารถในการไหลที่ดีจึงทำให้การกระจายตัวเกิดขึ้นได้โดยง่าย



รูปที่ 2.12 โมเดลแสดงลักษณะการผสม (ก) ยางที่มีการกระจายตัวที่ไม่ดี
(ข) ยางที่มีการกระจายตัวที่ดี^[16]

3) การแตกตัวของสารตัวเดิม (dispersion) เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากในการผสมสารตัวเดิมให้เข้ากับยาง เพราะการแตกตัวที่ดีจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพสูง กระบวนการแตกตัวคือกระบวนการที่ทำให้สารตัวเดิมซึ่งอยู่ในรูปของแอกโกลเมอเรตขนาดใหญ่ซึ่งถูกโอบล้อมด้วยยางแตกตัวออกเป็นแอกโกลเมอเรตที่มีขนาดเล็กลงด้วยแรงเฉือนที่เกิดจากเครื่องผสม จากนั้นแอกโกลเมอเรตขนาดเล็กๆ ที่เกิดขึ้นเหล่านี้ก็จะกระจายตัวในเนื้อยางต่อไป เมื่อการผสมดำเนินต่อไป แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะทำให้แอกโกลเมอเรตขนาดเล็กเหล่านี้แตกตัวต่อไปจนสุดท้ายได้เป็นแอกกรีเกตซึ่งเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของสารตัวเดิมที่ได้จากการผสม ในขั้นนี้จะถือว่าการผสมเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ การทำให้สารตัวเดิมแตกตัวเป็นหน่วยที่เล็กลงมีความสำคัญมากต่อสมบัติของยางคอมพาวด์ เพราะถ้าหากกระบวนการแตกตัวเกิดขึ้นได้ไม่ดี (อาจเนื่องจากสภาวะการผสมไม่ดีพอ เช่น ใช้ระยะเวลาในการผสมน้อยเกินไปหรือแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเครื่องผสมมีค่าต่ำเกินไป ฯลฯ) ยางคอมพาวด์ที่ได้ก็就会有ความหนืดสูง ส่งผลทำให้กระบวนการขึ้นรูปเป็นไปด้วยความยากลำบากและต้องสิ้นเปลืองพลังงานในกระบวนการผลิตสูง นอกจากนี้ การแตกตัวที่ไม่ดีของสารตัวเดิมยังส่งผลทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลต่ำ โดยเฉพาะค่าความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขูดถู เป็นต้น



รูปที่ 2.13 โมเดลแสดงลักษณะการผสม (ก) ยางที่มีการกระจายตัวที่ดีแต่ไม่มีการแตกตัว
(ข) ยางที่มีการกระจายตัวและการแตกตัวที่ดี^[16]

ปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อการแตกตัวของสารตัวเติมคือแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสม เพราะการที่จะทำให้สารตัวเติมแตกตัวและการบังคับให้ยางเข้าไปสัมผัสและโอบล้อมสารตัวเติมนั้นจำเป็นต้องอาศัยแรงเฉือนที่สูงมากๆ นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการผสมจะต้องนานเพียงพอที่จะทำให้สารตัวเติมแตกตัวเป็นแอกกรีเกต (หรือแอกโกลเมอเรตที่มีขนาดเล็กมากๆ) และทำให้แอกกรีเกตที่แตกออกมานี้กระจายตัวในยางได้อย่างทั่วถึง อย่างไรก็ตาม ควรหลีกเลี่ยงการผสมที่นานเกินไป เพราะนอกจากจะทำให้สิ้นเปลืองเวลาและพลังงานไฟฟ้า (รวมถึงต้นทุน) ในการผลิตแล้ว การผสมที่นานเกินไปยังก่อให้เกิดผลเสียต่อสมบัติเชิงกลของยางได้ เพราะยางที่ได้รับแรงเฉือนนานมากๆ จะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง นอกจากนี้ การผสมยางที่นานเกินไปอาจทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้เนื่องจากยางได้รับอนุมูลสูงนานเกินไป

2.4.1.7 สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (plasticizers and processing aids)^[17]

สารทำให้ยางนิ่มคือองค์ประกอบที่เติมลงไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น

1. ปรับความหนืดของยางให้ลดลง ทำให้ยางไหลได้ง่ายขึ้น จึงทำให้ประหยัดพลังงานในระหว่างกระบวนการผลิต

2. ช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิตและสมบัติความเหนียวติดกันของยางคอมพาวด์

3. ช่วยลดสัดส่วนของยางลงเพราะการใช้สารทำให้ยางนิ่มจะช่วยทำให้สามารถเติมสารตัวเติมลงไป ปริมาณที่สูงขึ้นได้

4. ทำให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น

5. ทำให้ยางคงรูปมีสมบัติบางประการดีขึ้น เช่น ช่วยปรับปรุงสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ยางมีค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ต่ำลงและมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดสูงขึ้น

ตัวอย่างของสารทำให้ยางนิ่มได้แก่

1. น้ำมันมิเนอร์ล (mineral oils) จัดเป็นสารทำให้ยางนิ่มกลุ่มที่มีความสำคัญมากที่สุดเพราะมีราคาถูกและสามารถเข้ากับยางได้หลากหลายชนิด น้ำมันมิเนอร์ลส่วนใหญ่ได้มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ) ซึ่งน้ำมันที่ผลิตได้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มย่อยตามลักษณะโครงสร้างทางเคมี คือ น้ำมันพาราฟินิก (paraffinic oil) น้ำมันแนฟเทนิค (naphthenic oil) และน้ำมันอะโรมาติก (aromatic oil)

น้ำมันพาราฟินิกคือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่งที่มีอะตอมของคาร์บอนมาต่อกันแบบอะลิฟาติก (aliphatic) คือเรียงต่อกันเป็นสายโซ่ตรงหรือมีกิ่งสาขาด้วยพันธะเดี่ยวเท่านั้น น้ำมันพาราฟินิกจึงจัดเป็นน้ำมันที่อิ่มตัว สูตรทั่วไปของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนพาราฟินิก คือ C_nH_{2n+2} ถ้า n มีค่าต่ำสารประกอบนี้จะอยู่ในสถานะของเหลวที่เรียกว่าน้ำมันพาราฟิน แต่ถ้า n มีค่าสูงสารประกอบที่ได้ก็จะอยู่ในสถานะของแข็งที่เรียกว่าไขพาราฟิน ไขพาราฟินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำหรือมีจุดหลอมเหลวต่ำสามารถใช้เป็นสารทำให้ยางนิ่มหรือเป็นสารช่วยในกระบวนการผลิตได้ ส่วนไขพาราฟินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนิยมใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซน

2. ไขมันสัตว์และน้ำมันพืช (animal and vegetable fats) ไขมันจากสัตว์หรือที่เรียกว่าลาโนลิน (lanolin) สามารถนำมาใช้เป็นสารทำให้ยางนิ่มได้ ไขมันเหล่านี้นอกจากจะมีส่วนช่วยให้กระบวนการผสมเป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้นแล้ว ยังมีส่วนช่วยในการปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยเฉพาะในขั้นตอนการขึ้นรูปด้วยการอัดผ่านคานและการรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องคานเดอร์ นอกจากนี้ช่วยปรับปรุงพื้นผิวของยางที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการดังกล่าวอีกด้วย ส่วนการใช้ไขมันพืช เช่น น้ำมันปาล์ม และน้ำมันถั่วเหลือง แม้ว่าจะช่วยลดความหนืดของยางและทำให้ยางสามารถรับสารตัวเติมได้ในปริมาณที่สูงขึ้น แต่เนื่องจากน้ำมันเหล่านี้มีพันธะคู่อยู่มากจึงอาจส่งผลเสียต่ออายุการใช้งานของยาง

2.4.2 การผสมยาง^[16]

ยางธรรมชาติเป็นของแข็งที่มีความเหนียวและความหนืดสูงมาก การผสมสารเคมีให้เข้ากับยางจึงเป็นไปได้ยาก ด้วยเหตุนี้ ก่อนการผสมเคมีจึงต้องทำการบดยางหรือลดความหนืดของยางโดยการตัดโมเลกุลของยาง (ลดน้ำหนักโมเลกุล) ด้วยกระบวนการเชิงกล นั่นคืออาศัยแรงเฉือนในเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) ดังรูปที่ 2.14 หรือในเครื่องผสมระบบปิด (internal mixer) ขั้นตอนการบดยางเพื่อลดความหนืดของยางก่อนการผสมเคมีนี้ เรียกว่า “มาสติเคชัน (mastication)” ปกติการบดยางที่อุณหภูมิต่ำจะให้ประสิทธิภาพการบดที่ดีเพราะยางจะมีความหนืดสูงส่งผลทำให้เกิดแรงเฉือนสูง โมเลกุลยางก็จะเกิดการฉีกขาดได้ดี แต่ที่อุณหภูมิสูง ยางจะมีความหนืดลดลงซึ่งจะส่งผลทำให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสมลดลงด้วย ประสิทธิภาพในการบดยางอันเนื่องมาจากแรงเชิงกลจึงลดลง แต่ในบางครั้งก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบดยางที่อุณหภูมิสูงได้เช่นกัน

โดยการเติมสารแปปไทเซอร์ (peptizer) ลงไปเล็กน้อย เพราะสารเคมีดังกล่าวจะช่วยทำให้โมเลกุลยางที่ถูกตัดขาดไปแล้วไม่สามารถกลับเข้าไปทำปฏิกิริยารวมตัวกันใหม่



รูปที่ 2.14 เครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง

เนื่องจากการบดขยี้ที่มากเกินไปจะทำให้ยางอ่อนเกินไป ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางไม่สามารถรับสารตัวเติมได้ในปริมาณมาก ยางคงรูปที่ได้จึงมีความยืดหยุ่น สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงพลวัตที่ไม่ดี ดังนั้น การบดขยี้จึงควรทำเท่าที่จำเป็น (ใช้เวลาให้สั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้) เพราะนอกจากจะทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติที่ดีแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย

การผสมเคมียางอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อให้ได้ยางที่มีคุณภาพสูงและสม่ำเสมอ ผู้ผสมจำเป็นต้องจัดลำดับการเติมสารเคมีต่างๆ ลงไปในเครื่องผสมอย่างถูกต้อง หลักการโดยทั่วไปของการเติมสารเคมี คือ หลังจากการบดขยี้ยางให้ نرم ก็จะมีการเติมสารเคมีหรือองค์ประกอบที่ผสมเข้าไปในเนื้อยางได้ยากก่อน เช่น เขม่าดำ หรือซิลิกา เพราะในช่วงนี้อุณหภูมิในการผสมยางยังต่ำ ทำให้ยางมีความหนืดสูง แรงกระทำเชิงกลหรือแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสมจึงมีค่าสูงซึ่งจะส่งผลทำให้สารตัวเติมดังกล่าวแตกตัวและกระจายตัวในเนื้อยางได้ดี จากนั้นจึงเติมสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงและน้ำมันตามลงไป ส่วนสารเคมีที่แนะนำให้เติมในลำดับสุดท้าย คือ สารตัวเร่งปฏิกิริยา กำมะถัน และสารป้องกันยางตาย ยางที่ได้หลังจากที่ผสมสารเคมีต่างๆ เรียบร้อยแล้วจะเรียกว่า ยางคอมพาวด์ (rubber compound)

ตารางที่ 2.4 แสดงลำดับของการผสมสารเคมีโดยทั่วไป^[16]

บดยางให้ نرم	ยางธรรมชาติจะใช้ระยะเวลาในการบดนานกว่ายางสังเคราะห์ เพราะยางธรรมชาติมีความหนืดเริ่มต้นสูงกว่า
เติมซิงก์ออกไซด์ กรดสเตียริก และสารป้องกันการเสื่อมสภาพ	ถ้าบดยาง NBR ก็เติมกำมะถันในขั้นตอนนี้ เพราะกำมะถันละลายและกระจายตัวในยาง NBR ได้ยาก
1/2 หรือ 1/4 ของสารตัวเติม	การแบ่งใส่สารตัวเติมเสริมแรงเป็น 2 ช่วงดังกล่าวนิยมใช้ในกรณีที่ต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรงในปริมาณมาก แต่ถ้าต้องการเติมสารตัวเติมเสริมแรงในปริมาณที่ไม่สูงมากนัก (เช่น < 30 phr) ก็สามารถเติมสารตัวเติมทั้งหมดในครั้งเดียวได้
สารตัวเติมส่วนที่เหลือและน้ำมัน	
กำมะถัน และสารตัวเร่งปฏิกิริยา	ต้องควบคุมไม่ให้อุณหภูมิของการผสมสูงเกินไป
รีดยางให้เป็นแผ่น	ปรับความหนาของแผ่นยางให้เหมาะสมสำหรับการนำไปทดสอบและขึ้นรูป

จากตารางที่ 2.4 จะเห็นว่าได้มีการเสนอแนะให้เติมซิงก์ออกไซด์ กรดสเตียริก และสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (ถ้ามี) ลงในช่วงต้นของการผสมต่างๆ ที่สารเคมีเหล่านี้ก็ผสมเข้ากับยางได้ง่าย ซึ่งโดยหลักการแล้วก็น่าที่จะสามารถเติมลงไปในช่วงท้ายของการผสมได้ แต่สาเหตุสำคัญที่ต้องเติมสารเคมีเหล่านี้ลงไปในช่วงต้นๆ ของการผสมก็เพราะว่าซิงก์ออกไซด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริกเกิดเป็นซิงก์สเตียเรตที่สามารถละลายเข้าไปในยางได้ จึงส่งผลทำให้ความหนืดของยางลดต่ำลง ยางก็จะสามารถไหลและโอบล้อมสารตัวเติมต่างๆ ที่จะเติมลงไปในช่วงตอนต่อไปได้ง่ายยิ่งขึ้น ส่วนสาเหตุที่ต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไปในช่วงต้นนั้นก็เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเสื่อมสภาพมากเกินไป (จากอุณหภูมิที่สูงขึ้น) ในระหว่างกระบวนการผสมนั่นเอง

สำหรับการผสมเคมียางที่มีการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมในปริมาณมากนั้น ผู้ผสมควรทำการเติมซิงก์ออกไซด์ในช่วงท้ายของการผสม เพราะบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) อยู่ในปริมาณมาก ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลเหล่านี้สามารถดูดซับซิงก์ออกไซด์หรือสารประกอบเชิงซ้อนของซิงก์ได้ ดังนั้น หากผู้ผสมทำการเติมซิงก์ออกไซด์ลงไปในช่วงต้นๆ ของการผสม ซิงก์ออกไซด์บางส่วนจะถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของซิลิกา ซึ่งจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาของรูปของยางลดลง

2.4.3 การขึ้นรูปยางและการคงรูปยาง (Rubber Forming and Vulcanization) ^[16]

การขึ้นรูปเป็นขั้นตอนหลังจากการผสม ยางคอมพาวด์ที่ได้จะต้องถูกนำไปขึ้นรูปให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่างๆ ตามความต้องการก่อนที่จะนำไปคงรูปต่อไป

โดยทั่วไป การขึ้นรูปยางคอมพาวด์ให้เป็นผลิตภัณฑ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 เทคนิคใหญ่ๆ ได้แก่ การใช้แม่พิมพ์ (moulding) การอัดรีด (extrusion) และการใช้เครื่องรีดแบบหลายลูกกลิ้งหรือที่เรียกว่าเครื่องคาลเอนเดอร์ (calender) ปัจจัยหลักที่เป็นตัวกำหนดเทคนิคการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางก็คือรูปร่างของผลิตภัณฑ์นั่นเอง ตัวอย่างเช่น สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างคงที่ (เมื่อมองในแนวภาพตัดขวาง) และมีความยาวมากๆ เช่น ท่อยางหรือยางขอบกระฉากรถยนต์ ก็จำเป็นต้องใช้เทคนิคการขึ้นรูปด้วยการอัดรีด แต่สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นแผ่นเรียบและมีขนาดใหญ่และยาว เช่น สายพานลำเลียงก็ควรเลือกใช้เทคนิคการขึ้นรูปด้วยเครื่องคาลเอนเดอร์ เป็นต้น

ในบางกรณี การขึ้นรูปและการคงรูปยางอาจเกิดขึ้นได้ในขั้นตอนเดียวกันเช่นในกรณีของการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ แต่ในบางกรณี การขึ้นรูปและการคงรูปอาจแยกออกจากกันอย่างชัดเจนดังเช่นในกรณีของการขึ้นรูปด้วยการอัดรีดหรือการใช้เครื่องคาลเอนเดอร์

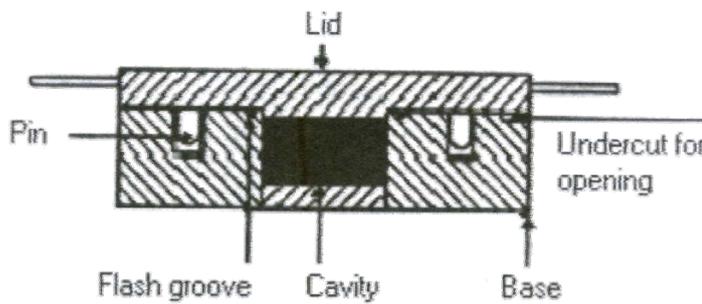
การใช้แม่พิมพ์ขึ้นรูปยาง เป็นการขึ้นรูปยางพร้อมๆ กับการคงรูปโดยอาศัยความร้อนและแรงอัด การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เป็นวิธีการที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน ผลิตภัณฑ์ยางส่วนใหญ่ไม่ว่าจะเป็นยางโอริง ประเก็น ยางรองแท่นเครื่อง พื้นรองเท้า หรือแม้แต่ยางล้อรถยนต์ ก็ล้วนแล้วแต่ใช้วิธีการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ทั้งสิ้น การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ก่อนที่จะนำไปใส่ลงในเบ้าพิมพ์เพราะความร้อนจากแม่พิมพ์จะทำให้ยางมีความหนืดต่ำลง ยางจึงไหลเต็มเบ้าพิมพ์ได้ง่ายยิ่งขึ้น และเมื่อยางไหลเต็มเบ้าพิมพ์แล้วความร้อนจากแม่พิมพ์ก็จะทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาคงรูปต่อไป แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปยางในโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายแบบ ได้แก่ แม่พิมพ์แบบกดอัด (compression mould) แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด (transfer mould) และแม่พิมพ์แบบฉีด (injection mould) เป็นต้น

การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัด (compression mould) เป็นวิธีการขึ้นรูปที่ใช้กันมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรมเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบอื่นๆ เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ต้องลงทุนทางด้านเครื่องจักรสูง เพราะทั้งเครื่องกดอัดและแม่พิมพ์มีราคาไม่สูงมากนัก เครื่องกดอัดที่นิยมใช้ ได้แก่ เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 เครื่องกดอัด ไฮดรอลิก

แม่พิมพ์แบบกดอัด เป็นแม่พิมพ์แบบง่าย ราคาถูก ลักษณะโดยทั่วไปของแม่พิมพ์แบบกดอัดประกอบด้วยแม่พิมพ์ 2 ส่วนคือแม่พิมพ์ส่วนบน (lid) และแม่พิมพ์ส่วนล่าง (base) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 แม่พิมพ์ส่วนล่างจะมีช่องเป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์เรียกว่า เบ้าพิมพ์ (cavity) ซึ่งเวลาขึ้นรูปยางก็จะนำยางคอมพาวด์ใส่ลงในเบ้าพิมพ์นี้ จากนั้นจึงนำแม่พิมพ์ส่วนบนมาปิดทับด้านบน ตัวสลัก (pin) ที่ติดอยู่ที่แม่พิมพ์ส่วนบนจะช่วยเป็นไกด์นำทางเพื่อให้แม่พิมพ์ส่วนบนและส่วนล่างปิดทับกันได้ได้อย่างแนบสนิทและช่วยล็อกไม่ให้แม่พิมพ์ส่วนบนเกิดการเคลื่อนตัวในแนวระนาบในขณะที่ได้รับแรงกดอัด หลังจากนั้นก็จะนำแม่พิมพ์ไปวางในเครื่องกดอัด เมื่อให้แรงดันแก่แม่พิมพ์ยางคอมพาวด์ก็จะถูกบังคับไหลจนเต็มเบ้าของแม่พิมพ์และความร้อนจากแม่พิมพ์ก็จะทำให้ยางเกิดการคงรูป



รูปที่ 2.16 ลักษณะพื้นฐานของแม่พิมพ์แบบกดอัด^[16]

2.4.4 การตกแต่งผลิตภัณฑ์ยาง^[15]

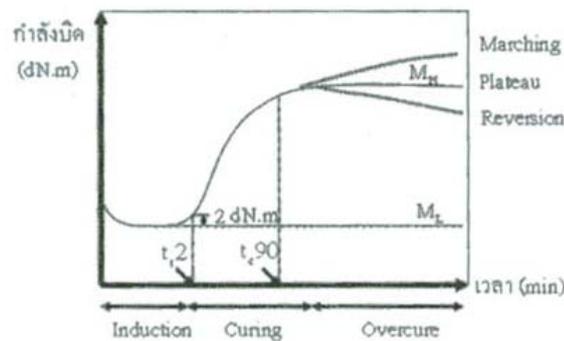
การตกแต่งชิ้นผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีวิธีการหลายแบบและการเลือกวิธีนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นผลิตภัณฑ์ วิธีการที่ใช้ตกแต่ง เช่น ใช้มือตกแต่งโดยใช้กรรไกรขลิบ หรือตัดส่วนเกิน ใช้เครื่องตกแต่ง หรือใช้วิธีการขัดด้วยล้อยขัดผิวหน้าผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

2.5 การทดสอบสมบัติของยาง^[16]

2.5.1 การทดสอบลักษณะการคงรูปของยาง

ภายหลังกระบวนการผสม ยางคอมพาวด์ที่ได้จะต้องถูกนำไปทดสอบลักษณะการคงรูปก่อนทุกครั้งเพราะลักษณะการคงรูปของยางสามารถบ่งชี้ได้ว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการผสมหรือไม่ เช่น หากมีการซังน้ำหนักของสารกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูปผิดหรืออาจเติมสารเคมีดังกล่าวผิดขั้นตอนก็จะส่งผลทำให้ลักษณะการคงรูปของยางผิดปกติไป ด้วยเหตุนี้ การทดสอบลักษณะการคงรูปของยางจึงเป็นหนึ่งในขั้นตอนของการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิต เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบลักษณะการคงรูปของยาง คือ เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating disc rheometer) หรือเรียกย่อว่าเครื่อง ODR เครื่อง ODR เป็นเครื่องมือที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับการศึกษาลักษณะการคงรูปยางโดยตรง ตัวเครื่องประกอบด้วยโรเตอร์ที่

เคลื่อนที่อยู่ในช่องว่างระหว่างคายนบนและคายนล่าง โรเตอร์ของเครื่อง ODR มีรูปร่างเป็นโคนคู่ประกบ และการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในระหว่างการทดสอบจะเป็นแบบแกว่ง โดยการแกว่งของโรเตอร์จะเกิดขึ้นเป็นมุมแคบๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการทำลายโครงสร้างตาข่าย 3 มิติของยางคงรูป หลังจากให้ความร้อนแก่ระบบจนถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ นำตัวอย่างคอมพาวด์ที่มีปริมาตรประมาณ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรหรือมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30+2 มิลลิเมตร หนา 11+1.5 มิลลิเมตร ไปวางไว้บนโรเตอร์และกดปุ่มเริ่มทดสอบ คายนบนก็จะเคลื่อนลงมาประกบกับคายนล่าง ความดันที่เกิดขึ้นจะอัดยางให้ไหลจนเต็มเข้าพิมพ์ หลังจากนั้น โรเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 35.55 + 0.01 มิลลิเมตร ก็จะเริ่มแกว่งไป-มาที่มุมต่างๆ (1° หรือ 3°) ด้วยความถี่ 1.67 Hz หรือ 100 รอบต่ออนาที จากนั้นก็บันทึกแรงที่ใช้ในการแกว่งตามเวลาที่จะได้เส้นกราฟคงรูป (cure curve) ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 เส้นกราฟการคงรูปที่วัดได้จากเครื่อง ODR ^[16]

จากรูปที่ 2.17 จะเห็นได้ว่าลักษณะการคงรูปของยางสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงใหญ่ๆ คือ

1. ช่วงเริ่มต้น (induction) : เมื่อตัวอย่างได้รับความร้อน ยางก็จะอ่อนลงทำให้แรงบิดลดลงในระยะแรกๆ ของการทดสอบ จนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิของยางเริ่มเข้าสู่สมดุล ความหนืดของยางก็จะมีค่าต่ำสุดและจะมีค่าคงที่อยู่ ณ จุดนี้เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะเริ่มเกิดการคงรูป ค่าความหนืดต่ำสุดนี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของยางที่ยังไม่คงรูป (ความสามารถในการไหลของยางคอมพาวด์) และใช้สัญลักษณ์ว่า M_L

2. ช่วงการคงรูป (curing) : หลังจากที่ยางมีค่าความหนืดต่ำสุด ความหนืดของยางก็จะเริ่มสูงขึ้นเนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเริ่มเกิดการคงรูป (แรงบิดจึงเริ่มสูงขึ้นตามเวลา) ระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มปิดคายนจนถึงเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปเรียกว่า “ระยะเวลาสกอร์ช (scorch time)” และใช้สัญลักษณ์เป็น t_s ในกรณีที่ใช้มุมแกว่งเท่ากับ 1° ค่าระยะเวลาสกอร์ชคือระยะเวลาที่ทำให้ค่าแรงบิดสูงกว่าจุดต่ำสุด (M_L) 1 เดซินิวตัน-เมตร (dN.m) ใช้สัญลักษณ์ว่า t_{s1} แต่ในกรณีที่ใช้มุมแกว่งเท่ากับ 3° ค่าระยะเวลาสกอร์ชคือระยะเวลาที่ทำให้ค่าแรงบิดสูงกว่าจุดต่ำสุด 2 เดซินิวตัน-เมตร และใช้

สัญลักษณ์ว่า t_{90} เนื่องจากระยะเวลาสกอร์ชเป็นตัวบ่งชี้ถึงระยะเวลาที่ยังคงสามารถไหลขึ้นรูปได้ ณ อุณหภูมินั้นๆ ดังนั้น ระยะเวลาสกอร์ชจึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงความปลอดภัยในกระบวนการผลิต

เมื่อการทดสอบดำเนินต่อไป ค่าแรงบิดจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามระดับของการคงรูป จนกระทั่งถึงจุดที่มีการคงรูปเกิดขึ้นสมบูรณ์ แรงบิด ณ จุดนี้มีค่าสูงที่สุดและใช้สัญลักษณ์ว่า M_H ซึ่งค่าแรงบิดสูงสุดนี้จะเป็ค่าที่บ่งชี้ถึงความแข็งแรงหรือค่าโมดูลัสเฉือนของยางคงรูป ณ อุณหภูมิของการทดสอบ

ตัวแปรสำคัญอีกตัวหนึ่งที่เป็นตัวบ่งชี้ลักษณะของการคงรูปยางคือ “ระยะเวลาของการคงรูป (curing time)” ใช้สัญลักษณ์เป็น t_x เมื่อ x คือร้อยละการเพิ่มขึ้นของแรงบิดจากจุดต่ำสุด (M_L) เช่น t_{90} ก็หมายถึงระยะเวลาที่ทำให้ยางคงรูปไปร้อยละ 90 หรือระยะเวลาที่ทำให้แรงบิดมีค่าเท่ากับค่าแรงบิดต่ำสุดบวกด้วย 90% ของผลต่างระหว่างค่าแรงบิดต่ำสุดหรือค่าแรงบิดสูงสุด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$t_{90} = \text{ระยะเวลาที่ทำให้แรงบิดมีค่าเท่ากับ } M_L + (90(M_H - M_L)/100)$$

โดยทั่วไปค่า t_{90} จัดเป็นค่า “ระยะเวลาการคงรูปที่เหมาะสม (optimum curing time)” ทางเทคนิคของยางคอมพาวด์เพราะการคงรูป ณ จุดนี้จะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี

นอกจากตัวแปรต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่สามารถใช้แสดงลักษณะการคงรูปของยางนั่นคือดัชนีอัตราการคงรูป (cure rate index, CRI) ซึ่งแสดงถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปที่สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$CRI = 100 / (\text{ระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม} - \text{ระยะเวลาสกอร์ช})$$

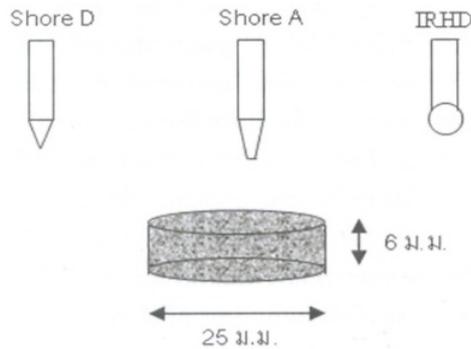
3. ช่วงของการคงรูปที่มากเกินไป (overcure) : เมื่อปฏิกิริยาการคงรูปเกิดได้สมบูรณ์แล้ว แต่ยังคงดำเนินการทดสอบต่อไป ความร้อนของยางที่ได้รับจะทำให้เกิดปฏิกิริยา 2 ปฏิกิริยาในเวลาเดียวกันคือปฏิกิริยาการคงรูป (ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล) และปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน (ทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุล) หาก 2 ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดได้ในอัตราเร็วที่ใกล้เคียงกัน แรงบิดก็จะคงที่ตามเวลา เรียกว่าเกิด “marching” แต่ถ้าปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพเกิดขึ้นได้มากกว่าปฏิกิริยาการคงรูป แรงบิดก็จะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลา เรียกว่าเกิด “reversion”

2.5.2 การทดสอบสมบัติของยางคงรูป^[16]

2.5.2.1 การทดสอบวัดความแข็ง (Hardness test)

ความแข็งเป็นสมบัติพื้นฐานของยางซึ่งมักจะใช้ร่วมกับสมบัติแรงดึงในการกำหนดคุณภาพของยาง ความแข็งของยางหมายถึงความต้านทานของพื้นผิวต่อการทะลุทะลวงของตัวกดที่มีขนาดเฉพาะและภายใต้แรงกดที่กำหนด

หน่วยที่ใช้สำหรับวัดความแข็งของยางมีอยู่ 2 หน่วยคือ IRHD (International Rubber Hardness Degree) และชอร์ (Shore unit) ซึ่งการวัดความแข็งในหน่วย IRHD นั้นจะใช้ลูกกลมแข็ง (rigid ball) แทนตัวกดและแรงกดจะมาจากน้ำหนักที่คงที่ ส่วนเครื่องวัดความแข็งที่ให้หน่วยชอร์นั้นเรียกว่าเครื่องคูโรมิเตอร์ (durometer) ซึ่งมีหลายแบบ แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบชอร์เอ (shore A) และแบบชอร์ดี (shore D)



รูปที่ 2.18 ชิ้นทดสอบและหัวกดแบบต่างๆ สำหรับวัดค่าความแข็ง ^[16]

2.5.2.2 การทดสอบสมบัติแรงดึง (Testing of Tensile Properties)

สมบัติแรงดึงที่นิยมใช้ในการควบคุมคุณภาพของยาง ได้แก่ ความทนทานต่อแรงดึง (tensile Strength) การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) และ โมดูลัส (modulus)

สมบัติแรงดึงของยางสามารถวัดได้โดยการดึงชิ้นทดสอบมาตรฐานขนาดด้วยอัตราเร็วในการดึงคงที่ เครื่องที่ใช้ทดสอบส่วนใหญ่จะเรียกว่าเครื่อง universal testing machine หรือ tensile testing machine ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ในระหว่างการดึง เครื่องจะทำการวัดและบันทึกค่าแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะการยืดตัวของยางแล้วนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณและพล็อตเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด พร้อมทั้งคำนวณหาค่าความทนทานต่อแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และค่าโมดูลัสที่ความเครียดต่างๆ



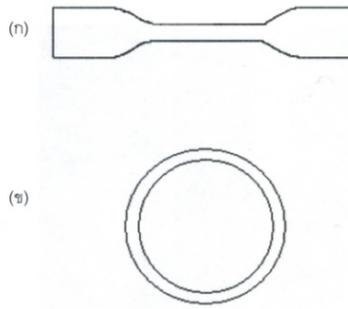
รูปที่ 2.19 เครื่อง tensile testing machine

ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength, TS) : คือค่าแรงดึงสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หรือค่าค่าความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการดึงขึ้นทดสอบมาตรฐานจนขาดที่อัตราเร็วในการดึงคงที่ ซึ่งมีหน่วยเป็นเมกะพาสกาล (MPa หรือ N/mm^2) ยางแต่ละชนิดจะมีค่าความทนทานต่อแรงดึงแตกต่างกัน ยางที่สามารถแตกผลึกได้ในขณะที่ถูกดึงหรือได้รับความเครียด (strain induced crystallization) เช่น ยางธรรมชาติ (NR) และยางคลอโรพรีน (CR) จะมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางที่ไม่สามารถแตกผลึกได้ อย่างไรก็ตาม การเติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ รวมถึงระบบการคงรูปก็ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติแรงดึงของยาง โดยทั่วไป ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางจะอยู่ในช่วง 7 N/mm^2 ถึงมากกว่า 45 N/mm^2 ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสูตรการผสมเคมี

การยืดตัวหรือความเครียด (elongation or strain) : คือการยืดตัวของชิ้นทดสอบที่เกิดขึ้นจากแรงดึง ซึ่งจะแสดงในรูปร้อยละการยืดตัวเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวตั้งต้น เช่น การยืดตัวที่ 300% หมายถึงชิ้นทดสอบถูกยืดออกไปจนมีความยาวเป็น 4 เท่าของความยาวเริ่มต้น ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break, E_b) คือระดับการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบ ซึ่งค่าความเค้น ณ จุดนี้ก็คือค่าความทนทานต่อแรงดึงนั่นเอง โดยทั่วไป การยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบ ซึ่งค่าความเค้น ณ จุดนี้ก็คือค่าทนทานต่อแรงดึงนั่นเอง โดยทั่วไป การยืดตัว ณ จุดขาดของยางอยู่ในช่วง 100% ถึงมากกว่า 1000% ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสูตรการผสมเคมี ส่วนค่าความเครียดก็สัมพันธ์กันโดยตรงกับค่าการยืดตัวของยางเพราะค่าความเครียดคืออัตราส่วนของระยะที่ยางยืดตัว ต่อความยาวตั้งต้นของยาง ด้วยเหตุนี้ เมื่อยางยืดตัวมากขึ้น ค่าความเครียดของยางก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

โมดูลัส (modulus, M) : สำหรับยางแล้ว ค่าโมดูลัสจะหมายถึงความเค้น (ในหน่วย MPa หรือ N/mm^2) ที่ต้องใช้ในการยืดยางให้ได้ค่าการยืดตัวตามที่กำหนดไว้ (โดยทั่วไปจะกำหนดการยืดตัวไว้ที่ 100% และ 300%) เช่น หากยางมีค่า 100% โมดูลัส(M100) เท่ากับ 5 N/mm^2 หมายถึงการที่จะดึงยางให้ได้ 100% ของการยืดตัวจะต้องใช้ความเค้นเท่ากับ 5 N/mm^2 เนื่องจากค่าโมดูลัสจะสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยาง ดังนั้นจึงนิยมใช้ค่าโมดูลัสของยางในการบ่งชี้สมบัติความแข็งแกร่ง (stiffness) และระดับของการเชื่อมโยง (vulcanization degree) ของยาง โดยทั่วไป ค่า 100% โมดูลัสของยางอยู่ในช่วง 1 N/mm^2 ถึงมากกว่า 13 N/mm^2 ขึ้นอยู่กับสูตรการผสมเคมี

โดยทั่วไป ชิ้นทดสอบที่จะนำมาทดสอบควรได้รับการคงรูปมาแล้วไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมงเพื่อให้แน่ใจว่าชิ้นทดสอบนั้นได้รับการคงรูปอย่างสมบูรณ์แล้ว อย่างไรก็ตามไม่ควรเก็บชิ้นทดสอบไว้นานเกิน 28 วันหลังการคงรูป (ยกเว้นในกรณีเตรียมชิ้นทดสอบจากผลิตภัณฑ์) สำหรับรูปร่างของชิ้นทดสอบมาตรฐานแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ รูปดัมเบลล์ และรูปวงแหวน ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 รูปร่างของชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบสมบัติแรงดึง

(ก) รูปดัมเบลล์ และ (ข) รูปวงแหวน^[16]

อัตราเร็วในการดึงขางก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อค่าที่วัดได้ โดยทั่วไป การเพิ่มอัตราเร็วในการดึงจะส่งผลทำให้ยางมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง มีค่าโมดูลัสสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความทนทานต่อแรงดึงอาจสูงขึ้นหรือลดลงก็ได้ นอกจากนี้ ทิศทางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลยางที่เกิดขึ้นในขณะที่ยางถูกรีดผ่านเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้งก็มีผลต่อสมบัติแรงดึงของยางด้วยเช่นกัน โดยพบว่า ถ้าทำการทดสอบสมบัติแรงดึงในทิศทางตามแนวการจัดเรียงตัวของโมเลกุลยาง (ขนานกับทิศทางการรีดผ่านลูกกลิ้ง) จะพบว่าความทนทานต่อแรงดึงที่วัดได้จะมีค่าสูงกว่าการทดสอบในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ด้วยเหตุนี้ ในการเตรียมชิ้นทดสอบควรมีการระบุทิศทางของยางที่ผ่านออกมาจากลูกกลิ้งด้วย เพราะมาตรฐานส่วนใหญ่ได้กำหนดให้ดำเนินการทดสอบสมบัติแรงดึงในทิศทางตามแนวการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลยาง

สมบัติแรงดึงเป็นสมบัติพื้นฐานที่ใช้ในการควบคุมการผลิต เนื่องจากค่าความทนทานต่อแรงดึงเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงได้ง่ายตามการเปลี่ยนแปลงของยางอันเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนสูตรการผสมเคมี หรือการเปลี่ยนแปลงทางกระบวนการผลิต นอกจากนี้ สมบัตินี้ยังนิยมใช้เป็นตัวชี้วัดความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากสิ่งเร้าต่างๆ เช่น ความร้อน ของเหลว ก๊าซ สารเคมี โอโซน สภาพอากาศ ฯลฯ โดยทั่วไป การทดสอบสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพสามารถกระทำได้โดยการวัดสมบัติแรงดึงของยางทั้งก่อนและหลังการสัมผัสกับสิ่งเร้าดังกล่าว ซึ่งถ้าสมบัติแรงดึงเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยก็แสดงว่ายางมีความทนทานต่อสิ่งเร้านั้นได้ดีและยางควรจะมียอายุการใช้งานที่ยาวนานภายใต้สิ่งเร้าดังกล่าว

ความต้านทานต่อแรงดึงของยางจะขึ้นกับสิ่งต่างๆ เหล่านี้

- 1) โครงสร้างของยาง
- 2) ชนิดและปริมาณของสารตัวเติม
- 3) ปริมาณพลาสติกไซเซอร์
- 4) ระบบการวัลคาไนซ์

5) อุณหภูมิในการทดสอบ

2.5.2.3 การทดสอบการบ่มเร่งของยาง (aging)

เมื่อนำยางวัลคาไนซ์แล้ว มาตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลาต่างๆ สมบัติของยางจะค่อยๆ เปลี่ยนไปตามอายุของยาง โดยทั่วไปการเพิ่มอุณหภูมิขึ้น จะเร่งให้การเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้น แต่ถ้าเร่งโดยใช้อุณหภูมิสูงเกินไป การเปลี่ยนแปลงของสมบัติของยางจะไม่เหมือนกับการที่ตั้งไว้

ลักษณะที่เกิดขึ้นเมื่อตั้งยางทิ้งไว้ มีดังนี้

1. ค่า Tensile Strength จะตกลง
2. ค่า Elongation at break ของยางจะลดลง
3. ค่าความแข็งของยางอาจจะเพิ่มขึ้น (เช่น กรณียาง SBR) หรือความแข็งอาจลดลง
4. สีของยางอาจเปลี่ยนไป

การทดสอบการเร่งให้ยางเสื่อมเร็ว ได้ออกแบบให้เราสามารถเปรียบเทียบถึงความต้านทานของยางต่อการเสื่อมเมื่อเวลาผ่านไป โดยจุดมุ่งหมายนี้ ยางจะถูกนำไปอยู่ในสภาวะที่ควบคุมแล้วปล่อยให้ยางเสื่อมภายในระยะเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นให้นำยางไปหาสมบัติของยางบางอย่าง และเปรียบเทียบกับสมบัติของยางดังกล่าวก่อนนำยางเข้าสู่สภาวะนั้น

2.5.2.4 การทดสอบสมบัติการสึกหรอ (Testing of Abrasion)

ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางหมายถึงความต้านทานของยางต่อการสึกหรอเมื่อยางต้องสัมผัสกับพื้นผิวขัดที่เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ในการทดสอบ ขึ้นทดสอบมาตรฐานจะถูกกด (ด้วยค่าแรงกดเฉพาะ) ลงบนพื้นผิวขัดที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วตามที่ระบุไว้ในมาตรฐานการทดสอบ

สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอของยางสามารถแสดงผลได้หลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับมาตรฐานและวิธีการทดสอบ แต่โดยทั่วไป ผู้ทดสอบนิยมแสดงผลการทดสอบใน 2 รูปแบบหลักๆ ได้แก่

1 ดัชนีความต้านทานต่อการสึกหรอ (abrasion resistance index, API) : เป็นการแสดงค่าความต้านทานต่อการสึกหรอในรูปอัตราส่วนของปริมาตรที่สูญเสียไปของตัวอย่างมาตรฐาน (DV_s) ต่อปริมาตรที่สูญเสียไปของตัวอย่างยาง (DV_p) ที่ได้รับการทดสอบภายใต้สภาวะเดียวกัน โดยนิยมแสดงผลในรูปของร้อยละ

$$API = (DV_s) / (DV_p) \times 100$$

2 ปริมาตรของตัวอย่างยางที่สูญเสียไป (volume loss, DV) ในหน่วยลูกบาศก์มิลลิเมตร เมื่อยางได้รับการทดสอบด้วยแผ่นขัดมาตรฐาน (abrasion cloth) ที่มีความคมหรือมีกำลังการขัดถู (abrasion power, S) เท่ากับ 200 มิลลิกรัม (กำลังการขัดถูของแผ่นขัดคือน้ำหนักของ

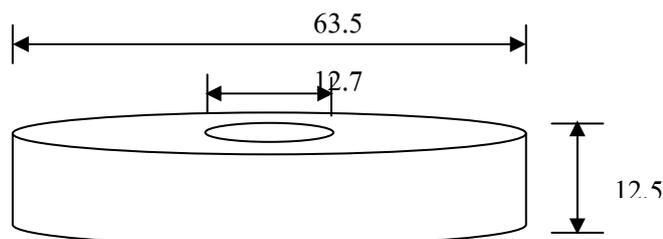
ตัวอย่างมาตรฐานที่สูญเสียไปหากต้องเคลื่อนที่ไปบนผิวขัดเป็นระยะทาง 40 เมตร ภายใต้สภาวะการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนด) เนื่องจากกำลังการขัดถูของแผ่นขัดตามห้องปฏิบัติการส่วนใหญ่อาจมีค่าไม่เท่ากับค่ามาตรฐานคือ 200 มิลลิกรัม (แผ่นขัดที่นำมาใช้ในการทดสอบต้องมีค่ากำลังการขัดถูในช่วง 170 ถึง 220 มิลลิกรัม) ดังนั้น ในการวัดค่าความต้านทานต่อการขัดถูของตัวอย่างยางทุกครั้ง ผู้ทดสอบจึงต้องทำการวัดค่าปริมาตรที่สูญเสียไปของตัวอย่างมาตรฐานอย่างน้อย 3 ซ้ำทั้งก่อนและหลังการทดสอบตัวอย่างยางจริงและนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปใช้แสดงกำลังการขัดถูที่แท้จริง (current abrasive power, S_c) ของแผ่นขัด จากนั้น จึงนำค่าปริมาตรที่สูญเสียไปของตัวอย่างยาง (DV_c) ที่วัดได้จากการใช้แผ่นขัดที่มีกำลังการขัดถูเท่ากับ S_c นี้ไปคำนวณหาค่าปริมาตรที่ควรจะสูญเสียไปหากทำการทดสอบโดยใช้แผ่นขัดที่มีกำลังการขัดถูมาตรฐาน โดยใช้สมการ

$$DV = (DV_c / S_c) \cdot 200$$

โดยทั่วไป ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างดังต่อไปนี้

1. ธรรมชาติและสมบัติของยาง เช่น ชนิดของยาง ชนิดและปริมาณของสารตัวเติม ความแข็ง ความทนทานต่อการฉีกขาด เป็นต้น
2. ลักษณะทางพื้นผิวของยาง
3. ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างผิวสัมผัส
4. ความคมของผิวขัด
5. ขนาดของแรงกด
6. สภาวะของการทดสอบ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น รวมถึงความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ เป็นต้น

สำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน BS นั้น จะเป็นการทดสอบโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่าเครื่อง Akron abrasion tester โดยชิ้นทดสอบจะมีลักษณะเป็นแผ่นกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 63.5 มิลลิเมตร หนา 12.5 มิลลิเมตร และที่บริเวณตรงกลางของชิ้นทดสอบจะมีรูกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ลักษณะของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน BS 903

การทดสอบด้วยเครื่อง Akron abrasion tester ต้องการขึ้นทดสอบเพียงแค่ 1 ชั้นต่อตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ เพราะการทดสอบทั้ง 5 ซ้ำสามารถทำได้อย่างต่อเนื่องกันโดยใช้ขึ้นทดสอบเพียงชั้นเดียว จากนั้นก็จะทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่สูญเสียไปและปริมาตรที่สูญเสียไป ตามลำดับ เนื่องจากมาตรฐาน BS ได้กำหนดให้รายงานผลการทดสอบในรูปของค่าดัชนีความต้านทานต่อการสึกหรอ ดังนั้นผู้ทดสอบจำเป็นต้องทำการทดสอบตัวอย่างมาตรฐานทั้งก่อนและหลังการทดสอบตัวอย่างจริงและนำค่าเฉลี่ยของการทดสอบทั้งก่อนและหลังดังกล่าวไปใช้ในการคำนวณหาค่า ARI ต่อไป

การทดสอบด้วยเครื่อง Akron abrasion tester จะเริ่มต้นด้วยการนำขึ้นทดสอบไปซึ่งน้ำหนักและนำไปยึดติดกับแกนหมุน ในระหว่างการทดสอบ ขึ้นทดสอบจะถูกหมุนด้วยความเร็ว $250 + 5$ รอบต่อนาทีและล้อหินขัดจะถูกดันให้ไปสัมผัสกับขึ้นทดสอบด้วยแรง 45 N โดยที่มาตรฐานได้กำหนดให้ระนาบของขึ้นทดสอบและระนาบของล้อหินขัดต้องทำมุมกัน 15° ยกเว้นในกรณีที่ยังมีความต้านทานต่อการขัดถูสูงมากก็สามารถปรับมุมให้กว้างขึ้นเป็น 25° ได้

โดยทั่วไป การทดสอบความต้านทานต่อการขัดถูด้วยเครื่อง Akron abrasion tester นี้สามารถแบ่งขั้นตอนการทดสอบได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 คือช่วงการทดสอบใน 500 รอบแรกของการหมุนเรียกว่าขั้นตอนของการทดลอง ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการศึกษาระดับของความต้านทานต่อการขัดถูของตัวอย่างอย่างคร่าวๆ ก่อนที่จะกำหนดสภาวะการทดสอบที่เหมาะสมต่อไป เมื่อขึ้นทดสอบได้รับการขัดถูครบ 500 รอบแล้ว ผู้ทดสอบก็จะนำขึ้นทดสอบไปวัดน้ำหนักที่สูญเสียไป และนำขึ้นทดสอบกลับเข้าไปยึดติดกับแกนหมุนดั้งเดิมเพื่อที่จะทำการทดสอบในขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 2 เป็นขั้นตอนการเตรียมพื้นผิวด้านที่ถูกขัดของขึ้นทดสอบให้พร้อม (เกิดการสึกหรอเข้าที่) ก่อนที่จะเริ่มการทดสอบจริง ซึ่งในขั้นตอนนี้ ยางจะถูกขัดต่อไปเป็นระยะเวลาหนึ่งทีเรียกว่าระยะเวลาการสึกหรอเข้าที่ ซึ่งระยะเวลานี้จะนานเท่าใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับระดับของความต้านทานต่อการขัดถูที่วัดได้จากขั้นตอนที่ 1 ซึ่งถ้ายังมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง การเตรียมพื้นผิวก็จะใช้ระยะเวลานานมากขึ้นหรืออย่างต้องถูกขัดด้วยจำนวนรอบการหมุนที่สูงขึ้น การเตรียมพื้นผิวในขั้นตอนที่ 2 นี้มีจุดประสงค์หลักก็เพื่อจะทำให้พื้นผิวด้านที่ถูกขัดของขึ้นทดสอบอยู่ในสภาพที่สึกหรอเต็มที่ก่อนการทดสอบจริง ทั้งนี้เพื่อลดความแปรปรวนของผลการทดสอบในครั้งถัดๆ ไป (เพราะต้องทำการทดสอบ 5 ซ้ำติดๆ กันบนขึ้นทดสอบชั้นเดียวกัน)

ขั้นตอนที่ 3 เป็นขั้นตอนการทดสอบจริง ในขั้นตอนนี้ ขึ้นทดสอบที่ได้รับการเตรียมพื้นผิวให้สึกหรอเต็มที่ (จากขั้นตอนที่ 2) จะถูกนำมาชั่งน้ำหนักและทำการทดสอบเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียไป โดยจะทำการทดสอบจำนวน 5 ซ้ำ ซึ่งจำนวนรอบการหมุนของการทดสอบในขั้นตอนนี้ก็จะขึ้นอยู่กับระดับความต้านทานต่อการขัดถูที่วัดได้จากขั้นตอนที่ 1 เช่นเดียวกันกับในกรณีของการเตรียมพื้นผิว)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นุชรี สะอาด และคณะ (2544)^[8] ได้ศึกษาการเตรียมซิลิกาเจลจากแกลบโดยนำแกลบมาแช่โซเดียมไฮดรอกไซด์และแช่กรดไฮโดรคลอริกและนำไปเผาที่ 800 °C จะได้ขี้เถ้าแกลบ จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นำไป reflux ได้สารละลายโซเดียมซิลิเกต พบว่า จะได้เปอร์เซ็นต์เถ้าแกลบ 21.13 เปอร์เซ็นต์ เถ้าแกลบมีเปอร์เซ็นต์ซิลิกาเฉลี่ย 85.77 เปอร์เซ็นต์

ชีวารัตน์ มาสิงบุญ (2545)^[9] ได้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาบริสุทธิ์จากการเผาแกลบ โดยการฟลักซ์แกลบด้วย 1N HCl เป็นเวลา 15 min และนำไปเผาที่ 800 °C, 5 h เป็นภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดซิลิกา โดยเถ้าแกลบที่ได้มีซิลิกาอสังฐานเป็นองค์ประกอบ 99.33 wt% หลังจากนั้นศึกษาการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกซิลิกาโดยนำเถ้าแกลบสีขาวมาเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกซิลิกาด้วย XRD และ Raman spectroscopy พบว่า เมื่อเผาที่ 800 °C, 10 h ซิลิกาอสังฐานจะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็น α -ควอร์ซ ซิลิกาจะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจาก α -ควอร์ซ เป็น α -ไตรดิไมท์ เมื่อเผาต่อที่ 1100 °C, 10 h และจะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจาก α -ไตรดิไมท์ เป็น α -คริสโทบอลไลท์ เมื่อเผาต่ออีกครั้งที่ 1200 °C, 10 h ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของซิลิกาที่ได้จากการเผาแกลบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วย SEM พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสูงขึ้น อนุภาคของซิลิกาจะเกิดการเกาะตัวกัน และมีขนาดของอนุภาคเล็กลง

เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร และคณะ (2544)^[10] งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยซิลิกาที่เตรียมได้จากแกลบโดยนำแกลบไปทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ ที่ อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้เถ้าสีขาวที่มีปริมาณซิลิกาสูงถึงประมาณร้อยละ 99.6 เมื่อทดสอบสมบัติของซิลิกาที่เตรียมได้พบว่านอกจากจะมีปริมาณซิลิกาและพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าซิลิกาทางการค้าที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง ยังมีปริมาณความชื้นต่ำกว่าด้วย และเมื่อนำผงซิลิกาที่เตรียมจากแกลบนี้ไปใช้เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติแล้วทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ ได้แก่ ความทนแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด ความต้านทานการสึกหรอ การคืนตัว และการกระดอน เทียบกับผลิตภัณฑ์ที่เสริมแรงด้วยซิลิกาทางการค้าพบว่ายางธรรมชาติสูตรที่ใส่ซิลิกาจากแกลบมีสมบัติเชิงกลโดยทั่วไปดีกว่า

จิตติพงษ์ ตั้งฐานานุกัตต์ (2543)^[23] ได้ศึกษาผลของสารตัวเติม Silica , Clay , CaCO₃ , Talcum และ MgO ต่อความเสียดทานและการสึกหรอของยางธรรมชาติ จากการทดสอบความเสียดทานของยางที่ใส่สารตัวเติม Silica จะมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงที่สุด โดยเทียบกับยางที่มีความแข็งเท่ากัน และการทดสอบการสึกหรอพบว่ายางที่ใช้ Silica เป็นสารตัวเติมจะทำให้ยางมีความต้านทานการสึกหรอดีที่สุด ส่วนยางที่ใช้ CaCO₃ จะมีความต้านทานการสึกหรอต่ำมากที่สุด เมื่อยางมีความแข็งเพิ่มขึ้นความต้านทานการสึกหรอจะลดลงยกเว้นยางที่ใช้ Silica จะมีความต้านทานการสึกหรอที่สูงขึ้นเมื่อความแข็งเพิ่มขึ้น

ศิรินทร ทองแสง และคณะ(2549)^[24] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการนำถั่วลอยในประเทศไทยมาใช้เป็นสารเสริมแรงในสารประกอบยางธรรมชาติและเปรียบเทียบกับซิลิกาเกรดการค้า จากการทดลองพบว่าถั่วลอยสามารถนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติได้ และสามารถทดแทนซิลิกาเกรดการค้าได้ในปริมาณซิลิกา 30 ส่วนในร้อยส่วน ซึ่งให้สมบัติเชิงกลด้านความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อแรงฉีกขาด และค่าความแข็งเทียบเท่ากัน และยางธรรมชาติที่เติมถั่วลอยยังสามารถรักษาสมบัติความเป็นออสติกของยางดีกว่าซิลิกาเกรดการค้าด้วย

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์
Nakhon Sawan Rajabhat University