

บทที่ 2

ข้อมูลเบื้องต้นทางวิชาการ

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)

ยางธรรมชาติที่นำมาใช้ในทางการค้า ได้จากต้นไม้ใหญ่ชนิดหนึ่งที่เรียกว่า ต้นยางพารา มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* ซึ่งแต่เดิมมีอยู่เฉพาะในทวีปอเมริกาใต้เท่านั้น และได้มีผู้นำมาปลูกในทวีปเอเชียและแอฟริกา พืชชนิดนี้นิยมปลูกกันมากในประเทศที่มีอากาศร้อนชื้น เช่น ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งมีอากาศที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของต้นยางพารา มากกว่า 90% ของยางธรรมชาติที่ใช้ในโลกได้มาจากภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ที่เหลือได้มาจากแถบแอฟริกากลาง สำหรับประเทศไทยสามารถปลูกยางพาราได้ทั้งภาคใต้และภาคตะวันออก

เมื่อต้นยางโตเต็มที่แล้วชาวสวนจะเก็บน้ำยางโดยการกรีดลำต้น (tapping) ให้น้ำยางไหลซึมออกมา น้ำยางที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นข้นคล้ายน้ำนม มีกลิ่นหอมเล็กน้อย ประกอบด้วยอนุภาคยางเล็กๆ แขนงลอยอยู่ในน้ำ ในลักษณะของอิมัลชัน (emulsion) มีเนื้อของแข็ง 30 - 40 % ขึ้นกับพันธุ์ของต้นยาง อายุของต้นยาง และฤดูกาล น้ำยางที่ได้มีความหนาแน่นประมาณ 0.98 มี pH ประมาณ 6.8

น้ำยางที่ได้เมื่อวางทิ้งไว้จะเกิดการบวมตัว จึงต้องทำการแปรรูปให้เป็นยางดิบในลักษณะต่างๆ กัน คืออยู่ในรูปของน้ำยางข้น (concentrated latex) หรือยางดิบแห้งชนิดต่างๆ ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน (ribbed smoked sheet, RSS) ยางแผ่นผึ่งแห้ง (air-dried sheet, ADS) ยางเครพขาว (crepes) หรือยางแท่ง (block rubber) เป็นต้น เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบป้อนโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์ยางประเภทต่างๆ เช่น ยางรถยนต์ ยางล้อเครื่องบิน ยางรัดของ ท่อยาง ที่นอนฟองน้ำ และรองเท้ายาง เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากยางมีสมบัติพิเศษแตกต่างจากวัสดุอื่นๆ คือ มีความยืดหยุ่นดี นอกจากนี้ยังมีเนื้อที่บวมตัวสามารถกั้นน้ำและอากาศไม่ให้ผ่านได้โดยง่าย อีกทั้งไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังนั้นยางจึงเป็นวัสดุที่มีประโยชน์และมีคุณค่ามาก

ยางธรรมชาติเป็นยางที่เหมาะสมสำหรับใช้ผลิตวัสดุสำเร็จรูปทั่วไปที่ไม่ต้องการสมบัติพิเศษ เช่น การทนต่อน้ำมัน หรือทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีการผลิตยางสังเคราะห์ขึ้นหลายชนิด แต่ปริมาณการใช้ยางธรรมชาติเพื่อผลิตวัสดุสำเร็จรูปยางก็ยังสูงอยู่ เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติที่ดีหลายประการ คือ มีความต้านทานแรงดึง (tensile) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) ดีมาก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง มีความสามารถในการกระดอน (resilience)

(resilience) สูง มีสมบัติเหนียวติดกันเอง (tackiness) ดีมาก มีความต้านทานต่อการสึกหรอ (abrasion resistance) ดีมาก แต่ค้อยกว่ายาง SBR เล็กน้อย การเกิดความร้อนสะสมต่ำ และมีความต้านทานต่อการซึมผ่านของก๊าซไม่ดี

2.1.1 ลักษณะของต้นยางพารา การปลูก และการกรีค

ต้นยางพาราเป็นต้นไม้ขนาดใหญ่ มีอายุยาวนานเป็นร้อยปี ต้นยางมีเปลือกหนา 6.5 - 15 มิลลิเมตร ซึ่งลำต้นที่สมบูรณ์จะสูงชะลูด กิ่งจะแยกตั้งขึ้นไปประมาณ 45 องศา จากลำต้น ใบจะรวมเป็นพุ่มที่ส่วนใบของกิ่ง โดยแต่ละก้านใบแยกออกเป็น 3 ใบ ใบกว้างประมาณ 5 - 10 เซนติเมตร และยาวประมาณ 10 - 20 เซนติเมตร ในทางพฤกษศาสตร์จัดให้อยู่ในวงศ์ family *Euphorbiaceas* genus *Hevea* และ species *brasiliensis* สำหรับต้นยางในสกุล *Hevea* มีอยู่มากกว่า 50 ชนิด แต่ *Hevea brasiliensis* เป็นชนิดที่ให้น้ำยางมากที่สุด และเนื้อยางมีสมบัติดีกว่ายางชนิดอื่นๆ

ต้นยางพาราชอบขึ้นในดินร่วน มีการระบายน้ำได้ดีมีความชื้น และดินมีความเป็นกรด (pH 4.0 - 5.5) ต้องการฝนปีละประมาณ 2,000 - 2,500 มิลลิเมตร เหมาะที่จะปลูกในเขตระหว่างเส้นขนานที่ 28 องศาเหนือและ 28 องศาใต้ ไม่ควรปลูกในที่ที่สูงกว่าระดับน้ำทะเลเกิน 100 ฟุต รากของต้นยางเป็นรากแก้วค่อนข้างตื้น ลึกไม่เกิน 1.50 - 2.00 เมตร มีรากเล็กๆ แผ่ตามผิวดินเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะล้มได้ง่ายเมื่อมีลมแรง สามารถกรีคเอาน้ำยางได้เมื่อต้นยางมีอายุ 5 - 6 ปีขึ้นไป ถ้ากรีคด้วยความระมัดระวังสามารถกรีคยางได้นานกว่า 30 ปี

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีว่า พอลิไอโซพรีน (Polyisoprene, $(C_5H_8)_n$) ซึ่งได้จากหน่วยของไอโซพรีนต่อกันแบบหัวต่อหาง (head to tail)

ยางเฮเวีย (*Hevea rubber*) มีโครงสร้างเป็น cis 1,4 polyisoprene ส่วนยางกัตตาเปอร์ชา (*gutta-percha*) และยางบาลาตา (*balata*) มีโครงสร้างเป็น trans-1,4 polyisoprene ซึ่งต้นกัตตามีอยู่ในประเทศมาเลเซีย ส่วนบาลาตามีอยู่บริเวณชายฝั่งตะวันออกเฉียงเหนือของทวีปอเมริกาใต้ และในประเทศอินโดนีเซีย ซึ่งไม่ค่อยมีความสำคัญในทางการค้ามากนัก มีการใช้งานน้อย แต่เดิมใช้ทำถ่านหุ้มสายเคเบิลได้น้ำ ปัจจุบันใช้ทำที่หุ้มลูกกอล์ฟและกาวพิเศษบางชนิดเท่านั้น ทั้งนี้เพราะน้ำยางเกิดการแข็งตัวได้เร็วมากในอากาศ

2.1.3 น้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex)

น้ำยางที่ได้จากต้นยางมีสีขาวขุ่นข้นคล้ายน้ำมัน มีกลิ่นหอมเล็กน้อย ความหนาแน่นประมาณ 0.975 - 0.980 กรัมต่อมิลลิเมตร มีค่า pH 6.5 - 7.0 น้ำยางจะมีอนุภาคขนาดต่างๆ กัน แขนงลอยหรือกระจาย (disperse) อยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว โดยอนุภาคเหล่านี้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 5 ไมครอน และมีประจุเป็นลบ ซึ่งผลกักกันตลอดเวลา

น้ำขางมีลักษณะพิเศษที่เรียกว่า “คอลลอยด์” (colloid) ชนิดที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (hydrosol) แต่มีลักษณะพิเศษ คือ น้ำขางมีลักษณะก้ำกึ่งระหว่างสารที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และสารที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) แต่ลักษณะที่ไม่ชอบน้ำจะเด่นชัดกว่า นอกจากนี้ น้ำขางยังประกอบไปด้วย ส่วนที่ไม่ใช่ขาง ได้แก่ สารพวกโปรตีนและกรดอะมิโน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และอนุมูลของโลหะ เป็นต้น

2.1.4 ขางคืบแห้งชนิดต่างๆ

1) ขางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS)

ประเทศไทยสามารถผลิตขางแผ่นรมควันได้ประมาณ 80% ของขางคืบที่ผลิตได้ทั้งหมด ส่วนใหญ่ได้จากสวนขางขนาดเล็ก ซึ่งจะทำการแปรรูปน้ำขางสดเหล่านี้ให้เป็นขางแผ่นคืบไม่รมควัน (Unsmoked Sheet) โดยนำขางแผ่นคืบที่ได้มาผึ่งชั่วคราวหนึ่ง ทำให้แผ่นขางที่ได้มีความชื้นลดลง สำหรับการผลิตขางแผ่นรมควันดำเนินการโดยโรงรมควัน ซึ่งอาจอยู่ในรูปของบริษัท ห้างหุ้นส่วน หรือกลุ่มเกษตรกร โดยโรงรมควันจะเป็นผู้รวบรวม และรับซื้อขางแผ่นคืบจากร้านค้าขางหรือจาก ตลาดกลางขางแผ่นคืบ แล้วนำขางที่ได้มาทำการรมควัน และแยกชั้นของขางเป็นขางแผ่นคืบรมควัน ชั้นต่างๆ คุณภาพของขางแผ่นรมควันขึ้นกับสภาพการดำเนินงานของแต่ละสวน สำหรับการจัดชั้นของ ขางนั้นจะคู่ด้วยสายตา โดยพิจารณาจาก ขนาด รูปร่าง ความหนา สี ฟองอากาศ เชื้อราบนแผ่นขาง ความสม่ำเสมอของตำหนิจากการรมควัน ความชื้น สิ่งแปลกปลอม เป็นต้น

การทำขางแผ่นรมควันเป็นการทำแบบเก่า คุณภาพของขางอยู่ที่ความสะอาด ถ้าสะอาดมาก ถือว่าเป็นขางชั้นดี การจัดชั้นคุณภาพของขางแผ่นรมควันสามารถแบ่งได้เป็นชั้นต่างๆ ดังนี้ คือ

ขางแผ่นรมควันชั้น 1 พิเศษ

เป็นขางแผ่นรมควันที่มีการควบคุมการผลิตอย่างเข้มงวด ก้อนขางแต่ละก้อนต้องไม่ขึ้นรา ไม่ปรากฏจุดหรือริ้วรอยของขางถูกรมควันมากเกินไป แผ่นขางต้องแห้งดี สะอาดรมควันสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ปราศจากฟองอากาศ สิ่งสกปรก ตลอดจนสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ

ขางแผ่นรมควันชั้น 1

ก้อนขางแต่ละก้อนต้องไม่ขึ้นรา ไม่ปรากฏจุดหรือริ้วรอยของขางถูกรมควันมากหรือน้อยเกินไป ขางต้องแห้งดี สะอาด รมควันสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ปราศจากฟองอากาศ สิ่งสกปรก ตลอดจนสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ

ขางแผ่นรมควันชั้น 2

ก้อนขางแต่ละก้อนมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกิน 5% แผ่นขางมีฟองอากาศบ้าง แต่ปราศจากร่องรอยของการถูกรมควันไม่สม่ำเสมอ ขางต้องแห้งดี สะอาด ไม่มีจุดค้างของสิ่งสกปรกหรือสิ่งแปลกปลอม



ยางแผ่นรมควันชั้น 3

ก่อนยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกิน 10% แผ่นยางมีจุดค้างและฟองอากาศบ้าง แต่ต้องไม่มีร่องรอยของยางถูกรมควันไม่สม่ำเสมอ ยางต้องแห้งดี สะอาด ไม่มีสิ่งแปลกปลอม

ยางแผ่นรมควันชั้น 4

ก่อนยางมีราขึ้นบ้าง แต่ต้องไม่เกิน 20% แผ่นยางมีจุดค้างฟองอากาศ และร่องรอยของการรมควันไม่ถูกต้องปานกลาง ยางต้องแห้งดี ไม่มีสิ่งแปลกปลอม

ยางแผ่นรมควันชั้น 5

ก่อนยางมีราขึ้นบ้าง แต่ต้องไม่เกิน 30% แผ่นยางมีจุดค้าง ฟองอากาศ และร่องรอยของการรมควันไม่ถูกต้องขนาดใหญ่

2) ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air - dried sheet, ADS)

เป็นยางแผ่นที่ทำให้แห้งโดยไม่จำกัดว่าจะเป็นการอบหรืออากาศธรรมชาติ สำหรับหนังสือมาตรฐานสากลว่าด้วยการจัดชั้นคุณภาพและการห่อของธรรมชาติ (International Standards of Quality and Packing for Natural Grade The Green Book) หมายถึง “แผ่นยางที่มีสีใส ซึ่งมีขั้นตอนการผลิตเช่นเดียวกับยางแผ่นรมควันทุกประการ เพียงแต่จะต้องมีการควบคุมแต่ละขั้นตอนอย่างพิถีพิถัน และทำให้แห้งโดยไม่ต้องรมควัน” ตามปกติจะผึ่งลมไว้ในที่ร่มหรือในโรงอบที่ปราศจากควัน และต้องไม่มีการเติมสารอื่นนอกเหนือไปจากสารที่ได้รับการยกเว้น เช่น สารฟอกสีโซเดียมไบซัลไฟท์ (sodium bisulphite) และสารกันเชื้อราพาราโนโครฟินอล (Paranitrophenol, PNP)

เนื่องจากยางที่ไม่ได้ถูกรมควัน จึงไม่มีน้ำมันดิน (tar) และสารบางชนิดที่อยู่ในควันไม้ที่ช่วยในการฆ่าเชื้อโรค จึงอาจขึ้นราได้ง่าย ดังนั้นเมื่อทำเป็นแผ่นแล้วจึงจุ่มลงในน้ำยาป้องกันเชื้อรา พาราโนโครฟินอลเสียก่อน แล้วจึงนำไปผึ่งให้แห้ง

การปล่อยให้ยางแห้งเองจะใช้เวลาาน สี่อาจชุ่นหรือขึ้นร่าก่อน จึงควรอบด้วยความร้อน (ไม่ใช่การรมควัน) ในห้องอบความร้อน โดยใช้ท่อไอน้ำผ่านรอบห้องประมาณ 3 วัน จะได้ยางผึ่งแห้งที่มีสีใสสวยงามตามต้องการ

เนื่องจากยางแผ่นผึ่งแห้งมีสีจาง บาง และสะอาด ดังนั้นจึงมักมองเห็นตำหนิหรือสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ได้ง่าย สิ่งที่ทำให้ยางแผ่นผึ่งแห้งมีคุณภาพต่ำ ได้แก่ ฟองอากาศ ยางสีคล้ำ การเกิดรา และยางมีสิ่งสกปรกปนอยู่

3) ยางเครพ (crepes) ยางเครพที่ผลิตโดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 พวก คือ

ก. ยางเครพที่ผลิตจากน้ำยางสด ได้แก่ ยางโซลเครพ ยางเครพขาว และยางเครพสีจาง เป็นยางที่ไม่มีสารสีเหลือง กรรมวิธีผลิตไม่ทำให้ยางมีสีคล้ำหรือสีดำ มีการพิจารณาคัดเลือกพันธุ์ยางที่ใช้ในการผลิต น้ำยางที่จับตัวต้องเจือจางให้มีเนื้อยางแห้ง 20% เติมโซเดียมไบซัลไฟท์ และสารฟอกสี

ข. ยางคุณภาพต่ำ เป็นยางที่ทำมาจากยางที่จับตัวแล้ว เช่น เศษยาง ขี้ยาง เป็นต้น ในกระบวนการผลิต ขณะที่ยางผ่านเข้าเครื่องจักร ต้องฉีดน้ำล้างยางตลอดเวลาเพื่อชะล้างทำความสะอาด ขั้นตอนสุดท้ายจะรีดยางเป็นแผ่นเครพ ผึ่งให้แห้งในโรงผึ่ง

4) ยางแท่ง (Block Rubber)

ยางแท่งเป็นยางที่ทำจากน้ำยางและเศษก้อนยาง โดยทำให้ยางเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำมาอบด้วยความร้อนให้แห้ง ต่อจากนั้นจึงอัดเป็นแท่ง ยางแท่งเป็นยางที่มีการระบุคุณภาพมาตรฐาน มีการใช้เครื่องจักร เข้ามาใช้ในการผลิต ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมาก ปรับปรุงการหีบห่อให้ทันสมัย สะดวกในการขนส่งและใช้งาน ยางแท่งของประเทศไทยมีชื่อเรียกว่า ทีทีอาร์ (TTR, Thai Tested Rubber) แบ่งเป็น 5 ชั้น คือ ทีทีอาร์ 5แอล (TTR 5L), ทีทีอาร์ 5 (TTR 5), ทีทีอาร์ 10 (TTR 10), ทีทีอาร์ 20 (TTR 20) และ ทีทีอาร์ 50 (TTR 50)

ส่วนยางแท่งที่ผลิตมากที่สุด คือ ยางแท่งทีทีอาร์ 20 ซึ่งการผลิตยางแท่งสามารถผลิตได้ทั้งจากน้ำยางสดและจากยางที่จับตัวแล้ว สมบัติที่ใช้ระบุเป็นคุณภาพมาตรฐานยางแท่งมีดังนี้ คือ ปริมาณสิ่งสกปรกในยาง ปริมาณขี้เถ้า ปริมาณไนโตรเจน ปริมาณสิ่งระเหยได้ ค่าความอ่อนตัวของยางและสี ตารางที่ 2.1 แสดงคุณภาพของยางแท่ง ทีทีอาร์ ชนิดต่างๆ

5) ยางskim (Skim Rubber)

ยางskimเป็นผลิตผลจากหางน้ำยาง ซึ่งมีเนื้อยางแห้งอยู่ 3 - 7 % อันเป็นผลพลอยได้จากการผลิตน้ำยางข้น การผลิตยางskimโดยนำหางน้ำยางมาทำให้จับตัว ยางที่ได้จะมีสารที่ไม่ใช่ยางปะปนอยู่ เช่น โปรตีนซึ่งทำให้ยางมีกลิ่นเหม็น และปฏิกิริยาการทำให้ยางคงรูปเกิดขึ้นเร็ว โดยทั่วไปยางskimจะผลิตจำหน่ายในรูปของยางแท่งและยางเครพ

6) ยางความหนืดคงตัว (Viscosity Stabilized Rubber)

ยางชนิดนี้มีความหนืดต่ำและคงตัว ซึ่งจะช่วยลดขั้นตอนการบดยางผสมสารเคมี ที่เรียกว่า การบดยางให้นิ่ม (Mastication) จะทำให้ประหยัดพลังงานในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง โดยที่สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ยางไม่เปลี่ยนแปลง ยางพวกนี้มีหลายชนิดด้วยกัน เช่น

- ยาง CV (Constant Viscosity Rubber) เป็นยางที่มีความหนืดคงที่
- ยาง LV (Low Viscosity Rubber) เป็นยางที่มีความหนืดต่ำ
- ยาง GP (General Purpose Rubber) เป็นยางที่ใช้ทั่วไป

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณภาพของยางแท่ง ทีทีอาร์ ชนิดต่างๆ¹

สมบัติ	ชั้นยาง ทีทีอาร์				
	5 แอล	5	10	20	50
เปอร์เซ็นต์ผง (ใช้กรอง 325 เมช) ไม่เกิน	0.05	0.05	0.10	0.20	0.50
เปอร์เซ็นต์เถ้า ไม่เกิน	0.60	0.60	0.75	1.00	1.50
เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน ไม่เกิน	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
เปอร์เซ็นต์สังกะสี ไม่เกิน	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ดัชนีความอ่อนตัว (PRI) ^{**} ไม่ต่ำกว่า	60	60	50	40	30
ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (P ₀) ไม่ต่ำกว่า	30	30	30	30	30
รหัสชั้นใช้สี	เขียว อ่อน	เขียว อ่อน	น้ำตาล	แดง	เหลือง
พลาสติก (พอลิเอทิลีน) ที่ใช้ห่อยาง	โปร่ง แสง	โปร่ง แสง	โปร่ง แสง	โปร่ง แสง	โปร่ง แสง
แถบพอลิเอทิลีนที่ใช้หั่นยาง	โปร่ง แสง	สีขาว ทึบแสง	สีขาว ทึบแสง	สีขาว ทึบแสง	สีขาว ทึบแสง

2.1.5 การนำยางธรรมชาติไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยาง

- ข้อดี
1. เนื้อยางจะให้สมบัติเชิงกลสูง เนื่องจากเมื่อยืดออก โมเลกุลจะเรียงตัวเป็นระเบียบ
 2. มีความต้านทานแรงดึงสูง (มากกว่า 20 MPa)
 3. สามารถยืดตัวก่อนขาดได้มาก (500 - 1000 %)
 4. ทนทานต่อการฉีกขาดและสึกหรอได้ดี แต่น้อยกว่ายางสังเคราะห์
 5. การคืนตัวและการกระดอนดี
 6. สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดี
 7. สามารถยึดติดกับเส้นใยและโลหะได้ดี

¹ พลชิต บัวแก้ว, เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตร เทคโนโลยียางแห่งเล่ม 1 (กรุงเทพมหานคร: ศูนย์วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2538), หน้า 4.

* เป็นอัตราจำกัดสำหรับผู้ใช้งาน ส่วนอัตราจำกัดสำหรับผู้ผลิตเท่ากับ 0.5 %

** Plasticity retention index

ตารางที่ 2.2 ประเภทของยางชนิดต่างๆ ในทางการค้า¹

ชื่อทั่วไป	การเรียกชื่อตาม ASTM
	ยางที่ใช้ในงานทั่วไป
ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)	NR
พอลิไอโซพรีน (Polyisoprene)	IR
สไตรีน-บิวตะไดอิน (Styrene-butadiene)	SBR
บิวทิล (Butyl)	IIR
เอทิลีน-โพรพิลีน (Ethylene-Propylene)	EPDM
พอลิบิวตะไดอิน (Polybutadiene)	BR
	ยางทนสารละลาย
พอลิซัลไฟด์ (Polysulfides, Thiokol)	T
ไนไตรล์ (Nitrile)	NBR
พอลิกลอโรพรีน (Polychloroprene, Neoprene)	CR
พอลิยูรีเทน (Polyurethane)	
พอลิเอสเทอร์ (Polyester)	AU
พอลิอีเทอร์ (Polyether)	EU
อีพิกลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin)	CO
อีพิกลอโรไฮดริน-เอทิลีน ออกไซด์ (Epichlorohydrin-ethylene oxides)	ECO
	ยางทนความร้อน
ซิลิโคน (Silicone)	MQ
คลอโรซัลโฟเนต-พอลิเอทิลีน (Chlorosulfonated-polyethylene, Hypalon)	CSM
พอลิอะคริเลต (Polyacrylate)	ACM
ยางฟลูออโร (Fluororubbers)	CMF

¹ รองศาสตราจารย์ เสาวรณีย์ ช่วยจุลจิตร, เทคโนโลยีของยาง (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย), หน้า 31-32.

- ข้อเสีย**
1. ความต้านทานการบ่มและความร้อนไม่ดี
 2. ไม่ทนทานต่อพวกน้ำมันปิโตรเลียม เช่น น้ำมันเครื่อง น้ำมันเบนซิน เป็นต้น
 3. มีอุณหภูมิใช้งานระหว่าง -40 ถึง 70 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางธรรมชาติ ได้แก่ ยางล้อรถยนต์ ยางเครื่องบิน ยางรองคอกสะพาน ยางรองรับแรงสะเทือน หรือแผ่นดินไหว ยางชิ้นส่วนรถยนต์ และเฟอร์นิเจอร์ พื้นรองเท้า กาวยาง ยางเส้นรัศของ เป็นต้น

2.2 สารตัวเติมสำหรับยาง (Additive for Rubber)

สารเติมแต่งสำหรับยางเป็นสารเคมีที่ผสมลงไปในยาง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ ยางที่ผสมสารเคมีแล้วนี้ ยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้เลย จนกว่าสารเคมีจะเข้าทำปฏิกิริยากับยาง ซึ่งอาจเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้นได้ด้วยการให้ความร้อน ยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมีเรียกว่า ยางไม่คงรูป (Green Compound หรือ Uncured Compound) ส่วนยางที่สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับยางแล้ว เรียกว่า ยางคงรูป (Vulcanized rubber หรือ Cured Rubber)

ปกตินิยมบอกปริมาณของสารเติมแต่งทุกชนิดที่ใส่เข้าไปในยางเทียบกับยาง 100 ส่วน โดยมีหน่วยเป็น phr (parts per hundred of rubber) ทั้งนี้เพื่อความสะดวก หากมีการเปรียบเทียบสูตรสารประกอบยางที่มีปริมาณสารเคมีแตกต่างกัน และการเขียนสูตรส่วนผสมยางมักเขียนเรียงลำดับสารที่จะใส่เข้าไปในยางก่อน - หลัง

ประโยชน์ในการผสมยางกับสารเคมี

1. เพื่อแก้ไขข้อเสียของยาง

ก. ยางมีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติก สมบัติเป็นพลาสติก คือ สมบัติของสารที่เมื่อใช้น้ำหนักกดลงไป จะแบนและไหลได้ ส่วนสมบัติเป็นอีลาสติก คือ สมบัติของสารที่เมื่อมีแรงกระทำต่อมัน เช่น ยืดออก เมื่อเอาแรงออกจะกลับคืนรูปเดิม ยางเมื่อกดก็จะแบนลง แต่เมื่อคลายแรงจะกลับคืนรูปแต่ไม่เท่าของเดิม หรือเมื่อดึงออกจะยืด แต่เมื่อปล่อยกลับจะคืนกลับแต่ไม่เท่าเดิม การที่ยางมีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติกนี้ทำให้ไม่สามารถนำยางไปใช้งานได้โดยตรง

ข. ยางเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) คือ ที่อุณหภูมิต่ำ ยางจะแข็งกระด้าง แตกหักได้ง่าย แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้นยางจะอ่อนนุ่มไหลแปรรูปไป การมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก ทำให้สามารถนำยางไปใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่จำกัด

ค. ยางมีความแข็งแรงต่ำ ความต้านทานแรงดึงต่ำ และความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำ

ง. ยางสามารถละลายได้ง่ายในตัวทำละลายหลายชนิด ยางเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 30,000 - 300,000 โมเลกุลเหล่านี้เมื่ออยู่รวมกันจะยึดกันด้วยแรงอ่อนๆ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ หรือพันธะไฮโดรเจน โมเลกุลจึงแยกจากกันได้ง่าย โดยใช้ตัวทำละลายที่มีขั้วหรือมีสัมประสิทธิ์ของการละลายใกล้เคียงกับยาง ดังนั้นยางจึงสามารถละลายได้ง่ายในตัวทำละลายต่างๆ

2. เพื่อเป็นตัวช่วยในขบวนการแปรรูปยาง

ปกติในยางดิบที่ยังไม่ได้ผสมกับสารเคมีอื่น จะมีสมบัติเหนียว ซึ่งเกี่ยวกับความยืดหยุ่นของ ส่วนประกอบที่อยู่ในยางดิบ และทำให้ลำบากในการนำไปเข้ากระบวนการต่างๆ เช่น การรีดยางให้เป็น แผ่นเรียบจากเครื่องรีดเรียบ หรือการทำท่อยางและเส้นยางจากเครื่องอัดผ่านหัวใด เป็นต้น กระบวนการ เหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความผิดปกติ หรือความสม่ำเสมอของยางเมื่อผ่านเครื่องรีดเรียบ และความคิดปกติ ในการพองตัวของยางเมื่อผ่านเครื่องอัดผ่านหัวใด แต่หลังจากที่ได้เติมสารเคมีบางชนิด เช่น สารตัวเติม สารทำให้ยางอ่อนตัว จะทำให้ผลผลิตที่ได้จากเครื่องรีดเรียบมีผิวเรียบ และสามารถลดปัญหาเกี่ยวกับ ความไม่สม่ำเสมอของแผ่นยางหรือการพองตัวของท่อยางได้

3. ทำให้ยางมีขอบเขตการใช้งานกว้างขึ้น

จากความเหมาะสมในการเลือกสารเคมีผสมในยาง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของ ผลิตภัณฑ์ยางอย่างมาก และผลิตภัณฑ์ที่ได้เหล่านี้จะเปลี่ยนจากอ่อน ไปจนถึงผลิตภัณฑ์ที่มีความสามารถ ในการทนความร้อน เช่น ขวดใส่น้ำร้อน และผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงมากที่สุด เช่น เปลือกหม้อเบคเดอรี ต้องการสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางอย่างไร ก็สามารถเลือกชนิดและปริมาณของสารเคมีได้ตามวัตถุประสงค์

4. เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต

การนำยางมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ ถ้าใช้แต่เนื้อยางล้วนๆ จะทำให้ต้นทุนการผลิตสูง ถ้าสามารถ ผสมสารอื่นที่มีราคาถูกลงไป จะทำให้ลดต้นทุนการผลิตลง

ตารางที่ 2.3 สูตรพื้นฐานทั่วไปของผลิตภัณฑ์ยาง¹

วัตถุดิบ	phr
ยาง	100
กำมะถัน	2.5 - 3.5
สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป	0.5 - 3.5
สารเสริมตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป	1 - 5
สารต้านทานยางเสื่อมสภาพ	1 - 2
สารช่วยในการแปรรูปยาง	5 - 10
สารตัวเติม	ตามต้องการ

¹ วิภา เศรษฐกนิษฐ์, เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตร เทคโนโลยียางแห่งเล่ม 2 (กรุงเทพมหานคร: ศูนย์วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2538), หน้า 4.



2.2.1 สารทำให้ยางคงรูป หรือ สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent)

สารทำให้ยางคงรูป หรือสารวัลคาไนซ์ เป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (crosslink) เพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางให้ดีขึ้น ปฏิกริยาที่เกิดขึ้น เรียกว่า การคงรูปหรือการวัลคาไนซ์ (Vulcanization หรือ Cure)

การทำให้ยางคงรูปเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงของยางที่อยู่ในสภาพไม่คงตัวให้เป็นยางที่รักษารูปทรงได้ในลักษณะยืดหยุ่น หรือแข็งกระด้าง โดยการใช้สารที่ทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agent) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล บริเวณตำแหน่งที่วงโคจรปฏิกิริยา

สารทำให้ยางคงรูปมี 3 ประเภท คือ กำมะถันและธาตุที่คล้ายกำมะถัน สารที่ให้กำมะถัน (sulfur donor) และสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่กำมะถัน แต่สารที่ทำให้ยางคงรูปที่สำคัญสำหรับยางธรรมชาติ คือ กำมะถัน ส่วนยางสังเคราะห์อื่นๆ จะใช้สารที่ทำให้ยางคงรูปแตกต่างกันไป ขึ้นกับชนิดของยาง การทำให้ยางคงรูปจะทำให้ยางมีสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป คือ

1) ยางเปลี่ยนโครงสร้างจากเส้นตรงเป็นร่างแหหรือเป็นแบบ 3 มิติ โดยการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ทำให้ยางเปลี่ยนจากวัสดุพลาสติกไปเป็นวัสดุอีลาสติกสูงขึ้น

2) สมบัติทางกายภาพ เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความต้านทานต่อการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้น

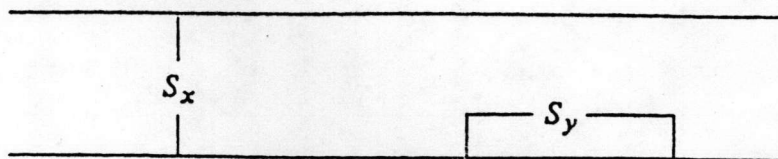
3) เปลี่ยนสภาพของยางจากการละลายในสารละลาย เป็นยางที่ไม่ละลายในสารละลาย และไม่พองตัว

4) มีความทนทานต่อความร้อน แสง เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากขึ้น

กำมะถันเป็นสารที่ทำให้ยางคงรูปที่นิยมใช้มากที่สุด ประมาณ 90% และนิยมใช้กับยางที่ไม่อิ่มตัว ซึ่งมีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล ได้แก่ ยางธรรมชาติ, ยาง SBR และยาง NBR เป็นต้น

เมื่อใส่กำมะถันเข้าไปในยางแล้วให้ความร้อน จะเกิดการคงรูปขึ้น โดยกำมะถันเป็นตัวเชื่อมระหว่างโมเลกุลของยาง ทำให้ยางมีสมบัติดีขึ้น คือ เมื่อร้อนไม่เหลวหรือเยิ้มเหนียว เมื่อเย็นไม่แข็ง ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น โดยกำมะถันจะเชื่อมต่อกับโมเลกุลของยางดังรูปที่ 2.1

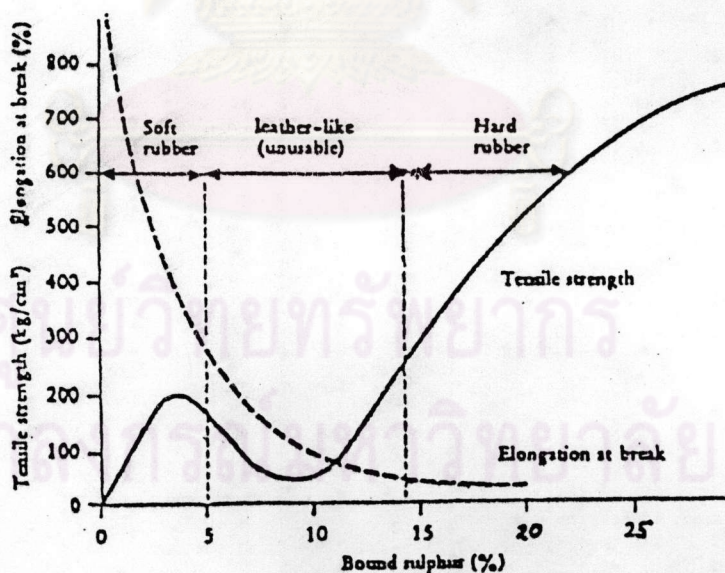
โดยทั่วไปถ้าการคงรูปเกิดในระบบที่มีสารตัวเร่งที่มีประสิทธิภาพดี ค่า x ควรมีค่าประมาณ 1 หรือ 2 และไม่มีโครงสร้างที่เป็นวง (cyclic) หรือน้อยมาก แต่ถ้าเป็นระบบที่ไม่มีประสิทธิภาพ x อาจมีค่าสูงถึง 8 และมีโครงสร้างที่เป็นวงเกิดขึ้นมาก ปริมาณกำมะถันที่รวมอยู่ในโครงสร้างร่างแหนี้เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการคงรูป (coefficient of vulcanization) ซึ่งเป็นส่วนของกำมะถันที่เข้าร่วมตัวกับยาง 100 ส่วน



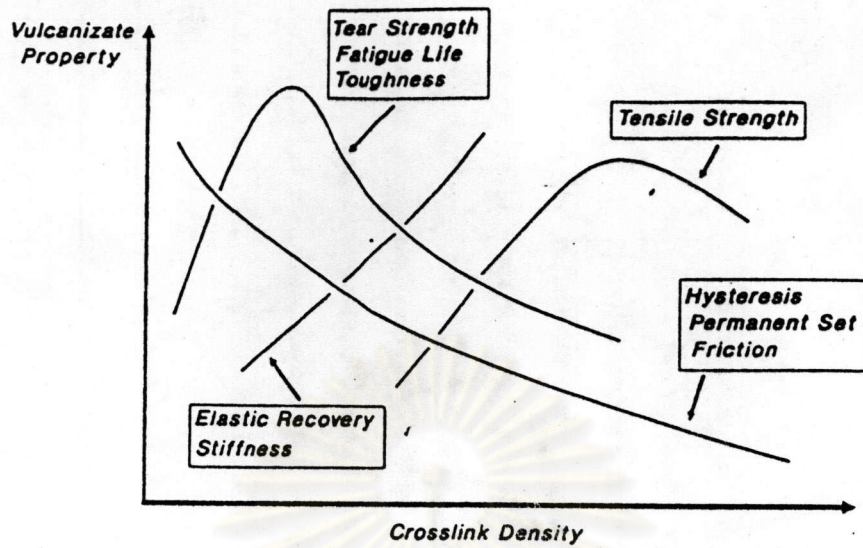
รูปที่ 2.1 การเชื่อมโยงโมเลกุลของยางด้วยกำมะถัน
 S_x เป็นการเชื่อมโยงระหว่างสองโมเลกุล
 S_y เป็นการเชื่อมโยงภายในโมเลกุลเดียวกัน

ปริมาณของกำมะถันที่ใส่อยู่ในช่วง 1 - 3 phr แต่โดยทั่วไปมักไม่เกิน 2.5 phr เนื่องจากปริมาณกำมะถัน 2.5 phr จะทำให้ยางมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด นอกจากถ้าต้องการยางที่มี มอดุลัสต่ำ เช่น ลูกโป่งจะใช้กำมะถันน้อยลง หรือถ้าต้องการยางที่มีมอดุลัสสูง จะใช้กำมะถันมากขึ้น

การเชื่อมโยงทำให้โมเลกุลของยางมีขนาดใหญ่ขึ้น และปริมาณของกำมะถันที่ใช้จะมีผลต่อสมบัติของยาง ดังรูปที่ 2.2 แสดงอิทธิพลของปริมาณกำมะถันต่อความต้านทานแรงดึง และการยืดออกจนขาด (elongation at break) และรูปที่ 2.3 แสดงสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อปริมาณของการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.2 อิทธิพลของปริมาณกำมะถันต่อความต้านทานแรงดึงและการยืดออกจนขาด



รูปที่ 2.3 สมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อปริมาณของการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น

จากรูป 2.3 จะเห็นว่า ถ้าต้องการให้ยางคงสภาพความยืดหยุ่นได้ดี ปริมาณกำมะถันในยางไม่ควรเกิน 5 phr (ตารางที่ 2.5)

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพของยางเมื่อปริมาณการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น¹

สมบัติ	การเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มปริมาณการเชื่อมโยง
สมบัติที่ขึ้นกับปริมาณการเชื่อมโยงเท่านั้น	
ความเหนียว (มอดุลัส)	เพิ่มขึ้น
ความแข็ง	เพิ่มขึ้น
สมบัติที่บางส่วนขึ้นกับปริมาณการเชื่อมโยง	
การยืดออกจนขาด	ลดลง
การกระดอน	เพิ่มขึ้น
การบวมเนื่องจากสารละลาย	ลดลง
ความต้านทานต่อการสึกหรอ	เพิ่มขึ้น
ความต้านทานแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด	เพิ่มขึ้น, แล้วลดลง

¹ A.D. Roberts, *Natural Rubber Science and Technology*, (Oxford University Press, 1988), p. 518.

ตารางที่ 2.5 ลักษณะของยางเมื่อใส่กำมะถันในปริมาณที่ไม่เท่ากัน

ปริมาณกำมะถัน (phr)	ลักษณะของยาง
0 - 5	ยางมีสภาพยืดหยุ่น
5 - 15	ยางมีลักษณะยืดได้เล็กน้อย คล้ายหนัง (leather like)
> 15	ทำให้ยางมีความแข็งมาก เรียกว่า Ebonite

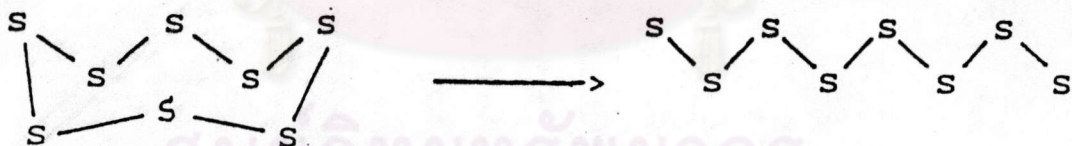
กำมะถันโดยทั่วไปมี 3 อันรูป คือ

ก. α - sulfur หรือ rhombic sulfur

ข. β - sulfur หรือ monoclinic sulfur : ที่ 96 องศาเซลเซียส α - sulfur จะเปลี่ยนรูปไปเป็น β - sulfur

ค. γ - sulfur หรือ plastic sulfur : เป็นกำมะถันอสัณฐานซึ่งไม่ละลายในยาง ทำได้โดยการนำกำมะถันมาทำให้ร้อนจนเหลว แล้วเทลงในน้ำเย็นทันที

แต่กำมะถันที่ใช้ในการคงรูปยาง จะใช้กำมะถันชนิด rhombic ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 คือมีโครงสร้างเป็นวง ประกอบด้วยกำมะถัน 8 อะตอม S_8 มีลักษณะเป็นผลึกเหลือง และหลอมเหลวที่ อุณหภูมิ 112 องศาเซลเซียส จุดเดือดที่ 444 องศาเซลเซียส ถ้าให้ความร้อนแก่กำมะถัน โครงสร้างที่เป็นวงจะแตกออกเป็นสาย นั่นคือ กำมะถันกำลังหลอมเหลว



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของกำมะถัน rhombic

กำมะถันที่ใช้ในยางต้องเป็นกำมะถันที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ซึ่งขนาดอนุภาคยิ่งเล็กจะยิ่งทำให้กำมะถันกระจายในยางได้ทั่วถึง สำหรับการละลายของกำมะถันในยางจะขึ้นกับชนิดของยาง ซึ่งกำมะถันจะละลายในยางได้ประมาณ 0.8 ส่วนต่อยาง 100 ส่วน และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกำมะถันจะละลายได้มากขึ้น แต่มีข้อเสีย คือ เมื่อตั้งทิ้งไว้กำมะถันที่เป็นส่วนเกิน จะตกผลึกออกมาที่ผิวยาง เรียกว่า เกิดการบลูม (blooming) คือ การที่กำมะถันเกิดการแยกตัวมาอยู่ที่ผิวยางที่ยังไม่คงรูป ทางแก้ไข คือ

1) ผสมกำมะถันเข้าไปในยางที่อุณหภูมิค่าที่สุกเท่าที่จะทำได้

2) อาจใช้กำมะถันชนิดไม่ละลายแทนกำมะถันธรรมดา ซึ่งเป็นแบบชนิดละลาย แต่กำมะถันไม่ละลายจะไม่คงตัว คือ เมื่อตั้งทิ้งไว้นานๆ จะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นกำมะถันชนิดละลายอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิสูงจะเปลี่ยนเป็นกำมะถันชนิดละลายได้ภายในเวลา 10 - 20 นาที ซึ่งการเก็บรักษากำมะถันชนิดไม่ละลายต้องเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อป้องกันไม่ให้กำมะถันชนิดไม่ละลายเปลี่ยนรูป

3) อาจใช้กำมะถันชนิดไม่ละลายปนกับชนิดละลาย เช่น การใช้กำมะถันชนิดไม่ละลายประมาณ 70 % ของปริมาณทั้งหมด จะลดการตกผลึกของกำมะถันที่ผิวยางได้

การใส่กำมะถันลงในยางจะใส่หลังสุดในจำนวนสารเคมีทั้งหมด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการคงรูปก่อนกำหนด (scorch) ส่วนยางบางชนิด เช่น ยางไนไตรล์ (ยาง NBR) กำมะถันจะกระจายในยางได้ไม่ดี จำเป็นต้องใส่กำมะถันเข้าไปตั้งแต่เริ่มต้น เพื่อช่วยเพิ่มเวลาในการกระจายตัว หรืออาจใช้กำมะถันพิเศษ คือ MC - sulfur แทนกำมะถันธรรมดา

ข้อดีของกำมะถัน

1. กำมะถันมีราคาค่อนข้างถูก ทำให้ต้นทุนต่ำ
2. กระจายตัวในยางได้ง่าย
3. ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ
4. มีผลโดยตรงต่อสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป จึงเป็นตัวควบคุมอัตราการเกิดการคงรูป

ข้อเสียของกำมะถัน

1. มีแนวโน้มทำให้เกิดการแยกตัวของกำมะถันมาอยู่ที่ผิวยาง
2. มีการติดสีของซัลไฟด์
3. เมื่อนำยางที่ผสมกำมะถันไปอบ จะมีความต้านทานต่อความร้อนไม่ดี
4. มีข้อจำกัดในการใช้ คือ ใช้ได้เฉพาะกับยางที่ไม่อิมตัว

นอกจากกำมะถันแล้วยังมีธาตุอื่นๆ ที่คล้ายกำมะถัน ทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้ยางคงรูป ได้แก่ ซีลีเนียม (Selenium) และเทลลูเรียม (Tellurium) มักใช้แทนกำมะถันเมื่อต้องการสมบัติในด้านความต้านทานต่อความร้อน แต่ปฏิกิริยาที่สารทั้งสองทำกับยางไม่ดีเท่ากับกำมะถัน และยังเป็นพิษอีกด้วย โดยทั่วไปนิยมใช้สารสองตัวนี้เป็นสารทำให้ยางคงรูปเสริมร่วมกับกำมะถัน ซึ่งทำให้ปริมาณกำมะถันที่ใช้ลดลง และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความต้านทานต่อความร้อนและไอน้ำ และยังมี modulus สูงขึ้นด้วย

2.2.2 สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป (Accelerator)

ก่อนที่จะมีการค้นพบสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปของยางนั้น ชาลส์ กู๊ดเยียร์ ได้ค้นพบวิธีการคงรูปยางธรรมชาติ โดยใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียว ซึ่งต้องใช้กำมะถันในปริมาณมาก และการคงรูปต้อง

ใช้เวลานานที่อุณหภูมิสูง ผลึกพันธ์อย่างที่ได้มีสีคล้ำ และเมื่อทิ้งไว้จะเกิดการซึมของกำมะถันออกมาที่ผิว ต่อมาได้มีการค้นพบสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป และนำมาใช้ร่วมกับกำมะถันในการคงรูปยาง ซึ่งสารเร่งนี้ จะช่วยลดเวลา ลดอุณหภูมิ และลดปริมาณกำมะถันที่ใช้ในการคงรูปลง นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติ ของผลิตภัณฑ์อีกด้วย

สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระบบ คือ

- 1) ระบบการใช้สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปเพียงชนิดเดียว (primary accelerator) ให้พอเพียงที่จะคงรูปยางได้ตามเวลาที่ต้องการ
- 2) ระบบการใช้สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ประกอบด้วย
 - สารชนิดที่ใช้ในปริมาณมาก เรียกว่า ตัวเร่งปฐมภูมิ (primary accelerator)
 - สารชนิดที่ใช้ในปริมาณน้อย เรียกว่า ตัวเร่งทุติยภูมิ (secondary accelerator)
- 3) ระบบการใช้สารเร่งที่มีปฏิกิริยาช้า (delayed action accelerator) จะไม่เกิดปฏิกิริยา ก่อนการคงรูป ซึ่งเป็นการป้องกันปัญหาขางเกิดการคงรูปก่อนกำหนด

สมบัติของสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป

1. สามารถทำให้ยางคงรูปได้เร็ว
2. มีความว่องไวในการเร่งให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางสูง
3. ละลายได้ดีในยาง
4. มีความปลอดภัยในขบวนการผลิต
5. สามารถเก็บรักษาได้นานโดยไม่เสื่อมสภาพ
6. ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง
7. เข้ากันได้ดีกับสารเคมีอื่นๆ ที่ใส่เข้าไปในยาง
8. ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้
9. สมบัติต่างๆ ของยางไม่ลดลงเมื่อใช้เวลาในการคงรูปนาน
10. ไม่ทำให้เกิดผลเสียดต่อสมบัติอื่น

ประเภทของสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป

สามารถจัดตามความเร็วในการเร่งให้ยางเกิดการคงรูป แบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. สารเร่งที่มีปฏิกิริยาช้า (slow accelerators) ได้แก่ Aniline เมื่อทำการคงรูปยางธรรมชาติ ใช้เวลา 90 - 120 นาที
2. สารเร่งที่มีปฏิกิริยาเร็วปานกลาง (Moderately fast accelerators) ได้แก่ Diphenyl guanidine, Hexamethylene tetramene ใช้เวลาในการคงรูปประมาณ 60 นาที
3. สารเร่งที่มีปฏิกิริยาเร็ว (Fast accelerators) ได้แก่ Mercaptobentothiazole, Benzothiazyl disulfide ใช้เวลาในการคงรูปประมาณ 30 นาที

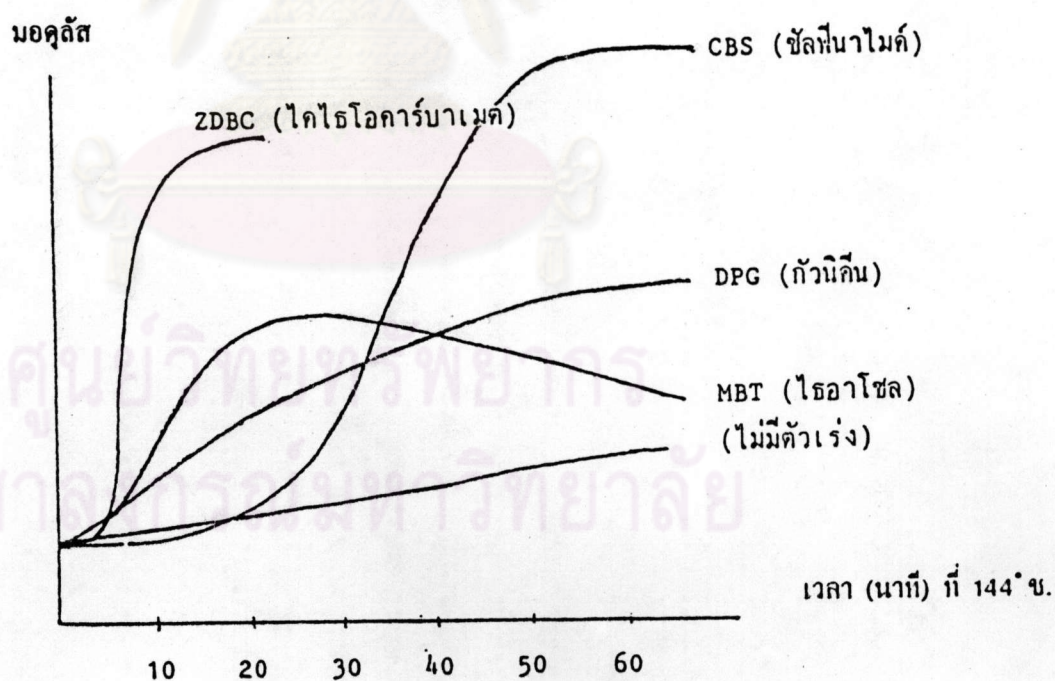
4. สารเร่งที่มีความเร็วมาก (Ultra accelerators) ได้แก่ thiurams, Dithiocarbamates, Xanthates ใช้เวลาในการคงรูปน้อยกว่า 30 นาที

เมื่อมีการใช้ยางสังเคราะห์มากขึ้น สารเร่งที่มีการคงรูปที่จัดว่าเร็วหรือเร็วมากในยางธรรมชาติ อาจกลายเป็นสารเร่งที่ช้าสำหรับยางสังเคราะห์ จึงมีการจัดประเภทของสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป โดยพิจารณาตามลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสารเร่งนั้นๆ สามารถแบ่งได้เป็น 7 ประเภท คือ

1. กัวนิติน (Guanidines)
2. อัลดีไฮด์-อะมีน (Aldehyde-amine)
3. ซัลฟีนามาไมด์ (Sulphenamide)
4. ไทอาโซล (Thiazole)
5. ไทยูแรม (Thiurams)
6. ไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamates)
7. แชนเทต (Xanthates)

สามารถเรียงลำดับความว่องไวจากเร็วไปช้า ได้ดังนี้

$$1 > 2 > 3 > 4 > 5 > 6 > 7$$

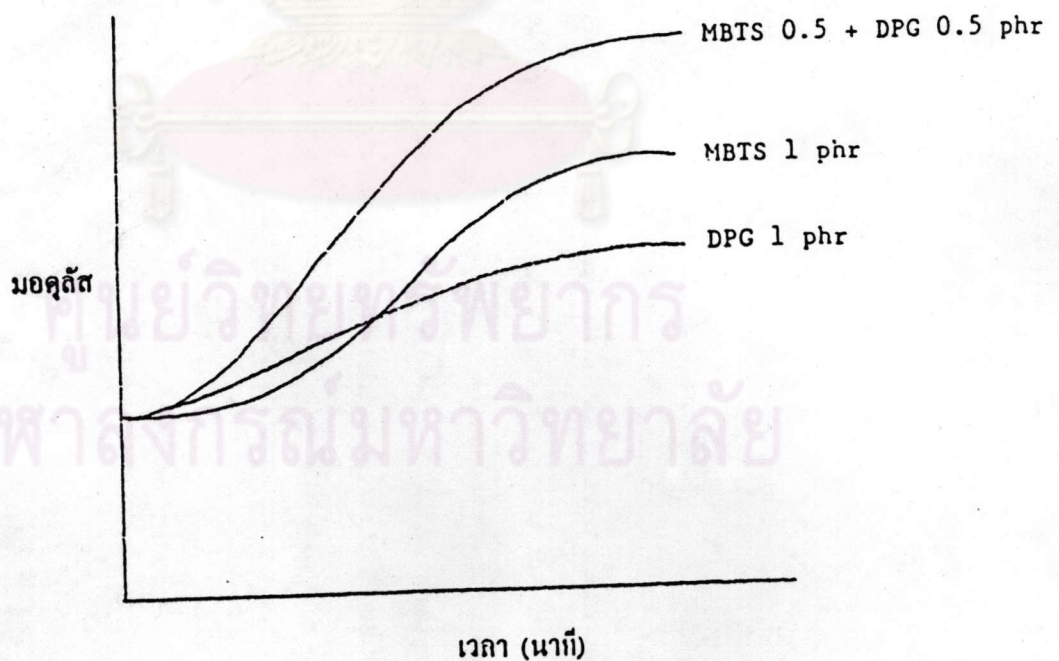


รูปที่ 2.5 อิทธิพลของสารเร่งชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการคงรูปยาง

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า
 กลุ่มไดโซคาร์บาเมต เป็นสารเร่งที่เกิดการคงรูปก่อนกำหนด และการคงรูปได้เร็วที่สุด
 กลุ่มกัวนิดีน เกิดการคงรูปก่อนกำหนดเร็วมาก แต่เกิดการคงรูปช้า
 กลุ่มไทอาโซล เกิดการคงรูปก่อนกำหนดช้ากว่ากลุ่มกัวนิดีน แต่เกิดการคงรูปได้เร็วกว่า
 กลุ่มซัลฟิनाไมด์ เกิดการคงรูปก่อนกำหนดช้าที่สุด และเมื่อถึงเวลาคงรูป มอดุลัสจะสูงขึ้น
 อย่างรวดเร็ว นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมยางรถยนต์

การกระตุ้นการทำงานของสารเร่งด้วยสารเร่ง มี 2 ประเภท คือ

1. การกระตุ้นสารเร่งที่คงรูปช้า โดยการใส่สารเร่งที่คงรูปได้เร็วกว่า เช่นการกระตุ้นสารทวาทาโซลและซัลฟิनाไมด์ ด้วยโรยูแรม และไดโซคาร์บาเมต การกระตุ้นเช่นนี้การคงรูปจะเร็วที่สุดอย่างมากก็เท่ากับโรยูแรม หรือไดโซคาร์บาเมตเท่านั้น
2. การกระตุ้นโดยใช้สารเร่งที่คงรูปช้ากว่า เช่น โรยูแรมหรือไดโซคาร์บาเมต กระตุ้นโดยใช้กัวนิดีน ซึ่งสารเร่งรวมนี้จะเร็วกว่าสารเร่งเดิมทั้งสอง การกระตุ้นแบบนี้ เรียกว่า Synergism ซึ่งเป็นการเสริมซึ่งกันและกัน ตัวอย่างเช่น กลุ่มไทอาโซลกับกัวนิดีน MBTS กับ DPG และ TMTD กับ MBT (ซึ่งจะทำให้มอดุลัสสูงกว่าการใช้สารเร่งเดี่ยวๆ) จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่า การใช้ DPG ผสมกับ MBTS จะทำให้มอดุลัสของยาง และอัตราการคงรูปดีกว่า MBTS หรือ DPG เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2.6 การกระตุ้นการทำงานของสารเร่งด้วยสารเร่งที่คงรูปช้ากว่า

2.2.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูป (Activator)

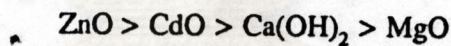
สารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูปเป็นสารที่เสริมตัวเร่ง โดยจะช่วยเร่งอัตราการคงรูปของยางให้เร็วขึ้น โดยทำให้สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา เพื่อจะได้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งสารกระตุ้นนี้จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป เกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่มีประสิทธิภาพในการเร่งให้กำมะถันเกิดความว่องไวต่อปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุล สารกระตุ้นมีสมบัติที่สำคัญ คือ เมื่อใส่เข้าไปในยางปริมาณเล็กน้อย จะทำให้ยางมีมอดูลัสสูงขึ้น ช่วยไม่ให้สารประกอบยางติดกับลูกกลิ้งที่ใช้ในการบดผสมยาง ช่วยในการกระจายตัวของสารเคมีในเนื้อยาง และในบางครั้งอาจไม่มีปฏิกิริยาการคงรูปเกิดขึ้นถ้าไม่มีสารกระตุ้น

ชนิดของสารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูป

2.2.3.1 พวกอนินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นพวกโลหะออกไซด์ ได้แก่

- ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)
- แคดเมียมออกไซด์ (Cadmium oxide, CdO)
- แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO)
- แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO)

ลำดับความว่องไวในการช่วยให้เกิดปฏิกิริยา



ซิงค์ออกไซด์เป็นสารที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป แต่เป็นสารที่มีราคาค่อนข้างแพง โดยมักมักใช้ซิงค์ออกไซด์ประมาณ 3 - 5 phr ถ้าซิงค์ออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็ก สามารถลดปริมาณการใช้เหลือเพียง 1 phr ได้ ซึ่งจะทำให้ได้ยางที่มีมอดูลัสสูง และยางมีลักษณะโปร่งใส

ซิงค์ออกไซด์สามารถจัดเกรดได้ตามความบริสุทธิ์ เนื่องจากปกติซิงค์ออกไซด์จะมีตะกั่วเจือปนอยู่ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ยางมีสีคล้ำ จึงแบ่งซิงค์ออกไซด์ได้เป็น 2 ชนิด คือ white seal และ red seal โดย white seal มีตะกั่วอยู่ในปริมาณน้อย มักใช้ในยางสีขาวย หรือสีสดใส ส่วน red seal จะมีตะกั่วอยู่ในปริมาณมาก และนิยมใช้ในยางสีดำ

นอกจากนี้ซิงค์ออกไซด์บางชนิดที่มีอนุภาคเล็ก และอยู่ปนกับออกไซด์ของโลหะอื่น เรียกว่า Active zinc oxide สามารถใช้ในยางได้ โดยใส่ในปริมาณน้อย จะทำให้ยางใส มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น ได้แก่ มอดูลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอ เป็นต้น

2.2.3.2 พวกอินทรีย์ ที่สำคัญ คือ กรดไขมัน ได้แก่ กรดสเตียริก (stearic acid) กรดลอริก (lauric acid) กรดปาล์มมิติก (palmitic acid) เป็นต้น กรดไขมันเป็นสารที่จำเป็นในการใช้เป็นสารเสริมตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูปสำหรับสารเร่งปฏิกิริยาบางตัว โดยเฉพาะพวกไทอาโซล

โดยทั่วไปกรดไขมันที่มีความเป็นกรดสูง มีโมเลกุลยาวจะเป็นกรดไขมันที่มีประสิทธิภาพสูง สำหรับพวกที่มีจุดหลอมตัวต่ำ จะทำให้ยางอ่อนตัว และพวกที่มีความอึดตัวต่ำ จะทำให้สมบัติของยาง หลังการบ่มเร่งดีขึ้น เช่น สมบัติการต้านทานต่อรอยแตกเนื่องจากการหักงอ เป็นต้น

กรดไขมันที่นิยมใช้เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูปมากที่สุด คือ กรดสเตียริก ปริมาณที่ใช้ ในยางขึ้นกับชนิดของยาง โดยทั่วไปการผสมสารเคมีกับยางธรรมชาติจะใส่กรดสเตียริก 1 - 3 phr

2.2.4 สารตัวเติม (Filler)

สารตัวเติม หมายถึง สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยางที่ใส่ลงไปในยาง เพื่อลดต้นทุนในการผลิต หรือปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น เช่น เชม่าคำ แคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกา เป็นต้น

สารตัวเติมที่ใส่ลงไปในยาง เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ ดังนี้

- เพื่อลดต้นทุน
- เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของยาง
- เพื่อช่วยในขบวนการผลิต
- ลดการพองตัวของยางในน้ำมัน
- เพิ่มอายุการใช้งานของยาง

การแบ่งชนิดของสารตัวเติม

สามารถแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามการผลิตและตามลักษณะ คือ

การแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามการผลิต แบ่งได้เป็น 5 ชนิด คือ

1. สารตัวเติมที่มีตามธรรมชาติ หรือจากผลพลอยได้จากธรรมชาติ แล้วนำมาบดให้ละเอียด
 - แคลเซียมคาร์บอเนตจากหินปูน เปลือกหอย และชอล์ค
 - แคลเซียมและแมกนีเซียมซิลิเกตจากแป้งทัลคัม
 - ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica)
2. สารตัวเติมตามธรรมชาติที่ร่อนแยกความละเอียด เช่น คาโอลิน
3. สารตัวเติมที่ได้จากวิธีการตกตะกอน เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ไฮดรอกซิลิกา ไฮเดียม-อลูมิเนียมซิลิเกต อลูมิเนียมซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกต และไฮดรอกซิลูมิเนียมออกไซด์
4. สารตัวเติมในรูปของเชม่า หรือผงฝุ่น เช่น เชม่าคำ ซิงค์ออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์
5. สารตัวเติมประเภทที่มีการทำปฏิกิริยาที่ผิว (Surface modified products) เป็นผลิตภัณฑ์ที่นำสารตัวเติมมาทำปฏิกิริยาที่ผิว เพื่อให้สารตัวเติมนั้นเกาะติดแน่นกับยาง ซึ่งทำให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทัลคัม และซิลิกาที่ทำปฏิกิริยาที่ผิวหรือฉาบผิว

การแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามลักษณะ แบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด (Particulated filler) ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต เชม่าคำ
 2. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous filler) ได้แก่ แอสเบสทอส ผงเยื่อไม้
 3. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน (Resinous filler) ได้แก่ ฟีนอลิกเรซิน เป็นต้น
- สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด

ก. สารตัวเติมพวกเสริมความแข็งแรง (Reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมที่ช่วยให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น คือ มีความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง เป็นต้น แต่ถ้าเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมมากขึ้นจะทำให้ยางมีความต้านทานต่อการกระดอนลดลง สารตัวเติมประเภทนี้ส่วนใหญ่จะมีอนุภาคขนาดเล็กประมาณ $180 - 600 \text{ \AA}$ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเชม่า เช่น เชม่าคำ และซิลิกา เป็นต้น

ข. สารตัวเติมพวกกึ่งเสริมความแข็งแรง (Semi-reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมที่ช่วยเสริมความแข็งแรงของยางได้บ้าง สารตัวเติมเหล่านี้มีขนาดอนุภาคปานกลาง เช่น อลูมิเนียมซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกต และคาโอลิน เป็นต้น

ค. สารตัวเติมพวกช่วยลดต้นทุนการผลิต (Diluent filler) สารตัวเติมประเภทนี้ไม่เสริมประสิทธิภาพความแข็งแรงให้กับยาง มีราคาถูก มีอนุภาคขนาดใหญ่ตั้งแต่ $10,000 \text{ \AA}$ ขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทัลคัม แบเรียมซัลเฟต เป็นต้น สารตัวเติมประเภทนี้จะทำให้สมบัติทางกายภาพบางอย่างลดลง เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการสึกหรอ แต่ปรับปรุงสมบัติบางอย่างให้ดีขึ้น เช่น ทำให้ความแข็งและมอดูลัสดีขึ้น ทำให้กระบวนการแปรรูปง่าย ลดการบวมของยาง และช่วยลดต้นทุนการผลิตเพราะมีราคาถูก

สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย ได้แก่

ก. แอสเบสทอส (Asbestos) เป็นเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ ช่วยเพิ่มสมบัติในด้านความทนทานต่อเปลวไฟ หรือความร้อนของยาง

ข. ผงเยื่อไม้ (Wood flour) ได้จากการบดไม้ให้มีขนาดเล็ก มักใช้เป็นสารตัวเติมในยางประเภทเกรดต่ำ สารตัวเติมประเภทนี้ไม่มีผลต่อการคงรูปของยาง ถ้าใช้ในปริมาณมากจะทำให้ยางแข็งขึ้น และช่วยลดอัตราการหดตัวของยาง

สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน เรซินที่ใส่เข้าไปในยางจะทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการทำใหยางแข็งขึ้น มักจะใช้สารตัวเติมที่เป็นผง เช่น เชม่าคำ และซิลิกา แต่สารเคมีที่เป็นผงนี้สามารถผสมเข้าไปในยางได้ในปริมาณที่จำกัด ถ้ามากเกินไปแล้วจะทำให้ผสมเข้ายาก ยางแห้ง และมีความร้อนเกิดขึ้นในขณะที่ผสม จึงมีการเลือกที่จะใช้พวกเรซินเติมลงไปในยาง สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน ได้แก่ สไตรีนเรซิน และฟีนอลิกเรซิน

นอกจากนี้แล้วสารตัวเติมประเภทที่มีลักษณะเป็นเม็ด ยังแบ่งได้เป็นชนิดที่มีสีดำและชนิดที่ไม่ใช่สีดำ ซึ่งเขม่าดำเป็นสารตัวเติมชนิดที่มีสีดำที่นิยมใช้กันมาก ส่วนสารตัวเติมชนิดที่ไม่เป็นสีดำที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ ซิลิกา

2.2.4.1 เขม่าดำ (Carbon Black) สามารถผลิตได้ 3 วิธี คือ

1) Channel Process โดยการเผาก๊าซธรรมชาติให้เปลวไฟกระทบกับแผ่นโลหะเย็นทำให้เกิดเขม่าดำที่แผ่นโลหะ และสามารถควบคุมขนาดของเขม่าดำที่ออกมา โดยควบคุมปริมาณอากาศในการเผาไหม้ อุณหภูมิของเตาเผาและปริมาณอากาศที่ให้ออกมา ความดันของก๊าซที่ใช้ในการเผาไหม้ และอื่นๆ เขม่าดำที่ได้มีขนาดตั้งแต่ 100 - 400 A^o แต่ที่ใช้กับยางควรมีขนาดตั้งแต่ 170 A^o ขึ้นไป เนื่องจากเขม่าดำที่มีขนาดเล็กกว่า 150 A^o จะผสมเข้ากับยางได้ยาก ส่วนยางที่ได้ก็จะแข็งและแปรรูปยาก นอกจากนี้แล้วเขม่าดำที่ได้จะมีสมบัติเป็นกรด ทำให้เวลาในการคงรูปของยางนานขึ้น

Channel Black แบ่งตามขนาดอนุภาค ได้ดังนี้

- CC (Conductive channel black) มีขนาดอนุภาค 170 - 230 A^o
- HPC (Hard processing channel black) มีขนาดอนุภาค 220 - 250 A^o
- MPC (Medium processing channel black) มีขนาดอนุภาค 250 - 290 A^o
- EPC (Easy processing channel black) มีขนาดอนุภาค 290 - 330 A^o

2) Furnace black โดยการนำก๊าซธรรมชาติ หรือน้ำมันที่ได้จากโรงงานถ่านหิน หรือโรงงานน้ำมัน มาเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ การผลิตเขม่าดำในปัจจุบันจะนิยมผลิตโดยวิธีนี้ ซึ่งสามารถเตรียมเขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 140 - 900 A^o เขม่าดำชนิดนี้มีสมบัติเป็นด่าง ดังนั้นยางที่ผสมด้วยเขม่าดำชนิดนี้จะคงรูปเร็วกว่ายางที่ผสมด้วย channel black ถ้าใช้สารเร่งชนิดเดียวกัน

Furnace black แบ่งตามขนาดอนุภาคได้ดังนี้

- SAF (Super abrasion furnace black) มีขนาดอนุภาค 200 A^o
- ISAF (Intermediate super abrasion furnace black) มีขนาดอนุภาค 240 A^o
- HAF (High Abrasion Furnace) มีขนาดอนุภาค 300 A^o
- FEF (Fast extension furnace black) มีขนาดอนุภาค 400 A^o
- GPF (General purpose furnace black) มีขนาดอนุภาค 600 A^o
- SRF (Semi-reinforcing furnace black) มีขนาดอนุภาค 700 A^o
- SCF (Super conductive furnace black) มีขนาดอนุภาค 200 A^o
- CF (Conductive furnace black) มีขนาดอนุภาค 240 A^o

3) Thermal black โดยการแยกสลายก๊าซธรรมชาติที่ใช้ความร้อนสูงถึง 1300°C ในสภาพที่ปราศจากอากาศ เขม่าดำชนิดนี้มีขนาดอนุภาคใหญ่มาก และมีสมบัติเป็นกลาง

Thermal black แบ่งตามขนาดอนุภาคได้ดังนี้

- FT (Fine thermal black) มีขนาดอนุภาค 1,000 - 2,000 A°
- MT (Medium thermal black) มีขนาดอนุภาค 3,000 - 5,000 A°

สมบัติของเขม่าดำขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย คือ

1. ขนาดอนุภาค โดยทั่วไปแล้วเขม่าดำที่มีขนาดเล็กจะทำให้ยางที่ผสมมีความแข็ง ความต้านทานแรงดึง และความต้านทานต่อการสึกหรอสูงขึ้น การผสมเข้ากับยางก็ยากขึ้นด้วย

2. โครงสร้างของเขม่าดำ เป็นการจับตัวระหว่างอนุภาคของเขม่าดำ คือ ถ้าเขม่าดำ มีการจับตัวต่อกันเป็นเส้นสายมาก แสดงว่ามีโครงสร้างสูง ถ้าการจับตัวไม่ต่อกัน หรือต่อกันน้อย แสดงว่ามีโครงสร้างต่ำ

เขม่าดำมีโครงสร้างต่างกันมากหรือน้อย ขึ้นกับกระบวนการเตรียมเขม่าดำนั้นๆ เช่น thermal black มีโครงสร้างน้อยมาก หรือไม่มีเลย ส่วน channel black มีโครงสร้างปานกลาง แต่ furnace black ชนิดที่ใช้ น้ำมันอะโรมาติกสูง จะให้เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูง

3. ลักษณะผิว โดยการจับตัวของอะตอมคาร์บอนในเขม่าดำจะมีลักษณะเป็นชั้นๆ เขม่าดำที่มีสมบัติในการเสริมประสิทธิภาพต่ำ เช่น thermal black จะมีการจัดของอะตอมคาร์บอนเรียงขนานกันอย่างมีระเบียบ เขม่าดำที่มีสมบัติเสริมประสิทธิภาพสูงจะมีการจัดตัวของอะตอมคาร์บอนไม่เป็นระเบียบเท่า และยิ่งเขม่าดำมีขนาดอนุภาคเล็กยิ่งขึ้น การจัดตัวของอะตอมคาร์บอนก็ยิ่งไม่เป็นระเบียบมากขึ้น บางครั้งลักษณะของอะตอมคาร์บอนที่ผิวจะมีผลต่อการเสริมประสิทธิภาพได้ เช่น ถ้าอะตอมของคาร์บอนเกิดการสร้างพันธะกันเอง จนทำให้ลักษณะผิวจัดตัวเป็นระเบียบทำให้เกาะติดกับยางไม่ดี การเสริมประสิทธิภาพก็จะต่ำ แต่ถ้าอะตอมคาร์บอนมีไฮโดรเจนมาเกาะจะช่วยทำให้เขม่าดำนั้นเสริมประสิทธิภาพมากขึ้นและเพิ่มมากขึ้นถ้าเกิดอนุมูลอิสระอยู่บนผิวของเขม่าดำ ซึ่งอนุมูลอิสระนี้จะสร้างพันธะกับยางได้ เมื่อโมเลกุลของยางแตกออกเป็นอนุมูลอิสระจะทำการผสม

4. สมบัติทางเคมีของผิว เขม่าดำประกอบด้วย คาร์บอนประมาณ 90 - 99 % โดยที่เหลือเป็นไฮโดรเจน และออกซิเจน ที่เกาะกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งออกซิเจนส่วนใหญ่จะอยู่ที่ผิวของเขม่าดำ นอกจากนี้ยังมีกำมะถันปริมาณเล็กน้อยปนอยู่ในเขม่าดำด้วย ปริมาณของกำมะถันขึ้นกับปริมาณของกำมะถันเดิมที่มีในน้ำมันที่ใช้ทำเขม่าดำ สารเคมีพวกไฮโดรเจน ออกซิเจน และกำมะถันนี้ทำให้ pH ของเขม่าดำต่างกัน คือ channel black มีออกซิเจนสูง มี pH เป็นกรด ส่วน furnace black มีออกซิเจนน้อยกว่า 1 % จะมี pH เป็นกลางหรือเป็นด่าง ซึ่งความเป็นกรดหรือด่างของเขม่าดำนี้มีผลต่อ

การคงรูป เช่น การใช้กำมะถันในการคงรูปยางที่มีเขม่าค่า pH เป็นค่าจะคงรูปได้เร็วกว่าเขม่าค่าที่มี pH เป็นกรด เป็นต้น

5. ความเป็นรูปทรงของเขม่าค่า ผิวของเขม่าค่าไม่เรียบเนื่องจากในการเตรียมเขม่าค่าทำโดยให้เกิดการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง การออกซิเดชันจะทำให้เกิดเป็นรูปทรงขึ้นในอนุภาคของเขม่าค่าได้ การมีรูปทรงมากหรือน้อยในเขม่าค่าจะเป็นเหตุทำให้การคงรูปเร็วหรือช้าได้ เนื่องจากรูปทรงเหล่านี้จะดูดเอาสารตัวเร่งเข้าไป ทำให้การคงรูปช้าลงได้ และพบว่าเขม่าค่าที่มีรูปทรงมากมีจำนวนอนุภาคมากกว่าเขม่าค่าที่มีรูปทรงน้อย ดังนั้นถ้าใช้เขม่าค่าจำนวนเท่าๆ กันโดยน้ำหนักใส่ในยาง เขม่าค่าที่มีรูปทรงมากจะทำให้ยางมีความหนืดสูงกว่า การนำไฟฟ้าดีกว่าเขม่าค่าที่มีรูปทรงน้อย เนื่องจากมีจำนวนอนุภาคมากกว่า สมบัติของเขม่าค่าขึ้นกับขนาดอนุภาคมากที่สุด รองลงมาคือ โครงสร้างและความเป็นรูปทรง ส่วนลักษณะผิวทางกายภาพและทางเคมีจะมีผลน้อย

ผลของเขม่าค่าต่อยางที่ยังไม่คงรูป

การนำเขม่าค่าผสมกับยางจำเป็นต้องบดขย้างให้ نرم ก่อน ก็ยางจะมีความหนืดลดลง การใส่เขม่าค่าจะทำให้ยางมีความหนืดเพิ่มขึ้น ดังนั้นการใส่เขม่าค่าปริมาณและขนาดต่างกัน จะมีผลต่อความหนืดของยาง เขม่าค่าที่มีขนาดอนุภาคเล็กทำให้ยางมีความหนืดสูงกว่าเขม่าค่าที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ เมื่อใช้ในปริมาณเท่าๆ กัน นอกจากเขม่าค่าที่มีขนาดเล็กจะทำให้ความหนืดสูงกว่าแล้วยังผสมเข้าไปในยางโดยใช้เวลานานกว่าด้วย

เวลาในการคงรูปก่อนกำหนด (scorch) ของยางที่มีเขม่าค่าไม่ขึ้นกับขนาดอนุภาคเท่าใดนัก แต่เวลาในการคงรูปก่อนกำหนดขึ้นกับชนิดและปริมาณของเขม่าค่าที่ใส่ไปในยาง โดย furnace black จะเกิดการคงรูปก่อนกำหนดเร็วกว่า channel black มาก ดังนั้นสารที่ใช้เร่งปฏิกิริยาการคงรูปของยางที่ประกอบด้วยเขม่าค่าทั้งสองชนิด ควรใช้แตกต่างกัน เพื่อที่จะสามารถควบคุมเวลาในการคงรูปก่อนกำหนดของยางให้ได้ตามต้องการ เช่น channel black ใช้ไทอาโซล ส่วน furnace black ใช้สารเร่งที่มีปฏิกิริยาช้า (delayed action) ได้แก่ พวกลิพินาไมด์ ผลของการใช้เขม่าค่าในยางทำให้ลดเวลาการคงรูปก่อนกำหนดลง ไม่ว่าจะใช้สารตัวเร่งชนิดใด

อิทธิพลของเขม่าค่าต่อสมบัติของยางคงรูป

สมบัติของยางที่คงรูป ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอ และการกระดอนของยาง จะขึ้นกับขนาดของอนุภาคของเขม่าค่า ส่วนความแข็งของยางขึ้นกับโครงสร้างมากกว่าขนาดอนุภาค

อิทธิพลของเขม่าค่าต่อความต้านทานแรงดึง คือ เขม่าค่าส่วนใหญ่ทำให้ยางมีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.6 ผลของขนาดอนุภาคและโครงสร้างของเขม่าดำต่อสมบัติของยาง¹

สมบัติ	ขนาดอนุภาคลดลง	โครงสร้างเพิ่ม
Processing properties		
loading capacity	ลดลง	ลดลง
incorporation time	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
oil extension potential	เปลี่ยนเล็กน้อย	เพิ่มขึ้น
dispersability	ลดลง	เพิ่มขึ้น
mill bagging	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
viscosity	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
scorch time	ลดลง	ลดลง
extrusion shrinkage	ลดลง	ลดลง
extrusion smoothness	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
extrusion rate	ลดลง	เปลี่ยนเล็กน้อย
Vulcanizate properties		
rate of cure	ลดลง	เปลี่ยนเล็กน้อย
tensile strength	เพิ่มขึ้น	ลดลง
modulus	เพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดแล้วลดลง	เพิ่มขึ้น
hardness	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
abrasion	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
elongation	ลดลงถึงจุดต่ำสุดแล้วเพิ่มขึ้น	ลดลง
tear resistance	เพิ่มขึ้น	เปลี่ยนเล็กน้อย
cut growth resistance	เพิ่มขึ้น	ลดลง
flex resistance	เพิ่มขึ้น	ลดลง
resilience	ลดลง	เปลี่ยนเล็กน้อย
heat build up	เพิ่มขึ้น	เพิ่มเล็กน้อย
compression set	เปลี่ยนเล็กน้อย	เปลี่ยนเล็กน้อย
electrical conductivity	เพิ่มขึ้น	เปลี่ยนเล็กน้อย

¹ พรพรรณ นิธิอุทัย, สารเคมีสำหรับยาง (คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2528), หน้า 186-187.

อิทธิพลของเขม่าดำต่อความต้านทานต่อการสึกหรอ คือ ความต้านทานต่อการสึกหรอของยาง ขึ้นกับขนาดอนุภาคของเขม่าดำอย่างมาก ขนาดอนุภาคยิ่งเล็กทำให้ความต้านทานต่อการสึกหรอยิ่งสูง

อิทธิพลของเขม่าดำต่อความแข็งของยาง คือ ยางที่ใส่เขม่าดำจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเขม่าดำ และถ้าเขม่าดำยังมีขนาดอนุภาคเล็ก ความแข็งก็จะเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งปริมาณของเขม่าดำที่ทำให้ความแข็งของยางเพิ่มขึ้นในยางแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน

อิทธิพลของเขม่าดำต่อความต้านทานต่อการฉีกขาด คือ เขม่าดำมีผลต่อความต้านทานต่อการฉีกขาดคล้ายกับความต้านทานต่อการสึกหรอ โดยเขม่าดำจะทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง เมื่อใส่เขม่าดำเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดจะลดลง และความต้านทานต่อการฉีกขาดจะขึ้นกับขนาดอนุภาค ถ้าขนาดเล็กลงจะมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง

อิทธิพลของเขม่าดำต่อการกระดอนของยาง คือ โดยทั่วไปถ้าใส่สารตัวเติมลงไปยางพบว่าทำให้การกระดอนของยางลดลง ยิ่งปริมาณสารตัวเติมมากขึ้นเท่าใด การกระดอนก็จะยิ่ง ลดลง โดยเฉพาะถ้าสารตัวเติมมีขนาดอนุภาคเล็กจะทำให้การกระดอนลดลงมาก

2.2.4.2 ซิลิกา (Silica)

ซิลิกามีชื่อทางเคมีว่า ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide, SiO_2) และอาจมีน้ำผลึกอยู่ด้วย ซิลิกาเป็นสารตัวเติมชนิดที่ไม่ใช่สีดำ (Non black filler) ที่ดีที่สุดและนิยมใช้มาก เพราะเป็นสารตัวเติมชนิดที่เสริมความแข็งแรงให้กับยางด้วย มักใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางพวกที่มีสีขาวหรือสีต่างๆ สามารถแบ่งซิลิกาได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ซิลิกาบด (Ground mineral silica) เป็นแร่ซิลิกาบดหรือทรายบดละเอียด มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 200 เมช ($75,000 \text{ }^\circ\text{A}$) ซึ่งเป็นขนาดที่หยาบ ไม่ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง แต่มีราคาถูกจึงนิยมใช้เป็นสารตัวเติมในยางทนความร้อน เนื่องจากขนาดอนุภาคใหญ่จึงทำให้สมบัติไม่ดี และมีพื้นที่ผิวน้อย การดูดซึมสารเร่งไวท์ที่ผิวจะมีน้อย ดังนั้นซิลิกาบดจึงไม่มีผลต่อเวลาในการคงรูป และไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์โปร่งแสง

2. ซิลิกาที่เตรียมจากการตกตะกอน (Precipitated silica) โดยการนำทรายมาละลายในด่างให้กลายเป็นสารประกอบซิลิเกต จากนั้นจึงตกตะกอนเอาซิลิกากลั่นออกมาล้างและทำให้แห้งจะได้ซิลิกาผง ซึ่งมีน้ำปนอยู่ในอนุภาค ซิลิกาที่ได้มีฤทธิ์เป็นกลางถึงเป็นกรดเล็กน้อย มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 100 - 400 $^\circ\text{A}$ (วิธีการสังเคราะห์ซิลิกาที่ได้จากการตกตะกอนและขนาดอนุภาคในภาคผนวก ก)

ซิลิกาชนิดนี้เป็นสารตัวเติมที่เสริมความแข็งแรงให้กับยางที่นิยมใช้มากที่สุด โดยทำให้ยางมีความต้านทานแรงดึง การฉีกขาด และการสึกหรอ นอกจากนี้ยังทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปมักใช้กับการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการลักษณะโปร่งแสง และมีสีขาว เช่น Hi-sil 255, Hi-sil 233, Ultrasil VN-3

3. ซิลิกาที่เตรียมจากการเผาไหม้ (Furnace หรือ Combustion หรือ Fume silica) ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง SiCl_4 (หรือ SiHCl_3) กับไอน้ำในเปลวไฟของไฮโดรเจนและออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1400 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวให้ซิลิกาออกมา ซิลิกาชนิดนี้มีฤทธิ์เป็นกรด และมีขนาดอนุภาคเล็กมาก เสริมความแข็งแรงได้ดีมาก ทำให้ยางมีความต้านทานแรงดึง การฉีกขาด และการสึกหรอ ซิลิกาชนิดนี้มีราคาแพงมากมักใช้เพื่อวัตถุประสงค์พิเศษกับยางซิลิโคน เป็นต้น

ซิลิกาที่เตรียมจากการตกตะกอนและการเผาไหม้ เมื่อใช้กับยางจะก่อให้เกิดการชะลอการคงรูป เนื่องจากผิวหน้าที่ไวต่อปฏิกิริยาของอนุภาคซิลิกา จะดูดซึมสารเร่งปฏิกิริยาคงรูป จึงจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาคงรูป หรือใช้สารเคมีช่วยเร่งปฏิกิริยาคงรูป ได้แก่ พวกไกลคอล เช่น DEG และ PEG เป็นต้น หรือพวกอะมีน เช่น triethanolamine เป็นต้น โดยจะใช้ประมาณ 6% ของปริมาณซิลิกาในยาง

อิทธิพลของการใช้ซิลิกากับยาง

1. อิทธิพลเนื่องจากขนาดของซิลิกา ซิลิกามีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวมาก ขณะผสมยางจะเกิดความร้อนสูง อาจเป็นเหตุให้เกิดการคงรูปก่อนกำหนดได้ง่าย

ซิลิกามีลักษณะเป็นผงสีขาว เบา ร่วน ทำให้การผสมเข้าไปในยางทำได้ไม่ง่ายนัก การผสมจะใช้เวลานานกว่าปกติ ซึ่งทำให้ยางเกิดการแตกของโมเลกุลได้ ทำให้สมบัติของยางตกลง ดังนั้นการผสมยางกับซิลิกาเพื่อไม่ให้เสียเวลานาน ไม่ควรผสมในเครื่องบดสองลูกกลิ้ง แต่ควรผสมในเครื่องผสมแบบปิด กรณีที่ไม่มีเครื่องผสมแบบปิด และจำเป็นต้องผสมในเครื่องบดสองลูกกลิ้ง ต้องทำด้วยความระมัดระวัง อย่าผสมนานเกินไป และขณะผสมให้ใส่ยางกับซิลิกาเท่านั้น อย่าใส่สารเคมีอื่นลงไป เนื่องจากจะทำให้การผสมยากขึ้น เมื่อผสมเสร็จให้ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน แล้วจึงใส่สารเคมีอื่นลงไป ส่วนการผสมในเครื่องผสมแบบปิดนั้นจะสามารถผสมแบบปกติได้

2. อิทธิพลเนื่องจากความเป็นกรดของซิลิกา ซิลิกาเป็นสารที่มี pH เป็นกรด ซึ่งทำให้เกิดการดูดสารตัวเร่งที่ผิวของซิลิกาได้ ปริมาณสารตัวเร่งจะลดลง ทำให้ยางคงรูปช้าลง ซึ่งแก้ไขได้โดยการเพิ่มปริมาณของสารตัวเร่ง หรือใส่สารประเภทที่เป็นตัวลดประสิทธิภาพ (deactivator) ลงไป สารเหล่านี้ ได้แก่ สารประกอบอะมีน และแอลกอฮอล์

สารประเภทอะมีนมักทำให้ยางเป็นสีน้ำตาล และมีประสิทธิภาพสูงกว่าแอลกอฮอล์ ส่วนแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ ได้แก่ DEG การใช้สารลดประสิทธิภาพมักจะใช้ประมาณ 6% ของสารตัวเติม ปริมาณจะมากหรือน้อยขึ้นกับประสิทธิภาพของสารตัวเติม และอัตราการคงรูปที่ต้องการ ถ้าใช้ปริมาณสูงเกินไปจะทำให้การคงรูปเร็ว เกิดการคงรูปก่อนกำหนดได้ง่าย ถ้าปริมาณต่ำไปก็จะคงรูปช้า

3. อิทธิพลที่ทำให้ยางแข็ง ปกติการมีซิลิกาผสมอยู่ในยางจะทำให้ความแข็งของยางที่ยังไม่คงรูปสูงขึ้น ดังนั้นผลการทดลองซึ่งนำยางแผ่นรมควันมาบด 3 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที โดยแต่ละครั้ง

ตั้งเวลาห่างกันครั้งละ 30 นาที หลังจากนั้นเอายางไปผสมซิลิกา ในเครื่องผสมเป็นเวลา 12 นาที นำไปหาค่า Mooney viscosity ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ผลของปริมาณซิลิกาต่อความหนืดยาง¹

ปริมาณของ Hi-sil 233 ต่อยางธรรมชาติ 100	Mooney viscosity MV 4 นาที ที่ 100 องศาเซลเซียส
0	25
10	40
15	65
20	105
25	148
30	202

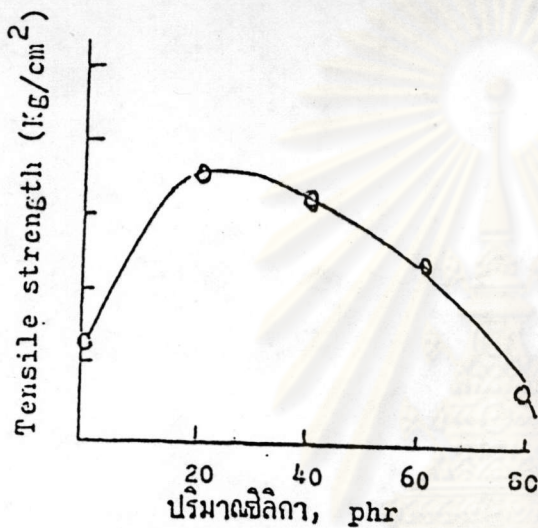
(ซิลิกามีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.0 ดังนั้นการใส่ซิลิกาที่มีปริมาตร 10 ในยาง 100 เท่ากับใส่ซิลิกาเข้าไป 20 phr)

การเพิ่มปริมาณของซิลิกาทำให้ยางมีค่า Mooney viscosity เพิ่มขึ้น ทำให้การแปรรูปยากขึ้น และอาจเกิดปัญหาทำให้แรงดันในเครื่องจักรเพิ่มขึ้น จึงต้องทำการเติมสารช่วยในการแปรรูป (plasticizer) ลงไป เพื่อช่วยให้ยางมีค่า Mooney viscosity ลดลง ซึ่งการใช้สารเคมีธรรมดา เช่น กรดสเตียริก กรดโอเลอิก จะช่วยลดความหนืดของยางได้พอใช้ แต่การใช้กรดมากเกินไปจะทำให้ยางคงรูปช้าลง ดังนั้นกรดสเตียริกมักใช้เป็นสารกระตุ้นมากกว่า และไม่ควรใช้เกิน 3 phr ส่วนน้ำมันอะโรมาติก และน้ำมันโรซิน จะทำให้ค่าความหนืดของยางลดลงบ้างแต่ไม่มากนัก ส่วน DEG เป็นสารที่ทำให้ยางนิ่มได้ เพราะสามารถลดความหนืดของยางได้ดีเทียบเท่ากับน้ำมันโรซิน ดังนั้น DEG จึงนิยมใช้ในการผสมยางเมื่อใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม เนื่องจากใช้เป็นที่ทั้งสารที่ทำให้ยางนิ่มและสารลดประสิทธิภาพพร้อมๆ กัน

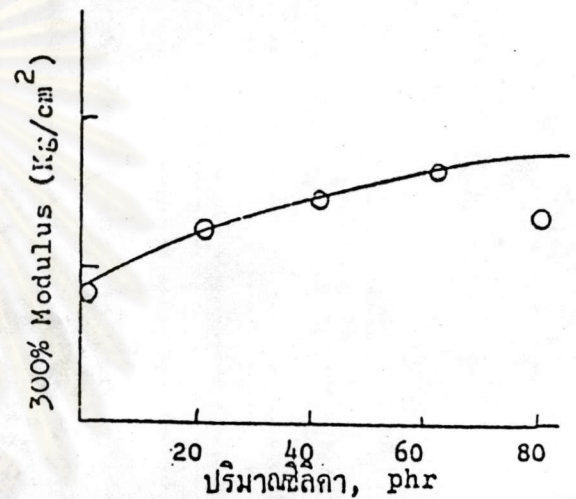
¹ พรพรรณ นิธิอุทัย, สารเคมีสำหรับยาง (คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2528), หน้า 218.



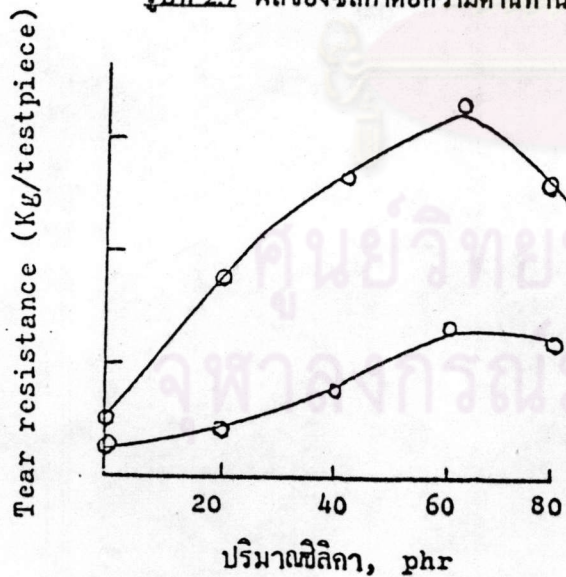
4. อิทธิพลเนื่องจากซิลิกาเป็นสารอนินทรีย์ โดยปกติซิลิกาที่ได้จากการตกตะกอนเป็นซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ดังนั้นจึงทำให้ความต้านทานแรงดึง และการยืดออกจนขาดใกล้เคียงกับเขม่าดำ แต่จะมีความต้านทานต่อการสึกหรอ และมอดูลัสต่ำกว่ายางที่ใช้เขม่าดำ เช่น ความต้านทานต่อการสึกหรอมีค่าประมาณ 60 % ของ HAF ส่วนค่ามอดูลัสประมาณ 25 % ของ HAF เพราะซิลิกามีผิวเป็นสารอนินทรีย์มาก ทำให้มีแรงยึดกับยางไม่ดีนัก ซึ่งจะมีผลต่อความต้านทานต่อการสึกหรอและมอดูลัสของยาง แต่ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางที่ใช้ซิลิกาสูงกว่ายางที่ใช้ HAF มาก การเพิ่มปริมาณซิลิกา จะทำให้สมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปคล้ายๆ กับการใช้เขม่าดำ



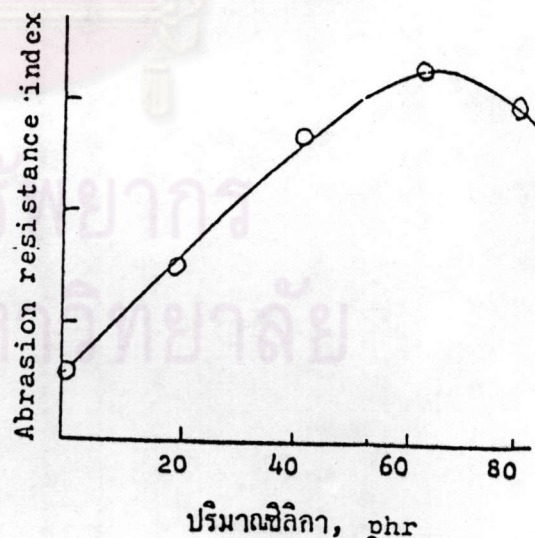
รูปที่ 2.7 ผลของซิลิกาต่อความต้านทานแรงดึง



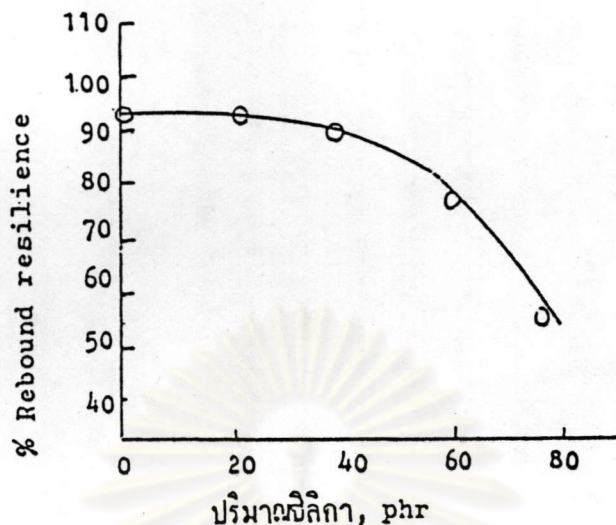
รูปที่ 2.8 ผลของซิลิกาต่อมอดูลัส



รูปที่ 2.9 ผลของซิลิกาต่อความต้านทานต่อการฉีกขาด



รูปที่ 2.10 ผลของซิลิกาต่อความต้านทานต่อการสึกหรอ



รูปที่ 2.11 ผลของซิงค์ออกไซด์ต่อการกระดอนของยาง

ซิงค์ออกไซด์ของแข็งสีขาวมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.46 - 1.54 แล้วแต่ชนิดของซิงค์ออกไซด์ (ส่วนค่าดัชนีหักเหของยางธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 1.52) สำหรับ Hi-sil 233 ซึ่งเป็นซิงค์ออกไซด์ตกตะกอนพบว่ามีความดัชนีหักเหใกล้เคียงกับยางมาก จึงนิยมใช้ Hi-sil 233 สำหรับการทำยางใส (transparent rubber หรือ translucent rubber)

2.2.5 สารช่วยในการแปรรูป (Plasticizer)

เป็นสารที่ใส่เข้าไปในยางเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และเพิ่มความสามารถในการใช้งาน ซึ่งสารช่วยในการแปรรูปจะทำให้ความแข็งแรงของยางลดลง และช่วยให้แปรรูปได้ง่ายขึ้น

ในบางครั้งสารช่วยในการแปรรูปจะมีชื่อเรียกต่างๆ กัน ขึ้นกับหน้าที่และปริมาณการใช้ คือ

1. Processing aid คือ สารพลาสติกไซเซอร์ ที่ใช้ในปริมาณไม่เกิน 5 phr เพื่อช่วยในการแปรรูปยาง และช่วยให้การผสมสารเคมีเข้าไปในยางได้ง่ายขึ้น

2. Softener คือ สารพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ในปริมาณ 5 - 15 phr ใส่เพื่อทำให้ยางนิ่มลง ทั้งในขณะที่ยังไม่คงรูปและคงรูปแล้ว

3. Extender คือ สารพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ในปริมาณมากกว่า 15 phr ใส่เพื่อลดต้นทุนหน้าที่ของพลาสติกไซเซอร์

1. ช่วยในการแปรรูปยาง คือ ช่วยให้ยางทั้งที่คงรูปแล้วและยางที่ยังไม่คงรูปนิ่มลง ทำให้แปรรูปยางได้ง่ายขึ้น

2. เพื่อปรับปรุงสมบัติของยาง คือ มีความแข็งแรงลดลง โมดูลัสลดลง แรงบีคออกจนขาดของยางสูงขึ้น มีความยืดหยุ่นสูงขึ้น

3. ลดต้นทุน คือ การเติมพลาสติกไซเซอร์เข้าไปจะช่วยให้สามารถใส่สารตัวเติมได้มากขึ้น

4. เพื่อการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ คือ ทำใหยางยังคงมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ

5. เพื่อลดพลังงานในการแปรรูปยาง เนื่องจากพลาสติกไซเซอร์ทำใหยางนิ่มลง พลาสติกไซเซอร์ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

ก. สารช่วยทำใหยางนิ่มโดยทางเคมี (chemical plasticizer) เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่เมื่อใส่เข้าไปในปริมาณเล็กน้อย จะทำใหยางนิ่มและลดเวลาของการบดขยงลง มักใช้กับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่มีความหนืดสูง ซึ่งมีโมเลกุลใหญ่และแปรรูปได้ยาก โดยใช้ประมาณ 2 phr ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับยาง

ข. สารช่วยทำใหยางนิ่มโดยทางกายภาพ (physical plasticizer) เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ใส่เข้าไปแล้ว ทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นระหว่างโมเลกุลของยาง ทำให้โมเลกุลยางเคลื่อนไหวได้ง่าย ยางจะนิ่มลง แปรรูปได้ง่ายขึ้น เป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยากับยางและสามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกับยางและสารอื่นๆได้ ตัวอย่างเช่น น้ำมันปิโตรเลียม เป็นต้น

2.2.6 สารต้านทานยางเสื่อมสภาพ (Protective agent)

โมเลกุลของยางธรรมชาติจะมีพันธะคู่อยู่ด้วย จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางธรรมชาติเกิดการเสื่อมสภาพได้ โดยสาเหตุของการเสื่อมสภาพนี้เนื่องจากปฏิกิริยาของออกซิเจนและโอโซน ซึ่งการเสื่อมสภาพของยางจะเกิดขึ้นมากถ้าไม่มีสารเร่ง แต่ในธรรมชาติ เช่น แสง ความร้อน ความไม่บริสุทธิ์ของโลหะ ล้วนเป็นตัวเร่งตามธรรมชาติที่ทำให้ยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น

นอกจากนี้การอบยาง (aging) จะทำให้ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลง หรืออาจเกิดการเปลี่ยนแปลงในทุกส่วนของผลิตภัณฑ์ เช่น เกิดรอยแตกที่ผิว ผิวแข็ง และสูญเสียความแข็งแรง ซึ่งการเสื่อมสภาพของยางสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 แบบ คือ

1. เสื่อมสภาพเนื่องจากตั้งทิ้งไว้นาน (Self aging)
2. เสื่อมสภาพเนื่องจากการกระตุ้นของโลหะที่เป็นตัวเร่ง (Metallic poisoning)
3. เสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat aging)
4. เสื่อมสภาพเนื่องจากแสง (Light aging)
5. เสื่อมสภาพเนื่องจากการหักงอไปมา (Flex cracking)
6. เกิดรอยแตกเนื่องจากบรรยากาศ (Atmospheric cracking)

ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันยางเสื่อมสภาพและเพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้น ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันยางเสื่อมสภาพ โดยใช้สารแอนติออกซิแดนท์ (antioxidant) หรือสารแอนตี้โอโซนแนนท์ (antiozonant) ซึ่งจะช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ให้นานขึ้น

2.2.6.1 แอนติออกซิแดนท์ เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางที่เนื่องมาจากการที่ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับยาง โดยเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า “ปฏิกิริยาออกซิเดชัน” โดยสารแอนติออกซิเดนท์สามารถแบ่งได้เป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ

ก. สารแอนติออกซิเดนท์ชนิดตกสี (Staining antioxidant) เป็นออกซิเดนท์ที่เป็นสารประกอบอะมีน (amine) หรืออนุพันธ์ของอะมีน ใช้กับยางที่มีสีดำ เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูง แต่เมื่อใช้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ตกสี ได้แก่ Para-phenylene diamine (PPD) เป็นต้น

ข. สารแอนติออกซิเดนท์ชนิดไม่ตกสี (Non-staining antioxidant) เป็นสารแอนติออกซิเดนท์ที่เป็นสารประกอบฟีนอล (phenol) หรืออนุพันธ์ของฟีนอล ใช้กับยางที่มีสีทั่วไป ซึ่งจะไม่เกิดการตกสี หรือตกสีเล็กน้อย ได้แก่ Phenolic sulfide เป็นต้น

2.2.6.2 แอนตี้โอโซนแนนท์ โดยปกติโอโซนมีอยู่ในปริมาณน้อยประมาณ 1 - 10 ส่วนต่อร้อยล้านส่วน (pphm) แต่มีผลต่อยาง โดยทำให้ยางเกิดรอยแตก สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

ก. Para-phenylene diamine (PPD) ซึ่งเป็นทั้งแอนติออกซิเดนท์และแอนตี้โอโซนแนนท์ แต่มีข้อเสีย คือ เกิดการตกสี เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีสีดำ

ข. ขี้ผึ้งพาราฟิน (Paraffin wax) เป็นสารขี้ผึ้งที่เค็มลงไปบนยางจะเกิดการซึมออกมาที่ผิวยาง กลายเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โอโซนกระทบกับผิวของยาง ทำให้ยางมีความทนทานต่อโอโซน ขี้ผึ้งพาราฟินที่ใช้ในการป้องกันไม่ให้โอโซนทำปฏิกิริยากับยาง ควรจะมีสมบัติดังนี้ ต้องซึมออกมาที่ผิวของยางได้เร็ว ต้องเกาะยึดแน่นกับผิวยาง และต้องมีปริมาณมากพอที่จะทำให้ผิวของยางมีขี้ผึ้งอยู่ตลอดเวลา

2.3 ซิลิกาจากแกลบ

โดยทั่วไปในการเสริมแรงยางธรรมชาติ มักใช้สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นผง เช่น เขม่าดำ หรือซิลิกา แต่ซิลิกาที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีราคาแพง จึงได้มีการคิดค้นวิจัย นำซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงที่ได้จากแกลบมาใช้แทนซิลิกาในปัจจุบัน

ในธรรมชาตินั้นสามารถพบซิลิกาในพืชหลายชนิด ซึ่งซิลิกาเป็นส่วนประกอบในโครงสร้าง โดยพืชเหล่านี้สามารถนำซิลิกาเข้ามาในลำต้นได้ในรูปสารละลายเท่านั้น สำหรับต้นข้าวเป็นแหล่งสะสมซิลิกาปริมาณมาก โดยสารละลายซิลิกาจะถูกดูดซึมเข้าไปยังต้นข้าว และสะสมอยู่ที่ง่ามลำต้น ใบ และ

แกลบ ซึ่งทุกส่วนของต้นข้าวจะมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแกลบจะมีซิลิกาสะสมอยู่มากที่สุด ประมาณ 21 % จึงได้มีการวิจัยเกี่ยวกับซิลิกาที่อยู่ในแกลบกันอย่างกว้างขวาง

ในช่วงหลายสิบปี ที่ผ่านมามีผู้ค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับแกลบซึ่งเป็นแหล่งของสารประกอบซิลิกา เพื่อนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ สำหรับวัตถุประสงค์ที่ทำจากแกลบ เช่น การเตรียมซิลิกอนคาร์ไบด์ (Shama, Williams, and Zangvil, 1984; Lee and Cutler, 1975) และการเตรียมซิลิกอนไนไตรด์ (Rahman and Riley, 1989) ซึ่งสารเหล่านี้มีราคาสูงจึงเป็นแรงจูงใจในการใช้แกลบเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นที่มีราคาไม่แพง

ปัจจุบันการศึกษาเกี่ยวกับแกลบได้มุ่งเน้นไปทางด้านการเตรียมซิลิกาอสังขฐานที่มีความบริสุทธิ์สูง (Chakraverty, Mishra, and Banerjee, 1988)

2.3.1 องค์ประกอบของแกลบ

องค์ประกอบของแกลบขึ้นกับพันธุ์ข้าว วิธีการปลูกข้าว แหล่งที่ผลิตและดินฟ้าอากาศ ส่วนข้อมูลขององค์ประกอบที่รายงานจะขึ้นกับการเตรียมตัวอย่าง และวิธีการวิเคราะห์ เป็นต้น องค์ประกอบหลักของแกลบดังตารางที่ 2.8

แกลบประกอบด้วยโปรตีน ความชื้นและวิตามินจำนวนเล็กน้อย สมบัติที่สำคัญที่สุดของแกลบที่ได้จากแกลบ คือ ซิลิกาจำนวนมาก (ซิลิกามากกว่า 90%) ตารางที่ 2.9 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของแกลบจากพืชชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบหลักของแกลบ¹

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์
เถ้า	13 - 29
เซลลูโลส	34 - 44
ลิกนิน	19 - 47
น้ำตาล *	17 - 26

* D-xylose, L-arabinose, methylglucuronic acid และ D-galactose

ซิลิกาอสังขฐานที่ได้จากแกลบนี้เป็นคอลลอยคอลลซิลิกา (colloidal silica) คือ เป็นซิลิกาที่เป็นของแข็งและมีขนาดเล็กมาก อนุภาคที่เล็กที่สุดของคอลลอยคอลลซิลิกามีขนาด 10^{-3} มิลลิเมตร จึงทำ

¹ ปรีดา ทัพพ์ขาวจำ, โรฮาร์ด กอนราคท์ และสมศักดิ์ คำรงค์เลิศ, รายงานการวิจัยเตรียมซิลิกาความบริสุทธิ์สูงจากแกลบด้วยวิธีฟลูอิดไดเซชัน (คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย), หน้า 16.

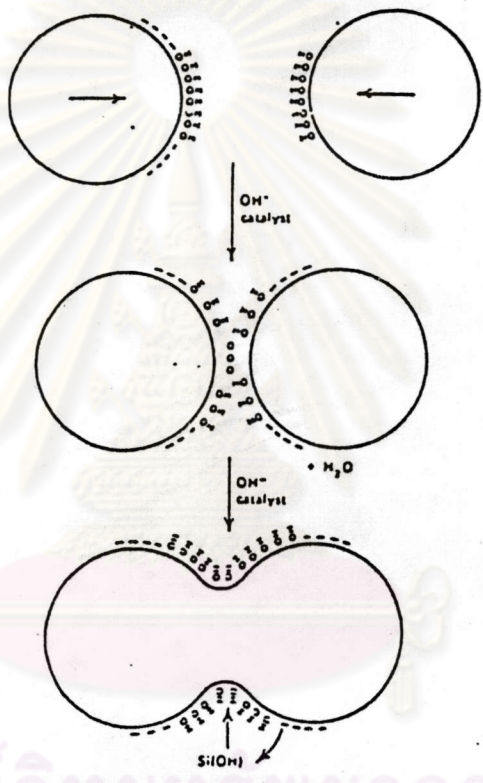
ให้มีพื้นที่ผิวสูง โดยคอลลอยคอลลีซิลิกา 50 กรัม มีพื้นที่ผิวใหญ่กว่าพื้นที่ของสนามกีฬาแห่งชาติ ซึ่งการผลิตซิลิกาจากแกลบนี้สามารถผลิตให้มีความบริสุทธิ์สูงได้มากกว่า 99.8 % ขึ้นกับกระบวนการผลิต

2.3.2 สมบัติทางเคมีของซิลิกา

สมบัติทางเคมีของซิลิกาเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและน้ำ ซึ่งมีผลต่อการละลาย การตกตะกอน การรวมกลุ่มกันของซิลิกา และการเกิดพอลิเมอร์ เป็นต้น

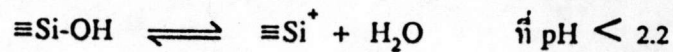
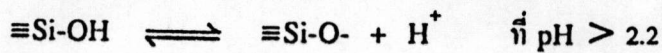
ผลของพื้นที่ผิวที่เป็น H^+ ต่อการรวมกลุ่มกันของอนุภาคซิลิกาที่เป็นคอลลอยด์ แสดงในรูปที่

2.12

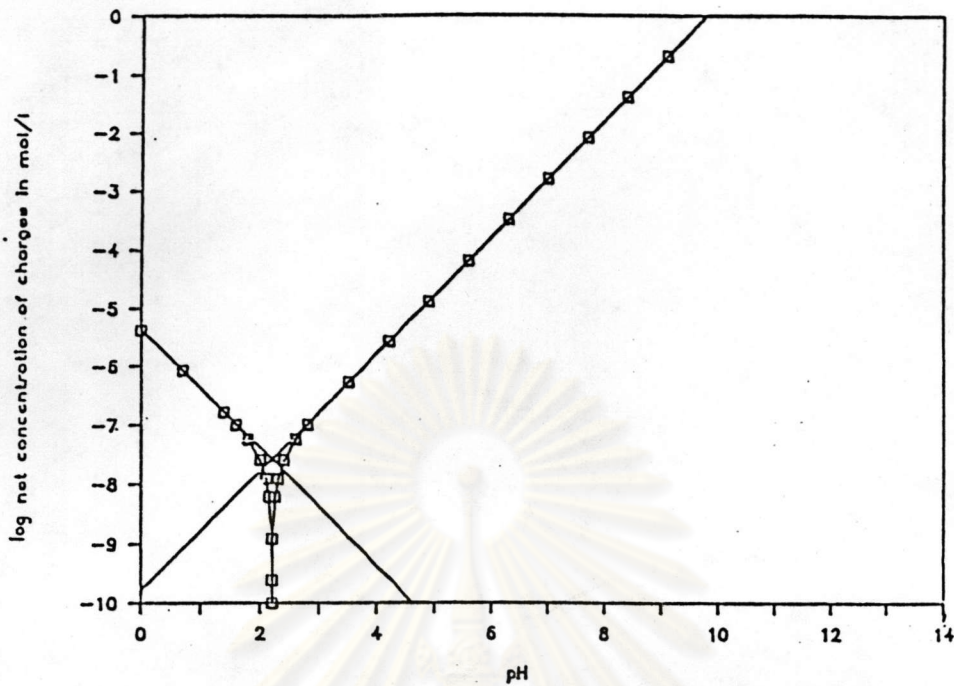


รูปที่ 2.12 การเกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคซิลิกาที่เป็นคอลลอยด์

โดยที่ pH ต่างกันจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ต่างกัน 2 ปฏิกิริยา คือ

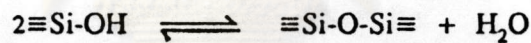


ซึ่ง pH ขึ้นกับความเข้มข้นของประจุ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ผลของประจุของอนุภาคซิลิกาที่เป็นคอลลอยด์ต่อ pH

ในที่สุดการเกิดพอลิเมอร์จะเกิดขึ้นโดยไม่มีขึ้นกับ pH ตามปฏิกิริยา



ความแตกต่างระหว่างการรวมกลุ่มกัน (agglomeration) และการเกิดพอลิเมอร์ (polymerization) คือ การรวมกลุ่มจะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ในชั้นที่เป็นพื้นผิวของ $\equiv\text{Si-OH}$ ขณะที่การเกิดพอลิเมอร์จะเป็นการเกิด $\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$

2.3.3 การผลิตซิลิกาจากแกลบ

ได้จากแกลบประกอบไปด้วยซิลิกาที่เป็นออสฐานเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งการนำแกลบมาล้างทำความสะอาด เพื่อขจัดเศษดินให้หมดไป แล้วนำมาทำปฏิกิริยากับกรดซึ่งช่วยทำลายโมเลกุลของลิกนินให้เล็กลง สำหรับการนำแกลบมาทำปฏิกิริยากับกรดนั้น สามารถใช้ได้กับกรดหลายชนิด เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก นอกจากนี้ยังสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้อัตราส่วนของกรดไฮโดรคลอริกต่อน้ำเป็น 1 : 1 และ 1 : 3 (Hunt และคณะ, 1984; Amick, 1982) และใช้อัตราส่วน 1 : 10 แต่ใช้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

ตารางที่ 2.9 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าจากพืชชนิดต่างๆ¹

ชนิดของพืช	SiO ₂	P ₂ O ₅	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ₂
beech wood	5	6	10	50	6	20	-
birch wood	12	8	14	30	9	23	-
oak bark	3	3	8	57	2	26	-
pine wood	10	9	6	25	9	27	-
spruce wood	2	4	6	30	6	7	43
rice husk	96	-	1.5		1.5		-

ผลของปริมาณซิลิกาที่ได้จากการเผาเถ้าที่ทำปฏิกิริยากับกรดและที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับกรดนั้น จะให้ผลที่แตกต่างกัน โดยกรดจะสามารถทำให้เถ้าจากเถ้ากลบมีคุณภาพดีขึ้น คือ มีปริมาณซิลิกาสูงถึงประมาณ 99 % ส่วนซิลิกาที่ได้จากการเผาเถ้าที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับกรดประมาณ 96 %

เถ้าที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกแล้ว จะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลเข้มเกือบดำ และมีความเปรี้ยว หลังจากนั้นนำเถ้าที่ได้นี้ล้างกรดออกด้วยน้ำสะอาดให้มี pH เป็นกลาง แล้วนำไปอบให้แห้ง หลังจากนั้นจึงนำเถ้าที่ได้มาทำการเผาในขั้นต่อไป

การนำเถ้าที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับกรดมาเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะทำให้ได้เถ้าซึ่งมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 99 % ถ้ามีลักษณะขาวรีเหมือนลักษณะเม็ดเถ้าขนาดเล็กกว่า ส่วนใหญ่มีสีขาว และมีเถ้าสีเทาปนอยู่บ้างแต่น้อยมาก มีความกรอบและเปรี้ยว โดยจะได้ซิลิกาในขั้นสุดท้ายที่ได้นี้คิดเป็นน้ำหนักประมาณ 20 % ของเถ้าเริ่มต้น

ซิลิกาที่ได้จากเถ้านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารเสริมแรงในยางที่ไม่ใช้สีค่า ใช้เป็นสารตัวเติมในสี ในพลาสติกและในเครื่องสำอาง เป็นต้น

2.4 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง (Rubber Manufacturing Process)

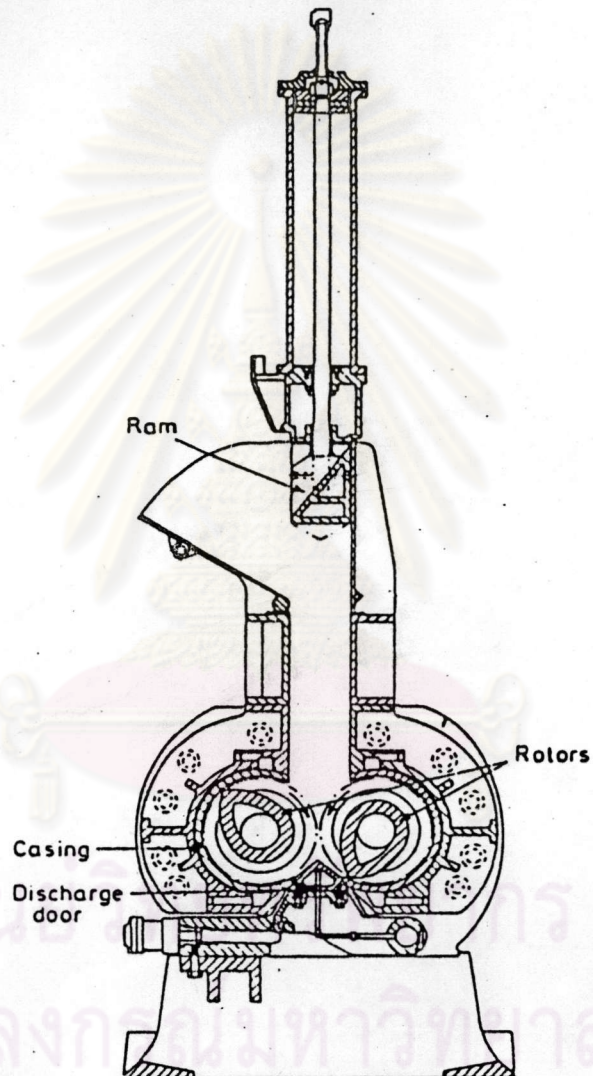
กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ คือ การผสมยางกับสารเคมี (mixing) การทำให้ยางมีรูปร่างต่างๆ (forming) และการทำให้ยางคงรูป (vulcanizing)

¹ ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, โรยาร์ด คอนราทท์ และสมศักดิ์ คำรงค์เลิศ, รายงานการวิจัยการเตรียมซิลิกาความบริสุทธิ์สูงจากเถ้าด้วยวิธีฟลูอิดไลเซชัน (คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย), หน้า 17.

2.4.1 การผสมขางกับสารเคมี

ในการผสมสูตรขางที่มีสารตัวเติมเป็นองค์ประกอบนั้น ขั้นตอนแรกต้องทำการผสมในเครื่องบดผสมแบบเปิด (Banbury mixer) ก่อน แล้วจึงทำการผสมกับในก้ำมะดันเครื่องบดผสมแบบเปิด

2.4.1.1 เครื่องบดผสมแบบเปิด



รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบภายในของเครื่อง Banbury mixer

Banbury mixer เป็นเครื่องบดผสมแบบปิดที่นิยมใช้กันมาก เพื่อการบดผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว รูปที่ 2.14 แสดงส่วนประกอบภายในของเครื่อง Banbury mixer

Banbury mixer ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ ส่วนที่รับยางเข้าเครื่อง (feeding module) ส่วนที่บดผสมยาง (mixing module) และส่วนที่ขับเครื่อง (driving module)

ส่วนที่รับยางเข้าเครื่องประกอบด้วยช่องสำหรับใส่ยางและสารเคมี (feed hopper) เข้าไปบดผสม และมีช่องทรงกระบอกสำหรับเครื่องกระทัน (ram) ที่มีน้ำหนักเคลื่อนขึ้นลงเพื่อกดยาง และสารต่าง ๆ ให้เข้าสู่ห้องบด (mixing chamber)

ส่วนที่บดผสมยางประกอบด้วยห้องบดซึ่งภายในมีโรเตอร์ (rotor) 2 ตัว เรียงขนานกันในแนวนอนและหมุนในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็วต่างกัน เพื่อให้ยางและสารเคมีถูกเหวี่ยงอย่างสม่ำเสมอ ผิวของโรเตอร์มีลักษณะเป็นใบมีด (rotor blades) จะดันให้ยางและสารเคมีบดผสมกันที่กลางห้องบด และขณะเดียวกันใบมีดจะตัดยางตามยาวด้วย การที่โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วต่างกันจึงเกิดการบดคนวดยางอย่างรุนแรง และการควบคุมอุณหภูมิอย่างถูกต้อง จะทำให้ใช้เวลาบดสั้นและยางที่ได้มีคุณภาพดี

ส่วนที่ขับเครื่องจะควบคุมการทำงานของโรเตอร์ที่อยู่ภายในห้องบด และควบคุมการเปิดปิดของประตู (discharge door) ที่อยู่ด้านล่าง เพื่อเปิดให้ยางที่บดผสมแล้วหล่นลงมา

การบดผสมยางกับสารเคมีในเครื่องบดผสมแบบปิดโดยทั่วไปจะบดผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ ยกเว้นพวกกำมะถัน การบดผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ ในเครื่องบดผสมแบบปิดต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการบด ลำดับการเติมสารลงไปบด ตลอดจนอุณหภูมิขณะบด

สารพวกน้ำมันใส่บดผสมพร้อมกับเขม่าดำและซิลิกา สำหรับอุณหภูมิขั้นสุดท้ายของการบด ถ้าสูงหรือต่ำเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาต่างๆ ได้ เช่น มีฟองอากาศอยู่ในเนื้อยาง เกิดฝุ่นของสารเคมีเคลือบผิวหน้ายางที่ผสมสารเคมี ซึ่งสารเคมีเหล่านี้ถูกผสมในปริมาณที่มากเกินไปจนความสามารถที่จะละลายผสมปนกับยางได้ นอกจากนี้ยังเกิดการกระจายของสารเคมีไม่ทั่วถึงในเนื้อยาง อุณหภูมิของยางที่บดผสมเสร็จแล้วควรมีอุณหภูมิสูงประมาณ 110 - 120 องศาเซลเซียส การเลือกระยะเวลาและอุณหภูมิที่จะบดยางพิจารณาจากการกระจายของสารเคมีในเนื้อยางและจากสมบัติทางกายภาพของยางซึ่งได้บดผสมสารทุกอย่างเรียบร้อยแล้ว

เงื่อนไขที่ต้องกำหนดเมื่อบดผสมยางโดยเครื่องบดผสมแบบปิด คือ ลำดับของสารที่จะใส่บดผสมกับยาง จังหวะการปรับเครื่องกระทันขึ้น - ลง แรงดันของแรม อุณหภูมิสุดท้ายของการบด และระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการบด

นอกจากนี้แล้วยังต้องมีการบดผสมยังต้องคำนึงถึงความจุของเครื่องบดผสมด้วย โดยต้องมีการคำนวณปริมาณของยางผสมสารเคมีไม่ให้เกินความจุของเครื่องบดผสมแบบปิด ซึ่งสามารถดูยางได้

ประมาณ 1220 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถ้านำขางผสมมากเกินไปจะทำให้การบดผสมไม่มี ประสิทธิภาพ คือ สารเคมีต่างๆ ที่ทำการบดผสมจะเข้ากับขางได้ไม่ทั่วถึง และใช้พลังงานในการบดผสมมาก

ถ้าให้ $(phr)_i$ และ s_i เป็นน้ำหนักความถ่วงจำเพาะขององค์ประกอบในสูตรขาง และ V_B เป็น ปริมาตรของขางผสม จะได้ความถ่วงจำเพาะของขางผสม (s) ดังนี้

$$s = \sum (phr)_i / V_B = \sum (phr)_i / \sum ((phr)_i / s_i)$$

สำหรับการผสมในเครื่องผสมแบบปิดให้มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้น ไม่ใช่ใช้ปริมาตรของขางผสมเท่ากับความจุของห้องผสมของเครื่อง แต่ใช้ค่าความจุที่เรียกว่า Fill Factor (F)

$$F = V_B / V_C$$

โดย V_B เป็นปริมาตรของขางผสม และ V_C เป็นปริมาตรของห้องผสม ดังนั้นน้ำหนักของขางผสมสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$Q = \text{ปริมาตร} \times \text{ถ.พ.} \quad \text{หรือ} \quad Q = F \times V_C \times s$$

ตัวอย่างการคำนวณ

องค์ประกอบ	phr	ถ.พ.	ปริมาตร
ยางธรรมชาติ	100	0.92	108.70
กรดสเตียริก	1	0.85	1.17
ซิงค์ออกไซด์	5	5.57	0.89
ZMBT	0.5	1.64	0.30
เขม่าดำ	50	1.80	27.78
น้ำมันอโรมาติก	5	1.02	4.90
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ	1	1.08	0.92
รวม	162.50		144.66

ดังนั้นความถ่วงจำเพาะของขางผสม (s) มีค่าเท่ากับ $162.50 / 144.66 = 1.12$

ถ้า $F = 0.90$ และ $V_C = 2220$ จะได้ขนาดของขางผสมดังนี้

$$Q = 0.90 \times 2220 \times 1.12 = 2237.76 \text{ กรัม}$$

จะได้ Multiplying factor (M.F.) คือ

$$M.F. = Q / phr = 2237.76 / 162.5 = 15.5$$

จากนี้ ต้องนำค่า M.F. มาคูณกับ phr จะได้น้ำหนักของขางและสารเคมี ตามสูตร คือ

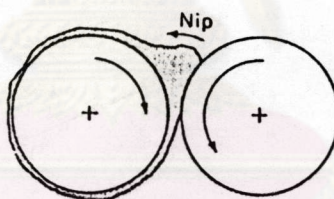
$$\text{น้ำหนักขององค์ประกอบ} = M.F. \times phr \text{ ของแต่ละองค์ประกอบ}$$

จากสูตรข้างข้างต้น จะได้น้ำหนักของยางและสารเคมี ดังนี้

องค์ประกอบ	phr	น้ำหนัก
ยางธรรมชาติ	100	1550
กรดสเตียริก	1	15.5
ซิงค์ออกไซด์	5	77.5
ZMBT	0.5	7.75
เขม่าดำ	50	775
น้ำมันอโรมาติก	5	77.5
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ	1	15.5
รวม	162.5	2518.75

2.4.1.2 เครื่องบดผสมแบบเปิด

เครื่องบดผสมแบบเปิดนี้จะเป็นแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก ที่มีขนาดเท่ากันวางในแนวนอน ให้แกนของลูกกลิ้งขนานกัน (รูปที่ 2.15)



รูปที่ 2.15 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง

การบดยางเริ่มด้วยการใส่ชิ้นยางเข้าไปในช่องระหว่างสองลูกกลิ้งที่กำลังหมุนอยู่ ปรับความกว้างของช่องเพื่อให้บีบยางขณะผ่าน ยางที่ผ่านช่องระหว่างสองลูกกลิ้ง ในตอนแรกจะมียางร่วงตกลงบนถาดรองรับได้ลูกกลิ้ง เมื่อบดยางต่อไป 3 ถึง 4 ครั้ง ยางจะเริ่มอ่อนนุ่มพอที่จะจับพันรอบลูกกลิ้งได้ เมื่อยางเกาะพันรอบลูกกลิ้งได้ เมื่อยางเกาะพันรอบลูกกลิ้งในตอนแรกจะมีลักษณะไม่เรียบทั่วผิวลูกกลิ้ง คือยางที่พันรอบลูกกลิ้งจะมีช่องที่ขาดเป็นรูอยู่ทั่วไป เมื่อบดต่อไปยางที่พันลูกกลิ้งจะเริ่มเรียบขึ้น ขณะเดียวกันก็จะมีกองยางอยู่เหนือช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง และต้องให้ยางผ่านลูกกลิ้งเข้าไปซ้ำมาหลายครั้ง เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอทั่วเนื้อยาง ซึ่งทำได้โดยใช้มีดตัดยาง (mill knife) ตัดยางที่พันอยู่บนลูกกลิ้ง ลูกหน้าไปตามยางประมาณ 3 ใน 4 ของความยาวลูกกลิ้ง ขณะเดียวกันก็ให้มีอีกข้างหนึ่งมีวนยางที่ถูกตัดเข้ามา โดยให้มีวนยางยังคงทาบอยู่บนผิวลูกกลิ้งจนกว่ากองยางที่ยังค้างอยู่บนช่องระหว่างลูกกลิ้งใหม่

โดยให้มีวันข้างยังคงทาบอยู่บนผิวลูกกลิ้งจนกว่ากองยางที่ยังค้างอยู่บนช่องระหว่างลูกกลิ้งใหม่ เมื่อยางพันรอบลูกกลิ้งอีกครั้งให้ตัดยางที่พันรอบลูกกลิ้งซ้ายขวาสลับกัน จนสารต่างๆ ผสมเป็นเนื้อเดียวกับยาง ขณะที่ยางถูกคนนั้น ยางจะแผ่กระจายบนผิวลูกกลิ้ง แต่จะแผ่ได้จำกัด เพราะมีแผ่นยึดอยู่บนหัวและท้ายของลูกกลิ้ง (guides) ซึ่งแผ่นทั้งสองสามารถปรับให้เลื่อนเข้าออกได้ตามแนวยาวของลูกกลิ้ง นอกจากสองแผ่นนี้จะช่วยในการควบคุมปริมาณยางขณะบดแล้ว ยังช่วยป้องกันไม่ให้ยางเปรอะเปื้อนกับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้กับเครื่องบดผสมบริเวณส่วนปลายของลูกกลิ้งอีกด้วย

การบดยางกับสารเคมีอย่างมีประสิทธิภาพนั้น ลูกกลิ้งลูกหน้าจะหมุนช้ากว่าลูกกลิ้งลูกหลัง แต่ถ้าต้องการรีดยางเป็นแผ่นเรียบลูกกลิ้งทั้งสองควรจะมีความเร็วเท่ากัน ความเร็วของลูกกลิ้งทั้งสองจะขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการบดผสม สำหรับการบดผสมยางธรรมชาติกับสารเคมีนั้น อัตราส่วนความเร็วของทั้งสองลูกกลิ้ง คือ 1: 1.25 (ลูกกลิ้งลูกหน้า : ลูกกลิ้งลูกหลัง)

เครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งเป็นเครื่องบดที่ทำให้เกิดความร้อนสูงขณะบดยาง ดังนั้นเพื่อป้องกันยางเกิดการคงรูปก่อนเวลาขณะบดจึงต้องมีระบบการหล่อเย็นภายในลูกกลิ้ง จะทำให้ลูกกลิ้งเย็นสำหรับลูกกลิ้งบดยางต้องมีผิวหน้าแข็ง ทนทานต่อการใช้งาน โดยเฉพาะทนทานต่อมีดที่กดลงบนผิวลูกกลิ้งขณะบด ดังนั้นลูกกลิ้งบดผสมยางจึงต้องทำจากเหล็กหล่ออย่างดี และผิวหน้าต้องเรียบ

2.4.2 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์

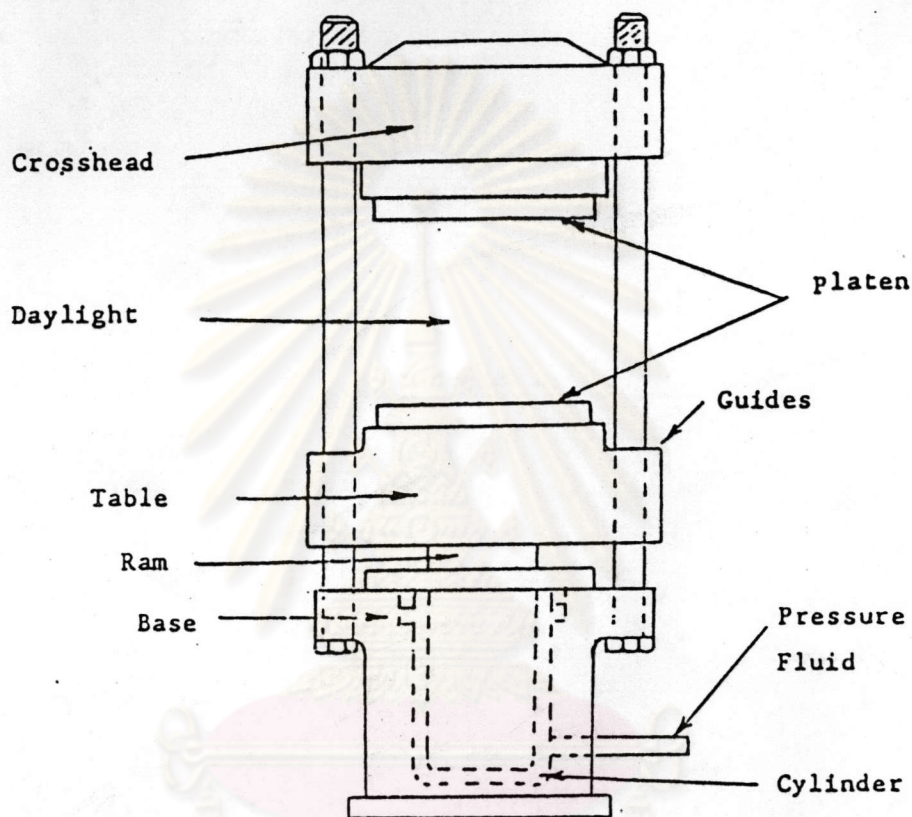
ผลิตภัณฑ์จะได้จากการอัดยางที่ผสมสารเคมีแล้วเข้าไปในแม่พิมพ์ เป็นการทำให้ยางเกิดรูปร่างและคงรูปในเวลาเดียวกัน โดยอาศัยความร้อนและแรงอัด

การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัดเป็นวิธีการผลิตแบบง่ายและธรรมดาที่สุด ใช้กันอย่างกว้างขวางในการแปรรูปยาง โดยนำยางที่ผสมกับสารเคมีแล้ว มาทำให้มีรูปร่างอย่างคร่าวๆ ก่อน แต่มีขนาดเล็กกว่าช่องแม่พิมพ์เล็กน้อย เพื่อยางจะได้แผ่กระจายเต็มช่องแม่พิมพ์ อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 100 - 170 องศาเซลเซียส ส่วนของยางที่เกินความจุของช่องแม่พิมพ์จะดันออกข้างๆ แม่พิมพ์ ไหลไปตามร่องเรียกยางที่ดันออกมานี้ว่า mold flash ซึ่งยางจะถูกให้ความร้อนในการคงรูปอยู่ในแม่พิมพ์ชั่วระยะเวลาหนึ่ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะคงรูปไม่หลอมละลายได้อีก แล้วจึงเปิดแม่พิมพ์ ลดความดันช้าๆ ชิ้นงานถูกนำออกจากแม่พิมพ์ทำให้เย็นลง เครื่องมือที่ใช้มีหลายขนาด ตั้งแต่ขนาดเล็กซึ่งทำงานโดยใช้มือกด จนถึงขนาดใหญ่ที่เป็นเครื่องกดอัดอัตโนมัติระบบไฮดรอลิก

2.4.3 การทำให้ยางคงรูป

เป็นกระบวนการทำให้ได้วัสดุที่มีความยืดหยุ่น อันเนื่องจากโครงสร้างของโมเลกุลเกิดการเชื่อมโยง หรือยึดกันด้วยพันธะทางเคมีระหว่างต่างโมเลกุล ยางที่คงรูปแล้วนี้ เมื่อถูกปล่อยให้เย็นอิสระจากแรงที่มากกระทำจะคืนตัวสู่สภาพเดิม ดังนั้นการทำให้ยางคงรูปจึงช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและลดการเสียรูปของยาง หรือเป็นการเพิ่มความพยายามที่จะรักษารูปร่างแรกเริ่มไว้ และลดความพยายามรักษารูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงกระทำ ซึ่งอาจเป็นรูปร่างที่เกิดจากการยืดออกหรือหดลงก็ได้

การทำให้ยางคงรูปโดยวิธีอัด เป็นวิธีที่ใช้กับผลิตภัณฑ์ยางประเภทต้องใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูป โดยวางแม่พิมพ์ที่บรรจุยางผสมสารเคมีแล้วลงบนแท่นของเครื่องอัดระบบไฮดรอลิก รูปที่ 2.16 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดยางแบบแท่นอัดยางเคลื่อนขึ้น (up-stroking press) ซึ่งแท่นอัดยางแท่นล่างเป็นส่วนที่เคลื่อนขึ้นด้วยแรงอัดไฮดรอลิก ช่องระหว่างแท่นอัดยาง เรียกว่า daylight



รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดไฮดรอลิก

เครื่องอัดยางมีได้หลายแท่นอัด ซึ่งจะเพิ่มจำนวนช่องว่าง (daylight) และทำให้อัดยางได้ครั้งละหลายๆ ชิ้น แท่นอัดยางถูกทำให้ร้อนด้วยไอน้ำหรือน้ำมันหรือไฟฟ้า ซึ่งอุณหภูมิที่ต้องการจะถูกควบคุมโดยระบบอัตโนมัติ

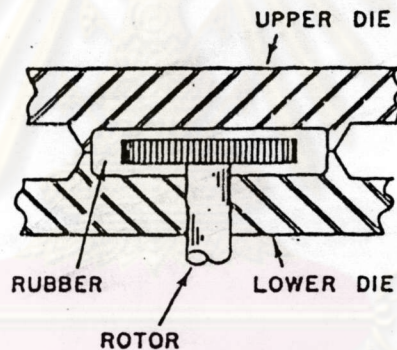
2.5 การทดสอบการแปรรูปและการคงรูป

2.5.1 Mooney viscometer

2.5.1.1 การวัดความหนืดของยาง

การวัดความหนืดของยางเป็นการวัดความหนืดของยางที่เพิ่มขึ้นในขณะที่เกิดการคงรูป โดยอาศัยหลักการให้แรงเฉือนหรือแรงบิด (torque) แก่สารประกอบยางด้วยโรเตอร์ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วคงที่ในสารประกอบยางประมาณ 2.00 ± 0.02 รอบต่อนาที

เครื่องมือประกอบด้วยโรเตอร์เป็นรูปทรงกลม ซึ่งที่ผิวของโรเตอร์นี้จะเจาะเป็นร่องเพื่อป้องกันการไหลเลื่อนของยาง โดยโรเตอร์นี้จะอยู่ภายในห้องใส่ยาง ซึ่งเป็นช่องว่างรูปทรงกระบอกคี่นๆ และโรเตอร์จะหมุนโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้า (รูปที่ 2.17) ส่วนชิ้นงานที่ทดสอบ ให้ตัดเป็นวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5.5 เซนติเมตร แล้วเจาะรูตรงกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร น้ำหนักประมาณ 20 กรัม ทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.17 โรเตอร์และช่องใส่ยางของเครื่อง Mooney viscometer

การทดสอบทำได้โดยการตัดยางเป็นสองแผ่นให้มีขนาดพอเหมาะที่จะใส่เข้าไปได้ในห้องใส่ยาง ยางจะถูกอัดเข้าไปในช่องว่างด้วยความดันที่เหมาะสม ภายใต้อุณหภูมิ 100 ± 0.5 องศาเซลเซียส โดยให้ยางแผ่นหนึ่งวางบนโรเตอร์ อีกแผ่นวางไว้ข้างใต้ เมื่อโรเตอร์หมุนจะเกิดแรงเฉือนระหว่างผิว ส่วนแรงบิดที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานต่อแรงเฉือนของยาง ซึ่งจะบอกถึงค่าความหนืดของยางในหน่วยของ MV (Mooney viscosity) โดยกำหนดให้แรงบิดขนาด 8.30 ± 0.02 นิวตัน-เมตร เทียบเท่ากับ 100 MV เมื่อใส่ชิ้นงานเข้าไปแล้วจะให้ความร้อนกับสารประกอบยางเป็นเวลา 1 นาที ก่อนที่มอเตอร์จะเริ่มทำงาน สำหรับยางธรรมชาตินั้น การอ่านค่า MV จะอ่านหลังจากโรเตอร์หมุนไปประมาณ 4 นาที

ผลของการวัดความหนืดรายงานดังนี้ : 50 ML 1 + 4(100°C) หมายความว่า ยางนี้มีความหนืด 50 MV วัดที่ 100 องศาเซลเซียสโดยอุ้งยางเป็นเวลา 1 นาที และคำนวณค่าความหนืด เมื่อมอเตอร์ทำงานไปแล้ว 4 นาที ส่วน L หมายถึง ขนาดของโรเตอร์ซึ่งเป็นงานโลหะขนาดใหญ่

2.5.1.2 การวัดค่าเวลาการคงรูปก่อนกำหนด

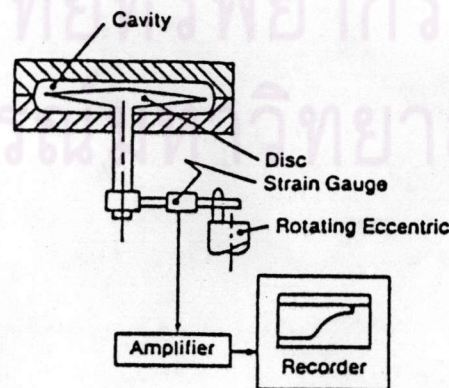
ในทางปฏิบัติ สารประกอบยางอาจเกิดการคงรูปก่อนกำหนดขึ้นระหว่างการผสมและการแปรรูป โดยเฉพาะสารประกอบของยางธรรมชาติ จึงต้องใส่สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปเป็นสารสุดท้ายในการผสมสารต่างๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการคงรูปก่อนกำหนด

นอกจากวัดค่าความหนืดของยางแล้วเครื่อง Mooney viscometer ยังสามารถวัดค่าเวลาที่ยางเริ่มคงรูปก่อนกำหนด (scorch time) ของยางผสมสารเคมีด้วย

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับยางที่ทำการผสมสารเคมีแล้ว สารเร่งปฏิกิริยาและสารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูป จะเริ่มทำปฏิกิริยา ซึ่งจะใช้เวลาหนึ่ง อาจจะช้าหรือเร็วขึ้นกับอุณหภูมิและชนิดของสารเคมีที่ใช้ ในขณะที่เดียวกันเมื่อยางได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจะมีการอ่อนตัวลงอีกเล็กน้อย เมื่อผ่านระยะเวลาเริ่มต้นนี้ไปแล้ว สารเคมีจะเริ่มทำปฏิกิริยากับยาง เกิดพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของยาง ทำให้ยางเริ่มแข็งขึ้น เวลาที่ยางเริ่มแข็งตัวจนเป็นได้ชนิดนี้เป็นเวลาที่ยางเริ่มคงรูปก่อนกำหนด ซึ่งยางจะไหลยากขึ้นเนื่องจากยางเริ่มคงรูป ซึ่งปฏิกิริยาก็ยังดำเนินต่อไป ยางจะแข็งขึ้นตามลำดับ จนปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ สำหรับการทดสอบสารประกอบยางจะใช้เครื่อง Mooney viscometer จะทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส

การทดสอบด้วยวิธีนี้ไม่สามารถกระทำต่อไปจนถึงขั้นที่ยางเกิดการคงรูปเต็มที่ เนื่องจากความหนืดที่สูงมากขึ้นจนทำให้โรเตอร์ไม่สามารถหมุนต่อไปได้ จึงต้องหาเวลาที่ใช้ทำให้ยางคงรูป โดยใช้เครื่อง curemeter ที่เรียกว่า "Monsanto Oscillating Disk Rheometer" (ODR)

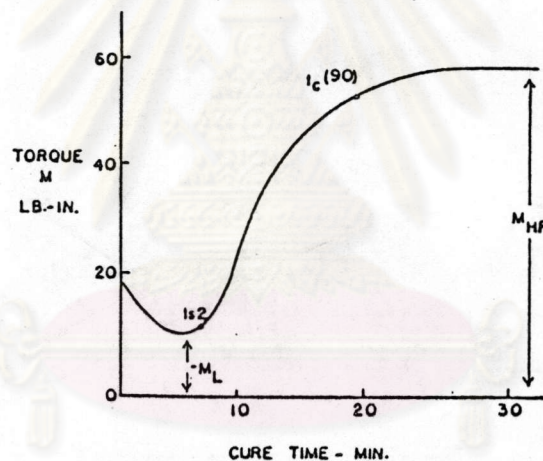
2.5.2 Monsanto Oscillating Disk Rheometer (ODR)



รูปที่ 2.18 Oscillating disk rheometer

ODR เป็นเครื่องมือสำหรับหาเวลาในการคงรูปของสารประกอบยาง ประกอบด้วยโรเตอร์ที่เคลื่อนไหวในลักษณะแกว่งกลับไปกลับมา (oscillating disk) ตามองศาที่กำหนด (1° 3° หรือ 5°) และใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 140 - 160 องศาเซลเซียส ซึ่งเครื่องนี้จะวัดแรงที่ต้องใช้ (torque) ในการแกว่งโรเตอร์ที่จมอยู่ในตัวอย่างยาง โดยยางถูกใส่ไว้ในช่องที่ถูกอัดด้วยแรงอัดสูง และมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตามต้องการ การแกว่งของโรเตอร์นี้ไม่เป็นการทำลายตัวอย่างยาง เหมือนเช่นการทดสอบยางด้วยเครื่อง Mooney viscometer

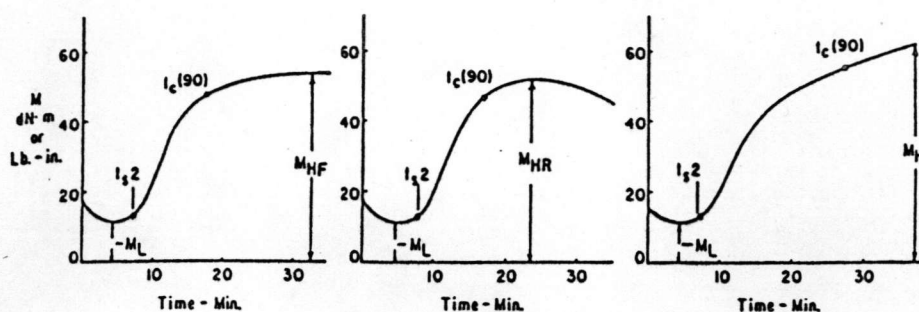
ขณะที่ปฏิบัติการคงรูปดำเนินไปนั้น แรงที่ต้องใช้เดือนยางจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น และผลที่ได้จะดูบันทึกกลงเป็นกราฟบนกระดาษ ตามระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้ยางคงรูป โดยรูปที่ 2.19 เป็นลักษณะกราฟที่ได้จากเครื่อง ODR และจากกราฟแสดงให้เห็นถึง แรงต่ำสุด (minimum torque, M_L) แรงสูงสุด (maximum torque, M_{HF}) เวลาในการคงรูปก่อนกำหนด (scorch time, t_s) และเวลาการคงรูป 90 % ($t_c(90)$)



รูปที่ 2.19 ลักษณะกราฟที่ได้จากเครื่อง ODR

ลักษณะของกราฟภายหลังการคงรูปเต็มที่แล้วมี 3 แบบ ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งขึ้นกับชนิดของสารประกอบยาง คือสารประกอบยางบางชนิดภายหลังยางคงรูปเต็มที่แล้ว จะมีลักษณะของ torque คงที่ หรือสมดุล (M_{HF}) สารประกอบยางธรรมชาติเมื่อผ่านการคงรูปเต็มที่แล้วจะมี torque ลดลงจากค่าสูงสุด (reversion) ซึ่งมีผลทำให้สมบัติของยางเสียไป ส่วนลักษณะการคงรูปอีกแบบหนึ่งเป็นแบบที่ torque เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (marching) คือ 'ไม่ถึงจุดสมดุลหรือไม่ถึงจุดสูงสุด'

วิธีทดสอบ คือ ตัดยางเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 1.5 เซนติเมตร โดยใช้ torque 25 อุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



(1) (2) (3)

รูปที่ 2.20 ลักษณะของกราฟการคงรูปแบบต่างๆ

- (1) ลักษณะการคงรูปคงที่
- (2) ลักษณะการคงรูปที่ลดลง
- (3) ลักษณะการคงรูปที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

2.6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป

2.6.1 ความต้านทานแรงดึง

ชิ้นงานที่จะนำมาหาค่าความต้านทานแรงดึงเป็นชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปให้เป็นแผ่น (sheet curve) มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำแผ่นยางที่ได้มาตัดด้วยเครื่องตัดตัวอย่างยางแบบใช้กำลังลม (compress air sample cutter) ให้เป็นรูปคิมเบลล์ (dumbbell) โดยจะตัดชิ้นงานทางด้านแนวเครื่อง คือ ตัดชิ้นงานให้ตั้งตามแนวที่ยางถูกบดออกมา

จากนั้นนำมาทดสอบหาสมบัติความต้านทานแรงดึง โดยใช้ load cell ขนาด 1000 นิวตัน โดยมีเลเซอร์เป็นอุปกรณ์วัดความยืดของยาง ชุดเครื่องตั้งต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อบันทึกผลการทดสอบ และสามารถพิมพ์ผลการทดสอบลงบนเครื่องพิมพ์ได้

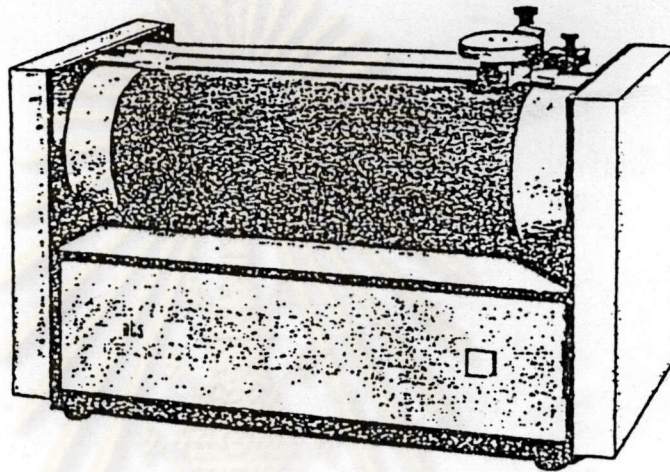
ก่อนทำการทดสอบชิ้นงานจะวัดความหนา โดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่สามารถวัดได้ละเอียด ± 0.005 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานมาบีบด้วยหัวจับ (grip) ซึ่งเป็นระบบสปริงยึดแน่นโดยอัตโนมัติ ทำให้เกิดแรงกดที่สม่ำเสมอตลอดชิ้นงานทั้งหัวและท้าย เมื่อเริ่มทดสอบหัวจับด้านบนจะเลื่อนขึ้น ขณะที่หัวจับด้านล่างอยู่กับที่ แรงที่ใช้ดึงชิ้นงานตลอดระยะเวลาบีบอัดจะถูกบันทึกไว้ จนยางถูกบีบจนขาด

2.6.2 ความต้านทานต่อการสึกหรอ

เป็นการทดสอบความทนทานต่อการขัดถูที่ผิวของยางและแผ่นขัดถู (abradant) ที่ทำด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) โดยใช้เครื่อง DIN abrader เป็นเครื่องวัดความต้านทานต่อการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร และความหนาประมาณ 6 มิลลิเมตร โดยที่แผ่นกระดาษ

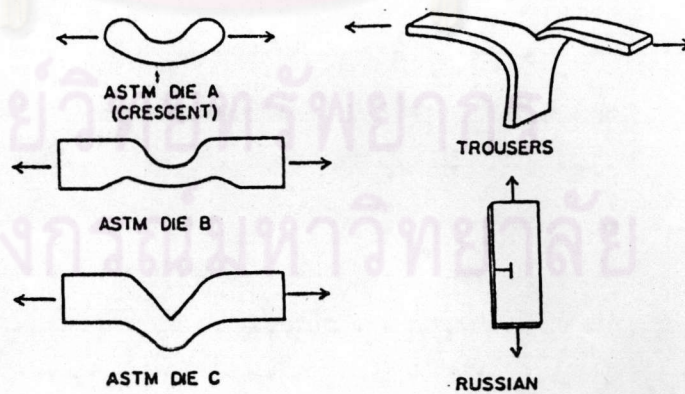
ขัดดู (abrasive paper) จะถูกพันรอบๆ ลูกกลิ้งยาว 40 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร หมุนด้วยอัตราเร็ว 40 รอบต่อนาที ชิ้นทดสอบจะถูกขัดดูภายใต้ความดัน 10 นิวตัน ดังรูปที่ 2.19 แล้ววัดปริมาณที่ลดลงเนื่องจากการขัดดู

ค่าความต้านทานต่อการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความแข็งเพิ่มขึ้น การใช้เข็ม่าค่าซึ่งเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงจะช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อการสึกหรอให้เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.21 เครื่อง DIN abrader ตาม DIN 53516

2.6.3 ความต้านทานต่อการฉีกขาด



รูปที่ 2.22 ชิ้นทดสอบหาความต้านทานต่อการฉีกขาดแบบต่างๆ

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีหลายรูปแบบ ดังรูปที่ 2.22 ส่วนแบบที่ใช้ในการทดลองนี้ คือแบบ ASTM die c เรียกว่า แบบ “angle”

ผลของการทดสอบจะขึ้นกับแบบของชิ้นทดสอบที่ใช้ อัตราเร็วของการตีให้ฉีกขาด และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ

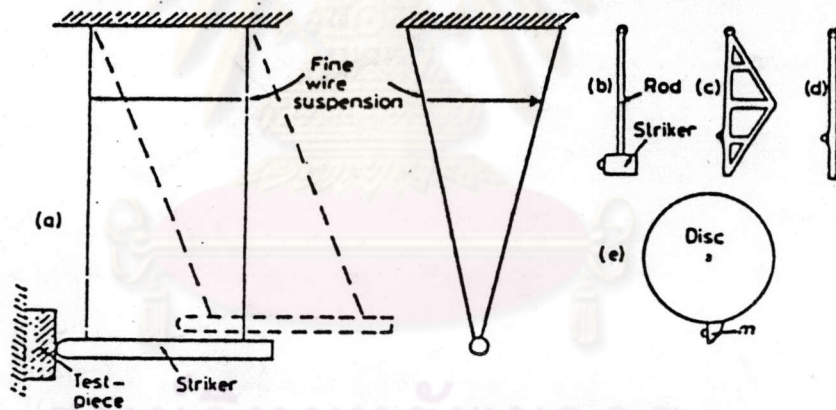
ยางที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูง โมดูลัสต่ำและมีความยาวที่บีบออกสูง มักมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงด้วย

2.6.4 ความแข็ง

การทดสอบความแข็งโดยใช้ Shore durometer มีหลายชนิดให้เลือกใช้ตามประเภทของวัสดุ เช่น shore A ใช้กับยางที่นิ่ม shore B ใช้กับยางที่แข็งและพลาสติก

ข้อควรระวังสำหรับการทดสอบความแข็ง คือ ความหนาของชิ้นงานต้องหนามากกว่า 6 มิลลิเมตร แต่ถ้าความหนาของชิ้นงานไม่ถึง 6 มิลลิเมตร ต้องนำชิ้นงานมาซ้อนกันให้ได้ความหนาตามที่ต้องการ ซึ่งอาจให้ผลที่คลาดเคลื่อนเนื่องจากผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานด้วยกัน

2.6.5 การกระดอน (Resilience)



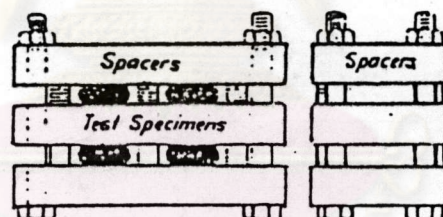
รูปที่ 2.23 เครื่องทดสอบการกระดอน

- (a) Lupke pendulum
- (b) Schob pendulum
- (c) Dunlop pendulum
- (d) Goodyear-Healey pendulum
- (e) Tripsometer

การทดสอบการกระดอนของยางนั้น ยางจะได้รับพลังงานจากการชนหรือกระแทกของวัตถุที่แกว่งเข้ามาชนในแนวโค้ง และชั้นทดสอบจะปล่อยพลังงานที่ได้รับ เพื่อคืนกลับรูปเดิมหลังจากที่เสียรูปไปเนื่องจากถูกชน ดังนั้นการกระดอน คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้คืนรูปต่อพลังงานที่ใช้ทำให้เสียรูป นิยมบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ สำหรับการกระดอนของยางธรรมชาติจะมีค่าประมาณ 60 - 80 % สำหรับเครื่องมือที่ใช้วัดการกระดอนมีหลายแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ส่วนแบบที่ใช้ในการทดลองคือแบบ (e) ตาม ISO 4662 โดยใช้เครื่อง Wallace Dunlop Tripsometer

2.6.6 การคืนตัว (compression set)

เป็นการวัดความสามารถของสารประกอบยางที่จะคงสมบัติความเป็นอีลาสติคภายใต้ความเค้นกด (compression stress) เป็นเวลานานๆ ภายใต้ความหนาที่ถูกกดไว้คงที่ ซึ่งจะกดชั้นทดสอบลง 25 % ของความหนาเดิม เครื่องทดสอบประกอบด้วยแผ่นเหล็ก 2 แผ่นหรือมากกว่า (รูปที่ 2.24) โดยชั้นทดสอบที่วัดความหนาเรียบร้อยแล้วจะถูกกดอยู่ระหว่างแผ่นเหล็ก 2 แผ่น จนได้ความหนาตามต้องการ ซึ่งจะมีท่อนเหล็กที่มีความหนาประมาณ 25 % ของความหนาเดิมเป็นตัวกำหนดความหนาของการกดภายใต้อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด เมื่อการทดสอบสิ้นสุดลงให้นำชั้นทดสอบออกมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 นาที หลังจากนั้นวัดความหนาของชั้นทดสอบอีกครั้งหนึ่ง แล้วนำไปคำนวณหาค่าการคืนตัวต่อไป



รูปที่ 2.24 เครื่องทดสอบการคืนตัวโดย method B

2.6.7 การบ่มเร่งด้วยความร้อน (Heat aging)

ยางส่วนใหญ่จะเสื่อมคุณภาพระหว่างการเก็บ หรือระหว่างการใช้งาน สาเหตุของการเสื่อมสภาพมีหลายแบบ ซึ่งการทดสอบโดยการบ่มเร่งสามารถทำนายอายุการใช้งานของยางได้ สิ่งที่ทำให้ยางเสื่อมสภาพ ได้แก่ ออกซิเจน โอโซน แสงแดด และของไหลต่างๆ เช่น น้ำมัน ตัวทำละลาย และน้ำ

การบ่มเร่งโดยใช้ความร้อนเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด คือ การเปรียบเทียบสมบัติค่าความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง การกระดอน และการคืนตัว ก่อนและหลังได้รับความร้อนจากอากาศภายในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 100 ± 1 °C เป็นเวลา 22 ± 2 ชั่วโมง ตัวกลางที่ให้ความร้อนภายในตู้อบจะเป็นอากาศร้อนซึ่งหมุนเวียนอยู่ภายใน ที่ความดันบรรยากาศ การให้ความร้อนต้องสม่ำเสมอทั่วถึง

โดยขึ้นทดสอบจะถูกแขวนในแนวตั้ง โดยไม่สัมผัสกับตุ้บหรือสัมผัสกันเองเลย ซึ่งการทดสอบนี้จะ
ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D573



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย