

บทที่ 2 วารสารปริทัศน์

2.1 น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex)

น้ำยางธรรมชาติเกิดจากการกรีดยางผ่านเปลือกของต้นยางด้วยมีดชนิดพิเศษ โดยเอียงทำมุมลงจากซ้ายไปขวาประมาณ 20-30 องศากับแนวนอน จะมีน้ำยางซึมออกมาเป็นของเหลวสีขาวขุ่นข้น (คล้ายน้ำนม) หรือสีครีมเล็กน้อย มีความหนาแน่นระหว่าง 0.975 ถึง 0.980 กรัม/มิลลิลิตร มี pH ตั้งแต่ 6.5 ถึง 7.0 ความหนืดและส่วนประกอบต่าง ๆ ของน้ำยางจะแปรเปลี่ยนได้ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น พันธุ์ยาง อายุของต้นยาง ฤดูกาลกรีดยาง และวิธีการกรีดยาง เป็นต้น เมื่อนำน้ำยางที่กรีดได้ไปตรวจสอบจะพบว่ามียูนิทขนาดเล็กต่าง ๆ กันแขวนลอย หรือกระจัดกระจาย (disperse) อยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว (dispersion medium) ยูนิทเหล่านี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 5 ไมครอน และมีประจุเป็นลบ ซึ่งผลกักันตลอดเวลาจึง ทำให้อูนิทเหล่านี้สามารถแขวนลอย และคงสภาพเป็นยางเหลวได้นานจนกว่าจะมีภาวะแวดล้อมและปัจจัยต่าง ๆ มารบกวนจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง สำหรับส่วนของของเหลวที่เป็นตัวกลางนั้น โดยทั่วไปเรียกว่า "เซรัม" (serum)

น้ำยางมีลักษณะเป็นสารละลายคอลลอยด์ (colloid) ชนิดไฮโดรโซล (hydrosol) ซึ่งเป็นสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย) แต่มีลักษณะพิเศษกว่าไฮโดรโซลทั่วไป คือ น้ำยางมีลักษณะกึ่งชอบน้ำ (hydrophilic) คือมีลักษณะเป็นสารที่ละลายได้ง่ายเมื่อน้ำเป็นตัวทำละลาย และลักษณะไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งก็คือลักษณะที่ไม่ยอมรวมกับน้ำ ดังนั้นสารเหล่านี้จึงเป็นสารที่ละลายได้ยากเมื่อน้ำเป็นตัวทำละลาย เพราะในยางธรรมชาตินั้นมีลักษณะไม่ชอบน้ำเด่นกว่าลักษณะที่ชอบน้ำ นอกจากนี้ น้ำยางยังประกอบด้วยส่วนที่ไม่ใช่ยาง ได้แก่ สารพวกโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต อนุมูลของโลหะ ซึ่งส่วนประกอบของน้ำยางโดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ ดังนี้

- | | |
|------------------------------------------|------|
| 1. ส่วนที่เป็นเนื้อยาง | 35 % |
| 2. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง | 65 % |
| ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ | |
| 2.1 ส่วนที่เป็นน้ำ | 55 % |
| 2.2 ส่วนของลูทอยด์ (lutoid) และสารอื่น ๆ | 10 % |

ปริมาณเนื้อยางในน้ำยางธรรมชาติอาจแปรเปลี่ยนอยู่ในช่วง 25-45 % ขึ้นกับชนิดของพันธุ์ยาง อายุต้นยาง และฤดูกาล ส่วนสารพวกโปรตีน ประมาณครึ่งหนึ่งละลายอยู่ในส่วนที่เป็นน้ำ อีกหนึ่งในสี่ที่ถูกดูดซับอยู่รอบ ๆ ผิวอนุภาคอย่าง และที่เหลืออยู่ปะปนในส่วนของลูทอยด์

เนื้อยางเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบกันเป็นหน่วยไอโซพรีน (isoprene) เชื่อมต่อกัน (โมเลกุลยางประกอบด้วยไอโซพรีน 2000-5000 หน่วย) แขนงลอยอยู่ในเซรัม ได้น้ำยางที่มีความหนาแน่นประมาณ 0.92 กรัม/มิลลิลิตร อนุภาคยางมีรูปร่างทั้งทรงกลมและทรงรีคล้ายลูกแพร์ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.02-0.03 ไมครอน โมเลกุลมีขนาดใหญ่ไม่ละลายน้ำ และเมื่ออยู่ในสภาพน้ำยางสด ผิวรอบอนุภาคจะถูกห่อหุ้มด้วยชั้นของสารพวกไขมัน และโปรตีน

นอกจากนี้ ยังมีโลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียม โพแทสเซียม และ ทองแดง ปนอยู่ในส่วนของยางประมาณ 0.05 %

ส่วนที่ไม่ใช่ยาง

ส่วนที่เป็นน้ำ (aqueous phase) หรือที่เรียกว่า “เซรัมของน้ำยาง” มีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัม/มิลลิลิตร ประกอบด้วยสารต่าง ๆ ดังนี้

คาร์โบไฮเดรต เป็นสารพวกแป้งและน้ำตาล สารเหล่านี้จะถูกแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นกรดไขมัน เช่น กรดฟอร์มิก กรดแอซติก และกรดไพโรพิออนิก ทำให้น้ำยางเสียความคงตัวและจับตัวกันเป็นก้อน

โปรตีนและพวกกรดอะมิโน ที่สำคัญได้แก่ แอลฟาไกลูโคบิน และฮิวิน ซึ่งแอลฟาไกลูโคบินจะเป็นส่วนที่พบมากในน้ำยางสด มีสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในสารละลายของเกลือ ของกรด และของด่าง สำหรับฮิวินจะมีน้ำหนักโมเลกุลเพียงประมาณ 10,000 และสามารถละลายน้ำได้

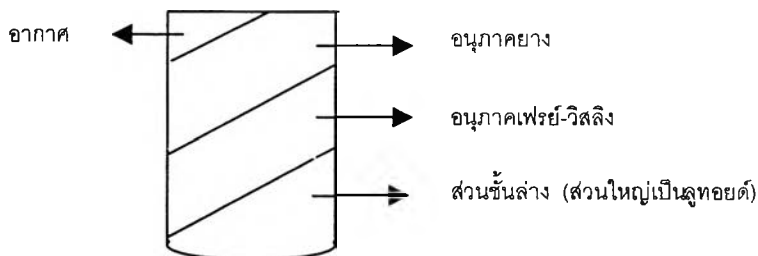
ส่วนของลูทอยด์ และสารอื่น ๆ (lutoid and other particulate phases) ลูทอยด์หรือที่เรียกว่า “วิสคอยด์” (viscoid) เป็นส่วนประกอบในน้ำยางสดซึ่งได้มีการรายงานเป็นครั้งแรกโดย โฮแมนและแวนกิลส์ (Homan and Van Gils) ในปี ค.ศ. 1948 โดยได้ทำการหมุนเหวี่ยง (centrifuge) น้ำยางสดและพบว่าน้ำยางแยกออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งมีสีขาวประกอบด้วยอนุภาคของยางเป็นส่วนมาก อีกส่วนมีสีเหลืองแยกอยู่ ชั้นล่าง ซึ่งมีประมาณ 20-30 % ของปริมาณทั้งหมด จากการศึกษาพบว่า ส่วนชั้นล่างเป็นอนุภาคที่ไม่เกาะกันแน่นมีความแตกต่างจากอนุภาคของยาง ซึ่งเรียกว่า “ลูทอยด์” เพราะเข้าใจว่าเป็นตัวทำให้เกิดสีเหลือง (มาจาก luteous ที่แปลว่าสีเหลืองเข้ม) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-5 ไมครอน (ใหญ่กว่าอนุภาคของยาง) ปริมาณลูทอยด์ในน้ำยางมีผลต่อความหนืดและเสถียรภาพของน้ำยางสด ลูทอยด์มีสมบัติการเกิดปฏิกิริยาออสไมติก

ได้ง่าย ดังนั้นการเติมน้ำลงในน้ำยางมีผลทำให้ลูทอยด์เกิดการบวมตัวและแตกออก ซึ่งเป็นผลให้ของเหลวภายในลูทอยด์ออกมาอยู่ในส่วนของเซอรุ่ม ทำให้น้ำยางมีความหนืดเพิ่มขึ้น

ในกระบวนการทำยางแท่งและยางแผ่นรมควันจะมีขั้นตอนที่ต้องเติมน้ำลงไปเพื่อทำให้น้ำยางเจือจางก่อนที่จะใส่กรดเข้าไปทำใหยางจับตัวกันเป็นก้อน ดังนั้นจะมีส่วนของลูทอยด์เข้าไปในก้อนยางที่มีการจับตัวด้วยซึ่งมีผลต่อสมบัติของยาง เนื่องจากลูทอยด์มีสารโลหะละลายอยู่ในของเหลว

นอกจากนี้ในการกรีดยาง ถ้าลูทอยด์เกิดแตกออกจะมีผลให้ยางจับตัวอุดท่อน้ำยางทำใหยางหยุดไหลได้เช่นกัน ผลของลูทอยด์อีกประการหนึ่ง คือ เมื่อทำการแปรรูปน้ำยางสดให้เป็นน้ำยางข้นด้วยการหมუნเหวียงนั้น จะต้องเติมแอมโมเนียเพื่อรักษาสภาพน้ำยาง แอมโมเนียที่เติมลงไปจะรวมตัวกับลูทอยด์ และแมกนีเซียมฟอสเฟต ตกตะกอนเป็นตะกอนน้ำตาลและสีขาวแยกออกจากเนื้อยาง และเกาะรวมกันอยู่ด้านล่างสุดของเครื่องหมუნเหวียง ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องหมუნเหวียงลดลง ต้องถอดล้างเอาตะกอนเหล่านี้ออก นอกจากจะมีสารพวกลูทอยด์แล้วยังมีสารอีกประเภทหนึ่ง เรียกว่า “อนุภาคเฟรย์-วิสลิง” (Frey wysling) ซึ่งมีลักษณะกลม สีเหลืองเข้ม และมีอนุภาคใหญ่กว่าอนุภาคของยาง มีความหนาแน่นมากกว่าเล็กน้อย มีสารคาร์โรทีนอยด์ (carotinoid) ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดสีเหลืองเข้มมากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณของสารคาร์โรทีนอยด์นี้ การที่ชั้นล่างของน้ำยางมีสีเหลืองนั้น จะเนื่องจากอนุภาคเฟรย์-วิสลิงมากกว่าลูทอยด์ น้ำยางชั้นที่ผ่านการหมუნเหวียงโดยการเติมแอมโมเนียจะไม่พบอนุภาคเฟรย์-วิสลิงอยู่ด้วย อาจเป็นเพราะอนุภาคเหล่านี้ถูกแยกออกจากยาง และละลายอยู่ในส่วนของเซอรุ่ม

การหมუნเหวียงน้ำยางสดด้วยความเร็วสูง เช่น การหมუნเหวียงด้วยเครื่องอัลตราเซนตริฟิวจ์ (ultracentrifuge) จะแยกน้ำยางออกเป็น 4 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ชั้นของน้ำยางเมื่อถูกหมუნเหวียงด้วยเครื่องอัลตราเซนตริฟิวจ์

การออกสูตรและเตรียมน้ำยางผสมสารเคมี

การออกสูตรผลิตถุงมืออย่างจำเป็นต้องมีข้อพิจารณาต่าง ๆ เพื่อความสอดคล้องเกี่ยวกับชนิดของถุงมือ ข้อกำหนดสมบัติต่าง ๆ หรือคุณภาพของถุงมือ อายุการใช้งาน ความต้องการของผู้บริโภค ตลอดจนความสามารถและการทำงานของเครื่องจักรของโรงงาน อย่างไรก็ตามสารเคมีที่จำเป็นต้องใช้ในการผลิตถุงมือนั้นมีเพียงไม่กี่ชนิด ความเข้าใจหน้าที่และความสำคัญของสารต่าง ๆ จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

น้ำยางข้น (concentrated latex) ในการผลิตถุงมืออย่างโดยทั่วไปจะใช้น้ำยางธรรมชาติ ยกเว้นการผลิตถุงมือชนิดที่ต้องการความทนทานต่อสารประเภท น้ำมัน ไขมัน หรือไอโซน จะใช้น้ำยางสังเคราะห์ พอลิคลอโรพรีน (polychloroprene latex)

น้ำยางข้น (concentrated latex) หมายถึงน้ำยางที่ผ่านการไล่น้ำออกไปบางส่วนเพื่อให้มีเนื้อยางแห้งเพิ่มเป็น 60 % ของน้ำหนักยางทั้งหมด (เดิมมีเนื้อยางแห้ง 30-40 %) ปัจจุบันความต้องการน้ำยางข้นเพิ่มมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ซึ่งใช้น้ำยางข้นเป็นวัตถุดิบ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์แบบจุ่ม (dipping) แบบหล่อ (casting) แบบพ่น (spraying) แบบใช้แม่แบบ (molding) และแบบทา (spreading) เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำยางข้น ได้แก่ ตึกตาที่กลวง กาว สีทา ถุงมือ ลูกโป่ง ยางฟองน้ำ (latex foam rubber) และที่นอน เป็นต้น

2.2 การผลิตน้ำยางข้น

น้ำยางสดจากสวน ยังไม่เหมาะจะนำไปใช้งานในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีปริมาณเนื้อยางต่ำ ดังนั้น จึงมีวิธีผลิตน้ำยางข้นเพื่อแยกส่วนที่ไม่ใช่ยางออกไป ทำให้ปริมาณเนื้อยางสูงขึ้น และง่ายต่อการเก็บรักษา

การผลิตน้ำยางข้นในการการค้าแบ่งออกเป็น 4 วิธี คือ

- วิธีทำให้เกิดครีม (creaming)
- วิธีใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuging machine)
- วิธีทำให้น้ำระเหย (evaporation)
- วิธีการแยกด้วยไฟฟ้า (electrodecantation)

วิธีทำให้เกิดครีม

วิธีนี้เป็นวิธีเก่าแก่ที่สุดในการผลิตน้ำยางข้น โดยเติมสารที่ทำให้เกิดครีม (creaming agent) หรือทำให้ส่วนที่เป็นยางลอยตัวแยกออกจากน้ำลงในน้ำยางสด (ที่ผสมแอมโมเนียเหลวหรือสารประกอบแอมโมเนียเพื่อป้องกันไม่ให้ยางจับตัวเป็นก้อน) สารพวกนี้ได้แก่ โซเดียม หรือ

แอมโมเนียอัลจิเนต (sodium or ammonium alginate) แล้วควนให้เข้ากับยาง ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 10-12 วัน ส่วนที่เป็นยางจะลอยขึ้นมารวมกันอยู่ทางตอนบนของส่วนที่เป็นน้ำ ดังนั้น น้ำยางจะแยกเป็น 2 ชั้น ชั้นล่างเป็นน้ำซึ่งมีส่วนที่เป็นยางเพียงเล็กน้อย ชั้นบนเป็นครีมซึ่งมีเนื้อยางสูง ประกอบด้วยปริมาณของแข็ง (% total solid content ; %TSC) ประมาณ 61.5 % และมีเนื้อยางประมาณ 60 % น้ำที่อยู่ตอนล่างสามารถระบายออกโดยเหลือน้ำยางตอนบนไว้ หลังจากนั้นให้เติมแอมโมเนียเหลวหรือสารประกอบแอมโมเนียลงไปอีกครั้งเพื่อรักษาสภาพน้ำยางชั้น วิธีนี้ไม่นิยมทำกันเพราะยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลา

วิธีใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมมากในปัจจุบัน น้ำยางชั้นที่ได้สามารถนำไปทำผลิตภัณฑ์ยางสำเร็จรูปได้แทบทุกชนิด เครื่องหมุนเหวี่ยงที่ใช้เรียกว่า "latex separator" หรือ "latex concentrator" เป็นการหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกยางซึ่งเบากว่า (ความถ่วงจำเพาะ 0.92) ออกจากของเหลวที่หนักกว่า (ความถ่วงจำเพาะ 1.02) โดยน้ำยางสดซึ่งใส่แอมโมเนียมาแล้ว จะไหลผ่านท่อเข้าไปในถ้วยปั่นแยก และถูกเหวี่ยงโดยการหมุนด้วยความเร็ว 7,000-8,000 รอบ/นาที ยางจะถูกเหวี่ยงขึ้นด้านบนและไหลออกตามช่องทางท่อตอนบนของเครื่อง ส่วนนี้เรียกว่า "น้ำยางชั้น" ส่วนของเหลวที่เหลือรวมทั้งของแข็งที่ไม่ใช่ยาง จะถูกแยกออกทางช่องซึ่งอยู่ด้านล่าง ของเหลวที่ผ่านช่องนี้เรียกว่า "หางน้ำยาง" (skim latex) โดยวิธีนี้ น้ำยางจะถูกแยกเป็น 2 ทาง ทางหนึ่งเป็นน้ำยางชั้นที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณ 61.5 % และเนื้อยางแห้ง 60 % อีกทางหนึ่งเป็นน้ำที่มียางแห้งปนอยู่ราว 3-5 % ส่วนประกอบของเครื่องหมุนเหวี่ยงจะสัมผัสกับน้ำยางโดยตรง จึงต้องมีความต้านทานการกัดกร่อนของแอมโมเนีย ควรทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) ไม่ควรใช้โลหะทองแดง ทองเหลือง ทองสัมฤทธิ์ และแมงกานีส เพราะมีผลทำให้น้ำยางเสื่อมคุณภาพเร็วขึ้น

วิธีทำให้น้ำระเหย

น้ำยางที่ได้จากวิธีนี้ มีสมบัติแตกต่างจากน้ำยางที่ได้จากวิธีใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง วิธีทำเป็นเพียงการระเหยเอาน้ำออกจากน้ำยางสดเพียงอย่างเดียวเท่านั้น จึงต้องเติมสารที่ทำให้ยางคงตัวและไม่ระเหิดลงไป ได้แก่ กลู (glue) ไปแตสเซียมหรือสบู่ และป้องกันมิให้น้ำยางที่ผิวหน้าหรือบริเวณที่มีการระเหยน้ำออกเกิดการจับตัว การผลิตทำโดยการกรองน้ำยางตามปกติ พร้อมทั้งเติมสารที่ทำให้คงตัวลงไป เช่น สบู่ไปแตสเซียมจากน้ำมันมะพร้าว (potassium coconut oil soap) ปริมาณ 2% หลังจากนั้น ทำให้น้ำระเหยด้วยความร้อน โดยผ่านน้ำร้อนเข้าไปในถัง 2 ชั้นที่มีน้ำยางอยู่ภายใน ขณะที่ถึงบรรจุน้ำยางหมุนไปรอบ ๆ นั้น อากาศภายในถังจะถูกดูดออกไป พร้อมกับพา

น้ำที่ระเหยจากน้ำยางออกไปให้เร็วที่สุด วิธีนี้ได้น้ำยางชั้นที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 70-75 % น้ำยางชั้นที่ได้มีความคงตัวสูง สามารถนำไปใช้ประโยชน์โดยการผสมกับสารที่มีความหนืดสูง เช่น การทำกาว ซีเมนต์ราดถนน เป็นต้น

วิธีการแยกด้วยไฟฟ้า

เนื่องจากน้ำยางสดเป็นของเหลวประเภทคอลลอยด์ ประกอบด้วยสารแขวนลอยหรืออิมัลชันของอนุภาคยางลอยตัวอยู่ในของเหลวที่เป็นตัวกลาง การเคลื่อนไหวของอนุภาคเหล่านี้จะเกิดอย่างต่อเนื่องตามประจุไฟฟ้าที่มีอยู่อนุภาคของยางมีประจุลบ จึงวิ่งเข้าหาขั้วบวกตลอดเวลา

วิธีการแยกน้ำยางด้วยไฟฟ้านี้ ทำโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในน้ำยาง ทำให้เกิดความต่างศักย์ภายในเซลล์อนุภาคของยางจะเคลื่อนเข้าหาจากที่เป็นขั้วบวกที่อยู่ใกล้ที่สุด ทำให้อนุภาคยางอยู่รวมตัวกันหนาแน่นจนเกิดเป็นน้ำยางชั้นขึ้น อนุภาคยางจะลอยตัวอยู่ข้างบน ซึ่งทำให้สามารถช้อนเอาน้ำยางชั้นส่วนนี้ออกจากถังได้ วิธีนี้จะได้น้ำยางชั้นที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 62-63 % และเนื้อยางแห้ง 60 % หลังจากนั้นทำการเก็บรักษาโดยเติมแอมโมเนีย 0.7 % ของน้ำหนักยางลงไป

น้ำยางชั้นที่ใช้แอมโมเนียเพียงอย่างเดียวเพื่อรักษาสภาพน้ำยาง จะต้องใช้แอมโมเนียสูงถึง 0.7 % น้ำยางชนิดนี้เรียกว่า "HA latex" (high ammonia latex) ส่วนน้ำยางที่ใช้แอมโมเนียเล็กน้อยประมาณ 0.2 % ร่วมกับสารอื่น เช่น ZnO/TMTD 0.02 % หรือกรดบอริก 0.2 % หรือแซนโตไบรต์ (santobrite) 0.2 % เรียกว่า "LA latex (low ammonia latex)"

ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากน้ำยางชั้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถทำให้น้ำระเหยออกไปได้ง่าย ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่บางและมีรูพรุน เช่น ลูกโป่ง ถุงมือ ยางยืด จุกนม ตึกตา ที่นอนฟองน้ำ ฟองน้ำรองใต้พรม เป็นต้น

ความนิยมใช้น้ำยางชั้น 60 % DRC (dry rubber content) ที่ผลิตโดยวิธีการหมუნเหวี่ยงมีมากกว่าน้ำยางชั้นที่ผลิตโดยวิธีทำคริมหรือโดยวิธีระเหยน้ำ เพราะน้ำยางชั้น 2 ชนิดหลังหาซื้อได้ยาก มีราคาแพงและไม่มีซื้อได้เปรียบไปกว่าน้ำยางชั้นจากการหมუნเหวี่ยง น้ำยางชั้นที่ใช้ผลิตถุงมือสามารถผลิตได้ทั้งจากน้ำยางชั้นปกติที่ยังไม่ได้ทำให้คงรูป (unvulcanised latex) และจากน้ำยางที่ทำให้คงรูปแล้ว (pre-vulcanised latex) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะตลอดจนสมบัติของถุงมือที่จะผลิตซื้อได้เปรียบของการเลือกใช้น้ำยางคงรูปคือมีความสะดวกและไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีอื่น ๆ อีก ยกเว้นสารป้องกันยางเสื่อม อย่างไรก็ตามฟิล์มยางที่ได้จากน้ำยางคงรูปจะมีความทนแรงดึง (tensile strength) การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) ต่ำกว่าฟิล์มยางที่ทำให้คงรูปภายหลังที่เป็นฟิล์มแล้ว (post-vulcanised film)

ทั้งนี้เนื่องมาจากขาดการเชื่อมขวางอย่างสมบูรณ์ระหว่างตัวอนุภาคยางในน้ำยาง ควบรูปเพราะโมเลกุลยางในแต่ละอนุภาคได้เกิดพันธะทางเคมีกันก่อนแล้ว ดังนั้นในการที่จะเลือกใช้น้ำยางควบรูปเพื่อการผลิตควรพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างต้นทุนความสะดวกและสมบัติบางประการของยางที่ด้อยลงไป แต่มีวิธีการที่มักปฏิบัติกันวิธีหนึ่งคือทำให้น้ำยางที่ผสมสารเคมีไว้แล้วควบรูปในระดับหนึ่งและทำให้ฟิล์มยางควบรูปอย่างสมบูรณ์ในภายหลังที่เป็นฟิล์มแล้ว ซึ่งวิธีการตรวจสอบระดับหรือองศาของการควบรูปของน้ำยางมีหลายวิธี วิธีที่ง่ายและรวดเร็วให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์พอสมควรคือการทดสอบโดยใช้คลอโรฟอร์มเล็กน้อยผสมกวนกับน้ำยางในปริมาณเท่า ๆ กัน ถ้าน้ำยางเกิดการจับเป็นก้อนนิ่ม ๆ ยืดได้แสดงว่าน้ำยางยังไม่ควบรูป ถ้าเกิดยางจับตัวร่วนหรือเป็นเม็ดเล็ก ๆ แสดงว่าน้ำยางเกิดการควบรูปอย่างสมบูรณ์และถ้าได้ยางที่มีลักษณะก้ำกึ่งระหว่าง 2 ลักษณะดังกล่าวแสดงว่าน้ำยางเกิดการควบรูปบ้างแต่ยังไม่สมบูรณ์ หากจะทำถุงมือ ที่มีความบางมากก็ไม่ควรให้น้ำยางเกิดการควบรูปก่อน และถ้าผลิตถุงมือชนิดหนามาก ๆ ในการใช้งานหนักก็อาจใช้น้ำยางที่ได้เกิดการควบรูปอย่างสมบูรณ์แล้ว

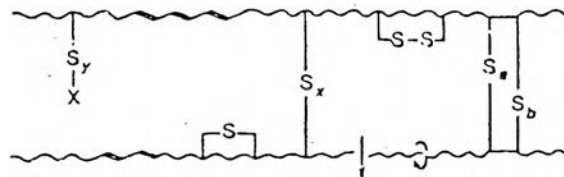
หนึ่งไม่ควรใช้น้ำยางที่ผสมระหว่างน้ำยางควบรูปแล้วกับน้ำยางที่ยังไม่ควบรูปเพราะทำให้ความแข็งแรงของยางเปียก (wet-gel strength) ต่ำ ขณะอบแห้งจะเกิดรอยแตกกระแหง และยางที่จับพิมพ์ส่วนล่างอาจแยกจากส่วนบนขณะยกพิมพ์ออกจากน้ำยาง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากความสามารถในการเกาะยึดระหว่างอนุภาคยางที่ควบรูปแล้วกับอนุภาคยางที่ยังไม่ควบรูปมีจำกัด

ชนิดของน้ำยางชั้นที่ใช้ผลิตถุงมือมี 2 ชนิดคือชนิดที่มีแอมโมเนียมาก (HA, high ammonia) และชนิดที่มีแอมโมเนียน้อย (LA, low ammonia) ร่วมกับสารช่วย สำหรับชนิดแรกก่อนนำมาผลิตถุงมือต้องใส่แอมโมเนียให้เหลือประมาณ 0.2 % (โดยน้ำหนักของยาง) ส่วนน้ำยางชนิดที่มีแอมโมเนียน้อยอาจไม่จำเป็นต้องลดปริมาณแอมโมเนียลงมาน้ำยางชนิดที่มีแอมโมเนียน้อย นิยมใช้คือชนิด LA-TZ (low ammonia-tetramethyl thiuram disulphide/zinc oxide)

การวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ

กระบวนการวัลคาไนเซชัน เป็นกระบวนการเปลี่ยนยางซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่คงตัวให้เป็นยางที่คงตัว สามารถรักษารูปทรงได้ในลักษณะยืดหยุ่น หรือแข็งกระด้างโดยการใส่ "สารวัลคาไนซ์" (vulcanizing agent) ซึ่งอาจจะเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยง (crosslink) ระหว่างโมเลกุลของยาง ตรงตำแหน่งซึ่งวงวอต่อปฏิกิริยา สารวัลคาไนซ์ที่สำคัญของยางธรรมชาติคือ กำมะถัน (ยางสังเคราะห์อาจใช้กำมะถัน หรือสารอื่น ๆ ตามแต่ชนิดของยางนั้น ๆ)

การเชื่อมโยงโมเลกุลของยางด้วยพันธะเคมีระหว่าง C และ S สามารถเกิดได้หลายรูปแบบ ดังแสดงในรูป 2.2



รูป 2.2 การเชื่อมโยงโมเลกุลของยางด้วยกำมะถัน (x, y, a และ $b=1.9$)

X = accelerator fragment; ลูกศรโค้งหมายถึง cis, trans isomerized double bond และลูกศรชี้ลงหมายถึง main chain scission

กระบวนการวัลคาไนเซชันที่ใช้กำมะถันและความร้อนเท่านั้น ปฏิกริยาเกิดช้ามาก ต้องใช้เวลาหลายชั่วโมง ยิ่งไปกว่านั้นยังต้องใช้กำมะถันเป็นจำนวนสายยาวเกินความจำเป็น ซึ่งส่วนใหญ่จะสูญเปล่าไปโดยมีกำมะถันมาเชื่อมต่อกันเองเป็นสายยาว (ทำให้ x, y, a และ b ในรูป 2.2 มีค่ามากเกินไป) หรือมีอะตอมจะออกมาในรูปของกำมะถันเสรีอยู่ในเนื้อยาง หรือซึมออกมาอยู่ที่ผิวของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ จึงต้องใช้ “สารเร่งวัลคาไนซ์” (accelerator) ร่วมกับสารวัลคาไนซ์ เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ (อัตราเร็วของปฏิกริยาเพิ่มขึ้น) นอกจากนี้อุณหภูมิที่ใช้จะลดลงรวมทั้งจะใช้กำมะถันปริมาณน้อยลงด้วย เป็นเหตุให้การซึมของกำมะถันที่ผิวของผลิตภัณฑ์ลดลง นอกจากนี้ยังต้องมีการเติม “สารกระตุ้นวัลคาไนซ์” (activator) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งวัลคาไนซ์อีกด้วย

การเชื่อมโยงโมเลกุลทำให้โมเลกุลทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้ภายหลังจากวัลคาไนซ์จะมีสมบัติเปลี่ยนไป เช่น จะไม่เกิดการหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน และไม่แข็งตัวเมื่อได้รับความเย็น ความสามารถในการละลายจะลดลงอาจมีเพียงการบวมตัวขึ้นเท่านั้น ความทนแรงดึง (tensile strength) ความแข็ง (hardness) ความต้านทานการขัดถู (abrasion resistance) ความต้านทานการสึกกร่อน (wear resistance) และการหักงอของยางที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature flexibility) จะเพิ่มขึ้น แก๊สซึมผ่านยางได้น้อยลง และช่วงอุณหภูมิการใช้งานกว้างขึ้น ถึงแม้การวัลคาไนซ์จะมีหลายวิธี แต่กระบวนการเติมของก๊วยเตียร์ก็ยังคงเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด ในอุตสาหกรรม

2.3 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

ในน้ำยางมีเนื้อยางแห้ง 20-45 % โดยน้ำหนัก คือ เนื้อยางแห้งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งคิดเป็น 92 % อีกประมาณ 8 % เป็นสารอื่นที่ไม่ใช่ยาง (non-rubber constituents) ปนอยู่ได้แก่ โปรตีน (protein) กลูโคไซด์ (glucosides) ลิพิด (lipids) เกลือแร่ (mineral salts) และเอนไซม์ (enzymes) สารที่ไม่ใช่ยางเหล่านี้แม้มีเพียงเล็กน้อย แต่มีผลต่อการวัลคาไนซ์ และต่อสมบัติของยางเป็นอย่างมาก

เนื่องจากยางเป็นสารประกอบที่ไม่อิมิตัวมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาอยู่ด้วยซึ่งมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ข้อดีคือ สามารถทำปฏิกิริยากับกำมะถันในกระบวนการวัลคาไนซ์เซชันได้ ข้อเสียคือสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนและโอโซนโดยมีโลหะ (เช่น Mn, Fe, Cu และ Co เป็นต้น) ความร้อน แสง และความเครียดที่มีในเนื้อยาง (เช่นการหักงอของยางไปมา) เป็นตัวเร่งให้ยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้นเมื่อตั้งทิ้งไว้หรือขณะใช้งาน ดังนั้น จึงต้องใช้ “สารต้านการเกิดออกซิเดชัน” (anti-oxidant) และ “สารต้านโอโซน” (antiozonant) ผสมเข้าไปในยางเพื่อยืดอายุการใช้งานหรือการเก็บรักษา

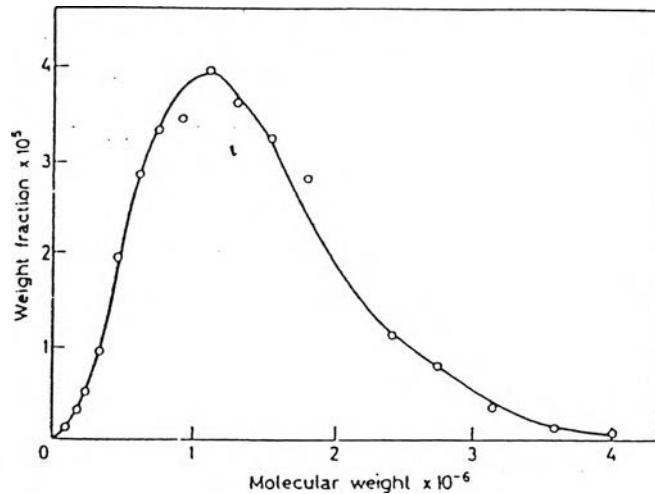
สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติจากแหล่งต่างๆมีความแตกต่างกันบ้าง เนื่องจากมีความแตกต่างของปริมาณสารที่ไม่ใช่ยางปะปนอยู่ และจากระดับของการเกิดผลึก (degree of crystallinity) เช่นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส ยางธรรมชาติสามารถเกิดผลึกมีผลทำให้ความหนาแน่นเปลี่ยนจาก 0.92 เป็นประมาณ 0.95 ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติทางกายภาพโดยเฉลี่ยของยางธรรมชาติ

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ

Density	0.92
Refractive index (20 องศา)	1.52
Coefficient of cubical expansion	0.00062 / องศา C
Cohesive energy density	63.7 cal. / cc.
Heat of combustion	10700 cal. / g
Thermal conductivity	0.00032 cal. / sec / cm ² / องศา C
Dielectric constant	2.37
Power factor (1000 cycle)	0.15-0.20
Volume resistivity	10 ¹⁵ ohm / cc.
Dielectric strength	1000 volts / mi!

ตัวทำละลายสำหรับยางธรรมชาติได้แก่ สารไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว สารไฮโดรคาร์บอนที่มีคลอรีน (chlorinated hydrocarbon) อีเทอร์ (ethers) คาร์บอนไดซัลไฟด์ (carbon disulfide) ยางธรรมชาติไม่ละลายในสารต่อไปนี้คือ สารคีโตนโมเลกุลต่ำ (lower ketone) แอลกอฮอล์ (alcohol) และสารเอสเตอร์โมเลกุลต่ำ (lower ester)

ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ไม่สามารถวัดน้ำหนักโมเลกุลด้วยวิธีการลดจุดเยือกแข็ง (depression of freezing point) หรือวิธีการเพิ่มจุดเดือด (elevation of boiling point) แต่สามารถวัดได้ด้วยการหาความดันออสโมติก (osmotic pressure) วิธีวัดความหนืด (viscosity measurement) และจากวิธีการแยกลำดับส่วน (fractionation) พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติอยู่ในช่วง 200,000-500,000 รูปที่ 2.3 แสดงการกระจายน้ำหนักโมเลกุล ของยางธรรมชาติจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscope)



รูปที่ 2.3 การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระดอน (resilience) สูงกว่ายางสังเคราะห์อื่น ๆ การใช้ฟิลเลอร์เสริมแรง (reinforce filler) เช่น เขม่าดำ หรือคาร์บอนแบล็ก (carbon black) จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ดีขึ้น ยางธรรมชาติมีความถ่วงจำเพาะ 0.915-0.930 ยางมีจุดอ่อนตัว (softening point) ประมาณ 120 °C ทนน้ำ กรดเจือจาง ด่าง และเกลือได้ดี แต่ออกซิเจน โอโซน แสงแดด และแสงอัลตราไวโอเล็ต ทำให้ยางธรรมชาติเกิดรอยแตก หรือเกิดการแตกหักได้ พบว่าปริมาณโอโซน 100 ppm สามารถทำลายยางได้ภายใน 2 นาที และถ้าจุ่มยางธรรมชาติในกรดไนตริก กรดซัลฟูริก กรดโครมิก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือโซเดียมไฮโปคลอไรด์ ยางจะถูกทำลายอย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติไม่ทนต่อน้ำมัน ขี้ผึ้งต่าง ๆ ที่มีในยางได้แก่

1. ยางที่มีสภาพเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติก คือ เมื่อมีแรงมากกระทำกับยางเช่น ดึงให้ยืดออกและเมื่อปล่อยแรงที่ดึงนั้น จะคืนตัวกลับแต่ไม่เท่าเดิม หรือเมื่อกดก็จะแบนลง และเมื่อเอาแรงกดออกจะคืนรูปแต่ไม่เท่าขนาดเดิม การที่ยางมีสภาพเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติกนี้ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรง

2. ยางมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก ซึ่งที่อุณหภูมิต่ำยางจะแข็งกระด้าง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ยางจะอ่อนนุ่มหรือยืดหยุ่นได้ง่าย การมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกทำให้ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่จำกัดเท่านั้น
3. ยางมีความแข็งแรง ความทนแรงดึง และความต้านทานการขาดุดำ
4. ยางมีราคาแพง การนำยางมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ ถ้าใช้แค่ยางเพียงลำพังจะทำให้ต้นทุนการผลิตสูง
5. ยางสามารถละลายในตัวทำละลายหลาย ๆ ชนิด ยางเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 30,000-300,000) และเมื่อโมเลกุลเหล่านี้ถูกรวมกันจะยึดกันด้วยพันธะอ่อนๆ ได้แก่ พันธะแวนเดอร์วาล หรือพันธะไฮโดรเจน โมเลกุลจึงแยกจากกันได้ง่ายโดยใช้ตัวทำละลายที่มีค่าพารามิเตอร์การละลาย (solubility parameter) ใกล้เคียงกับยาง

2.4 สารเคมีต่างๆที่เติมในน้ำยาง

สารเคมีที่เติมในน้ำยางล้วนมีหน้าที่เฉพาะตัวแต่ล้วนช่วยให้ยางมีสมบัติตามต้องการทั้งในระหว่างการผลิต การวัลคาไนซ์ และการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งาน ยางที่ผสมสารเคมีต่างๆแล้วยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้จนกว่ายางจะเกิดการวัลคาไนซ์เสียก่อน ยางที่ยังไม่เกิดการวัลคาไนซ์เรียกว่า "green compound" หรือ "uncured compound" ส่วนยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วเรียกว่า "cured compound" หรือ "cured rubber" หรือ "vulcanized rubber" หรือ "vulcanizate"

โดยปกตินิยมบอกปริมาณสารเติมแต่งทุกชนิดที่ใส่เข้าไปในยางคิดเป็นส่วนของสารเติมแต่งต่อยาง 100 ส่วน มีหน่วยเป็น phr (parts per hundred of rubber) หรือส่วนของสารต่อยาง 100 ส่วน

ในการใช้งานของยาง จำเป็นต้องผสมสารเติมแต่งต่าง ๆ ลงไป เพื่อแก้ไขข้อเสียต่างๆของยางทำให้ยางมีการใช้งานได้กว้างขึ้น ช่วยในการแปรรูป และลดต้นทุนการผลิต การผสมสารเติมแต่งจำเป็นต้องใส่ในปริมาณที่แน่นอน ซึ่งปริมาณของสารขึ้นกับความต้องการในการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยาง เช่น การทำถุงมือยางจะมีสูตรแตกต่างจากการทำยางรถยนต์ เป็นต้น

2.4.1 สารเพิ่มความคงตัว

สารตัวนี้มีความสำคัญมาก ทำหน้าที่รักษาความคงตัวของน้ำยางระหว่างการผลิต อาจจะมีชื่อเรียกได้หลายอย่าง ทั้งนี้สารแต่ละชนิดที่ใช้อาจจะทำหน้าที่มากกว่าหนึ่งอย่างก็ได้ เช่นเรียกว่า

- Wetting agent
- Dispersion stabilizer
- Emulsifier
- Foam promoters
- Foam stabilizer

ความคงตัวของน้ำยางขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการคือ ชั้นของน้ำยางที่ห่อหุ้มอนุภาคยางและประจุบนอนุภาค ในน้ำยางธรรมชาติสารเคมีที่ใช้รักษาประจุบนอนุภาคยาง คือ แอมโมเนียและโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถแบ่งชนิดของสารเพิ่มความคงตัวออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ 4 กลุ่มดังนี้

2.4.1.1 สารเพิ่มความคงตัวที่มีประจุลบ

สารพวกนี้เมื่อแตกตัวจะให้ประจุลบช่วยเพิ่มประจุและพลังงานระหว่างอนุภาคยางกับส่วนที่เป็นน้ำ สารที่เพิ่มประจุลบบนอนุภาคยางได้แก่ พวกสบู่ของกรดไขมัน เช่น โปตัสเซียมโอเลอเอท แอมโมเนียลอเรต นอกจากนี้ยังมีพวกซัลเฟตและซัลโฟเนทของสารอินทรีย์ซึ่งมีจำหน่ายในชื่อต่าง ๆ เช่น

ผู้ผลิต	ชื่อการค้า
Dupont	Aquarex F, D และ SMO Duponal
Vanderbilt	Daravan 1 และ 2
Monsanto	Santomerse D และ S Areasklene
ICI	Areskap SO Vulcastab LS Vulcastab A

2.4.1.2 สารเพิ่มความคงตัวที่มีประจุบวก

สารพวกนี้เมื่อแตกตัวแล้วจะให้ประจุไฟฟ้าบวก ส่วนใหญ่มาจากอนุมูลของแอมโมเนีย สารพวกนี้จะไม่กระทบกระเทือนเนื่องจากอนุมูลของโลหะหนัก บางครั้งเมื่อใช้กับน้ำยางธรรมชาติจะเป็นตัวลดความเสถียรทั้งนี้อาจเนื่องจากในกระบวนการผลิตน้ำยางมีความคงตัวมากเกินไป ต้องการให้น้ำยางจับตัวเร็วขึ้นก็โดยการเติมสบู่พวกนี้ ที่มีจำหน่าย เช่น

ผู้ผลิต	ชื่อทางการค้า
ICI	Vulcastab TII
Resinous Products Chemical	Triton K 60

2.4.1.3 สารเพิ่มความคงตัวที่ไม่มีประจุ

สารพวกนี้เป็นสารที่ช่วยน้ำในการห่อหุ้มอนุภาคของยาง โดยทั่วไปสารพวกนี้เป็นกลางทำหน้าที่ไม่ขึ้นกับความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำยาง ดังนั้นแม้ว่า pH ของน้ำยางเปลี่ยนแปลงแต่น้ำยางจะคงตัวเสมอ มีจำหน่ายในชื่อต่าง ๆ เช่น

ผู้ผลิต	ชื่อทางการค้า
Resinous Products Chemical	Triton N-100 และ NE
Adrance Salyents	Advawet 10
Sharpless Chemicals	Nonionic No 218

2.4.1.4 สารเพิ่มความคงตัวที่มีทั้งประจุลบและประจุบวก

สารพวกนี้เป็นสารที่อาจจะแสดงอนุภาคนวกรหรือลบกก็ขึ้นอยู่กับสถานะของความเป็นกรด-ด่างของตัวกลาง สำหรับน้ำยางธรรมชาติได้แก่พวก โปรตีน ที่นิยมใช้มากได้แก่พวก Caseine ammonium casenate เป็นต้น

2.4.2 สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing Agent)

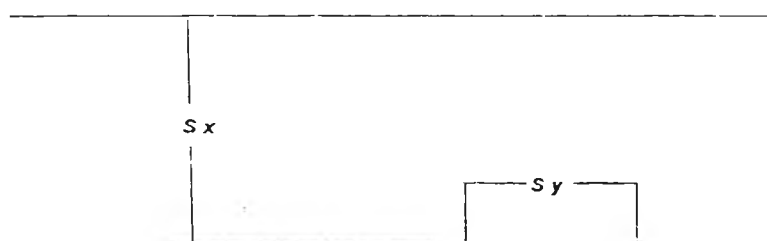
การวัลคาไนซ์ยางเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงยางซึ่งอยู่ในสภาพไม่คงรูปให้เป็นยางที่สามารถรักษารูปทรงไว้ได้ทั้งในลักษณะยืดหยุ่นหรือแข็งกระด้างโดยการใช้สารวัลคาไนซ์ ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางโมเลกุลตรงตำแหน่งที่วงไวต่อปฏิกิริยา สารวัลคาไนซ์ที่สำคัญของยาง

ธรรมชาติ ได้แก่ กำมะถัน ส่วนยางสังเคราะห์อื่น ๆ ก็ใช้สารวัลคาไนซ์แตกต่างกันตามชนิดของยาง การวัลคาไนซ์ยางทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคือ

- ยางเปลี่ยนโครงสร้างจากแบบเชิงเส้นเป็นแบบร่างแห ทำให้ยางเปลี่ยนจากสภาพพลาสติกเป็นสภาพอิลาสติกที่มีความแข็งแรงมากขึ้น
- ทำให้ยางไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์หลายๆ ชนิด
- ทำให้สมบัติเชิงกลของยางเพิ่มขึ้น เช่น ความทนแรงดึง ความต้านทานการขีดถู และความต้านทานการฉีกขาด
- ทำให้ยางมีความต้านทานความร้อน แสง เพิ่มขึ้น สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น สามารถแบ่งชนิดของสารวัลคาไนซ์ออกเป็น 5 ประเภทคือ กำมะถัน ซีเลเนียม เทลลูเรียม สารให้กำมะถัน และเปอร์ออกไซด์

2.4.2.1 กำมะถัน

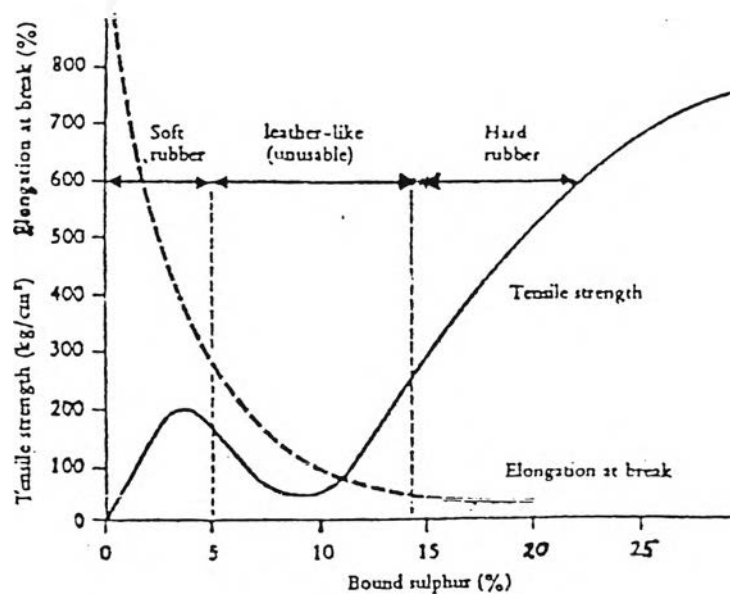
กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ที่นิยมใช้มากที่สุด เมื่อใส่กำมะถันเข้าไปในยางแล้วนำไปให้ความร้อนจะเกิดการวัลคาไนซ์ ทำให้สมบัติของยางดีขึ้น คือ เมื่อร้อนจะไม่อ่อนนิ่ม หรือเยิ้มเหนียว เมื่อเย็นลงจะไม่แข็ง ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น การเชื่อมขวางโมเลกุลของยางด้วยกำมะถันแสดงไว้ในรูปที่ 2.4



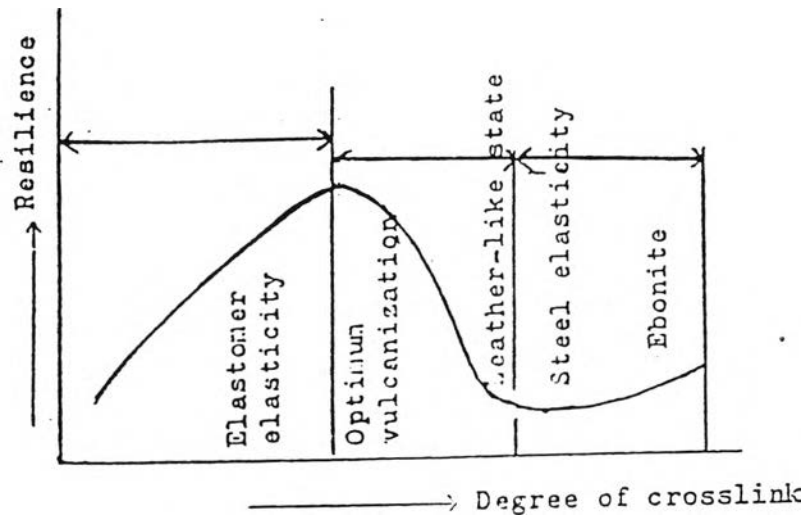
รูปที่ 2.4 การเชื่อมขวางโมเลกุลของยางด้วยกำมะถัน

ถ้าการเกิดวัลคาไนซ์ซึ่งมีประสิทธิภาพดี ค่า x ในรูปที่ 2.4 ควรมีค่าประมาณ 1 หรือ 2 เท่า นั้น และไม่มีโครงสร้างที่เป็นวง (cyclic) หรือ มีน้อยมาก แต่ถ้าไม่มีประสิทธิภาพ ค่า x อาจสูงถึง 8 และมีโครงสร้างเป็นวงจำนวนมาก ปริมาณสารกำมะถันที่เข้าร่วมตัวในโครงสร้างร่างแหนี้ เรียกว่า “สัมประสิทธิ์การวัลคาไนซ์” (coefficient of vulcanization) ซึ่งอาจให้นิยามว่า คือ “ส่วนของกำมะถันที่เข้าร่วมตัวกับยาง 100 ส่วน” ยางซึ่งมีการเชื่อมโยงของกำมะถันเพียง 1 แห่งต่อโมโนเมอร์ 200 หน่วย ใน 1 โมเลกุล ถือว่าเพียงพอที่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเหมาะสมแล้ว (น้ำหนักโมเลกุลระหว่างการเชื่อมโยงเท่ากับ 8,000-10,000) ปริมาณกำมะถันที่ต่อเป็นวง (y) และที่มาเชื่อมระหว่างโมเลกุล (x) ถ้ามีมากเกินไป จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มี aging properties ไม่ดี

การใช้กำมะถันปริมาณมากจะทำให้การเชื่อมขวางโมเลกุลเพิ่มขึ้น และสมบัติต่างๆ เช่น ความทนแรงดึง การยืดตัวที่จุดขาดและการกระดอนของยางจะเปลี่ยนไป รูป 2.5 แสดงผลของปริมาณกำมะถันต่อความทนแรงดึงและการยืดตัวที่จุดขาด ปริมาณกำมะถัน 0-5 ส่วน ทำให้อย่างมีสภาพอิลาสติก ปริมาณ 5-15 ส่วน ทำให้อย่างมีสภาพคล้ายหนัง และถ้าปริมาณตั้งแต่ 15 ส่วนขึ้นไป จะทำให้อย่างแข็งมากที่เรียกว่า อีโบไนต์ (ebonite) นอกจากนี้การกระดอนของยางจะเปลี่ยนไปตามปริมาณกำมะถันที่ใช้ ดังแสดงในรูป 2.6



รูปที่ 2.5 ผลของปริมาณกำมะถันต่อความทนแรงดึงและการยืดตัวที่จุดขาด



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระดอนของยางกับปริมาณการเชื่อมโยง

จากรูป 2.5 และ 2.6 พบว่าถ้าต้องการให้ยางคงสภาพอีลาสติกไว้ ปริมาณกำมะถันในยางไม่ควรเกิน 5 phr โดยปกติกำมะถันมี 3 อัญรูป คือ α sulfur หรือ rhombic sulfur, β -sulfur หรือ monoclinic sulfur และ γ -sulfur หรือ plastic sulfur โดยทั่วไปนิยมใช้ rhombic sulfur ในการวัลคาไนซ์ยาง ซึ่งมี โครงสร้างเป็นวง และประกอบด้วยกำมะถัน 8 อะตอม S_8 มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 112°C และเดือดที่ 444°C ถ้าให้ความร้อนแก่กำมะถัน โครงสร้างที่เป็นวงจะแตกออกเป็นสาย นั่นคือ กำมะถันกำลังหลอมเหลว ที่อุณหภูมิห้องกำมะถันอยู่ในรูปของ rhombic sulfur แต่ที่อุณหภูมิ 96°C จะเปลี่ยนรูปเป็น monoclinic sulfur ซึ่ง rhombic sulfur ละลายได้ในคาร์บอนไดซัลไฟด์ เบนซินร้อน น้ำมันสนร้อน ในยางประมาณ 0.75 phr ถ้าอุณหภูมิของยางสูงขึ้นเช่นที่ 100°C การละลายของกำมะถันในยางจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 phr ซึ่งการละลายของกำมะถันในยางขึ้นกับชนิดของยางด้วย

เมื่อนำกำมะถันมาหลอมและเทลงในน้ำเย็นทันที จะได้กำมะถันอสังฐานที่เรียกว่า plastic sulfur ซึ่งมีโครงสร้างเป็นสายยาว ๆ มีน้ำหนักโมเลกุล 100,000-300,000 และส่วนใหญ่ไม่ละลายในตัวทำละลายและในยาง บางครั้งเรียกว่า “insoluble sulfur” ถ้าตั้ง insoluble sulfur ทิ้งไว้นาน ๆ จะเปลี่ยนเป็น rhombic sulfur แต่ถ้าทิ้งไว้ที่อุณหภูมิสูงจะเปลี่ยนเป็น rhombic sulfur อย่างรวดเร็ว

กำมะถันที่ใช้ในยาง ต้องมีความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่า 99.5% มีเถ้าไม่เกิน 0.5% และต้องไม่มีกรดปนอยู่ เพราะจะทำให้การวัลคาไนซ์เกิดช้าลง กำมะถันที่ใช้ต้องมีอนุภาคเล็ก การคัดขนาดทำโดยใช้ตะแกรงขนาด 100, 200 และ 300 เมช เป็นต้น กำมะถันที่มีอนุภาคเล็กจะมีการกระจายตัวในยางได้ดี ทำให้การวัลคาไนซ์เกิดได้ทั่วถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็จะมีสมบัติเชิงกลสูง ถ้าต้องการกำมะถันชนิดพิเศษที่กระจายตัวเป็นอนุภาค เล็กๆ ได้ดี ที่เรียกว่า MC-sulfur สามารถทำโดยนำกำมะถันมาผ่านตะแกรงขนาด 300 เมช แล้วเติมแมกนีเซียมคาร์บอเนตลงไป 2.5% ของกำมะถัน แมกนีเซียมคาร์บอเนตจะห่อหุ้มอนุภาคของกำมะถันไว้ป้องกันไม่ให้อนุภาคของกำมะถันจับตัวเป็นก้อนใหญ่

การละลายกำมะถันในยางขึ้นกับชนิดของยาง สำหรับยางธรรมชาติและยาง SBR กำมะถันจะละลายได้ดีที่อุณหภูมิห้อง แต่ยางบิวตะไดอินและยางไนไตรล์จะละลายได้ยาก การผสมกำมะถันกับยางที่อุณหภูมิสูงจะช่วยให้กำมะถันละลายได้มากขึ้น แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้ กำมะถันส่วนเกินจะตกผลึกออกมา ผลึกนี้อาจอยู่ในเนื้อยางหรือแพร่ออกมาที่ผิวของยางเรียกว่า “การเกิดฝ้า” (blooming) การเกิดฝ้าจะมากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณกำมะถันที่มากเกินไปความสามารถในการแพร่ของกำมะถันมาที่ผิว และชนิดของยาง นอกจากนี้ ยังขึ้นกับส่วนผสมอื่น ๆ เช่น สารเร่ง วัลคาไนซ์ เป็นต้น การตกผลึกของกำมะถันที่ผิวยางทำให้เนื้อยางไม่ติดกันเพราะมีฝ้าของกำมะถันกั้นไว้ ดังนั้นเพื่อลดการตกผลึกที่ผิวยางควรผสมกำมะถันกับยางที่อุณหภูมิต่ำ อีกวิธีหนึ่งซึ่งสามารถลดการเกิดผลึกของกำมะถันที่ผิวยาง คือ การใช้ “กำมะถันไม่ละลาย” (insoluble sulfur) แทนกำมะถันธรรมดา (กำมะถันไม่ละลายมีราคาแพงกว่ากำมะถันธรรมดา 6 เท่า) เนื่องจากกำมะถันไม่ละลายทำหน้าที่เป็นแกนกลางให้กำมะถันธรรมดาเกาะรอบ ๆ ไม่ตกผลึก ซึ่งจะช่วยลดการเกิดฝ้าที่ผิวยาง

กำมะถันไม่ละลายที่จำหน่ายในท้องตลาดมีเนื้อสาร 65-95 % ที่ไม่ละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์ (การวัดปริมาณกำมะถันไม่ละลายจะใช้คาร์บอนไดซัลไฟด์เป็นตัวทำละลายในการวัด) กำมะถันไม่ละลายจะไม่เสถียรและค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นกำมะถันละลายอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะเปลี่ยนได้หมดภายใน 10-20 นาที ดังนั้นจึงต้องเก็บกำมะถันไม่ละลายไว้ที่อุณหภูมิต่ำและในการแปรรูปยางจะต้องให้อุณหภูมิของยางต่ำเพื่อป้องกันการเปลี่ยนรูปของกำมะถันไม่ละลายหรืออาจเพิ่มเสถียรภาพของกำมะถันไม่ละลายด้วยการเติมคลอรีน ไบรอมีน ไฮไดรเจนซัลเฟอร์โมโนคลอไรด์ หรือ เทอร์ฟิน ปริมาณเล็กน้อยลงไป ในการใช้งานจริง ๆ อาจใช้

กำมะถันไม่ละลายปนกับกำมะถันละลาย เช่น การใช้กำมะถันไม่ละลายประมาณ 60-70 % ของปริมาณทั้งหมดจะลดปัญหาการตกผลึกของกำมะถันที่ผิวยางได้ การใช้กำมะถันไม่ละลายไม่ทำให้ผลผลิตของยางต่างจากการใช้กำมะถันธรรมดาถ้าสามารถผสมเข้ากันได้ดี แต่การผสมกับยางทำได้ยากเพราะไม่ละลายในยาง

ยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันได้ต้องเป็นยางที่มีพันธะคู่ซึ่งว่องไวต่อปฏิกิริยา เช่น ยางธรรมชาติ ยางบิวตะไดอิน ยาง SBR ยางบิวทิล ยางไนไตรล์ เป็นต้น แต่ยางซึ่งมีพันธะคู่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เช่น ยางคลอโรพีน หรือยางที่ไม่มีพันธะคู่เลย เช่น ยาง EPM ยาง Hypalon ยางซิลิโคน ไม่สามารถวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันได้

กำมะถันที่ใส่เข้าไปในยางควรมีอนุภาคขนาดเล็ก คือ ต้องผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช ขึ้นไป และมักใส่หลังสุดในจำนวนสารเคมีทั้งหมด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการบ่มก่อนกำหนด แต่ยางบางชนิด เช่น ยางไนไตรล์ การผสมกำมะถันลงไปพบว่ากำมะถันกระจายตัวไม่ดีจึงจำเป็นต้องใส่กำมะถันเข้าไปตั้งแต่เริ่มต้น เพื่อเพิ่มเวลาในการกระจายหรืออาจใช้ MC-sulfur แทนกำมะถันธรรมดาก็ได้ แต่ในกรณีนี้ต้องใส่สารเริ่ม วัลคาไนซ์หลังสุด ปกติยางเมื่อใส่กำมะถันแล้วต้องทำให้ยางเย็นตัวเร็วที่สุดเพื่อลดการบ่มก่อนกำหนด

2.4.2.2 การวัลคาไนซ์ด้วยซีเลเนียมและเทลลูเรียม

บางครั้งการวัลคาไนซ์อาจใช้ซีเลเนียม (selenium) และเทลลูเรียม (tellurium) เป็นสารวัลคาไนซ์แทนกำมะถันได้ แต่ปฏิกิริยาที่สารทั้งสองทำกับยางยังมีประสิทธิภาพที่ไม่ดีเท่ากับกำมะถัน และเป็นพิษด้วย จะใช้สารทั้งสองนี้แทนกำมะถันเมื่อต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีความต้านทานความร้อนสูงมากเป็นพิเศษ โดยทั่วไปพบว่าการวัลคาไนซ์ยางด้วยสารสองชนิดนี้สามารถลดเวลาในการวัลคาไนซ์ลงและช่วยปรับปรุงสมบัติบางอย่างของผลิตภัณฑ์ ซีเลเนียมมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่าเทลลูเรียม ในบางกรณีอาจใช้ซีเลเนียมหรือเทลลูเรียมปริมาณเล็กน้อยเสริมในกำมะถันทำให้ใช้กำมะถันน้อยลง และผลิตภัณฑ์ได้มีความต้านทานอากาศร้อน ไขมัน และมีโมดูลัสสูงขึ้นด้วย ดังนั้น จึงนิยมใช้เป็นสารวัลคาไนซ์ร่วมกับกำมะถัน

ตาราง 2.2 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของซีลีเนียมเทลลูเรียม และกำมะถัน

	Sulfur		Selenium	Tellurium
	Rhombic	Amorphous		
Atomic Weight	32.06	32.06	78.96	127.61
Appearance	Yellow Powder	Yellow Powder	Metallic Powder	Metallic Powder
Specific Gravity	2.07	1.92	4.80	6.24
M.P. องศา C	112.8-119	>110	217.4	449.8
Price \$/l b	0.03	0.21	6.50	7.00

ปกติการเติมซีลีเนียมหรือเทลลูเรียมจะเติมประมาณ 0.5-1 ส่วนต่อยาง 100 ส่วน ผสมกับสารเร่งวัลคาไนซ์ TMTD โดยไม่มีกำมะถัน และถ้ามีกำมะถันจะใช้ประมาณ 0.25 ส่วนต่อกำมะถัน 2 ส่วน และสารเร่งวัลคาไนซ์ ZDEC 0.25 ส่วน

2.4.2.3 สารให้กำมะถัน

นอกจากการใช้กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์โดยตรงแล้ว ยังอาจใช้สารที่สลายตัวให้กำมะถัน (sulfur donor) แทนได้สารเร่งวัลคาไนซ์หลายชนิดและสารประกอบที่คล้าย ๆ กัน สามารถเป็นแหล่งให้กำมะถันได้ เช่น บางครั้งอาจใช้สารให้กำมะถัน 3-4 phr ร่วมกับกำมะถันธรรมดาน้อยกว่า 1 phr หรือบางกรณีไม่ใช้กำมะถันธรรมดาเลยก็ได้ ตัวอย่างสูตรเคมีของสารที่ให้กำมะถันแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 สารประกอบที่ใช้จะสลายตัวให้อนุมูลเสรีที่อุณหภูมิของการวัลคาไนซ์ และรวมตัวกับโมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมขวางโมเลกุลยางขึ้นและในระบบนี้จะเกิดการเชื่อมโยงอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีกำมะถันต่อกันเพียง 1 หรือ 2 อะตอม (mono หรือ disulfidic crosslink) และไม่มีกำมะถันมาต่อกันเป็นวง ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์มีความต้านทานความร้อน และ compression set ดีกว่ายางที่มีการวัลคาไนซ์แบบ polysulfidic crosslink ซึ่งมีสมบัติต้านทานการขีดถู และการหักงอดีกว่า การแก้ไขเพื่อให้ยางมีสมบัติดีควรใช้สารที่ให้กำมะถันร่วมกับการใช้กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ และมักใช้สารกำมะถัน 2 phr แทนกำมะถัน 1 phr เพื่อให้ได้ยางที่มีมอดูลัสคงเดิม ตาราง 2.3 แสดงปริมาณกำมะถันที่ได้จากสารให้กำมะถัน

ตารางที่ 2.3 ปริมาณกำมะถันที่ได้จากสารให้กำมะถัน

สารให้กำมะถัน	ปริมาณกำมะถัน (%)
Tetramethylthiuram disulfide	13.3
Dipentamethylenethiuram hexasulfide	35.0
Dimorpholinyl disulfide	31.4
Dibutylxanthogen disulfide	21.4
Alkylphenol disulfide	23.0, 28.0

แม้สารเคมีในตารางที่ 2.3 จะให้กำมะถันออกมาไม่มาก แต่กำมะถันที่ออกมามีประสิทธิภาพในการเชื่อมขวางอย่างมาก และให้ยางที่มีมอดูลัสสูงกว่ายางที่ใช้กำมะถันธรรมดาในปริมาณที่เท่ากันเพื่อการวัลคาไนซ์ เช่น การใช้ไดมอร์โฟลีนิลไดซัลไฟด์ (dimorpholinyl disulfide) 3 ส่วน ต่อยาง 100 ส่วน จะให้กำมะถันออกมา 0.8 phr แต่จะให้ยางที่มีมอดูลัสเทียบเท่ากับยางที่ใช้กำมะถัน 2.5 phr สารที่ให้กำมะถันจะมีราคาแพงกว่ากำมะถันธรรมดา แต่มีข้อดี คือ ลดการตกผลึกที่ผิวซึ่งเกิดเมื่อใช้กำมะถันธรรมดาและช่วยไม่ให้เกิดการบวมก่อนกำหนด แต่การบวมจะเกิดขึ้นช้ากว่าเนื่องจากต้องรอจนกว่ากำมะถันถูกปล่อยออกมาจึงจะเกิดการวัลคาไนซ์ นอกจากนี้สารที่เหลือหลังจากให้กำมะถันแล้วอาจทำหน้าที่เป็นสารเร่งวัลคาไนซ์หรือสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ เช่น ไทยูเรมเตตระซัลไฟด์ ซึ่งหลังการสลายตัวให้กำมะถันแล้ว สารที่เหลือ คือ ไดไทโอคาร์บาเมต ซึ่งเป็นสารเร่งวัลคาไนซ์ความเร็วสูง (ultra-accelerator)

2.4.2.4 สารเปอร์ออกไซด์

ยางสังเคราะห์ที่ไม่มีพันธะคู่ภายในโมเลกุลไม่สามารถวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสารเร่งวัลคาไนซ์ได้ ตัวอย่างเช่น ยางซิลิโคน ยาง EPM ยางยูรีเทน และยาง EVA (ethylene vinylacetate copolymer) เป็นต้น จึงจำเป็นต้องใช้สารเปอร์ออกไซด์ในการวัลคาไนซ์ยางเหล่านี้ แต่สารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์เท่านั้นที่นิยมใช้กันในปัจจุบันนี้โดยมีสูตรทั่วไปว่า $R-O-O-R$ สารเหล่านี้ต้องมีเสถียรภาพพอที่จะเก็บไว้ได้นาน ๆ แต่สามารถสลายตัวให้อนุมูลอิสระซึ่งเป็นตัวไปดึงไฮโดรเจนอะตอมออกจากยาง ทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นบนโมเลกุลของยางและเกิดการเชื่อมกันดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 การเชื่อมโมเลกุลยางด้วยสารเปอร์ออกไซด์

การเชื่อมโมเลกุลยางแบบนี้มีเสถียรภาพดีมาก อาจสามารถทำโดยใช้รังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์ด้วยเช่นกันสามารถแบ่งสารเปอร์ออกไซด์นี้ออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

- เปอร์ออกไซด์ที่มีหมู่คาร์บอกซิลเป็นสารอะลิฟาติกและสารอะโรมาติกโดยมีลักษณะสำคัญของเปอร์ออกไซด์กลุ่มนี้ คือ เป็นสารที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยากับกรด สลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ และมีความว่องไวต่อออกซิเจน ทำให้เกิดปัญหาในการวัลคาไนซ์ ถ้ามีคาร์บอนแบล็กอยู่ด้วย

- เปอร์ออกไซด์ที่ไม่มีหมู่คาร์บอกซิลเป็นสารอะลิฟาติกและสารอะโรมาติก เช่นเดียวกันโดยมีลักษณะสำคัญของเปอร์ออกไซด์กลุ่มนี้ คือ เป็นสารที่ว่องไวต่อปฏิกิริยากับกรด สลายตัวที่อุณหภูมิสูง และว่องไวต่อออกซิเจนน้อยกว่าเปอร์ออกไซด์ที่มีหมู่คาร์บอกซิล

สารเปอร์ออกไซด์สลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน ดังนั้นจึงต้องเก็บรักษาไว้ในที่เย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 38°C และเก็บห่างจากแหล่งกำเนิดความร้อนไม่ให้ถูกกับแสงแดด ประกายไฟ หรือเปลวไฟ หลีกเลี่ยงจากสารออกซิไดส์ สารรีดิวซ์และกรดแอมโมเนีย เป็นต้น

ข้อดีของการวัลคาไนซ์ยางด้วยสารเปอร์ออกไซด์ คือ

1. สารประกอบยางที่เก็บไว้จะไม่เกิดการบวมก่อนกำหนด
2. สามารถวัลคาไนซ์ยางอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง .
3. ยางที่ได้มี compression set ต่ำแม้ที่อุณหภูมิสูง
4. ยางที่ได้มี heat aging ดีมาก และมีเสถียรภาพดีที่อุณหภูมิสูง
5. ยางมีสมบัติทางไฟฟ้าดีมาก
6. ให้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีสดใส
7. ไม่มีปัญหาเรื่องโลหะหลงเหลือมาทำปฏิกิริยา
8. ไม่มีปัญหาการเกิดฝ้าบนยาง ซึ่งมักเกิดเมื่อใช้กำมะถัน
9. สามารถวัลคาไนซ์ยางหลายชนิดที่ผสมกันอยู่ได้พร้อมๆกัน

ข้อเสียของการวัลคาไนซ์ยางด้วยสารเปอร์ออกไซด์ คือ

1. มีราคาแพงกว่าการวัลคาไนซ์ยางด้วยกำมะถัน
2. การวัลคาไนซ์ยางโดยใช้ไอน้ำแบบเปิด (open steam) หรือโดยใช้อากาศ (air curing) อาจมีปัญหา
3. กลิ่นของเปอร์ออกไซด์บางตัวอาจไม่เป็นที่ยอมรับ
4. ยางมีความทนแรงดึงต่ำกว่ายางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน
5. สมบัติทางกายภาพของยางส่วนใหญ่ต่ำกว่ายางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน
6. ยางมีความต้านทานการขีดถูต่ำกว่า และมีการบวมตัวมากกว่า

2.4.2.5 สารวัลคาไนซ์อื่น ๆ

นอกจากสารที่กล่าวมาแล้ว ยังมีสารวัลคาไนซ์อื่น ๆ อีกที่เป็นโลหะออกไซด์ (metal oxides) ซึ่งสามารถใช้ในการวัลคาไนซ์ยางสังเคราะห์บางชนิดพอลิคลอโรพรีน(ยางนีโอพรีน) ส่วนใหญ่ใช้แมกนีเซียมออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ บางครั้งใช้ตะกั่วออกไซด์ทั้ง litharge(PbO) red lead(PbO) ยาง Hypalon ใช้ได้ทั้ง litharge, litharge/magnesia(MgO) หรือ magnesia/pentaerythritol เป็นสารวัลคาไนซ์ การใช้โลหะออกไซด์ผสมสารวัลคาไนซ์สามารถควบคุมอัตราเร็วของการวัลคาไนซ์เซชันและคอยดูดซับคลอไรด์ที่เกิดขึ้น นอกจากนี้โลหะออกไซด์แล้ว ยังมีสารประกอบอื่น ๆ ที่สามารถวัลคาไนซ์ยางได้ เช่น การใช้ไอพอกซีเรซินกับยางไนไตรล์ การใช้ควิโนนไดออกไซด์กับยางบิวทิล หรือใช้ไดอะมีนและสารประกอบไดไทโอ (dithio compound) กับยางฟลูออโร (fluororubber) เป็นต้น ซึ่งแสดงไว้ในตาราง 2.4

ตาราง 2.4 การวัลคาไนซ์โดยใช้สารประกอบที่ไม่ใช่กำมะถัน

สารวัลคาไนซ์	ปริมาณที่ใช้ (phr)
	<u>Metal Oxide</u>
Zinc oxide	5 (Neoprene)
Litharge	25 (Hypalon)
Magnnesia/Pentaerythitol	4/3 (Hypalon)
	<u>Difunctional Compound</u>
Phenolic resins	12 (Butyl)
p-Quinonedioxime	2 (Butyl)
Hexamethylenediamend carbamate	<1.5 (Fluororubber)
	<u>Peroxide</u>
Dicumyl peroxide	2 (Silicone), 5 (Urethane)
2,5-bis(t-butylperoxy) – 2,5-dimethylhexane	2 (Polyethylene or EPM)

2.4.3 สารเร่งวัลคาไนซ์ (Accelerators)

สารนี้เป็นสารที่ใช้ร่วมกับสารวัลคาไนซ์ เพื่อลดเวลาในการวัลคาไนซ์เซชัน (vulcanization time หรือ cure time) โดยจะเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดวัลคาไนซ์เซชัน นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์อีกด้วย

ก่อนจะมีการค้นพบสารเร่งวัลคาไนซ์ กู๊ดเยียร์ ได้พบวิธีการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติโดยใช้กำมะถันและความร้อนเท่านั้น ซึ่งปฏิกิริยาเกิดช้ามาก ต้องใช้เวลาหลายชั่วโมง และต้องใช้กำมะถันเป็นจำนวนมากเกินความจำเป็น โดยกำมะถันเชื่อมต่อกันเองเป็นสายยาวมากเกินไป หรือมีอะตอมกำมะถันส่วนเกินปะปนอยู่ในเนื้อหรือซึมมาที่ผิวของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น เมื่อมีการค้นพบสารเร่งอินทรีย์ในปี ค.ศ. 1906 โดย Oenslager จึงได้นำมาผสมลงในยางใช้ร่วมกับกำมะถันในการวัลคาไนซ์ยาง ซึ่งช่วยลดเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ลงอย่างมาก อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิที่ใช้และปริมาณกำมะถันที่ใช้ลดลง ช่วยลดการ สูญเปล่าและการซึมของกำมะถันมาที่ผิวของผลิตภัณฑ์ สารเร่งวัลคาไนซ์ยังช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย สารเร่งวัลคาไนซ์จึงเป็นสารที่จำเป็นในการวัลคาไนซ์ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

สารเร่งวัลคาไนซ์ได้ถูกแบ่งในระยาะแรกตามความเร็วของปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันเป็น 4 ชนิด คือ

- สารเร่งวัลคาไนซ์ความเร็วสูง (ultra accelerators) ได้แก่ ไทยูแรม ไดไทโอคาร์บาเมต และแซนเทต (xanthates) วัลคาไนซ์ยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 140 °C ในเวลาไม่กี่นาที
- สารเร่งวัลคาไนซ์ความเร็วสูงปานกลาง (semi-ultra accelerators) ได้แก่ เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล เบนโซไทอะโซลไดซัลไฟด์ ใช้วัลคาไนซ์ยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 140 °C ในเวลาประมาณ 30 นาที
- สารเร่งวัลคาไนซ์ความเร็วปานกลาง (moderately fast accelerators) ได้แก่ ไดฟีนิลกัวนิดีน (diphenyl guanidine) เฮกซะเมทิลีนเตตระมีน (hexamethylene tetramine) ใช้วัลคาไนซ์ยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 140 °C ในเวลาประมาณ 60 นาที
- สารเร่งวัลคาไนซ์ความเร็วต่ำ (slow accelerators) ได้แก่ อะนิลีน (aniline) ใช้เมื่อวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 140 °C ในเวลา 90-120 นาที

การแบ่งหมวดหมู่แบบนี้เคยใช้ได้ผลดี แต่เมื่อมียางสังเคราะห์เพิ่มขึ้น สารเร่งวัลคาไนซ์ซึ่งเคยเป็นสารเร่งความเร็วสูงปานกลางหรือความเร็วสูงสำหรับยางธรรมชาติ อาจเป็นสารเร่งความเร็วต่ำสำหรับยางสังเคราะห์อื่น ๆ ดังนั้นจึงจัดแบ่งสารเร่งวัลคาไนซ์ใหม่ตามลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสารเร่งเหล่านั้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบสำคัญ ได้ดังนี้

- อัลดีไฮด์-อะมีน (aldehyde-amines)
- กัวนิดีน (guanidines)
- ไทอะโซล (thiazoles)
- ไทยูแรม (thiurams)
- ซัลฟิनाไมด์ (sulfenamides)
- ไดไทโอคาร์บาเมต (dithiocabamates)
- แซนเทต (xanthates)

การลดเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์อาจทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณและ/หรือชนิดสารเร่งวัลคาไนซ์ ซึ่งในทางปฏิบัติ อาจใช้ระบบที่มีสารเร่งวัลคาไนซ์ชนิดเดียวที่มีประสิทธิภาพในการวัลคาไนซ์ สารเร่งวัลคาไนซ์นี้เรียกว่า "primary accelerator" นอกจากนี้ อาจมีระบบวัลคาไนซ์ที่ใช้สารเร่งวัลคาไนซ์มากกว่าหนึ่งชนิด โดยมีสารเร่งวัลคาไนซ์หนึ่งเป็นหลัก และใช้สารเร่งวัลคาไนซ์อีกชนิดในปริมาณเล็กน้อย (10-20 % ของปริมาณทั้งหมด) เพื่อช่วยกระตุ้นหรือปรับปรุงสมบัติของยางที่วัลคาไนซ์แล้ว สารเร่งวัลคาไนซ์เสริมนี้เรียกว่า "secondary accelerator"

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งประเภทของสารเร่งวัลคาไนซ์ตามสภาพความเป็นกรดต่างของสารออกเป็น 2 ชนิด คือ

- สารเร่งวัลคาไนซ์ที่มีสภาพเป็นด่าง ได้แก่ บิวทริลดีไฮด์อะนิลีน (butyraldehyd aniline) เฮกซะเมทิลีนเตตระมีน DPG และ DOTG เป็นต้น
 - สารเร่งวัลคาไนซ์ที่มีสภาพเป็นกรด ได้แก่ ไทอะโซล ซัลฟีนามาइट ไทยูแรม ไดไทโอคาร์บาเมต และแซนเทต เป็นต้น ซึ่งสารเร่งวัลคาไนซ์ที่มีสภาพกรดจะนิยมใช้กันมาก
- สารเร่งวัลคาไนซ์ต่าง ๆ มีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ เรียงลำดับดังนี้

แซนเทต > ไดไทโอคาร์บาเมต > ไทยูแรม > ไทอะโซล > ซัลฟีนามาइट > กัวนิติน (ปกติกัวนิตินไม่ใช่สารเร่งวัลคาไนซ์หลัก แต่เป็นสารเร่งวัลคาไนซ์เสริม)

2.4.4 สารกระตุ้นวัลคาไนซ์ (Activators)

สารกระตุ้นวัลคาไนซ์ เป็นสารที่เติมลงในสารประกอบยางเพียงเล็กน้อยเพื่อกระตุ้นให้สารเร่งวัลคาไนซ์ทำหน้าที่ได้ดียิ่งขึ้น โดยเข้าไปทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนทางเคมีที่มีประสิทธิภาพสูง ทำให้กำมะถันเชื่อมขวางกับยางเร็วขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยไม่ใหยางติดลูกกลิ้งที่ใช้ในการบดผสมยาง และช่วยในการกระจายตัวของสารเคมีต่าง ๆ ในเนื้อยางอีกด้วย

สารกระตุ้นวัลคาไนซ์ที่ใช้กันทั่วไป อาจเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ สารกระตุ้นวัลคาไนซ์อินทรีย์ที่สำคัญและนิยมใช้มากที่สุด คือ ซิงก์ออกไซด์ ส่วนแมกนีเซียออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์พอมิใช้บ้าง สารกระตุ้นวัลคาไนซ์อินทรีย์ที่สำคัญคือ กรดอินทรีย์ (organic acids) โดยปกติใช้ร่วมกับโลหะออกไซด์ ที่ใช้อยู่ทั่วไป คือ กรดโมโนเบสิก (monobasic acids) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง หรือของผสมของกรดเหล่านี้ ได้แก่ กรดสเตียริก (stearic acid) กรดปาล์มมิติก (palmitic acid) กรดลอริก (lauric acid) กรดโอเลอิก (oleic acid) กรดไมริสติก (myristic acid) และน้ำมันไฮโดรจิเนต (hydrogenated oils) ได้แก่ น้ำมันปาล์ม (palm oil) น้ำมันปลา (fish oil) น้ำมันละหุ่ง (castor oil) และน้ำมันลินสีด (linseed oil) เป็นต้น

2.4.4.1 ซิงก์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO)

โดยทั่วไป นิยมใช้ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ ในปริมาณตั้งแต่ 3-5 phr ถ้าซิงก์ออกไซด์มีอนุภาคเล็กจะลดปริมาณการใช้ให้เหลือเพียง 1 phr ยางที่ได้จะมี modulus สูงและมีลักษณะโปร่งใส ถ้าเติมซิงก์ออกไซด์เกิน 1 phr จะไม่ละลายในยางและทำให้ยางขุ่นขาว แต่ถ้าซิงก์ออกไซด์ถูกเติมมากกว่า 5 phr ขึ้นไปแสดงว่ามีจุดมุ่งหมายอื่นนอกเหนือจากการใช้เป็นสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ การใช้ซิงก์ออกไซด์ปริมาณสูง ทำให้การถ่ายเทความร้อนในยางรวดเร็วขึ้น เหมาะกับ

การทำขึ้นยางหนา ๆ โดยเฉพาะกับการบ่มแบบใช้อากาศร้อน และถ้าใช้ซิงก์ออกไซด์ขนาดเล็กจะทำให้ยางมีมอดูลัสสูงขึ้น สามารถขึ้นรูปทรงได้ดีขณะทำการบ่มในเข้าพิมพ์แบบเปิด (close cure)

ซิงก์ออกไซด์สามารถจัดเกรดได้ตามความบริสุทธิ์ โดยปกติซิงก์ออกไซด์จะมีตะกั่วปนอยู่ ทำให้สีของยางคล้ำลงเมื่อผสม ดังนั้นการจัดเกรดจะขึ้นกับปริมาณตะกั่วที่มีอยู่แบ่งเป็น “white seal” ถ้ามีปริมาณตะกั่ววันน้อย และ “red seal” ถ้าปริมาณตะกั่วมาก กรณีที่เป็นยางสีดำสามารถใช้ซิงก์ออกไซด์ชนิด red seal ได้ แต่ถ้าต้องการยางที่มีสีขาวหรือยางสีสด ต้องใช้ซิงก์ออกไซด์ชนิด white seal

ถ้าต้องการยางที่มีความต้านทานความร้อนสูง อาจใช้ litharge (PbO) หรือ red lead (Pb₃O₄) แทนซิงก์ออกไซด์ได้ แต่ตะกั่วออกไซด์ทั้งสองจะมีฤทธิ์การกระตุ้นวัลคาไนซ์แรงกว่าซิงก์ออกไซด์ ดังนั้น อาจทำให้ยางบ่มได้เร็วขึ้นมาก ซึ่งจะทำให้เกิดการบ่มก่อนกำหนดได้ง่าย

เบสิกซิงก์คาร์บอเนต (Zn(OH)₂-ZnCO₃) อาจถูกใช้แทนซิงก์ออกไซด์ได้ เพราะละลายในยางได้ดีกว่า อาจใช้ในปริมาณมากเหมาะเป็นสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ในยางโปร่งใส (transparent rubber) และถ้าบดให้มีขนาดเล็กเรียกว่า “transparent zinc oxide” สามารถใช้กับยางโดยใส่ในปริมาณน้อย และทำให้ยางโปร่งใสเช่นเดียวกัน

2.4.4.2 กรดไขมัน (Fatty Acids)

นอกจากซิงก์ออกไซด์แล้ว กรดไขมันก็เป็นสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งสำหรับสารเร่ง วัลคาไนซ์บางชนิดโดยเฉพาะพวกไทอะโซลกรดไขมันที่ใช้ส่วนมากเป็นของผสมระหว่างอะลิฟาติกอิมิดัว ซึ่งมีคาร์บอน 12 ถึง 18 อะตอม ประสิทธิภาพของการกระตุ้นขึ้นกับความยาวโมเลกุลของกรดไขมัน เช่น กรดคาโปรอิก (caproic acid) ซึ่งมีคาร์บอน 6 อะตอม มีผลในการกระตุ้นวัลคาไนซ์น้อยมาก ในขณะที่กรดโมเลกุลขนาดใหญ่มีผลของการกระตุ้นจะเพิ่มมากขึ้น เช่น กรดสเตียริก (มีคาร์บอน 18 อะตอม) มีความสามารถในการกระตุ้นสูงกว่ากรดคาโปรอิกกรดเบเฮนิก (behenic acid) มีคาร์บอน 20 อะตอม มีความสามารถกระตุ้นสูงกว่ากรดสเตียริก เป็นต้น

ปริมาณการใช้กรดไขมันขึ้นกับชนิดของยางที่ใช้ ถ้ายางชนิดใดมีกรดไขมันอยู่แล้วก็ไม่จำเป็นต้องใส่ หรือใส่ในปริมาณน้อยมาก ยางธรรมชาติจะมีกรดไขมันอยู่บ้างในรูปของกรดสเตียริก แต่กรดไขมันที่มีในยางธรรมชาติจะมีปริมาณแตกต่างกัน ขึ้นกับวิธีการเตรียมยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติแต่ละก้อนอาจมีปริมาณกรดไขมันไม่เท่ากัน ซึ่งมีผลให้อัตราการบ่มยางต่างกัน ดังนั้นการผสมสารเคมีในยางทุกครั้ง จึงมักใส่กรดสเตียริกปริมาณ 1-4 phr เพื่อแก้ปัญหการบ่มที่แตกต่างกัน

2.4.5 สารหน่วงวัลคาไนซ์ (Retarders)

การบ่มก่อนกำหนด (scorch) ของยางมีสาเหตุจากการที่ยางได้รับความร้อนในระหว่างการผลิตและการแปรรูป ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ต้องกระทำที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ยางไหลเข้าแม่แบบได้ ถ้ายางมีเวลาในการบ่มก่อนกำหนดสั้นไป ยางจะไม่สามารถไหลเข้าไปเต็มแม่แบบ การแก้ปัญหาอาจทำได้โดยให้เวลาของการบ่มก่อนกำหนดยาวขึ้นโดยการลดปริมาณสารเร่งวัลคาไนซ์ให้น้อยลงซึ่งอาจมีผลทำให้สมบัติเชิงกลของยางเปลี่ยนไป จึงจำเป็นต้องเติมสารหน่วงวัลคาไนซ์เพื่อยืดเวลาการบ่มก่อนกำหนดให้ยาวขึ้น

สารหน่วงวัลคาไนซ์ที่ดี ควรสามารถยืดเวลาในการบ่มก่อนกำหนด ส่วนเวลาในการวัลคาไนซ์ควรเท่าเดิม หรือเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด หากใช้สารหน่วงวัลคาไนซ์ที่ไม่ดี จะทำให้เวลาในการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นพร้อมกับเพิ่มเวลาของการบ่มก่อนกำหนดอีกด้วย

2.4.6 สารป้องกันการเสื่อมของยาง (Age-Resistors)

สารเหล่านี้ได้แก่ สารกระตุ้นการเกิดออกซิเดชัน สารต้านไอโซน และสารอื่น ๆ ที่ช่วยป้องกันยางไม่ให้เสื่อมสภาพในขณะที่ใช้งานหรือตั้งทิ้งไว้ เนื่องจากออกซิเจน ไอโซน แสง ความร้อน และอื่น ๆ เร่งให้ยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น

2.4.7 สารตัวเติมหรือฟิลเลอร์ (Fillers)

สารนี้เป็นสารที่ช่วยเสริมแรง ปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ หรือช่วยลดต้นทุนการผลิตยาง

2.4.8 สารทำให้นิ่ม (Softeners)

สารนี้เป็นสารที่เติมในยางเพื่อช่วยด้านการผสม เพิ่มความยืดหยุ่น ช่วยให้ยางติดกันได้ง่าย (ไม่ร่วน) เป็นต้น

2.4.9 สารอื่น ๆ (Miscellaneous Ingredients)

เป็นสารที่มีการใช้งานจำเพาะเช่น สารหน่วง (retarder) สารขัดถู (abrasive) สารฟู่ (blowing agent) และสารเกิดกลิ่น (odorant) เป็นต้น

2.5 การผสมสารเคมีในน้ำยาง

ข้อควรระวังในการผสมสารเคมีต่าง ๆ ในน้ำยางคือ ควรตรวจสอบสถานะของน้ำยางและสารเคมีก่อนและหลังการผสม (compounded latex) นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องเรียงลำดับการผสมสารกลุ่มต่างๆ อย่างถูกต้องอีกด้วย ข้อมูลเหล่านี้จะเป็นประโยชน์มากในการควบคุมกระบวนการผลิตตลอดจนคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับ

2.5.1 การทดสอบน้ำยางและสารเคมีก่อนการผสม

2.5.1.1 น้ำยาง

น้ำยางควรถูกทดสอบหาปริมาณของแข็งทั้งหมด (TSC, total solid content)

ปริมาณเนื้อยางแห้ง (DRC, dry rubber content) ปริมาณแอมโมเนีย (% NH₃) เวลาความคงตัวของเครื่องกล (MST, mechanical stability time) และระดับกรดไขมันระเหยได้ (VFA No., volatile fatty acid No.)

2.5.1.2 สารเคมี

สารเคมีต่างๆมักถูกเตรียมให้อยู่ในรูปของสารละลาย หรือดีสเพิซชัน หรือ อิมัลชัน ควรต้องมีการตรวจสอบความเข้มข้น คือตรวจสอบว่ามีปริมาณของเนื้อสารเคมีถูกต้องหรือไม่ และขนาดของอนุภาคมีความละเอียดพอเพียงหรือไม่ (ปกติควรมีความละเอียดต่ำกว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคยาง คือต่ำกว่า 5 ไมครอน (1 ไมครอน=10⁻⁴ ซม.) ตลอดจนถึงต้องตรวจสอบความเป็นกรดต่างของสารเหล่านั้น เพื่อจะช่วยควบคุมความคงตัวของน้ำยางเมื่อเติมสารเหล่านี้ลงไป นอกจากนี้ลำดับขั้นตอนการเติมสารเคมีลงผสมกับน้ำยางก็มีความสำคัญเช่นกันโดยขั้นตอนที่พึงกระทำควรเป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เติมน้ำให้ได้ความเข้มข้นของเนื้อยางที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 2 เติมสารช่วยให้ยางคงตัว (stabilizer)

ขั้นตอนที่ 3 เติมสารวัลคาไนซ์ให้ยางคงรูป (vulcanising system) โดยให้เติม ZnO หลังสุดเพื่อป้องกันน้ำยางเหนียว

ขั้นตอนที่ 4 เติมสารป้องกันยางเสื่อม

ขั้นตอนที่ 5 เติมสารสี (pigment)

สารที่เติมลงไปในแต่ละขั้นตอนควรถูกกวนให้ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกับน้ำยางก่อนการเติมสารชนิดต่อไป โดยที่ความเร็วในการกวนควรอยู่ราว 5-60 รอบต่อนาที

2.5.2 การทดสอบน้ำยางผสมสารเคมี

ภายหลังการผสมน้ำยางกับสารเคมีแล้ว ควรทำการทดสอบสมบัติต่างๆของน้ำยางผสม (compounded latex) ก่อนการใช้งานหรือระหว่างการใช้งาน ซึ่งสามารถแจกแจงการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

2.5.2.1 การทดสอบหาปริมาณของแข็งทั้งหมด (TSC, Total Solid Content)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยางผสมสารเคมีว่าเป็นเท่าไร วิธีการทดสอบทำเช่นเดียวกับการทดสอบน้ำยางปกติ คือชั่งน้ำยางที่ผสมสารเคมีแล้ว 2.0099-2.0000 กรัม อบให้แห้งที่ 100 °c เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาเก็บในภาชนะดูความชื้น เมื่อเย็นแล้วจึงนำมาชั่งด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง คำนวณค่า TSC เช่นเดียวกับการคำนวณน้ำยางชั้นตามสูตรดังนี้

$$\% \text{ TSC} = \frac{\text{น้ำหนักยางหลังเข้าอบแล้ว} \times 100}{\text{น้ำหนักยางก่อนอบ}}$$

2.5.2.2 การทดสอบหองศาความคงรูป (Degree of Vulcanization)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาความคงรูปของน้ำยางว่าเหมาะแก่การนำมาขึ้นรูปหรือยัง โดยจะทำการทดสอบหลังการบ่มน้ำยางผสมแล้วเป็นเวลา 24 48 และ 72 ชั่วโมง ด้วยวิธีการทดสอบคลอโรฟอร์มและการทดสอบดูการพองตัวของน้ำยาง โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

การทดสอบคลอโรฟอร์ม (Choloroform test) เป็นการตรวจหา degree of vulcanization ที่ค่อนข้างง่ายและสะดวก แต่ให้ผลได้ไม่แม่นยำเท่ากับการหา %การพองตัว (swelling) ของน้ำยางสามารถทดสอบได้โดยการหยดคลอโรฟอร์ม หรือคาร์บอนเตตระคลอไรด์ลงในน้ำยาง แล้วกวาดด้วยแท่งแก้ว จากนั้น 2-3 นาทีสังเกตลักษณะการจับตัวของยาง และแบ่งระดับความคงรูปตามลักษณะการจับตัวดังนี้

สถานะความคงรูปของยาง

ยังไม่คงรูป (unvulcanized)

คงรูปบ้างเล็กน้อย (lightly vulcanized)

คงรูปปานกลาง (moderate vulcanized)

คงรูปเต็มที่ (fully vulcanized)

ลักษณะการจับตัวของยาง

เป็นก้อนเหนียว

เป็นก้อนนุ่มหยาบ ๆ

เป็นเม็ดร่วนไม่เหนียว

เป็นเม็ดแห้ง ๆ ร่วนและละเอียด

การทดสอบการพองตัว (Swelling) วิธีการทดสอบทำโดยการหยดน้ำยางผสม 1 หยดลงบนกระดาษที่มีผิวลื่นทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นแกะหยดของยางที่แห้งแล้วแช่ในโทลูอีน (toluene) เป็นเวลา 30 นาที บันทึกเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดยกก่อนแช่โทลูอีน และหลังแช่เพื่อคำนวณหา % การพองตัวของยางต่อไป แต่ในงานวิจัยนี้ได้หา %การพองตัวของยาง ที่ถูกตัดด้วย die cut ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.3 เซนติเมตรแล้วนำไปแช่โทลูอีน ทำการคำนวณหา %การพองตัวของยาง เช่นเดียวกับวิธีการข้างต้นโดยวัดที่ 24 48 และ 72 ชั่วโมง โดยคำนวณหา %การพองตัวของยางจากสมการ 2.1

$$\%swelling = \frac{(d_1 - d_0)}{d_0} \times 100 \text{ (สมการ 2.1)}$$

เมื่อ d_0 คือเส้นผ่านศูนย์กลางของยางก่อนแช่ในโทลูอีนหน่วยเป็นเซนติเมตร

d_1 คือเส้นผ่านศูนย์กลางของยางหลังแช่ในโทลูอีนหน่วยเป็นเซนติเมตร

ถ้า %swelling เป็น 75 แสดงว่า ยางมีสถานะความคงรูปในระดับ moderate vulcanization หรือน้ำยางมีความคงรูปปานกลางสามารถนำยางที่ผสมแล้วนี้ไปใช้งานได้

2.5.2.3 การทดสอบหาความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของน้ำยางผสมมีความสำคัญมาก เพราะมีผลต่อความหนาของยางที่เกาะแม่พิมพ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อกระบวนการผลิตใช้การวิธีจุ่มโดยอาศัยสารช่วยจับตัว (coagulant dipping process) และต้องการฟิล์มยางที่บางมาก เช่น กรณีกระบวนการผลิตถุงมือใช้งานแพทย์

ปกติน้ำยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นของเหลวแบบ "pseudoplastic" คือความหนืดจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราเร็วของแรงเฉือน (shear rate) (ภาพที่ 1) ระดับของความหนืด pseudoplastic จะสูงเมื่อมีปริมาณสารของแข็งมาก และเมื่อปริมาณของแข็งทั้งหมด (TSC) ต่ำกว่า 30 % น้ำยางก็จะเป็น pseudoplastic อีกต่อไป และจะแสดงลักษณะของ "Newtonian"

ดังนั้นน้ำยางผสมโดยทั่วไป (TSC 30%) จึงมีลักษณะของ pseudoplastic ซึ่งหมายความว่าสมบัติการไหลของน้ำยางผสมนั้นไม่สามารถจะระบุได้โดยการวัดความหนืดเพียงการใช้อัตราเร็วของแรงเฉือนเพียงอย่างเดียว การประเมินหาสมบัติการไหลของน้ำยางผสมที่เชื่อถือได้จำเป็นต้องวัดหาความหนืดอย่างน้อยที่ 2 ระดับของอัตราเร็วของแรงเฉือน เครื่องมือที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้วัดคือเครื่องชนิด rotational viscometer เช่น Brookfield viscometer ส่วนเครื่องชนิด "flow-cup" ไม่เหมาะที่จะวัดความหนืดของน้ำยางผสมเพราะไม่สามารถให้ผลเปรียบเทียบระหว่างน้ำยางผสม

2 ชุดได้ ในกระบวนการจุ่มแบบพิมพ์ อัตราเร็วของแรงเฉือนจะต่ำ ดังนั้นการวัดความหนืดของน้ำยางผสมจึงควรทำที่อัตราความเร็วของแรงเฉือนต่ำ

การวัดความหนืดของน้ำยางผสมควรวัดด้วย Brookfield viscometer ที่อัตราเร็ว 6 และ 12 รอบต่อนาที ผลการทดสอบที่อัตราเร็วทั้ง 2 ระดับนี้ และอัตราส่วนของผลการทดสอบจาก 2 ระดับจะเป็นค่าที่ใช้เปรียบเทียบความหนืดของน้ำยางแต่ละชุดได้ เนื่องจากความหนืดของน้ำยางขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นการวัดความหนืดทุกครั้งจะต้องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่

2.5.2.4 การทดสอบหาความเสถียรของความหนืด (Viscosity Stability)

วิธีการทดสอบมีดังนี้คือ อุณหภูมิให้น้ำยางให้มีอุณหภูมิ 25 ± 0.5 °C หรือ 30 ± 0.5 °C หรืออุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิของโรงงาน แล้ววัดความหนืด จากนั้นวัดความหนืดซ้ำในระหว่างการเก็บรักษาน้ำยาง ตรวจสอบว่าน้ำยางมีความเสถียรของความหนืดพอเพียงหรือไม่ เพื่อการพิจารณาปรับให้น้ำยางมีความเสถียรด้านความหนืดก่อนการนำไปใช้งานต่อไป

2.5.2.5 การทดสอบหาความคงตัวต่อการปั่น (Mechanical Stability)

ควรวัดความคงตัวของน้ำยางผสมต่อการปั่น เพื่อประเมินหาความเสถียรของน้ำยางผสมต่อการกวนปั่นระหว่างการจุ่มน้ำยางเพื่อขึ้นรูป หากน้ำยางผสมมีความเสถียรไม่พอเพียงอาจเกิดปัญหาน้ำยางเป็นเม็ด "flocCs" ได้

วิธีการวัดความคงตัวต่อการปั่นกวนของน้ำยางผสมทำได้ทำนองเดียวกับการวัดน้ำยางขึ้นปกติโดยการชั่งน้ำยางผสมประมาณ 80 กรัมทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิของกระบวนการผลิตจริง ๆ หากจุดยุติที่ยางเริ่มจับเป็นเม็ดโดยเครื่องวัด MST ถ้าหาก MST ไม่พอเพียง (เช่นต่ำกว่า 7000 วินาที) ก็สามารถที่จะปรับความคงตัวของน้ำยางผสมได้ในขั้นนี้

2.5.2.6 การทดสอบหาความเป็นกรด-ด่าง (pH Value)

ควรตรวจความเป็นกรด-ด่างของน้ำยางผสม โดยการใช้เครื่องมือวัด pH เนื่องจากความเป็นกรด-ด่างจะมีผลต่อความเสถียร ความตึงผิวและความสามารถในการเกาะแม่พิมพ์ของน้ำยาง นอกจากนี้การใช้เทคนิคการจุ่มแบบอาศัยสารช่วยน้ำยางจับตัว (coagulant) เพื่อขึ้นรูปจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างของน้ำยางผสมด้วย

การใช้เครื่องมือวัด pH จะต้องระมัดระวังรักษาความสะอาดของ pH electrodes เป็นอย่างดี เพราะยางจะติด electrodes ทำให้ค่าที่อ่านได้มีความผิดพลาด

2.5.2.7 การทดสอบหาระดับของการเกิดปฏิกิริยาอย่างคงรูป (Pre-vulcanization) หรือ ระดับของการบ่มน้ำยางผสม (Maturity)

วิธีการตรวจสอบสมบัติเนื้อที่วิธีหนึ่งนอกเหนือจาก chloroform test คือทำให้น้ำยางผสมแห้งเป็นฟิล์มบางแล้วแช่ในตัวทำละลายยาง เช่น เบนซีน (benzene) โทลูอีน (toluene) หรือน้ำมันเชื้อเพลิง การบวมของฟิล์มยางจะมากถ้ายางได้มีการคงรูปไปบ้างเล็กน้อย และจะไม่ค่อยบวมหรือไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงถ้ายางได้รูปอย่างสมบูรณ์ (high degree of vulcanization)

2.5.2.8 การทดสอบคุณลักษณะขณะจุ่ม (Dipping Characteristics)

ขั้นตอนสุดท้ายที่ควรตรวจสอบน้ำยางผสมคือ ควรตรวจสอบลักษณะของน้ำยางขณะการจุ่มเพื่อขึ้นรูป โดยการทดลองจุ่มแม่พิมพ์ลงในน้ำยางที่เตรียมไว้ตามเงื่อนไขที่จะทำการผลิตจริง ๆ

ควรบันทึกความหนาของฟิล์มยางที่ได้จากการจุ่มพร้อมทั้งสังเกตคุณภาพของการจุ่มตลอดจนลักษณะของยางที่เกาะแม่พิมพ์ (gel) เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการใช้น้ำยางผสมนี้ต่อไป

2.6 การบ่มน้ำยางผสม (Maturation)

เมื่อผสมน้ำยางกับสารเคมีต่าง ๆ แล้วควรเก็บไว้สักระยะหนึ่งหรือเรียกว่า บ่มก่อนที่จะนำไปใช้ ทั้งนี้เพื่อให้โอกาสสารต่าง ๆ ที่ผสมลงไปได้กระจายอย่างทั่วถึงเป็นเนื้อเดียวกับน้ำยางโดยตลอด การบ่มมีข้อดีคือทำให้น้ำยางผสมมีความเหนียวสม่ำเสมอ ได้ยางจับตัวที่แข็งแรง (strong gel) และทำให้ได้ผลผลิตสุดท้ายที่มีการคงรูปอย่างทั่วถึง (uniform vulcanization) สำหรับระยะเวลาการบ่มจะนานเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับระบบสารคงรูปที่ใช้ อุณหภูมิของการบ่มและองค์ประกอบของสารคงรูป การทดลองและศึกษาหาระยะเวลาการบ่มจึงมีความจำเป็นเพื่อให้ได้กำหนดเวลาที่เหมาะสมและถูกต้องที่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดี อุณหภูมิการบ่มคือประมาณ 20-30 °C ขณะบ่มน้ำยางจะต้องกวนน้ำยางอย่างสม่ำเสมอด้วย

2.7 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยการจุ่ม

เมื่อบ่มน้ำยางผสมจนได้ที่แล้วจึงทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งวิธีการขึ้นรูปที่จะกล่าวนี้เป็น การขึ้นรูปด้วยวิธีการจุ่ม เริ่มจากการเตรียมแม่พิมพ์เพื่อจุ่ม การอบแห้ง การทำให้อย่างคงรูป การนำผลิตภัณฑ์ออกจากแม่พิมพ์ และการตรวจสอบ

2.7.1 การเตรียมแบบพิมพ์

แบบพิมพ์ (former) ที่ใช้ในงานทำผลิตภัณฑ์ด้วยกรรมวิธีจุ่มทำได้จากวัสดุต่าง ๆ เช่น แก้ว อะลูมิเนียม อะลูมิเนียมอัลลอยด์ ไม้ ปูนปลาสเตอร์ และกระเบื้อง (porcelain) เป็นต้น กระเบื้องเป็นวัสดุที่นิยมทำเป็นแบบพิมพ์สำหรับการผลิตตุ้มมือต่าง ๆ แบบพิมพ์ตุ้มมืออาจมีผิวเรียบหรือผิวหยาบขึ้นอยู่กับชนิดของตุ้มมือที่จะผลิต ลักษณะผิวของแบบพิมพ์มีผลต่อกระบวนการผลิตและสูตรน้ำยางผสมเป็นอย่างมาก เพราะความหยาบของผิวแบบพิมพ์จะมีผลต่อการเกาะแบบพิมพ์ของสารช่วยจับตัว (coagulant) และการเกาะแบบพิมพ์ของน้ำยางผสม

การทำความสะอาดแบบพิมพ์เป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่ง ก่อนจุ่มแบบพิมพ์ในน้ำยางผสมทุกครั้งจะต้องทำความสะอาดแบบพิมพ์ด้วยด่างหรือกรดอินทรีย์ (alkali or inorganic acid) แล้วต้องล้างแบบพิมพ์ด้วยน้ำสะอาดที่เป็นน้ำอ่อนและอาจมีวิธีการขูดสิ่งสกปรกออกจากพิมพ์โดยใช้แปรง เมื่อได้แบบพิมพ์ที่สะอาดแล้วจะต้องทำการอบแห้งแบบพิมพ์ก่อนการจุ่ม

2.7.2 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยการจุ่ม (Dipping Technique)

เทคนิคการจุ่มเพื่อทำผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ นั้นมีหลายวิธี ได้แก่

- การจุ่มน้ำยางโดยตรง (straight dipping)
- การจุ่มโดยใช้สารช่วยจับ (coagulant dipping)
- การจุ่มโดยใช้แบบพิมพ์ร้อน (sensitive dipping)
- การจุ่มโดยใช้ไฟฟ้าช่วย (electrode dipping)

เทคนิคทั้งหมดดังกล่าวนี้ เทคนิคการจุ่มโดยใช้สารช่วยจับเป็นที่นิยมและเหมาะสำหรับการผลิตตุ้มมือโดยทั่วไป

เทคนิคการจุ่มโดยใช้สารช่วยจับ มีวิธีการคือ จุ่มแบบพิมพ์ลงในสารช่วยจับน้ำยางจากนั้นจึงจุ่มแบบพิมพ์ลงในน้ำยางผสม สารช่วยจับน้ำยางจะช่วยให้น้ำยางเกาะแบบพิมพ์ เทคนิคนี้ยังแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ ชนิดแรกเป็น สารช่วยจับเปียก (wet coagulant dipping) เช่น กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก กระทำโดยจุ่มแบบพิมพ์ในสารนี้แล้วจุ่มแบบพิมพ์ลงในน้ำยางผสมต่อกัน ชนิดหลังเป็น สารช่วยจับแห้ง (dry coagulant dipping) เช่น สารละลายของเกลือแคลเซียมมักจุ่มแบบพิมพ์ลงในสารนี้ แล้วทิ้งให้แห้งหรือหมาดเสียก่อน จึงนำไปจุ่มในน้ำยางผสม ความหนาของยางที่เกาะพิมพ์ในการจุ่มหนึ่งครั้งขึ้นอยู่กับธรรมชาติและความเข้มข้นของสารช่วยจับที่ใช้ ระยะเวลาการแช่ ความเข้มข้นและความหนืดของน้ำยางผสม ตัวอย่างเช่น การจุ่มแบบพิมพ์สารช่วยจับ 1 ครั้ง และจุ่มต่อไปในน้ำยางผสม 1 ครั้งจะได้ยางหนา 0.2-0.8 มิลลิเมตร

สารช่วยจับที่นิยมใช้คือ สารละลายของเกลือแคลเซียม เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) แคลเซียมไนเตรด (CaNO_3) จะได้แผ่นยางที่มีผิวยางเรียบสม่ำเสมอและหนาพอสมควร แคลเซียม

คลอไรด์จะทำให้ได้ยางสีขุ่นกว่าแคลเซียมไนเตรด ถ้าต้องการยางที่โปร่งแสงควรใช้ cyclohexylamine acetate (CHA) เป็นสารช่วยจับ ซึ่งได้จากการผสม cyclohexylamine กับกรดอะซิติก ใช้สัดส่วนโมลต่อโมล การเตรียมสารละลายของสารช่วยจับตัวอาจใช้น้ำ แอลกอฮอล์ (methylate spirits) หรือทั้งสองอย่างผสมกัน การใช้น้ำเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายแต่แอลกอฮอล์ระเหยได้เร็วกว่า ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาในระหว่างกระบวนการผลิตลงได้เล็กน้อย ความเข้มข้นของสารละลายเกลืออยู่ระหว่าง 10-15 % ขึ้นกับความหนาของถังมือที่ต้องการ

ถ้าต้องการยางบาง ๆ อาจเติมสารบางอย่าง เช่น ทัลก์ชนิดละเอียด (micronized talc), diatomaceous silica (snowfloss) หรือสารที่คล้าย ๆ กันลงในสารช่วยจับ สารนี้ช่วยให้ถอดยางออกจากแบบพิมพ์ได้ง่ายและป้องกันการยับยบเห็นยวดติดกันของยาง ปริมาณการใช้สารดังกล่าวผสมในสารช่วยจับคือประมาณ 1-5 %

2.7.3 การล้างผลิตภัณฑ์ยาง (Leaching)

การล้างหมายถึงล้างฟิล์มยางที่จับอยู่บนแบบพิมพ์ซึ่งอาจทำได้ 2 วิธีคือ ล้างขณะอยู่ในระหว่างกระบวนการผลิต (on-line) หรือล้างหลังจากแกะผลิตภัณฑ์ออกจากแบบพิมพ์แล้ว (off-line) การล้างนี้เพื่อกำจัดสารที่ละลายน้ำออก ซึ่งได้แก่ เกลือที่มีอยู่ในน้ำยางแต่แรกหรือที่เติมลงไป ในน้ำยาง ซึ่งการล้างนี้จะช่วยป้องกันการดูดซึมน้ำของสารที่ตกค้างอยู่ในยาง ป้องกันผิวยางเหนียวเนื่องจากสารที่ตกค้างอยู่ ป้องกันไม่ให้สารตกค้างอยู่ในยาง เพื่อลดการระคายเคืองต่อผิวหนัง เมื่อใช้ถังมือ ลดการเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์เมื่อถูกกับแสง และทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงมากขึ้น

การล้างผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการผลิตโดยเฉพาะอย่างยิ่งขณะที่ยางอยู่ในสภาพเปียก (wet gel) จะได้ผลดีมาก เพราะน้ำสามารถชะล้างสารต่าง ๆ ในเนื้อยางขณะที่เปียกอยู่ ออกได้อย่างรวดเร็วและง่าย อย่างไรก็ตามไม่ควรล้างยางทันทีที่แบบพิมพ์ถูกยกขึ้นจากถังจุ่ม เพราะผิวยางที่เกาะแบบพิมพ์ยังเหลวอยู่ ควรอบให้ผิวของฟิล์มยางแข็งก่อน อาจใช้เวลาประมาณ 2 นาที ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

การใช้น้ำอุ่น (50-60°C) ประมาณ 5-10 นาที (ขึ้นกับความหนา) ล้างจะให้ประสิทธิภาพดี การล้างควรใช้น้ำในปริมาณที่พอเพียงและควรเปลี่ยนน้ำล้างบ่อยๆ ด้วย

น้ำที่ใช้ล้างยางควรเป็นน้ำที่ไม่มีไอออน เช่น น้ำกลั่น หรือ deionised water แต่อาจใช้น้ำก๊อกได้ถ้าหากน้ำก๊อกนั้นมีปริมาณของทองแดงต่ำ น้ำกระด้างก็อาจใช้ได้ถ้าความกระด้างไม่สูงเกินไปนัก อย่างไรก็ตามน้ำที่มีทองแดงจะมีผลต่ออย่างมากกว่า ควรใช้น้ำที่มีทองแดงต่ำกว่า 0.1 ppm ถ้าปริมาณทองแดงในน้ำสูงกว่านี้ ผลิตภัณฑ์จะเกิดปัญหาเรื่องการเปลี่ยนสีและปัญหาด้านการเสื่อมสภาพได้

2.7.4 การอบแห้งและการทำให้ยางคงรูป (Drying and Vulcanizing)

ปกติมักอบแห้งและทำให้ยางคงรูปในตู้อบร้อน โดยอบเพื่อให้ยางที่จับแบบพิมพ์แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 70-80 °C ก่อนที่จะอบให้คงรูปในขั้นต่อไป ไม่ควรใช้อุณหภูมิสูงเกิน 100 °C ในช่วงแรกของการอบแห้ง เพราะอาจเกิดฟองอากาศในยาง (blister) จากการระเหยของน้ำที่อยู่ในเนื้อยางใช้อุณหภูมิประมาณ 100-140 °C ในการอบยางให้คงรูป ระยะเวลาขึ้นอยู่กับสารที่ใช้ทำให้ยางคงรูป

2.7.5 การถอดผลิตภัณฑ์ออกจากแบบพิมพ์

การถอดผลิตภัณฑ์ออกจากแบบพิมพ์จะเป็นขั้นสุดท้ายของกระบวนการผลิต โดยทั่วไปมักใช้มือถอด และอาศัยแปรง เช่น แปรงลัดก์ และเคลย์ ช่วยเพื่อป้องกันยางติดแบบพิมพ์