

เทคโนโลยีการผลิตยางคอมพาวด์

ยางคอมพาวด์ (rubber compound) คือ ยางที่มีการผสมสารเคมีต่างๆ เช่น สารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่งปฏิกิริยา สารตัวเติม เป็นต้น พร้อมทั้งจะนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นยางล้อ ถูมือยาง ถูยางอนามัย ยางรองคอสะพาน ท่อยาง ยางรัดของ ฯลฯ

การจะผลิตยางคอมพาวด์ต้องอาศัยเทคโนโลยีต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการออกสูตรเคมียางและการผสมยาง เพื่อให้ได้ยางคอมพาวด์ที่นำไปขึ้นรูปและคงรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามที่ต้องการ

เทคโนโลยีการออกสูตรเคมียาง (compounding formulation)

การออกสูตรเคมียางให้เหมาะสมนั้นนับเป็นขั้นตอนแรกที่มีความสำคัญอย่างมากในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากจะส่งผลต่อสมบัติหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางดังกล่าว การออกสูตรเคมียางที่ดีนั้นต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับสมบัติและการใช้งานของยางแต่ละชนิดโดยละเอียด ต้องรู้หน้าที่กลไกการทำงานของสารเคมีต่างๆ ที่จะผสมลงไปเป็นอย่างดี รวมทั้งต้องมีความรู้เกี่ยวกับเครื่องจักรที่จะใช้ในการผสมและการแปรรูปด้วย

จุดประสงค์หลักของการออกสูตรเคมียาง ได้แก่

1. เพื่อให้สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ (processability)
2. เพื่อให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีสมบัติตามที่ต้องการ (properties)
3. เพื่อควบคุมต้นทุน/ราคาตามที่ต้องการ (price)

โดยทั่วไปส่วนประกอบต่างๆ ในสูตรเคมียาง ประกอบด้วย

1. ยาง ไม่ว่าจะเป็นยางธรรมชาติ (natural rubber; NR) ยางสังเคราะห์ (synthetic rubber; SR) ยางผสม (blends) หรือยางเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic elastomer; TPE)
2. สารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent)
3. สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator)
4. สารกระตุ้นปฏิกิริยา (activator)
5. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradants)
6. สารตัวเติม (fillers)
7. สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (plasticizers and processing aids)
8. สารอื่นๆ เช่น สี (pigments) สารทำให้เกิดฟอง (blowing agents) และสารหน่วงการติดไฟ (flame retardants) เป็นต้น

อย่างไรก็ดี ในแต่ละกลุ่ม อาจจะมีการใช้สารเคมีมากกว่าหนึ่งตัว เช่น สารตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะใช้สองตัวร่วมกัน หรือสีอาจจะใช้สามหรือสี่ชนิดรวมกัน เป็นต้น

1. ยาง

ยางมีมากมายหลายชนิด ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ การเลือกใช้ชนิดของยางให้เหมาะสมถือเป็นเรื่องที่สำคัญต่อการออกสูตรยาง

1.1 ยางธรรมชาติ (natural rubber; NR)

ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่น คือ มีความยืดหยุ่น (elasticity) สูง ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำ ความเหนียวติดกัน (tack) ในสภาพที่ยังไม่คงรูปดีเยี่ยม มีความทนต่อแรงดึง (tensile strength) สูงมากโดยไม่ต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรง มีความทนต่อการฉีกขาด (tear strength) สูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง มีสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ที่ดี มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำระหว่างการใช้งาน มีความต้านทานต่อการล้าตัว (fatigue resistance) ที่สูงมาก มีความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) สูง แต่ยังคงดีกว่ายาง SBR

ยาง NR จัดเป็นยางเอนกประสงค์ที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง ยางรัดของ ท่อยาง สายพานลำเลียง ยางกระเปาะน้ำร้อน ยางล้อรถบรรทุก ยางล้อรถยก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

สำหรับข้อดีของยางธรรมชาติ ได้แก่ ไม่ทนต่อโอโซน ความร้อน แสงแดด น้ำมัน (ละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ผึ้ง เช่น เบนซีน เฮกเซน โทลูอีน) และสารเคมีอื่นๆ

1.2 ยางสังเคราะห์ (synthetic rubber; SR)

ยางสังเคราะห์ผลิตขึ้นมาเพื่อแทนที่ยางธรรมชาติที่มีข้อดีหลัก คือ ไม่ทนต่อโอโซน ความร้อน แสงแดด น้ำมัน และสารเคมี สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชนิดตามชนิดของโมโนเมอร์ที่เข้ามาทำปฏิกิริยากัน แต่ในเบื้องต้นนี้จะขอกล่าวถึงยางสังเคราะห์เพียงบางชนิดที่มีการใช้งานกันค่อนข้างมากในอุตสาหกรรมเท่านั้น

1.2.1 ยางโพลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene; IR)

ยาง IR เป็นยางที่เกิดจากความพยายามในการสังเคราะห์ยางที่มีโครงสร้างทางเคมีและมีสมบัติเหมือนกับยางธรรมชาติ ดังนั้นจึงสามารถใช้ยาง IR แทนยางธรรมชาติในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติแล้ว ยาง IR มีสมบัติเชิงกล เช่น ความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดต่ำกว่าเล็กน้อย และมีราคาสูงกว่ายางธรรมชาติอีกด้วย แต่ยาง IR ก็มีข้อดีที่เหนือกว่ายางธรรมชาติ คือ ยางจะมีคุณภาพสม่ำเสมอ มีสิ่งเจือปนน้อยกว่า และมีสีขาวสวย บางครั้งจึงนิยมใช้ยาง IR แทนยางธรรมชาติในการผลิตจุกนมยางและอุปกรณ์การแพทย์บางชนิด

1.2.2 ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (styrene-butadiene rubber; SBR)

ยาง SBR เป็นยางที่สังเคราะห์จากโมโนเมอร์ของสไตรีนและบิวทาไดอีน จัดเป็นยางสังเคราะห์เอนกประสงค์ที่สำคัญและใช้กันมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรมเพราะเป็นยางที่ใช้งานได้ทั่วไปเช่นเดียวกับยางธรรมชาติและยาง IR สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง มีคุณภาพสม่ำเสมอ และราคาค่อนข้าง

คงที่ นอกจากนั้นข้อดีของยาง SBR ที่เหนือกว่ายางธรรมชาติ คือ มีกระบวนการแปรรูปที่ง่ายกว่า ประหยัดทั้งกำลังงานและเวลาตลอดจนต้นทุนการผลิต นอกจากนั้น ยาง SBR มีความต้านทานต่อการขีดถูสูงกว่ายาง NR เล็กน้อย

ยาง SBR เป็นยางที่มีสมบัติเหนียวติดต่ำ เมื่อผ่านการวัลคาไนซ์แล้วจะมีความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดค่อนข้างต่ำ จำเป็นต้องเสริมแรงด้วยสารตัวเติมเสริมแรง เช่น เขม่าดำหรือซิลิกา มีการกระด้างกระดอนหรือความยืดหยุ่นต่ำกว่ายาง NR มาก เมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยาง SBR จึงมีความร้อนสะสมสูงกว่า ด้วยเหตุนี้ ยาง SBR จึงไม่เหมาะที่จะใช้ในการผลิตยางล้อรถบรรทุกที่มีขนาดใหญ่เพราะความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นอาจสูงมากพอที่จะทำให้ยางเกิดการระเบิดได้

ยาง SBR เป็นยางที่มีความเป็นฉนวนสูง ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนต่ำ เสื่อมสภาพจากความร้อน ออกซิเจน และโอโซนได้ง่ายเช่นเดียวกับยาง NR

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากยาง SBR ได้แก่ สายพาน พื้นรองเท้า ฉนวนหุ้มสายไฟ ท่อยาง ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ บรรจุภัณฑ์อาหาร รวมถึงดอกยางล้อรถยนต์โดยสาร เป็นต้น

1.2.3 ยางไนไตรล์ (nitrile or acrylonitrile-butadiene rubber; NBR)

ยาง NBR เป็นยางที่สังเคราะห์จากโมโนเมอร์ของอะคริโลไนไตรล์และบิวทาไดอีน ยาง NBR มีสมบัติเด่น คือ ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ ได้ดี ทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน ออกซิเจน และโอโซนสูงกว่ายาง NR และ SBR และเป็นยางที่มีความต้านทานต่อการขีดถูที่สูงมาก สำหรับข้อด้อย คือ เป็นยางที่มีสมบัติความเหนียวติดต่ำ เมื่อผ่านการวัลคาไนซ์ ยางจะมีความยืดหยุ่น ความทนต่อแรงดึง และความทนต่อการฉีกขาดต่ำค่อนข้างต่ำ หากต้องการนำไปใช้งานในทางวิศวกรรมก็จำเป็นต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย

ยาง NBR ส่วนใหญ่นิยมนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ทนน้ำมัน เช่น ปะเก็นน้ำมัน ยางโอริง ยางซีล ยางเชื่อมต่อ สายพานลำเลียง ท่อดูดหรือส่งน้ำมัน ท่อยางเสริมแรง ยางบุภาชนะ ยางเคลือบลูกกลิ้ง รองเท้าบูท พื้นและส้นรองเท้า เป็นต้น

1.2.4 ยางคลอโรพรีน (chloroprene rubber; CR)

ยาง CR เป็นยางที่สังเคราะห์จากโมโนเมอร์ของคลอโรพรีน มีสมบัติความเหนียวติดที่ดี ยางวัลคาไนซ์มีความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดสูงโดยไม่ต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรง (แต่ยังต่ำกว่ายาง NR เล็กน้อย) มีความต้านทานการขีดถูสูง สามารถทนต่อน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ในระดับปานกลางถึงดี มีความทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ออกซิเจน และโอโซนสูงกว่ายางไดอีนทั่วๆ ไป และยังไม่ลามไฟอีกด้วย

แม้ว่ายาง CR เป็นยางที่มีสมบัติโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ที่ดี แต่ก็ก็เป็นยางที่มีราคาค่อนข้างแพง นิยมนำไปใช้ในการผลิตแผ่นยางรองรางรถไฟ ยางซีล ท่อยางเสริมแรง สายพานลำเลียงในเหมืองแร่ สายพานรูปตัววี ยางรองคอสพาน ยางบุผนัง พื้นรองเท้า ยางขอบหน้าต่าง และยางขอบหลังคา

1.2.5 ยางบิวไทล์ (butyl rubber; IIR)

ยาง IIR เป็นยางที่สังเคราะห์จากโมโนเมอร์ของไอโซพรีนและไอโซบิวทิลีน สมบัติเด่นของยางชนิดนี้คือ ความสามารถในการเก็บกักก๊าซได้ดีเยี่ยม (มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซต่ำกว่ายาง NR ประมาณ 8-10 เท่า) มีความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการขีดถูอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และสามารถทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสารเคมี ออกซิเจน โอโซน ไขมัน ความร้อน และสภาพอากาศได้อย่างดีเยี่ยมอีกด้วย แต่ยาง IIR มีข้อด้อย คือ ความยืดหยุ่นค่อนข้างต่ำ

ยาง IIR นิยมใช้ในการผลิตยางโอริงหรือปะเก็นยางชนิดที่ต้องทนต่อสารเคมี ท่อไขมัน ยางในรถบรรทุก ยางบุด้านในของยางล้อแบบไม่มียางใน สายพาน ยางบุต่างๆ รวมถึงจุกปิดขวดยา เป็นต้น

1.2.6 ยางบิวทาไดอีน (butadiene rubber; BR)

ยาง BR มีสมบัติเด่น คือ เมื่อผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว ยางจะมีความยืดหยุ่นและความต้านทานต่อการขีดถูสูงที่สุดในบรรดายางทั้งหมด มีความเป็นฉนวนสูงและมีสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำดีมาก อย่างไรก็ตามยางชนิดนี้มีความทนต่อแรงดึงต่ำ ไม่ทนต่อน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วเช่นเดียวกับยาง NR รวมทั้งยังเสื่อมสภาพได้เร็วเหมือนยางที่ไม่อิมิตัวชนิดอื่นๆ และยางยังมีสมบัติเหนียวติดตัว (ในสภาพที่ยังไม่คงรูป) อีกด้วย ส่วนใหญ่นิยมนำยาง BR ไปใช้ในการผลิตดอกยางล้อรถยนต์ ใส้ในลูกกอล์ฟ ลูกฟุตบอล ยางพื้นรองเท้า สายพานลำเลียง ยางกันกระแทก สายพานส่งกำลัง และยางกันสะเทือน เป็นต้น

1.2.7 ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนโมโนเมอร์ (ethylene propylene diene rubber; EPDM)

ยาง EPDM เป็นยางที่สังเคราะห์จากโมโนเมอร์ของเอทิลีน โพรพิลีน และไดอีน มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน ออกซิเจน โอโซน และสารเคมี เป็นยางที่มีความยืดหยุ่น มีความเป็นฉนวน และมีความต้านทานต่อการล้าตัวค่อนข้างสูง สามารถนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 150°C จึงนิยมใช้ในการผลิตท่อเครื่องซักผ้า ยางหุ้มท่อแอร์ สายพานลำเลียง แผ่นยางกันน้ำ แผ่นยางบุหลังคา ฉนวนหุ้มสายเคเบิล รวมถึงชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น ยางขอบหน้าต่าง ยางขอบประตู แก้มยาง ท่อยางหม้อน้ำ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ยาง EPDM เป็นยางที่มีสมบัติเหนียวติดตัว มีความทนต่อแรงดึงต่ำ และไม่ทนน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว

1.2.8 ยางซิลิโคน (silicone rubber; Q)

ยาง Q จัดเป็นยางชนิดพิเศษที่มีสมบัติเด่น คือ มีความทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ออกซิเจน และโอโซนสูงมาก จึงสามารถใช้งานในที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำมากๆ ได้ ยาง Q มีแรงดึงดูระหว่างโมเลกุลต่ำ ส่วนใหญ่จึงอยู่ในรูปของเหลวที่มีความหนืดสูงหรืออยู่ในรูปของแข็งที่มีความหนืดต่ำ สามารถอัดตัวได้มาก (highly compressible) และยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ง่าย นอกจากนี้ยางชนิดนี้ต้องวัลคาไนซ์ด้วยระบบเพอร์ออกไซด์ จึงทำให้ยางมีความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาด และความต้านทานการขีดถูต่ำมาก ทนน้ำมันได้ในระดับปานกลาง

ยาง Q มีหลายชนิด เช่น MQ (ไดเมทิลซิลิโคน) VMQ (ไดเมทิลไวนิลซิลิโคน) PMQ (ไดเมทิลฟีนิลซิลิโคน) PVMQ (ไดเมทิลไวนิลฟีนิลซิลิโคน) รวมถึงยางฟลูออโรซิลิโคนหรือ FVMQ ซึ่งเป็นยางที่มีทั้งหมู่ไวนิลเมทิล และหมู่ที่มีธาตุฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบ

ส่วนใหญ่นิยมใช้ในการผลิตยางที่เป็นชิ้นส่วนของยานอวกาศ เครื่องบิน และรถยนต์ ใช้ทำฉนวนหุ้มสายเคเบิล ยางโอริง หน้ากากออกซิเจน และใช้ในงานทางการแพทย์และเภสัชกรรม รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร

1.2.9 ยางฟลูออโรคาร์บอน (fluorocarbon rubber; FKM)

ยาง FKM เป็นยางที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณสูง มีสมบัติเด่น คือ มีความเป็นขี้และมีความเสถียรสูงมาก จึงทนน้ำมันและตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ได้ดีเยี่ยม ทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน ออกซิเจน โอโซน เปลวไฟ และสารเคมีต่างๆ ได้อย่างดีเยี่ยมด้วย (ทนความร้อนได้สูงที่สุดในบรรดา ยางทั้งหมด) นอกจากนี้ ยังมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซที่ต่ำมากอีกด้วย อย่างไรก็ตาม ยางชนิดนี้ก็มีราคาที่สูงมาก และเป็นยางที่มีความยืดหยุ่นและมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่ายางไดอีนชนิดอื่นๆ

ยาง FKM สามารถใช้ในการผลิตปลอกหุ้มสายไฟหรือสายเคเบิล ในกรณีที่ต้องการความทนต่อความร้อน โอโซน สารเคมี และเปลวไฟสูงเป็นพิเศษ นอกจากนี้ ยังใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์อื่นๆ โดยเฉพาะชิ้นส่วนยานยนต์ (รวมถึงชิ้นส่วนของเครื่องบินและจรวด) ได้แก่ ท่อน้ำมันเชื้อเพลิง ยางโอริง ปะเก็น ยางซีล เป็นต้น

2. สารวัลคาไนซ์

สารวัลคาไนซ์ คือ สารที่ทำให้โมเลกุลยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ผ่านปฏิกิริยาเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีความยืดหยุ่นสูง และมีสมบัติที่เสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก

การวัลคาไนซ์ยางที่ใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบกำมะถัน ระบบเพอร์ออกไซด์ และระบบที่ใช้สารเคมีอื่นๆ

2.1 กำมะถัน (sulfur)

กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยางเพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สามารถเกิดขึ้นได้เร็ว และยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ระบบนี้นิยมใช้กับยางทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ เช่น SBR, IR, BR, NBR เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ระบบนี้ก็มีข้อจำกัดหลัก คือ ไม่สามารถใช้วัลคาไนซ์ยางที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล เช่น ยางซิลิโคน หรือ ยาง EPM ได้

2.2 เพอร์ออกไซด์ (peroxide)

แม้ว่าการวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์จะสามารถใช้ได้ดีกับยางส่วนใหญ่ (ทั้งที่มีพันธะคู่และไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล) แต่เนื่องจากระบบนี้มีต้นทุนสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตต่ำกว่ายางที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ประกอบกับเพอร์ออกไซด์จัดเป็นสารเคมีที่ค่อนข้างอันตราย การขนย้ายและการเก็บรักษาต้องทำด้วยความระมัดระวัง ดังนั้นการวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์นั้นจึงนิยมใช้กับยางที่ไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล (เช่น EPM, EVA, CPE หรือ Q เป็นต้น) หรือยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำมากเท่านั้น (เช่น HNBR, EPDM) สำหรับยางอื่นๆ นิยมวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันมากกว่า ยกเว้นกรณีที่ต้องการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ทนต่อความร้อนได้ดีและ/หรือมีค่าการเสีรूपลาเวลหลังกด (compression set) ต่ำเท่านั้น

2.3 สารเคมีอื่นๆ

นอกจากระบบหลักๆ 2 ระบบดังกล่าวมาแล้ว ยังมีการนำสารวัลคาไนซ์ชนิดอื่นๆ มาใช้ในการคงรูปด้วยเช่นกัน แต่มีการใช้น้อยหรือใช้ในกรณีที่เป็น เช่น การใช้โลหะออกไซด์ (แมกนีเซียมออกไซด์ร่วมกับซิงก์ออกไซด์) ในการคงรูปของยางคลอโรพรีน (chloroprene; CR) หรือการใช้สารประกอบในกลุ่มควิโนนไดออกไซม์นิยมใช้ในการวัลคาไนซ์ยาง IIR เป็นต้น

3. สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerators)

สารตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางปริมาณเล็กน้อยเพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้ยางวัลคาไนซ์ให้เร็วขึ้น ทำให้ลดเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ลง และทำให้ยางวัลคาไนซ์มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ซึ่งการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยานี้เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน ปัจจุบันสามารถแบ่งกลุ่มของสารตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้เป็นหลายกลุ่ม ดังนี้

3.1 เมอร์แคปโต (mercapto)

สารตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ใช้ได้ดีกับยางแทบทุกประเภท ทำให้ยางมีระยะเวลาสกร์ชสั้นและมีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ปานกลาง ยางวัลคาไนซ์ที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความทนทานต่อความร้อนสูง ตัวอย่างที่สำคัญของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มเมอร์แคปโตนี้ ได้แก่ เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล (2-mercaptobenzothiazole; MBT) และไดเบนโซไทอะโซลไดซัลไฟด์ (dibenzothiazyl disulfide; MBTS)

3.2 เบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (benzothiazole sulfenamide)

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ทำให้ยางมีระยะเวลาสกรอชที่ยาวขึ้น แต่ให้อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูง และให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง ดังนั้น ยางวัลคาไนซ์ที่ได้จึงมีความแข็งแรงสูง มีความยืดหยุ่นดี และมีความต้านทานต่อการล้าตัวสูง

ตัวอย่างที่สำคัญของสารเคมีในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide; CBS) บิวทิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N-tert.butyl-2-benzothiazole sulfonamide; TBBS) ไดไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N,N'-dicyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide; DCBS) และ มอโฟลิโนโรโอเบนโซไทอะโซล (2-(4-morpholiniothio) benzothiazole; MBS) เป็นต้น

3.3 ไดไทโอคาร์บาเมต (dithiocarbamates)

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพสูงมากในการเร่งอัตราเร็วของการวัลคาไนซ์ ทำให้ยางมีระยะเวลาสกรอชสั้นและเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อได้รับการวัลคาไนซ์นานเกินไป ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมาก และไม่ทำให้สีของยางเปลี่ยนแปลงไป จึงสามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้อย่างหลากหลาย รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานในทางการแพทย์ เกษษกรรม หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ตัวอย่างของสารเคมีในกลุ่มนี้ ได้แก่ ซิงก์ไดเมทิลไดไทโอคาร์บาเมต (zinc dimethyldithiocarbamate; ZDMC) ซิงก์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (zinc diethyldithiocarbamate; ZDEC) และซิงก์ไดเบนซิลไดไทโอคาร์บาเมต (zinc dibenzylthiocarbamate; ZBEC) เป็นต้น

3.4 ไทยูแรม (thiurams)

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไทยูแรมมีประสิทธิภาพในการเร่งอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูงมากในขณะที่ให้ระยะเวลาสกรอชที่ยาวกว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไดไทโอคาร์บาเมตเล็กน้อย ตัวอย่างที่สำคัญของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ ได้แก่ เทตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (tetramethylthiuram disulfide; TMTD) และ เทตระเมทิลไทยูแรมโมนอสัลไฟด์ (tetramethylthiuram monosulfide; TMTM) และ เทตระเบนซิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (tetrabenzylthiuram disulfide; TBzTD) เป็นต้น

3.5 กัวนิดีน (guanidines)

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำจึงไม่นิยมนำไปใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิ แต่จะนำไปใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิในกลุ่มอื่นๆ ตัวอย่างที่สำคัญที่สุดของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไดฟีนิลกัวนิดีน (diphenylguanidine; DPG) ไดโทลิลกัวนิดีน (di-o-tolylguanidine; DOTG) และโทลิลไบกัวไนด์ (o-tolylbiguanide; OTBG)

อย่างไรก็ตาม ผู้ออกสูตรเคมียางส่วนใหญ่มักใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดหรือมากกว่า เพื่อให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดทำงานแบบเสริมกัน (synergistic effect) ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางมีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์

สูงขึ้น เรียกสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณมากกว่าว่า “สารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิ (primary accelerator)” และเรียกสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณน้อยกว่าว่า “สารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิ (secondary accelerator)”

4. สารกระตุ้นและสารหน่วงปฏิกิริยา (activators and retarders)

4.1 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา คือ สารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้นให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดียิ่งขึ้น สารกระตุ้นปฏิกิริยาสำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ ซิงก์ออกไซด์ และกรดสเตียริก โดยทั่วไป นิยมใช้ซิงก์ออกไซด์ในปริมาณ 2-5 phr ร่วมกับกรดสเตียริกในปริมาณ 1-2 phr

4.2 สารหน่วงปฏิกิริยา (retarders)

สารหน่วงปฏิกิริยา คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อยืดระยะเวลาสกรอซ ทำให้ลดโอกาสของการเกิดยางตายทั้งในระหว่างการเก็บรักษายางคอมพาวด์และในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ตัวอย่างที่สำคัญของสารหน่วงปฏิกิริยา ได้แก่

1) สารหน่วงปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรด เช่น พะทาลิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) กรดซาลิไซลิก (salicylic acid) กรดเบนโซอิก (benzoic acid) และกรดมาลิก (maleic acid)

2) ไซโคลเฮกซิลไทโอพะทาลิไมด์ (cyclohexyl-N-thiophthalimide; CTP) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า PVI (pre-vulcanization inhibitor) สารหน่วงชนิดนี้เป็นสารหน่วงที่เพิ่มระยะเวลาสกรอซของยางคอมพาวด์ โดยไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราเร็วของการวัลคาไนซ์ซึ่งต่างจากสารหน่วงปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรด

5. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradants)

สารป้องกันการเสื่อมสภาพเป็นสารเคมีที่เติมลงไปในส่วนผสมเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เติมลงไปปริมาณ 1-3 phr สารป้องกันการเสื่อมสภาพมีหลายชนิดทั้งที่เปลี่ยนสียาง เช่น กลุ่มอนุพันธ์ของเอมีน (amine derivatives) และไม่เปลี่ยนสียาง เช่น กลุ่มอนุพันธ์ของฟีนอล (phenol derivatives) โดยทั่วไป สารป้องกันการเสื่อมสภาพที่เปลี่ยนสียางอย่างรุนแรงจะมีประสิทธิภาพในการปกป้องยางสูงกว่าสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่ไม่เปลี่ยนสียาง ตัวอย่างที่สำคัญของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ได้แก่ ไอโซโพรพิลพินิลพินิลลีนไดเอมีน (N-Isopropyl-N'-phenyl-p-phenylenediamine; IPPD) ไดมิลบิวทิลพินิลพินิลลีนไดเอมีน (N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine; 6PPD) พอลิเมอร์ของ ไตรเมทิลไดไฮโดรควินอลีน (2,2,4-Trimethyl-1,2-dihydroquinoline; TMQ) ไดบิวทิลครีโซล (2,6-Di-tert.butyl-p-cresol; BHT) และ สไตรีเนตฟีนอล (Styrenated phenol; SPH) เป็นต้น

6. สารตัวเติม (fillers)

สารตัวเติม คือ องค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต หรือเพื่อลดต้นทุน ฯลฯ สารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกตามประสิทธิภาพของการเสริมแรงได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

- 1) สารตัวเติมเสริมแรง ได้แก่ เขม่าดำ และซิลิกา
- 2) สารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง ได้แก่ ดินขาว ทัลคัม แคลเซียมคาร์บอเนต ฯลฯ

6.1 เขม่าดำ (carbon black)

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง มีหลายเกรด โดยแต่ละเกรดจะมีสมบัติพื้นฐานโดยเฉพาะขนาดของอนุภาคปฐมภูมิ พื้นที่ผิว และโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังนั้น เขม่าดำแต่ละเกรดจึงมีความสามารถในการเสริมแรงในยางได้ไม่เท่ากัน การเลือกใช้เกรดของเขม่าดำให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์จึงเป็นเรื่องที่สำคัญ

6.2 ซิลิกา (silica)

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมอีกชนิดหนึ่งที่ยอมรับใช้กันมากในอุตสาหกรรมยาง โดยเฉพาะในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความโปร่งแสงและมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ยางพื้นรองเท้า เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (หมู่ -OH) หรือหมู่ซิลานอลอยู่ในปริมาณมาก ทำให้มีความเป็นขั้วสูง ซิลิกาจึงแตกตัวและเข้ากับยางที่ไม่มีขั้วได้ยาก นอกจากนี้ หมู่ซิลานอลดังกล่าวยังสามารถดูดซับสารกระตุ้นปฏิกิริยา ทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ได้ช้าลงและมีระดับของการวัลคาไนซ์ต่ำลง ดังนั้นจึงต้องแก้ปัญหาด้วยการเติมสารเคมีที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ง่ายกับหมู่ซิลานอล เช่น ไดเอทิลีนไกลคอล (DEG) โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) ไทโรเอทานอลามีน (triethanolamine) หรือเฮกซะเมทิลีนเททระมีน (hexamethylene tetramine, HEXA) รวมถึงการเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น DPG หรือ DOTG ลงไปในสูตรเคมียางด้วย

นอกจากนั้น ยังต้องมีการเติมสารเคมีที่เรียกว่า สารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent) ลงไปเพื่อเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา ทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่ายยิ่งขึ้น กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างดีขึ้น และยางวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลและพลวัตดีขึ้น

ตัวอย่างของสารคู่ควบไซเลนที่ใช้กันมาก ได้แก่ ไทโรเอทอกซีไซลิลโพรพิลเททระซัลไฟด์ (bis-(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide; Si-69) เมอร์แคปโตโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (mercaptopropyl-trimethoxysilane; A-189) ไทโอไซยาเนโตโพรพิลไทโรเอทอกซีไซเลน (3-thiocyanato-propyl-triethoxysilane; Si-264) เป็นต้น

6.3 สารตัวเติมอื่นๆ

สารตัวเติมอื่นๆ นอกเหนือจากเขม่าดำ และ ซิลิกา ได้แก่ ดินขาวหรือเคลล์ (clay) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ทัลคัม (talcum) ซึ่งสารเหล่านี้ไม่เสริมแรงจนถึงเสริมแรงได้ปานกลางขึ้นกับขนาดของอนุภาค แต่จะช่วยลดต้นทุน และทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างง่ายดาย

7. สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (plasticizers and processing aids)

7.1 สารทำให้ยางนิ่ม (plasticizers)

สารทำให้ยางนิ่มหรือ “พลาสติกไซเซอร์” หมายถึง สารเคมีที่เติมลงไปนยางแล้วทำให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดียิ่งขึ้นหรือมีความเหนียวต่ำลง ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างง่ายดายและรวดเร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้จะช่วยลดความเหนียวของยางคอมพาวด์แล้ว สารทำให้ยางนิ่มยังช่วยปรับปรุงสมบัติความเหนียวติด ทำให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น และช่วยปรับปรุงสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำของยางได้ด้วย

การเลือกใช้นิคมของสารทำให้ยางนิ่มจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยหลายอย่างประกอบกัน เช่น ความเข้ากันได้กับยาง ประสิทธิภาพ การตกสี และราคา สารทำให้ยางนิ่มสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายกลุ่มดังนี้

7.1.1 น้ำมันมิเนอร์ล (mineral oils)

น้ำมันมิเนอร์ลจัดเป็นสารทำให้ยางนิ่มกลุ่มที่มีความสำคัญมากที่สุดเพราะมีราคาถูกและสามารถผสมเข้ากับยางได้หลากหลายชนิด สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มย่อยตามลักษณะโครงสร้างเคมี คือ น้ำมันพาราฟินิก (paraffinic oil) น้ำมันแนฟเทนิค (naphthenic oil) และน้ำมันอะโรมาติก (aromatic oil)

7.1.2 ไชพาราฟิน (paraffin wax)

ไชพาราฟินมีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายน้ำมันพาราฟินิกแต่น้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า จึงเปลี่ยนสภาพกลายเป็นของแข็ง ไชพาราฟินเกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำหรือมีจุดหลอมเหลวต่ำสามารถใช้เป็นสารทำให้ยางนิ่มหรือเป็นสารช่วยในกระบวนการผลิตได้ ส่วนไชพาราฟินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนิยมใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซน

7.1.3 สารทำให้ยางนิ่มสังเคราะห์ (synthetic plasticizers)

สารกลุ่มนี้นิยมใช้น้อยเพราะมีราคาค่อนข้างสูง จึงนำไปใช้กับยางบางประเภทที่ไม่สามารถเข้ากันได้หรือเข้ากันได้น้อยกับน้ำมันมิเนอร์ล สารทำให้ยางนิ่มสังเคราะห์นอกจากจะทำให้ความเหนียวของยางลดลงแล้ว ยังช่วยปรับปรุงสมบัติความเหนียวติด และไม่ทำให้ยางเปลี่ยนสี แต่ส่วนใหญ่จะทำให้ยางวัลคาไนซ์มีความแข็งแรงลดลงและมีสมบัติแรงดึงที่ด้อยลง (ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ใช้) แต่ก็ทำให้ยางวัลคาไนซ์มีสมบัติการกระด้างกระดอนและสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำดีขึ้น ตัวอย่างที่สำคัญของสารทำให้ยางนิ่มสังเคราะห์ ได้แก่ คลอรีเนตพาราฟิน (chlorinated paraffins) ไทโอบิวทริกเอซิดบิวทิลเอสเทอร์ (thiobutyric acid butylester) ไดออกทิลเฟทาเลต (dioctylphthalate; DOP) ไดไอโซออกทิลเฟทาเลต (diisooctylphthalate; DIOP) และ ไดไอโซโนนิลเฟทาเลต (diisononylphthalate; DINP)

7.2 สารช่วยในกระบวนการผลิต (processing aids)

สารช่วยในกระบวนการผลิต คือ สารเคมีที่เติมเข้าไปในยางเพื่อช่วยให้การผสมหรือการขึ้นรูปเป็นไปได้ง่ายขึ้น เนื่องจากสารเคมีในกลุ่มนี้จะช่วยลดพลังงานที่ใช้ในการผลิต สารทำให้ยางนิ่มที่กล่าวถึงข้างต้นจึงถือเป็นส่วนหนึ่งของสารช่วยในกระบวนการผลิตด้วย แต่นอกจากสารทำให้ยางนิ่มแล้ว ยังมีสารช่วยในกระบวนการผลิตอื่นๆ ที่เติมลงไปในยางเพื่อจุดประสงค์เฉพาะบางอย่างที่ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ง่ายขึ้น ตัวอย่างของสารช่วยในกระบวนการผลิตเหล่านี้ ได้แก่

7.2.1 สารทำให้เหนียวติด (tackifiers)

สารทำให้เหนียวติดเป็นสารเคมีที่ช่วยปรับปรุงสมบัติความเหนียวติดของยางสังเคราะห์ (ทำให้สามารถนำยางส่วนต่างๆ มาประกอบกันได้ดียิ่งขึ้น) ตัวอย่างที่สำคัญของสารทำให้เหนียวติด ได้แก่ คูมาโรนเรซิน อินดีนเรซิน และคูมาโรน-อินดีนเรซิน ปีโตรเลียมเรซิน ฟีนอลิกเรซิน และโคเรซิน

7.2.2 เพปไทเซอร์ (peptizers)

เพปไทเซอร์เป็นสารที่เติมเข้าไปในช่วงขั้นตอนของการบดย่อยยาง NR เพื่อทำให้ยาง NR มีความหนืดลดลงเร็วขึ้น จึงช่วยลดระยะเวลาและพลังงานในการบดย่อยยาง ตัวอย่างของเพปไทเซอร์ ได้แก่ Zinc-2-benzamidothiophenate (Pepton 65) และ Zinc salt of pentachlorothiophenol (Renacit IV) เป็นต้น

7.2.3 แฟกทิกซ์ (factice)

แฟกทิกซ์เป็นสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อจุดประสงค์เฉพาะบางอย่าง เช่น ต้องการประหยัดพลังงานในระหว่างการผลิต หรือต้องการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ยางคอมพาวด์ (green strength) เพิ่มความเสถียรทางรูปร่างให้แก่ยางคอมพาวด์ที่ได้รับการขึ้นรูปด้วยการเอ็กซ์ทรูดและช่วยทำให้พื้นผิวยางที่ขึ้นรูปได้มีความเรียบมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การเติมแฟกทิกซ์ลงไปจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลง โดยเฉพาะความต้านทานต่อการขัดถู

8. สารอื่นๆ)

8.1 สี (pigments)

สีที่นิยมใช้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ สีอินทรีย์ และสีอนินทรีย์ สีอินทรีย์ให้สีที่มีความสว่างสดใสน้อยกว่าสีอนินทรีย์ แต่มีความทนทานต่อสภาพอากาศและสารเคมีสูงกว่าสีอนินทรีย์มากและยังมีราคาถูกกว่าอีกด้วย ตัวอย่างของสีอินทรีย์ที่ใช้กันมาก ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide, TiO_2) ให้สีขาว เหล็กออกไซด์ (iron oxides) ให้สีโทนแดง โครเมียมออกไซด์ (chromium oxide) ให้สีโทนเขียวและเหลือง-เขียว แคดเมียมซัลไฟด์ (cadmium sulfide) ให้สีโทนเหลือง ส้ม และแดง

สีอินทรีย์แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพสูงและให้สีที่สว่างสดใสกว่าสีอนินทรีย์ แต่ก็มีข้อเสียหลักคือไม่ทนต่อความร้อน ไขมัน กรด และด่าง มีราคาแพง และสีบางตัวยังอาจก่อให้เกิดปัญหาการบวมได้อีกด้วย ตัวอย่างของสีอินทรีย์ที่นิยมใช้ ได้แก่ azodyes (สีโทนส้ม) และ phthalocyanide dyes (สีโทนน้ำเงินและเขียว)

8.2 สารทำให้เกิดฟอง (blowing agents)

สารทำให้เกิดฟอง คือ สารที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง แต่จะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงและปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในช่วงก่อนหรือในระหว่างการเกิดปฏิกิริยารวัลคาไนซ์ ก๊าซที่ปล่อยออกมาจะทำให้ยางมีรูพรุนหรือมีฟองกระจายอยู่ทั่วไปเรียกว่ายางฟองน้ำ (sponge) ตัวอย่างของสารทำให้เกิดฟอง ได้แก่ โซเดียมไบคาร์บอเนต (sodium bicarbonate) เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (azodicarbonamide; ADC) เบนซีนซัลโฟไฮไดรไซด์ (benzenesulfohydrazide; BSH) เบนซีนไดซัลโฟไฮไดรไซด์ (benzene-1,3-disulfohydrazide) และไดไนโตรโซเพนตะเมทิลีนเทตระมีน (N,N'-dinitrosopentamethylenetetramine; DNPT)

8.3 สารหน่วงไฟ (flame retardants)

สารหน่วงไฟ เป็นสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อช่วยหน่วงการติดไฟของผลิตภัณฑ์ โดยสารเคมีนี้จะสลายตัวให้แก๊ส หรือสารที่ไม่ติดไฟเมื่อได้รับความร้อน ตัวอย่างสารหน่วงการติดไฟ ได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) และแอนติโมนีออกไซด์ (Sb_2O_3)

8.4 สารดูดความชื้น (desiccants)

สารดูดความชื้น คือ สารที่เติมลงไปเพื่อกำจัดความชื้นที่มีอยู่ในยางให้หมดไปก่อนการวัลคาไนซ์ ทั้งนี้เมื่อยางคอมพาวด์ได้รับความร้อนสูงๆ ความชื้นที่มีอยู่ในยางจะระเหยกลายเป็นไอทำให้เกิดรูพรุนหรือฟองอากาศขึ้น โดยเฉพาะที่ขึ้นรูปด้วยวิธีเอ็กซ์ทรูด ซึ่งยางมักจะทำการวัลคาไนซ์ด้วยการใช้อุโมงค์ลมร้อน (hot air tunnel) หรืออ่างเกลือหลอม (salt bath) ตัวอย่างสารดูดความชื้น เช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO)

ตัวอย่างการออกสูตรเคมียาง

ผลิตภัณฑ์: ยางกันกระแทกรถยนต์

ข้อกำหนด: สีดำ ความแข็ง (65 ± 3) IRHD ความแข็งแรงปานกลาง ทนความร้อน/โอโซน ความกระด้างตัวสูง

สภาวะการใช้งาน: สัมผัสแดด ฝน ไม่สัมผัสน้ำมัน/สารเคมี

ต้นทุน: ต่ำ

การออกสูตรเคมียางเริ่มจากการเลือกชนิดของยางที่ใช้ ในที่นี่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่ทนความร้อน/โอโซน แต่ไม่สัมผัสน้ำมัน/สารเคมี ราคาไม่แพงมาก จึงเลือกใช้ยาง EDPM

ต่อมาพิจารณาเลือกชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์เป็นสีดำ จึงเลือกใช้เซม่าดำได้ และเนื่องจากต้องการความแข็งแรงปานกลาง ดังนั้นจึงเลือกใช้สารตัวเติมที่เสริมแรง (เซม่าดำ) ร่วมกับสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง (แป้ง) เพื่อลดต้นทุนได้

ปัจจัยถัดมาที่ต้องพิจารณา คือ การเลือกระบบการวัลคาไนซ์ เนื่องจากยาง EPDM สามารถวัลคาไนซ์ได้ทั้งกำมะถันและเพอร์ออกไซด์ แต่ผลิตภัณฑ์นี้ไม่ได้สัมผัสอุณหภูมิสูงมากนัก จึงไม่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทนความร้อน ดังนั้นไม่จำเป็นต้องใช้ระบบเพอร์ออกไซด์ แต่ผลิตภัณฑ์ต้องการความแข็งแรงปานกลางและมีความกระด้างต่ำสูง ดังนั้น จึงเลือกวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันแบบ CV

สำหรับสารเคมีอื่นๆ ที่ต้องเติมลงไปในส่วน ได้แก่ สารตัวเร่งปฏิกิริยา สารกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา สารป้องกันการเสื่อมสภาพ เป็นต้น โดยมีสูตรเบื้องต้นเป็นดังนี้

สูตรผสมเคมียาง	ปริมาณ (phr)
ยาง EPDM	100
ซิงก์ออกไซด์	3
กรดสเตียริก	1
เขม่าดำ (N330)	30
แคลเซียมคาร์บอเนต	70
น้ำมันแฉฟีนิก	2
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ TMQ	1
สารตัวเร่งปฏิกิริยาหลัก TBBS	1
สารตัวเร่งปฏิกิริยาหลัก TBBS	0.3
กำมะถัน	2
รวม	210.3

ที่มา: ภูซังค์ ทับทอง, เอกสารประกอบการอบรมหลักสูตร เทคโนโลยีการผลิตยางคอมพาวด์เบื้องต้น 26-27 มิถุนายน 2557

เทคโนโลยีการผสมยาง (mixing)

เมื่อออกสูตรเคมียางเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนถัดมาคือการผสมยางกับสารเคมียางเข้าด้วยกันโดยใช้เครื่องผสมซึ่งอาจจะเป็นเครื่องผสมระบบปิดหรือระบบเปิดก็ได้ ว่างที่ผ่านการผสมสารเคมีแล้วจะเรียกว่า “ยางคอม

พาวด์ (rubber compound)” การผสมยางนี้ก็เป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากถ้าสารเคมีที่เติมลงไปในยางกระจายตัว (distribution) หรือแตกตัว (dispersion) ได้ไม่ดี ก็ส่งผลโดยตรงต่อความสม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการใช้กระบวนการผสมที่แตกต่างกัน เช่น การใช้เครื่องผสมคนละชนิดกัน การใช้สภาวะการผสมที่แตกต่างกัน หรือแม้แต่การจัดลำดับการเติมสารเคมีลงไปเครื่องผสมที่แตกต่างกัน ย่อมจะส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติที่แตกต่างกันด้วย แม้ว่าจะเป็นยางสูตรเดียวกันก็ตาม ดังนั้นผู้ผลิตจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของการผสมโดยนำยางคอมพาวด์ที่ได้จากการผสมแต่ละครั้ง (batch) ไปทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) และสมบัติการคงรูปของยาง (cure characteristics) เพื่อควบคุมคุณภาพให้คงที่

เนื่องจากเทคโนโลยีการผสมยางให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพคงที่ตามที่ต้องการนั้นมีปัจจัยที่ต้องพิจารณามากมายและต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในกลไกการผสม อันได้แก่ การเข้าไปในเนื้อยางของสารตัวเติม (incorporation หรือ wetting) การกระจายตัวของสารตัวเติมในยาง (distribution) และการแตกตัวของสารตัวเติม (dispersion) รวมไปถึงปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ปริมาณที่ผสม ตลอดจนลำดับการใส่สารเคมี ที่มีต่อการใช้เครื่องผสมยางต่างชนิดกัน (เครื่องผสมระบบปิด เครื่องผสมระบบเปิด หรือเครื่องผสมแบบต่อเนื่อง) ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงตัวอย่างเครื่องผสมยางแต่เพียงคร่าวๆ เพื่อให้พอทราบถึงลักษณะการทำงานของเครื่องผสมยาง

เครื่องผสมยาง

เครื่องผสมยางแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

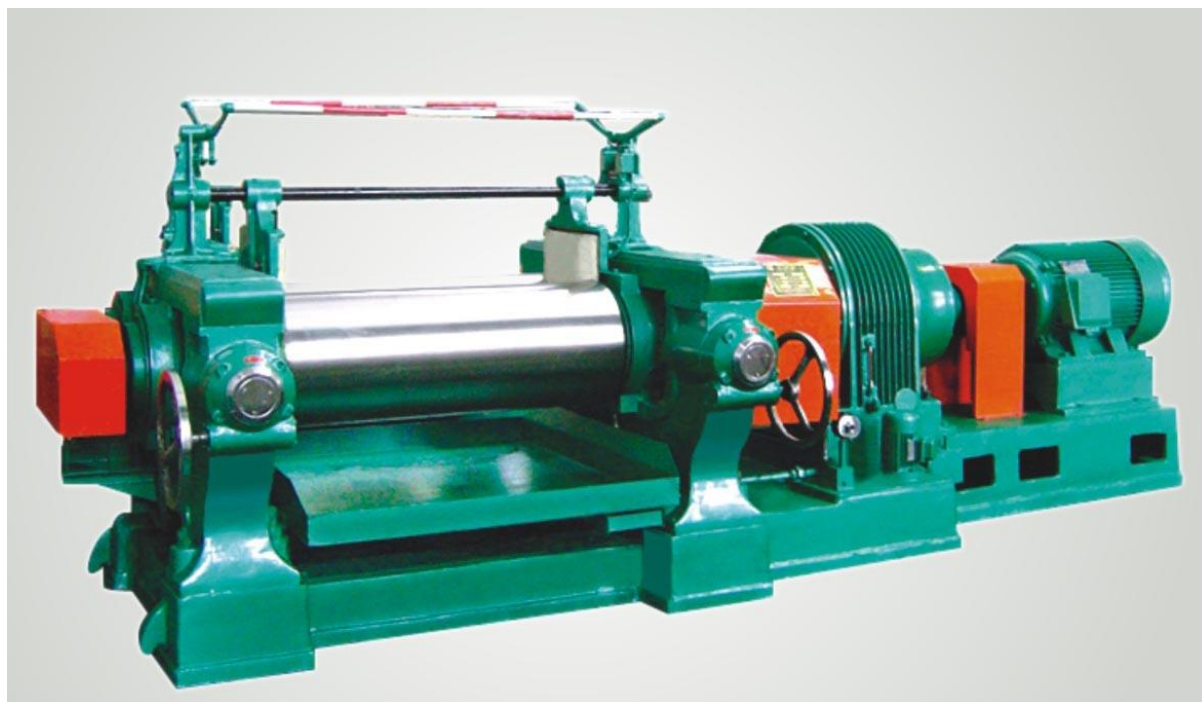
1. เครื่องผสมยางแบบไม่ต่อเนื่องหรือแบบแบตช์ (batch mixer) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ระบบ ได้แก่
 - 1.1 ระบบเปิด ได้แก่ เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill)
 - 1.2 ระบบปิด แบ่งตามลักษณะของโรเตอร์ ออกเป็น 4 แบบ ได้แก่
 - 1.2.1 เครื่องผสมระบบปิดแบนบูรี (Banbury internal mixer)
 - 1.2.2 เครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์มิกซ์ (Intermix internal mixer)
 - 1.2.3 เครื่องผสมระบบปิดแบบที่ปรับระยะห่างระหว่างโรเตอร์ได้ (variable intermeshing clearance internal mixer)
 - 1.2.4 เครื่องผสมระบบปิดอื่นๆ ได้แก่ เครื่องนวดยางหรือนีดเตอร์ (kneader)
2. เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง (continuous mixer) ได้แก่ เครื่องผสมแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (single screw) เครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (twin screw)

เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill)

เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้งเป็นเครื่องผสมระบบเปิด ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก เรียงตัวในแนวนอนขนานกัน หมุนเข้าหากันด้วยความเร็วต่างกัน ทำให้เกิดแรงเฉือนที่จำเป็นต่อการบดผสมยางกับสารเคมียาง ในการผสมยางกับสารเคมียางจะใส่ยางลงช่องระหว่างลูกกลิ้ง ยางจะถูกรีดออกมาเป็นแผ่นรอบลูกกลิ้งด้านหน้า

จากนั้นจึงเติมสารเคมียาง โดยผู้ผสมต้องทำการกรีดยางแผ่นและพับไปมาในขณะที่เติมสารเคมีลงไปเรื่อยๆ ซึ่งยางที่ถูกตัดพับจะถูกใส่กลับไปยังช่องระหว่างลูกกลิ้ง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะช่วยให้สารเคมีต่างๆ กระจายตัวเข้ากับเนื้อยางได้ดี เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้งใช้ผสมยางในปริมาณไม่มาก เนื่องจากต้องใช้ความชำนาญและกำลังคนในการผสม

รูปที่ 1 เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) [6]



เครื่องผสมระบบปิดแบบบูรี (Banbury internal mixer)

โดยทั่วไปเครื่องผสมระบบปิดมีองค์ประกอบที่สำคัญ 4 ส่วนได้แก่ ห้องผสม (chamber) ตัวบดผสมหรือโรเตอร์ (rotor) แท่งกดหรือแรม (ram) และระบบหล่อเย็น (cooling system) เครื่องผสมระบบปิดให้ประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการผสมมากกว่าการใช้เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้งเพราะสารเคมีไม่ฟุ้งกระจายระหว่างการผสม ลดการสูญเสียสารเคมีขณะผสม และลดการผิดพลาดเนื่องจากการใช้แรงงานคนในการผสม สามารถผสมยางกับสารเคมีได้ในปริมาณสูง เช่น 50-100 กิโลกรัม

โรเตอร์ทั้งสองของเครื่องผสมระบบปิดแบบบูรีจะเป็นแบบไม่คาบเกี่ยวกัน หรือที่เรียกว่า “non-interlocking” หรือ “non-intermeshing” หมุนด้วยอัตราเร็วที่ต่างกันขึ้นกับรุ่นของเครื่อง การทำงานของเครื่องผสมเพื่อให้เกิดการผสมคลุกเคล้าของยางกับสารเคมีส่วนใหญ่จะมาจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างปีกของโรเตอร์กับผนังของห้องผสม ยางและสารเคมีจะถูกบีบขนาดผสมกันในสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิของห้องผสมอย่างเหมาะสม ทำให้สารเคมีต่างๆ กระจายตัวในยางได้ดีขึ้น

รูปที่ 2 เครื่องผสมระบบปิดแบบบูรี (Banbury internal mixer) [7]



เครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์มีกซ์ (Intermix internal mixer)

เครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์มีกซ์มีองค์ประกอบสำคัญเหมือนกับเครื่องผสมระบบปิดแบบบูรี แต่โรเตอร์ทั้งสองของเครื่องผสมแบบนี้จะเป็นแบบคาบเกี่ยวกัน หรือที่เรียกว่า “intermeshing” หมุนด้วยอัตราเร็วที่เท่ากัน แรงเฉือนจะเกิดขึ้นที่บริเวณช่องว่างระหว่างปีกของโรเตอร์ ยางและสารเคมีจะถูกบีบอัดผสมคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกันในสถานะที่ควบคุมอุณหภูมิของห้องผสมและโรเตอร์ได้ดีกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบบูรี จึงมีประสิทธิภาพการผสมที่สูงมาก สารตัวเติมสามารถแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ดี แต่อย่างไรก็ตามโรเตอร์แบบ “intermeshing” นี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ทำให้อย่างคอมพาวด์ที่ได้จากการผสมในแต่ละครั้งมีปริมาณค่อนข้างน้อย จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยม

รูปที่ 3 เครื่องผสมยางระบบปิดแบบอินเตอร์มิกซ์ (Intermix internal mixer) [8]



เครื่องผสมระบบปิดแบบที่ปรับระยะห่างระหว่างโรเตอร์ได้ (variable intermeshing clearance internal mixer)

เครื่องผสมแบบนี้มีโรเตอร์เหมือนเครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์มิกซ์ แต่ผู้ผสมสามารถปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างโรเตอร์ทั้งสองระหว่างการผสมได้ เช่น ในช่วงแรกของการผสมตั้งระยะห่างระหว่างโรเตอร์ไว้ให้มาก จะทำให้ป้อนยางและสารเคมีเข้าไปในเครื่องได้ง่าย จากนั้นปรับลดระยะห่างระหว่างโรเตอร์เพื่อให้มีแรงเฉือนสูงขึ้น จะทำให้สารตัวเติมแตกตัวได้ดีขึ้น

รูปที่ 4 เครื่องผสมยางระบบปิดแบบที่ปรับระยะห่างระหว่างโรเตอร์ได้
(variable intermeshing clearance internal mixer) [9]



เครื่องนวดยางหรือนืดเตอร์ (kneader)

เครื่องนวดยางหรือนืดเตอร์เป็นเครื่องผสมระบบปิดชนิดอื่นๆ ที่มีการจำหน่ายในเชิงการค้าและมีการผลิตในประเทศแถบเอเชีย แม้ว่าเครื่องนวดยางจะมีหลักการทำงานคล้ายกับเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรี แต่รูปแบบของโรเตอร์แตกต่างจากโรเตอร์ของเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรีมาก ทำให้ประสิทธิภาพในการผสมต่ำกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรีมาก อย่างไรก็ตามเครื่องนวดยางมีราคาต่ำกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรีมาก จึงเป็นที่นิยมสำหรับผู้ประกอบการไทยปัจจุบัน

รูปที่ 5 เครื่องนวดยางหรือนีตเตอร์ (kneader) [10]



เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง (continuous mixer)

เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง (continuous mixer) ได้แก่ เครื่องผสมแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (single screw) เครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (twin screw) ตัวเครื่องสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณใหญ่ๆ ได้แก่

1. บริเวณที่ป้อนสาร (feed zone) ซึ่งจะประกอบด้วยถังป้อนสารที่มีลักษณะคล้ายกรวย (hopper)
2. บริเวณที่เกิดการผสม (mixing zone) คล้ายห้องผสมในเครื่องผสมระบบปิด
3. บริเวณที่ปล่อยยางออกจากเครื่อง (discharge zone)

ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น อัตรากำลังการผลิตซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าไปในเครื่อง การเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบจะทำให้ระยะเวลาที่ยางคอมพาวด์อยู่ในเครื่องผสมสั้นลง ทำให้ประสิทธิภาพในการผสมลดลง ยางคอมพาวด์ที่ได้จะมีระดับการกระจายตัวและการแตกตัวของสารตัวเติมที่ต่ำลง ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

รูปที่ 6 เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง (continuous mixer) [11]



การตรวจสอบคุณภาพของยางคอมพาวด์เบื้องต้น

เมื่อผสมยางคอมพาวด์เรียบร้อยแล้ว ผู้ผลิตควรตรวจสอบคุณภาพของยางคอมพาวด์เบื้องต้นเพื่อให้แน่ใจได้ว่ายางคอมพาวด์ที่ผลิตได้มีคุณภาพเป็นไปตามข้อกำหนดด้านคุณภาพตามที่ลูกค้าต้องการ นอกจากนี้ การตรวจสอบคุณภาพของยางคอมพาวด์อย่างสม่ำเสมอยังเป็นการช่วยควบคุมความสม่ำเสมอทางคุณภาพของการผลิตอีกด้วย โดยทั่วไป ผู้ผลิตควรตรวจสอบสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของยางคอมพาวด์ดังต่อไปนี้

1. ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)

ความหนืดมูนนี่เป็นหนึ่งในสมบัติที่สำคัญที่สุดของยางคอมพาวด์ที่ต้องตรวจสอบเพราะเป็นสมบัติที่บ่งชี้ความสามารถในการไหลหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางคอมพาวด์ ยางที่มีความหนืดต่ำจะไหลได้ง่ายทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างง่ายดายเช่นกัน

การวัดค่าความหนืดมูนนี่สามารถทำได้โดยใช้เครื่องทดสอบที่เรียกว่า “เครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer)” ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 7 ตัวเครื่องทดสอบประกอบด้วยโรเตอร์ที่วางอยู่ในช่องว่างระหว่างดาย 2 อัน คือ ดายบน (upper die) และดายล่าง (lower die) โดยโรเตอร์มี 2 ขนาดให้เลือกใช้ตามระดับความหนืดของยาง กล่าวคือถ้ายางที่ทดสอบมีความหนืดสูงก็ใช้โรเตอร์ขนาดเล็ก แต่ถ้ายางที่ทดสอบมีความหนืดปานกลางหรือต่ำก็ใช้โรเตอร์ขนาดใหญ่ ใส่ยางเข้าไปในช่องว่างระหว่างดายบนและดายล่าง ให้ความร้อนแก่ยาง (preheat time) 1 นาที เพื่อให้ยางมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิที่จะทดสอบ จากนั้นโรเตอร์จะเริ่มหมุนด้วยความเร็วประมาณ 2 รอบต่อนาทีทำให้เกิดแรงเฉือนระหว่างพื้นผิวของโรเตอร์และพื้นผิวของดาย แรงที่ใช้ในการหมุนโรเตอร์จะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนืดของยางคอมพาวด์ เครื่องจะบันทึกแรงบิดที่ใช้ในการหมุนโรเตอร์ตามเวลาและแปลงค่าที่ได้ให้อยู่ในรูปของ “Mooney units (MU) หรือ Mooney viscosity (MV)

scale” โดยส่วนใหญ่นิยมอ่านค่าความหนืดของยางหลังจากที่โรเตอร์หมุนไป 4 นาที ยกเว้นในกรณีของยางบิวไทล์ (IIR) และยางฮาโลบิวไทล์ (XIIIR) ซึ่งจะอ่านค่าความหนืดของยางหลังจากที่โรเตอร์หมุนไป 8 นาที

รูปที่ 7 เครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer)



สัญลักษณ์ที่ใช้ในการแสดงผลการทดสอบค่าความหนืดมูนนี่คือ 40 ML 1+4 (100 °C)

เมื่อ 40 คือค่าความหนืดที่วัดได้ในหน่วยมูนนี่

M มาจาก Mooney

L หมายถึงโรเตอร์ขนาดใหญ่ (large) แต่ถ้าเป็นโรเตอร์ขนาดเล็กจะใช้ S (small) แทน

1 คือระยะเวลาที่ให้ความร้อนแก่ยางก่อนการทดสอบ

4 คือระยะเวลาที่อ่านค่าความหนืด (มีค่าเท่ากับ 8 สำหรับยางบิวไทล์)

100°C คืออุณหภูมิของการทดสอบ (มีค่าเท่ากับ 125°C สำหรับยาง EPDM เป็นต้น)

2. ลักษณะการวัลคาไนซ์ (cure characteristics)

นอกจากสมบัติการไหลแล้ว ลักษณะการวัลคาไนซ์ เช่น ระยะเวลาสกอร์ช (scorch time) และระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ (curing time) ก็จัดเป็นสมบัติสำคัญของยางคอมพาวด์ที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิต เพราะถ้ายางเกิดการวัลคาไนซ์เร็วเกินไปหรือมีระยะเวลาสกอร์ชที่สั้นเกินไปก็อาจก่อให้เกิดปัญหาในระหว่างการผลิตขึ้นรูปได้ เช่น ยางไหลได้ไม่เต็มแม่พิมพ์ ดังนั้น ในการออกสูตรเคมียาง จึงต้องออกสูตรให้ยางคอมพาวด์มีระยะเวลาสกอร์ชที่ยาวเพียงพอที่จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิต และยางคอมพาวด์ก็ควรจะมีระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ที่สั้นเพื่อทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงและเพิ่มผลิตภาพการผลิต

ยิ่งไปกว่านั้น การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางยังเป็นหนึ่งในขั้นตอนของการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิตอีกด้วย เช่น หากมีการชั่งน้ำหนักของสารเคมีในกลุ่มที่ทำให้ยางวัลคาไนซ์ผิดหรืออาจเติมสารเคมีดังกล่าวผิดขั้นตอนนี้ก็จะส่งผลทำให้ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางผิดปรกติได้ ปัจจุบัน เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางมี 3 ชนิด ได้แก่ เครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer) เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating disc rheometer; ODR) และเครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่ (Moving die rheometer; MDR)

2.1 การทดสอบด้วยเครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์

แม้ว่าเครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์จะได้รับการออกแบบมาเพื่อวัดค่าความหนืดของยางมากกว่าที่จะใช้ในการศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ แต่เนื่องจากค่าของความหนืดของยางแปรผันโดยตรงกับระดับของการวัลคาไนซ์ ด้วยเหตุนี้ ผู้ประกอบการจึงสามารถนำเครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ไปใช้ในการศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางได้ด้วยเช่นกัน โดยทั่วไป การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางด้วยเครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์จะมีวิธีการทดสอบเช่นเดียวกับการวัดค่าความหนืดมูนนี่ แต่จะแตกต่างกันตรงที่การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์จะเป็นการทดสอบแบบต่อเนื่องและนิยมทำการทดสอบที่อุณหภูมิสูงกว่า (เช่น ที่อุณหภูมิ 125°C หรือ 140°C เป็นต้น) ดัชนีการวัลคาไนซ์ (cure index) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{สำหรับโรเตอร์ขนาดใหญ่} : \Delta t_L = t_{35} - t_5$$

$$\text{สำหรับโรเตอร์ขนาดเล็ก} : \Delta t_S = t_{18} - t_3$$

โดย t_3 คือ เวลาที่ยังมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นจากจุดต่ำสุด 3 หน่วย (สำหรับโรเตอร์ขนาดเล็ก)

t_5 คือ เวลาที่ยังมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นจากจุดต่ำสุด 5 หน่วย (สำหรับโรเตอร์ขนาดใหญ่)

t_{18} คือ เวลาที่ยังมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นจากจุดต่ำสุด 18 หน่วย (สำหรับโรเตอร์ขนาดเล็ก)

t_{35} คือ เวลาที่ยังมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นจากจุดต่ำสุด 35 หน่วย (สำหรับโรเตอร์ขนาดใหญ่)

อย่างไรก็ตาม ผู้ทดสอบควรตระหนักไว้ว่าเครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์สามารถนำไปใช้ในการศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางได้เฉพาะในช่วงต้นของการวัลคาไนซ์เท่านั้นเพราะเมื่อโรเตอร์หมุนไปเรื่อยๆ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะไปทำลายโครงสร้างตาข่าย 3 มิติที่เกิดจากวัลคาไนซ์ของยางซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบในช่วงท้ายมีความผิดพลาดสูง ด้วยเหตุนี้ การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางในปัจจุบันจึงนิยมใช้เครื่องรีโอมิเตอร์ (rheometer) ชนิดอื่นแทน

2.2 การทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating disc rheometer; ODR)

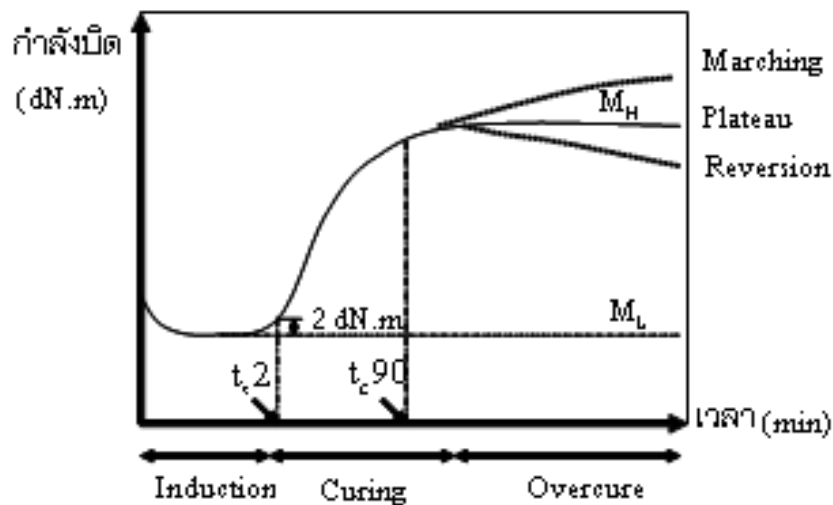
เครื่อง ODR เป็นเครื่องมือที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางโดยตรง ตัวเครื่องประกอบด้วยโรเตอร์ที่เคลื่อนที่อยู่ในช่องว่างระหว่างตายบนและตายล่างเช่นเดียวกับเครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ อย่างไรก็ตาม โรเตอร์ของเครื่อง ODR มีรูปร่างเป็นรูปโคนคู่ประกบ (biconical shape) และการ

เคลื่อนที่ของโรเตอร์ในระหว่างการทดสอบจะเป็นแบบแกว่ง (ไม่ใช่แบบหมุนเหมือนในกรณีของเครื่องมูนนี่วิสต์โคมิเตอร์) โดยการแกว่งของโรเตอร์จะเกิดขึ้นเป็นมุมแคบๆ (1° หรือ 3°) ด้วยความถี่ 1.67 Hz หรือ 100 รอบต่อนาทีเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการทำลายโครงสร้างตาข่าย 3 มิติของยางวัลคาไนซ์ จากนั้นเครื่องก็จะบันทึกแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาของการทดสอบซึ่งจะได้กราฟที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 8

รูปที่ 8 เครื่อง ODR [12]



รูปที่ 9 เส้นกราฟการวัลคาไนซ์ที่วัดได้จากเครื่อง ODR



จากรูป จะเห็นได้ว่าลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงใหญ่ๆ คือ

1. ช่วงเริ่มต้น (induction): เมื่อยางได้รับความร้อน ยางก็จะนิ่มลงทำให้แรงบิดลดลงในระยะแรก จนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิของยางเริ่มเข้าสู่สมดุล ความหนืดของยางก็จะมีค่าต่ำสุดและจะมีค่าคงที่อยู่ที่ ณ จุดนี้เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์ ใช้สัญลักษณ์ว่า M_L

2. ช่วงการวัลคาไนซ์ (curing): หลังจากที่ยางเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์ ความหนืดของยางก็จะเริ่มสูงขึ้น (แรงบิดจึงเริ่มสูงขึ้นตามเวลา) ระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มบิดตายจนถึงเวลาที่ยางเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์เรียกว่า “ระยะเวลาสกอร์ช (scorch time)” และใช้สัญลักษณ์เป็น t_s ในกรณีที่ใช้มุมแกว่งเท่ากับ 1° ค่าระยะเวลาสกอร์ชคือระยะเวลาที่ทำให้ค่าแรงบิดสูงกว่าจุดต่ำสุด 1 เดซินิวตัน-เมตร (dN.m) ใช้สัญลักษณ์ว่า t_{s1} แต่ในกรณีที่ใช้มุมแกว่งเท่ากับ 3° ค่าระยะเวลาสกอร์ชคือระยะเวลาที่ทำให้ค่าแรงบิดสูงกว่าจุดต่ำสุด 2 เดซินิวตัน-เมตร และใช้สัญลักษณ์ว่า t_{s2} ระยะเวลาสกอร์ชเป็นตัวบ่งชี้ถึงระยะเวลาที่ยางยังคงสามารถไหลขึ้นรูปได้ ณ อุณหภูมินั้นๆ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความปลอดภัยในกระบวนการผลิต

เมื่อทดสอบต่อไป ค่าแรงบิดก็จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามระดับของการวัลคาไนซ์จนกระทั่งถึงจุดที่การวัลคาไนซ์เกิดขึ้นสมบูรณ์ แรงบิด ณ จุดนี้จะมีค่าสูงที่สุดและใช้สัญลักษณ์ว่า M_H ซึ่งจะเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงค่าโมดูลัสเฉือนของยางวัลคาไนซ์ ณ อุณหภูมิของการทดสอบ

ตัวแปรสำคัญอีกตัวหนึ่งที่เป็นตัวบ่งชี้ลักษณะของการวัลคาไนซ์ยางคือ “ระยะเวลาของการวัลคาไนซ์ (curing time)” โดยทั่วไป ใช้สัญลักษณ์เป็น t_c เมื่อ x คือร้อยละการเพิ่มขึ้นของแรงบิดจากจุดต่ำสุด (M_L) เมื่อเปรียบเทียบกับจุดสูงสุด (M_H) ซึ่งค่า t_{c90} จัดเป็นค่า “ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ที่เหมาะสม (optimum curing time)” หมายถึงระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้ยางวัลคาไนซ์ไปร้อยละ 90 หรือระยะเวลาที่ทำให้แรงบิดมีค่าเท่ากับค่าแรงบิดต่ำสุดบวกด้วย 90% ของผลต่างระหว่างค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าแรงบิดสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากการวัลคาไนซ์ ณ จุดนี้จะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี ส่วนการวัลคาไนซ์ไปจนถึง 100% ส่วนใหญ่มักจะส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลบางประการของยางด้อยลง

t_{c90} สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$t_{c90} = \text{ระยะเวลาที่ทำให้แรงบิดมีค่าเท่ากับ } M_L + [90 (M_H - M_L)/100]$$

นอกจากตัวแปรต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่สามารถใช้แสดงลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง นั่นคือ ดัชนีอัตราการวัลคาไนซ์ (cure rate index; CRI) ซึ่งแสดงถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ที่สามารถคำนวณได้จากสมการ

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

3. ช่วงของการวัลคาไนซ์ที่มากเกินไป (overcure): เมื่อปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เกิดได้สมบูรณ์แล้ว แต่ยังคงทดสอบต่อไป ค่าแรงบิดหรือโมดูลัสของยางอาจจะคงที่ตามเวลา เรียกว่าเกิด “plateau” แต่ในบางกรณีอาจ

พบว่าค่าโมดูลัสของยางอาจจะสูงขึ้นเรื่อยๆ (เรียกว่าเกิด marching) หรืออาจจะมีความต่ำลง (เรียกว่าเกิด reversion) ก็ได้ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสูตรเคมีที่ใช้

2.3 การทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่ (Moving die rheometer; MDR)

ปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาเครื่องมือทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางอย่างต่อเนื่อง จนได้เป็นเครื่องมือทดสอบชนิดที่ไม่มีโรเตอร์เรียกว่า “rotorless curemeter” ตัวอย่างที่สำคัญของเครื่องมือวัดชนิดนี้ ได้แก่ เครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่หรือเครื่อง MDR ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยทั่วไป เครื่อง MDR มีหลักการทำงานและวิธีการทดสอบเหมือนกับเครื่อง ODR ยกเว้นเครื่อง MDR จะไม่มีโรเตอร์ (มีเพียงตายบนและตายล่าง) เมื่อเริ่มการทดสอบ ตายล่างจะแกว่งไป-มาเป็นมุมแคบๆ (ส่วนใหญ่จะตั้งไว้ที่ 0.5° ซึ่งต่ำกว่าเครื่อง ODR) ด้วยความถี่ 1.7 Hz จากนั้นเครื่องก็จะเริ่มบันทึกค่าแรงบิดที่เปลี่ยนไปตามเวลา ผลการทดสอบที่ได้จึงมีลักษณะเช่นเดียวกับผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง ODR แต่ค่าระยะเวลาสกอรัซที่วัดได้จากเครื่อง MDR คือระยะเวลาที่ทำให้ค่าแรงบิดสูงกว่าจุดต่ำสุด 1 เดซินิวตัน-เมตร โดยไม่ขึ้นอยู่กับมุมแกว่งของเครื่อง

รูปที่ 10 เครื่อง MDR [13]



ขั้นตอนอื่นๆ

หลังจากได้ยางคอมพาวด์และตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการนำยางคอมพาวด์ที่ได้มาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่างๆ ตามต้องการ ก่อนที่จะนำไปวัลคาไนซ์เพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. พรพรรณ นิธิอุทัย, “เอกสารประกอบการอบรมเทคโนโลยียางระยะสั้น เรื่อง เทคนิคการออกสูตรยาง”, 29 เมษายน ถึง 1 พฤษภาคม 2535, โรงแรมเอเชีย กรุงเทพฯ
2. พงษ์ธร แซ่อู๋, “ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน”, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, พิมพ์ครั้งที่ 2 มิถุนายน 2548.
3. พงษ์ธร แซ่อู๋, “สารเคมียาง”, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, พิมพ์ครั้งที่ 1 มิถุนายน 2548.
4. พงษ์ธร แซ่อู๋ และ ชาศริต สิริสิงห, “ยาง: กระบวนการผลิตและการทดสอบ”, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, พิมพ์ครั้งที่ 1 มิถุนายน 2550.
5. วราภรณ์ ขจรไชยกูล, “ผลิตภัณฑ์ยาง: กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี”, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, พิมพ์ครั้งที่ 2 กันยายน 2554.
6. <http://www.made-in-china.com/showroom/artificiallawn/product-detailBbkQgSeKZfYh/China-Two-Roll-Mixing-Mill-RM-OM-.html>
7. <http://www.farrel.com/products/F%20Series%20Banbury%20Mixer.pdf>
8. <http://www.farrel.com/products/intermix.pdf>
9. http://www.webalice.it/roberto.regalia/le_mie_publicazioni.html
10. <http://cnhitop.en.made-in-china.com/product/eMymHLwVXtpg/China-Rubber-Machinery-Dispersion-Mixer-Kneader-.html>
11. <http://www.farrel.com/products/9UM.pdf>
12. http://www.thru-med.com/eq2_Rubber_Oscillating.htm
13. http://www.sambosc.com/board/bbs/board.php?bo_table=product7&wr_id=1
14. <http://www.nb-jk.com/enp8.htm>
15. <http://www.karunanandpress.com/rubber-moulding-press.html>
16. http://www.diytrade.com/china/pd/10945198/Rubber_injection_moulding_machine.html
17. <http://www.ventmaster.com/p-cold-feed-rubber-extruder-machine-1265442.html>
18. <http://www.globalchemmade.com/company/8744/Equipments/9487.html>
19. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Autoclave_Laminacion_de_Vidrio.jpg
20. <http://bainasb.en.made-in-china.com/productimage/xqwJfAncTLWt-2f0j00uCdESzncSjkl/China-Salt-Bath-Continous-Curing-System.html>
21. http://www.alibaba.com/product-gs/517220670/Rubber_rotocure_rubber_machine_for_tire.html