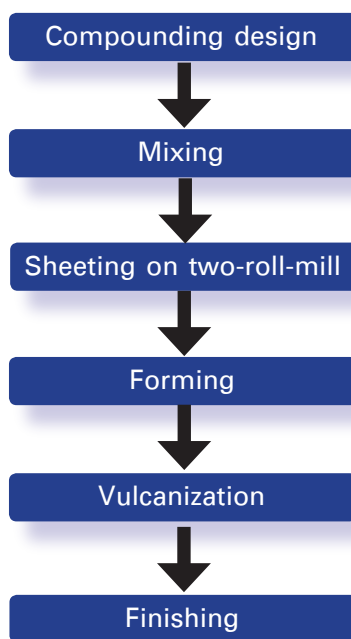


กระบวนการผลิต

เรียบเรียงโดย....ดร.พงษ์ธร แซ่ฮุย

จากที่กล่าวไว้แล้วว่ายางดิบมีสมบัติที่ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ได้โดยตรง จำเป็นต้องมีการผสมยางดิบกับสารเคมีต่างๆ เพื่อปรับสมบัติของยางให้ได้ตามความเหมาะสมกับสภาพการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้นๆ และนำยางคอมพาวด์ที่ผสมได้ไปผ่านกระบวนการคงรูป (vulcanization) ทำให้ยางมีโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย 3 มิติ (3-D network) หรือที่เรียกว่าการเกิดการเชื่อมโยง (crosslink) ระหว่างโมเลกุลของยาง โดยทั่วไปกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางสามารถสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางโดยทั่วไป

การออกสูตรยาง

การออกสูตรยางเป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อคุณภาพและต้นทุนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ การออกสูตรยางจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับสมบัติของยาง หน้าที่และความจำเป็นของการใช้สารเคมีผสมยาง รวมทั้งต้องพิจารณาถึงราคาของสารเคมีที่จะใช้ว่าเหมาะสมหรือคุ้มค่ากับการผลิตผลิตภัณฑ์นั้นๆ เพราะต้นทุนการผลิตก็เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเป็นครั้งแรกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง พื้นฐานของส่วนผสมของสูตรประกอบด้วยสารกลุ่มต่างๆ ดังนี้

ยาง (rubber)

การออกสูตรยางจะต้องรู้สมบัติของยางแต่ละชนิดเป็นอย่างดี กล่าวคือ ต้องทราบถึงข้อดีและข้อเสียของยางที่จะนำมาใช้ เช่น ยางธรรมชาติมีข้อดี คือ มีความแข็งแรงของเนื้อยางล้วน (pure gum) ดีมาก นั่นคือไม่ต้องเติมสารเสริมแรงก็สามารถให้ความแข็งแรงได้ดี ในขณะที่เดียวกันยาง EPDM มีความแข็งแรงของน้ำยางล้วนสู้ยางธรรมชาติไม่ได้ แต่มีความทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนและสภาพอากาศที่ดีกว่า เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีการผสมยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์มาใช้เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิดและยังมีส่วนต่อการลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย

สารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agent or curing agent)

สารกลุ่มนี้จะทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ยางอยู่ในสถานะที่ยึดหยุ่นได้สูง หรืออาจใช้คำว่า “คงรูป” แต่ตามโรงงานมักเรียกกันว่า “ยางสุก” สารทำให้ยางคงรูปแบ่งเป็น 2 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (sulfur) นิยมใช้ในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มีพันธะคู่ในโมเลกุล และระบบที่ใช้เพอร์ออกไซด์ (peroxide) ซึ่งนิยมใช้ในยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำ นอกจากนี้ 2 ระบบดังกล่าว ยังมีการใช้สารคงรูปพวกโลหะออกไซด์ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ (MgO/ZnO) ในยางสังเคราะห์บางชนิด เช่น ยางนีโอพรีน

- ระบบยางคงรูปโดยกำมะถัน (sulphur vulcanization system)

เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับการทำให้ยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลสูง เช่น ยางธรรมชาติหรือยาง SBR เพราะพันธะคู่คือ บริเวณที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ในเซชันด้วยกำมะถัน การทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถันจะทำให้ยางที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่มีความทนต่อความร้อนต่ำ ระบบนี้ประกอบด้วย

- กำมะถัน ซึ่งเป็นสารคงรูป
- สารเร่งให้ยางคงรูป (accelerator) เช่น TMTD (tetramethyl thiuram disulfide) MBT (2-mercaptobenzothiazole) และ CBS (n-cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide) เป็นต้น
- สารกระตุ้นสารเร่ง (activator) ได้แก่ สารอนินทรีย์พวกซิงก์ออกไซด์ (ZnO) สารอินทรีย์พวกกรดสเตียริก (stearic acid) และสารที่เป็นด่าง (นิยมใช้ในสูตรที่มีสารที่เป็นกรดหรือซิลิกาช่วยอยู่ด้วย) ได้แก่ สาร DEG (diethylene glycol)
- ระบบเพอร์ออกไซด์ (peroxide system)

ระบบนี้สามารถใช้ในการทำยางเกือบทุกชนิดคงรูปโดยเฉพาะยางสังเคราะห์ที่ไม่มีหรือมีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำ ยางที่คงรูปด้วยระบบนี้จะมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีนัก ต้นทุนสูงกว่าระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน และยางคงรูปที่ได้มักมีกลิ่นของ acetophenone ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (by-product) จากการทำปฏิกิริยารีดอกซ์ในเซชัน แต่ว่ายางจะมีความทนต่อความร้อนสูง

สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (antidegradants)

เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยางทั่วไป โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะมีพันธะคู่อยู่ค่อนข้างมาก ยางจึงเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อต้องสัมผัสกับ โอโซน แสงแดด ออกซิเจน ดังนั้นการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างของสารในกลุ่มป้องกันยางเสื่อมสภาพ ได้แก่ IPPD (N-Isopropyl-N'-phenyl-p-phenylene diamine) TMQ (2,2,4-Trimethyl-1,2-dihydroquinoline, polymerized) และ BHT (2,6-Di-tert-Butyl (p-cresol)) เป็นต้น

สารตัวเติม (filler)

สารตัวเติมเป็นสารที่ผสมกับยางเพื่อช่วยเสริมแรง (reinforcement) ให้ผลิตภัณฑ์ยางหรือช่วยลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงจะเรียกว่า สารเสริมแรง (reinforcing filler) ซึ่งจะเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก (มีพื้นที่ผิวสูง) ได้แก่ ผงเขม่าดำ (carbon black) เกรดต่างๆ ผงเขม่าขาวหรือซิลิกา เป็นต้น ส่วนสารตัวเติมที่ไม่ช่วยเสริมแรง (inert filler or non-reinforcing filler) แต่นิยมใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว (clay) แป้ง แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

สารช่วยในกระบวนการผลิต (processing aids)

สารกลุ่มนี้ทำหน้าที่เฉพาะตัวต่างๆ กัน เช่น สารที่ช่วยให้ยางนิ่มในระหว่างการบดผสม ได้แก่ พวกละอูน (oils) และสารเคมีย่อยยาง (peptizer) เช่น pepton22 สารบางตัวช่วยควบคุมไม่ให้ยางมีความหนืดตัว (nerve) สูงมากเกินไปเพราะจะทำให้สารเคมีที่เป็นผงเข้าเนื้อยางได้ยากในระหว่างการบดผสม เพราะยางจะพันลูกกลิ้งยาก สารพวกนี้ ได้แก่ factice เป็นต้น

สารกลุ่มนี้โดยทั่วไปแล้วไม่จำเป็นต้องใช้ในการออกสูตร แต่ในบางกรณีที่ต้องการให้ยางมีสมบัติพิเศษบางประการจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีบางตัวเข้าช่วย

- สารหน่วง (retarder) จะใช้เมื่อต้องการชะลอไม่ให้อย่างที่กำลังบดผสมคงรูปเสียก่อน (scorch) หรือที่เรียกว่า ยางตาย ตัวอย่างของสารหน่วงได้แก่ benzoic acid หรือ salicylic acid เป็นต้น
- สารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) ใช้สำหรับการทำให้อย่างฟูในการทำยางพองน้ำ ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้ ได้แก่ สาร sodium bicarbonate หรือ dinitrosopentamethylene tetramine เป็นต้น
- สารทำให้เกิดสี (pigments) อาจเป็นสียอนินทรีย์ เช่น cadmium sulfide (ให้สีแดงเข้ม-ส้มและเหลือง) chromium oxide (ให้สีเขียวเข้ม) และ titanium dioxide (ให้ยางมีสีขาว มีความสว่าง หรือช่วยให้ยางสีต่างๆ มีสีที่สดขึ้น) ส่วนสีที่เป็นสียอนินทรีย์ จะให้สีสด ทนต่อความร้อนได้ดีกว่าสียอนินทรีย์

การออกสูตรยางจะกำหนดปริมาณสารต่างๆ ในสัดส่วนต่อยาง 100 ส่วน (โดยน้ำหนัก) และเรียกเป็น phr หรือ pphr (part per hundred of rubber) ตารางที่ 1 แสดงหน้าที่และปริมาณการใช้สารต่างๆ

ตารางที่ 1 แสดงหน้าที่และปริมาณการใช้สารต่างๆ

สมบัติที่ต้องการ	สารเคมี	ปริมาณการใช้ (phr)
ความยืดหยุ่น (elasticity)	สารทำให้อย่างคงรูป สารกระตุ้น สารเร่ง	1-3.5 1-5 0.5-2.5
การป้องกันยางเสื่อมอันเนื่องมาจากออกซิเจนและโอโซน	สารป้องกันยางเสื่อม เช่น 6 PPD, Flectol H, Antioxidant 2246, Wingstay L, Vulkanox MB	1-4
เสริมความแข็งแรงให้ยาง	สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็ก เช่น เขม่าดำ ซิลิกา	10-100
ลดความหนืด (viscosity) ของยางดิบ	บดให้หยาบ (mastication) และ/หรือเติมสารย่อยยาง (Chemical peptizer)	0.1-1.5
เชื่อมติดผ้า โลหะ กระเบื้อง	สารพวกเป็นตัวเชื่อม (bonding agent) และต้องทำความสะอาดหรือมีวิธีการปรับผิว (treat) ของสิ่งที่ต้องการเชื่อม	2-10
สี	สียอนินทรีย์ หรือสียอนินทรีย์	ตามความเข้มที่ต้องการ
ลดต้นทุน	สารตัวเติมชนิดราคาถูก ยางรีเคลม เศษยางคงรูป	10-200, 10-100, 5-50
พองพูน (cellular structure)	สารฟู พวกสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์	0.5-20 5-30
ลดอันตรายจากการติดไฟ (self extinguishing)	สารลดการติดไฟ เช่น พวก phosphates, antimony salts, halogenated organics, borates (antimony trioxide and chlorinated wax - มักใช้กับยางธรรมชาติ)	1-20
ฉนวนกันไฟฟ้า	สารพวกไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น สารตัวเติมพวกแร่ธาตุ น้ำมันไฮโดรคาร์บอน	5-50
กันไฟฟ้าสถิตย์	สารกันไฟฟ้าสถิตย์ เช่น พวกเอสเทอร์ที่มีขั้ว เขม่าดำ	0.1-2.0, 1-5
ตัวนำไฟฟ้า	สารตัวนำไฟฟ้า เช่น เขม่าดำ อนุภาคโลหะ และเกลือโลหะ	10-50
ป้องกันแบคทีเรีย	สารป้องกันเชื้อรา เช่น สารพวก chlorinated phenol	0.5-5.0

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบและปริมาณของยางและสารเคมีต่างๆ ในสูตรผลิตภัณฑ์ยางพื้นฐาน

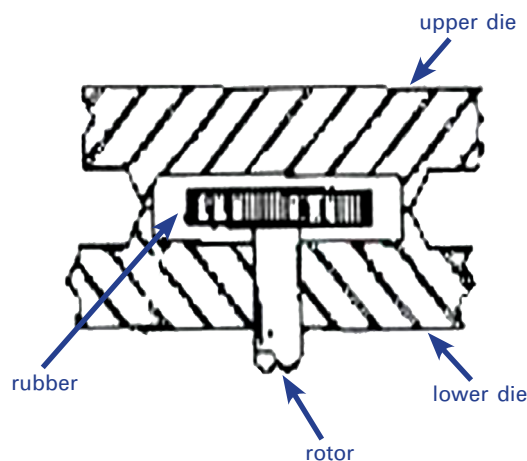
ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)
ยาง (ชนิดเดียว หรือ 2 ชนิดขึ้นไป)	100
กำมะถัน	2.5-3.5
สารกระตุ้น	1-5
สารเร่งให้ยางคงรูป (ชนิดเดียว หรือ 2 ชนิดขึ้นไป)	0.5-2.0
สารตัวเติม	(ตามที่ต้องการ)
สารทำให้ยางนิ่ม	5-10
สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ	1-2

สัดส่วนการใช้สารต่างๆ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดและประสิทธิภาพของสารเคมี กระบวนการที่จะขึ้นรูปคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการออกสูตรยางที่ถูกต้องเหมาะสมนั้นจำเป็นต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในสมบัติ หน้าที่และปริมาณของทั้งยางและสารเคมีต่างๆ เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามสูตรยางที่ดีเพียงอย่างเดียวไม่ได้หมายความว่า จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีเสมอไป เพราะยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ต้องศึกษาและทำความเข้าใจอีกหลายประการ ดังจะได้กล่าวต่อไป

การบดยางให้นิ่ม (mastication)

เมื่อได้สูตรที่เหมาะสมแล้วขั้นตอนต่อไป คือ การบดผสมสารเคมีต่างๆ ให้เข้ากับเนื้อยาง สมบัติของยางที่สำคัญสำหรับการบดผสม คือ ความหนืด (viscosity) ถ้ายางมีความหนืดสูงจะทำให้การบดผสมเป็นไปได้ยากเนื่องจากสารเคมีจะเข้าผสมกับยางได้ยาก และจะใช้พลังงานในการบดผสมสูง ด้วยเหตุนี้ก่อนการใส่สารเคมีลงไปจึงต้องมีการลดความหนืดโดยการบดยางให้นิ่ม (mastication) ซึ่งภาษาชาวบ้านเรียกว่า การตียาง ในบางกรณีอาจมีการเติมสารช่วยย่อยโมเลกุลหรือ peptizer เพื่อให้ยางนิ่มเร็วขึ้น โดยทั่วไปการบดยางจะทำในเครื่องบดซึ่งอาจใช้เครื่องบดระบบปิด (internal mixer) หรือเครื่องบดระบบเปิด (two-roll mill) ขั้นตอนนี้ยางจะถูกทำให้นิ่มโดยโมเลกุลของยางถูกทำให้ฉีกขาดด้วยแรงเฉือนจากเครื่องบด ซึ่งจะใช้เวลาในการบदनานเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับความหนืดเริ่มต้นของยาง ถ้ายางมีความหนืดสูงมาก (โดยเฉพาะยางธรรมชาติ) ก็ใช้เวลาบदनาน อุณหภูมิของการบดควรจะต่ำกว่า 100°C เพื่อป้องกันยางเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

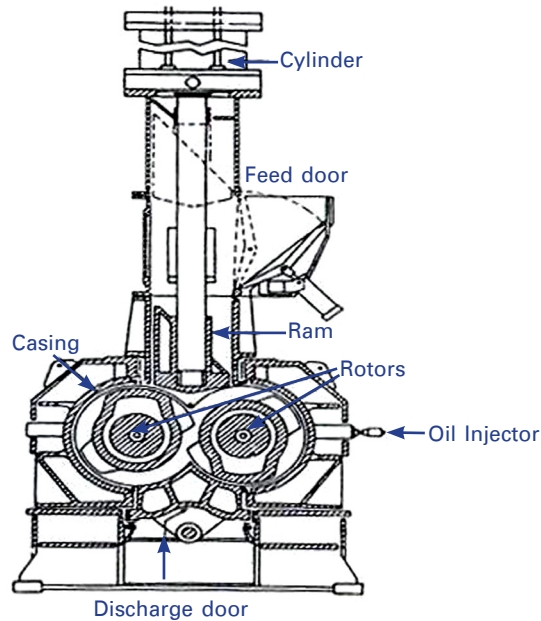
ค่าความหนืดของยางสามารถวัดค่าได้โดยใช้เครื่อง Mooney viscometer ใช้หลักการหมุน (rotate) ยางด้วยแกนหมุน (rotor) ของเครื่องภายใต้การควบคุมอุณหภูมิของชั้นทดสอบ การวัดความหนืดในรูปของ Mooney viscosity ML (1+4) 100°C (M = Mooney, L = Large rotor, 1 = preheat time (min), 4 = ระยะเวลาการหมุนของ rotor ก่อนการอ่านค่าความหนืดและวัดที่ 100°C)



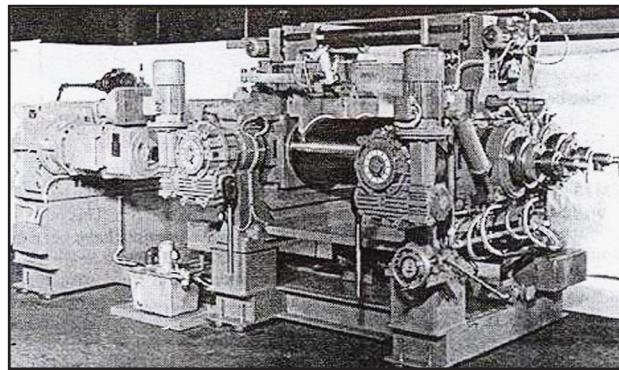
รูปที่ 2 เครื่อง Mooney viscometer

- เครื่องมือที่ใช้ในการบดผสม

เครื่องมือที่ใช้บดผสมยางโดยทั่วไปมี 2 ระบบ คือ เครื่องบดระบบปิด (internal mixer) เช่น เครื่องนวด (kneader) เครื่อง banbury เป็นต้น และเครื่องบดระบบเปิด เช่น เครื่องบดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) (ดูรูปที่ 3 และ 4 ประกอบ)



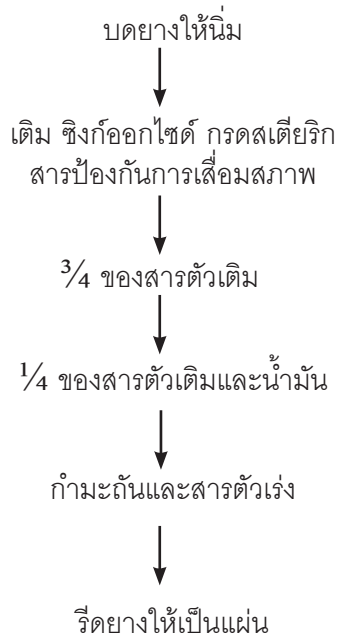
รูปที่ 3 เครื่องบดผสมระบบปิด (Internal mixer)



รูปที่ 4 เครื่องบดผสมระบบเปิด (Two-roll mill)

- ขั้นตอนการบดผสม (mixing step)

ในการบดผสมยางอย่างมีประสิทธิภาพและบดยางให้มีความสม่ำเสมอในคุณภาพนั้น ลำดับขั้นตอนการเติมสารเคมีต่างๆ ต้องเป็นไปตามขั้นตอนอย่างถูกต้อง หลักการโดยทั่วไป คือ หลังจากการบดยางให้หยาบก็จะเติมสารที่บดให้กระจายในเนื้อยางได้ยากก่อน เช่น ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) กรดสเตียริก (stearic acid) ผงเขม่าดำ เพราะช่วงนี้อุณหภูมิในการบดยังต่ำ และยางมีความหนืดสูง แรงกระทำเชิงกลจึงมีมาก จากนั้นจึงเติมสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง สารอื่นๆ และน้ำมัน สารที่แนะนำให้เติมลำดับสุดท้าย คือ สารตัวเร่ง กำมะถัน และสารป้องกันยางตาย (scorch) ยางที่ได้หลังจากที่ผสมสารเคมีต่างๆ เรียบร้อยแล้วจะเรียกว่า ยางคอมพาวด์ (rubber compound) รูปที่ 5 แสดงลำดับของการบดผสมโดยทั่วไป



** ยางธรรมชาติจะหนานกว่ายางสังเคราะห์ เพราะมีความหนืดสูง

** ถ้าบดยาง NBR ต้องเติมน้ำกำมะถันในขั้นตอนนี้เพราะกำมะถันละลายและกระจายตัวได้ยากใน NBR

** จำเป็นในกรณีนี้ที่เติมสารตัวเติมเสริมแรงในปริมาณมาก

** ควบคุมไม่ให้อุณหภูมิของการผสมสูงเกินไป

** ปรับความหนาของแผ่นยางให้เหมาะสำหรับการนำไปทดสอบและขึ้นรูป

รูปที่ 5 ลำดับการผสมยางโดยทั่วไป

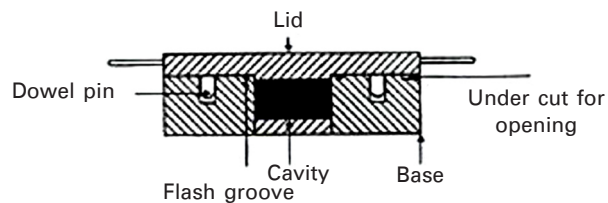
- การขึ้นรูปยาง (forming)

เทคนิคที่ใช้ในการขึ้นรูปยางคอมพาวด์ให้เป็นผลิตภัณฑ์มี 3 วิธี คือ

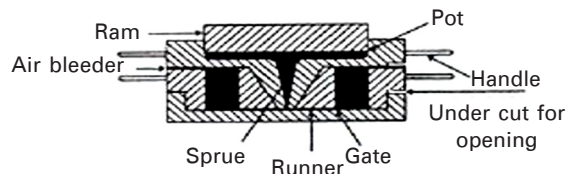
1. การใช้แม่พิมพ์ (moulding)

การใช้แม่พิมพ์ขึ้นรูปยาง เป็นการขึ้นรูปยางพร้อมๆ กับการเกิดปฏิกิริยาคงรูป (vulcanization) โดยอาศัยความร้อนและแรงอัด แม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปมีหลายแบบ ได้แก่ แบบอัด (compression mould) แบบกึ่งฉีด (transfer mould) และแบบฉีด (injection mould) รูปที่ 6 แสดงลักษณะของแม่พิมพ์แบบต่างๆ

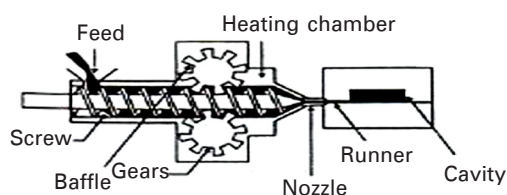
Compression Mold (Semi-conductive type)



Transfer Mold



Injection Molding



รูปที่ 6 การขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์แบบต่างๆ

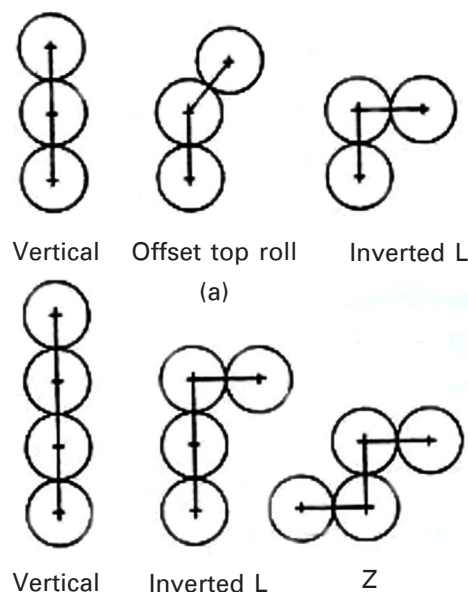
แม่พิมพ์แบบอัดเป็นแม่พิมพ์แบบง่าย ราคาถูก ใช้กันอย่างกว้างขวางในการทำผลิตภัณฑ์ทั่วไป ลักษณะของแม่พิมพ์แบบอัดประกอบด้วยฝา 2 ชั้นที่ยึดกันด้วยสลักฝาด้านหนึ่งจะเป็นช่องรูปร่างของผลิตภัณฑ์ซึ่งเวลาอัดยางจะใส่ยางลงในฝานี้ เมื่อนำอีกฝานึงปิดลงและวางพิมพ์ในเครื่องอัดพร้อมทั้งให้ความร้อน ยางจะไหลเต็มช่องของแม่พิมพ์ ส่วนแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีดยังมีส่วนประกอบของแม่พิมพ์มากกว่า 2 ส่วน ยางจะถูกอัดจากส่วนของแม่พิมพ์ที่เรียกว่า Pot เข้าไปยังช่องของแม่พิมพ์ที่เป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ โดยแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีดยังสามารถใช้ผลิตภัณฑ์ที่ซับซ้อนได้ แม่พิมพ์แบบฉีดเป็นแบบที่ได้รับการพัฒนามาจาก 2 แบบแรก ซึ่งจะประกอบด้วยเครื่องที่เป็นส่วนทำให้ยางนิ่มแล้วฉีดยางเข้าพิมพ์ เครื่องฉีดและแม่พิมพ์แบบนี้ราคาสูงมาก แต่จะให้อัตราเร็วในการผลิตสูงเหมาะกับการผลิตชิ้นส่วนที่ซับซ้อนและมีปริมาณการผลิตสูง

2. การอัดผ่านตาย (extrusion)

การอัดยางผ่านตาย (die) ที่มีรูปร่างต่างๆ ตามลักษณะของผลิตภัณฑ์ต้องอาศัยเครื่องอัดหรือต้นยาง ซึ่งเครื่องอัดแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่อาศัยแรงอัดจากแรม (ram) และชนิดที่อาศัยแรงอัดจากการหมุนของสกรู (screw) ชนิดหลังเป็นชนิดที่ใช้กันอย่างกว้างขวางและเรียกกันว่าเครื่องเอกซ์ทรูด (extruder) ผลิตภัณฑ์ยางที่ขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคนี้ ได้แก่ ท่อยาง ยางหุ้มสายเคเบิล และยางรัดของ เป็นต้น โดยปกติยางที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเทคนิคนี้จะต้องผ่านการอบให้ยางคงรูปในหม้ออบไอน้ำหลังจากดันยางออกจากตายแล้ว

3. การใช้เครื่อง calender

เครื่องคาลเ็นเดอร์ (calender) คือ เครื่องที่ประกอบด้วยชุดของลูกกลิ้งจำนวน 2 หรือ 3 หรือ 4 ลูก (ดูรูปที่ 7 ประกอบ) ที่ทำจากเหล็กหล่ออย่างดี ผิวหน้าขัดเรียบ ปกติจะใช้เครื่องคาลเ็นเดอร์ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เป็นแผ่นเรียบ มีความหนาและความกว้างสม่ำเสมอหรือเพื่อการฉาบยางบางๆ ลงบนผ้าหรือแผ่นใยลวด (coating) ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ได้แก่ สายพานลำเลียง ยางแผ่นเรียบใช้ในงานปูพื้นต่างๆ เช่น ยางแผ่นปูอ่างน้ำ ยางบุถัง เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคนี้จำเป็นต้องผ่านกระบวนการอบให้คงรูปก่อนนำไปใช้งาน



รูปที่ 7 การจัดเรียงตัวของลูกกลิ้งแบบต่างๆ ในเครื่อง Calender

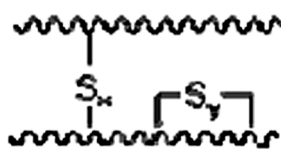
การทำให้ยางคงรูป (vulcanization or curing)

การทำให้ยางคงรูปหรือทำให้ยางสุกคือการทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างสายโมเลกุลหรือที่เรียกกันว่าปฏิกิริยาลวดลายในเซชัน เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ส่งผลให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพจากค่อนข้างอ่อน (มีความเป็นพลาสติกสูง) ไปเป็นยางที่มีความยืดหยุ่นดีและแข็งแรง มีสมบัติเชิงกลที่เสถียรและไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากนัก และทำให้ยางทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและแสงแดดได้ดียิ่งขึ้น จึงสามารถนำยางไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง ปฏิกิริยาลวดลายในเซชันต้องอาศัยสารเคมีกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูป (vulcanizing or curing agents) และความร้อนเพื่อให้สารดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาได้

- ระบบทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถัน

เป็นระบบที่ใช้กันอย่างกว้างขวางกับยางที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลไม่อิ่มตัว (unsaturation) ระบบนี้จำเป็นต้องมีสารตัวกระตุ้น (activator) เช่น ซิงก์ออกไซด์ และกรดสเตียริก สำหรับสารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปสัดส่วนของการใช้กำมะถัน/สารตัวเร่งมีความสำคัญเพราะเป็นตัวกำหนดชนิดของพันธะเคมีที่เกิดขึ้น เช่น ถ้าใช้ปริมาณกำมะถันมากและใช้สารตัวเร่งน้อย เรียกว่า ระบบธรรมดา หรือ conventional vulcanization (CV system) ซึ่งจะมีพันธะเคมีแบบ polysulfidic crosslinks และแบบ cyclic แต่ถ้าใช้ปริมาณกำมะถันน้อยและใช้สารตัวเร่งมากจะได้พันธะเคมีส่วนใหญ่เป็นแบบ monosulfidic crosslinks เรียกขานระบบนี้ว่า ระบบประสิทธิภาพหรือ efficient vulcanization (EV system) นอกจากนี้ 2 ระบบดังกล่าวยังมีอีกระบบหนึ่งเรียกว่า ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-EV system) ซึ่งจะอยู่กึ่งกลางระหว่าง 2 ระบบข้างต้น

พันธะเคมีแบบ polysulfidic จะให้ยางที่มีสมบัติเชิงกลดีแต่ไม่ทนต่อความร้อน ในขณะที่ยางที่มีพันธะแบบ mono- หรือ disulfidic จะให้สมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่าแต่ยางจะเสถียรต่อความร้อนได้ดี



ระบบ EV ค่า x จะเท่ากับ 1 หรือ 2 (mono- or disulfidic)

ระบบ CV ค่า x จะสูงส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 3 ถึง 8 (polysulfidic)

รูปที่ 8 พันธะเคมีหรือการเชื่อมโยงของสายโมเลกุลยางด้วยกำมะถัน

- ระบบทำให้ยางคงรูปด้วยสารประกอบที่สลายตัวให้กำมะถัน

นอกจากการใช้กำมะถันเป็นสารคงรูปแล้ว สารประกอบอินทรีย์ที่สลายตัวให้กำมะถันที่อุณหภูมิการอบให้ยางคงรูปสามารถใช้เป็นสารคงรูปได้ สารกลุ่มนี้ได้แก่ TMTD (tetramethyl thiuram disulfide) และอนุพันธ์ของ morpholine เช่น DTDM (dithio dimorpholine)

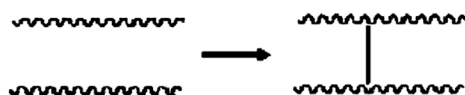
การใช้สารประกอบพวกนี้เป็นสารคงรูปมีข้อดี คือ ลดปัญหาการเกิดการบลูม (bloom) และเนื่องจากปฏิกิริยาจะไม่เกิดจนกว่ากำมะถันจะสลายตัวออกมา ดังนั้นจึงลดปัญหาการเกิดยาง scorch สารพวกนี้ยังก่อให้เกิดพันธะเคมีแบบ monosulfidic เป็นส่วนใหญ่ทำให้ยางทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดีมาก

- ระบบทำให้ยางคงรูปด้วยสารที่ไม่มีกำมะถัน

1. โลหะออกไซด์ เช่น ZnO ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาของยางนีโอพรีน โดยนิยมใช้ร่วมกับ MgO เพื่อเป็นตัวจับอะตอมคลอรีนที่เกิดขึ้น

2. สารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ (difunctional group compound) เช่น ใช้ epoxy resin ในยางไนไตรล์ ใช้ quinine dioximes ในยางบิวไทล์และใช้ diamines ในยาง fluoroelastomer เป็นต้น

3. เพอร์ออกไซด์ เป็นสารคงรูปที่สำคัญสำหรับยางที่มีโมเลกุลอิ่มตัว (saturated) หรือโมเลกุลที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อปฏิกิริยาในการสร้างพันธะเคมีเชื่อมโมเลกุล เช่น ยาง EPM เป็นต้น ในทำนองเดียวกันเพอร์ออกไซด์ก็สามารถใช้เป็นสารคงรูปสำหรับยางที่ไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ ยาง SBR และยาง NBR ได้ และจะทำให้ยางเหล่านี้ทนต่อความร้อนได้ดี สารกลุ่มนี้ไม่ได้เข้าไปเชื่อมระหว่างโมเลกุลของยาง แต่จะทำให้โมเลกุลของยางเกิดเป็นเรดิคัล (radicals) แล้วพอร์มพันธะเคมีแบบคาร์บอน-คาร์บอน ระหว่างสายโมเลกุลของยาง

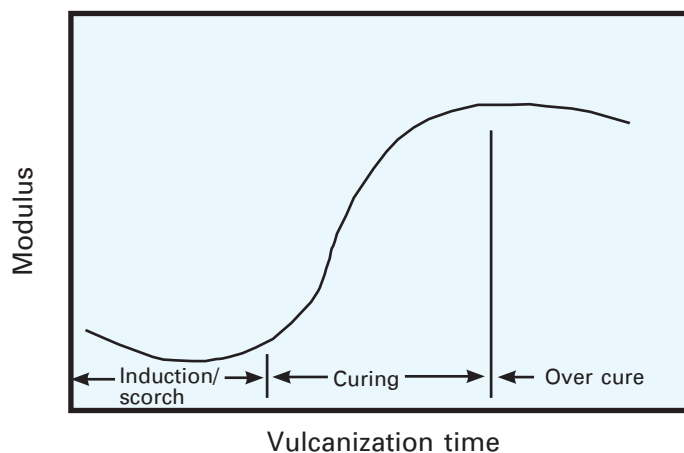


รูปที่ 9 การเชื่อมโยงแบบพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่เกิดจากการใช้เพอร์ออกไซด์

นอกจากการใช้สารเคมีดังกล่าวแล้ว การฉายรังสีที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา ก็สามารถทำให้ยางคงรูปได้เช่นกัน โดยเมื่อถูกรังสีโมเลกุลของยางจะแตกตัวให้เรดิคัลและจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบ คาร์บอน-คาร์บอนทำให้ยางที่ได้มีความเสถียรต่อความร้อน มีความบริสุทธิ์สูงเพราะไม่มีสารเคมีอื่นใดเจือปน จึงเหมาะสำหรับการผลิตอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนยางที่ใช้ทางการแพทย์

การทดสอบปฏิกิริยาของรูป (vulcanization test)

ปัจจุบันได้มีการใช้เครื่องมือเพื่อติดตามลักษณะการคงรูปของยาง เครื่องมือดังกล่าว ได้แก่ oscillating disc rheometer (ODR) หลักการทำงานของเครื่อง คือ ยางตัวอย่างจะถูกวางบน rotor และถูกอัดระหว่างแผ่นอัดที่ร้อนและมีแรงอัด จากนั้น rotor ก็แกว่ง (oscillate) เล็กน้อยจากการขับเคลื่อนของมอเตอร์ เครื่องก็จะวัดแรงต้าน (torque) ของ rotor ที่ใช้ในการแกว่งยาง ซึ่งจะแสดงกราฟระหว่างแรงต้านกับเวลา ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของยางในระหว่างปฏิกิริยาของรูป

จากกราฟจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของยางในระหว่างปฏิกิริยาการคงรูปแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

1. ขั้นการเริ่มต้น (induction period) ในขั้นนี้ความหนืดของยางจะลดลงเนื่องจากความร้อน แต่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาการคงรูป
2. ขั้นการเกิดพันธะเคมี (curing of vulcanization) เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ซึ่งอัตราความเร็วของการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ คือ อุณหภูมิ ชนิดของยาง และระบบของสารที่ใช้ทำให้ยางคงรูป
3. ขั้นการผ่านจุดที่ยางคงรูปเต็มที่ (overcure) ในขั้นนี้ ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงจะเริ่มหมดไปจนถึงจุดเต็มที่ ซึ่งยางจะแข็งหรือมีค่าโมดูลัสสูงสุด และถ้าหากให้ความร้อนกับยางต่อไป ยางอาจจะแข็งเพิ่มมากขึ้น (marching) หรืออาจจะอ่อนลง (reversion) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของยาง

เทคนิคการทำให้ยางคงรูป

การทำให้ยางคงรูปมีหลายวิธี ซึ่งการเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น

- การทำให้ยางคงรูปด้วยเครื่องอัด ใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอัดหรือแบบกึ่งฉีด
- การทำให้ยางคงรูปแบบเปิด (open cure) ใช้สำหรับทำผลิตภัณฑ์ยางชนิดที่ไม่ต้องการความแน่นอนของรูปร่างตามรูปร่างของแม่พิมพ์ การใช้คำว่า เปิด ชี้ให้เห็นว่า ความร้อนที่ทำให้ยางคงรูปนั้น หมุนเวียนอย่างอิสระภายในตู้อบ (สำหรับ hot air curing) หรือหม้อน้ำ (open steam curing) วิธีการที่จะยึดให้ยางที่ยังไม่คงรูปมีรูปร่างตามต้องการนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะและชนิดของผลิตภัณฑ์ เช่น ใช้แกนอลูมิเนียมสอดยึดรูปร่างของท่อยางที่จะนำไปตัดเป็นยางรัดของ เป็นต้น
- การทำให้ยางคงรูปโดยระบบต่อเนื่อง (continuous vulcanization) ซึ่งอาศัยความร้อนจากแหล่งต่างๆ เช่น จากไอน้ำที่มีความดันสูง (high pressure steam) ความร้อนจากอ่างเกลือหลอม (molten salt bath) ความร้อนจากลูกแก้วกลมขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในอากาศร้อน (fluidized bed) รวมถึงการใช้ความร้อนจากไมโครเวฟ เป็นต้น วิธีการนี้เหมาะสำหรับใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความยาวต่อเนื่องกันมากๆ เช่น ท่อยาง สายเคเบิล เป็นต้น