

การใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมในการทำนายการหดตัว ของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูป

A Prediction of Rubber Product Shrinkage in Compression Moulding Process Using the Neural Network Model

คำนำ

ประเทศไทยผลิตยางพารามากเป็นอันดับหนึ่งของโลก ในปี 2548 ผลิตยางได้ 2.8 ล้านตัน คิดเป็น 1 ใน 3 ของผลผลิตทั่วโลก ผลผลิตจำนวนมากนี้เป็นการจัดการขั้นปฐมภูมิเท่านั้น คือ เป็นเพียงผลผลิตวัตถุดิบ โดยประเทศไทยส่งออกยางดิบแปรรูปเบื้องต้นถึง 90% ของผลผลิต สร้างรายได้ให้แก่ประเทศ 120,877 ล้านบาท และใช้เพียง 10% เพื่อการแปรรูปผลิตภัณฑ์ใช้ในประเทศและส่งออกเป็นสินค้าออกของประเทศ ซึ่งสร้างรายได้ให้แก่ประเทศถึง 94,350 ล้านบาท จากความแตกต่างของรายได้และปริมาณที่ผลิตได้ จะเห็นได้ว่าการแปรรูปของเป็นผลิตภัณฑ์ยาง สร้างมูลค่าเพิ่มได้ประมาณ 10 เท่า ดังนั้นการส่งออกเป็นยางดิบจำนวนมากและไม่ได้แปรรูป เป็นผลิตภัณฑ์ในประเทศเป็นการสูญเสียโอกาสทางเศรษฐกิจอย่างมาก หากมีการเพิ่มการแปรรูป เป็น 20% จะทำให้ประเทศมีรายได้เพิ่มขึ้นอีกประมาณ 95,000 ล้านบาท (สถาบันวิจัยยาง, 2548) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแนวทางที่สำคัญในการเพิ่มมูลค่าให้กับยางพารา คือ การพัฒนาอุตสาหกรรม แปรรูปผลิตภัณฑ์ยางในประเทศให้เข้มแข็งขึ้น

ในกระบวนการแปรรูปยางพาราเพื่อเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยวิธีการขึ้นรูปด้วย แม่พิมพ์นั้นในปัจจุบันสามารถแบ่งได้ 3 แบบ คือ แบบอัด (compression moulding) แบบกึ่งฉีด (transfer moulding) และแบบฉีด (injection moulding) (วารสาร, 2542) โดยแม่พิมพ์แบบอัด เป็นแม่พิมพ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีราคาถูกกว่าแบบอื่น เหมาะสำหรับการผลิต ผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่มีความซับซ้อนของรูปร่างมากนัก ในขณะที่แม่พิมพ์กึ่งฉีดนั้นจะใช้กับ ผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนปานกลาง และใช้เวลาที่สั้นกว่าแบบอัด ส่วนแบบฉีดนั้นเหมาะกับ ผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนสูง โดยมีราคาของแม่พิมพ์สูงด้วยเช่นกัน ในส่วนของแบบแม่พิมพ์ อัดนั้น มีนักวิจัยให้ความสนใจในการศึกษาวิจัยการออกแบบสร้างแม่พิมพ์สำหรับงานด้วยวิธีการ อัดขึ้นรูปร่างค่อนข้างน้อยทั้ง ๆ ที่มีการใช้แม่พิมพ์อย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง

ภายในประเทศ สำหรับการใช้งานในปัจจุบันยังมีการผลิตผลิตภัณฑ์ยางด้วยแม่พิมพ์อัดในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ชิ้นส่วนประกอบของอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ไฟฟ้า ชิ้นส่วนประกอบอุตสาหกรรมยานยนต์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ และชิ้นส่วนประกอบสำหรับอุตสาหกรรมอื่น ๆ และยังมีผลิตภัณฑ์ยางบางชนิดต้องนำเข้าแม่พิมพ์จากต่างประเทศ เช่น รองเท้ายาง แม่พิมพ์ยางอะไหล่เครื่องยนต์ เป็นต้น (วราภรณ์, 2546) ปัญหาที่สำคัญที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์อัดคือการเสียรูปร่าง (loss of shape) ของผลิตภัณฑ์หลังจากผ่านกระบวนการต่าง ๆ แล้ว ผลิตภัณฑ์ยางดังกล่าวเมื่อมีการเปลี่ยนขนาดเพื่อให้เหมาะสมกับชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด จะเกิดการเสียรูปที่แตกต่างกัน ซึ่งปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเสียรูปร่างได้แก่ การออกแบบแม่พิมพ์ (mould design) กระบวนการขึ้นรูป (processing) และจากยางผสม (rubber compound) สำหรับการแก้ปัญหาของโรงงานในปัจจุบันจะใช้วิธีการลองผิดลองถูก (trial and error) ซึ่งการแก้ปัญหาคด้วยวิธีการดังกล่าวใช้เวลาและค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมาก และบางครั้งก็ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดหดตัว (shrinkage) ของชิ้นงานที่เกิดขึ้นได้ นอกจากนั้นยังต้องอาศัยประสบการณ์การทำงานของผู้ปฏิบัติงาน ประการสุดท้ายนี้ทำให้การแก้ปัญหามีอยู่อย่างจำกัดและไม่ก่อให้เกิดองค์ความรู้ในการแก้ปัญหาที่เป็นระบบ

ในปัจจุบันได้มีการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ลดเวลาและต้นทุนในการผลิต เช่น ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method, FEM) และแบบจำลองด้านปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligent, AI) โดยเฉพาะแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม (neural network) ซึ่งเหมาะกับกระบวนการผลิตที่มีความซับซ้อนสูง จากปัญหาที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ยาง จึงมีแนวความคิดในการศึกษาตัวแปรในกระบวนการผลิตที่ทำให้เกิดการเสียรูปให้ได้ข้อมูลมาสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมเพื่อ แก้ปัญหาการในการออกแบบ และกระบวนการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาตัวแปรของกระบวนการผลิตในแม่พิมพ์อัดที่มีผลต่อการหดตัวของผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งนำมาซึ่งผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่ได้ขนาดตามต้องการ

2. เพื่อสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่ใช้สำหรับการทำนายการหัดตัวของผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งแบบจำลองนี้จะช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์อัดและเลือกตัวแปรในกระบวนการผลิตที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ยาง

ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาการหัดตัวของผลิตภัณฑ์แวนยางกันซึมหรือโอริง ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 25 และ 45 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด 2 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยใช้ยางธรรมชาติ STR20
2. ใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมในการทำนายการหัดตัวของผลิตภัณฑ์ยาง โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาพัฒนาแบบจำลอง
3. การออกแบบการทดลองเป็นแบบจำลองผลกระทบคงที่ (fixed effect model) ซึ่งจะครอบคลุมในส่วนผลที่ได้ทำการทดลอง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ลดเวลาในการออกแบบแม่พิมพ์อัดและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากแม่พิมพ์อัด เนื่องจากมีข้อมูลและแบบจำลองที่ใช้ทำนายอัตราการหัดตัวของผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ยางที่เหมาะสมและให้ได้ขนาดของชิ้นงานที่เที่ยงตรงตามที่ต้องการ
2. ลดต้นทุนการผลิตอันเนื่องจากของเสียในกระบวนการ (defect) รวมไปถึงการแก้ไขงาน (rework) ที่เกิดจากตำหนิที่เกิดขึ้นจากการแปรรูปผลิตภัณฑ์ยาง

การตรวจเอกสาร

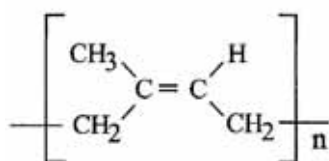
ยางธรรมชาติ

1. คุณสมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

ยางเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากและมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ โดยเฉพาะความยืดหยุ่น (elasticity) นั่นคือ เมื่อมีแรงดึงยางที่คงรูปแล้วสามารถยืดตัวได้หลายเท่าของความยาวเดิมและเมื่อปล่อยแรงออก ยางจะสามารถกลับคืนสู่รูปร่างและความยาวเดิมได้ นอกจากนี้ยางยังมีคุณสมบัติเด่นอื่น ๆ อีกด้วย เช่น มีความเหนียว (toughness) และมีความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) สูงสามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำและอากาศได้ดี (พงษ์ธร, 2547)

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1, 4-พอลิไอโซพรีน (cis-1, 4-polyisoprene) กล่าวคือ ในโมเลกุลยาง 1 โมเลกุล จะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) (ดังแสดงในภาพที่ 1) มาต่อกันเป็นสายยาว (แบบเส้นตรง) โดยทั่วไปยางธรรมชาตินี้มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 กรัม/ซม³ ที่อุณหภูมิ 20 °C และมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ -72 °C นั้นหมายความว่าหากนำยางธรรมชาติไปเก็บไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า -72 °C คุณสมบัติของยางจะเปลี่ยนจากมีความยืดหยุ่นไปเป็นแข็งเปราะเช่นเดียวกับแก้ว

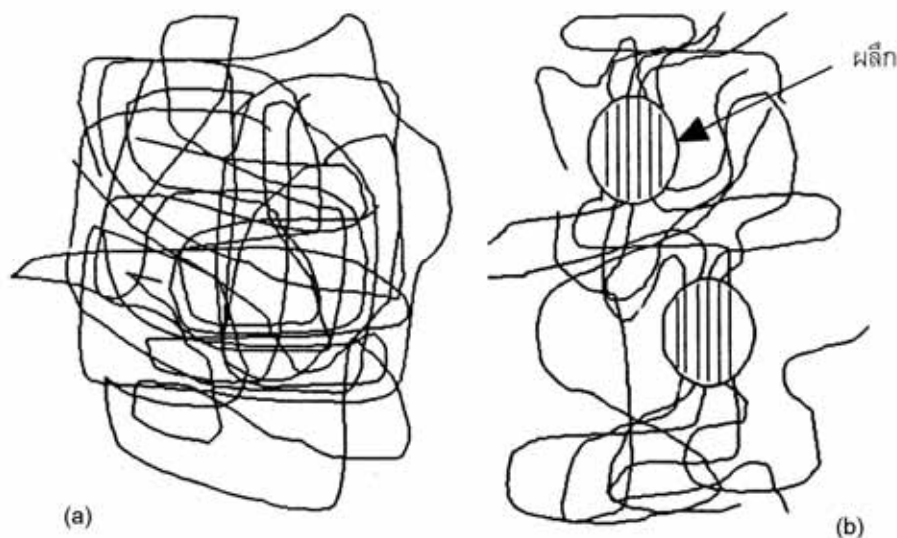
จากภาพที่ 1 จะเห็นได้ว่า หน่วยของไอโซพรีนจะมีพันธะคู่และมีหมู่แอลฟาเมทิลีน (α -methylene) ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถันอยู่ ดังนั้นพันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางจะเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับโครงสร้างกำมะถัน อย่างไรก็ตาม พันธะคู่เหล่านี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้อีก เช่น ออกซิเจน หรือโอโซน ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพหรืออาจทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน คลอรีน ไฮโดรเจนคลอไรด์ เป็นต้น ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยาง (ที่ตำแหน่งพันธะคู่) กับสารเคมีต่าง ๆ เหล่านี้จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



ภาพที่ 1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

ที่มา: พงษ์ธร (2547)

โดยทั่วไป ยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อยางถูกยืด โมเลกุลของยางบางส่วนสามารถจัดเรียงตัวได้อย่างค่อนข้างเป็นระบบ ยางจึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ (ดังแสดงในภาพที่ 2) การเกิดผลึกเนื่องอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallize) นั้น มักจะพบในกรณีที่เก็บยางที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 °C เป็นเวลานาน โดยยางมีอัตราเร็วในการตกผลึกสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ -26 °C การตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำนี้จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น ทำให้ไม่สามารถนำยางไปผสมให้เข้ากับสารเคมีหรือสารตัวเติม (filler) อื่น ๆ ได้ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลึกที่เกิดขึ้นก็จะถูกทำลาย ยางจะอ่อนตัวลงและกลับสู่สภาพเดิม ด้วยเหตุนี้ในประเทศที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ ยางธรรมชาติจะถูกนำมาอบที่อุณหภูมิประมาณ 50-70°C เพื่อทำให้ยางอ่อนตัวก่อนนำไปสู่กระบวนการผลิตต่อไป ในส่วนการเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain-induced crystallization) จะพบเมื่อยางถูกยืดจากความยาวเดิมประมาณ 2-3 เท่า การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดจะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน กล่าวคือยางจะเปลี่ยนจากสภาพโปร่ง (transparent) ไปเป็นทึบแสง (opaque) ซึ่งสังเกตได้ง่ายในยางคงรูปที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม นอกจากนี้การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดยังทำให้ยางคงรูปมีคุณสมบัติเชิงกลดีขึ้น นั่นคือ ยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขูดถูสูงขึ้น



ภาพที่ 2 ลักษณะสายโซ่โพลิเมอร์ของยางธรรมชาติ (a) ในสภาวะปกติ (b) ในสภาวะที่ถูกยืด

ที่มา: พงษ์ธร (2547)

2. การบดขยี้ให้นิ่มและการบดผสม (mastication and mixing)

ยางธรรมชาติที่ไม่ได้รับการผสมจะมีคุณสมบัติในการใช้งานที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นยางจะมีลักษณะนิ่มและอ่อนตัว แต่ที่อุณหภูมิต่ำยางจะแข็งเปราะ การนำยางไปใช้ประโยชน์จึงจำเป็นต้องมีการผสมสารเคมีต่าง ๆ โดยกระบวนการนี้เรียกว่า การบดผสมยาง หรือการตียาง ซึ่งนับเป็นกระบวนการสำคัญในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางมาก เพราะเป็นขั้นตอนที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีคุณภาพตามที่ต้องการ ความเข้าใจหลักการทางวิชาการอย่างถูกต้องของการผสมยางกับสารเคมี สามารถทำให้เกิดการปฏิบัติอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพอย่างเต็มที่

2.1 สารเคมีสำหรับยาง (additives for rubber) (พรทิพย์, 2547)

สารเคมีสำหรับยางหมายถึงสารเคมีต่าง ๆ ที่ผสมลงไปนยางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณสมบัติตามต้องการ ยางที่ผสมสารเคมีแล้ว (rubber compound) ไม่อาจนำไปใช้งานได้ นอกจากสารเคมีเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับยางก่อนซึ่งสามารถเร่งได้ด้วยวิธีการให้ความร้อน ยางที่ยัง

ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมีจะเรียกว่า ยางไม่คงรูป (green compound or uncured compound) ส่วนยางที่สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับยางแล้วเรียกว่ายางคงรูป (vulcanized rubber or cured rubber) โดยสรุปแล้วเหตุผลในการผสมยางกับสารเคมีมี 4 ประการ คือ

- 1) เพื่อให้ยางธรรมชาติเหมาะสมกับการนำไปใช้งานที่ต้องการ
- 2) เพื่อเป็นตัวช่วยในกระบวนการแปรรูปยางธรรมชาติ
- 3) เพื่อให้ยางธรรมชาติมีขอบเขตการใช้งานกว้างขึ้น
- 4) เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต

2.1.1 เพื่อให้ยางธรรมชาติเหมาะสมกับการนำไปใช้งานที่ต้องการสามารถกล่าวได้ดังนี้

2.1.1.1 ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติเป็นทั้งพลาสติก (plastic) และมีอีลาสติก (Elastic) คุณสมบัติเป็นพลาสติกคือ ความสามารถที่ยางจะพยายามรักษารูปร่างที่ได้เปลี่ยนไปตามแรงกระทำ ส่วนคุณสมบัติเป็นอีลาสติกคือ ความสามารถที่ยางพยายามจะรักษารูปร่างเดิมก่อนที่จะทำให้เปลี่ยนไปตามแรงกระทำ การที่ยางมีคุณสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติกนี้ทำให้ไม่สามารถนำยางไปใช้งานได้โดยตรง

2.1.1.2 ยางธรรมชาติเป็นเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) ที่อุณหภูมิต่ำยางจะแข็งกระด้าง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (ประมาณ 60-70 °C) ยางจะนิ่มหรือเยิ้ม การมีคุณสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก ทำใหยางใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่จำกัด

2.1.1.3 ยางธรรมชาติมีความแข็งแรงต่ำ ความต้านทานต่อแรงดึงต่ำและความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำ

2.1.1.4 ยางธรรมชาติสามารถละลายได้ง่ายในตัวทำละลายหลายชนิด เช่น โทลูอิน คาร์บอนเท-ทระคลอไรด์ เป็นต้น

2.1.2 เพื่อเป็นตัวช่วยในกระบวนการแปรรูปยางธรรมชาติ โดยปกติยางดิบที่ยังไม่ผสมกับสารเคมี จะมีคุณสมบัติเหนียวและทำให้สิ้นเปลืองพลังงานสูงในการนำไปเข้ากระบวนการต่าง ๆ เช่น การรีดยางให้เป็นแผ่นเรียบจากเครื่องรีดเรียบ (calender) หรือการทำท่อยาง เส้นยางจากเครื่องอัดยางผ่านด้าย (extruder) เป็นต้น ยางที่ผ่านกระบวนการเหล่านี้จะแสดงให้เห็นถึงความผิดปกติ หรือความสม่ำเสมอของยางเมื่อผ่านเครื่องรีดเรียบ และความผิดปกติในการพองตัวของยางเมื่อผ่านเครื่องอัดยางผ่านด้าย แต่หลังจากที่ได้เติมสารเคมีบางชนิด เช่น สารตัวเติม สารช่วยในการแปรรูปยาง จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องรีดเรียบมีผิวเรียบ และสามารถจะลดปัญหาเกี่ยวกับความไม่สม่ำเสมอของแผ่นยางหรือการพองตัวของท่อยางได้

2.1.3 ทำให้มีขอบเขตการใช้งานกว้างขึ้น จากความเหมาะสมในการผสมสารเคมีในยางจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง และผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความสามารถในการทนความร้อน เช่น กระเป๋าน้ำร้อน และผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงมาก เช่น เปลือกหม้อเบตเตอร์ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ขึ้นอยู่กับความต้องการของผลิตภัณฑ์

2.1.4 เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต การนำยางมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ ถ้าใช้เป็นเนื้อยางล้วน ๆ จะทำให้ต้นทุนการผลิตสูง สามารถผสมสารอื่นที่มีราคาถูกลงไป เช่น พวกลีคล์ (clay) ไวติง (whiting) ทำให้ลดต้นทุนการผลิตลง สารที่ใช้ผสมยางเพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง

2.2 สารที่ใช้ร่วมกับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

2.2.1 สารทำให้ยางคงรูปหรือสารวัลคาไนซิง (vulcanizing agent) เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (cross link) ในตำแหน่งที่ไวต่อปฏิกิริยา สารคงรูป ได้แก่ กำมะถัน (sulphur) สารที่มีส่วนประกอบของกำมะถัน เพอร์ออกไซด์ (peroxide) เป็นต้น

2.2.2 สารตัวเร่ง (accelerator) ได้แก่ สารเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้เกิดช้า ปานกลาง หรือเร็ว เช่น กัวนิดิน (guanidine) ไธอาโซล (thiazole) ซัลฟีนามาไมด์ (sulphenamide) และ ไธยูเรม (thiuram)

2.2.3 สารกระตุ้นหรือสารเสริมตัวเร่ง (activator) เป็นสารที่ช่วยเร่งอัตราการคงรูปยางให้เร็วขึ้น โดยการทำให้สารเร่งมีความไวต่อปฏิกิริยามากขึ้น และยังเร่งอัตราการคงรูปยางให้เร็วขึ้น นอกจากนั้นยังปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้นโดยทำให้ยางมีค่าโมดูลัส (modulus) สูงขึ้น เช่น กรดสเตียริก (stearic acid) ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide)

2.2.4 สารตัวเติม (fillers) เป็นสารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ยางที่ใส่ลงไปในช่วง เพื่อลดต้นทุนในการผลิตหรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของยางให้ดีขึ้น เช่น พวกราไฟต์ดำ (carbon black) แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) และซิลิกา (silica)

2.2.5 สารช่วยในการแปรรูปยางหรือสารพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) เป็นสารทำให้ยางนิ่ม โดยสาร พลาสติกไซเซอร์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

2.2.5.1 สารทำให้ยางนิ่มโดยทางเคมี (chemical plasticizer) เป็นสารเคมีที่เมื่อใส่เข้าไปในยางจะทำให้ยางนิ่มและลดเวลาของการบดยางลง การใช้งานมักใช้กับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์โดยมักใส่สารเคมีประเภทนี้ลงไปในยางเมื่อเริ่มต้นการผสมหรือบดในเครื่องบด 2 ลูกกลิ้ง และปล่อยให้สารทำปฏิกิริยากับยางเป็นระยะเวลาสั้น ๆ ก่อนที่ใส่สารอื่นลงไป เช่น sulphonic acid และ xylyl mercaptan

2.2.5.2 สารช่วยทำให้ยางนิ่มโดยทางกายภาพ (physical plasticizer) เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ที่ใส่เข้าไปแล้วจะทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นระหว่างโมเลกุลของยางทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนไหวได้ง่าย ยางจะนิ่มลงแปรรูปได้ง่ายขึ้น เช่น น้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันเอสเทอร์

2.2.6 สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (protective agent) เป็นสารต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชัน (antioxidant) หรือสารต้านทานปฏิกิริยาอันเนื่องมาจากโอโซน (antiozonant) ซึ่งสารทั้งสองชนิดจะทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางสูงขึ้น

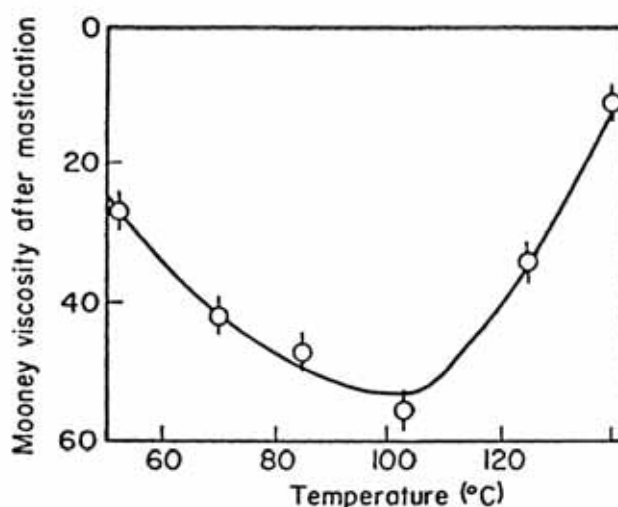
2.2.7 สารพิเศษอื่นๆ (miscellaneous ingredient) ไม่ถือว่าเป็นสิ่งที่ต้องใช้สำหรับยางทั่วไป แต่บางครั้งจะใส่ลงไปกับยางเมื่อมีความต้องการให้ผลิตภัณฑ์ยางมีคุณสมบัติพิเศษบางประการ เช่น สารที่ทำให้เกิดสี (coloring material) สารที่ทำให้เกิดฟอง (blowing agent) สารหน่วง (retarder)

2.3 การบดยางให้นิ่ม (mastication) (วารสาร, 2542)

การบดยางให้นิ่มเป็นวิธีการสำคัญและจำเป็นสำหรับกรณีการใช้งานยางธรรมชาติ เพราะยางธรรมชาติมีความหนืดสูงหรือแข็งเกินกว่าที่จะทำให้สารเคมีต่าง ๆ กระจายเป็นเนื้อเดียวได้ จึงจำเป็นต้องบดให้นิ่ม เพื่อลดความหนืดหรือลดความยืดหยุ่นของยาง ทำให้ยางสามารถรับหรือเข้ากับสารเคมีต่าง ๆ ได้ ซึ่งจะสามารถได้อย่างผสมที่มีสถานะความเป็นพลาสติกมากขึ้น คือ อ่อนนุ่มต่อการขึ้นรูปโดยกรรมวิธีต่าง ๆ ได้ เช่น การรีดเรียบ (calendering) การอัดยางผ่านคายน (extrusion) และการขึ้นรูปแบบอื่น ๆ

ขณะการบดยางด้วยเครื่องบด ซึ่งมีทั้ง เครื่องระบบปิด (internal mixer) และเครื่องระบบเปิด (open mill) หรือเครื่องบด 2 ลูกกลิ้ง (two roll mill) แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะตัดสายโมเลกุลยางและเกิดการฟอร์มเรดิคัล (radical) ที่ปลายสายโมเลกุลที่ขาดออก เรดิคัลเหล่านี้จะต่อกันเป็นโมเลกุลยาวได้อีกหากไม่ถูกทำให้เสถียร แต่ถ้าเรดิคัลที่เกิดขึ้นถูกทำให้เสถียร โมเลกุลยางที่ขาดจะไม่มีโอกาสต่อยาวใหม่ น้ำหนักโมเลกุลก็จะลดลง ความหนืดจึงลดลงไปด้วย

อุณหภูมิขณะการบดยางมีผลต่อประสิทธิภาพการบดยางให้นิ่มเป็นอย่างมาก ภาพที่ 3 แสดงผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพของการบดยางให้นิ่ม การพิจารณาประสิทธิภาพของการบดจากค่าความหนืดของยางที่ลดลง โดยยางที่มีค่าความหนืดลดลงมากจะมีประสิทธิภาพในการบดหรือการขาดสายโมเลกุลยางสูง จากภาพที่ 3 จะพบว่าประสิทธิภาพการบดยางค่อนข้างสูงในช่วงการบดที่อุณหภูมิต่ำและที่อุณหภูมิสูง และ ณ ที่อุณหภูมิประมาณ 115 °C ประสิทธิภาพการบดจะต่ำที่สุด ประสิทธิภาพการบดที่สูงในช่วงแรกของการบดยาง (อุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C) นั้นเนื่องมาจากยางยังมีน้ำหนักโมเลกุลมาก แรงกระทำของเครื่องบดสามารถทำงานการดึงเฉือนและฉีกโมเลกุลยางได้อย่างเต็มที่ หรืออาจกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพ หรือการขาดของสายโมเลกุลยางขณะการบดที่อุณหภูมิต่ำนั้น เป็นเพราะการทำงานของเครื่องบด (mechanical rupture) เมื่ออุณหภูมิของการบดสูงขึ้น การฉีกขาดโมเลกุลด้วยเครื่องบดจะลดลงเพราะยางร้อนขึ้น โมเลกุลจะเคลื่อนที่ได้ง่ายยางจะนิ่มมาก แรงกระทำของเครื่องบดต่อโมเลกุลยางจึงฉีกโมเลกุลยางได้ยาก แต่ ณ ที่อุณหภูมิยิ่งสูงมากขึ้น (มากกว่า 130 °C) โมเลกุลยางจะเสื่อม เพราะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งก็จะเกิดการฉีกขาดของสายโมเลกุลเช่นกัน และเรียกปฏิกิริยาเช่นนี้ว่า oxidative degradation



ภาพที่ 3 ผลการบดยาง 30 นาที ในสภาพบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิต่าง ๆ
ต่อค่าความหนืด Mooney ของยาง

ที่มา: วรากรณ์ (2541)

2.4 การบดผสม (mixing) (วรากรณ์, 2542)

เครื่องที่ใช้บดยางโดยทั่วไปมี 2 ระบบ คือ เครื่องบดระบบเปิด (open mill) หรือที่เรียกตามลักษณะของเครื่องว่าเครื่องบด 2 ลูกกลิ้ง (two roll mill) และเครื่องบดระบบปิด (internal mixer) ซึ่งมักเรียกตามชื่อยี่ห้อเครื่อง เช่น เครื่อง banbury shaw intermix และ kneader เป็นต้น

2.4.1 การบดผสมโดยเครื่องบดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two roll mill) ก่อนบดยางจะต้องปรับความกว้างของช่องระหว่างลูกกลิ้ง (nip, gap) ให้พอเหมาะกับปริมาณยาง และข้อที่สำคัญจะต้องปรับระหว่างลูกกลิ้งให้กว้างสม่ำเสมอทั้ง 2 ข้าง ผ่านยางลงไปในช่วงระหว่างลูกกลิ้งในตอนแรกยางอาจเกาะลูกกลิ้ง ทำให้ร่วงหล่นลงบนถาดที่รองอยู่ใต้ลูกกลิ้ง เมื่อบดต่อไปยางเริ่มอ่อนพอที่พันรอบลูกกลิ้ง ความยากง่ายในการพันรอบลูกกลิ้งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของยางในการบดยางธรรมชาติถ้ายางไม่ได้รับการบดให้นิ่มมาก่อน ยางจะพันรอบลูกกลิ้งได้ยากมาก จำเป็นเป็นต้องบดให้นิ่มเสียก่อนจึงสามารถจับพันรอบลูกกลิ้งได้ ในช่วงแรกยางเกาะพันรอบลูกกลิ้งได้ยาก และมีลักษณะไม่เรียบทั่วผิวลูกกลิ้ง โดยจะมีช่วงขาดเป็นรูใหญ่ ๆ เมื่อบดต่อไป

ยางที่พันลูกกลิ้งจะเริ่มเต็มผิวหน้าลูกกลิ้ง และมีผิวเริ่มเรียบมากขึ้น ซึ่งลักษณะนี้จะเต็มสารต่าง ๆ ลงบนกองยาง (blank) ที่อยู่เหนือช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งได้ ระยะเวลาบดยางให้นิ่มก่อนที่จะเติมสารเคมีขึ้นอยู่กับชนิดและเกรดของยาง อุณหภูมิการบด

ในขณะที่เติมสารเคมีลงผสมกับยางนั้น จะมีส่วนของสารเคมีตกลงบนถาดใต้ลูกกลิ้งต้องคอยกวาดสารเคมีและใส่ลงบดผสม จนกระทั่งยางสามารถเข้ากับสารเคมีได้หมด ขณะการบดช่วงการเติมสารเคมีจะต้องใช้มีดตัดยาง (mill knife) กดลงข้างใดข้างหนึ่งของลูกกลิ้งหน้า และค่อย ๆ เลื่อนการมีดมาตามแนวยาวของหน้าลูกกลิ้งขณะที่กำลังหมุนอยู่ ม้วนยางที่ถูกตัดให้ยางที่ม้วนคงอยู่บนหน้าลูกกลิ้ง สังเกตยางบนช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง เมื่อกองยางหมดไป จึงใส่ม้วนยางกลับคืนเข้าบดในลักษณะใส่หัวหรือท้ายของม้วนยาง ตัดยางด้วยวิธีดังกล่าวสลับซ้าย-ขวา ของลูกกลิ้งหน้าจนสังเกตว่าสารเคมีทั้งหมดได้ผสมคลุกเคล้าทั่วถึงในเนื้อยาง จึงใช้มีดตัดยางและรีดแผ่นออกจากเครื่อง ขั้นสุดท้ายของการบดผสมมักจะให้ม้วนยาง นำด้านหัวหรือท้ายของม้วนยางใส่ผ่านช่องระหว่างลูกกลิ้งที่ตั้งไว้แคบ จำนวนประมาณ 6 ครั้ง เพื่อให้สารเคมีต่าง ๆ เข้ากับเนื้อยางได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอจากนั้นปรับช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้กว้างออกตามต้องการ ที่จะรีดยางขั้นสุดท้ายออกให้มีความหนาตามความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

2.4.2 การบดยางด้วยเครื่องระบบปิด (internal mixer) การบดยางธรรมชาติในเครื่องบดระบบปิดโดยทั่วไปจะใส่ยางลงไปบดก่อน โดยเฉพาะยางธรรมชาติต้องบดให้นิ่มก่อนแล้วจึงเติมสารเคมีต่างๆ ควรใส่พวกสารกระตุ้น สารตัวเติม สารทำให้ยางนิ่ม สารกันเสื่อม และสารตัวเร่ง ตามลำดับ ไม่ควรเติมสารตัวเติมพร้อม ๆ กับสารพวกน้ำมัน เพราะจะทำให้ยางลื่น ทำให้การผสมคลุกเคล้าของสารตัวเติมกับยางไม่ดี การบดผสมในเครื่องบดระบบปิดใช้เวลา 5-10 นาที ขึ้นอยู่กับเทคนิคการบดผสมและปริมาณสารตัวเติม นิยมเติมกำมะถันภายหลังการคัมพ์ยางผสมออกจากเครื่องบดระบบปิด โดยบดผสมกำมะถันบนเครื่องบด 2 ลูกกลิ้ง

3. ยางคงรูป (vulcanized rubber)

ปฏิกิริยาลูกกลิ้งในเซชันหรือปฏิกิริยาคงรูป เป็นปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยง (cross link) ระหว่างโมเลกุลของยางเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ทำให้ยางคงรูปและมีคุณสมบัติความยืดหยุ่นสูงขึ้น (พงษ์ธร, 2547) ยางธรรมชาติที่ผ่านการคงรูปมีความต้านทานต่อการฉีกขาดที่อุณหภูมิสูงดี ทำให้การถอดยางออกจากแม่พิมพ์ทำได้ง่าย โดยผลิตภัณฑ์จะไม่เสียหายมาก ถ้าหากจำเป็นที่จะ

ต้องยึดขณะที่ถอดแบบยางธรรมชาติสามารถคงรูปได้รวดเร็ว ที่อุณหภูมิปานกลาง เช่น ที่ 150°C เป็นต้น ทำให้สามารถใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ในปริมาณน้อยได้ แต่ยางธรรมชาติก็สามารถเสื่อมได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นไม่ควรจะคงรูปที่อุณหภูมิที่สูงเกินไป เช่น คงรูปที่อุณหภูมิสูงเกิน 180°C เป็นต้น การคงรูปให้สูงเกินไปจะทำให้คุณสมบัติของยางตกลง เช่น ค่าความทนทานต่อแรงดึงลดลง โมดูลัส และความแข็งลดลง เป็นต้น (พรพรรณ, 2540)

4. คุณสมบัติของยางคงรูป (properties of vulcanized rubber) (พรพรรณ, 2540)

4.1 ความแข็ง (hardness)

ยางธรรมชาติสามารถคงรูปให้มีความแข็งต่างๆ กันได้มาก ตั้งแต่นุ่มมาก (เช่น 30-50 IRHD-international rubber hardness degree) ไปจนถึงความแข็งของอีโบนินต์ (98+ IRHD) การปรับความแข็งของยางทำได้โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตัวเติม หรือโดยการเปลี่ยนปริมาณกำมะถันในช่วงของการใช้กำมะถันปริมาณ 10-20 phr (parts per hundred rubber) จะได้ยางที่มีความแข็งคล้ายหนัง (leather like) สำหรับงานกระเบื้องปูพื้นและยางลูกกลิ้ง แต่จะมีความแข็งต่ำและเสื่อมสภาพได้ง่าย

4.2 ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength)

ยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอ ทำให้สามารถตกผลึกได้เมื่อดึง (ดังแสดงในภาพที่ 2) ดังนั้นจึงทำให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงสูงและความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง ยางธรรมชาติแม้ไม่มีสารตัวเติม ยังมีความแข็งแรงสูงถึงประมาณ 30 MPa ซึ่งคุณสมบัตินี้ ทำให้ยางธรรมชาติ มีความเหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ ที่มีความบาง นุ่มและแข็งได้ เช่น ทำถุงมือผ่าตัด ลูกโป่ง ถูยางอนามัย สายยางยืด และยางรัด เป็นต้น เนื่องจากยางธรรมชาติมีความแข็งในตัวสูง จึงทำให้สามารถใช้สารตัวเติมราคาถูก เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตและดินขาว เป็นต้น สำหรับในผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการความแข็งเป็นคุณสมบัติหลัก เช่น ยางรองพื้นรถ ยางปูพื้น และยางรองขาเก้าอี้ เป็นต้น จากการที่ยางธรรมชาติสามารถใช้สารตัวเติมราคาถูกได้ ทำให้ยางธรรมชาติได้เปรียบกว่ายางชนิดอื่น ๆ ในด้านต้นทุนการผลิต สำหรับการใส่สารตัวเติมชนิดเสริมประสิทธิภาพที่มีราคาแพง เช่น เชม์ดำ และซิลิกา จะใช้ต่อเมื่อต้องการความแข็งแรงสูงเท่านั้น เช่น ดอกยางรถยนต์ พื้นและส้นรองเท้าคุณภาพสูง ยางหุ้ม

สายพานลำเลียงที่ทำให้ยางมีความสึกหรอสูง เช่น แร่โลหะ หรือกรวด เป็นต้น ถ้าใช้ขี้น้ำดำ HAF N 330 ในปริมาณ 45-50 phr จะทำให้ได้คุณสมบัติทั้งการเสริมคุณสมบัติแข็งแรงทนทานของยางและความแข็งที่สูงถึง 65 IRHD

4.3 ความสามารถในการยืด (elongation)

ยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม จะสามารถยืดได้ถึงประมาณ 1000% หรือมากกว่านั้น ความสามารถในการยืดของยางธรรมชาติจะลดลงตามปริมาณของสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น และตามปริมาณของพันธะการคงรูป คุณสมบัติในการยืดได้สูงนี้ ทำใหยางธรรมชาติสามารถใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความยืดสูง เช่น เส้นยางยืด ยางรัดของและลูกโป่ง เป็นต้น

4.4 ความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance)

ยางธรรมชาติมีความสามารถในการดกผลึกได้ดี ทำให้มีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่ายางสังเคราะห์อื่น ๆ ยกเว้นยางโพลียูรีเทน (polyurethane) ที่เชื่อม โยงพันธะด้วยไฮโดรเจน ความต้านทานต่อการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพร่วมด้วย

4.5 ความสามารถในการกระเด็นตัว (rebound) และฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss)

ยางธรรมชาติมีความสามารถกระเด็นตัวสูงกว่ายางอื่น ๆ ยกเว้นยางบิวทาไดอิน (butadiene rubber, BR) ความกระเด็นตัวของยางธรรมชาติสูงถึงประมาณ 70% เมื่อมีสารตัวเติมอยู่ด้วยความกระเด็นลดลงตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ความกระเด็นตัวสูงของยางธรรมชาติแสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติจะไม่สะสมพลังงานไว้ในตัวเมื่อได้รับแรงกระทำ ทำให้ความร้อนสะสมในยางธรรมชาติน้อยกว่ายางอื่น ๆ ดังนั้นจะเหมาะสมในการใช้ทำดอกยางรถบรรทุกซึ่งมีความหนามาก การถ่ายเทความร้อนยาก ซึ่งต้องเลือกใช้ยางที่สะสมความร้อนต่ำแบบยางธรรมชาติเท่านั้น ความกระเด็นตัวสูงและฮิสเทอรีซิสต่ำของยางธรรมชาติ สามารถทำให้ลดลงได้โดยการใส่สารตัวเติม ดังนั้นจึงทำให้สามารถเตรียมผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติให้มีคุณสมบัติความกระเด็นตัวต่าง ๆ กันได้ ตัวอย่างได้แสดงให้เห็นในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความกระด้างตัวของยางธรรมชาติเมื่อใช้เขม่าดำ SRF N762 ปริมาณต่าง ๆ กัน

ปริมาณ SRF, phr	2	30	60	100	120
ความกระด้างตัว, %	88	82	71	59	46
ความแข็ง, IRHD	39	52	60	72	82

ที่มา: พรพรรณ (2540)

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าความแข็งของยางจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นในขณะที่ความกระด้างตัวจะลดลง ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะเตรียมยางที่มีความแข็งสูงในขณะที่ความกระด้างตัวสูงพร้อม ๆ กัน

4.6 การใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ (application at low temperature)

คุณสมบัติเด่นอีกอย่างหนึ่งของยางธรรมชาติ คือ การที่มีความสามารถในการหักงอไปมาได้แม้อุณหภูมิต่ำ ค่าอุณหภูมิแข็งคล้ายแก้ว (T_g) มีค่า ประมาณ -72°C ดังนั้นจึงทำให้มีความเป็นยางได้ แม้อุณหภูมิต่ำกว่าเนื้อกว่ายางชนิดอื่น ๆ ยกเว้นยางบิวทาไดอิน (BR) และยางซิลิโคน (methyl silicone rubber, MQ) เท่านั้น การใช้งานที่อุณหภูมิต่ำจะใช้ได้ในช่วงสั้นๆ แต่ถ้าเป็นเวลานาน เช่น มากกว่า 1-2 วัน การตกผลึกจะเกิดขึ้น อัตราการตกผลึกจะสูงสุดที่อุณหภูมิ -26°C การใส่น้ำมันลงในยางธรรมชาติ จะทำให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำลงไปจากเดิมได้อีก ดังเช่นยางธรรมชาติชนิด OENR (oil extended natural rubber) เป็นต้น

4.7 ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (aging)

พันธะคู่ที่ไวในปฏิกิริยาซึ่งทำให้เกิดการคงรูปนั้นก็เป็นจุดอ่อนที่ทำให้ถูกทำปฏิกิริยาได้ง่ายกับออกซิเจนและโอโซน โดยทั่วไป ยางธรรมชาติไม่เหมาะกับงานหลายชนิดที่ต้องการความต้านทานต่อการเสื่อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูงและมีโอโซนอยู่ด้วย เพื่อที่จะให้ยางมีความต้านทานต่อการเสื่อมดีมากขึ้นเป็นที่ต้องใส่สารกันเสื่อมแอนติออกซิแดนท์ และใส่สารตัวเร่งประเภทไฮดรอกไซลอปในระยะเวลาที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไป อย่างไรก็ตามความทนทานต่อการเสื่อมสภาพของยางธรรมชาติก็ยังไม่ถึงระดับของยางสังเคราะห์โดยส่วนใหญ่

4.8 ความทนทานต่อความร้อน (heat resistance)

การใช้งานของยางธรรมชาติค่อนข้างจะจำกัดในสถานะที่รุนแรงที่มีผลต่ออายุการเสื่อมของยาง ยางธรรมชาติไม่เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 70 °C เป็นระยะเวลานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นยางบาง ซึ่งมีพื้นที่สัมผัสกับบรรยากาศเป็นบริเวณกว้างและไม่ใช้ในกรณีที่ต้องยึดยางในบรรยากาศที่มีโอโซนอยู่ด้วย แอนติออกซิแดนท์และแอนติโอโซนเนท์จะใช้เป็นสารช่วยป้องกันยางธรรมชาติต่อการเสื่อม

วิธีการทดสอบความทนทานต่อความร้อนของยางของ สมาคมนักวิศวกรรมของเยอรมัน (VDE) ได้ถือว่า ยางยังคงยึดได้เกิน 100% ภายหลังจากที่ดึงยางดังกล่าวไว้ 20,000 ชั่วโมง (2 ปี) ที่อุณหภูมิ 60-70 °C ยางสังเคราะห์เกือบทั้งหมดไม่มีปัญหาในการทดสอบนี้แต่ยางธรรมชาติอาจมีปัญหา การทำให้ยางธรรมชาติทนทานต่อความร้อนดีขึ้น อาจจะต้องทำทั้ง 3 วิธีพร้อม ๆ กันคือ ระบบและวิธีคงรูป (vulcanization systems) ระบบสารตัวเติม และระบบแอนติออกซิแดนท์ ระบบการคงรูปแบบอีวี (efficient vulcanizing system, EV) หรือระบบเปอร์ออกไซด์ (peroxide system) หรือยูรีเทน (urethane system) จะให้ความทนทานต่อความร้อนดีขึ้น รวมทั้งควรให้คงรูปที่อุณหภูมิต่ำลง และให้ยางสุกน้อยลง การใช้สารตัวเติมซิลิกาจะให้ยางทนทานต่อความร้อนมากขึ้น และการใช้สารแอนติออกซิแดนท์ผสมกันระหว่าง Octylated Diphenylamine (ODPA) Styrenated Diphenylamine (SDPA) กับ 2-Mercapto Benzimidazole (MBI) จะให้ยางธรรมชาติความร้อนได้นานขึ้น

5. ระบบการคงรูปของยางธรรมชาติ (vulcanization systems of natural rubber)

ยางธรรมชาติสามารถคงรูปหลายระบบด้วยกัน คือ (พรพรรณ, 2540)

5.1 ระบบกำมะถันปกติ (conventional system, CV)

ระบบกำมะถันปกติ เป็นระบบที่มีราคาถูกที่สุดในระบบทั้งหมด แต่ละพันธะเชื่อมโยงจะมีกำมะถันอยู่หลายอะตอม (polysulphidic cross link) จึงให้ยางที่มีคุณสมบัติทางเชิงกล เช่น ความทนทานต่อแรงดึงดี ความต้านทานต่อการฉีกขาดและความต้องการการล้าดี และคุณสมบัติในการต้านการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำดีมาก แต่ไม่ต้านคุณสมบัติการ reversion เช่น คุณสมบัติ

ตกลงเมื่ออบสุกเกินไปหรือเสื่อมเนื่องจากการถูกออกซิไดซ์ ส่วนคุณสมบัติในการทนทานต่อความร้อน ด้านการต้านความเสื่อม และคุณสมบัติการจัดตัวเมื่อได้รับแรงอัด (compression set) ของยาง จะดีกว่าระบบอื่น ๆ

5.2 ระบบอีวี (efficient vulcanizing system, EV)

ระบบนี้ใช้กำมะถันน้อยและสารตัวเร่งมากหรือใช้ระบบสารให้กำมะถัน ซึ่งทำให้การใช้กำมะถันเชื่อมโยงแต่ละพันธะมีประสิทธิภาพมาก แต่ละพันธะเชื่อมโยงจะมีกำมะถันอยู่เพียงหนึ่งหรือสองอะตอมเท่านั้น (monosulphidic or disulphidic cross link) ทำให้ยางมีคุณสมบัติทางกลดีกว่าการใช้กำมะถันแบบธรรมดา แต่จะใหยางมีความต้านทานต่อการ reversion ดี คุณสมบัติในการทนทานต่อความร้อนดี และมีคุณสมบัติด้านการเสื่อมเมื่อถูกออกซิไดซ์และมีคุณสมบัติการจัดตัวเมื่อได้รับแรงอัดที่ดี

5.3 ระบบเซมิอีวี (semi efficient vulcanizing system, semi-EV)

ระบบนี้ใช้กำมะถันและสารตัวเร่ง กึ่งกลางระหว่างการใช้กำมะถันและสารตัวเร่งในระบบปกติ กับการใช้ในระบบอีวี ทำให้คุณสมบัติด้านทางกลและด้านต้านความเสื่อมอยู่ระหว่างทั้งสองระบบนี้ อัตราส่วนกำมะถันต่อสารตัวเร่งและคุณสมบัติของยางคงรูป แสดงในตารางที่ 2

5.4 ระบบเปอร์ออกไซด์ (peroxide system)

ยางที่คงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ที่มีแอนติออกซิแดนซ์ที่เหมาะสม จะให้ยางมีความต้านทานต่ออุณหภูมิสูงดีที่สุดในระบบทั้งหมด แต่อย่างไรก็ตาม ระบบเปอร์ออกไซด์จะอบสุกช้า และเริ่มคงรูป (scorch) เร็ว ระยะเวลาการอบสุกจะใช้ประมาณ 6 เท่าของอายุครึ่งชีวิต (half life) ของเปอร์ออกไซด์ เพื่อไม่ให้มีเปอร์ออกไซด์หลงเหลืออยู่ ที่จะทำให้ความต้านทานต่อการออกซิไดซ์ของยางเสียไป แต่ต้องระมัดระวังเกี่ยวกับการใช้แอนติออกซิแดนซ์เพราะแอนติออกซิแดนซ์บางตัว จะทำให้การใช้เปอร์ออกไซด์ไม่ได้ผล ตัวอย่างของแอนติออกซิแดนซ์พวกนั้น ได้แก่ P-Phenylenediamines เป็นต้น แอนติออกซิแดนซ์ที่เหมาะสม ได้แก่ 2-Mercapto Benzimidazole (MBI) หรือ Zinc-2-Mercaptobenzimidazole (ZMBI) ผสมกับ 2, 2, 4-Trimethyl-1

(TMQ) และ Zinc Dimethyl Dithiocarbamate (ZDMC) เป็นต้น เปอร็อกไซด์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ Dicumyl Peroxide แต่อย่างที่ได้อ่านมีกลิ่นพิเศษ เปอร็อกไซด์ตัวอื่นที่อาจจะใช้ได้คือ Bis- (T-Butylperoxy-Isopropyl Benzene) ซึ่งจะอบสุกช้ากว่า มีอายุครึ่งชีวิตแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 อัตราส่วนกำมะถันต่อสารตัวเร่งและคุณสมบัติของยางคงรูป

vulcanization system	sulphur (phr)	accelerator (phr)	vulcanisate properties
conventional system (CV)	2.0-3.5	1.0-0.4	Excellent tensile strength resilience, fatigue and abrasion resistance. Poor reversion resistance and poor resistance to ageing, set and stress-relaxation.
efficient (EV)	0.3-0.8	6.0-2.5	Excellent resistance to ageing, set and stress-relaxation. Good resistance to reversion.
semi-efficient (semi- EV)	1.0-1.7	2.5-1.0	Lie between those for CV and EV

ที่มา: สถาบันวิจัยยาง (2545)

ตารางที่ 3 ค่าครึ่งชีวิตของเปอร็อกไซด์

ชื่อเคมี	ชื่อทางการค้า	อายุครึ่งชีวิต (นาท) ที่	
		160 °C	180 °C
Dicumyl Peroxide (ประมาณ)	Dicup	8.7	1.3
Bis- (T-Butylperoxy-Isopropyl Benzene)	Percadox 14	12	2

ที่มา: พรพรรณ (2540)

ยางที่คงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์มีความต้านทานตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำไม่ดี และมีคุณสมบัติทางกลด้อยกว่าการใช้ระบบกำมะถันปกติ และยังไม่เหมาะในการคงรูปโดยใช้ไอน้ำหรืออากาศร้อน เพราะสารเปอร์ออกไซด์จะกระตุ้นให้เกิดการออกซิไดซ์ได้ ปริมาณการใช้เปอร์ออกไซด์ ประมาณ 2.5-3 phr (ไม่ต้องมีซิงค์ออกไซด์หรือกรดสเตียริกร่วมด้วย)

5.5 ระบบยูรีเทน (urethane system)

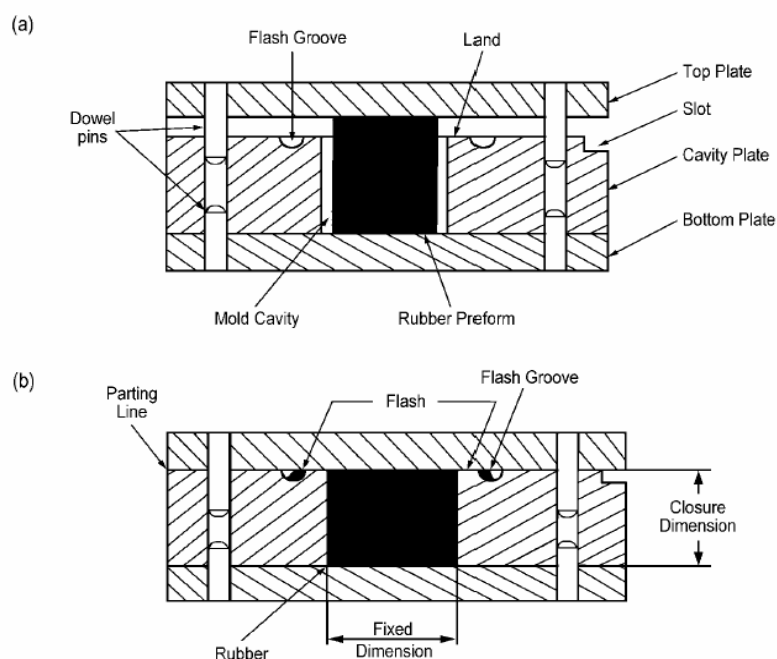
สารคงรูปยางธรรมชาติชนิดยูรีเทนมีชื่อเรียกทางการค้าว่า Novor ให้ยางคงรูปที่มีคุณสมบัติต้านทานต่อการ reversion ได้ดี ทนความร้อนได้สูง และมีคุณสมบัติทางเชิงกลดี และระบบนี้ยังสามารถใช้ร่วมกับระบบคงรูปด้วยกำมะถันได้ การปรับอัตราส่วนระหว่างสองระบบนี้ทำให้สามารถปรับคุณสมบัติและราคาต้นทุนได้

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยใช้แม่พิมพ์ (moulding)

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยอัดแม่พิมพ์ เป็นกระบวนการที่มีผลทั้งขึ้นรูปผลิตภัณฑ์และทำให้ยางคงรูป (shaping or forming and vulcanizing) โดยอาศัยความร้อนและแรงอัดยางที่อยู่ในสถานะที่สามารถอ่อนตัวและไหลได้ (plastic State) ในแม่พิมพ์รูปร่างตามที่ต้องการ (วราภรณ์, 2542) วิธีการพื้นฐานของการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์มี 3 แบบ คือ วิธีการใช้แม่พิมพ์แบบอัดธรรมดา (compression mould) แบบกึ่งฉีด (transfer mould) และแบบฉีด (injection mould)

1. แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป (compression mould)

แม่พิมพ์แบบอัดขึ้นรูปนี้ใช้กันอย่างกว้างขวางในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางต่าง ๆ ลักษณะของแม่พิมพ์ประกอบด้วย 2 ส่วน ซึ่งยึดกันด้วยสลัก ใต้อย่างที่ผสมสารเคมีแล้วในช่องของแม่พิมพ์ โดยให้ขนาดขางเล็กกว่าขนาดของช่องแม่พิมพ์เล็กน้อย เพื่อจะได้แผ่นกระจายเต็มช่องแม่พิมพ์ เมื่อปิดแม่พิมพ์และอาศัยเครื่องอัด (press) อัดแม่พิมพ์ ส่วนของยางที่เกินความจุของช่องแม่พิมพ์จะล้นออกตามข้างแม่พิมพ์ ไหลไปตามร่องและเรียกยางที่ล้นจากแม่พิมพ์ว่า เศษยาง (mould flash) ดังแสดงในภาพที่ 4 การทำแม่พิมพ์อาจทำให้สามารถยกเข้าออกจากเครื่องอัดได้ และเปิดแม่พิมพ์โดยอาศัยแท่งเหล็กหรือแท่งทองเหลือง หรืออาจทำให้แม่พิมพ์ยึดติดกับแท่นของเครื่องอัด ก็ได้ จำนวนช่องว่างในแม่พิมพ์ขึ้นอยู่กับขนาดของแท่นเครื่องอัด และขนาดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทำ (วราภรณ์, 2542)

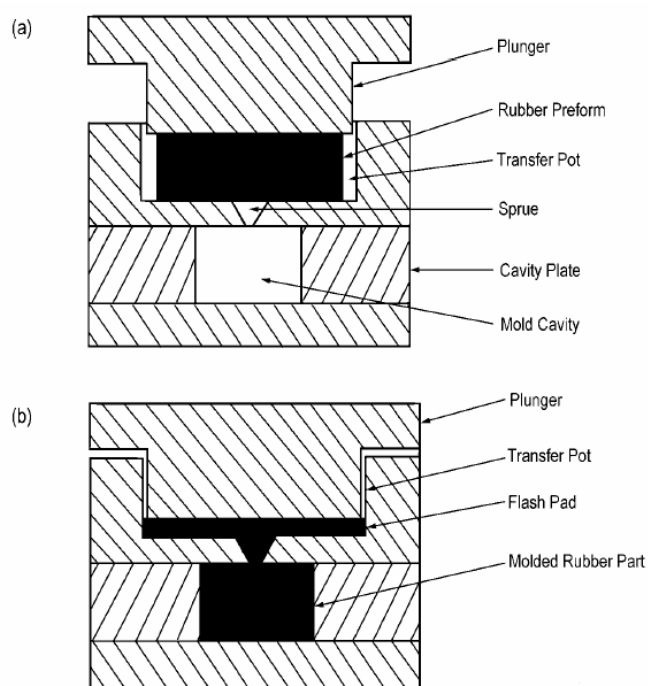


ภาพที่ 4 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป (a) ก่อนปิดแม่พิมพ์ (b) หลังปิดแม่พิมพ์

ที่มา: Johnson (2001)

2. แม่พิมพ์กึ่งฉีดขึ้นรูป (transfer mould)

หลักการของแม่พิมพ์กึ่งฉีดคือ ขางจะอ่อนตัวและถูกอัดให้กระจายจากส่วนหนึ่งของแม่พิมพ์ที่เรียกว่า แอ่งพักยาง (reservoir or pot) ผ่านรูฉีด (sprue) เข้าไปยังตัวแม่พิมพ์ที่เป็นรูปร่างผลิตภัณฑ์ (วารกรณ์, 2542) ดังภาพที่ 5 วิธีการนี้มีข้อดีกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูป คือ ชิ้นงานที่ได้มีขนาดแน่นอนกว่าเพราะตัวแม่พิมพ์จะมีการปิดสนิทก่อนที่จะใช้แรงอัดเข้าไป ในกรณีของชิ้นงานที่ผสมขึ้นส่วนโลหะจะมีการยึดติดที่ดีกว่า นอกจากนั้นต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตต่ำกว่าเนื่องจากใช้ระยะเวลาคงรูป (cure time) ที่สั้นกว่า (Johnson, 2001) ข้อดีข้อเสียของแม่พิมพ์ชนิดนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4



ภาพที่ 5 แม่พิมพ์กึ่งฉีดขึ้นรูป (a) plunger ดันไปจากบนลงล่าง
(b) ยางถูกฉีดเข้าแม่พิมพ์ซ้ายมือ

ที่มา: Johnson (2001)

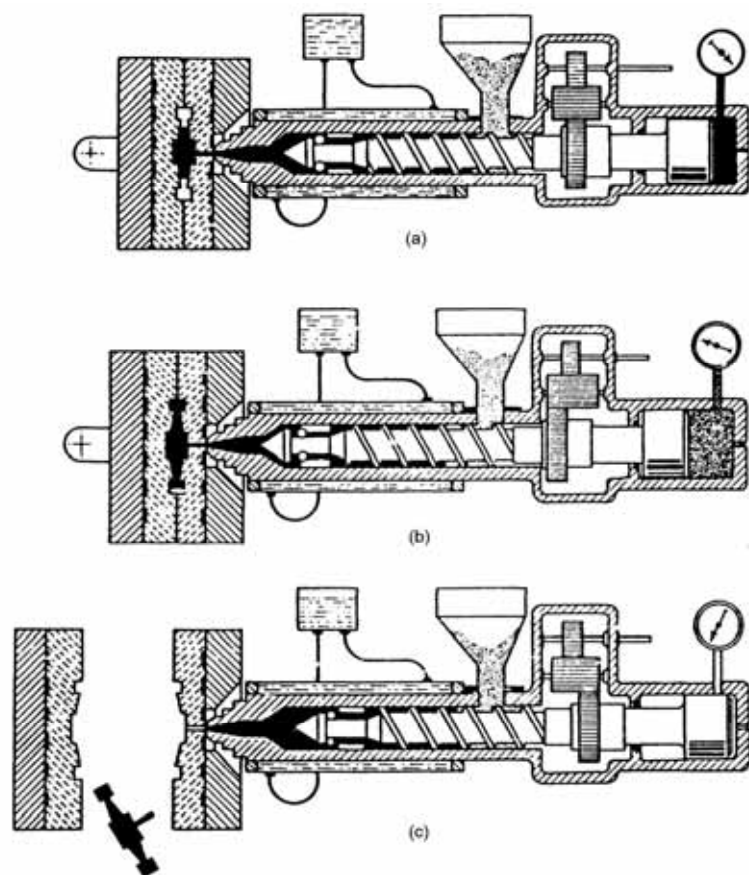
ตารางที่ 4 ข้อดีและข้อเสียของแม่พิมพ์กึ่งฉีดขึ้นรูป

ข้อดี	ข้อเสีย
1. เตรียมชิ้นงานได้ง่าย เพราะเตรียมขึ้นใหญ่เพียงชิ้นเดียว	1. ราคาแพง
2. ใช้ระยะเวลาสั้นในการอบยางให้คงรูป	2. แม่พิมพ์มีน้ำหนักรมาก
3. ยางเชื่อมกับโลหะได้ดีกว่า	3. ใช้เวลานานในการเปลี่ยนยางเข้า-ออกแต่ละครั้ง
4. มียางเสียน้อยกว่า	4. มักมีช่องอัดยางน้อยกว่าแม่พิมพ์แบบอัดธรรมดา
5. วางชิ้นส่วนโลหะที่จะประกอบได้ง่าย	

ที่มา: วราภรณ์ (2542)

3. แม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูป (injection mould)

แม่พิมพ์แบบนี้ถือว่าพัฒนามาจากแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด ดังแสดงในภาพที่ 6 แสดงขั้นตอนของการขึ้นรูปยางโดยใช้แม่พิมพ์แบบฉีด เครื่องที่ใช้ในการฉีดยางอาจเป็นชนิดสกรูหรือชนิดลูกสูบ (piston) ซึ่งลักษณะตัวเครื่องฉีดมีทั้งแบบแนวตั้งและแบบแนวนอนโดยที่มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับเครื่องที่ใช้ฉีดพลาสติก ยางที่จะป้อนเข้าเครื่องฉีดอาจอยู่ในรูปลักษณะเส้นยาวขนาดเล็ก หรือเป็นเม็ดขนาดเล็ก ในการขึ้นรูปยางโดยใช้แม่พิมพ์และอัดด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป ยางจะถูกทำให้คงรูปโดยอาศัยความร้อนจากภายนอกแม่พิมพ์ แต่ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป (และกึ่งฉีดขึ้นรูป) ยางจะถูกหลอมด้วยความร้อนก่อนอย่างทั่วถึง อุณหภูมิของยางขณะที่ผ่านตามช่องทางสู่แม่พิมพ์จะสูงขึ้น โดยความร้อนที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงเสียดสี ปฏิกิริยาที่ทำให้ยางคงรูปจึงเกิดขึ้นอย่างทั่วถึงและก่อให้เกิดการคงรูปที่มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งผลิตภัณฑ์ แม้ว่า จะมีความหนาตามที่ตาม (วราภรณ์, 2542) โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปนี้ถือเป็นการแปรรูปที่มีข้อดีต่าง ๆ มากกว่ากระบวนการแบบเดิมมาก เช่น ลดค่าใช้จ่ายในด้านแรงงาน ใช้เวลาคงรูปที่สั้น ให้น้ำหนักที่แน่นอน รวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณสมบัติทางกายภาพที่สม่ำเสมอมากกว่า (Johnson, 2001) จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีความทนทานต่อการหักงอ ดีกว่ากระบวนการขึ้นรูปแบบอื่น ๆ (วราภรณ์, 2542)



ภาพที่ 6 ขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (a) สกรูหมุนไปข้างหน้า (จากขวาไปซ้าย)
 (b) ยางถูกฉีดเข้า แม่พิมพ์ ซ้ายมือ (c) ยางคงรูป สกรูหมุนกลับ แม่พิมพ์เปิดและ
 ผลิตภัณฑ์หลุดออกจากแม่พิมพ์

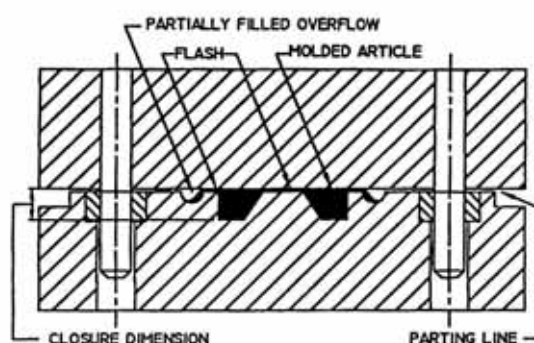
ที่มา: Wheelans (1974)

แม่พิมพ์สำหรับการอัดขึ้นรูป (compression mould)

แม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่มีใช้กันโดยทั่วไป สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท (บุญธรรม และ อติชัย, 2539)

1. แม่พิมพ์แบบโอเพ่นแฟลช (open flash mould)

เป็นแม่พิมพ์แบบธรรมดาที่ใช้กันอยู่ทั่วไป มีข้อดีคือทำได้ง่าย ราคาไม่แพง มีการสึกหรอน้อย เปิดง่าย อากาศที่ขังอยู่ไหลออกได้ง่าย สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี แต่มีข้อเสียคือต้องระวังให้เดือยตรงกับร่อง ความดันในการอัดยางต่ำ ยางไหลออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายทำให้มีเศษยาง (flash) มาก (ดังแสดงในภาพที่ 7)



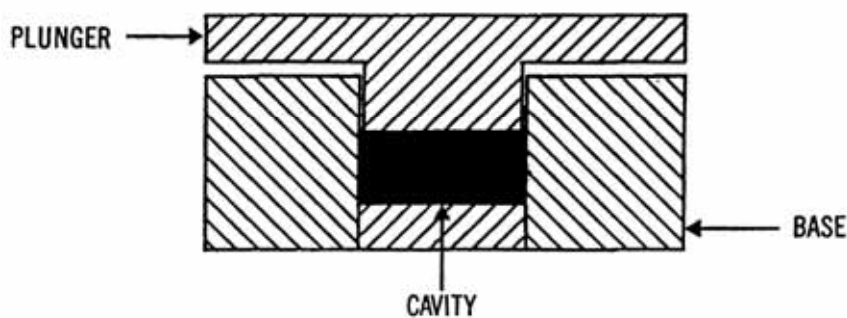
ภาพที่ 7 แม่พิมพ์แบบโอเพ่นแฟลช

ที่มา: Sommer (2003)

2. แม่พิมพ์แบบโพสิทีฟ (positive mould)

แม่พิมพ์แบบนี้มีข้อดีคือ แม่พิมพ์ไม่จำเป็นต้องมีเดือย ความดันที่ใช้ในการอัดแม่พิมพ์สูง ไม่เกิดปัญหาเป็นร่องที่รอยต่อแม่พิมพ์ (backrinding) ข้อเสียของแม่พิมพ์แบบนี้คือ อากาศภายในถ่ายเทออกยาก อาจจะมีโพรงอากาศ (air trap) ซึ่งมีความจำเป็นต้องกำจัดออก เช่น โดยการตัด การทำแม่พิมพ์ทำได้ยากกว่าแบบ open flash mould มีการสึกหรอสูง บำรุงรักษายาก เนื่องจากไม่มีช่องให้ยางส่วนเกินไหลออกจึงจำเป็นต้องควบคุมขนาด (หรือน้ำหนักหากทราบความหนาแน่น

ที่แน่นอน) ของยางที่อัดให้แน่น การถ่ายเทความร้อนยาก แม่พิมพ์แบบนี้ส่วนใหญ่จะไม่ค่อยได้ใช้กันในการอัดขึ้นรูปยาง แต่จะใช้กับงานที่อัดวัสดุที่เป็นผง เช่น Bakelite เป็นต้น ซึ่งสามารถอัดตัวเข้ากันได้เป็นอย่างดีเมื่อมีความดันสูง (ดังแสดงในภาพที่ 8)

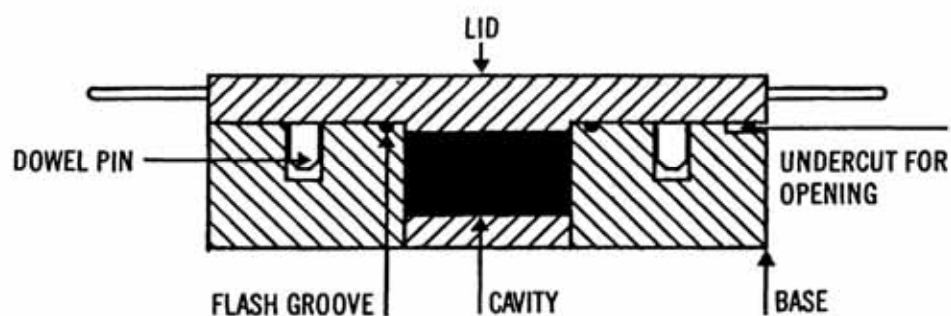


ภาพที่ 8 แม่พิมพ์แบบโพสิทีฟ

ที่มา: Sommer (2003)

3. แม่พิมพ์แบบเซมิโพสิทีฟ (semi-positive mould)

เป็นแม่พิมพ์ที่มีลักษณะผสมกันระหว่าง open flash mould และแบบ positive mould จึงมีข้อดีข้อเสียใกล้เคียงกัน แต่ได้แรงอัดมากกว่าแบบ open flash mould (ดังแสดงในภาพที่ 9)



ภาพที่ 9 แม่พิมพ์แบบเซมิโพสิทีฟ

ที่มา: Sommer (2003)

ปัจจัยที่สำคัญในการอัดแม่พิมพ์

1. อุณหภูมิ

การอัดแม่พิมพ์เป็นปฏิกิริยาทางเคมีเป็นไปตามสมการของ Arrhenius ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$K = S \cdot e^{-(E/RT)} \quad (1)$$

เมื่อ	K	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยา (reaction rate)
	S	=	ค่าคงที่
	E	=	พลังงานกระตุ้น (energy of activation) 19-32 kcal/mol (สำหรับยางทั่วไปเท่ากับ 24 kcal/mol.)
	R	=	ค่าคงที่ของแก๊ส
	T	=	อุณหภูมิของปฏิกิริยา (kelvin, K)

จากสมการที่ (1) จะเห็นได้ว่าทุกการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C ปฏิกิริยาเคมีจะเร็วขึ้นเป็น 2 เท่าตัว ดังนั้นสมมติว่าที่อุณหภูมิ 140 °C จะใช้เวลา 30 นาที ยางจึงเกิดการคงรูปสมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 150 °C จะใช้เวลาเพียง 15 นาที ก็สามารถคงรูปในระดับที่เท่ากัน

1.1 อุณหภูมิแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปยางหนา

การอบยางเหมือนกับอบเนื้อคือ ข้างนอกจะสุกก่อนด้านใน ถ้าด้านในสุกด้านนอกจะเกรียมไปแล้ว เพราะฉะนั้นยางหนาจะต้องอบที่อุณหภูมิต่ำ และใช้เวลานานและจะต้องเผื่อระยะเวลาพักตัวให้อุณหภูมิของยางภายในค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม ยางชั้นบางสามารถอบคงรูปที่อุณหภูมิสูง และใช้ในเวลาสั้นลงได้

1.2 ข้อกำหนดการตั้งอุณหภูมิของแม่พิมพ์

1.2.1 ลักษณะการไหลของยางในแม่พิมพ์

1.2.2 ระยะเวลาของการอุ่นยางในแม่พิมพ์

- ทำให้ยางสุกให้สม่ำเสมอ
- ยางหนาควรใช้อุณหภูมิต่ำ

1.2.3 ข้อกำหนดของระบบคงรูป

1.2.4 สีของยางจะสวยกว่า ถ้าคงรูปที่อุณหภูมิต่ำ

1.2.5 ความทนทานต่อการฉีกขาดลดลง เมื่ออุณหภูมิการอบสูงขึ้น ยิ่งผลิตภัณฑ์
เว้ามาก โค้งมาก ยิ่งฉีกขาดง่าย

2. เวลาการอัดแม่พิมพ์

การถ่ายเทความร้อนเป็นเรื่องที่สำคัญของการอัดแม่พิมพ์ ยางที่นำความร้อนดี ย่อมร้อนเร็ว ยางที่บาง ๆ ถ่ายเทความร้อนได้เร็ว อาจใช้เวลาจากเครื่อง rheometer เป็นเวลาที่ใช้ในการคงรูปได้ แต่ยางหนา ๆ ต้องใช้เวลานานขึ้นเพื่อเวลาในการทำให้ยางภายในร้อนขึ้นด้วย นอกจากนี้การใช้ ปริมาณสารตัวเติมในการบดผสมยาง เช่น เชม์ดำ ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เวลาในการอัด แม่พิมพ์ลดลง (Ciesielski, 1999) ระยะเวลาในการเผื่อขึ้นอยู่กั

2.1 รูปร่างของผลิตภัณฑ์ยาง

2.2 ความหนาของผลิตภัณฑ์ยาง

2.3 การแพร่ความร้อนของยางผสม (thermal diffusivity ของยาง) ดังสมการที่ (2)

$$\text{Thermal Diffusivity, } D = \frac{\text{Thermal Conductivity}}{\text{Specific Heat} \times \text{Specific Gravity}} \quad (2)$$

เนื้อยางล้วนจะมีค่า thermal diffusivity ต่ำ
 ยางที่ใส่เขม่าดำมากจะมี thermal diffusivity สูง
 ยางที่ใส่ ZnO มาก จะมี thermal diffusivity สูง
 หน่วยของ D เป็น $\text{นิ้ว}^2/\text{นาท}$
 ยางธรรมชาติที่คงรูป ไม่มีสารตัวเติม มีค่า $D = 0.0075$
 ยางธรรมชาติที่คงรูป เขม่าดำ 50 phr มีค่า $D = 0.01$
 ยางธรรมชาติที่คงรูป มีสารตัวเติมในปริมาณสูง มีค่า $D = 0.015$
 (เหล็กมีค่า $D = 1$)

3. ความดัน

ความดันที่ใช้อัดยาง ใช้ในการให้ยางไหลได้เต็มแม่พิมพ์ โดยขึ้นอยู่กับความหนืดของยาง
 ยางที่มีความหนืดน้อย อาจใช้ความดันต่ำ ประมาณ 15 กก/ซม² หรือ ประมาณ 200 ปอนด์/นิ้ว²
 ยางที่มีความหนืดสูงมาก (ยางแข็งมาก) จะใช้ความดันสูง เช่น 100 กก/ซม² หรือ ประมาณ 1400
 ปอนด์/นิ้ว²

ความดันที่ใช้อัดยาง สามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะ

3.1 ความดันจากภายนอก

ความดันแบบนี้ใช้ผลิตภัณฑ์ยางที่ซับซ้อน ยางแข็ง ต้องการความดันในการอัดสูง

- ยางนิ่ม แม่พิมพ์ธรรมดา ใช้ความดันประมาณ 15 กก/ซม²
- ยางแข็ง แม่พิมพ์ซับซ้อน ใช้ความดัน ประมาณ 100 กก/ซม²

สามารถคำนวณแรงที่ใช้ปิดแม่พิมพ์ได้จากสมการที่ (3)

$$\text{แรงที่ใช้ปิดแม่พิมพ์} = \text{ความดันที่ต้องการ} \times \text{พื้นที่พิมพ์} \quad (3)$$

หรือแรงที่ใช้ในการปิดแม่พิมพ์อาจคำนวณได้จากสมการ (4)

$$\text{แรงที่ใช้ในการปิดแม่พิมพ์} = \text{ความดันในกระบอกไฮดรอลิก} \times \text{พื้นที่หน้าตัดกระบอก} \quad (4)$$

3.2 ความดันจากภายในยาง

ความดันในลักษณะนี้คือ ความดันจากแก๊สในยาง ได้แก่ ยางประเภทฟองน้ำ ความดันที่ใช้ในการอัดแม่พิมพ์ไม่สูงมาก เพียงอัดแม่พิมพ์ไม่ให้เปิดอันเนื่องมาจากยางพองขึ้นเท่านั้น แม่พิมพ์ไม่จำเป็นต้องแข็งแรงมาก สามารถใช้โลหะอ่อน เช่น อลูมิเนียมได้

3.3 ความดันจากถุงลมหรือของเหลว

ความดันที่ใช้อัดผ่านถุงลมหรือของเหลวไปดันยางให้อัดกับแม่พิมพ์ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ยางรถยนต์ ยางท่อ สามารถคำนวณแรงที่ใช้ปิดแม่พิมพ์ได้จากสมการที่ (5) หรือให้สูงกว่าแรงดันจากข้างใน 10% ถึง 20% (บุญธรรม และ อติชัย, 2539)

$$\text{แรงที่ใช้ปิดแม่พิมพ์} = \text{ความดันภายใน} \times \text{พื้นที่ผิวยาง} \times 1.1 \text{ (หรือ 1.2)} \quad (5)$$

กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (compression mould)

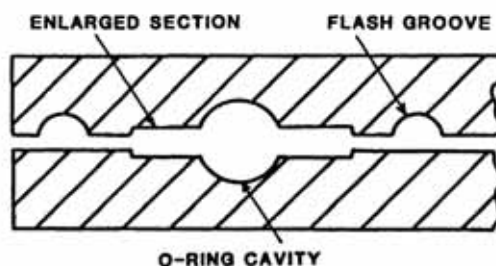
สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน

1. การเตรียมขี้ยาง

นำยางที่ผสมสารเคมีแล้ว มาตัดให้ได้ขนาด รูปร่าง และน้ำหนักตามต้องการ โดยทั่วไปมักจะเตรียมให้ขี้ยางมีปริมาตรมากกว่าปริมาตรของแม่พิมพ์อยู่ประมาณ 5-15% นอกจากจะพิจารณาปริมาตรแล้ว ถ้าหากทราบความหนาแน่นที่แน่นอน สามารถใช้วิธีการชั่งน้ำหนักได้ โดยปกติแล้วให้มากกว่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ 6-10% และมีความหนืดอย่างน้อย 30 (ML 1+10 ที่อุณหภูมิ 121 °C) (DuPont Dow Elastomers, 2003) ส่วนรูปร่างของขี้ยางนั้นควรเตรียมใกล้เคียงกับรูปร่างของช่องในแม่พิมพ์

2. การเตรียมแม่พิมพ์เพื่ออัดยาง

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการอัดมักจะทำด้วยเหล็กหรืออลูมิเนียม ถ้าเป็นอลูมิเนียมจะตกแต่งได้ง่ายกว่าและเบากว่าเหล็ก แต่อลูมิเนียมมีความทนทานน้อยกว่าเหล็ก อย่างไรก็ตามโลหะที่ใช้ทำยางนั้นห้ามใช้โลหะที่เป็นทองแดง ทองเหลืองหรือโลหะที่มีทองแดงผสม เพราะธาตุเหล่านี้ไม่เพียงแต่จะทำให้ยางเสื่อมสภาพได้ง่าย การถอดยางออกจากแม่พิมพ์ที่มีทองแดงผสมก็ทำได้ยากมาก แม่พิมพ์จะมีช่องว่างที่จะให้ยางไหลเข้าไปอยู่ เพื่อขึ้นรูปตามแบบในแม่พิมพ์ ซึ่งเรียกว่าช่องว่างของแม่พิมพ์ (mould cavity) โดยบริเวณรอบ ๆ ช่องว่างของแม่พิมพ์นั้นจะมีช่องว่าง (overflow groove or flash groove) ให้ยางที่ใส่เกินปริมาตรช่องว่างของแม่พิมพ์ไหลล้นออกมา ภาพที่ 10 แสดงตัวอย่างของแม่พิมพ์โอริง (o-ring) นอกจากนั้นก่อนที่จะนำยางใส่ลงไป ในแม่พิมพ์จะต้องอุ่นแม่พิมพ์ให้ร้อนเท่ากับอุณหภูมิที่อัดยางเสียก่อน แล้วจึงทาหรือพ่นสารกันยางติดแม่พิมพ์ลงไปบนผิวที่ร้อน



ภาพที่ 10 หน้าตัดของแม่พิมพ์โอริง

ที่มา: Sommer (2003)

3. การอัดยาง

วิธีการอัดจะนำชิ้นงานที่เตรียมไว้ใส่เข้าไปที่ช่องว่างของแม่พิมพ์ แล้วปิดฝาเข้าไปอัดในเครื่องอัดไฮดรอลิก แล้วทำการอัดยางโดยเร็ว จนกระทั่งฝาบนของแม่พิมพ์เลื่อนขึ้น ก็มักจะสัมผัสกับแผ่นอัดบน ก็ให้ลดความเร็วอัดลงเพื่อให้ยางไหลเข้าไปสู่ช่องว่างของแม่พิมพ์อย่างสม่ำเสมอและไล่อากาศออกไป และเพื่อให้เกิดแรงดันข้างที่เกินให้ไหลล้นออกไปนอกช่องว่างของแม่พิมพ์ ยางที่ไหลล้นนี้ คือส่วนที่เรียกว่าเศษยาง (flash) ความเร็วในการอัดอย่าให้ช้าเกินไปมิฉะนั้นยางจะเกิดเริ่มคงรูป (scorch) ได้ทำให้ได้เศษยางหนา ในบางครั้งการอัดครั้งเดียวไม่อาจที่จะไล่อากาศที่ขังในแบบแม่พิมพ์ได้ จะต้องมีการไล่อากาศโดยการอัดแล้วคลายแรงอัดออกเล็กน้อย แล้วอัดใหม่ วิธีการนี้เรียกว่ากดย้ำ (bumping) การกดย้ำอาจจะทำ 1-2 ครั้ง หรือมากกว่านั้น การอัดยางควรใช้ความดันที่ต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อป้องกันไม่ให้แม่พิมพ์ชำรุดหรือสึกหรอ แต่ควรจะให้สูงพอที่ยางไหลล้นออก ไม่หนาเกินไป ความหนาของเศษยางบริเวณที่แผ่นบน-ล่าง อัดแนบกันพอดี (บริเวณแลนด์) ควรหนาประมาณ 0.03 นิ้ว ความดันที่ใช้อัดจริงนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของยาง ขึ้นอยู่กับพลาสติกซีดี (plasticity) ของยางด้วย และบางครั้งขึ้นอยู่กับกรอบของพิมพ์ โดยทั่วไปความดันที่ใช้อัดมักจะประมาณ 500-1,000 ปอนด์/นิ้ว² โอกาสที่จะใช้ความดันสูงถึง 3,000 ปอนด์/นิ้ว² มีน้อยมาก

4. อุณหภูมิและเวลาในการอัดยาง

นอกจากความดันแล้ว อุณหภูมิและเวลาของการอัดยาง ซึ่งเป็นกระบวนการทั้งขึ้นรูปและอบยางให้คงรูป (forming and vulcanizing) ด้วยนั้น เป็นสิ่งที่สำคัญที่ต้องกำหนดในการอัดทุกครั้ง เวลาและอุณหภูมิมีความสัมพันธ์กันเป็นไปตามสมการ Arrhenius (1) (บุญธรรม และอดิษฐ์, 2539) โดยทั่วไปถ้าเพิ่มอุณหภูมิขึ้น 10 °C เวลาในการอัดจะลดลงไปได้ประมาณครึ่งหนึ่ง อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้อบให้ยางคงรูปจริง ๆ นั้น ขึ้นอยู่กับสูตรของยางเป็นอย่างยิ่งและรวมทั้งขึ้นอยู่กับความหนาของยางอีกด้วย ยางที่ใช้ตัวเร่งชนิดเร็ว (fast accelerator) ย่อมสุกเร็วกว่ายางที่ใช้ตัวเร่งชนิดเร็วปานกลางหรือช้า (moderate accelerator or slow accelerator) ยางต่างสูตรมีความสามารถในการนำความร้อนต่างกัน ยางที่มีตัวเติมน้อยจะนำความร้อนได้ไม่ดีเท่ากับยางที่ใส่ตัวเติมมาก นอกจากนั้น สารตัวเติมต่างชนิดกันก็นำความร้อนได้เร็วช้าต่างกันอีกด้วย เป็นต้นหนึ่งในการถ่ายเทความร้อนสู่ยางนั้น ขึ้นอยู่กับความหนาของยางอีกด้วย โดยทั่วไปเมื่ออบยางที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ความหนาของยางที่เพิ่มขึ้น 1/4 นิ้ว จะต้องเพิ่มเวลาการอบให้ยางสุกประมาณ

5 นาที ทั้งนี้เพราะยางที่หนาต้องใช้เวลาอบนานเพื่อให้อุณหภูมิตอนกลางของยางขึ้นสูงตามต้องการได้ ดังนั้นยางหนาต้องใช้เวลาในการอบนานกว่ายางบาง และถ้ายางหนามาก ๆ ก็ต้องลดอุณหภูมิในการอัดด้วย เพื่อป้องกันมิให้ยางภายนอกสุกมากเกินไปหรือเกรียมก่อนที่ยางภายในจะสุกพอดี ในบางครั้งยางที่หนา ๆ อาจจะใช้วิธีการอบแบบค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์เป็นขั้น ๆ (step cure) เพื่อไม่ให้ยางภายนอกสุกเกินกว่ายางภายในมากหรือบางครั้งจะมีการทำให้ยางหนาร้อน (preheat) โดยการใช้ไมโครเวฟก่อนการใส่แม่พิมพ์ เมื่อยางในแม่พิมพ์สุกตามต้องการแล้วก็ถอดยางออกจากแม่พิมพ์นั้นและเริ่มต้นอัดยางใหม่ตั้งแต่ต้น ส่วนยางที่ถอดออกมาจากแม่พิมพ์ก็นำไปตกแต่งตัดขอบต่อไป

ปัญหาที่เกิดจากการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

1. การหดตัว (shrinkage)

มักจะเกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ยางโดยมีผลจากหลายปัจจัยที่ต่างกัน

1.1 เกิดจากความแตกต่างระหว่างสัมประสิทธิ์การขยายตัวของยางผสมและวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ ปัญหานี้มักจะนำมาพิจารณาในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ โดยมักจะเกิดจากการใช้แม่พิมพ์ตัวเดิมกับยางผสมที่ต่างกัน

1.2 ปริมาณส่วนผสมของยางกับสารตัวเติมต่าง ๆ

2. ความเสียหายที่เกิดจากการไหล (flow faults)

ความเสียหายในลักษณะนี้ เช่น รอยพับ รอยแตก หรือลักษณะเป็นรอยที่สังเกตเห็นได้ โดยเกิดจากสาเหตุดังนี้

- 2.1 ความดันในการอัดต่ำเกินไป
- 2.2 การออกแบบแม่พิมพ์ที่ผิดพลาด
- 2.3 รูปร่างขนาดของชิ้นยางไม่เหมาะสม
- 2.4 ใช้สารหล่อลื่นแม่พิมพ์น้อยเกินไป

2.5 แม่พิมพ์สกปรก

2.6 ชื่นยางสกปรก เช่น มีฝุ่นเกาะ

3. โพรงอากาศ (air pockets)

อาจเกิดเป็นลักษณะของฟองอากาศ (bubbles) หรือบวม (blisters) ผิวหรือพื้นที่ภายในแม่พิมพ์ โดยอาจเกิดขึ้นได้กับยางผสมแม่พิมพ์อ่อนมากกว่าแบบแข็ง มีสาเหตุดังนี้

3.1 มีอากาศอยู่ในชิ้นยางมาก

3.2 เส้นทางการไหลถูกจำกัดให้แคบเกินไป (อาจเกิดจากรูปร่างของชิ้นยางไม่เหมาะสม)

3.3 ช่องระบายอากาศภายใน (mould venting) ไม่เพียงพอ

3.4 วัสดุมีการซึมผ่านของแก๊สต่ำ

4. โพรงในชิ้นงาน (porosity)

มีฟองอากาศเกิดขึ้นในชิ้นงาน สาเหตุเกิดจากการ undercure แก้ปัญหาโดยการเพิ่มเวลาคงรูป (cure time) ให้ยาวขึ้น หรืออาจเพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้สูงขึ้น เพื่อไม่ให้กระทบต่ออัตราการผลิต

5. รอยกัดบริเวณรอยต่อแม่พิมพ์ (backrinding)

เมื่อเริ่มต้นการอัดแม่พิมพ์ชิ้นงานยางจะได้รับความร้อน เกิดการขยายตัวของยางในอัตราส่วนที่สูงเมื่อเทียบกับโลหะจะเกิดเป็นรอยฉีกขาดโดยเฉพาะรอยต่อของแม่พิมพ์ จะเกิดมากในกระบวนการขึ้นรูปของผลิตภัณฑ์ยางที่มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่หรือมีค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาตรต่อพื้นที่มาก เช่น ผลิตภัณฑ์ที่มีทรงกลม (Ciesielski, 1999) และในยางที่สารตัวเติมน้อยสามารถแก้ไขได้ดังนี้

5.1 อุ่นชิ้นยางให้ร้อนก่อนปิดแม่พิมพ์

5.2 ใช้แม่พิมพ์ชนิด positive mould

6. ความเสียหายของผลิตภัณฑ์ยางขณะถอดออกจากแม่พิมพ์ (tearing when demoulding)

แรงต้านของยางที่คงรูป (ผลิตภัณฑ์) กับแม่พิมพ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ การติดแม่พิมพ์ขึ้นอยู่กับชนิดของยาง ชนิดของสารเคมี อุณหภูมิ และสภาวะของแม่พิมพ์ สามารถแก้ปัญหาได้ดังนี้

6.1 เพราะว่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นการถอดออกจากแม่พิมพ์จะต้องทำที่อุณหภูมิต่ำหรือชิ้นงานต้องทำให้เย็นตัวก่อนถอดออกจากแม่พิมพ์

6.2 แม่พิมพ์จะต้องออกแบบอย่างระมัดระวังที่จุดอันตราย

- ทำความสะอาดแม่พิมพ์สม่ำเสมอและแน่ใจว่าไม่มีสิ่งสกปรกหรือโลหะเหลือติดอยู่ในแม่พิมพ์

6.3 ใช้สารหล่อลื่นแม่พิมพ์ให้เหมาะสม

6.4 ในการทำแม่พิมพ์ควรหลีกเลี่ยงรอยตัด

7. เศษยาง (flashing)

เศษยาง หรือบางครั้งอาจเรียกว่าครีป คือ ส่วนเหลือจากตัวผลิตภัณฑ์ มีสาเหตุดังนี้

7.1 การใส่ยางในแม่พิมพ์มากเกินไป

7.2 บางครั้งยังเกิดครีปมากแม้ว่าการไหลในแม่พิมพ์ยังไม่เต็มก็เพราะว่าการเตรียมชิ้นยางรูปร่างไม่เหมาะสม หรือการออกแบบแม่พิมพ์ไม่มีประสิทธิภาพ

7.3 ความดันในการอัดยางต่ำเกินไป

7.4 ปฏิบัติการคงรูปของยาง

ปัญหาที่เกิดขึ้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง กล่าวถึงสาเหตุโดยภาพรวมแล้วเกิดจากการออกแบบที่ผิดพลาด การเลือกวัสดุที่ไม่เหมาะสม ความบกพร่องในขั้นตอนการผลิต การติดตั้งที่ไม่ถูกต้อง สภาพการใช้งานที่ไม่ได้คาดการณ์ไว้ การใช้งานที่ผิดวิธีหรือไม่ระมัดระวัง รวมไปถึงการออกแบบในลักษณะที่ไม่คำนึงถึงความอ่อนแอของผลิตภัณฑ์ (strategic weakness) (Brown, 2002)

การหดตัว (shrinkage)

การหดตัวของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์แสดงถึง ความแตกต่างระหว่างขนาดของแม่พิมพ์และขนาดของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์นั้น (Sommer, 2003) โดยพบว่า ในระหว่างการแข็งตัว (solidification) ของผลิตภัณฑ์ในแม่พิมพ์อัด ความเค้นตกค้าง (residual stress) ค่อย ๆ เกิดขึ้น ตลอดกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการแข็งตัว ความซับซ้อนของคุณสมบัติทางกลและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเป็นสาเหตุของการเกิดการหดตัว (Davis *et al.*, 2003)

การควบคุมการหดตัวเป็นปัญหาที่ยาวนานในอุตสาหกรรมยาง แต่การหดตัวไม่ได้เป็นผลเสียทั้งหมด ถ้าไม่มีการหดตัว การถอดยางคงรูปออกจากแม่พิมพ์จะทำให้ยากมากยิ่งขึ้น ได้มีการศึกษาในเรื่องการหดตัวของยางชนิดอื่น ๆ โดยศึกษาถึงผลที่เกิดจากวัสดุกระบวนการผลิต และปัจจัยในการออกแบบในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง (Sommer, 2003)

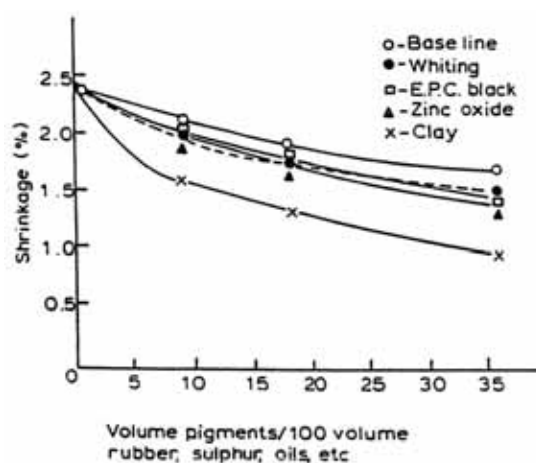
1. ปัจจัยที่ทำให้เกิดการหดตัวของยางที่ผ่านการขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์

จากการศึกษาในตำราและงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้สรุปถึงสาเหตุของการหดตัวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประการ

1.1 คุณสมบัติของยางผสม (properties of rubber compound)

คุณสมบัติของยางผสมที่กล่าวถึง คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น (coefficient of expansion) ของยางผสมที่แตกต่างกับของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ สาเหตุที่ทำให้สัมประสิทธิ์เกิดขึ้นมากน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนยางกับสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ ที่เติมลงไปเพื่อให้ยางมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

1.1.1 ปริมาณสารตัวเติม (amount of fillers) สารตัวเติมแต่ละชนิดที่ใช้ในการบดผสมยาง เพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมตามความต้องการมีผลต่อการหดตัวของยาง คือเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมลงไปยางทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวลดลงเป็นผลให้การหดตัวลดลง (Deng, 1990) ดังแสดงในภาพที่ 11 และภาพที่ 12 การศึกษาของ Amarow *et al.*, 2004 พบว่าในการบดผสมพอลิเมอร์ที่ใช้สารผสมที่อัตราส่วนต่างกันทำให้ได้ค่าการหดตัวที่ต่างกัน (ดังแสดงในตารางที่ 5) พบว่าสามารถควบคุมการหดตัวด้วยปริมาณส่วนผสมที่แตกต่างกันได้



ภาพที่ 11 ผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมต่อการหดตัวเต็มที่มีของยางธรรมชาติ ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์

ที่มา: Deng (1990)

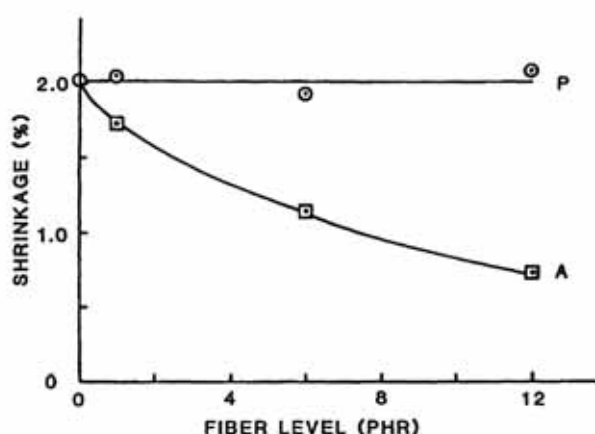
ตารางที่ 5 ผลการวิจัยการหดตัวของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านอัดขึ้นรูป

run	PU+DCP	TALC	EVA+DCP	shrinkage %	hardness ShA
1	100.00	0.00	0.00	2.79	57
2	90.01	0.00	9.99	2.97	63
3	80.00	0.00	20.00	3.36	72
4	69.98	0.00	30.02	3.49	76
5	60.00	0.00	40.00	3.60	79
6	70.26	14.69	15.06	2.65	73
7	70.13	7.33	22.54	3.16	79
8	70.39	22.07	7.54	2.09	75
9	90.23	9.77	0.00	2.49	64
10	80.39	19.61	0.00	2.20	67
11	69.49	30.51	0.00	1.74	72
12	63.08	36.92	0.00	1.60	74
13	60.00	20.00	20.00	2.57	82
14	60.00	26.67	13.33	2.02	80
15	60.00	13.33	26.67	3.10	84
16	63.08	36.92	0.00	1.51	74
17	60.00	0.00	40.00	3.69	82
18	60.00	40.00	0.00	1.43	74
19	73.33	26.67	0.00	1.87	70
20	60.00	26.67	13.33	1.94	81
21	60.00	13.33	26.67	3.17	81

หมายเหตุ PU = Polyurethane Rubber, DCP = Dicyclopentadiene, EVA = Ethylene Vinyl Acetate Copolymer

ที่มา: Amarow *et al.* (2004)

1.1.2 ชนิดของสารตัวเติม (type of fillers) อนุภาคของสารตัวเติมมีรูปร่างต่าง ๆ และมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของยาง รวมทั้งผลต่อการหดตัวด้วย (ดังแสดงในภาพที่ 12) โดยทั่วไปแล้ว สารตัวเติมที่มีค่า อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างหรือความหนา (aspect ratio) เช่น สารตัวเติมที่มีรูปร่างของอนุภาคเป็นเส้นใยหรือแผ่น จะช่วยเสริมความแข็งแรง และทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติแอนไอโซโทรปิก (anisotropic) (อรอุษา, 2546) ขึ้นอยู่กับการวางเรียงตัว (orientation) ของสารตัวเติม ซึ่งสอดคล้องกับ Sommer (2003) ที่พบว่า สารตัวเติมชนิดที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกคล้ายเข็ม (acicular fillers) เป็นสาเหตุให้เกิดการหดตัวที่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 12 โดยการหดตัวจะลดลงในทิศทางตามแกนสารของสารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (fiber) ด้วยการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ผลจากลักษณะนี้ต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบแม่พิมพ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งยางผสมที่มีปริมาณสารตัวเติมสูง



ภาพที่ 12 ผลของการวางตัวของเส้นใยต่อการหดตัวของยางผสม NR

(A) การหดตัวตามแกนเส้นใย (P) การหดตัวตั้งฉากกับแกนของเส้นใย

ที่มา: Sommer (2003)

1.2 กระบวนการผลิต (processing variables)

1.2.1 อุณหภูมิแม่พิมพ์ (mould temperature) ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการคงรูปอุณหภูมิในการคงรูปที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้การหดตัวเพิ่มมากขึ้น (วราภรณ์, 2542)

ความซับซ้อนของคุณสมบัติทางกล อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง เวลาในการคงรูปเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ทำให้เกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงาน (Rios *et al.*, 2002) ซึ่งความเค้นตกค้างเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการหดตัวและบิดตัวของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ นอกจากนี้ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีก ที่มีผลต่อการหดตัว เช่น ปฏิกริยาระหว่างพลาสติกไซเซอร์ และยาง มีความซับซ้อนต่อการคำนวณการหดตัว การหดตัวอาจเพิ่มขึ้นเพราะว่าการระเหยของสารจากตัวผลิตภัณฑ์และยางที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีพิเศษบางตัว เช่น ฟลูออโรคาร์บอน (fluorocarbon or fluoro rubbers, FKM) การทำให้คงรูปด้วยเตาอบ (oven cure) ตามด้วยการอัดให้คงรูป (press cure) จากวิธีการดังกล่าวแสดงให้เห็นผลว่า 75% ของการหดตัวทั้งหมดมาจากการอัดให้คงรูปและที่เหลือ 25% มาจากการทำให้คงรูปด้วยเตาอบ (Sommer, 2003)

2. การหาการหดตัว

การหาการหดตัวของผลิตภัณฑ์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ส่วนใหญ่ได้จากการวัดโดยตรงหลังจากที่นำชิ้นยางไปอัดขึ้นรูปแต่ก็มีข้อเสียที่ต้องใช้เวลานานและสิ้นเปลืองวัสดุในการลองผิดลองถูก (Trial and Error) เป็นผลให้ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยเพิ่มสูงขึ้น และการคำนวณโดยใช้สมการแต่การใช้สมการในการคำนวณค่าที่แน่นอนได้ยาก เพราะสัมประสิทธิ์การขยายตัวของยางคงรูปจะเปลี่ยนแปลงไปตามส่วนประกอบของสูตร (วราภรณ์, 2542) และความซับซ้อนของคุณสมบัติทางกลและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (Davis *et al.*, 2003) ในระหว่างการแข็งตัว นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีหนึ่งที่พบในการตรวจสอบเอกสารคือการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการหดตัว (ดังแสดงในภาพที่ 18) (Amarow *et al.*, 2004)

2.1 การวัดโดยตรง

ขั้นตอนการหาอัตราการหดตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป อาจมีความแตกต่างกัน ซึ่งแต่ละที่อาจมีความแตกต่างกันไปบ้าง ขึ้นอยู่กับเครื่องมือ ความชำนาญ และความเหมาะสม ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอขั้นตอนการหดตัวของผลิตภัณฑ์ยางของบริษัทผลิตผลิตภัณฑ์ยางแห่งหนึ่ง

2.1.1 นำชิ้นยางผสม (blank) ใส่แม่พิมพ์ในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ตัวอย่างแม่พิมพ์ที่ใช้ทดสอบการหดตัว

2.1.2 ปรับตัวแปรต่าง ๆ ที่เครื่องอัดขึ้นรูป (ดังแสดงในภาพที่ 14) ให้เหมาะสม



ภาพที่ 14 แสดงชุดควบคุม

2.1.3 นำชิ้นงานที่ได้จากแม่พิมพ์อัด 3 ชั้น มาทำเครื่องหมายบนชิ้นงาน 6 จุดของชิ้นงาน 3 ชั้น ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แสดงตำแหน่งที่จะทำการวัดชิ้นงาน

2.1.4 ทำการวัดชิ้นงาน 3 ชั้น (ดังแสดงในภาพที่ 16 และ 17) ได้ทำเครื่องหมายโดยคนที่ 1 วัดทั้ง 3 ชั้น ๆ ละ 3 ครั้ง จากเปลี่ยนเป็นคนี่ 2 และ 3 ตามลำดับ



ภาพที่ 16 แสดงอุปกรณ์ตรวจวัด



(a)



(b)

ภาพที่ 17 แสดงการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานด้วยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์

(a) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (b) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

2.1.5 นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณอัตราการหดตัว ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$\% \text{ Shrinkage} = \frac{L_M - L}{L_M} \times 100\% \quad (6)$$

โดยที่ L_M = ขนาดของแม่พิมพ์
 L = ขนาดของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป

2.1.6 นำข้อมูลเปอร์เซ็นต์การหดตัวของยางผสม ไปออกแบบแม่พิมพ์ให้เหมาะสมกับยางสูตรแต่ละสูตร

2.2 การคำนวณ

โดยปกติแล้วผลิตภัณฑ์ยางมักหดตัวหลังจากผ่านการคงรูปชิ้นงานแล้ว เพราะระหว่างการอบคงรูปยางใช้ความร้อน ซึ่งก่อให้เกิดการขยายตัวของทั้งแม่พิมพ์ (กรณีการอัดคงรูปโดยแม่พิมพ์) และยาง แต่การขยายตัวของทั้งสองส่วนมีความแตกต่างกัน การหดตัวของผลิตภัณฑ์ยางอัดแม่พิมพ์จะมากน้อยอย่างไรขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การขยายตัว (coefficient of expansion) ของยางที่คงรูปแล้วและสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแม่พิมพ์ รวมทั้งอุณหภูมิของการอัดยางให้คงรูป ส่วนของยางที่อยู่ในแม่พิมพ์อย่างเต็มพิมพ์ ขณะการอบให้คงรูปจะหดตัว

ขณะที่ยื่นตามอุณหภูมิห้อง การหดตัวของยางจะมากกว่าการหดตัวของแม่พิมพ์ เพราะยางมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวมากกว่าแม่พิมพ์ นั่นคือ การหดตัวของยางจะยิ่งมาก เมื่อยางและโลหะที่ใช้ทำแม่พิมพ์มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวแตกต่างกันมาก และเมื่ออุณหภูมิของการอบยางให้คงรูปต่างกับอุณหภูมิห้องมากสูตรยางที่มีเนื้อยางมาก จะให้ยางคงรูปที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวสูง สารตัวเติมมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ สารอื่น ๆ ซึ่งละลายได้ในอะซิโตน ได้แก่ สารตัวเร่ง สารป้องกันยางเสื่อม สารช่วยทำให้ยางนิ่ม เรซิน จี๊ซิ่ง กำมะถัน แพลทิส และยางรีเคลม เหล่านี้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวใกล้เคียงกับยาง ฉะนั้นในการคำนวณหาการหดตัวของยางจึงนับสารเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของยาง สัมประสิทธิ์การขยายตัวของยาง สารตัวเติมบางชนิด และของโลหะทำแม่พิมพ์แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สัมประสิทธิ์การขยายตัวของยาง สารตัวเติม และโลหะบางชนิด

materials	linear coefficient of expansion (per°C)
natural rubber (NR)	216×10^{-6}
styrene butadiene rubber (SBR)	216×10^{-6}
nitrile rubber (NBR)	196×10^{-6}
chloroprene rubber (CR)	200×10^{-6}
butyl rubber (IIR)	194×10^{-6}
สารตัวเติม ประมาณ	$5-10 \times 10^{-6}$
โลหะทำแม่พิมพ์	
steel	11×10^{-6}
light metal	22×10^{-6}

ที่มา: วราภรณ์ (2542)

ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวของยางจากส่วนผสมของสูตรนั้น จะได้เพียงค่าประมาณเท่านั้น โดยใช้สมการที่ (7) ในการคำนวณ (วรากรณ์, 2542)

$$S = \Delta T, \Delta A, K, \Delta F, \Delta H \quad (7)$$

เมื่อ S = การหดตัว (%)
 ΔT = อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ทำให้ยางคงรูปกับอุณหภูมิห้อง
 ΔA = ความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของยางกับวัสดุที่ทำแม่พิมพ์
 K = เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของยางและสารที่ละลายได้ในอะซิโตน
 ΔF = ความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสารตัวเดิมกับวัสดุทำแม่พิมพ์
 ΔH = ความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสารที่ละลายได้ในอะซิโตนกับของยาง

ถ้าถือว่าค่า F และ H ไม่นับสำคัญ สมการ (7) จะเป็นดังนี้

$$S = \Delta T, \Delta A, K \quad (8)$$

สมการ (8) นี้ใช้ได้กรณีที่ได้ตั้งสมมุติฐานว่าสารตัวเดิมมีสัมประสิทธิ์ การขยายตัวเท่ากับวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ และสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสารที่ละลายได้ในอะซิโตนเท่ากับยาง ฉะนั้นปัจจัย 2 ประการนี้ จึงไม่ได้มีส่วนสนับสนุนการหดตัวเมื่อเปลี่ยนแปลงแม่พิมพ์

ตัวอย่างการคำนวณการหดตัวของผลิตภัณฑ์ยาง

การหดตัวของยางคงรูปจากสูตร : ยางแผ่นรมควัน (ribbed smoke sheet, RSS) 100, ซิงค์ออกไซด์ (active) 5.0, กำมะถัน 2.5 Vulcacid F 1.0, กรดสเตียริก 1.5, แอนติออกซิแดนท์ Phenyl-B-Naphthyl Amine (PBN) 1.5 phr ปริมาตรยาง 99% อัดในแม่พิมพ์ทำจากโลหะ อัดที่อุณหภูมิ 143 °C และทำให้เย็นที่อุณหภูมิ 20 °C จะหดตัว 2.49% ซึ่งคำนวณได้ ดังนี้

จากสมการ (7) : $S = \Delta T \cdot \Delta A \cdot K$

เมื่อ $\Delta T = 143 - 20 = 123 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\Delta A = 216 \times 10^{-6} - 11 \times 10^{-6} = 205 \times 10^{-6}$$

$$K = 99\%$$

$$S = 123 \times 205 \times 10^{-6} \times 99 = 2.49$$

เนื่องถ้าอุณหภูมิของการอบคงรูปเปลี่ยนไป การหาค่าจำนวนได้โดยการคูณด้วยแฟกเตอร์ของความเปลี่ยนแปลง ดังนี้

การหาค่าที่ $143 \text{ }^{\circ}\text{C}$: 2.49%

$$\begin{aligned} \text{การหาค่าที่ } 151 \text{ }^{\circ}\text{C} &: 2.49 \times \frac{151 - 20}{143 - 20} = 2.49 \times 1.065 \\ &= 2.65 \% \end{aligned}$$

สำหรับงานวิจัยอื่น ๆ อาจใช้ความแตกต่างของสารตัวเดิมในการหาค่าการหาค่าคงที่ที่ใช้ก็แตกต่างกันไปตามชนิดของสารตัวเดิม ตัวอย่างเช่น ค่าคงที่สำหรับ แคลเซียมคาร์บอเนต (whiting) $= 2.49 \times 10^{-4}$ และค่าคงที่สำหรับเขม่าดำ $= 3.29 \times 10^{-4}$ สำหรับ NR compound ทำการคงรูปในแม่พิมพ์โลหะ จะได้สมการที่ (9) (Sommer, 2003)

$$S_p = \Delta T [0.0205 - (100 - x)_m] \quad (9)$$

เมื่อ S_p = เปอร์เซ็นต์การหาค่า

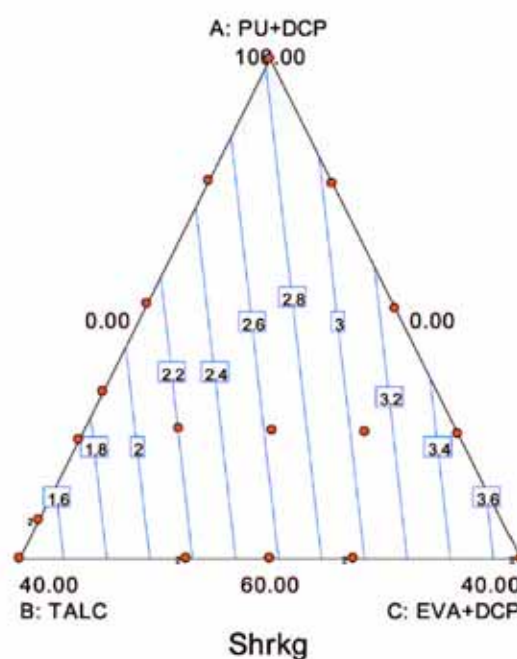
ΔT = ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิคงรูป (vulcanization temperature) และอุณหภูมิห้อง

x = เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของยางที่รวมสารตัวเร่ง แอนติ ออกซิแดนท์ และพลาสติกไซเซอร์

m = ค่าคงที่ของแต่ละสารตัวเดิม

2.3 การสร้างแบบจำลองกราฟ (model graph) เพื่อทำนายการหดตัว

เป็นการนำเอาข้อที่ได้จากการเก็บข้อ หรือได้จากการทดลองมาสร้างแบบจำลองใช้ในการทำนายการหดตัว แต่จากการศึกษาข้อมูลยังมีการทำงานวิจัยในเรื่องนี้ค่อนข้างน้อย ขอยกตัวอย่างงานวิจัยของ Amarow *et al.* (2004) ที่ใช้ทำนายการหดตัวของพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำยางรองพื้นรองเท้า เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบอัตราส่วนผสมให้เหมาะสมกับค่าการหดตัวที่ต้องการ เป็นการเปลี่ยนขนาด (size) รองเท้า โดยยังคงใช้แม่พิมพ์เดิม ตัวอย่างแบบจำลองกราฟ (ดังแสดงในภาพที่ 18)



ภาพที่ 18 แบบจำลองกราฟสำหรับแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป

ที่มา: Amarow *et al.* (2004)

เครือข่ายประสาทเทียม (artificial neural networks, ANNs)

คอมพิวเตอร์ไม่สามารถทำงานได้เหมือนระบบประสาทของมนุษย์ จึงทำให้นักวิจัยได้ทำการศึกษาและพัฒนาทฤษฎีเครือข่ายประสาทเทียม (ANNs) ซึ่งเป็นแขนงหนึ่งของระบบปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence) โดยมีโครงสร้างและลักษณะการทำงานคล้ายกับระบบประสาทมนุษย์

1. วิวัฒนาการของเครือข่ายประสาทเทียม

การศึกษาเกี่ยวกับเครือข่ายประสาทเทียมเริ่มจากงานวิจัยของ Warren McCulloch และ Walter Pitts ในช่วง 1940s เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับระบบเซลล์ประสาทอย่างง่าย ซึ่งงานวิจัยของบุคคลทั้งสองถือว่าเป็นจุดเริ่มของการศึกษาทางด้านเครือข่ายประสาทเทียม ต่อมาในปี 1943 Donald Hebb ได้เสนอแบบจำลองเครือข่ายที่มีการประมวลผลจากการเรียนรู้ของเซลล์สมอง ซึ่งเรียกว่า Hebbian Learning Rule และหลังจากนั้นได้นำมาใช้ในการออกแบบเครือข่ายประสาทเทียมต่าง ๆ อีกมากมาย

การประยุกต์ใช้งานเป็นครั้งแรกเกิดขึ้นในปี 1950 โดย Frank Rosenblatt และคณะด้วยการสร้างเครือข่าย Perceptron และแสดงให้เห็นถึงความสามารถของเครือข่ายในการจดจำรูปแบบ (pattern recognition) ความสำเร็จในช่วงแรกได้สร้างความสนใจอย่างมากในงานวิจัยด้านเครือข่ายประสาทเทียม แต่ในเวลาต่อมาเกิดการค้นพบข้อจำกัดในการแก้ปัญหาของเครือข่ายประสาทเทียมในเวลาเดียวกันนี้ Bernard Widrow และ Ted Hoff ได้เสนอวิธีการเรียนรู้ใหม่เรียกว่า adaptive linear neural (ADALINE) ซึ่งโครงสร้างและความสามารถคล้ายกับ Rosenblatt's Perceptron สำหรับ Widrow-Hoff learning rule นี้ ยังมีการประยุกต์ใช้งานกระทั่งปัจจุบัน Marvin Minsky และ Seymour Papert ได้แสดงให้เห็น ข้อจำกัดของ Rosenblatt's network และ Widrow's network เช่นการแก้ปัญหา non-linear logic (exclusive or, XOR) ซึ่งทั้ง Rosenblatt และ Widrow ได้พยายามแก้ปัญหาดังกล่าวโดยนำเสนอเครือข่ายแบบใหม่ แต่เครือข่ายเหล่านั้นก็ไม่สามารถที่จะใช้ฝึกหัดกับโครงสร้างที่มีความซับซ้อนได้

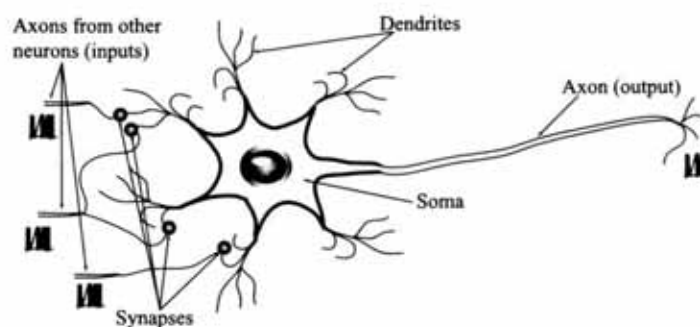
นักวิจัยจำนวนมากเห็นด้วยกับ Minsky และ Papert และเชื่อว่าเครือข่ายประสาทเทียมได้มาถึงจุดสิ้นสุดแล้ว ประกอบกับไม่มีคอมพิวเตอร์ที่สามารถทดสอบได้ เป็นสาเหตุให้งานวิจัยทางด้านนี้หยุดชะงักเป็นเวลานาน แต่ในระหว่างปี 1970 นี้มีงานวิจัยที่สำคัญบางส่วนได้ดำเนินการอย่างต่อเนื่อง ในปี 1972 Teuvo Kohonen และ James Anderson ได้เริ่มต้นงานวิจัยเกี่ยวกับหน่วยความจำ Stephen Grossberg เป็นนักวิจัยอีกคนหนึ่งที่ทำการศึกษาเครือข่ายประสาทเทียมแบบ self-organizing ในช่วงเวลานี้ความสนใจในเครือข่ายประสาทเทียมได้หยุดชะงักในช่วงปลายปี 1960 เพราะขาดแนวความคิดใหม่และคอมพิวเตอร์ไม่มีความสามารถเพียงพอที่จะทำการทดลองได้ กระทั่งปี 1980 ปัญหาเหล่านี้ได้ถูกกำจัดไปและงานวิจัยด้านนี้ก็ได้เพิ่มขึ้นอีกครั้ง

มีแนวความคิดใหม่ 2 ประการ ที่ทำให้ได้เครือข่ายประสาทเทียมได้รับความสนใจอีกครั้ง ประการแรก การใช้ Statistical Mechanics ในการอธิบายการทำงานของเครือข่ายประเภท recurrent ซึ่งสามารถใช้กับ associative memory ได้ งานวิจัยนี้ได้ถูกเผยแพร่โดย John Hopfield และ ประการที่สอง นักวิจัยหลายท่าน ได้ค้นพบและพัฒนา วิธีแพร่ย้อนกลับ (backpropagation algorithm) สำหรับการฝึกหัดเครือข่าย multilayer perceptron โดย David Rumelhart และ James McClelland ได้แสดงให้เห็นสิ่งที่สำคัญอย่างมากของวิธีการนี้ คือสามารถแก้ข้อจำกัดที่เคยถูกนำเสนอโดย Minsky และ Papert ในปี 1960 ได้เป็นผลสำเร็จ (Martin *et al.*, 1996)

2. พื้นฐานความรู้เบื้องต้นของเครือข่ายประสาทเทียม

ความพยายามของมนุษย์ที่จะสร้างสมองประดิษฐ์ (artificial brain) เพื่อให้คอมพิวเตอร์ทำงานในสิ่งที่ไม่ได้หรือทำได้ไม่ดีพอ แต่สิ่งที่ทำได้คือ พยายามลอกเลียนแบบลักษณะการทำงานของเซลล์ประสาทหรือนิวรอน (neuron) เครือข่ายประสาทเทียม (neural network) เป็นแนวความคิดที่ถูกออกแบบให้ทำงานเช่นเดียวกับสมองมนุษย์ กระบวนการทำงานของระบบประสาทมนุษย์ เช่น เมื่อสัมผัสกับวัตถุชนิดหนึ่ง นิวรอน ตัวแรกจะเป็นตัวกำหนดสัญญาณว่ามีลักษณะเป็นอย่างไร โดยที่เดนไดรต์ (dendrites) ทำหน้าที่รับสัญญาณผ่านเส้นใยประสาทและส่งสัญญาณไปยังตัวเซลล์ (soma or cell body) หลังจากนั้นตัวเซลล์ จะทำการประมวลผลโดยการรวมสัญญาณและแปลงสัญญาณออกไปเป็นสัญญาณที่มีความถี่ต่างกับตอนแรก และส่งสัญญาณนี้ออกไปยังแอกซอน (axon) โดยที่แอกซอนจะส่งสัญญาณไปยังนิวรอนอื่น ๆ โดยผ่านไซแนปส์ (synapses) ซึ่งแต่ละไซแนปส์จะมีค่า synapses strength ที่แตกต่างกัน สัญญาณนี้จะส่งต่อไปจนกระทั่งเราสามารถรับรู้ได้ว่าวัตถุชิ้นนั้นคืออะไร มีลักษณะเป็นอย่างไร เป็นอันสิ้นสุด

กระบวนการทำงาน การเปรียบเทียบระหว่างเซลล์ประสาทเทียมกับเซลล์ประสาทในทางชีววิทยา ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างเซลล์ประสาทในทางชีววิทยากับเซลล์ประสาทเทียม

ที่มา: Gupta *et al.* (2003)

เซลล์ประสาทเทียมมีคุณสมบัติและขั้นตอนการทำงานเหมือนกับเซลล์สมอง โดยทั้งสองมีความสัมพันธ์กันดังแสดงในตารางที่ 7 สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. เซลล์ประสาทสามารถรับสัญญาณ (input) ได้จำนวนมาก
2. สัญญาณต่างๆ ถูกปรับโดยค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) ที่ไซแนปส์
3. เซลล์ประสาททำการรวมค่าถ่วงน้ำหนักและส่งผลลัพธ์ไปยังแอกซอน
4. ผลลัพธ์จากเซลล์ประสาทหนึ่งเซลล์ สามารถส่งไปที่เซลล์ประสาทเทียมหลายเซลล์ได้
5. ไซแนปส์สเตรงท์ (synapse strength) มีความสามารถในการเรียนรู้แบบอัตโนมัติ ดังนั้นจึงสามารถปรับได้จากประสบการณ์ในการเรียนรู้

ตารางที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ประสาทกับเซลล์ประสาทยเทียม

ลำดับ	เซลล์ประสาท	เซลล์ประสาทยเทียม
1	ตัวเซลล์ (cell body or soma)	ยูนิต (unit)
2	เดนไดรต์ (dendrites)	ค่าถ่วงน้ำหนัก (weight)
3	แอกซอน (axon)	ตัวแปรนำออก (output)
4	ไซแนปส์ (synapse)	ตัวแปรนำเข้า (input)

ที่มา: Negnevitsky (2002)

6. การกระจายความจำของเซลล์ประสาทประกอบด้วย 2 ลักษณะ ได้แก่ long term memory คือการกระจายค่าถ่วงน้ำหนักที่อยู่ในไซแนปส์ และ short term memory คือการกระจายสัญญาณที่ถูกส่งมาโดยเซลล์ประสาท

7. การส่งสัญญาณของเซลล์ประสาทจากไซแนปส์ แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ ลักษณะกระตุ้น (excitatory) เป็นการทำให้สัญญาณที่ส่งผ่านเข้ามามีความถี่สูงขึ้น และลักษณะของการยับยั้ง (inhibitory) เป็นการทำให้สัญญาณที่ส่งผ่านเข้ามามีความถี่ต่ำลง

3. กระบวนการเรียนรู้สำหรับเครือข่ายประสาทเทียม

กระบวนการเรียนรู้สำหรับเครือข่ายประสาทเทียม สามารถแบ่งได้บนพื้นฐานของการเรียนรู้เป็น 3 ลักษณะดังนี้ คือ

3.1 การเรียนรู้แบบมีครูสอน (supervised learning)

การเรียนรู้แบบมีครูสอนเริ่มด้วยการส่งสิ่งเร้าที่ใช้สอนเข้าไปเป็นตัวแปรนำเข้า (input) ในเครือข่ายประสาทเทียมเพื่อให้เครือข่ายสร้างผลตอบออกมาเป็นตัวแปรนำออก (output) ซึ่งผลตอบจะเป็นอย่างไร ก็ขึ้นอยู่กับสถานะในตอนเริ่มเรียนรู้ของเครือข่ายประสาทเทียม ผลตอบดังกล่าวถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลเป้าหมาย (target response) เรียกว่าค่าความคลาดเคลื่อน (error) ซึ่งค่านี้ถูกนำไปคำนวณการปรับค่าน้ำหนักต่าง ๆ ในเครือข่าย จนกว่าได้ค่าความคลาดเคลื่อน

น้อยที่สุดหรือได้ค่าตามที่ต้องการ การปรับแต่งค่าถ่วงน้ำหนักโดยการพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนนี้จะขึ้นอยู่กับวิธีการเรียนรู้ที่แตกต่างกัน โดยแต่ละวิธีการจะมีคุณลักษณะและสมรรถนะแตกต่างกัน ซึ่งวิธีการดังกล่าวคัดแปลงมาจากวิธีการทางคณิตศาสตร์ในเรื่องเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม (optimization technique) และนำไปสู่การปรับปรุงตัวแปรบางตัวในเครือข่ายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่าย

การเรียนรู้แบบนี้เป็น การเรียนรู้โดยสมมุติว่ามีครูคอยกำกับดูแลการทำงานของเครือข่าย ระหว่างการเรียนรู้มีการเปรียบเทียบผลการคำนวณของเครือข่ายกับเป้าหมาย ความคลาดเคลื่อนหรือความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะนำไปสู่การปรับปรุงตัวแปรบางตัวในเครือข่าย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่าย รูปแบบตัวแปรนำเข้าอาจอยู่ในรูปของเวกเตอร์ x^p ($p=1, 2, \dots$) ซึ่งถูกส่งผ่านไปยังเครือข่ายและนำมาเป็นรูปแบบตัวแปรนำออก y^p ตัวแปรนำออกแต่ละรูปแบบจะถูกนำไปปรับแต่งค่าถ่วงน้ำหนักของตัวแปรนำเข้าแต่ละตัว เพื่อให้ค่าผิดพลาดจากการคำนวณน้อยที่สุดหรือเข้าใกล้เป้าหมายมากขึ้น

3.2 การเรียนรู้แบบเสริม (reinforcement learning)

การเรียนรู้แบบเสริมเป็นการเรียนรู้อีกวิธีหนึ่ง เป็นลักษณะที่มีครูคอยกำกับในการทำงานก็ตาม แต่คำตอบที่ถูกต้องหรือเป้าหมายไม่ได้ถูกนำมาแสดงในเครือข่าย ดังนั้น ผลการคำนวณจากเครือข่ายจึงแสดงออกมาในรูปของถูกหรือผิด เครือข่ายจึงต้องใช้ประโยชน์จากข้อมูลต่างๆ เพื่อนำไปปรับปรุงการทำงานให้ดีขึ้น ถ้าผลการคำนวณถูกเครือข่ายจะได้รับรางวัล (reward) ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าถ่วงน้ำหนักของตัวแปรนำเข้าบางหน่วย ในทางตรงข้าม ถ้าผลการคำนวณจากเครือข่ายออกมาผิดจะได้รับการลงโทษ (penalty) โดยการลดค่าถ่วงน้ำหนักลง

3.3 การเรียนรู้แบบไม่มีครูสอน (unsupervised learning)

เครือข่ายจะไม่สามารถรับรู้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลเป้าหมาย ดังนั้น เครือข่ายจะต้องเรียนรู้ให้สามารถค้นพบโครงสร้างที่เหมาะสมกับรูปแบบข้อมูลตัวแปรนำเข้า โดยการปรับตัวเข้าสู่การกระจายตัวเชิงสถิติของข้อมูลตัวแปรนำเข้า การเรียนรู้แบบนี้จะใช้วิธีการสร้างความเข้มแข็งให้กับค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมโยงกับหน่วยตัวแปรนำเข้าที่สนองตอบได้ดีกับตัวแปรนำออก ในขณะที่เดียวกันก็จะลดความสำคัญของหน่วยตัวแปรนำเข้าที่อ่อนแอลง

ตัวอย่างการเรียนรู้แบบนี้ในมนุษย์ คือ การให้เด็กเล็กๆ จับเก็บสิ่งของไว้บนชั้นวางของให้เป็นระเบียบเรียบร้อย สมมติว่าเด็กคนหนึ่งเก็บหนังสือต่าง ๆ ไว้ที่ชั้นบน เก็บตุ๊กตาไว้ที่ชั้นล่างและเก็บของเล่นอื่น ๆ ไว้ที่ชั้นกลาง หลังจากนั้น หากเด็กคนนั้นซื้อตุ๊กตาใหม่ ก็นำมาเก็บไว้ที่ชั้นล่างเป็นต้น แม้ว่าการเรียนรู้แบบนี้จะไม่ต้องการเรียนรู้แต่ก็ต้องวางแผนทางในการจัดกลุ่ม เช่น การจัดกลุ่มจะจัดตามรูปทรง สี หรือวิธีการใช้งานของวัตถุต่าง ๆ เป็นต้น ดังนั้นหากไม่แนวทางการจัดกลุ่มควรเป็นไปตามคุณลักษณะใด การจัดกลุ่มอาจไม่ประสบความสำเร็จในแง่การนำมาใช้งานจริงก็ได้ ตัวอย่างเช่น การใช้เด็กจัดของไว้บนชั้นวางของ

การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนไม่จำเป็นต้องมีค่าเป้าหมาย (target response) ในระหว่างการเรียนรู้เครือข่ายประสาทเทียมได้รับข้อมูลในรูปแบบต่าง ๆ และทำการจัดรูปแบบ เหล่านั้นเองตามต้องการ ผลตอบของเครือข่ายประสาทเทียมที่ใช้การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนนี้จะเป็นการระบุกลุ่มของข้อมูลที่ใส่เข้าไป โดยอ้างอิงกับวิธีการจัดกลุ่มซึ่งได้เรียนรู้จากข้อมูลที่เครือข่ายเคยพบ

กระบวนการเรียนรู้เปรียบเสมือน กระบวนการเปรียบเทียบ (calibration) ในการจำลองคณิตศาสตร์ ทั่ว ๆ ไป อย่างไรก็ตามเครือข่ายประสาทเทียมจะแบ่งข้อมูลที่มีเป็น 2 ส่วน ข้อมูลส่วนแรกจะใช้ในการสอนหรือการเรียนรู้เครือข่าย (network training) ข้อมูลส่วนที่สองจะใช้ในการทดสอบเครือข่าย (network testing) วัตถุประสงค์ในการเรียนรู้ข้อมูลแรก เพื่อที่จะหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมโยงระหว่างหน่วยในชั้นต่างๆ ของเครือข่าย ที่ซึ่งจะทำให้ผลการคำนวณจากเครือข่ายมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลเป้าหมาย ดังนั้นในการเรียนรู้ในช่วงนี้จะมีความต้องการข้อมูลที่มากพอหรือรูปแบบของข้อมูลควรมีอย่างเพียงพอด้วย สำหรับข้อมูลที่เหลือซึ่งเป็นข้อมูลในส่วนที่ 2 จะใช้ ในการทดสอบเครือข่ายต่อไป