

## เครื่องจักรประเภทต่างๆ

เครื่องจักรส่วนใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง ประกอบด้วย 3 กลุ่มหลัก คือ เครื่องจักรสำหรับการผสมยาง การขึ้นรูปยาง และการคงรูปยาง โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

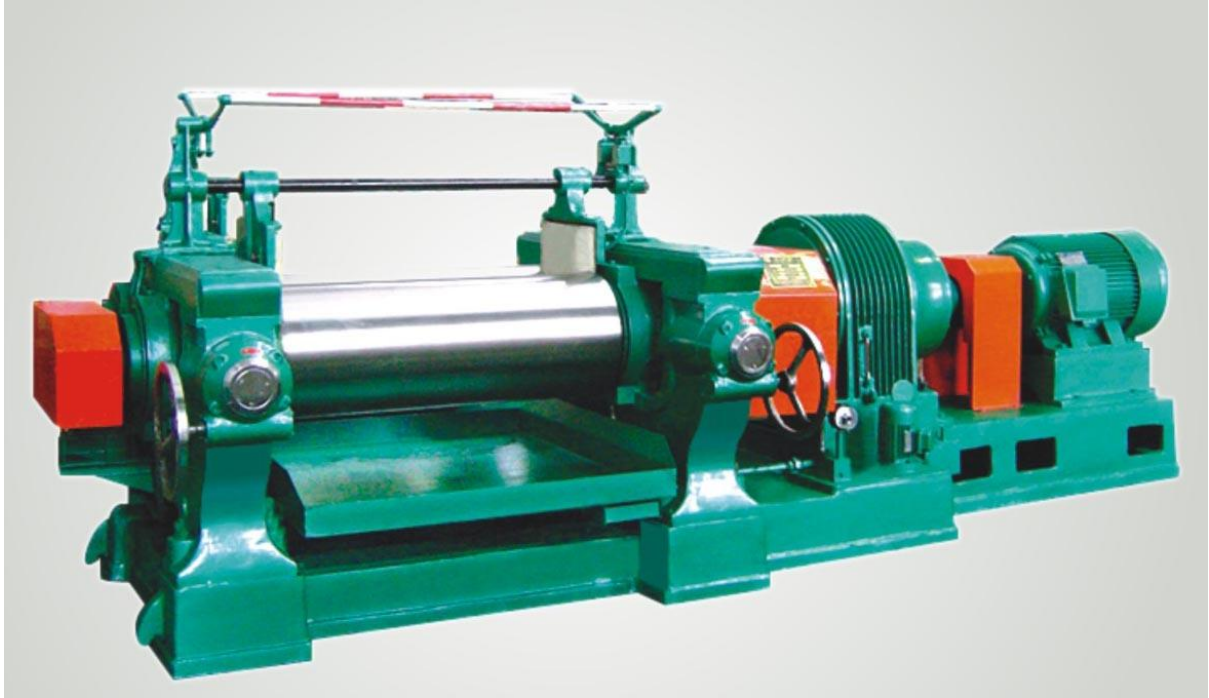
### 1. การผสมยาง

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 เครื่องผสมระบบปิดแบนบูรี่ (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 โดยผู้ผสมต้องทำการกรีดยางแผ่นและพับไปมาในขณะที่เติมสารเคมีลงไปในยาง ซึ่งยางที่ถูกตัดพับจะถูกใส่กลับไปยังช่องระหว่างลูกกลิ้ง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะช่วยให้สารเคมีต่างๆ กระจายตัวเข้ากับเนื้อยางได้ดี เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้งใช้ผสมยางในปริมาณไม่มาก เนื่องจากต้องใช้ความชำนาญและกำลังคนในการผสม



รูปที่ 1 เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill)

### เครื่องผสมระบบปิดแบนบูรี (Banbury internal mixer)

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

โรเตอร์ทั้งสองของเครื่องผสมระบบปิดแบนบูรีจะเป็นแบบไม่คาบเกี่ยวกัน หรือที่เรียกว่า “non-interlocking หรือ non-intermeshing” หมุนด้วยอัตราเร็วที่ต่างกันขึ้นกับรุ่นของเครื่อง การทำงานของเครื่องผสมเพื่อให้เกิดการผสมคลุกเคล้าของยางกับสารเคมีส่วนใหญ่จะมาจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างปีกของโรเตอร์กับผนังของห้องผสม ยางและสารเคมีจะถูกบีบววดผสมกันในสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิของห้องผสมอย่างเหมาะสม ทำให้สารเคมีต่างๆ กระจายตัวในยางได้ดีขึ้น



รูปที่ 2 เครื่องผสมระบบปิดแบบบุนนีย์ (Banbury internal mixer)

### เครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์มีกซ์ (Intermix internal mixer)

เครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์มีกซ์มีองค์ประกอบสำคัญเหมือนกับเครื่องผสมระบบปิดแบบบุนนีย์ แต่โรเตอร์ทั้งสองของเครื่องผสมแบบนี้จะเป็นแบบคาบเกี่ยวกัน หรือที่เรียกว่า “intermeshing” หมุนด้วยอัตราเร็วที่เท่ากัน แรงเฉือนจะเกิดขึ้นที่บริเวณช่องว่างระหว่างปีกของโรเตอร์ ยางและสารเคมีจะถูกบีบอัดผสมคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกันในสถานะที่ควบคุมอุณหภูมิของห้องผสมและโรเตอร์ได้ดีกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบบุนนีย์ จึงมีประสิทธิภาพการผสมที่สูงมาก สารตัวเติมสามารถแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ดี แต่อย่างไรก็ตามโรเตอร์แบบ “intermeshing” นี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ทำให้ยางคอมพาวด์ที่ได้จากการผสมในแต่ละครั้งมีปริมาณค่อนข้างน้อย จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยม



รูปที่ 3 เครื่องผสมยางระบบปิดแบบอินเทอร์มิกซ์ (Intermix internal mixer)

เครื่องผสมระบบปิดแบบที่ปรับระยะห่างระหว่างโรเตอร์ได้ (variable intermeshing clearance internal mixer)

เครื่องผสมแบบนี้มีโรเตอร์เหมือนเครื่องผสมระบบปิดแบบอินเทอร์มิกซ์ แต่ผู้ผสมสามารถปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างโรเตอร์ทั้งสองระหว่างการผสมได้ เช่น ในช่วงแรกของการผสมตั้งระยะห่างระหว่างโรเตอร์ไว้ให้มาก จะทำให้ก้อนยางและสารเคมีเข้าไปในเครื่องได้ง่าย จากนั้นปรับลดระยะห่างระหว่างโรเตอร์เพื่อให้มีแรงเฉือนสูงขึ้น จะทำให้สารตัวเติมแตกตัวได้ดีขึ้น



รูปที่ 4 เครื่องผสมยางระบบปิดแบบที่ปรับระยะห่างระหว่างโรเตอร์ได้  
(variable intermeshing clearance internal mixer)

#### เครื่องนวดยางหรือนืดเตอร์ (kneader)

เครื่องนวดยางหรือนืดเตอร์เป็นเครื่องผสมระบบปิดชนิดอื่นๆ ที่มีการจำหน่ายในเชิงการค้าและมีการผลิตในประเทศแถบเอเชีย แม้ว่าเครื่องนวดยางจะมีหลักการทำงานคล้ายกับเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรี แต่รูปแบบของโรเตอร์แตกต่างจากโรเตอร์ของเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรีมาก ทำให้ประสิทธิภาพในการผสมต่ำกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรีมาก อย่างไรก็ตามเครื่องนวดยางมีราคาต่ำกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรีมาก จึงเป็นที่นิยมสำหรับผู้ประกอบการไทยปัจจุบัน



รูปที่ 5 เครื่องนวดยางหรือนีตเตอร์ (kneader)

### 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)

## 2. การขึ้นรูปยาง

หลังจากการผสมยางกับสารเคมีให้เข้ากันได้ดีแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการนำยางคอมพาวด์ที่ได้มาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่างๆ ตามต้องการ ก่อนที่จะนำไปคงรูปต่อไป หรือในบางกรณีการขึ้นรูปและการคงรูปอาจเกิดขึ้นได้ในขั้นตอนเดียวกันได้เช่นกรณีที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (molding)

โดยทั่วไป การขึ้นรูปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 เทคนิคใหญ่ๆ ได้แก่

1. การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ (molding)
2. การขึ้นรูปด้วยวิธีอัดผ่านตายโดยใช้เครื่องเอ็กชทรูด (extrusion)
3. การขึ้นรูปด้วยเครื่องคาลเอนเดอร์ (calendering)

สำหรับเทคนิคที่ 1 การขึ้นรูปและคงรูปเกิดได้พร้อมกันในขั้นตอนเดียวกัน แต่เทคนิคที่ 2 และ 3 การขึ้นรูปกับการคงรูปจะแยกขั้นตอนกันอย่างชัดเจน

### การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ (molding)

การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์นั้นเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดทั้งการขึ้นรูป (forming) และคงรูป (vulcanizing) ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนเดียวกัน โดยอาศัยความร้อนและแรงอัด เริ่มจากการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ก่อน จากนั้นจึงนำยางคอมพาวด์ไปใส่ลงในแม่พิมพ์ เมื่อยางไหลเต็มแม่พิมพ์แล้ว ความร้อนจากแม่พิมพ์จะทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาคงรูปต่อไป แม่พิมพ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 แบบ ได้แก่

1. แม่พิมพ์แบบกดอัด (compression mold)
2. แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด (transfer mold)

### 3. แม่พิมพ์แบบฉีด (injection mold)

#### การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัด (compression mold)

การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัดเป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมเมื่อเทียบกับการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบอื่น เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและเครื่องจักรที่ใช้มีราคาไม่สูงมากนัก เครื่องจักรที่ใช้ ได้แก่ เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก (hydraulic press) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นกดอัด (platen) จำนวน 2 แผ่น หรือมากกว่า 2 แผ่น ขึ้นกับการออกแบบ แผ่นกดอัดจะเลื่อนขึ้นลงด้วยระบบไฮดรอลิกเพื่ออัดและส่งผ่านแรงดันไปสู่แม่พิมพ์ที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นกดอัด เครื่องจะสามารถตั้งอุณหภูมิและควบคุมความร้อนให้คงที่ระหว่างการผลิต

ในส่วนของแม่พิมพ์แบบกดอัดนี้ประกอบด้วยแม่พิมพ์ 2 ส่วน คือ แม่พิมพ์ส่วนบน (lid) และแม่พิมพ์ส่วนล่าง (base) โดยแม่พิมพ์ส่วนล่างจะมีช่องเป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ เรียกว่า เบ้าพิมพ์ (cavity) สำหรับใส่ยางคอมพาวด์ที่จะขึ้นรูป จากนั้นนำแม่พิมพ์ส่วนบนมาปิดทับ สลัก (pin) ที่ติดอยู่กับแม่พิมพ์ส่วนบนจะช่วยล็อกไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวระนาบขณะที่ได้รับแรงกดอัด เมื่อให้แรงดันแก่แม่พิมพ์ ยางคอมพาวด์จะถูกบังคับให้ไหลจนเต็มเบ้าพิมพ์ และความร้อนจากแม่พิมพ์จะทำให้ยางเกิดการคงรูป ผลิตภัณฑ์บางส่วนใหญ่ เช่น ยางล้อ ยางโอริง ยางรองแท่นเครื่อง พื้นรองเท้า ฯลฯ ก็ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้



รูปที่ 7 เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก (hydraulic press)

#### การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด (transfer mold)

การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีดเป็นวิธีที่ใช้กันน้อยมากในปัจจุบัน แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีดประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่

- 1) แม่พิมพ์ส่วนบน ซึ่งออกแบบมาให้มีลักษณะคล้ายแท่งกด
- 2) แม่พิมพ์ส่วนล่าง เป็นส่วนเบ้าพิมพ์ที่มีรูปร่างต่างๆ ตามต้องการ
- 3) แม่พิมพ์ส่วนตรงกลาง เป็นส่วนที่มีแอ่งหรือช่องว่างสำหรับใส่ยางคอมพาวด์ เรียกว่า “pot” และที่บริเวณด้านล่างของ pot จะมีหัวฉีด (injection nozzle) เพื่อเป็นช่องให้ยางไหลลงเข้าสู่เบ้าพิมพ์ส่วนล่าง



การขึ้นรูปยางด้วยวิธีนี้เริ่มจากให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ นำยางคอมพาวด์ใส่ลงไปในช่วงใส่ง่ายของแม่พิมพ์ส่วนตรงกลาง ปิดแม่พิมพ์ แ่งกด (ram) ของแม่พิมพ์ส่วนบนจะดันยางให้ไหลผ่านหัวฉีดเข้าสู่เบ้าพิมพ์จนเต็ม เทคนิคนี้มีข้อดีคือสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนเกินกว่าที่จะใช้แม่พิมพ์แบบกดอัดได้ แต่ก็มีข้อเสียหลักที่สำคัญคือ ต้องเสียเวลานานในการขึ้นรูปแต่ละครั้ง เนื่องจากหลังการขึ้นรูป ต้องนำแม่พิมพ์ส่วนตรงกลางมาทำความสะอาดโดยกำจัดเศษยางคงรูป (scrap) ที่ติดอยู่บริเวณหัวฉีดหรือบริเวณฐานของช่องใส่ง่ายออกให้หมดก่อนที่จะทำการขึ้นรูปครั้งต่อไปได้



รูปที่ 8 เครื่องจักรแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด (transfer molding machine)

#### การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบฉีด (injection mold)

การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบฉีดเป็นการพัฒนามาจาก 2 แบบแรก วิธีนี้มีอัตราเร็วในการผลิตสูงและผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดที่ถูกต้องมากกว่าการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอื่นๆ จึงเหมาะกับการผลิตชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อน เครื่องฉีดยางมีทั้งแบบเกลียวหนอน (screw-type injection molding machine) หรือแบบผสมระหว่างเกลียวหนอนกับแ่งกด (plunger screw injection molding machine) หลักการคือจะต้องทำให้ยางนิ่ม/ไหลได้ก่อนที่จะฉีดยางเข้าสู่เบ้าพิมพ์ โดยเกลียวหนอนจะหมุนทำให้ยางถูกป้อนเข้าสู่บารเรลของเครื่องฉีดอย่างต่อเนื่อง (ตั้งค่าอุณหภูมิของบารเรลเพื่อให้ยางนิ่ม) ยางจะไหลไปทางด้านหน้าของเกลียวหนอน เมื่อมีปริมาณและอุณหภูมิสูงเพียงพอแล้ว เกลียวหนอนก็จะหยุดหมุนและถูกดันไปข้างหน้าเพื่อฉีดยางคอมพาวด์ให้ไหลเข้าสู่เบ้าพิมพ์ที่ร้อน หลังจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาคงรูปจนสมบูรณ์และแม่พิมพ์จะเปิดออก นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แม่พิมพ์จะปิด เกลียวหนอนก็จะเริ่มหมุนพร้อมทั้งเคลื่อนตัวไปทางด้านหลังเพื่อให้ยางคอมพาวด์ชุดใหม่ไหลลงมาสำหรับการฉีดในรอบถัดไป



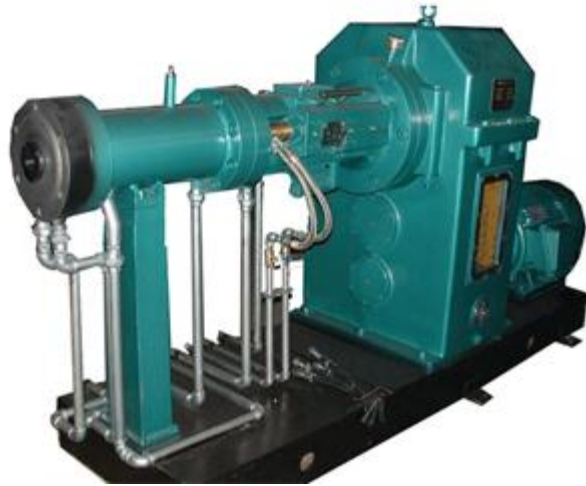
รูปที่ 9 เครื่องจักรแม่พิมพ์แบบฉีด (injection molding machine)

### การขึ้นรูปด้วยวิธีอัดผ่านตายโดยใช้เครื่องเอ็กชทรูด (extrusion)

การขึ้นรูปด้วยการอัดผ่านตาย (die) นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างของภาพตัดขวางเหมือนกันตลอดแนวความยาว เช่น ท่อ ยาง หุ้มสายเคเบิล ยางขอบกระจก ยางรัดซอง เป็นต้น เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยทั่วไปเรียกว่า เครื่องเอ็กชทรูด (extruder) ทั้งนี้เครื่องเอ็กชทรูดนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ เครื่องเอ็กชทรูดที่อาศัยแรงอัดจากแรม (ram extruder) และเครื่องเอ็กชทรูดที่อาศัยแรงอัดจากการหมุนของเกลียวหนอน (screw extruder) ซึ่งชนิดหลังนี้เป็นเครื่องเอ็กชทรูดชนิดที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน สำหรับยางที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้จะเรียกว่า เอ็กชทรูดเดต (extrudate)

### เครื่องเอ็กชทรูดที่อาศัยแรงอัดจากการหมุนของเกลียวหนอน (screw extruder)

เครื่องเอ็กชทรูดชนิดนี้ประกอบด้วยเกลียวหนอนซึ่งหมุนอยู่ในบาริล ซึ่งทั้งเกลียวหนอนและบาริลสามารถตั้งอุณหภูมิตามต้องการ ที่ปลายด้านหนึ่งของบาริลจะเป็นที่ตั้งของหัวตายและปลายอีกด้านหนึ่งจะเป็นช่องสำหรับป้อนยางคอมพาวด์เข้าสู่เครื่อง การหมุนของเกลียวหนอนจะทำให้ยางคอมพาวด์ไหลเข้าไปในบาริลอย่างต่อเนื่องและเกิดแรงดันสำหรับดันยางคอมพาวด์เหล่านี้ให้ไหลผ่านหัวตายที่อยู่ทางด้านหน้าเกิดเป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ หลังจากนั้นจำเป็นต้องนำยางที่ขึ้นรูปแล้ว (แต่ยังไม่เกิดการคงรูป) ไปผ่านขั้นตอนการคงรูปต่อไปโดยอาจใช้เทคนิคการคงรูปแบบไม่ต่อเนื่อง เช่น การคงรูปในหม้ออบไอน้ำความดันสูง หรือเทคนิคการคงรูปแบบต่อเนื่อง เช่น การคงรูปในถังของเหลว (liquid bath) หรือการคงรูปใน fluidized bed เป็นต้น



รูปที่ 10 เครื่องเอ็กซ์ทรูดที่อาศัยแรงอัดจากการหมุนของเกลียวหนอน (screw extruder)

### การขึ้นรูปด้วยเครื่องคาลเอนเดอร์ (calendering)

การขึ้นรูปด้วยเครื่องคาลเอนเดอร์นิยมใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เป็นแผ่นเรียบที่มีความหนาและความกว้างสม่ำเสมอหรือเพื่อการฉาบยางบางๆ ลงบนผ้าหรือแผ่นใยลวด (coating) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ เช่น สายพานลำเลียง ยางแผ่นปูพื้น ยางแผ่นปูบ่อน้ำ เป็นต้น เครื่องคาลเอนเดอร์ประกอบด้วยลูกกลิ้งที่ทำจากเหล็กหล่ออย่างดี ผิวหน้าขัดเรียบ ตั้งแต่ 2 ถึง 4 วางเรียงตัวกันในลักษณะต่างๆ ด้านในของลูกกลิ้งมีลักษณะกลวงเพื่อติดตั้งระบบทำความร้อนและหล่อเย็น ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งสามารถปรับให้กว้างหรือแคบได้ตามต้องการ โดยทั่วไปแล้วมักใช้เครื่องคาลเอนเดอร์ที่มี 3 ลูกกลิ้งสำหรับรีดยางให้เป็นแผ่นเรียบ ลูกกลิ้งทั้ง 3 ลูก จะหมุนด้วยความเร็วเท่ากันหรือต่างกันเล็กน้อย ลูกกลิ้งลูกกลางเคลื่อนที่ไม่ได้ แต่สามารถปรับลูกกลิ้งลูกบนและลูกล่างให้เคลื่อนที่เพื่อให้เกิดช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งตามต้องการได้

ขั้นตอนการรีดยางเป็นแผ่นเรียบทำได้โดยยาง (ที่อุ่นแล้ว) จะถูกป้อนเข้าระหว่างลูกกลิ้งคู่บน ยางจะพันตามลูกกลิ้งกลาง ผ่านไประหว่างลูกกลิ้งคู่ล่าง พันตามลูกกลิ้งล่างและม้วนออกมา (จะมีการเป่าด้วยแป้งทาลค์หรือสารกันยางติดอื่นๆ และพันหรือม้วนโดยมีผ้ากันระหว่างชั้นยางเพื่อป้องกันการเหนียวติดและสะดกในการนำไปสู่ขั้นตอนการผลิตต่อไป

อย่างไรก็ตามหลังจากยางแผ่นหรือยางที่ฉาบหรือเคลือบบนผ้าใบผ่านเครื่องคาลเอนเดอร์ออกมาแล้ว (แต่ยังไม่เกิดการคงรูป) จะต้องไปผ่านขั้นตอนการคงรูปต่อไป เช่น การคงรูปด้วยอากาศร้อน (hot air vulcanization) หรือการคงรูปแบบหมุน (rotational vulcanization)



รูปที่ 11 เครื่องคาลเอนเดอร์ (calender)

### 3. การคงรูปยาง

หลังจากขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แล้ว กระบวนการต่อมา คือ การทำให้ยางคงรูป (vulcanization) โดยอาศัยความร้อนกระตุ้นให้สารเคมี (ที่ผสมอยู่ในยางคอมพาวด์แล้ว) เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงโมเลกุลให้เป็นโครงสร้างตาข่ายสามมิติ ซึ่งจะทำให้ยางคอมพาวด์ (หรือยางดิบที่ยังไม่สามารถใช้งานได้) เปลี่ยนสภาพเป็นยางคงรูป (หรือยางสุก) ที่มีความยืดหยุ่น ทนทาน มีสมบัติที่เสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ จึงจะสามารถนำผลิตภัณฑ์ยางดังกล่าวไปใช้งานได้

การคงรูปยางสามารถใช้สารเคมี (บวกกับความร้อน) หรืออาจจะใช้รังสีหรือคลื่นพลังงาน เช่น รังสีแกมมา ลำอิเล็กตรอน คลื่นไมโครเวฟ ก็ได้ แต่การคงรูปโดยใช้รังสีจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพงและใช้ได้ดีในกรณีที่เป็นชิ้นงานบางๆ เท่านั้น ดังนั้นการคงรูปที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรม คือ การใช้สารเคมี (บวกกับความร้อน)

ระบบการคงรูปที่ใช้สารเคมีแบ่งออกเป็น 3 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่

1. ระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน (sulfur vulcanization)
2. ระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ (peroxide vulcanization)
3. ระบบการคงรูปด้วยสารเคมีอื่นๆ

#### ระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน (sulfur vulcanization)

ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันเป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน เพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ การคงรูปสามารถเกิดขึ้นได้เร็ว และยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ระบบนี้นิยมใช้กับยางทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ เช่น SBR, IR, BR, NBR เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ระบบนี้ก็มีข้อจำกัดหลัก คือ ไม่สามารถใช้ในการคงรูปยางที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล เช่น ยางซิลิโคน หรือยาง EPM

### ระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ (peroxide vulcanization)

แม้ว่าระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์จะสามารถใช้ได้ดีกับยางส่วนใหญ่ (ทั้งที่มีพันธะคู่และไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล) แต่เนื่องจากระบบนี้มีต้นทุนสูงกว่าระบบการคงรูปด้วยกำมะถันและยางคงรูปที่ได้มีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตต่ำกว่ายางที่ได้จากการคงรูปด้วยกำมะถัน ประกอบกับเพอร์ออกไซด์จัดเป็นสารเคมีที่ค่อนข้างอันตราย การขนย้ายและการเก็บรักษาต้องทำด้วยความระมัดระวัง ดังนั้นการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์นั้นจึงนิยมใช้กับยางที่ไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล (เช่น EPM, EVA, CPE หรือ Q เป็นต้น) หรือยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำมากเท่านั้น (เช่น HNBR, EPDM) สำหรับยางอื่นๆ นิยมคงรูปด้วยกำมะถันมากกว่า ยกเว้นกรณีที่ต้องการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ทนต่อความร้อนได้ดีและ/หรือมีค่าการเสียรูปถาวรหลังกด (compression set) ต่ำเท่านั้น

### ระบบการคงรูปด้วยสารเคมีอื่นๆ

นอกจากระบบหลักๆ 2 ระบบดังที่กล่าวมาแล้ว ยังมีการนำสารทำให้ยางคงรูปชนิดอื่นๆ มาใช้ในการคงรูปด้วยเช่นกัน แต่มีการใช้น้อยหรือใช้ในกรณีที่เป็น เช่น การคงรูปของยางคลอโรพรีน (chloroprene; CR) เป็นต้น สารเคมีอื่นๆ ได้แก่ ซีลีเนียม เทลลูเรียม โลหะออกไซด์ (ซิงค์ออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ ออกไซด์ของตะกั่ว) สารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ (difunctional compounds)

### เทคนิคที่ใช้ในการคงรูป (vulcanization techniques)

เทคนิคที่ใช้ในการคงรูปมีหลายวิธี ขึ้นกับความเหมาะสมและรูปร่างของผลิตภัณฑ์

#### 1. การคงรูปของยางที่ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์

ผลิตภัณฑ์ยางที่ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์จะทำให้ยางคงรูปได้ด้วยวิธีอัด (press) โดยวางแม่พิมพ์ที่มียางคอมพาวด์อยู่ภายในลงบนแผ่นกดอัด (platen) ของเครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก (hydraulic press) ที่สามารถเลื่อนขึ้นลงได้ (ดูการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัดประกอบ)

#### 2. การคงรูปของยางที่ขึ้นรูปด้วยวิธีอัดผ่านตายโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูด

การคงรูปของเอ็กซ์ทรูดแตกแบ่งได้เป็น 2 เทคนิค ได้แก่ เทคนิคการคงรูปแบบไม่ต่อเนื่อง (การคงรูปในหม้ออบไอน้ำความดันสูง) และ เทคนิคการคงรูปแบบต่อเนื่อง (การคงรูปในถังของเหลว หรือ การคงรูปใน fluidized bed)

##### 1. การคงรูปในหม้ออบไอน้ำความดันสูง

หม้ออบไอน้ำความดันสูงหรือที่เรียกกันว่า หม้อออโตเครฟ (autoclave) รูปทรงกระบอกวางในแนวตั้งหรือแนวนอน มีไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อน อุณหภูมิของไอน้ำจะขึ้นกับความดันภายในหม้ออบ นำเอ็กซ์ทรูดแตกที่ได้จากการขึ้นรูปส่งผ่านไปยังถังใส่สารหล่อลื่นเพื่อป้องกันการติดกันก่อนที่จะถูกส่งต่อไปพันรอบวงล้อกลมและนำเข้าไปอบในหม้อออโตเครฟ



รูปที่ 12 หม้ออบไอน้ำความดันสูง (autoclave)

## 2. การคงรูปในถังของเหลว

ถังของเหลวมีลักษณะคล้ายรางน้ำที่มีขนาดไม่กว้างมากนักแต่จะค่อนข้างยาวและมักจะวางต่อจากเครื่องเอ็กซ์ทруд เมื่อเอ็กซ์ทрудเดตต์ผ่านออกมาจากหัวตายแล้วจะถูกส่งต่อไปยังถังของเหลวอย่างต่อเนื่อง ความร้อนจากของเหลวจะทำให้เกิดการคงรูป (เอ็กซ์ทрудเดตต์จะต้องจมอยู่ใต้ระดับของเหลวตลอดเวลา) ของเหลวที่สามารถใช้เป็นตัวกลางความร้อน ได้แก่ ซิลิโคน ก्लीเซอริน และที่นิยมใช้มากที่สุด คือ เกลือผสม (salt mixtures)



รูปที่ 11-13 ถังของเหลว (liquid bath)

## 3. การคงรูปด้วย fluidized bed

การคงรูปด้วย fluidized bed มีหลักการคล้ายกับการคงรูปในถังของเหลว แต่มีตัวกลางการให้ความร้อนต่างกัน คือ ในถัง fluidized bed จะมีการปล่อยก๊าซให้ไหลจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนผ่านชั้นของเม็ดลูกแก้วกลมเล็กๆ ที่เรียกว่า บัลโลตินี (ballotini) เม็ดบัลโลตินีจะฟุ้งกระจายและแขวนลอยอยู่ในก๊าซที่เคลื่อนที่อยู่ภายในถัง ความร้อนจากเม็ดบัลโลตินีจะถูกถ่ายเทให้กับยางทำให้เกิดการคงรูปขึ้นได้ การคงรูปด้วยวิธีนี้เหมาะสำหรับเอ็กซ์ทрудเดตต์ที่บิดเบี้ยวได้ง่าย

นอกจากนี้ยังมีการคงรูปด้วยวิธีอื่นๆ เช่น การใช้อากาศร้อนในอุโมงค์ (hot air tunnel) การใช้คลื่นไมโครเวฟหรือรังสีที่มีพลังงานสูง เป็นต้น

### 3. การคงรูปของยางที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องคาลเลนเดอร์

ยางที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องคาลเลนเดอร์สามารถคงรูปได้โดยใช้หม้ออบความดันสูงหรือการใช้อากาศร้อน แต่ปัจจุบันมีเทคนิคการคงรูปแบบใหม่ที่เรียกว่า “เทคนิคการคงรูปแบบหมุน (rotational vulcanization or rotorcure)” ซึ่งประกอบไปด้วยลูกกลิ้ง 3 ลูก ติดตั้งห่างกันเป็นรูปสามเหลี่ยม บริเวณตรงกลางของลูกกลิ้งทั้งสามจะมีการติดตั้งลูกกลิ้งขนาดใหญ่ที่เรียกว่า “drum” โดยที่ภายใน drum จะมีการเจาะรูเป็นโพรงให้ไอน้ำหรือตัวกลางความร้อนชนิดอื่นๆ ไหลผ่าน ลูกกลิ้งทั้งสามและ drum จะเชื่อมกันด้วยแถบเหล็กลักษณะคล้ายสายพาน ยางจะถูกป้อนเข้ามาตามแถบเหล็ก เมื่อ drum หมุนทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของยางซึ่งจะถูกกดให้แนบติดกับ drum ความร้อนจาก drum ทำให้เกิดการคงรูป



รูปที่ 14 เครื่องการคงรูปแบบหมุน (rotorcure)

### ขั้นตอนการตกแต่งผลิตภัณฑ์ (finishing)

หลังจากผ่านการคงรูปและแกะผลิตภัณฑ์ออกจากแม่พิมพ์ (หรือการคงรูปด้วยวิธีอื่น) ขั้นตอนสุดท้ายคือ การตกแต่งผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีวิธีการหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์ เช่น การตกแต่งโดยใช้กรรไกร ขลิบหรือตัดเศษบางส่วนเกิน (scrap) หรือใช้เครื่องตกแต่งขัดผิวหน้าผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

### เอกสารอ้างอิง

1. พรพรรณ นิธิอุทัย, “เอกสารประกอบการอบรมเทคโนโลยียางระยะสั้น เรื่อง เทคนิคการออกสูตรยาง”, 29 เมษายน ถึง 1 พฤษภาคม 2535, โรงแรมเอเชีย กรุงเทพฯ
2. พงษ์ธร แซ่ฮุย และ ชาคริต สิริสิงห, “ยาง: กระบวนการผลิตและการทดสอบ”, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, พิมพ์ครั้งที่ 1 มิถุนายน 2550.

3. วราภรณ์ ขจรไชยกูล, “ผลิตภัณฑ์ยาง: กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี”, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, พิมพ์ครั้งที่ 2 กันยายน 2554.
4. <http://www.made-in-china.com/showroom/artificiallawn/product-detailBbkOgSeKZfyh/China-Two-Roll-Mixing-Mill-RM-OM-.html>
5. <http://www.farrel.com/products/F%20Series%20Banbury%20Mixer.pdf>
6. <http://www.farrel.com/products/intermix.pdf>
7. [http://www.webalice.it/roberto.regalia/le\\_mie\\_pubblicazioni.html](http://www.webalice.it/roberto.regalia/le_mie_pubblicazioni.html)
8. <http://cnhitop.en.made-in-china.com/product/eMymHLwXtpg/China-Rubber-Machinery-Dispersion-Mixer-Kneader-.html>
9. <http://www.farrel.com/products/9UM.pdf>
10. <http://www.nb-jk.com/enp8.htm>
11. <http://www.karunanandpress.com/rubber-moulding-press.html>
12. [http://www.diytrade.com/china/pd/10945198/Rubber\\_injection\\_moulding\\_machine.html](http://www.diytrade.com/china/pd/10945198/Rubber_injection_moulding_machine.html)
13. <http://www.ventmaster.com/p-cold-feed-rubber-extruder-machine-1265442.html>
14. <http://www.globalchemmade.com/company/8744/Equipments/9487.html>
15. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Autoclave\\_Laminacion\\_de\\_Vidrio.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Autoclave_Laminacion_de_Vidrio.jpg)
16. <http://bainasb.en.made-in-china.com/productimage/xqwJfAncTLWt-2f0j00uCdESzncSJkl/China-Salt-Bath-Continous-Curing-System.html>
17. [http://www.alibaba.com/product-gs/517220670/Rubber\\_rotocure\\_rubber\\_machine\\_for\\_tire.html](http://www.alibaba.com/product-gs/517220670/Rubber_rotocure_rubber_machine_for_tire.html)