

## การตรวจเอกสาร

Brown (2002) กล่าวถึงเหตุผลและสาเหตุการเสียหายของผลิตภัณฑ์ยาง แนวทางการป้องกันและตัวอย่างความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะกับผลิตภัณฑ์ยางที่เป็นล้อรถและซีล โดยความเสียหายดังกล่าวนี้เกิดจากการออกแบบที่ผิดพลาด การเลือกวัสดุที่ไม่เหมาะสม ความบกพร่องในขั้นตอนการผลิต การติดตั้งที่ไม่ถูกต้อง สภาพการใช้งานที่ไม่ได้คาดการณ์ไว้ การใช้งานที่ผิดวิธีหรือไม่ระมัดระวัง รวมไปถึงการออกแบบในลักษณะที่มีจุดบกพร่อง (strategic weakness)

Lindsay (1999) ได้ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อความสูญเสียในกระบวนการฉีดผลิตภัณฑ์ยาง ตั้งแต่ช่วงของการออกแบบผลิตภัณฑ์ไปจนถึงการปรับตั้งเงื่อนไขการฉีดของเครื่องจักร อิทธิพลของส่วนผสมและสารเติมเต็ม (additives) บางตัว ที่มีผลต่อเสถียรภาพในแม่พิมพ์ รวมทั้งเกิดตำหนิในชิ้นงานที่ฉีด นอกจากนี้ Lindsay ยังกล่าวถึงการนำระบบบริหารงานคุณภาพ ISO 9001 มาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน และให้ตระหนักถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูงและพิถีพิถันความคลาดเคลื่อนที่ต่ำ รวมไปถึงความร่วมมือกันระหว่างตัวผู้ผลิตและลูกค้าในแต่ละขั้นตอนเพื่อให้ผู้ผลิตสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่ตรงตามความต้องการของลูกค้า ทั้งในด้านของคุณภาพ ราคา ระยะเวลาในการส่งมอบและจำนวนที่ต้องการ

Bociaga (2001) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลกับคุณภาพในงานฉีดและใช้ในการอ้างอิงกระบวนการฉีด คือ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ความดันที่ใช้ในการฉีด ความเร็วฉีด และรอบการฉีด โดยทดลองชิ้นงานตัวอย่างที่เป็น HDPE โดยกำหนดปัจจัยคงที่ในการฉีด คือ อุณหภูมิฉีด ความดันฉีด ความดันฉีดช้า (holding pressure) เวลาคืนช้า เวลาหล่อเย็น และรอบการฉีด และปัจจัยแปรผันในการฉีด คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ และความเร็วฉีด นอกจากนี้ E. Bociaga ยังได้ศึกษาถึงรูปแบบของการฉีดที่ได้จากวิธีการฉีดเข้าแบบที่ต่างกัน เช่น ฉีดเข้าจุดเดียวด้านข้าง ฉีดเข้าสองจุดด้านข้าง ซึ่งมีอิทธิพลต่อโครงสร้างและการเกิด Crystallinity ของโพลิเมอร์ ลักษณะของรอยเชื่อมประสาน (weld lines) ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน รวมทั้งระดับการเกิด Crystallinity ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของแม่พิมพ์

Packham (2002) ได้ศึกษาปัญหาในระหว่างกระบวนการฉีดต่าง ๆ ซึ่งมีสาเหตุได้หลายประการ โดยได้ศึกษาปัญหาการติดของหน้าแม่พิมพ์ (mould sticking) ปัญหาเสียดก้าง (mould fouling) และปัญหาการทำความสะอาดที่เกิดในงานแม่พิมพ์ของวัสดุพอลิเมอร์ โดยได้ทำการศึกษาถึงกระบวนการปลดชิ้นงานในแม่พิมพ์ (mould release) ปังจ้ยจากชนิดของวัสดุและเงื่อนไขการฉีด ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมดังกล่าว รวมทั้งความสัมพันธ์ของกรรมวิธีการปรับปรุงผิว (surface treatment) ของหน้าสัมผัสแม่พิมพ์ การเลือกสารช่วยปลดชิ้นงาน (release agents) วิธีการทำความสะอาดแม่พิมพ์ และการพิจารณาการวัดค่าการปลดชิ้นงานและการตกค้างของเศษ (fouling)

Forrest (2001) ศึกษาส่วนผสมและผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อช่วยในงานควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยาง รวมไปถึงค้นหาสาเหตุการเสียหายที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ยางและส่วนผสมของยาง Goodship (2002) ศึกษาถึงการเลือกใช้วัสดุในกระบวนการฉีดที่ใช้วัสดุหลายชนิด เช่น เทคนิค Coinjection, Bi-injection และ Interval Injection โดยเฉพาะคุณสมบัติด้านการเชื่อมประสาน (bonding properties) ของวัสดุ นอกจากนั้น Kushnarenko (2001) ได้ทดสอบเวลาในการบ่มยางให้สุกของร่องเท้ายางที่มีส่วนผสมของโลหะ ซึ่งวางในตัวเบ้าขณะทำการฉีด โดยเกิดปัญหาทางความร้อนอันเนื่องมาจากวัสดุที่ไม่ใช่เนื้อเดียว (inhomogeneous) ซึ่งสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยวิเคราะห์ ทำให้สามารถพยากรณ์เวลาที่เหมาะสมในการบ่มยางให้สุกของผลิตภัณฑ์ยาง

Haberstroh and Kleba (2001) ศึกษาการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้นำมาใช้ในการทำนายการบิดตัว (warpage) ในโครงสร้าง Pur Sandwich ของชิ้นส่วนยานยนต์ การศึกษาหาลักษณะการบิดตัวของพลาสติกเสริมใยแก้วของชิ้นส่วน Motor Vehicle Radiator Tank ซึ่งเกิดจากอิทธิพลการเรียงตัวของเส้นใยอันเกิดจากการวางตำแหน่งช่องทางไหล (runner) ในตัวแม่พิมพ์ โดยนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองการเรียงตัวของเส้นใย เพื่อทำนายพฤติกรรมการหดตัว (shrinkage) และการเสียรูป (deformation) ชิ้นงานฉีด ซึ่งวัสดุที่ใช้ทดสอบคือวัสดุผสม Polypropylene เกรด Armlen PP SV 2T ที่ผลิตโดย Poliplastik แล้วทำการทดสอบด้วยตำแหน่งช่องทางไหล 3 แบบ ผลคำนวณที่ได้แสดงให้เห็นว่า Transverse Rigidity ของ Radiator Tank เพิ่มขึ้น และการบิดตัวลดลงอย่างชัดเจน การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการพยากรณ์การเรียงตัว (orientation) ของเส้นใยระหว่างช่องทางไหลของสารประกอบโพลิเมอร์ผ่านช่องทางขนาดเล็ก (narrow channel) ซึ่งได้แสดงผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เกิดขึ้นในเบ้าแม่พิมพ์ โดยใช้สัดส่วน

ความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่แตกต่างกัน 3 แบบ ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของการเรียงตัวของเส้นใยต่อสัดส่วนของความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในอดีตการออกแบบชิ้นส่วนและแม่พิมพ์เป็นเรื่องที่ยากต่อการเข้าใจ และไม่ได้ใช้การออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรม เมื่อมีการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้กับวิศวกรผู้ออกแบบ โดยสามารถทำนายลักษณะการไหล อุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ เวลาที่ใช้ในการบ่ม ปรากฏการณ์รอยพ่น (jetting) อาจเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยคำนวณผลกระทบของการไหลในลักษณะ 3 มิติ ค่าการกระจายความร้อนและการส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ ตำแหน่งของรูระบายอากาศที่เหมาะสมในตัวเบ้า ตำแหน่งรูเข้า การสร้างสมดุลของรูว้างและคำนวณค่ารอบการฉีด การบ่ม (curing) การหล่อเย็น จนถึงการเอาชิ้นงานออกจากตัวเบ้า ตัวอย่างเช่น ชิ้นงานตัวอย่างระบบยางกันซึมที่ประตู (door sealing system) โดยสามารถทำนายตำแหน่งที่เกิดความเสียหายขณะขึ้นรูปที่อาจเกิดขึ้น ค่าความดัน ค่าอุณหภูมิ ค่าของเวลาที่ใช้ในการกำหนดเงื่อนไขการผลิต ผลกระทบของอัตราเฉือน (local shear effect) และยังสามารถคำนวณค่าของ Cross-linking Reaction ที่เกิดขึ้นและปัญหาที่เกี่ยวข้อง ค่าความดันอากาศภายในตัวแม่พิมพ์ ค่าความร้อนและที่ทำให้เกิดเค้นภายในขณะที่ทำการหล่อเย็น ผลกระทบทางความร้อนของชิ้นโลหะที่เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ (metal insert) และประมาณเวลาของรอบการฉีด นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณและทำนายลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยและวิเคราะห์ค่าความเค้นของชิ้นงานจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป ช่วยลดเวลาการออกแบบและทำให้ลดปัญหาการแก้ไขชิ้นงานหลังจากที่มีการผลิตออกไปแล้ว รวมถึงเป็นการลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาที่เกิดขึ้น การนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้จำลองกระบวนการผลิต สามารถทำนายสิ่งที่จะเกิดขึ้นในการผลิตจริง ทำให้ช่องว่างระหว่างงานออกแบบและงานผลิตผลิตภัณฑ์อย่างลดลง ผู้ออกแบบสามารถเห็นปัญหาที่อาจเกิดขึ้น หากนำชิ้นงานที่ออกแบบไปทำการผลิตจริง จึงสามารถทำการแก้ไขปรับปรุงการออกแบบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบ และลดค่าใช้จ่ายจากความผิดพลาดเมื่อไปสู่ขั้นตอนของการผลิต

นริศรา (2546) ศึกษาแรงกระทำระหว่างยางกับเขม่าดำของคอมโพสิตยางธรรมชาติ (NR) และยางอะคริลิก (ACM) และคอมโพสิตยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอะคริลิก (NR/ACM) โดยวิธีทดสอบค่าบาค์รับเบอร์และสมบัติเชิงไดนามิกส์รวมทั้งศึกษาการกระจายพันธะข้ามและปริมาณพันธะข้ามโดยวิธีทดสอบสมบัติเชิงไดนามิกส์ตลอดจนความเข้ากันได้

ของยางผสมที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัลคาไนเซตยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอะคริลิก พบว่าเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้นค่าบดรับเบอร์ของคอมโพสิตยางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลงที่ ส่วนคอมโพสิตยางอะคริลิกลดลงแสดงว่าแรงกระทำระหว่างยางกับเขม่าดำของคอมโพสิต ยางธรรมชาติและยางอะคริลิกมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเกิดการรวมตัวของเขม่าดำจากการศึกษา การกระจายพันธะข้ามและปริมาณพันธะข้ามของวัลคาไนเซตยางผสมNR/ACMโดยวิธีทดสอบ สมบัติเชิงไดนามิกพบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความสูงของพีคของยางอะคริลิกเพิ่มขึ้น ส่วนเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความสูงของพีคของยางธรรมชาติลดลง แสดงว่าเมื่อปริมาณ ยางอะคริลิกเพิ่มขึ้น มีการกระจายพันธะข้ามและปริมาณพันธะข้ามของวัลคาไนเซตยางอะคริลิก มากกว่ายางธรรมชาติ จากการศึกษาความเข้ากันได้ของวัลคาไนเซตยางผสม NR/ACM พบว่า เขม่าดำทำให้ยางผสม NR/ACM เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น เมื่อผสมยางอะคริลิกลงไปในผลิตภัณฑ์ ยาง NR/ACM ร้อยละ 70 โดยน้ำหนักความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจน ขาดก่อนและหลังการเสื่อมสภาพทางความร้อนมีความแตกต่างกันน้อยที่สุด และเมื่อปริมาณ เขม่าดำเพิ่มขึ้นความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของผลิตภัณฑ์ ยางธรรมชาติและยางอะคริลิกลดลงส่วนสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางอะคริลิกมีความแตกต่าง ก่อนและหลังการเสื่อมสภาพทางความร้อนน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ

รัชดา และ อุคมเกียรติ (2546) ศึกษาการถ่ายโอนความร้อนจากเข้าพิมพ์สู่ล้อยางต้น ขณะอบคงรูปและตัวแทนสมบัติของยางพบว่ามิลักษณะดังนี้คือขณะอบคงรูปล้อยางต้น ยางจะมี ความสามารถในการนำความร้อนลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงก่อน การเกิดเชื่อมโยงโซ่โมเลกุล คือ ช่วงอุณหภูมิ 60-110 °C หลังช่วงอุณหภูมิคงรูป (120-150 °C) ค่าการนำความร้อนค่อนข้างคงที่แต่จะเกิดการคายพลังงานความร้อนออกมาส่วนหนึ่งอันเนื่อง มาจากการสลายและสร้างพันธะใหม่ระหว่างโซ่โมเลกุลของยางสำหรับในการคำนวณหา การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในล้อยางต้นขณะอบคงรูปเพื่อทำนายระดับการสุกตัวของยาง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในล้อยาง เพื่อความง่ายและสะดวกต่อการคำนวณจะสามารถสมมุติให้ค่า การนำความร้อนของยางมีค่าคงที่เป็นค่าที่อุณหภูมิห้องและค่าความร้อนที่ผลิตขึ้นเป็นค่าคงที่ เท่ากับ  $6000 \text{ W/m}^3$  จะทำให้ได้ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิซึ่งนำมาหาระดับการสุกตัวของยาง โดยใช้ทีทีซีชาร์ตได้อย่างถูกต้อง

อรรถพล (2545) ได้ศึกษาขั้นตอนการประยุกต์ใช้ CAD/CAE/CAM สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกและการปรับตั้งพารามิเตอร์เครื่องฉีดพลาสติกที่จะเป็นแนวทางการนำเสนอกับภาคอุตสาหกรรมที่ผลิตชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับพลาสติกโดยความรู้ขั้นตอนการออกแบบรวมไปถึงทำอะไรให้ได้ผลิตภัณฑ์นั้นตรงตามความต้องการการใช้งานของลูกค้าและทำให้สามารถประมาณคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้นว่าจะอยู่ในระดับใดหรือโรงงานสามารถผลิตได้หรือไม่ โดยจะต้องมีการคำนึงถึงองค์ประกอบต่อไปนี้

1. ชนิดพลาสติกและคุณสมบัติ
2. การออกแบบผลิตภัณฑ์ของพลาสติกและการสร้างแม่พิมพ์
3. เงื่อนไขการฉีดและการวิเคราะห์จำลองสภาวะการฉีด
4. การวางแผนขบวนการผลิตและกรรมวิธีการผลิต
5. ประสิทธิภาพเครื่องฉีดและอุปกรณ์ที่เอื้ออำนวยในการผลิต

#### ผลกระทบต่ออุตสาหกรรมแม่พิมพ์ของประเทศ

จากความสำคัญของการพัฒนากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่องระบบเศรษฐกิจโดยรวมของไทยนั้นเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติที่ยังไม่ได้แปรรูปให้มีมูลค่าที่สูงขึ้นจากการส่งออกยางดิบที่ยังไม่ได้มีการแปรรูปนั้นจะเห็นได้ว่ามูลค่าที่เพิ่มขึ้นประมาณ 10 เท่าในการพัฒนากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางนั้นจะส่งผลดีต่อเกษตรกรเนื่องจากความต้องการยางธรรมชาติในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์นั้นมีมากขึ้น ส่วนในโรงงานที่แปรรูปก็จะทำให้มีประสิทธิภาพของการแปรรูปยางดิบและมาตรฐานคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้นดีขึ้น และจะส่งผลทำให้ผู้ส่งออกสามารถที่จะส่งออกได้มากขึ้นด้วย

ในโครงการนี้ได้มุ่งเน้นเพื่อที่จะตอบสนองต่อยุทธศาสตร์ด้านอุตสาหกรรมยางของคณะกรรมการนโยบายยางธรรมชาติ ซึ่งเน้นมาตรฐานการดำเนินการระยะปานกลางซึ่งในโครงการนี้ได้เน้นไป 3 เรื่องใหญ่ ๆ คือ การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตโดยการนำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในกระบวนการพัฒนาและการกำหนดและปรับมาตรฐานคุณภาพของแม่พิมพ์

### 1. การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต

ในกรณีของผู้ประกอบการที่เข้าร่วมทำโครงการวิจัยนี้ได้มีการปรึกษาถึงปัญหาของกระบวนการผลิตและชิ้นงาน ที่เกิดขึ้นเช่น ชิ้นงานเกิดครีบหรือชิ้นงานติดกับแม่พิมพ์ ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียทางด้านต้นทุนและเวลาในการผลิตในการแก้ไขเพื่อที่จะปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นนั้นจะทำได้โดยการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์และการพัฒนากระบวนการผลิตในงานแม่พิมพ์ ฉีดยางพาราที่ถูกต้อง ดังนั้นจึงแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี คือมีการพัฒนากระบวนการออกแบบและการใช้งานแม่พิมพ์ฉีดยางพาราอย่างถูกต้องกับการที่ไม่มีโครงการในการเปรียบเทียบว่าควรมีโครงการหรือไม่ ดูได้จากมูลค่าที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์เท่ากับมูลค่าที่ใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาเมื่อสิ้นสุดโครงการ (ในที่นี้มูลค่าที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์นั้นจะเพิ่มขึ้นตามเวลา ส่วนมูลค่าหรือค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงและพัฒนาจะคงที่)

### 2. การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตโดยการนำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในกระบวนการพัฒนา

จากที่ได้กล่าวมาในความสำคัญของปัญหาจะเห็นได้ว่าทางด้านของเทคโนโลยีในกระบวนการผลิตของทางบริษัทยังขาดแม่พิมพ์ในการขึ้นรูปของงานที่ดีและการพัฒนากระบวนการออกแบบซึ่งเทคโนโลยีที่ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางใช้ส่วนมากจะนำเข้าจากต่างประเทศทั้งสิ้นและไม่สามารถที่จะพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตของตนเองได้ ซึ่งก็จะต้องขอความช่วยเหลือจากทางภาครัฐบาล ส่วนทางด้านภาครัฐบาลนั้นการค้นคว้าวิจัยพัฒนาและการถ่ายทอดเทคโนโลยีอุตสาหกรรมยางให้แก่ภาคอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางนั้นยังไม่มีเอกภาพ และไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ดังนั้นในการทำโครงการนี้จะเป็นตัวที่จะประสานงานในการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากทางภาครัฐสู่ภาคเอกชน และจะเป็นการสร้างความรู้และการพัฒนาเทคโนโลยีซึ่งจะเป็นการพัฒนาควบคู่กันไปพร้อม ๆ กัน

### 3. การกำหนดและปรับมาตรฐานคุณภาพของแม่พิมพ์

ในการเปรียบเทียบกันระหว่าง มาตรฐานและคุณภาพของแม่พิมพ์ประเทศไทยกับกลุ่มประเทศที่ทำอุตสาหกรรมเกี่ยวกับยางจะต่างกันอยู่มาก เนื่องจากประเทศไทยนั้นยังขาดทั้งบุคลากร เครื่องมือ และอุปกรณ์ ที่จะใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ ซึ่งถ้านำเข้าจากต่างประเทศราคาก็จะสูงขึ้น ดังนั้นโครงการนี้จึงจะช่วยในการกำหนดและปรับมาตรฐานคุณภาพของแม่พิมพ์

โดยการนำเอาคอมพิวเตอร์มาทำการวิเคราะห์ซึ่งจะทำให้การกำหนดและปรับมาตรฐานคุณภาพของแม่พิมพ์ดีขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ผลผลิตที่ได้นั้นมีมาตรฐาน และคุณภาพที่สูงขึ้น ซึ่งเมื่อส่งออกไปขายยังต่างประเทศแล้วก็จะสามารถที่แข่งขันกับต่างประเทศได้ ซึ่งจะเป็นการสร้างขีดความสามารถในการแข่งขันเพิ่มสูงขึ้นด้วย

### **แนวคิดในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการฉีดยางในการขึ้นรูป (Modeling of injection rubber Processes)**

ในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการฉีดนั้นจะต้องเริ่มจากขั้นตอนการกำหนดรูปร่าง (geometry definition) การสร้างเอลิเมนต์ของรูปทรงที่สร้างขึ้น (geometry enmeshment) วัสดุ และการกำหนดปัจจัยให้กับกระบวนการ (material and process parameter definition) การจำลองการไหลและผลเฉลยของสมการ (simulation/solution of the governing equations) และการประเมินผลของคำตอบ (evaluation of the results)

#### **การกำหนดรูปร่าง (Geometry definition)**

ในขั้นตอนแรกของการสร้างแบบจำลองของกระบวนการจะเป็นการกำหนดรูปร่างของระบบในการฉีดในปัจจุบันการใช้โปรแกรมในการจำลองการไหลนั้นจะนำรูปทรงมาจากข้อมูล CAD ซึ่งจะอยู่ในขั้นตอนก่อนที่จะดำเนินการ (pre-processor) สำหรับการนำข้อมูลเข้ามาภายในโปรแกรมและนำรูปทรงของช่องทางไหลเข้า (gating system) ระบบช่องทางไหล (runner system) เป็นต้น ซึ่งจะเป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในระบบฉีดยางให้ไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์ ข้อสำคัญระหว่างการสร้างแบบรูปทรงของแบบจำลองโดยการรวมเอลิเมนต์ทั้งหมดของระบบเข้าด้วยกันจะต้องให้ความสำคัญในการไหลของเนื้อยางภายในรูปทรงของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์และการถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานในการฉีด

#### **การสร้างเอลิเมนต์ของรูปทรงที่สร้างขึ้น (Geometry enmeshment)**

หลังจากการกำหนดรูปร่างของระบบในการฉีดขึ้นแล้วรูปร่างนั้นจะถูกกำหนดให้เป็นจำนวนของเอลิเมนต์ปริมาตรสำหรับที่จะทำการคำนวณ ข้อสำคัญนั้นจะต้องพิจารณาถึงจุดที่ละเอียดและหยาบในการสร้างกริดเพื่อที่จะทำการคำนวณ ความแม่นยำของคำตอบจะสูงถ้ามี

การแบ่งปริมาตรที่มีความละเอียดในการสร้างความละเอียดถ้ายังมีความละเอียดสูงเวลาในการคำนวณก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยโดยทั่วไปแล้วจะต้องทำการสมดุลกันระหว่างความแม่นยำที่ต้องการกับเวลาในการคำนวณ สำหรับในการพิจารณาการจำลองการไหลหนึ่ง ๆ

### **วัสดุและการกำหนดปัจจัยในขั้นตอนของกระบวนการ (Material and process parameter definition)**

ขั้นตอนต่อไปคือการกำหนดวัสดุและการกำหนดปัจจัยในขั้นตอนของกระบวนการ ซึ่งเป็นค่าที่ต้องการสำหรับการนำไปใช้ในการหาคำตอบของระบบสมการของการไหลเข้าภายในแม่พิมพ์และขั้นตอนของการบ่มเนื้อยาง ขั้นตอนแรกจะทำการกำหนดค่าคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุในระบบการฉีดทำการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับปริมาตรที่ไม่รู้ค่า เช่น อุณหภูมิเริ่มต้น และการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตสำหรับตัวไม่รู้ค่า เช่น ความร้อนหรือความดันสำหรับเนื้อยางที่จุดเริ่มต้นของกระบวนการฉีดหรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่หน้าสัมผัสระหว่างวัสดุในกระบวนการฉีด กระบวนการที่สำคัญที่จะต้องใส่เข้าไปจะเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการไหลและการบ่มของระบบการฉีด ตัวอย่าง เวลาในการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์, ผลกระทบทั้งหมดของการสมดุลทางความร้อนของแม่พิมพ์ ในการเข้าใจถึงผลของขั้นตอนในการจำลองการไหลของเนื้อยางเข้าไปภายในแม่พิมพ์จะต้องรู้และเข้าใจในวัสดุ และปัจจัยของขั้นตอนที่ใช้ในการจำลองการไหลสำหรับเหตุผลที่สำคัญจะต้องใช้ค่าคุณสมบัติทางความร้อนที่ถูกต้องและขั้นตอนในการฉีดนั้นจะต้องมีความเป็นไปได้ ถ้าทำได้ดังที่กล่าวมาจะทำให้ได้ผลของการวิเคราะห์การจำลองการไหลได้แม่นยำมากขึ้น

### **การจำลองการไหลและผลเฉลยของสมการ (Simulation/Solution of the governing equations)**

ในสมการที่ครอบคลุมทั้งหมดของขั้นตอนของการไหลและการบ่มตัวของเนื้อยางของกระบวนการฉีดจะทำการแบ่งกริดในการคำนวณ ซึ่งเมื่อมีการกำหนดวัสดุและปัจจัยในขั้นตอนต่าง ๆ จะได้มาซึ่งผลคำตอบของตัวแปรที่ไม่รู้ค่าในลักษณะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเวลาต่าง ๆ กันของการไหลเข้าและการประเมินผลในแต่ละช่วงเวลาของการบ่มเนื้อยาง



### การประเมินผลของคำตอบ (Evaluation of the results)

ผลที่ได้ของการไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์หรือการบ่มเนื้อยางโดยการจำลองการไหลค่าที่ใช้เริ่มต้น ได้แก่ อุณหภูมิ, ความดัน และความเร็ว ในการคำนวณ ในการประเมินผลนั้นเมื่อเสร็จสิ้นการประมวลผลแล้วจะแสดงให้เห็นโดยสายตาโดยค่าต่างๆจะแสดงในแนวแกนสามมิติ โดยจะแสดงค่าที่ได้แยกกันตามค่าที่ต้องการ ในการประเมินของการจำลองการไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์ส่วนที่จะต้องคำนึงถึงคือช่องทางการไหลในแต่ละระดับของเนื้อยางที่ไหลเข้าไปในช่องว่างของอากาศจนเต็มแม่พิมพ์ในการไหลเข้าของเนื้อยางโดยความเร็วที่สูงจะทำให้เกิดการหมุนวนของเนื้อยางซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาที่ตามมากับตัวชิ้นงานได้ เช่น โพลของอากาศที่บริเวณผิวของชิ้นงาน และช่วงของอุณหภูมิที่กระจายภายในเนื้อยางระหว่างการไหลซึ่งจะเป็นตัวชี้บอกว่าควรที่จะระบายความร้อนที่ตำแหน่งใดและต้องพิจารณาถึงอุณหภูมิหลังจากการไหลนั้นจะเป็นตัวกำหนดในการบ่มตัวที่จะทำให้เกิค่าการหดตัว ในการประเมินผลของการจำลองการบ่มเนื้อยางในขั้นตอนของการบ่มเนื้อยางที่เกิดขึ้น การทำนายการบ่มนั้นจะพิจารณาถึงขั้นตอนการสุกตัวและการเคลื่อนที่ในตัวชิ้นงานตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดและในการประเมินผลในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันและอัตราการให้ความร้อนซึ่งจะนำไปเป็นข้อมูลในการไหลเข้าของเนื้อยาง

### วิธีการมาตรฐานของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Standard Finite Difference Techniques (SFD – Techniques))

หลักการพื้นฐานที่สำคัญของ SFD นั้นจะใช้หลักการของวิธีของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Difference Equation) โดยใช้สมการการถ่ายเทความร้อน (transient heat transfer equation) หรือสมการพลังงาน (energy equation) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

โดยที่

$\rho C_p$  = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity)

$\lambda$  = ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity)

$T$  = อุณหภูมิ (temperature)

$t$  = เวลา (time)

และ  $u$ ,  $v$  และ  $w$  คือความเร็วของการไหล (flow velocities) ซึ่งจะอยู่ในแนวแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ตามลำดับ

ในการหาคำตอบของสมการนั้นจะต้องกำหนดค่าเริ่มต้นและค่าของขอบเขต (initial and boundary conditions) ซึ่งจะนำไปหาค่าของอุณหภูมิซึ่ง  $T = T(x, y, z)$  ในขบวนการ

ในสมการข้างต้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้เป็นดังสมการที่ 2

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,j,k}^{\text{new}} - T_{i,j,k}^{\text{old}}}{\Delta t} \quad (2)$$

เมื่อ  $\Delta t$  = เวลาที่เปลี่ยนแปลง

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2\Delta x} \left( \text{or } -\frac{T_{i-1} - T_i}{\Delta x} \text{ or } = \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{1}{\Delta x} \left( \lambda_{i+\frac{1}{2}} \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x} + \lambda_{i-\frac{1}{2}} \frac{T_{i-1} - T_i}{\Delta x} \right) \quad (4)$$

[ รูปสัญลักษณ์ได้ในภาพที่ 2 ]

จากสมการข้างต้นนั้นเมื่อนำมารวมเป็นชุดสมการโดยการเชื่อมต่อกันของในแต่ละส่วน ดังแสดงในภาพที่ 1 ในการหาคำตอบของชุดสมการสามารถที่จะหาได้โดยการหาแบบทางตรง (explicit) แบบทางอ้อม (implicit) และวิธีการ ADI

### การกำหนดโดยวิธีการปริมาตรจำกัด (Control Volume Formulation)

ในการขยายวิธีการสมการเชิงอนุพันธ์ที่มีขอบเขต (SFD – techniques) โดยใช้วิธีการปริมาตรจำกัด (control volume formulation) นั้นสามารถสร้างโครงข่ายดังภาพที่ 1 และ 2 โดยใช้ค่าการนำความร้อน (thermal conductance) ระหว่างจุดกลาง ( $i, j, k$ ) และจุดที่อยู่ข้างเคียง ( $i+1$ ) ดังแสดงในสมการที่ 5

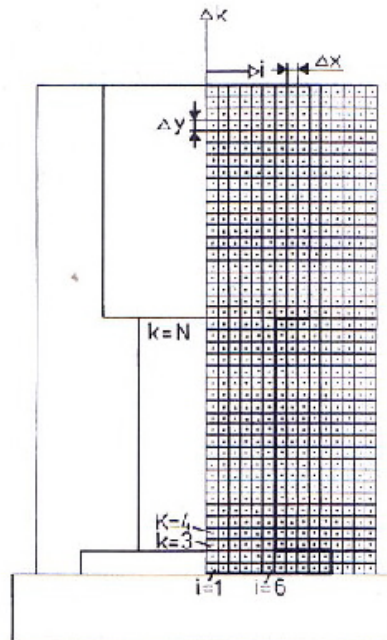
$$K_{(i,j,k) \rightarrow (i+1)} = \lambda \frac{\Delta z \cdot \Delta y}{\Delta x} \quad (5)$$

โดยที่  $\Delta z$  = ความหนาของเอลิเมนต์

ในการใช้สัญลักษณ์ที่จุดกึ่งกลาง (i,j,k) สามารถเปลี่ยนแปลงได้เช่นให้จุด i เป็นจุดกึ่งกลางจุดที่อยู่ใกล้เคียง (i+1) (i-1) (j+1) (j-1) (k+1) และ (k-1) หรือถ้าให้ j เป็นจุดศูนย์กลางก็สามารถทำได้โดยสมการทั่วไปของการนำความร้อนดังสมการที่ 6

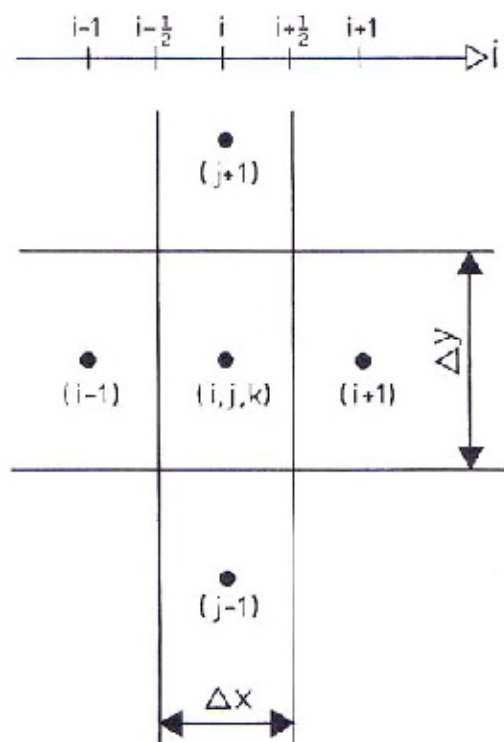
$$K_{i \rightarrow j} = \lambda \frac{A_j}{L_{ij}} \quad (6)$$

โดยที่  $L_{ij}$  = ระยะทางระหว่างจุด i และ j  
 $A_j$  = พื้นที่ผิวที่ตั้งฉากกับ  $L_{ij}$



**ภาพที่ 1** การสร้างเอลิเมนต์

ที่มา: Bonollo and Odorizzi (2004)



**ภาพที่ 2** สัญลักษณ์ของเอลิเมนต์

ที่มา: Bonollo and Odorizzi (2004)

สำหรับกรณีของค่าการนำความร้อนของเอลิเมนต์  $i$  และ  $j$  มีความแตกต่างกันของวัสดุ หรือความแตกต่างกันของอุณหภูมิของ 2 หน่วยเอลิเมนต์สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 7

$$K_{i \rightarrow j} = \frac{A_j}{\frac{L_{ij}}{2 \cdot \lambda_i} + \frac{L_{ij}}{2 \cdot \lambda_j} + R_{ij}} \quad (7)$$

ในสมการที่ 7 ค่าความต้านทานความร้อน (thermal resistance)  $R_{ij}$  ระหว่าง 2 เอลิเมนต์  $i$  และ  $j$  โดยที่ค่าของความต้านทานความร้อนระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์นั้นจะมีความสำคัญมากในตัวของกระบวนการ

ค่าความจุความร้อน (thermal capacitance) ของจุดศูนย์กลางของเอลิเมนต์ “i” กำหนดได้ดังสมการที่ 8

$$C_i = V_i (\rho C_p)_i \quad (8)$$

โดยที่  $V_i$  = ปริมาตร =  $\Delta x_i \cdot \Delta y_j \cdot \Delta z_k$

กำหนดให้ความเร็ว  $u$ ,  $v$  และ  $w$  เท่ากับศูนย์จะได้การสมดุลของการถ่ายเทความร้อนในจุดกลางของเอลิเมนต์ i ดังสมการที่ 9

$$C_i \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right)_i = \sum_{j=1}^n K_{i \rightarrow j} (T_j - T_i) \quad (9)$$

โดยที่  $n = 2$  สำหรับ 1-D โมเดล 1 มิติ  
 $n = 4$  สำหรับ 2-D โมเดล 2 มิติ  
 $n = 6$  สำหรับ 3-D โมเดล 3 มิติ

สำหรับในสมการอนุพันธ์ที่หนึ่ง นั้นจะคล้ายกับสมการที่ 9  
 ในสมการที่ 5 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกส์ได้ดังสมการที่ 10

$$[C] \frac{\partial T}{\partial t} = [K] \cdot \{T\} \quad (10)$$

โดยที่  $[C]$  แสดงถึงเมตริกส์  
 $\{T\}$  แสดงถึงเวกเตอร์  
 $[C]$  แสดงถึงค่าความจุความร้อน  $C_i$  ในรูปของเมตริกส์  
 $[K]$  แสดงถึงค่าการนำความร้อน  $K_{i \rightarrow j}$

### วิธีการหาคำตอบโดยตรง (Explicit Solution Technique)

เมื่อใช้การหาคำตอบโดยตรงสามารถที่จะเขียนสมการที่ 10 ได้ดังสมการที่ 11

$$[C] \left\{ \frac{T^{\text{new}} - T^{\text{old}}}{\Delta t} \right\} = [K] \cdot \{T^{\text{old}}\} \quad (11)$$

เนื่องจาก  $[C]$  เป็นเมตริกซ์แยงมุม

$$[C] = \begin{bmatrix} C_1 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & C_2 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & C_n \end{bmatrix}$$

ค่า  $C_1, C_2, C_3, C_4, \dots, C_n$  หาค่าได้ดังสมการที่ 4 และสามารถเขียนเมตริกซ์ผกผันได้ดังนี้

$$[C]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \frac{1}{C_2} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{1}{C_n} \end{bmatrix}$$

สามารถเขียนสมการที่ 11 ใหม่ได้ดังสมการที่ 12

$$\{T^{\text{new}}\} = \{T^{\text{old}}\} + \Delta t [C]^{-1} [K] \{T^{\text{old}}\} \quad (12)$$

ในการใช้ระบบสมการโดยการหาคำตอบโดยตรงสามารถหาค่าอุณหภูมิใหม่ได้โดยตรง และจะสามารถทำได้เร็วในการคำนวณซึ่งจะต้องรู้ค่าอุณหภูมิเดิมและระยะเวลา

โดยกระบวนการต้องเป็นไปตามนี้

1. ช่วงเวลา  $\Delta t$  ถูกกำหนดโดยค่าสูงสุด  $\Delta t^*$

$$\Delta t^* = P \frac{\Delta S^2}{\alpha} \quad (13)$$

โดยที่  $\Delta S$  = ค่าเฉลี่ยของระยะทางจากจุดศูนย์กลางถึงจุดใกล้เคียง  
 $\alpha$  = ค่าการแพร่กระจายของความร้อน (thermal diffusivity [ $\text{m}^2/\text{s}$ ])  
 $1/2$  สำหรับหนึ่งมิติ  
 และ  $P \cong 1/4$  สำหรับสองมิติ  
 $1/6$  สำหรับสามมิติ

2. จะให้ความแม่นยำในการคำนวณสูงสำหรับกรณีปกติสำหรับการสร้างเอลิเมนต์แบบทั่วไปและควรหลีกเลี่ยงระยะการเปลี่ยนแปลงระหว่างจุดที่มาก

### วิธีการหาคำตอบโดยทางอ้อม (Implicit Solution Technique)

สมการที่จะเขียนสมการที่ 10ให้อยู่ในรูปของ Implicit ได้ดังสมการที่ 14

$$\left( \frac{[C]}{\Delta t} - [K] \right) \cdot \{T^{\text{new}}\} - \left( \frac{[C]}{\Delta t} \right) \cdot \{T^{\text{old}}\} \quad (14)$$

โดยที่  $[K]$  คือเมตริกซ์ stiffness, ซึ่งเป็นลักษณะของระบบสมการแบบ Implicit.

สำหรับปัญหาหนึ่งมิติ,  $[K]$  จะเป็นเส้นทแยงมุมสามหลัก (โดยค่าที่อยู่นอกเส้นทแยงมุมจะมีค่าเป็นศูนย์ทั้งหมด) ซึ่งในระบบจะสามารถหาค่าได้ง่ายโดยใช้วิธีของเกาส์ (gaussian elimination)

**กระบวนการในการหาคำตอบโดยตรงจากวิธีการทางอ้อม (Alternating Direction Implicit Solution Method (ADI-Method))**

ในการกำหนดรูปแบบของเอลิเมนต์โดยทั่วไป(สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า ลูกบาศก์ เป็นต้น) ซึ่งจะต้องพิจารณาถึงความเร็วในการคำนวณ

สำหรับในระบบสองมิติ (หรือในพิกัดทรงกระบอก (cylindrical co-ordinates)) ซึ่งจากสมการที่ 10 สามารถเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ 15

$$[C] \left\{ \frac{T^{new} - T^{old}}{\Delta t} \right\} = [K]_x \{T\}_x + [K]_y \{T\}_y \quad (15)$$

โดยที่  $[K]_x$  และ  $[K]_y$  ในเมตริกซ์ทั้งคู่จะเป็นเมตริกซ์ทแยงมุมแบบสามคูณสามโดยมาตรฐานของ ADI สามารถที่จะเขียนได้ดังสมการที่ 16 และ 17

$$\left( \frac{[C]}{\Delta t} - [K]_x \right) \{T^{new}\}_x = \left( \frac{[C]}{\Delta t} - [K]_y \right) \{T^{old}\}_y \quad (16)$$

$$\left( \frac{[C]}{\Delta t} - [K]_y \right) \{T^{new}\}_y = \left( \frac{[C]}{\Delta t} - [K]_x \right) \{T^{old}\}_x \quad (17)$$

ในทั้งสองสมการข้างบนนี้เราสามารถที่จะหาค่าโดยใช้วิธีของเกาส์ได้ในสมการที่ 16 ใช้สำหรับทุกส่วนย่อยของทิศทางในแนวแกน y และในสมการที่ 17 ใช้สำหรับในแนวแกน x ในกรณีเพิ่มขนาดที่ใหญ่เข้าไปนั้นจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่ค่อยแม่นยำ

สำหรับในระบบสามมิตินั้นในการคำนวณจะใช้มาตรฐานวิธี ADI (ADI-techniques) จะแสดงได้ดังสมการที่ 18 19 20 และ 21



$$[C] \left\{ \frac{\Delta T_x}{\Delta t} \right\} = [K]_x \{T^{new}\}_x \quad \text{สำหรับทุกหน่วยย่อยในแนวแกน y และ z} \quad (18)$$

$$[C] \left\{ \frac{\Delta T_y}{\Delta t} \right\} = [K]_y \{T^{new}\}_y \quad \text{สำหรับทุกหน่วยย่อยในแนวแกน x และ z} \quad (19)$$

$$[C] \left\{ \frac{\Delta T_z}{\Delta t} \right\} = [K]_z \{T^{new}\}_z \quad \text{สำหรับทุกหน่วยย่อยในแนวแกน x และ y} \quad (20)$$

$$[C] = \{T^{old}\} + ([\Delta T_x] + [\Delta T_y] + [\Delta T_z]) \quad (21)$$

### วิธีการของอนุกรมเทเลอร์ (Taylor Series Approach Method)

สามารถทำได้โดยตรงจากการใช้สมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation) จะได้การประมาณค่าของสมการอนุพันธ์จำกัด (finite difference) จากอนุพันธ์ย่อยอนุกรมเทเลอร์ ในสองและสามมิติซึ่งในสองมิติจะแสดงดังสมการที่ 22

$$T = T_0 + h \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{k^2}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + hk \frac{\partial^2 T}{\partial x^2 \partial y} + o(\Delta^3) \quad (22)$$

โดยที่  $h = x - x_0$ ,  $k = y - y_0$

$$\Delta = \sqrt{h^2 + k^2}$$

$(x_0, y_0)$  = ตำแหน่งของจุดศูนย์กลาง

$(x, y)$  = ตำแหน่งของจุดที่อยู่ถัดจากจุดศูนย์กลางโดยรอบๆ

ใช้สมการที่ 22 สำหรับห้ำจุดที่อยู่รอบ ๆ จุดศูนย์กลาง  $(x_0, y_0)$  เราจะได้ระบบเมตริกส์  
ดังสมการที่ 23

$$\begin{bmatrix} h_1 & k_1 & \frac{h_1^2}{2} & \frac{k_1^2}{2} & h_1 k_1 \\ h_2 & k_2 & \frac{h_2^2}{2} & \frac{k_2^2}{2} & h_2 k_2 \\ h_3 & k_3 & \frac{h_3^2}{2} & \frac{k_3^2}{2} & h_3 k_3 \\ h_4 & k_4 & \frac{h_4^2}{2} & \frac{k_4^2}{2} & h_4 k_4 \\ h_5 & k_5 & \frac{h_5^2}{2} & \frac{k_5^2}{2} & h_5 k_5 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} T_1 - T_0 \\ T_2 - T_0 \\ T_3 - T_0 \\ T_4 - T_0 \\ T_5 - T_0 \end{Bmatrix} \quad (23)$$

### GFD - Volume Element Methods

ในปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติสามารรถที่จะกำหนดค่าตัวแปรของการนำ  
ความร้อน (thermal conductance) ได้ดังสมการที่ 24

$$K_{1 \rightarrow 2} = \lambda \frac{L_{1,2}}{L_{p,0}} \quad [\text{W/mK}] \quad (24)$$

ในสมการจะสัมพันธ์กับรูปสามเหลี่ยมดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งจะแสดงถึงค่าการนำ  
ความร้อนระหว่างสองจุดคือจุดที่ 1 และ 2 ซึ่งค่า

$L_{1,2}$  คือระยะห่างระหว่างจุด 1 และ 2

$L_{p,0}$  คือระยะห่างระหว่างจุด p และ 0

จุด p คือจุดกึ่งกลางของเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างจุดที่ 1 และ 2 และเส้นที่  $L_{p,0}$  ที่ออกจาก  
จุด p นั้นจะต้องตั้งฉากกับจุด 0

$\lambda$  = ค่าการนำความร้อนของวัสดุรูปสามเหลี่ยม

สามารถนำมาแปลงรูปให้อยู่ในดำนรูปทรงดังสมการที่ 25

$$K_{1 \rightarrow 2} = \lambda \frac{\cot(\beta_2)}{2} \quad (25)$$

โดยที่ค่า  $\cot(\beta_2)$  = โคแทนเจนต์ของมุมสามเหลี่ยม  $\beta_2$

ชุดของสามเหลี่ยมที่มากขึ้นดังภาพที่ 7 สามารถเขียน  $K_{1 \rightarrow 2}$  ได้ดังสมการที่ 26

$$K_{1 \rightarrow 2} = \lambda \frac{L_{1,2}}{L_{A,B}} = \lambda \left( \frac{\cot \beta_1}{2} + \frac{\cot \beta_2}{2} \right) \quad (26)$$

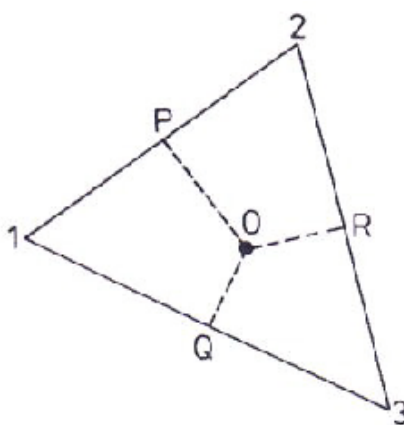
โดยรวมค่าการนำความร้อนในสองชุดสามเหลี่ยมที่อยู่ติดกัน

ค่าความจุความร้อน (thermal capacitance) ในจุดที่ 1 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 27

$$C_1 = V_1 (\rho C_p)_1 \quad (27)$$

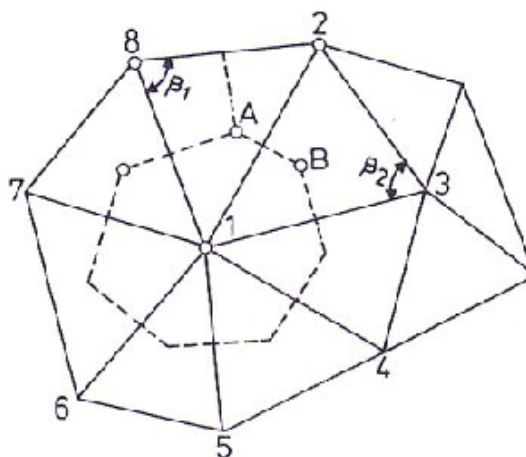
โดยที่  $V_1$  คือปริมาตร (หรือพื้นที่) ดังแสดงในภาพที่ 4

$\rho C_p$  คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุรูปสามเหลี่ยม



**ภาพที่ 3** การแบ่งรูปสามเหลี่ยมในการคำนวณค่าการนำความร้อนและค่าความจุความร้อน

ที่มา: Bonollo and Odorizzi (2004)



**ภาพที่ 4** ระบบที่ใหญ่ในการแบ่งสามเหลี่ยมที่ไม่เท่ากันของเอลิเมนต์

ที่มา: Bonollo and Odorizzi (2004)

ปริมาตรของชิ้นงานจะมีความสัมพันธ์กับการถ่ายเทความร้อนระหว่างจุด 1 และจุด 2 โดยพื้นที่สามเหลี่ยม 1AB จะได้สมการที่ 28

$$V_{1,2} = \frac{L_{1,2} (\cot \beta_1 + \cot \beta_2)}{8} \quad (28)$$

ผลรวมของปริมาตร

$$V_1 = \sum_{j=2}^n V_{1,j} \quad (29)$$

โดยที่ “j” คือดัชนีของจุดที่ติดกับจุดที่ 1 (2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ดังแสดงในภาพที่ 4) สามารถพิสูจน์สมการข้างบนนี้โดยการสมดุลของความร้อนโดยจะทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของจุดและใช้ค่าการนำความร้อนและค่าความจุความร้อนดังแสดงในสมการที่ 30

$$C_i \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right)_i = \sum_{j=1}^n K_{i,j} (T_j - T_i) \quad (30)$$

โดยที่ “j” คือจุดที่ติดกันของจุดศูนย์กลาง “i”

**วิธีการเชิงตัวเลขและการนำไปใช้ในปรากฏการณ์การฉีด (Numerical Methods Application to injection Rubber Phenomena; Fluid – Dynamics, Thermal Fields)**

**พื้นฐานสมการอนุรักษ์ที่แสดงปรากฏการณ์ของการไหลของความร้อนและการไหล (Basic conservation equations describing thermal and fluid flow phenomena)**

กฎของการอนุรักษ์ทั่วไปของ มวล โมเมนตัม และ พลังงาน (mass, momentum and energy) จะถูกกำหนดโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์และการบ่มตัวของเนื้อยางหลังการฉีดในบริบทของการอนุรักษ์นั้นจะคงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่มากระทบ ในกฎของการอนุรักษ์ที่สำคัญในการพิจารณาเมื่ออยู่สามกฎดังที่กล่าวมา

กฎของการอนุรักษ์มวลจะนำมาใช้กับปัญหาของการไหลของของไหลโดยผลลัพธ์ในสมการของความต่อเนื่อง (continuity equation) การอนุรักษ์โมเมนตัมแสดงโดยกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน สามารถนำมาใช้กับปัญหาการไหลของของไหลโดยสมการโมเมนตัม (momentum equation) การนำกฎการอนุรักษ์พลังงานมาใช้จะแสดงโดยกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์จะก่อให้เกิดสมการพลังงาน วิธีการนำกฎของการอนุรักษ์ไปใช้ในปริมาตรที่เล็ก (ปริมาตรจำกัด) ซึ่งจะได้จากสมการอนุพันธ์ (differential equations)

สำหรับการอนุรักษ์มวลในสามมิตินั้นสมการในตอนเริ่มต้นจะทำการสมดุลกันของเอลิเมนต์ของไหลได้ดังนี้

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวล      =      อัตราสุทธิในการไหลของมวล  
ในเอลิเมนต์ของไหล                      ที่เข้าไปในเอลิเมนต์ของไหล

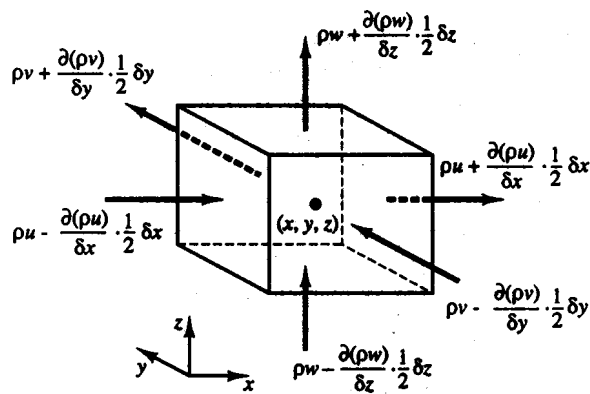
อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในเอลิเมนต์ของไหลแสดงได้ดังสมการที่ 31

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \quad (31)$$

อัตราการไหลที่ผ่านผิวของเอลิเมนต์โดยได้จากภาพที่ 5 จะได้อัตราสุทธิในการไหลของมวลที่เข้าไปในเอลิเมนต์ผ่านขอบเขตได้ดังสมการที่ 32

$$\begin{aligned}
& \left( \rho_u - \frac{\partial(\rho_u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z - \left( \rho_u + \frac{\partial(\rho_u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z \\
& + \left( \rho_v - \frac{\partial(\rho_v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z - \left( \rho_v + \frac{\partial(\rho_v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z \\
& + \left( \rho_w - \frac{\partial(\rho_w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left( \rho_w + \frac{\partial(\rho_w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y
\end{aligned} \tag{32}$$

การไหลในทิศทางที่ไหลเข้าเอลิเมนต์จะทำให้มวลเพิ่มขึ้นจะมีเครื่องหมายเป็นบวก ส่วนการไหลที่ไหลออกจากเอลิเมนต์จะให้เครื่องหมายเป็นลบ



**ภาพที่ 5** แสดงถึงการไหลเข้าและออกของมวลที่กระทำกับเอลิเมนต์ของไหล

ที่มา: Bonollo and Odorizzi (2004)

จากสมการที่ 31 นั้นจะเท่ากับสมการที่ 32 ในรูปของผลเฉลยของการสมดุลของมวล โดยย้ายสมการมาอยู่ด้านซ้ายแล้วหารด้วยปริมาตรของเอลิเมนต์  $\delta x \delta y \delta z$  จะได้สมการที่ 33

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{33}$$

เขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังสมการที่ 34

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (34)$$

ในสมการที่ 34 เรียกว่าการอนุรักษ์มวลในสามมิติ (three-dimensional mass conservation) หรือสมการความต่อเนื่อง (continuity equation) ในเทอมซ้ายมือสุดจะเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของความหนาแน่น (density) (มวลต่อหน่วยปริมาตร) และในเทอมที่สองจะแสดงถึงการไหลสุทธิของมวลที่ออกจากเอลิเมนต์ที่ผ่านขอบเขตและเรียกว่าเทอมของการพา (convection term)

สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (incompressible fluid) เช่นของเหลวค่าความหนาแน่น  $\rho$  นั้นจะคงที่สมการที่ 34 เขียนใหม่ได้ดังสมการ 35 และ 36

$$\text{div} \mathbf{u} = 0 \quad (35)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (36)$$

สมการโมเมนตัมโดยการใช้กฎข้อที่สองของนิวตันในการเคลื่อนที่โดยการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคของไหลจะเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำกับอนุภาค

อัตราที่เพิ่มขึ้นของโมเมนตัมของอนุภาคของไหล = ผลรวมของแรงที่กระทำกับอนุภาค

ในอัตราการเพิ่มขึ้นของ  $x$ ,  $y$  และ  $z$  โมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรของอนุภาคของไหลให้เป็นดังสมการ 37

$$\rho \frac{Du}{Dt} , \quad \rho \frac{Dv}{Dt} , \quad \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (37)$$

ซึ่งจะจำแนกแรงที่กระทำกับอนุภาคของไหลออกเป็นสองชนิด ได้แก่

1. แรงที่กระทำกับผิว (surface force)

- แรงจากคามดัน (pressure force)
- แรงเนื่องจากความหนืด (viscous force)
- แรงดึงระหว่างผิว (surface force)

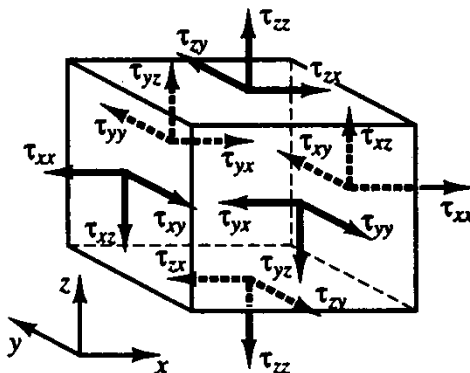
2. แรงที่กระทำกับปริมาตร (body force)

- แรงโน้มถ่วง (gravity force)
- แรงหนีจากศูนย์กลาง (centrifugal force)
- แรงแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic force)

โดยปกติอนุภาคจะถูกกระทำจากแรงที่บริเวณผิวโดยจะแยกแยะแรงแยกแยะของสมการโมเมนตัม และจะเพิ่มผลกระทบจากแรงที่กระทำกับปริมาตรอีกแรงแบบหนึ่ง

ในสภาวะของความเค้นที่กระทำกับอนุภาคของไหลจะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของความดันและองค์ประกอบของความเค้นที่เกิดขึ้นจากความหนืดดังแสดงในภาพที่ 6 ความดันจะเป็นความเค้นในแนวแกนโดยแสดงเป็นตัว  $p$  ความเค้นเนื่องจากความหนืดให้เป็น  $\tau$  และจะกำหนดทิศทางของความเค้นเนื่องจากความหนืดเป็น  $\tau_{ij}$  โดยที่  $i$  แสดงแนวแกนที่เกิดความเค้นในแนวแกนหลักและ  $j$  จะเป็นทิศทางที่เกิดในแนวแกนต่าง ๆ

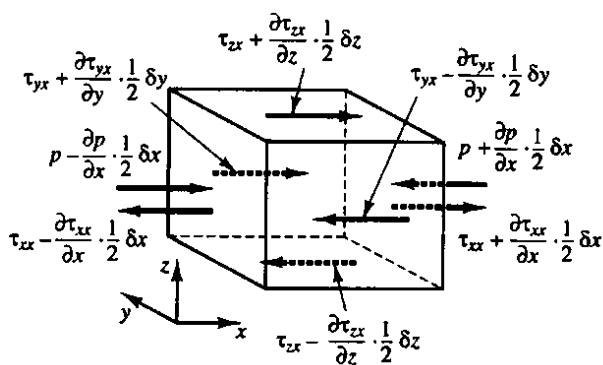




**ภาพที่ 6** แสดงองค์ประกอบของความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของอนุภาคของไหล

ที่มา: Bonollo and Odorizzi (2004)

พิจารณาในแนวแกน x โดยแรงที่เกิดจากความดันและความเค้นประกอบ ซึ่งได้แก่  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xy}$  และ  $\tau_{zx}$  ดังแสดงในภาพที่ 2.7 ขนาดของผลจากแรงความเค้นที่ผิวโดยได้จากความเค้นและพื้นที่ที่กระทำ โดยให้แรงที่กระทำในทิศทางแกนบวกจะให้เครื่องหมายเป็นบวกและทิศทางที่สวนทางให้เป็นลบ ผลสุทธิของแรงในทิศทาง x โดยการรวมองค์ประกอบของแรงที่กระทำในแต่ละทิศทางของอนุภาคของไหล



**ภาพที่ 7** แสดงถึงองค์ประกอบของความเค้นในแนวแกน x

ที่มา: Bonollo and Odorizzi (2004)

ในการจับคู่กันที่ผิวด้านซ้ายกับขวาจะได้สมการที่ 38

$$\left[ \left( p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left( \tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \quad (38)$$

$$+ \left[ - \left( p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) + \left( \tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z = \left( - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) \delta x \delta y \delta z$$

แรงที่กระทำในทิศทาง x ในแนวผิวด้านบนกับด้านล่างจะได้สมการที่ 39

$$- \left( \tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z + \left( \tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \quad (39)$$

แรงที่กระทำในทิศทาง x ในแนวผิวด้านหน้าและด้านหลังจะได้สมการที่ 40

$$- \left( \tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y + \left( \tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \quad (40)$$

เมื่อรวมแรงต่อหน่วยปริมาตรเข้าด้วยกันทั้งสามสมการ 38, 39 และ 40 และหารด้วยปริมาตร  $\delta x \delta y \delta z$  จะได้สมการที่ 41

$$\frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (41)$$

และเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของแรงที่กระทำกับปริมาตรผลกระทบทั้งหมดจะให้  
เป็น  $S_{Mx}$  ในทิศทางของแกน x โมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรต่อหน่วยเวลา

ในองค์ประกอบของแกน x ของสมการโมเมนตัมโดยจะกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมในแนวแกน x ของอนุภาคของไหลสมการที่ 37 จะเท่ากับผลรวมของแรงในทิศทางแกน x ที่กระทำกับเอลิเมนต์โดยตรงของความเค้นที่ผิวคือสมการที่ 40 บวกกับอัตราในการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัมในแกน x ของแรงที่กระทำกับปริมาตรจะได้สมการที่ 42

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (42)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถจะสร้างในทิศทางแนวแกน y โดยจะได้สมการโมเมนตัมดังสมการที่ 43

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (43)$$

แนวแกน z สมการโมเมนตัมจะได้ดังสมการ 44

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (44)$$

ในกรณีของแรงที่กระทำกับปริมาตรที่เป็นแรงโน้มถ่วงเพียงอย่างเดียวจะได้ว่า

$$S_{Mx} = 0, S_{My} = 0 \text{ และ } S_{Mz} = -\rho g$$

และสามารถที่จะเขียนรวมกันได้ในทุกแนวแกนได้ดังสมการ 45

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_1}(\rho u_1 u_i) + \frac{\partial}{\partial x_2}(\rho u_2 u_i) + \frac{\partial}{\partial x_3}(\rho u_3 u_i) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + (\rho g) + \frac{\partial \tau_{1i}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{2i}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{3i}}{\partial x_3} + X_i \end{aligned} \quad (45)$$

ในสมการที่ 45 แรงโน้มถ่วง ( $g$ ) แสดงในทิศทาง  $i$  ในแต่ละแนวแกน ความเค้นสถิต ( $p$ ) องค์ประกอบของความเค้นเนื่องจากความหนืดในรูปของเทนเซอร์  $\tau_{ji}$ ,  $X_i$  เป็นผลรวมของแรงที่เพิ่มขึ้นมาเช่นแรงจากแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นต้นในแนวแกน  $i$  ซึ่งในความเค้นที่เกิดจากความหนืดจะเขียนในรูปของความเร็ว โดยปกติจะสมมติให้การจำลองการไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์จะเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน (newtonian fluid) ทำการเพิ่มความสัมพันธ์แบบนิวโตเนียนเข้าไป ในสมการที่ 49 จะได้ทิศทางของโมเมนตัมตามทิศทาง  $i$  ดังสมการที่ 46

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho g_i) + \frac{\partial}{\partial x_1}(\rho u_1 u_i) + \frac{\partial}{\partial x_2}(\rho u_2 u_i) + \frac{\partial}{\partial x_3}(\rho u_3 u_i) = & (46) \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + (\rho g_i) + \left[ \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_3} \right) \right] \\ + S_i^\mu + S_i^d + X_i \end{aligned}$$

ในสมการที่ 46 ด้านซ้ายจะอยู่ในเทอมแรกจะอยู่ในรูปของการเก็บสะสมของโมเมนตัม และในเทอมของการพาความร้อนส่วนทางขวามือจะอยู่ในรูปของความดัน, แรงโน้มถ่วง, การแพร่ ( $S_i^\mu$ ) และในเทอมของการเคลื่อนที่โดยความเร็วซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบไม่อิสระ ( $S_i^d$ ) และแรงพิเศษ ( $X_i$ ) โดยที่เทอมในการแพร่หลักเขียนในรูปของวิธีการแบบลาปลาซโดยความเร็วคงที่สามารถที่จะเขียนได้ในสมการที่ 47

$$S_i^\mu = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_3} \right) \quad (47)$$

สำหรับปัญหาในการฉีด ในเทอมของการแพร่ ( $S_i^\mu$ ) จะต้องนำเอาค่าความหนืดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิมาพิจารณาด้วย ในเทอมของความเร็วที่เคลื่อนที่ไม่อิสระสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 48

$$S_i^d = \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) \right] \quad (48)$$

ในสมการอนุรักษ์พลังงานจะเป็นการสมดุลกันของผลรวมพลังงานทั้งหมดในปริมาตรจำกัด (control volume) ซึ่งจะมาจากกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยที่

อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของอนุภาคของไหล = อัตราสุทธิของความร้อนรวมของอนุภาคของไหลบวกอัตราสุทธิของงานที่เกิดจากอนุภาคของไหล

ในอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของอนุภาคของไหลต่อหน่วยปริมาตรจะได้ดังสมการที่ 49

$$\rho \frac{DE}{Dt} \quad (49)$$

งานที่เกิดจากแรงที่ผิว (work done by surface force) ในอัตราของงานที่กระทำกับอนุภาคของไหลในเอลิเมนต์โดยแรงที่กระทำที่ผิวจะเกิดจากผลของความเร็วมวลและแรงในทิศทางของแรง ตัวอย่างของแรงในสมการ 38, 39 และ 40 กระทำในทิศทาง x จะได้งานที่เกิดขึ้นจากแรงได้ดังสมการ 50

$$\left[ \frac{\partial [u(-p + \tau_{xx})]}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (50)$$

ในทำนองเดียวกันกับทิศทาง y และ z จะได้สมการที่ 51 และ 52

$$\left[ \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial [v(-p + \tau_{yy})]}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (51)$$

$$\left[ \frac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial [w(-p + \tau_{zz})]}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (52)$$

ผลรวมสุทธิของงานต่อปริมาตรที่เกิดจากอนุภาคของไหลทุกแรงที่กระทำกับผิวโดยทำการรวมสมการที่ 50, 51 และ 52 และหารด้วยปริมาตร และในเทอมของความดันสามารถเขียนอยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังสมการที่ 53

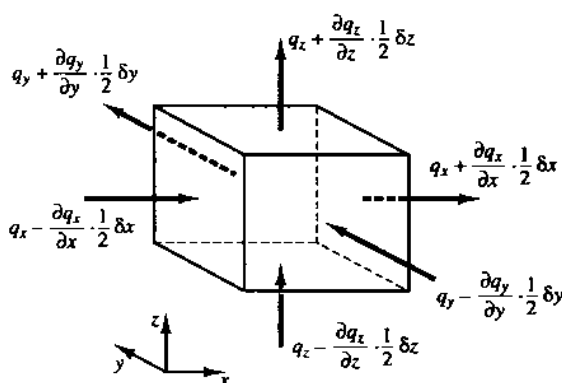
$$-\frac{\partial(u_p)}{\partial x} - \frac{\partial(v_p)}{\partial y} - \frac{\partial(w_p)}{\partial z} = -\text{div}(p\mathbf{u}) \quad (53)$$

ผลรวมของงานที่กระทำกับอนุภาคของไหลโดยความเค้นที่ผิวสามารถเขียนได้ในสมการที่ 54

$$\begin{aligned} [-\text{div}(p\mathbf{u})] + \left[ \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yy})}{\partial y} \right. \\ \left. + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (54)$$

### การไหลของพลังงานที่เกิดจากการนำความร้อน (energy flux due to heat conduction)

การไหลของความร้อนโดยเวกเตอร์  $q$  ในองค์ประกอบสามส่วน  $q_x$ ,  $q_y$  และ  $q_z$  ดังแสดงในภาพที่ 8



**ภาพที่ 8** จะแสดงเวกเตอร์การไหลของความร้อน

ที่มา: Bonollo and Odorizzi (2004)

อัตราการถ่ายเทความร้อนของอนุภาคของไหลโดยการไหลของของไหลในแนวแกน  $x$  โดยความแตกต่างกันระหว่างอัตราของความเร็วที่ไหลผ่านเข้าทางด้านซ้ายและอัตราของความร้อนที่ผ่านออกทางด้านขวาสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 55

$$\left[ \left( q_x - \frac{\partial q_x}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left( q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z = -\frac{\partial q_x}{\partial x} \delta x \delta y \delta z \quad (55)$$

ในทำนองเดียวกันในทิศทางของ  $y$  และ  $z$  จะได้สมการที่ 56 และ 57

$$-\frac{\partial q_y}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \quad (56)$$

$$-\frac{\partial q_z}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \quad (57)$$

ผลรวมของอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นในอนุภาคของไหลต่อหน่วยปริมาตรโดยการไหลของความร้อนผ่านขอบเขตโดยรวมสมการที่ 55, 56 และ 57 จะได้สมการที่ 58

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} = -\text{div} q \quad (58)$$

กฎของฟูเรียร์ของการนำความร้อนเกี่ยวกับการไหลของความร้อนที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน เขียนได้ดังสมการที่ 59

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (59)$$

เขียนให้อยู่ในรูปเวกเตอร์จะได้สมการที่ 60

$$q = -k \text{grad} T \quad (60)$$

รวมสมการที่ 58 และสมการที่ 60 จะได้อัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนของอนุภาค โดยการนำความร้อนผ่านขอบเขตจะได้สมการที่ 61

$$-\text{div} \mathbf{q} = \text{div}(\mathbf{k} \text{grad} T) \quad (61)$$

### สมการพลังงาน (Energy equation)

พลังงานของของไหลจะเป็นผลรวมของพลังงานภายใน (internal energy)  $i$ , พลังงานการเคลื่อนที่  $\frac{1}{2}(u^2+v^2+w^2)$  และพลังงานศักย์ แต่ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์นั้นจะมีค่าน้อยและพลังงานที่จ่ายให้กับอนุภาคต่อหน่วยปริมาตรต่อหน่วยเวลา  $S_E$  การอนุรักษ์พลังงานของอนุภาคของไหลโดยการสมดุลของอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอนุภาคของไหลกับผลรวมของอัตราสุทธิของงานที่กระทำกับอนุภาคของไหลและอัตราสุทธิของความร้อนที่เพิ่มในของไหลและอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานโดยได้จากแหล่งจ่าย โดยจะเรียกสมการนี้ว่า สมการพลังงาน (energy equation) ดังแสดงในสมการที่ 62

$$\begin{aligned} \rho \frac{DE}{Dt} = & -\text{div}(\mathbf{p}\mathbf{u}) + \left[ \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} \right. \\ & \left. + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] + \text{div}(\mathbf{k} \text{grad} T) + S_E \end{aligned} \quad (62)$$

ในสมการที่ 62 ค่า  $E = i + \frac{1}{2}(u^2+v^2+w^2)$

สามารถที่จะแยกการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของการเคลื่อนที่, พลังงานภายใน  $i$  หรือ อุณหภูมิ  $T$  โดยในสมการพลังงานของการเคลื่อนที่ที่สามารถรวมสมการ 42, 43 และ 44 ซึ่งจะได้สมการอนุรักษ์สำหรับพลังงานจลน์ดังสมการที่ 63

$$\begin{aligned} \rho \frac{D \left[ \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) \right]}{Dt} = & -\mathbf{u} \cdot \text{grad} p + u \left[ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right. \\ & \left. + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \right] + v \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right] + w \left[ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] + \mathbf{u} \cdot \mathbf{S}_M \end{aligned} \quad (63)$$



และเขียนในรูปของสมการพลังงานภายในได้ดังสมการที่ 64

$$\rho \frac{D \left[ \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) \right]}{Dt} = -u \cdot \text{grad} p + u \left[ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial (u \tau_{zx})}{\partial z} \right] + v \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right] + w \left[ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] + u \cdot S_M \quad (64)$$

$$\text{โดยที่ } S_i = S_E - u S_M$$

ในกรณีของไหลที่อัดตัวไม่ได้  $i = cT$  โดยที่  $c$  คือค่าความจุความร้อนและ  $\text{div } u$  จะได้ค่าเท่ากับศูนย์ สามารถที่จะเขียนสมการ 64 ได้ใหม่เป็นสมการในรูปของอุณหภูมิดังสมการที่ 65

$$\rho \frac{D \left[ \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) \right]}{Dt} = -u \cdot \text{grad} p + u \left[ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial (u \tau_{zx})}{\partial z} \right] + v \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right] + w \left[ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] + u \cdot S_M \quad (65)$$

เมื่อนำสมการของการอนุรักษ์พลังงานในรูปของอุณหภูมิมายเขียนในรูปของการนิคสามารถที่จะเขียนได้ดังสมการที่ 66

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} (u_1 \rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_2} (u_2 \rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_3} (u_3 \rho c_p T) = \left[ \frac{\partial}{\partial x_1} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) \right] + \mu \Phi_T + L \frac{\partial f_s}{\partial t} + S_T \quad (66)$$

ค่า  $k$  คือค่าการนำความร้อนโดยที่เทอมที่สองของสมการขวามือเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานภายในของความหนืดที่ค่อยๆลดลง เพราะพลังงานกล (ความเสียดทาน) จะตรงข้ามกับพลังงานภายใน โดยจะมีค่าเป็นบวกเสมอและไม่สามารถย่อยกับได้ ความหนืดที่ลดลงจะอยู่ในรูปของ Viscosity times  $\phi_T$  ได้ดังสมการที่ 67

$$\Phi_T = \left[ \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)^2 \quad (67)$$

$$+ \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right)^2 - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right)^2$$

โดยปกติทั่วไปในแบบจำลองสำหรับการเคลื่อนที่ของผิวอิสระที่เข้าไปภายในแม่พิมพ์ จะใช้แบบจำลองของปริมาตรของไหล (volume-of-fluid (VOF) model) โดยแบบจำลอง VOF จะใช้ตัวแปร “f” เป็นตัวกำหนดอัตราส่วนของปริมาตรของไหลภายในเอลิเมนต์ต่อหน่วยปริมาตรของรูปทรงเอลิเมนต์ VOF ในรูปของ f สามารถเขียนได้จากสมการพลังงานจลน์ดังสมการที่ 68

$$\frac{Df}{Dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + u_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial f}{\partial x_2} + u_3 \frac{\partial f}{\partial x_3} = 0 \quad (68)$$

สมการ VOF ที่อยู่ในตัวแปรของ “f” จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 “f” จะมีค่าเท่ากับ 0.0 สำหรับเอลิเมนต์ที่ว่าง และมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับเอลิเมนต์ที่เต็ม ซึ่งช่วงระหว่าง 0.0 และ 1.0 นั้น เอลิเมนต์จะถูกจุดด้วยผิวอิสระ ตัวอย่างเช่นเมื่อ f เท่ากับ 0.6 ซึ่งจะมีปริมาตรที่ 60% และจะมีพื้นที่ว่างเหลืออีก 40%

สมการที่ครอบคลุมทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นสามารถเขียนได้ในสมการที่ 69

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S^\phi \quad (69)$$

เมื่อค่า  $\phi$  คือตัวแปรทั่วไป

ในสมการที่ 69 นั้นจะมีอยู่ด้วยกันสี่เทอมได้แก่

- อัตราการเพิ่มขึ้นของ  $\phi$  ในอนุภาคของไหล
- อัตราการไหลของ  $\phi$  ที่ออกจากอนุภาคของไหล
- อัตราการเพิ่มขึ้นของ  $\phi$  โดยการแพร่
- อัตราการเพิ่มขึ้นของ  $\phi$  โดยแหล่งจ่าย

สมการอนุพันธ์ของสมการความต่อเนื่อง, สมการโมเมนตัม, สมการพลังงาน และสมการ VOF แตกต่างกันที่ตัวแปร  $\phi$  ในแต่ละสมการ, สัมประสิทธิ์ของการแพร่  $\Gamma^\phi$  และของแหล่งจ่าย  $S^\phi$  ในตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกันของสมการอนุพันธ์

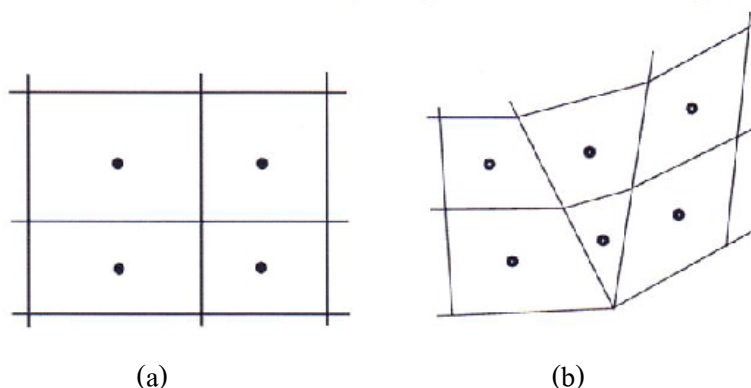
**ตารางที่ 1** แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกันในสมการการส่งถ่าย

| Equation name         | $\phi$           | $\Gamma^\phi$   | $S^\phi$                                                                            |
|-----------------------|------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Continuity            | 1                | 0               | 0                                                                                   |
| Momentum              | $u_i$            | $\mu$           | $-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + S_i^\mu + S_i^d + X_i$               |
| Energy                | T                | $\frac{k}{c_p}$ | $\frac{1}{c_p} \left( \mu \Phi_T + L \frac{\partial f_s}{\partial t} + S_T \right)$ |
| Volume fraction (VOF) | $\frac{f}{\rho}$ | 0               | 0                                                                                   |

ที่มา: Bonollo and Odorizzi (2004)

### วิธีการปริมาตรควบคุม (Control Volume Approach)

จากสมการอนุพันธ์ย่อยที่กล่าวมานั้นจะเป็นสมการในรูปแบบที่ต่อเนื่องในการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ นั้นจะสามารถที่จะหาได้โดยวิธีการปริมาตรจำกัดซึ่งจะทำการแปลงสมการในรูปแบบต่อเนื่องให้อยู่ในรูปแบบไม่ต่อเนื่องในรูปของสมการเชิงพีชคณิต (algebraic equation) ซึ่งวิธีการปริมาตรจำกัดจะแสดงวิธีในการทำการแบบไม่ต่อเนื่องค่าตัวแปรในระบบสมการควบคุมการไหลโดยใช้หลักการของปัญหาเป็นปริมาตรเล็กๆ โดยที่ตัวแปรที่จะทำการคำนวณจะถูกเก็บค่าอยู่ที่จุดศูนย์กลางของแต่ละปริมาตรจำกัดย่อย ๆ ที่ได้ทำการแบ่งไว้โดยค่าของปัจจัยที่มีผลกระทบต่าง ๆ จะถูกทำการเฉลี่ยค่าการคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ จะอาศัยหลักของความสมดุลของปัจจัยที่มีผลกระทบที่ถ่ายเทเข้าและออกจากปริมาตรจำกัดหนึ่งๆ ทำให้การคำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ เป็นไปตามหลักทางฟิสิกส์คือมีการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัมภายในปริมาตรจำกัดหนึ่ง ๆ ภาพที่ 9 แสดงตัวอย่างการสร้างกริดในภาพที่ 9a เป็นการสร้างกริดแบบพิกัด (cartesian grid) และ 9b เป็นการสร้างกริดแบบเข้ารูป (body-fitted grid)

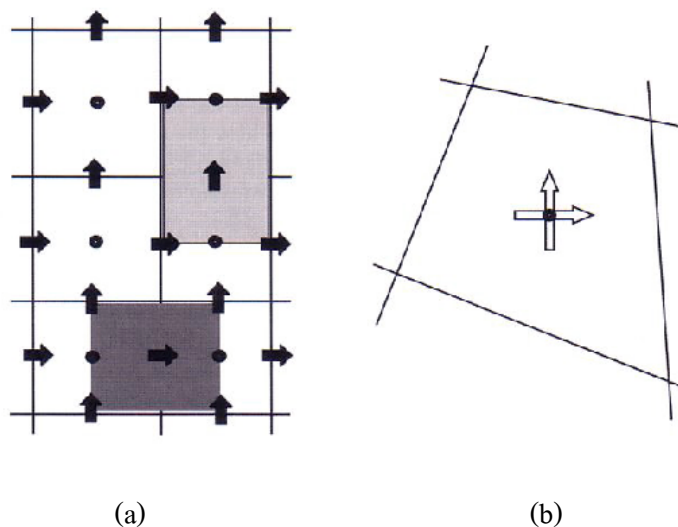


**ภาพที่ 9** a เป็นการสร้างกริดแบบพิกัด (cartesian grid)  
b เป็นการสร้างกริดแบบเข้ารูป (body-fitted grid)

ที่มา: Bonollo and Odorizzi (2004)

ในการสร้างกริดโดยทั่วไปนั้นที่นิยมใช้ในวิธีปริมาตรจำกัดนั้นมีอยู่ด้วยกันสองวิธีคือการสร้างกริดแบบพิกัดและการสร้างแบบเข้ารูปข้อดีของการสร้างกริดแบบพิกัดคือจะทำให้ง่ายต่อการคำนวณและไม่ซับซ้อนเช่นการสร้างกริดสำหรับการไหลผ่านช่องทางไหลที่เป็นสี่เหลี่ยมและข้อดีของการสร้างกริดแบบเข้ารูปจะช่วยในการลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณค่าในบริเวณขอบเขตต่าง ๆ ที่เป็นส่วนโค้งของกระบวนการสร้างกริดแบบพิกัด

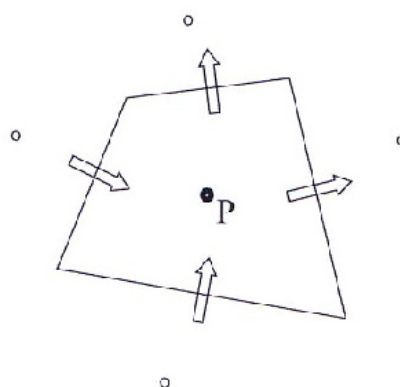
ส่วนในการเลือกลักษณะการไหลของปัจจัยที่มีผลกระทบจะแบ่งออกได้เป็นสองวิธีวิธีแรกจะเป็นการการจัดเตรียมแนวของกริดในแนวแกนพิกัดจากซึ่งลักษณะของปัจจัยที่มากกระทบจะกระทำที่บริเวณด้านข้างและแบบวิธีการเข้าใกล้จุดศูนย์กลางซึ่งจะใช้กับการสร้างกริดแบบเข้ารูป ซึ่งในภาพที่ 10 จะแสดงให้เห็นการเก็บค่าของปัจจัยที่มากกระทบของทั้งสองวิธีสำหรับภาพที่ 10a เป็นการวางกริดแบบพิกัดและการปัจจัยที่มากกระทบจะเป็นแบบสเกลาร์ซึ่งได้แก่ ค่าความดันสถิต, อุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งจะทำให้การเฉลี่ยค่าไว้ที่จุดกลางของเอลิเมนต์ซึ่งส่วนประกอบของความเร็วจะถูกเก็บไว้ที่ผิวหน้าของเอลิเมนต์และจะถูกส่งถ่ายไปดังแสดงให้เห็นดังรูปซึ่งจะเรียกว่าปริมาตรจำกัดสำหรับองค์ประกอบความเร็ว ในภาพที่ 10b จะแสดงให้เห็นตัวแปรที่เก็บไว้ที่ผิวของความเร็วและความดันของไหลซึ่งจะใช้เอลิเมนต์ในปริมาตรการควบคุมสำหรับทุกค่าตัวแปร



**ภาพที่ 10** a, b แสดงการเก็บค่าของตัวแปร

ที่มา: Bonollo and Odorizzi (2004)

ในรูปแบบเฉพาะของปริมาตรจำกัดดังแสดงในภาพที่ 11 จะแสดงค่าตัวแปรที่ไม่รู้ โดยจะแสดงค่าอยู่ในตำแหน่งลูกน้ำที่จุดศูนย์กลาง และที่ปริมาตรจำกัดรอบข้างจะแสดงที่จุดวงกลมเช่นเดียวกัน ส่วนลูกศรจะแสดงถึงผลของจุดที่อยู่รอบข้างที่กระทำบนผิวของปริมาตรจำกัดซึ่งจะคำนวณโดยลักษณะของการไหลเข้าและออก



**ภาพที่ 11** แสดงรูปแบบเฉพาะของเอลิเมนต์ในวิธีปริมาตรจำกัด

ที่มา: Bonollo and Odorizzi (2004)

วิธีการปริมาตรจำกัดจะมีอยู่ด้วยกันสองขั้นตอนในขั้นตอนที่หนึ่งจะใช้สมการการส่งถ่าย เฉพาะในสมการที่ 69 โดยจะทำการอินทิเกรตรอบปริมาตรควบคุมดังแสดงในภาพที่ 11 โดยทำ การอินทิเกรตสมการที่ 69 ค่า  $\phi$  จะเป็นตัวแปรของการไหลจะได้สมการที่ 70

$$\begin{aligned} \int_{V_p} \int_t^{t+\delta t} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) dt dV_p + \int_{V_p} \int_t^{t+\delta t} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \phi) dt dV_p = \\ \int_{V_p} \int_t^{t+\delta t} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) dt dV_p + \int_{V_p} \int_t^{t+\delta t} S^\phi dt dV_p \end{aligned} \quad (70)$$

จากสมการที่ 70 ใช้วิธีของเกาส์ไดเวอร์เจนจากการอินทิเกรตเป็นการอินทิเกรตที่ผิวจะได้ สมการที่ 71

$$\begin{aligned} \int_{V_p} \int_t^{t+\delta t} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) dt dV_p + \int_{\Omega_p} \int_t^{t+\delta t} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \phi \bar{u}_j \cdot \bar{n}) dt d\Omega_p = \\ \int_{\Omega_p} \int_t^{t+\delta t} (\Gamma^\phi \nabla \phi) \cdot \bar{n} dt d\Omega_p + \int_{V_p} \int_t^{t+\delta t} S^\phi dt dV_p \end{aligned} \quad (71)$$

ค่า  $V^p$  และ  $\Omega^p$  ในสมการ 71 แสดงถึงค่าของปริมาตรจำกัดที่จุดศูนย์กลาง P

ในขั้นตอนที่หนึ่งจะใช้วิธีการอินทิเกรตค่ากลาง (generalized mean value of integration theorem (GMVIT)) โดยวิธีการนี้จะคำนวณจากสมการที่ 71 ในการนำสมการ GMUIT ไปใช้ ในตอนแรกจะทำการเพิ่มตำแหน่งที่ไม่รู้ค่าในจุดที่จะทำการอินทิเกรต (ในตำแหน่งของลูกศรของ ภาพที่ 11) ในขั้นตอนที่สองนั้นค่าที่ไม่รู้ที่จุดจะทำการอินทิเกรตที่ตำแหน่งตรงกลางของปริมาตรควบคุม

ในปัญหาทางฟิสิกส์ของการไหลนั้นจะใช้สมการเชิงอนุพันธ์หลายสมการ (กฎการอนุรักษ์) สมการที่จะหาคำตอบนั้นได้แก่ สมการ โมเมนตัม รวมทั้งหมดสามสมการในแนวแกนสามแกน, สมการพลังงาน และสมการ VOF ซึ่งค่าตัวแปรที่ไม่รู้ค่าของสมการทั้งหมดนั้นจะแยกได้เป็นสมการ โมเมนตัมซึ่งจะไม่รู้ค่าของความเร็ว และ ความดันสถิต สมการพลังงานคือค่าของอุณหภูมิ และ สมการ VOF คือองค์ประกอบของ  $f$  ที่ไม่รู้ค่าซึ่งเราจะมีสมการอยู่ห้าสมการแต่มีตัวแปรที่ไม่รู้ค่า อยู่หกแต่ยังมีสมการของความต่อเนื่อง (การอนุรักษ์มวล) แต่สมการความต่อเนื่องจะประกอบด้วย

ความเร็วเท่านั้นและต้องใช้สมการโมเมนตัมในสมการสำหรับส่วนประกอบความเร็วสำหรับการไหลที่อัดตัวไม่ได้ จะทำการจัดรูปสมการใหม่สำหรับสมการความต่อเนื่องสำหรับความดันสามารถทำได้ดังนี้คือการอินทิเกรตสมการต่อเนื่องตลอดสมการทั้งปริมาณสเกลาร์ของปริมาตรจำกัดจะได้สมการที่ 72

$$\sum_e m = 0 \quad (72)$$

โดยที่ผลรวมของตลอดผิวหน้า (ตำแหน่ง “e”) ของปริมาณสเกลาร์ของปริมาตรจำกัด อัตราการไหลที่ผ่าน “e” ผิวหน้าของปริมาตรควบคุมจะมีความสัมพันธ์กับการอนุรักษ์มวลกับความเร็วดังสมการที่ 73

$$m_e = \int_{\Omega_p} \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} d\Omega_p \quad (73)$$

สามารถเขียนสมการ โมเมนตัมที่ตำแหน่ง “e” ของผิวปริมาตรจำกัดแบบสเกลาร์จะได้ดังสมการที่ 74

$$u_{i,e} = \frac{1}{a_e} \left[ \sum_{nb} a_{nb}^{u_i} u_{i,nb} + \left( \frac{\partial p}{\partial x_i} \right)_e + s_e^{u_i} \right] \quad (74)$$

โดยที่  $\frac{\partial p}{\partial x_i}$  ในสมการที่ 74 จะเป็นความแตกต่างกึ่งของความดันบนผิวหน้า “e” ของ

ปริมาตรควบคุม ความแตกต่างกึ่งของความดันระหว่างความดันสถิตในผิวของเอลิเมนต์ของผิวหน้า “e” นำไปแทนในสมการที่ 73 และในสมการ 74 และแทนที่องค์ประกอบความเร็วในรูปเวกเตอร์ โดยที่สมการ โมเมนตัมที่ผิวหน้าในสมการที่ 74 ค่าที่ไม่รู้คือความดันทำการเคลื่อน ทำการเคลื่อน ความแตกต่างของความดันไปทางซ้ายของสมการ จะได้ผลของสมการที่อยู่ในรูปของความดันสถิตย์ (หรือความดันที่เปลี่ยนแปลง) เป็นตัวไม่รู้ค่าดังสมการ 75

$$a_p^p P_p = \sum_{nb} a_{nb}^p P_{nb} + s_p^p \quad (75)$$

เมื่อรวมสมการความดันเข้าไปถึงจะมีจำนวนสมการเป็นหกสมการเท่ากับตัวแปรที่ไม่รู้ค่า

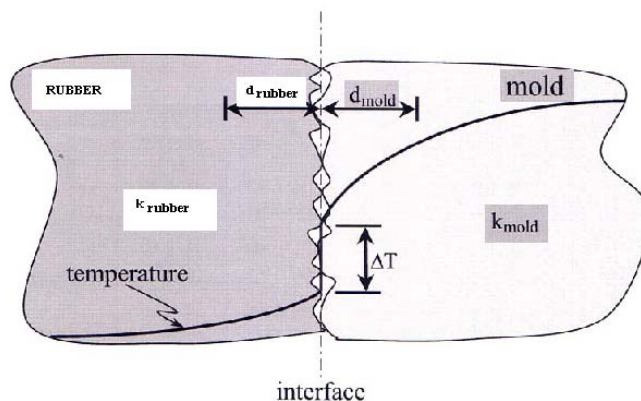
### **คุณสมบัติทางความร้อน (Thermophysical properties)**

ก่อนที่จะหาคำตอบของสมการที่ครอบคลุมการไหลและการเย็นตัวสิ่งที่สำคัญคือค่าของ คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่มีอยู่ สำหรับการคำนวณขอบเขตของอุณหภูมิในระบบการฉีดนั้น ข้อมูลที่ต้องการนั้นได้แก่ ความหนาแน่น (densities) ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacities) และค่าการนำความร้อน (thermal conductivities) ทั้งหมดของวัสดุในระบบของการฉีด เช่น เนื้อยางและแม่พิมพ์ เป็นต้น ที่จะนำเพิ่มเข้าไปและค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวของเนื้อยางในการคำนวณความเร็วและความดันระหว่างการไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์ของเนื้อยาง, ค่าความหนืดของเนื้อยางซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าของอุณหภูมิและที่สำคัญคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิที่จะต้องพิจารณาขึ้นงานขณะทำการจำลองการไหลสำหรับวัสดุที่เป็นอนนิวโตเนียนรีโอโลยี, ค่าของความหนืดจะเป็นองค์ประกอบของอัตราการเลื่อน

### **การถ่ายเทความร้อนระหว่างวัตถุ (The heat transfer between materials)**

ภายในแม่พิมพ์นั้นหลังจากกระบวนการฉีดได้เริ่มขึ้นจะมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นของวัตถุอยู่ภายในระบบคือจะมีการถ่ายเทจากที่อุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ เช่น จากแม่พิมพ์ไปที่ตัวเนื้อยาง เป็นต้น การสัมผัสกันระหว่างวัตถุสองชนิดนั้นจะมีช่วงการลดลงของอุณหภูมิที่ผ่านผิวหน้าสัมผัสสกลไกการถ่ายเทความร้อนบริเวณหน้าสัมผัสของวัตถุเกิดอยู่สองแบบคือการพาความร้อนผ่านช่องอากาศเล็กๆ ไปยังเนื้อยางและการแผ่รังสีข้ามช่องอากาศเนื่องจากความแตกต่างกันของอุณหภูมิของวัตถุทั้งสองโดยปกติจะเรียกความต้านทานของการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (HTC) ระหว่างวัตถุดังแสดงในภาพที่ 12





**ภาพที่ 12** แสดงถึงความแตกต่างกันของอุณหภูมิของแม่พิมพ์กับเนื้อยาง

ที่มา: Bonollo and Odorizzi (2004)

ตัวอย่างของการสัมผัสกันของสองวัสดุที่มีการถ่ายเทความร้อนจะพิจารณาความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของเนื้อยางกับแม่พิมพ์ ซึ่งผลรวมของความต้านทานของการถ่ายเทความร้อนระหว่างตำแหน่งจากแม่พิมพ์จากแม่พิมพ์ไปยังเนื้อยางแสดงได้ดังสมการที่ 76

$$R_{\text{total}} = \left[ \frac{d_{\text{rubber}}}{k_{\text{rubber}}} + \frac{1}{h_{\text{interface}}} + \frac{d_{\text{mould}}}{k_{\text{mould}}} \right] \quad (76)$$

โดยที่  $h_{\text{interface}}$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนที่บริเวณหน้าสัมผัส  
 $d_{\text{rubber}}$  และ  $d_{\text{mould}}$  คือระยะทางภายในเนื้อยางและแม่พิมพ์ในทิศทางหน้าสัมผัส  
 $k_{\text{rubber}}$  และ  $k_{\text{mould}}$  คือค่าการนำความร้อนของยางและแม่พิมพ์ดังแสดงในภาพที่ 12

## ลักษณะทั่วไปของยางและแม่พิมพ์ฉีดยาง

### คุณสมบัติทั่วไปของยาง

ยางเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากและมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ โดยเฉพาะความยืดหยุ่น (elasticity) นั่นคือเมื่อมีแรงดึงยางที่คงรูปแล้วจะสามารถยืดตัวได้หลายเท่าของความยาวเดิมและเมื่อปล่อยแรงออก ยางก็จะสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้ นอกจากนี้ยางยังมียุทธสมบัติเด่นอื่น ๆ อีกด้วย เช่น มีความเหนียว (toughness) และมีความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) สูงสามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำและอากาศได้ดี เป็นต้น ลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งของยาง ได้แก่ ความสามารถในการยึดติดกับวัสดุอื่น เช่น โลหะและสิ่งทอ (เส้นใย ผ้าใบ ฯลฯ) การเชื่อมติดยางกับวัสดุเหล่านี้ทำให้ยางมีความแข็งแรงสูงขึ้น จึงสามารถนำยางไปใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น

### ชนิดของยาง

ความรู้เรื่องยางแบ่งออกได้เป็นสองส่วนหลัก ๆ ได้แก่ การผลิตยางดิบ (raw rubber) และการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง (rubber product) ในส่วนของยางดิบนั้นสามารถแบ่งยางดิบออกได้เป็นสองประเภทคือ ยางดิบที่ได้มาจากต้นพืชเรียกว่ายางธรรมชาติ (natural rubber, NR) และยางดิบที่ได้จากการสังเคราะห์โดยกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) เรียกว่ายางสังเคราะห์ (synthetic rubber, SR) ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์อาจอยู่ในรูปของยางแห้ง (dry rubber) หรือน้ำยาง (latex) ก็ได้ สำหรับในส่วนของการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางนั้น โดยทั่วไปสามารถแบ่งผลิตภัณฑ์ยางออกได้เป็นสองกลุ่มตามลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้ คือ กลุ่มผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบที่เป็นยางแห้งและกลุ่มผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบที่เป็นน้ำยาง

ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ต่างก็มียุทธสมบัติเด่นที่แตกต่างกัน เช่น ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกัน (tack) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ที่สูงมากโดยไม่ต้องเติมสารตัวเสริมแรง อันเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือ เป็นต้น ส่วนยางสังเคราะห์นั้นมีมากมายหลายชนิด ซึ่งยางสังเคราะห์ในแต่ละชนิดนั้นจะมีความแตกต่างกันไป เช่น ยางบิวทาไดอิน (BR) ที่มีคุณสมบัติเด่นในด้านความต้านทานต่อการขัดถูหรือยางไนไตรล์ (NBR) ที่มีคุณสมบัติเด่นในด้านความต้านทานต่อน้ำมัน เป็นต้น

เนื่องจากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์แต่ละชนิดต่างก็มีข้อดีข้อด้อยที่แตกต่างกัน ดังนั้น ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางบางประเภทจึงจำเป็นต้องนำยางมากกว่าหนึ่งชนิดมาผสมกัน เพื่อให้ยางผสมที่ได้มีคุณสมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ในการเลือกชนิดของยางที่จะนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ใด ๆ ได้อย่างเหมาะสมนั้น ผู้ผลิตจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจในคุณสมบัติของยางแต่ละชนิดโดยละเอียด นอกจากนี้ผู้ผลิตยังต้องพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องร่วมด้วย เช่น ความยากง่ายในด้านกระบวนการการผลิต (processability) ของยางที่จะเลือกใช้ ราคาต้นทุนของการผลิต รวมถึงความยากง่ายในการจัดหาขายนั่น ๆ

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางนั้นจะมีพื้นฐานของส่วนผสมของสูตรประกอบด้วยสารต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่

**ตารางที่ 2** พื้นฐานของส่วนผสมของสูตรยาง

|                                      |                                                                                                                                                |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ยาง                                  | 1. ยางธรรมชาติ<br>2. ยางสังเคราะห์<br>3. ยางรีแคลม                                                                                             |
| สารทำให้ยางคงรูป (vulcanising agent) | 1. ซัลเฟอร์<br>2. สารอื่นๆ (ขึ้นอยู่กับชนิดของยางที่ใช้)                                                                                       |
| สารเร่งให้ยางคงรูป (accelerator)     | 1. พวกช่วยให้เกิดปฏิกิริยาช้า<br>2. พวกช่วยให้เกิดปฏิกิริยาปานกลาง<br>3. พวกช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเร็ว                                           |
| สารกระตุ้นสารเร่ง (activator)        | 1. พวกอินทรีย์สาร<br>2. พวกอนินทรีย์สาร                                                                                                        |
| สารเติม (filler)                     | 1. เขม่าดำ - ช่วยเพิ่มความแข็งแรง<br>- ไม่เพิ่มความแข็งแรง<br>2. พวกสีไม่ดำ - ช่วยเพิ่มความแข็งแรง<br>- ไม่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง<br>3. Extender |

## ตารางที่ 2 (ต่อ)

|                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| สารช่วยในกรรมวิธีการผลิต (processing aids) | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. พวกช่วยฉีกขาดโมเลกุลยาง</li> <li>2. พวกช่วยหล่อลื่นในโมเลกุลยาง</li> <li>3. พวกช่วยให้คุณสมบัติเหนียวติดกันดีขึ้น</li> </ol>                                                                                                     |
| สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (age - resisters)  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Staining</li> <li>2. Non – Staining</li> <li>3. ด้านทานการแตก</li> </ol>                                                                                                                                                         |
| สารอื่น ๆ                                  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ช่วยฉีกขาดโมเลกุล</li> <li>2. ช่วยให้ยางแข็ง</li> <li>3. ไม่ติดเปลวไฟ</li> <li>4. พวกสีต่าง ๆ</li> <li>5. ช่วยให้เกิดความเหนียวติด</li> <li>6. ช่วยให้เกิดฟอง</li> <li>7. ช่วยการเชื่อมต่อ</li> <li>8. ช่วยระงับกลิ่น</li> </ol> |

ที่มา: วราภรณ์ (2530)

## รีโอโลยีของยาง (Rubber Rheology)

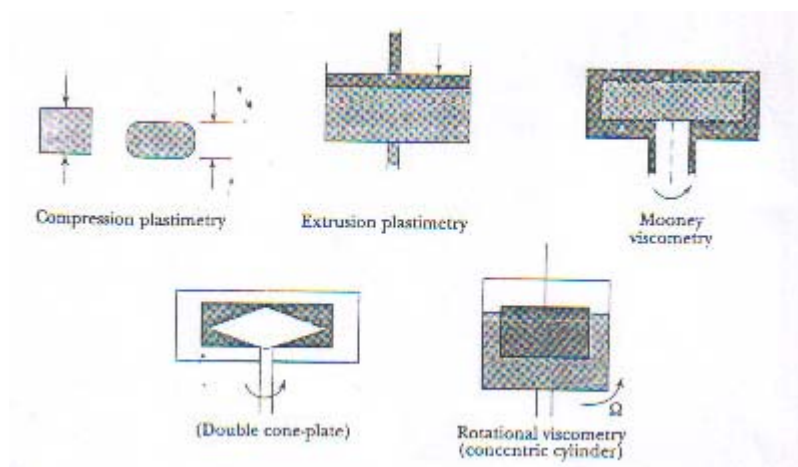
รีโอโลยีเป็นการศึกษาลักษณะการไหลและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุโดยจะหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น, ความเครียดและเวลาในการศึกษารีโอโลยีของยางนั้นจะศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างอุณหภูมิ และการเพิ่มองค์ประกอบต่าง ๆ เข้าไปแต่เนื่องจากยางนั้นจะมีคุณสมบัติที่เป็นทั้งของเหลวและเป็นของแข็งเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น (ดังนั้นต้องศึกษาพฤติกรรมรวมทั้งคู่ของความหนืดและความยืดหยุ่น) ในการศึกษารีโอโลยีของยาง เช่น การศึกษาอัตรา การไหลภายใต้ข้อกำหนดต่าง ๆ ของความเค้น อุณหภูมิ และเวลา ในการศึกษารีโอโลยีของยางจะศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปร 4 ตัว ที่สำคัญคือ เวลา,อุณหภูมิ,ความเค้นและความเครียด ซึ่งจะสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ขึ้นมาได้ นิยมเรียกว่า สมการ “Rheology equation of state” หรือ “constitutive equation”

ในการศึกษารีโอโลยีของยางยังมีคุณสมบัติที่สำคัญของยางที่ต้องศึกษาดังที่จะกล่าวต่อไป

### **ความหนืด (Viscosity)**

สมบัติความหนืดของยางเป็นสมบัติพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตมาก การเลือกยางที่มีความหนืดอย่างถูกต้องจะทำให้การบดและการขึ้นรูปยางถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ความหนืดของยางมักวัดด้วยเครื่อง Viscometer อ่านค่าเป็น Mooney Viscosity ML (1+4) 100 °C (M = Mooney, L = Large Rotor, 1 = pre-heat time (min), 4 = ระยะเวลาการหมุนโรเตอร์ min, ที่อุณหภูมิ 100°C) ยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะมีค่าความหนืดประมาณ 50 ถ้าต้องการสูตรยางที่บดผสมง่าย เช่น สูตรยางที่ใช้สารตัวเติม (filler) ปริมาณมาก หรือสูตรยางฟองน้ำที่ต้องการการพองตัวที่สม่ำเสมอ ควรใช้ยางที่มีความหนืดประมาณ 30 และในทางตรงกันข้าม ควรใช้ยางที่มีความหนืดมากประมาณ 100 สำหรับสูตรยางที่ผสมน้ำมันเพื่อการลดต้นทุน หรือสำหรับสูตรยางที่ต้องการความแข็งแรงของยางที่ยังไม่คงรูป (green strength of unvulcanised rubber)

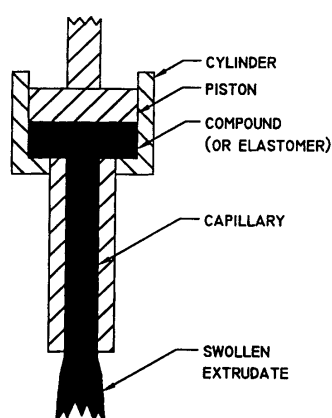
ยางธรรมชาติที่ผลิตโดยทั่วไปมีค่า Mooney Viscosity ประมาณ 90 ซึ่งค่อนข้างจะสูงเกินกว่าที่จะสามารถนำไปบดผสมโดยตรงนอกจากจะเป็นยางที่ได้ทำการผสมน้ำมันมาแล้วโดยปกติจะต้องทำการลดความหนืดของยางธรรมชาติโดยการใช้เครื่องบด (mechanical working) ซึ่งเป็นการทำให้ยางนิ่ม (mastication) ก่อนที่จะผสมสารต่าง ๆ ประสิทธิภาพการทำให้ยางนิ่มอาจใช้สารพวกทำให้ยางนิ่มนอกจากนี้อาจจะเลือกใช้ยางธรรมชาติชนิดที่มีค่าความหนืดเสถียร (viscosity-stabilised grade of CV rubber) และมีค่าความหนืด 55-65 ซึ่งไม่จำเป็นต้องบดยางให้นิ่มก่อน และเพื่อให้การขึ้นรูปสามารถควบคุมขนาดของชิ้นงานได้



**ภาพที่ 13** การทดสอบหาค่าความหนืดในรูปแบบต่าง ๆ

ที่มา: Indian Rubber Institute, "Rubber Engineerin" (2000)

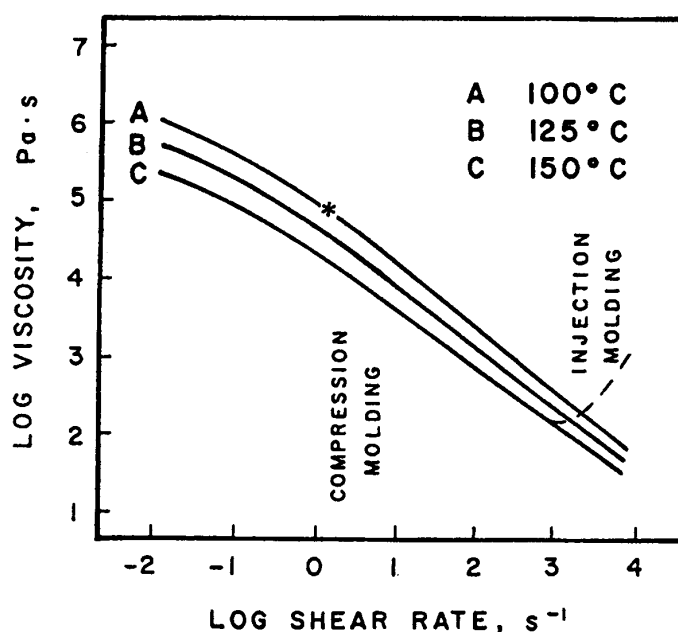
จากภาพที่ 13 จะแสดงถึงการวัดค่าความหนืดในลักษณะต่าง ๆ กันแต่การทดสอบค่าความหนืดที่จะใช้สำหรับการไหลของเนื้อยางจะเป็นการทดสอบโดยใช้เครื่องคาปิลารีวิสโคมิเตอร์ (capillary viscometers) ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 14 หลักการทำงานของเครื่องจะใช้ความดันดันให้ของไหลไหลผ่านท่อคาปิลารี ของไหลที่มีความหนืดมากต้องใช้ความดันมากในการดันให้ของไหลไหลผ่านท่อคาปิลารี ความหนืดจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกลับอัตราส่วนของความดันต่ออัตราการไหล



**ภาพที่ 14** แสดงส่วนประกอบต่างๆ และการทำงานของเครื่องคาปิลารีวิสโคมิเตอร์

ที่มา: Sommer (2003)

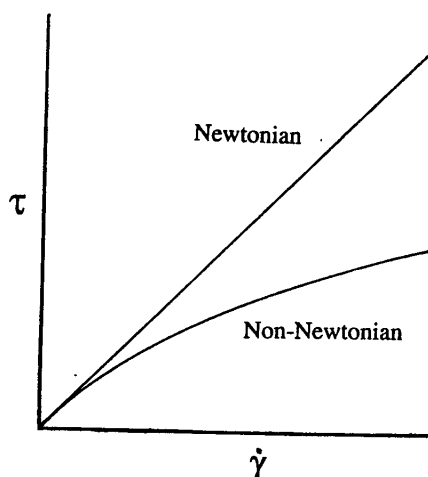
ในการใช้เครื่องคาปิลารีวิสโคมิเตอร์ในการทดสอบนั้นสามารถที่จะปรับขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดและความยาว ในช่วงความดันที่แตกต่างกันและอุณหภูมิได้ โดยในการทดสอบสามารถที่จะควบคุมปัจจัยต่าง ๆ นี้ได้โดยทั่วไปจะทำการทดสอบค่าความหนืดให้ขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนดังที่แสดงในภาพที่ 15 จะเป็นการทดสอบค่าความหนืดของเนื้อยางที่มีความหนืดสูงที่อัตราเฉือนต่าง ๆ ในแต่ละช่วงของอุณหภูมิ



**ภาพที่ 15** แสดงการทดสอบค่าความหนืดของเนื้อยางที่มีความหนืดสูงที่อัตราเฉือนต่าง ๆ ในแต่ละช่วงของอุณหภูมิ

ที่มา: Sommer (2003)

และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนกับอัตราเฉือนได้ซึ่งจะบอกลักษณะของไหลว่าเป็นแบบนิวโตเนียนหรือแบบนอนนิวโตเนียนดังแสดงในภาพที่ 16



**ภาพที่ 16** แสดงการเพิ่มขึ้นของความเครียดและอัตราเฉือนของไหลแบบนิวโตเนียนและแบบนอนนิวโตเนียน

ที่มา: Sommer (2003)

**สมการของวิลเลียม เลนเดล และ เฟอรรี่ (William Landdel and Ferry, WLF equation)**

เมื่อเขียนความสัมพันธ์ของค่า  $a_T$  กับอุณหภูมิได้ดังสมการที่ 77 เป็น

$$\log a_T = \frac{-c_1^0 (T - T_0)}{c_2^0 + T - T_0} \quad (77)$$

เมื่อ  $T_0$  เป็นอุณหภูมิอ้างอิง  $c_1$  และ  $c_2$  เป็นค่าคงที่ขึ้นกับธรรมชาติของพอลิเมอร์ และอุณหภูมิอ้างอิง และยังสามารถใช้อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน  $T_g$  เป็นอุณหภูมิอ้างอิง ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 78

$$\log a_T = \frac{-c_1^g (T - T_g)}{c_2^g + T - T_g} \quad (78)$$



ในพอลิเมอร์ทั่วไปประมาณได้ว่า

$$c_1^g \approx 17.44 \quad c_2^g \approx 51.6$$

จากกฎของวิศโคอีลาสติก  $a_T$  สัมพันธ์กับอัตราส่วนของความหนืดที่อุณหภูมิทั้งสอง ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 79

$$a_T = \eta(T)/\eta(T_0) \quad (79)$$

เมื่อ  $\eta(T)$  และ  $\eta(T_0)$  เป็นความหนืดของพอลิเมอร์ ที่อุณหภูมิ  $T$  และที่อุณหภูมิอ้างอิง  $T_0$

จากกฎของคูติเติลซึ่งเป็นกฎที่ให้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับปริมาตรว่าง หรือ ปริมาตรในเนื้อสารวัสดุพอลิเมอร์ที่ไม่มีโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์บรรจุอยู่ ปรากฏการณ์แสดง การมีปริมาตรว่าง เช่น การมีปริมาตรลดลงเมื่อความเค้นเฉือนกระทำ หรือการหดตัวของพอลิเมอร์ เนื่องจากลดอุณหภูมิลงผ่านอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน  $T_g$  ไม่เท่ากันขึ้นกับอัตราการลดลงของ อุณหภูมิดังแสดงในสมการที่ 80

$$\ln \eta = \ln A + B \frac{(V - V_f)}{V_f} \quad (80)$$

เมื่อ  $V_f$  เป็นปริมาตรว่างหรือสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 81

$$\ln \eta = \ln A + B \left( \frac{1}{f} - 1 \right) \quad (81)$$

เมื่อ  $f$  เรียกว่า อัตราส่วนของปริมาตรว่าง  $(V_f/V)$  จากทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่ จุดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะยาง หรือกลาสทรานซิชัน ซึ่งให้ความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 82

$$f = f_g + \alpha_f (T - T_g) \quad (82)$$

เมื่อ  $f$  = สัดส่วนปริมาตรว่างที่อุณหภูมิ  $T$   
 $f_g$  = สัดส่วนปริมาตรว่างที่อุณหภูมิ  $T_g$   
 $\alpha_f$  = สัมประสิทธิ์การขยายตัวของสัดส่วนปริมาตรว่าง

ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 83

$$\ln \eta = \ln A + B \left( \frac{1}{f_g + \alpha_f (T - T_g)} - 1 \right) \quad (83)$$

จากสมการที่ 83 จะได้สมการที่ 84

$$\ln \eta(T) / \eta(T_0) = B \left( \frac{1}{f_g + \alpha_f (T - T_g)} - \frac{1}{f_g} \right) \quad (84)$$

ซึ่งสมการนี้จะมีแบบจำลองเหมือนสมการของ WLF โดยที่

$$c_1^g = B/2.303f_g \quad c_2^g = f_g / \alpha_f$$

#### สมการของ Ostwald-de Waele Rheology Model

ในสมการของ Ostwald-de Waele จะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ และอัตราการเฉือนซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 85

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}(T, \gamma) = m \gamma^{n-1} \quad (85)$$

ลักษณะของแบบจำลองดังสมการข้างต้นนั้นค่าความหนืดสูงสุดจะถูกกำหนดโดยจุดที่มีค่าอัตราการเฉือนที่ต่ำที่สุด และค่าความหนืดต่ำสุดจะถูกกำหนดโดยค่าอัตราการเฉือนที่สูงสุด ในช่วงอัตราการเฉือนต่ำสุด นั้นควรที่จะมีค่าอัตราการเฉือนอยู่ระหว่างค่า 1 ถึง 10 ต่อวินาที

ในช่วงอัตราการเฉือนสูงสุด นั้นควรที่จะมีค่าอัตราการเฉือนอยู่ระหว่างค่า 1,000 ถึง 20,000 ต่อวินาที

โดยที่ค่า

$m$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของการไหลของโพลิเมอร์โดยจะขึ้นอยู่กับค่าของอุณหภูมิ

$n$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการเฉือนกับความเค้นเฉือน โดยในสมการนี้จะกำหนดค่าให้เท่ากับ 1 ซึ่งจะทำให้ลักษณะการไหลเป็นแบบราบเรียบ ซึ่งจะเห็นได้จากลักษณะของเส้นตรงที่เกิดขึ้น

### ความเครียดเฉือน (Shear strain)

กรณีที่วัสดุเคลื่อนที่แบบลามินาร์ซึ่งวัสดุมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันในระหว่างชั้นบางที่ขนานกันในการกำหนดความเครียดเฉือน โดยพิจารณาว่าที่เวลา  $t$  อนุภาคที่ตำแหน่ง  $x$  จะมีการเคลื่อนที่ออกไปจากเดิม (ตำแหน่งเมื่อเวลา  $t = 0$ ) ไปทางขวามือเป็นระยะทาง  $U(x,t)$  เมื่อ  $x$  เป็นระยะห่างจากตำแหน่งที่อยู่นิ่ง ( $x=0$ ) ในทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่

ความเครียดเฉือน  $\tau(x,t)$  กำหนดด้วยความสัมพันธ์ดังสมการที่ 86

$$\tau(x,t) = \frac{dU(x,t)}{dx} \quad (86)$$

ค่าความเครียดเฉือนนี้จะไม่ขึ้นกับระยะการเคลื่อนที่  $U(x,t)$  โดยตรงแต่ขึ้นกับอัตราของผลต่างการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นที่ติดกันของการเคลื่อนที่แบบลามินาร์กับระยะห่างระหว่างชั้น จึงเป็นที่แน่นอนว่าความเครียดเฉือน  $\tau(x,t)$  โดยทั่วไปอาจจะขึ้นกับเวลาและระดับชั้นที่พิจารณาคำนวณ

### อัตราเฉือน (Shear rate)

อัตราเฉือนเป็นอัตราความเครียดเฉือนในหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งความสัมพันธ์ได้เป็นดังสมการที่ 87

$$\dot{\gamma} = \frac{d\tau}{dt} (\text{s}^{-1}) \quad (87)$$

หรือสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 17



$$\text{SHEAR RATE} = \frac{v}{t} = \frac{\text{mm/s}}{\text{mm}} = \text{s}^{-1}$$

ภาพที่ 17 แสดงถึงอัตราเฉือน โดยจะขึ้นอยู่กับความเร็วและความหนา

ที่มา: Sommer (2003)

### การคืนตัวของยางดิบ (Nerve)

การคืนตัวของยางดิบ คือ ลักษณะที่ยางดิบซึ่งยังไม่ได้ทำให้คงรูปมีสมบัติคืนตัวได้มาก (high elastic recovery on deformation) ยางดิบที่มีการคืนตัวสูงจะบดผสมกับสารเคมีได้ยากขณะการบดบนลูกกลิ้งจะติดจากผิวหน้าลูกกลิ้งและพันรอบลูกกลิ้งได้ยากซึ่งจำเป็นต้องลดการคืนตัวให้อยู่ในระดับที่จะทำการบดผสมได้และเพื่อให้การขึ้นรูปสามารถควบคุมขนาดของชิ้นงานได้

สามารถทำให้การคืนตัวของยางดิบลดลงได้โดยวิธีต่าง ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของยาง การลดความคืนตัวของยางดิบ เช่น การบดให้ยางนุ่ม การเพิ่มสารตัวเติม การเลือกชนิดสารตัวเติม (เช่น ใช้เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูงแทนการใช้ชนิดที่มีโครงสร้างธรรมดา) ใช้สารพวก mineral rubber หรือ แฟคทีส (factice) หรืออาจใช้ยางที่ได้มีการคงรูปบ้างแล้ว (partially crosslinked) ผสม

### ความแข็งและโมดูลัส (Hardness and Modulus)

ในการทำผลิตภัณฑ์ยางความแข็งของยางมักจะเป็นสมบัติแรกที่สำคัญที่ต้องการทราบ การวัดความแข็งเป็นการวัดโมดูลัสที่แรงยืดเพียงเล็กน้อย (low strains) การวัดที่เป็นมาตรฐาน คือ วัดเป็น IRHD (international rubber hardness degree) และ Shore Hardness ซึ่งแบ่งเป็น A, B, C, D และ O

ค่าความแข็งโดยทั่วไปในระบบ IRHD และ Shore A จะใกล้เคียงกัน ในระบบ Shore Hardness แบ่งเป็นระดับต่าง ๆ เพื่อการวัดยางที่มีความแข็งช่วงต่าง ๆ กัน A - สำหรับยางที่มีความแข็งปกติ B- สำหรับยางที่มีความแข็งพิเศษ เช่น ยางลูกกลิ้งพิมพ์ดีด C - สำหรับยางที่แข็งมาก เช่น เปลือกลูกกอล์ฟ ส้นรองเท้า D- สำหรับยางที่แข็งจนเปราะ และ O - สำหรับยางพองน้ำ

ความแข็งของยางที่ยืดหยุ่นโดยทั่วไปจะประมาณ 35-75 IRHD ผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการนุ่ม เช่น ยางลบดินสอ ถุงมือ ลูกโป่ง ยางรัดของ และผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแข็ง เช่น ยางรถยนต์ พื้นรองเท้า และยางลบหมึก เป็นต้น

ผู้ออกสูตรยางส่วนใหญ่นอกจากจะสนใจวัดโมดูลัสที่ low strain แล้วยังสนใจที่จะวัดโมดูลัสที่ higher strain ซึ่งจะระบุไม่เป็น true modulus แต่จะระบุเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ที่ใช้ยืดยางออกความยาวที่กำหนด เช่น 100 300 และ 500% ของความยาวเดิม เป็นต้น สารต่าง ๆ ที่ทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มก็จะทำให้ยางมีโมดูลัสเพิ่มด้วย

ปกติความแข็งและโมดูลัสของยางขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ชนิดของยาง และสามารถทำให้เพิ่ม โดยการใช้สารตัวเติมพวกช่วยเสริมความแข็งแรงให้ยาง หรือใช้สารระบบการคงรูปเป็นพวก resin เช่น phenolic resin สารเรซินพวกไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเช่น high-styrene resin เมื่อใช้กับสูตรยางธรรมชาติ และสูตรยางเอสบีอาร์ จะทำให้ยางแข็งได้ PVC อาจผสมทำให้สูตรยางเอสบีอาร์ มีความแข็ง

### ความยืดหยุ่น (Elasticity)

ยางมีเอกลักษณ์ด้านสมบัติทางกายภาพคือสามารถเปลี่ยนรูปได้มาก (large deformation) โดยไม่เสียหรือฉีกขาด มีสมบัติด้านความหนืด (viscosity) เหมือนกับเป็นของเหลวในขณะเดียวกันก็มีความสามารถในการคืนตัวสู่ขนาดหรือสภาพเดิมได้ทันทีเมื่อแรงเค้นหยุดกระทำ ทำให้ยางมีสมบัติของแข็งด้วย คือ มีความยืดและหยุ่นได้ (elasticity) ดังนั้น เมื่อรวมสมบัติทั้ง 2 ด้านนี้เข้าด้วยกัน จึงมักเรียกว่ายางมีสมบัติเป็น viscoelastic material

สูตรยางที่ทำให้การคงรูปยางลักษณะที่การเชื่อมโยงโมเลกุลอย่างหนาแน่น (tightly knit crosslinking system) จะส่งเสริมความยืดหยุ่นของยาง ซึ่งจะแสดงออกมาในรูปของยางมีการกระทำคืน (resilience) ดี ถ้าลักษณะการเชื่อมโยงโมเลกุลมีความเสถียรต่อการเสื่อมสภาพได้ดีมากยางนั้นก็จะมีสมบัติด้าน creep, stress relaxation และ set ลดลงด้วยนอกจากนี้สารป้องกันยางเสื่อมจะช่วยปรับปรุงสมบัติดังกล่าวนี้อีกด้วย

creep คือสมบัติที่ยางจะเกิดการแบนต่อไปอีกอย่างช้า ๆ ภายหลังจากที่ถูกกดและขูดหรือแบนลงตามแรงกดจนถึงจุด ๆ หนึ่ง แล้วทิ้งไว้ให้แรงกดนั้นคงอยู่ต่อไป ความสำคัญของ creep ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานยาง โดยเฉพาะในกรณีต้องรับน้ำหนักตลอดเวลา เช่น ยางรองคอสพาน ยางรองแท่นเครื่อง และรองเท้า เป็นต้น ยางรองคอสพาน ถ้ามี creep มากจะทำให้รอยต่อของสพานมีความสูงหรือต่ำไม่เท่ากัน กรณีรองเท้าก็จะแบนบานออกไป

stress relaxation เป็นสมบัติของยางที่เกิดเมื่อมีการกดยางลงลงไปให้มีความสูงหรือหนาในระดับหนึ่ง ซึ่งจะต้องใช้แรงกดระดับหนึ่ง และถ้ายังคงกดยางให้อยู่ในระดับความสูงคงที่ขนาดนั้น จะพบว่าแรงที่ต้องกดยางค่อย ๆ ลดลงตามลำดับ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า stress relaxation ความสำคัญของ stress relaxation เห็นได้ชัดในกรณียางซีลหรือปะเก็นยาง คือ ในระยะแรกของการใช้ยางที่มีการกดให้ยางซีลยางแน่น การกดทำให้เกิดแรงดันขึ้นในยาง จึงเกิดการกันของเหลวไหลผ่านปะเก็นยางได้ แต่เมื่อทิ้งไว้นาน ๆ แรงดันของยางจะค่อย ๆ ลดลง จนกระทั่งในที่สุดความดันของเหลวจะมากกว่าความดันที่มีอยู่ในยาง ทำให้ของเหลวไหลออกได้

set เป็นสมบัติด้านการคืนรูปร่าง หรือขนาดหลังจากถูกแรงกดกระทำระยะเวลาหนึ่ง สมบัติด้าน set ของยางเกิดขึ้นเมื่อกดยางแล้วตั้งไว้ระยะหนึ่ง เช่น เป็นวัน เป็นสัปดาห์ เมื่อปล่อยแรงกดออกจะพบว่ายางไม่คืนรูปร่างเท่าเดิม ขนาดที่เปลี่ยนไปนี้เรียกว่า การคืนรูป หรือ set

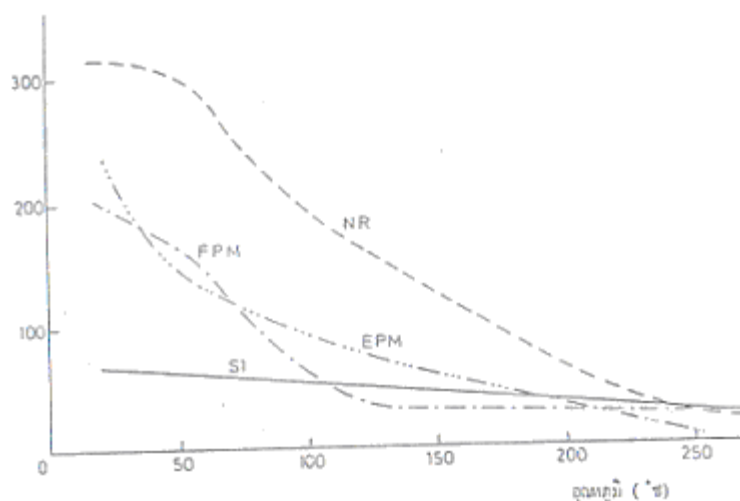
ในโรงงานอุตสาหกรรมยางนิยมนทดสอบ set มากกว่า creep หรือ stress relaxation เพราะใช้เครื่องมือที่ง่าย และให้ผลที่จะเป็นตัวบอกได้ว่ายางจะชิลได้ดีหรือไม่ในทันที แม้ว่า จะไม่ได้วัดแรงที่ยางกระทำในขณะที่ชิลก็ตาม

### ความแข็งแรงต่อการยืดยาง (Tensile Properties)

การทำยางให้มีความแข็งแรงต่ำ เช่น ต่ำกว่า 50 IRHD สำหรับยางที่มีความแข็งแรงของ เนื้อยางล้วน (pure gum strength) สูง นั้น ทำได้ง่าย ในกรณีการใช้อย่างที่มีโมเลกุลสามารถ ตกผลึก หรือเรียงตัวเป็นระเบียบเมื่อยืดยาง (crystalline on stretching) ได้แก่ ยางธรรมชาติ ไอโซพรีน คลอโรพรีน และบิวไทล์ ส่วนยางอื่น เช่น เอสบีอาร์ เอ็นบีอาร์ และบิวทาไดอิน ซึ่งมีความ แข็งแรงของเนื้อยางล้วนต่ำ จะต้องใช้สารตัวเติมชนิดที่มีประสิทธิภาพเสริมแรงดี เพื่อปรับความแข็งแรงต่อการยืดยาง ซึ่งสารตัวเติมดังกล่าวก็จะเพิ่มสมบัติด้าน โมดูลัสและ ความแข็งแรงด้วย

การปรับความแข็งแรงให้ยางทั้งสองกลุ่มดังกล่าวทำได้โดยการใช้สารตัวเติม เขม่าดำ ที่มีอนุภาคละเอียด หรือใช้พวกซิลิกา ข้อสำคัญจะต้องบดผสมให้ตัวเติมกระจายในยางอย่างดี ปริมาณที่พอเหมาะขึ้นอยู่กับชนิดของยางและชนิดของสารตัวเติม โดยปกติจะใช้สารตัวเติม ในระดับ 30-60 phr สารเรซินบางตัว สามารถผสมทำให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เช่น high-styrene resin ทำให้ยางเอส บี อาร์ มีความแข็งแรงดีขึ้น และฟีนอลิกเรซินที่สามารถเชื่อมโมเลกุล ได้ (crosslinkable phenolic resin) เพิ่มความแข็งแรงในยางเอ็น บี อาร์ ได้

ข้อพึงระวังด้านความแข็งแรงของยางที่ได้ออกสูตรเพื่อให้มีความแข็งแรงมาก คือ การใช้งานที่สถานะอุณหภูมิสูง ดังแสดงในภาพที่ 18 แสดงความแข็งแรงของยางบางชนิด ในสภาพการใช้งานที่อุณหภูมิสูงต่าง ๆ กัน



**ภาพที่ 18** แรงดึงยางขนาดของยางชนิดต่าง ๆ ในสภาพอุณหภูมิต่าง ๆ

ที่มา: วราภรณ์ (2003)

**ความทนต่อแรงกระทำเป็นรอบ ๆ แรงหักงอ รอยแตก และการล้าตัว (cyclic stressing, flex cracking, cut growth and fatigue)**

เมื่อผลิตภัณฑ์ยางถูกแรงกระทำระหว่างการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นแรงกระทำซ้ำ ๆ ในลักษณะทำให้ขึ้นยางหัก – งอ หรือกดขึ้นยางก็ตาม มักจะเป็นผลให้ยางเกิดรอยแตก และอยู่ในสภาพใช้งานไม่ได้ในที่สุด นอกจากนี้ในสภาพของการหัก – งอ ด้วยอัตราสูง เช่น การหมุนของยางล้อรถ หรือการวิ่งของสายพาน จะมีความร้อนสะสมเกิดขึ้นในยาง ดังนั้นการออกสูตรยางจะต้องคำนึงเกี่ยวกับสมบัติเหล่านี้

นอกจากชนิดของยางที่ใช้สารเคมีต่าง ๆ ก็มีผลต่อสมบัติการแตกของยาง ระบบของสารทำให้ยางคงรูป การเลือกชนิดของสารป้องกันยางเสื่อม การกระจายของสารเคมีต่าง ๆ ในเนื้อยาง ปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีผลต่อแรงเค้นดึงในยาง ซึ่งจะกระทบต่อสมบัติด้านการหักงอยาง สารเคมีที่ลดการกระเด็น ก็จะช่วยเพิ่มความร้อนสะสมเมื่อหักงอยาง และถ้าหากสภาพการหักงอรุนแรงก็จะทำให้ยางเกิดรอยแตกอย่างรวดเร็ว



ในการออกสูตรยาง จะต้องพิจารณาสภาพการใช้งานผลิตภัณฑ์ก่อนจึงจะสามารถเลือกชนิดยางได้ถูกต้อง ถ้าหากสภาพการใช้งานจะต้องเสี่ยงต่อการเกิดรอยแตก การถูกสิ่งทิ่มแทงยาง ก็ควรพิจารณาเลือกยางที่มีความแข็งแรงของยางล้วน ๆ สูง เช่น ยางธรรมชาติ และยางคลอ โรพรีน และเลือกสารตัวเติมที่ให้ความสมดุลย์ด้านสมบัติโมลกุลต่ำยืด ได้ดี และขณะเดียวกันก็ทนต่อการขีดข่วน

ได้มีการศึกษากันมาช้านาน พบว่าระบบการอบยางให้คงรูปโดยไม่ใช้ซัลเฟอร์ แต่ใช้สาร TMTD (teramethyl thiuram disulphide) ตามล้าพัง จะให้สมบัติด้านการล้าตัวเสื่อมสภาพที่จะใช้ยางได้เร็วกว่าการอบยางคงรูปโดยระบบใช้ซัลเฟอร์ตามปกติ (conventional system) ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าเนื่องจากสายเชื่อมโยงโมเลกุลที่เกิดโดยระบบการใช้ TMTD เป็น “monosulphide” มีความเคลื่อนไหวได้จำกัดกว่าสายเชื่อมโยงโมเลกุลแบบ “polysulphide” ที่เกิดจากการใช้ระบบซัลเฟอร์ตามปกติ

### ความทนต่อการเสื่อมสภาพและสมบัติทางฟิสิกส์อื่น ๆ

ความทนต่อการเสื่อมสภาพของยาง เช่น ทนต่อความร้อน เปลวไฟ สารเคมี แสงโอโซน บรรยากาศทั่วไปและสมบัติทางฟิสิกส์บางประการ เช่น การพองตัวในน้ำมัน ความหนาแน่น ตลอดจนสมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น สมบัติเหล่านี้ของผลิตภัณฑ์ยางจะขึ้นอยู่กับชนิดของยาง ระบบการใช้สารทำให้ยางคงรูป เช่น ระบบสารทำให้ยางคงรูปในยางธรรมชาติที่ ให้พันธะเคมีเชื่อมโยงโมเลกุลยางเป็นแบบ monosulphidic จะให้ความทนทานต่อความร้อนดีกว่า ระบบที่ให้พันธะเคมี เป็นแบบ polysulphidic การใช้ยางที่มีองค์ประกอบในโมเลกุลเป็นพวก halogen เช่น ยางคลอโรพรีน (CR) ก็สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ไฟจะดับได้เมื่อไม่มีเปลว คือไม่ลุกลามเป็นเปลว การใช้สารตัวเติมพวกเขม่าดำชนิด furnace และ acetylene จะสนับสนุนสมบัติด้านต้านไฟฟ้าสถิตย์ (antistatic) และด้านตัวนำไฟฟ้า ส่วนสารตัวเติมพวก mineral เช่น clays, whitihg, coated silicas ที่มีส่วนผสมของสารที่ละลายน้ำได้อยู่ในปริมาณน้อย จะสนับสนุนสมบัติด้าน electrical resistance และ dielectric characteristics ดีกว่าเขม่าดำ synthetic aluminium silicate บางชนิด สามารถใช้ผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการมีสีสรรอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สีดำ และต้องการสมบัติด้านต้านไฟฟ้าสถิต

### การอบยาง (Vulcanization and Kinetic Model Verification)

กรรมวิธีของการอบยางนั้นเป็นการเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีของยางเพื่อที่จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลของยางประสานกันเป็นโครงข่ายซึ่งลักษณะที่สำคัญที่เกิดขึ้นในยางที่ผ่านกรรมวิธีการอบแล้วนั้นจะอยู่ในรูปของโมเลกุลของโพลิเมอร์ (polymer molecule) จุดตัดที่เชื่อมติดกัน (crosslink) โครงข่าย (network chain) โครงข่ายที่ซ้อนทับกัน (chain entanglement) จุดสิ้นสุดของโครงข่าย (chain end) โครงข่ายพิเศษ (extra-network material) ดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 19

ในการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของความร้อนของกรรมวิธีการอบยางกับแม่พิมพ์ชนิดนั้นจะดูที่สภาวะของการให้ความร้อน ( $\alpha$ ) ซึ่งถูกกำหนดโดยระยะเวลาในการให้ความร้อน ( $t_r$ ), ระยะเวลาในการเข้ามาในแม่พิมพ์ของยาง ( $t_{or}$ ) และค่าคงที่ของผลกระทบในการให้ความร้อน ( $k_r$ ) ซึ่งจะสามารถเขียนได้เป็นสมการที่ 88 และ 89 ดังนี้

$$\alpha = 1 - \exp \left[ -k_r \left( t_r - t_{or} \right) \right] \quad (88)$$

และ

$$t_r = t_k \exp \left[ \left( E/2 \right) \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (89)$$

โดยที่

$\alpha$  = State of cure time

$k_r$  = Rate constant for the curing reaction

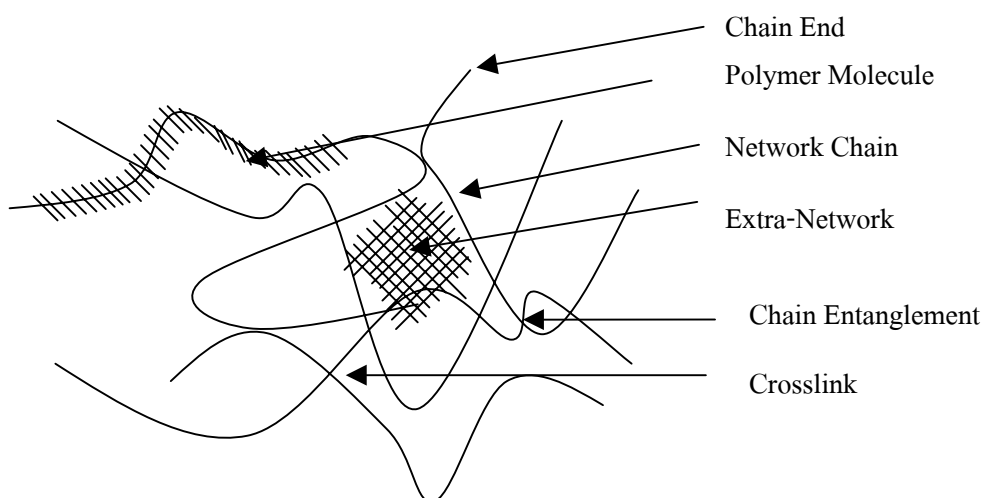
$t_r$  = Cure time

$t_k, t_{or}$  = Induction period

$E$  = Activation energy

$T_r$  = Reference temperature

$T$  = temperature



**ภาพที่ 19** รูปแสดงลักษณะที่เกิดขึ้นของเนื้อยางเมื่อผ่านการอบ (vulcanization)

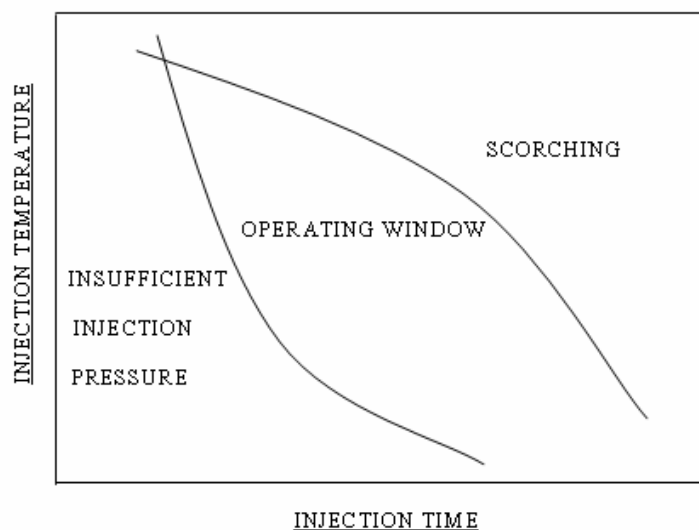
ที่มา: วราภรณ์ (2530)

### การเกิดสภาวะยางตาย (Scorch and Moldability)

การเกิดลักษณะของยางที่เรียกว่ายางตายนั้นเป็นสาเหตุจากการที่ยางได้รับความร้อนที่สูงหรือระยะเวลาในการนึ่งยางเข้าไปในแม่พิมพ์นานเกินไปซึ่งได้แสดงไว้ในภาพที่ 20

ในการเกิดการตายของยางในแม่พิมพ์นึ่งนั้นมีสาเหตุสำคัญมาจาก

- ความเร็วในการนึ่งสูง ซึ่งจะก่อให้เกิดความร้อนขึ้นในเนื้อยางขณะที่นึ่งเข้าไปในแม่พิมพ์
- ความเร็วในการนึ่งต่ำ ซึ่งจะทำให้การใช้เวลาในการนึ่งยางเข้าไปในแม่พิมพ์ยาวนานขึ้น
- อุณหภูมิของเนื้อยางที่จะทำการนึ่งเข้าไปในแม่พิมพ์สูง
- อุณหภูมิของแม่พิมพ์สูง



**ภาพที่ 20** แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง อุณหภูมิ และ เวลา ในการฉีด

ที่มา: Sommer (2003)

### ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity “ $c_p$ ”)

ค่าความจุความร้อนจำเพาะจะเป็นค่าผลรวมของพลังงานที่เนื้อวัสดุต้องการเพื่อที่จะทำให้อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียสที่น้ำหนัก 1 กิโลกรัม ซึ่งโดยปกติแล้วการวัดค่าความจุความร้อนของวัสดุจะใช้เครื่องแคลอรีมิเตอร์ ซึ่งค่าความจุความร้อนจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนแปลง และค่าความจุความร้อนของก๊าซและของเหลวนั้นจะมีค่าที่สูงกว่าของแข็ง เมื่อเป็นวัสดุเดียวกัน ในกรณีของเนื้อยางนั้นค่าในช่วงที่อุณหภูมิต่ำนั้นจะมีค่าความจุความร้อนที่สูง และเมื่อให้อุณหภูมิแก่เนื้อยางจะทำให้ค่าความจุความร้อนของเนื้อยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากเนื้อยางจะรับความร้อนเพื่อไปทำให้น้ำยางเกิดการสุกตัว และเมื่อน้ำยางสุกตัวแล้วค่าความจุความร้อนจะมีค่าลดลง

Mehrdad (2000) ได้เสนอแบบจำลองในการทำนายลักษณะและกลไกการตอบสนองของยางธรรมชาติที่รับความร้อน โดยการศึกษาค่าความจุความร้อนนั้นแบ่งออกเป็น 4 แบบด้วยกัน ได้แก่ การวัดค่าความจุความร้อนที่ความดันคงที่ ( $c_p$ ) วัดโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเนื้อยางที่มีอุณหภูมิสูงซึ่ง 1 องศาเซลเซียสโดยให้ความดันคงที่, การวัดค่าความจุความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่ปริมาตรคงที่ ( $c_v$ ), การวัดค่าความจุความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่ความดันและการเกิด

ผลึกคงที่ ( $c_p$ ) และการวัดค่าความจุความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่ปริมาตรและการเกิดผลึกคงที่ ( $c_{pc}$ ) จากการทดลองจะได้ค่าของค่าความจุความร้อนที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยที่ค่าความจุความร้อนของลักษณะของเนื้ออย่างธรรมชาติที่มีลักษณะเป็น amorphous ทั้งหมด นั้นจะมีค่าความจุความร้อนที่สูงกว่าลักษณะของเนื้ออย่างธรรมชาติที่มีลักษณะเป็น crystalline ที่อุณหภูมิเดียวกัน

Traian et al. (1998) ได้ศึกษาค่าความจุความร้อนของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ในช่วงอุณหภูมิ 340 – 440 องศาเซลเซียส โดยการใช้การแผ่รังสีแกมมาในการสร้างความร้อนให้เกิดขึ้น ผลของการศึกษานั้นพบว่าในการให้ความร้อนแก่เนื้อยางภายในสุญญากาศนั้นจะให้ค่าความจุความร้อนที่สูงกว่าการให้ความร้อนภายในบรรยากาศ ซึ่งในการศึกษาในครั้งนี้พิจารณาถึงผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อค่าความจุความร้อน 2 ตัวแปรได้แก่ การสุกตัวของเนื้อยาง และการเสื่อมสลายของความร้อนให้กับออกซิเจน แต่มีกรณีที่มีการแผ่รังสีที่ 100kGy, 500kGy และ 600kGy นั้นเมื่ออุณหภูมิของเนื้อยางสูงขึ้นผลของค่าความจุความร้อนของการทดสอบทั้ง 2 กรณีมีแนวโน้มที่จะมีค่าที่เท่ากัน

Wunderlich (1997) ได้ศึกษาผลรูปร่างและลักษณะจำเพาะของชิ้นงานโพลิเมอร์ซึ่งโดยปกติในตอนเริ่มต้นของการวิเคราะห์ทางด้านความร้อนนั้นจะพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวโพลิเมอร์ซึ่งการวัดโดยทั่วไปนั้นวัดจากกระบวนการ การให้ความร้อนที่เท่ากันทุกจุดโดยเครื่องแคลอริมิเตอร์ และแยกวิธีการวัดออกเป็น 3 แบบด้วยกัน ได้แก่ การสแกนการสมดุลรอบแกน และการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ (TMDSC) จากการเปรียบเทียบวิธีการวัดค่าความจุความร้อนในแต่ละกรณีแล้วพบว่า 2 วิธีการแรกนั้นจะได้ค่าที่เป็นการประมาณค่า ส่วนการวัดแบบการปรับเปลี่ยนอุณหภูมินั้นจะเป็นการวัดที่สามารถวัดกระบวนการที่ไม่สามารถย่อยกับได้ซึ่งจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

Korus et al. (1997) ได้ทำการหาค่าความเป็นไปได้ของขอบเขตในการหาค่าความจุความร้อนแบบสเปกตรัม โดยทำการศึกษาถึงการเคลื่อนที่ของโครงสร้างภายในของโพลิเมอร์ที่เป็นแบบแก้วและวัสดุอื่น จากการศึกษาพบว่าโดยทั่วไปแล้วค่าของการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุความร้อนในช่วงที่โครงสร้างอยู่ในรูปแบบของโครงสร้างแบบแก้วนั้นการเปลี่ยนแปลงจะมีค่าที่ต่ำแต่เมื่อ วัสดุได้รับความร้อนมากขึ้นโดยที่อุณหภูมิของวัสดุใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างแล้วนั้น การเปลี่ยนแปลงของค่าสเปกตรัมของค่าความจุความร้อนนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มมากขึ้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์

### การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยแม่พิมพ์ (Moulding)

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยอัดแม่พิมพ์ เป็นกระบวนการที่มีผลทั้งขึ้นรูปผลิตภัณฑ์และทำให้ยางคงรูป (shaping of forming and vulcanising) โดยอาศัยความร้อนและแรงอัดยางที่อยู่ในสถานะที่สามารถอ่อนตัวและไหลได้ (plastic state) ในแม่พิมพ์รูปร่างตามที่ต้องการ วิธีการพื้นฐานของการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์มี 3 แบบ คือ วิธีการใช้แม่พิมพ์แบบอัดธรรมดา (compression mould) แบบกึ่งฉีด (transfer mould) และแบบฉีด (injection mould)

#### แม่พิมพ์แบบอัด (Compression Mould)

แม่พิมพ์แบบอัดนี้ใช้กันอย่างกว้างขวางในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางต่าง ๆ ลักษณะของพิมพ์ประกอบด้วย 2 ส่วน ซึ่งยึดกันด้วยสลัก ใส่ง่ายที่ผสมสารเคมีแล้วในช่องของแม่พิมพ์ โดยให้ขนาดขางเล็กกว่าขนาดของช่องแม่พิมพ์เล็กน้อย เพื่อยางจะได้แผ่กระจายเต็มช่องแม่พิมพ์ เมื่อปิดแม่พิมพ์และอาศัยเครื่องอัด press อัดแม่พิมพ์ ส่วนของยางที่เกินความจุของช่องแม่พิมพ์จะล้นออกตามข้างแม่พิมพ์ ไหลไปตามร่องและเรียกยางที่ล้นจากแม่พิมพ์ว่า “ขี้ยาง” (mould flash)

การทำแม่พิมพ์อาจทำให้สามารถยกเข้า-ออกจากเครื่องอัด (press) ได้และเปิดแม่พิมพ์โดยอาศัยแท่งเหล็กหรือแท่งทองเหลือง หรืออาจทำให้แม่พิมพ์ยึดติดกับแท่นของเครื่องอัด (press) ก็ได้ จำนวนช่องว่างในแม่พิมพ์ขึ้นอยู่กับขนาดของแท่นเครื่องอัด (press) และขนาดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทำ

#### ตารางที่ 3 ข้อดีและข้อเสียของแม่พิมพ์แบบอัด

| ข้อดี                                         | ข้อเสีย                                        |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1. ราคาถูก                                    | 1. ชิ้นงานไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการ              |
| 2. ออกแบบง่ายสำหรับชิ้นงานที่ไม่ซับซ้อน       | 2. แม่พิมพ์มีน้ำหนักรวมมาก                     |
| 3. มีช่องอัดยางมากเมื่อกว่าแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด | 3. ใช้เวลานานในการเปลี่ยนยางเข้า-ออกแต่ละครั้ง |
| 4. มียางเสียน้อยกว่า                          | 4. ไม่เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและบาง  |
| 5. วางชิ้นส่วนโลหะที่จะประกอบได้ง่าย          |                                                |

ที่มา: Sommer (2003)

### แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด (Transfer Mould)

หลักการของแม่พิมพ์กึ่งฉีด คือ ยางจะอ่อนตัว และถูกอัดให้กระจายจากส่วนหนึ่งของแม่พิมพ์ซึ่งเรียกว่า pot ไปที่ช่องของแม่พิมพ์ที่เป็นรูปร่างผลิตภัณฑ์ วิธีการนี้สามารถใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อน หรือมีชิ้นส่วนของสิ่งอื่น ๆ ประกอบอยู่ภายในส่วนของผลิตภัณฑ์ หรือแม้กระทั่งผลิตภัณฑ์ชนิดที่มีส่วนของโลหะประกอบด้วย ซึ่งชิ้นส่วนโลหะจะถูกวางยึดในช่องว่างของแม่พิมพ์ และยางจะถูกฉีดให้เชื่อมติดกับส่วนของโลหะ โดยที่โลหะอาจเคลื่อนที่ทำให้เกิดความเสียหายกับแม่พิมพ์ได้ ถ้าใช้แม่พิมพ์แบบธรรมดา ดังนั้นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังกล่าวนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้แม่พิมพ์แบบอัดธรรมดา

#### ตารางที่ 4 ข้อดีและข้อเสียของแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด

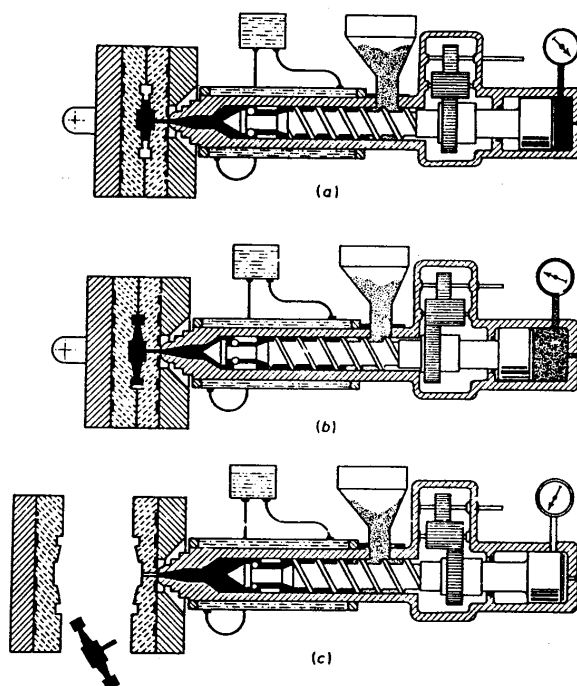
| ข้อดี                                                     | ข้อเสีย                                        |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1. เตรียมชิ้นงานได้ง่าย เพราะเตรียมชิ้นใหญ่เพียงชิ้นเดียว | 1. ราคาแพง                                     |
| 2. ใช้ระยะเวลาสั้นในการอบยางให้คงรูป                      | 2. แม่พิมพ์มีน้ำหนักมาก                        |
| 3. ยางเชื่อมกับโลหะได้ดีกว่า                              | 3. ใช้เวลานานในการเปลี่ยนยางเข้า-ออกแต่ละครั้ง |
| 4. มียางเสียน้อยกว่า                                      | 4. มักมีช่องอัดยางน้อยกว่าแม่พิมพ์แบบอัดธรรมดา |
| 5. วางชิ้นส่วนคละที่จะประกอบได้ง่าย                       |                                                |

ที่มา: Sommer (2003)

### แม่พิมพ์แบบฉีด (injection mould)

แม่พิมพ์แบบฉีด นี้อาจถือว่าพัฒนามาจากแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด และภาพที่ 21 แสดงขั้นตอนของการอัดยางโดยใช้แม่พิมพ์แบบฉีด เครื่องที่ใช้อัดยางเพื่อฉีดเข้าแม่พิมพ์ อาจใช้ชนิดสกรูหรือชนิดลูกสูบ (piston) ซึ่งลักษณะตัวเครื่องฉีดมีทั้งแบบแนวตรง และแบบแนวราบ เป็นเครื่องที่มีหลักการเช่นเดียวกับเครื่องที่ใช้ฉีดพองพลาสติก ยางที่จะป้อนเข้าเครื่องฉีดอาจอยู่ในรูปลักษณะเม็ดเล็ก ๆ รัว หรือชิ้นเล็ก ๆ

ในการขึ้นรูปยางโดยใช้แม่พิมพ์และอัดด้วยเครื่องอัดแบบธรรมดา (conventional press) นั้น ยางซึ่งเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ค่อยดี จะถูกทำให้คงรูปโดยอาศัยความร้อนจากภายนอกแม่พิมพ์ แต่ในเครื่องอัดยางแบบฉีด (และแบบกึ่งฉีด) ยางจะถูกหลอมด้วยความร้อนก่อนอย่างทั่วถึง อุณหภูมิของยางขณะที่ผ่านตามช่องทางสู่ช่องของแม่พิมพ์ สูงขึ้นถึง 70 องศาเซลเซียส ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เนื่องมาจากแรงเสียดสี ปฏิกริยาที่ทำให้ยางคงรูป จึงอาศัยความร้อนที่เกิดขึ้นอย่างทั่วถึงในยาง ดังนั้น จึงก่อให้เกิดการคงรูปที่มีความสม่ำเสมอและทั่วถึง แม้ว่าผลิตภัณฑ์ จะมีความหนาตามากก็ตาม และผลที่ได้ คือ ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทางกายภาพดี มีการกล่าวกันว่า ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเครื่องอัดยางแบบฉีดมีทนทานต่อการหักงอดีกว่าที่ทำจากการใช้แม่พิมพ์ ธรรมดาและอัดโดยเครื่องอัดธรรมดา



**ภาพที่ 21** ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยแม่พิมพ์แบบฉีดชนิดสกรู

- a สกรูหมุนไปข้างหน้า (จากขวาไปซ้าย)
- b ยางถูกฉีดเข้าแม่พิมพ์-ซ้ายมือ
- c ยางคงรูปแล้วสกรูหมุนกลับและผลิตภัณฑ์หลุดลอยออกจากแม่พิมพ์

ที่มา: วราภรณ์ (2542)



### ตารางที่ 5 ข้อดีและข้อเสียของแม่พิมพ์แบบฉีด

| ข้อดี                                              | ข้อเสีย                                        |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1. เหมาะกับชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและชิ้นงานที่บาง | 1. ราคาแพงมาก                                  |
| 2. ใช้ระยะเวลาสั้นในการอบยางให้คงรูป               | 2. การออกแบบที่ซับซ้อน                         |
| 3. ยางเชื่อมกับโลหะได้ดี                           | 3. ใช้ความดันสูงตอนขึ้นรูป                     |
| 4. ชิ้นงานได้ขนาดตามที่ต้องการ                     | 4. มักมีช่องอัดยางน้อยกว่าแม่พิมพ์แบบอัดธรรมดา |
|                                                    | 5. วางชิ้นส่วนโลหะที่จะประกอบได้ยาก            |
|                                                    | 6. มียางเสียมาก                                |

ที่มา: Sommer (2003)

### ขั้นตอนสำหรับการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ (Blank) ยาง

การเตรียมชิ้นยางเพื่ออัดขึ้นรูปขึ้นอยู่กับแบบแม่พิมพ์ที่จะใช้การใช้แม่พิมพ์แบบอัดธรรมดาต้องการชิ้นยางที่มีน้ำหนักและรูปร่างแน่นอนและใกล้เคียงกับช่องของแม่พิมพ์ ซึ่งอาจเตรียมจากการตัดจากแผ่นยางที่ได้รีดเรียบมาแล้ว หรืออาจเตรียมจากยางที่ใช้เครื่องดันยางเป็นเส้นหรือรีวมาแล้วตัดต่อให้ได้ชิ้นยางตามแบบของแม่พิมพ์

แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด ต้องการชิ้นยางเป็นไปได้ทั้งแผ่นหรือเม็ดหยاب ๆ ในปริมาณที่เพียงพอสำหรับช่องของแม่พิมพ์ บวกปริมาณที่เกินบ้างใน pot ส่วนเทคนิคการอัดโดยใช้พิมพ์แบบฉีดจะใช้ยางม้วนในลักษณะของรีวยางหรือเม็ดหยاب ๆ ก็ได้

ในการที่จะลดเวลาของการอัดพิมพ์ ควรจะอุ่นยางให้ร้อนใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแม่พิมพ์เท่าที่จะทำได้ แต่ต้องระวังไม่ให้ยางร้อนจนอาจเกิดยางตายได้ การอุ่นยางก่อนใส่แม่พิมพ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจะขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความหนาแน่นมาก ๆ เป็นสิ่งที่ควรทำ เพื่อให้ยางสุกหรือคงรูปอย่างทั่วถึงภายในส่วนกลาง ซึ่งการอุ่นยางอาจใช้อ่างน้ำร้อน ตู้อบ ตู้ไมโครเวฟ

### การหดตัวของยางที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ (Mould Shrinkage)

ปัญหาเกี่ยวกับการหดตัวของผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญโดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์พวกชิ้นส่วนที่ใช้งานเครื่องกลและงานวิศวกรรม เช่น ยางอะไหล่ ยางซีล และยาง ปะเก็น ฯลฯ โดยปกติแล้วผลิตภัณฑ์ยางมักหดตัวหลังจากการอบคงรูปชิ้นงานแล้ว เพราะระหว่างการอบคงรูปยางใช้ความร้อน ซึ่งจะก่อให้เกิดการขยายตัวของทั้งแม่พิมพ์ (กรณีการอัดคงรูปโดยแม่พิมพ์) และยาง แต่การขยายตัวของทั้งสองสิ่งนี้มีความต่างกัน การหดตัวของผลิตภัณฑ์ยางแม่พิมพ์จะมากน้อยอย่างไร ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การขยายตัว (coefficient of expansion) ของยางที่คงรูปแล้ว และสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแม่พิมพ์ รวมทั้งอุณหภูมิของการอัดยางให้คงรูป ส่วนของยางที่อยู่ในแม่พิมพ์อย่างเต็มพิมพ์ ขณะการอบให้คงรูปจะหดตัวขณะที่เย็นตามอุณหภูมิห้อง การหดตัวของยางจะมากกว่าการหดตัวของแม่พิมพ์ เพราะยางมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวมากกว่าแม่พิมพ์ นั่นคือ การหดตัวของยางจะยิ่งมาก เมื่อยางและโลหะที่ใช้ทำแม่พิมพ์มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวแตกต่างกันมากและเมื่ออุณหภูมิของการอบให้ยางคงรูปต่างกับอุณหภูมิห้องมาก อย่างไรก็ตามการคำนวณหาองศาของการหดตัวของยางว่าจะมากหรือน้อยเพียงใดให้ได้ค่าที่แน่นอนนั้นค่อนข้างยาก เพราะสัมประสิทธิ์การขยายตัวของยางคงรูปจะเปลี่ยนแปลงไปตามส่วนประกอบของสูตร

โดยปกติแล้วสูตรยางที่มีเนื้อยางมาก จะให้ยางคงรูปที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวสูง สารตัวเติมมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ สารอื่น ๆ ซึ่งจะละลายได้ในอะซิโตน ได้แก่ สารตัวเร่ง สารป้องกันยางเสื่อม สารช่วยทำให้ยางนุ่ม เรซิน จีฟี่ ซัลเฟอร์ แพลทิส และยางรีเคลม เหล่านี้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวใกล้เคียงกับยาง ฉะนั้นในการคำนวณหาการหดตัวของยางจึงนับสารเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของยาง

### สารหล่อลื่นแม่พิมพ์ (Mould Lubricant)

สารใช้เป็นตัวช่วยในการทำให้แม่พิมพ์ลื่น เพื่อช่วยการแกะชิ้นงานยางที่อบคงรูปแล้ว ออกได้ง่ายเป็นสารพวก surface-active เช่น พวกน้ำยาล้าง (detergents) สบู่ (wetting agent) ซิลิโคน ดิสเพ็นซันของพวกเปิงทาลด์ ไมคา และสารพวกกรดไขมัน การใช้ไขมัน ผันหรือขูดแปรงทา สารหล่อลื่นอีกพวกหนึ่งจะเป็นพวกที่มีลักษณะ “แห้ง” ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสาร PTFE (polytetrafluoroethylene) หรือ Polyethylene ที่มักจะทำในรูปสารละลายและใช้จาก aerosol

ปริมาณการใช้สารช่วยการหล่อลื่นแม่พิมพ์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ รูปร่างของแม่พิมพ์ ชนิดของสารหล่อลื่น ชนิดและเกรดของยาง

ข้อเสียประการสำคัญของการใช้สารช่วยการหล่อลื่น คือ เกิดการฟอร์มสารบางอย่างที่ผิวแม่พิมพ์ สารเหล่านี้มาจากสารหล่อลื่นที่ตกค้างสะสม และอาจเปลี่ยนแปลงสภาพซึ่งจำเป็นต้องคอยเอาออก มิฉะนั้นจะทำให้ผิวแม่พิมพ์เป็นรอยได้

การใช้สารหล่อลื่น ควรพยายามใช้น้อยที่สุด มิฉะนั้นจะเกิดปัญหากับชิ้นงานยางที่อัดออกมาอาจเชื่อมกันไม่ดี นอกจากนี้ในการใช้ซิลิโคนหรือสารหล่อลื่นอื่น ๆ สามารถที่จะทำให้เกิดข้อเสียที่ยากจะเชื่อมติดโลหะไม่ดี และอาจเกิดปัญหาการสุกก่อนเมื่อนำชิ้นงานยางติดโลหะนี้ไปใช้ในงานที่เกี่ยวข้องด้านไฟฟ้า

### **การทำความสะอาดแม่พิมพ์**

การใช้แม่พิมพ์นาน ๆ ไป จะมีสารอินทรีย์จากส่วนผสมที่ใช้ในยางหรือสารสะสมจากตัวที่ใช้หล่อลื่นแม่พิมพ์ติดอยู่ที่ผิวแม่พิมพ์ แม้การใช้ซิลิโคนเป็นตัวช่วยหล่อลื่นก็สามารถเกิดสิ่งสกปรกสะสมบนผิวแม่พิมพ์หลังจากใช้ไปนาน ๆ ได้ จึงจำเป็นต้องทำความสะอาดแม่พิมพ์ให้อัดชิ้นงานยางได้ดี ความถี่ของการทำความสะอาดขึ้นอยู่กับการใช้งานแม่พิมพ์

ในการทำความสะอาดแม่พิมพ์ ให้ใส่แม่พิมพ์ลงในอ่างล้าง ในสมัยก่อนมักใช้แช่ในอ่างกรด chromic อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากกรดมักทำลายเนื้อแม่พิมพ์ ปัจจุบันจึงใช้แช่ในด่างแทน ซึ่งมักจะใช้ด่างพวกโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) โดยจะแช่แม่พิมพ์ประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำ

หลักการทำความสะอาดเบื้องต้นดังกล่าวแล้ว จะใช้น้ำฉีดล้างแม่พิมพ์อีกอุปกรณ์ชนิดนี้ประกอบด้วย การใช้น้ำที่มีเม็ดแก้วละเอียดฉีดด้วยแรงดันประมาณ 8 บาร์ หรือต่ำเพียง 3 บาร์ สำหรับแม่พิมพ์ที่บาง จากนั้นจึงทำให้แม่พิมพ์แห้ง แล้วเคลือบผิวแม่ด้วยซิลิโคน เพื่อกันแม่พิมพ์เป็นสนิม จะใช้น้ำมันหรือน้ำมันกันสนิมทาผิวแม่พิมพ์ การใช้แม่พิมพ์ที่หลังการทำความสะอาดจะป้องกันแม่พิมพ์ขึ้นสนิม

### วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์

ในการเลือกใช้วัสดุที่จะมาทำแม่พิมพ์นั้นจะต้องคำนึงถึงจุดวิกฤตที่มีมากกว่าแม่พิมพ์อัดและแม่พิมพ์ส่งถ่าย ซึ่งในแม่พิมพ์นั้นจะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขของการควบคุม ซึ่งจะมี ความดันที่สูง อุณหภูมิที่สูงและความถี่ของไซเคิลการทำงาน ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวนี้อาจทำให้เกิด อัตราการสึกหรอที่สูง โดยเฉพาะจุดวิกฤตของขอบแม่พิมพ์ที่มาเชื่อมต่อกัน (parting line) ดังนั้น ในการเลือกเหล็กที่จะนำมาทำแม่พิมพ์นั้นจะต้องมีคุณภาพที่สูงซึ่งจะทำให้เกิดความคุ้มค่า ในการลงทุน ในการสร้างแม่พิมพ์จากวัสดุที่มีคุณภาพในตอนต้นอาจจะเปลี่ยนบางแม่พิมพ์ที่มี จุดวิกฤตสูง ๆ ก่อน และต่อจากนั้นทำการเปลี่ยนทั้งหมด ซึ่งจะทำให้คุณภาพของแม่พิมพ์สูงขึ้น และจะทำให้ผลิตชิ้นงานได้นานขึ้น

ความเค้นตกค้าง (residual stress) ในแม่พิมพ์จะเกิดจากการขึ้นรูปของแม่พิมพ์ หรือ กระบวนการทางความร้อนที่เกิดขึ้นตอนสร้างแม่พิมพ์ หรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน ของเหล็ก เช่น การรีดเย็น หรือการ โกงงอ ในกรณีของการเกิดความเค้นตกค้างก่อนขึ้นรูปแม่พิมพ์ คือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างสูงของชิ้นแม่พิมพ์ เช่น การเชื่อม การขึ้นรูป และการชุบแข็ง (hardening) ในกรณีของความดันที่เกิดจากความร้อน (thermal stress) ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรง เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ซึ่งจะทำให้ค่าความเค้นคราก (yield strength) เพิ่มขึ้น

วิธีการ subharmonic stress จะเป็นวิธีการที่จะทำให้ความเค้นตกค้างนี้ลดลง เหล็กที่ใช้ ทำแม่พิมพ์นั้นต้องการเนื้อเหล็กที่สะอาดและปราศจากสิ่งปลอมปน รูพรุนเล็ก ๆ ที่เนื้อเหล็ก (porosity) และความบกพร่องอื่น ๆ ซึ่งจะมีผลต่อการสร้างแม่พิมพ์เป็นอย่างมาก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ การเลือกเหล็กที่ใช้ผลิต

เหล็กที่ผ่านกระบวนการทำให้แข็งนั้นจะขึ้นรูปได้ยากกว่าเหล็กอ่อน ซึ่งจะต้องใช้เวลา มากกว่าการขึ้นรูปเหล็กอ่อน ประมาณ 28% เหล็กที่ผ่านกระบวนการทำให้แข็งนั้นจะนิยมใช้ สร้างแม่พิมพ์นั้นเพราะจะให้ความทนทานที่สูง ในกระบวนการสร้างในปัจจุบันและการปรับปรุง คุณภาพของเหล็กนั้นต่างจากสมัยก่อน ซึ่งมีความยากมากกว่าโดยมีความยากในการขึ้นรูป เหล็กที่นำมาใช้ทำแม่พิมพ์ ซึ่งต้องการลักษณะจำเพาะของเหล็กที่จะนำมาสร้างแม่พิมพ์ โดยต้องการความมั่นคงและความง่ายในการเชื่อมประสานเหล็ก เหล็ก NAK 55 จะครอบคลุม คุณสมบัติที่ต้องการของเหล็กที่ใช้ทำแม่พิมพ์ ซึ่งจะใช้แทนเหล็ก 4140 และ P 20

เหล็กบางชนิด สามารถนำผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (การปรับปรุงทางความร้อน) ซึ่งจะทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของความแข็งนั้นจะเกิดขึ้นจากบริเวณผิวที่สึกลงไปภายในผิวของแม่พิมพ์ ซึ่งต้องการความแข็งที่มีลักษณะคงที่เท่า ๆ กันตลอดในทุกกระดပ်ของความลึก ความแข็งสูงของแม่พิมพ์นั้น จะช่วยให้บริเวณพื้นที่ภายในของแม่พิมพ์จะทนต่อแรงกดที่เกิดขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดรอยร้าวขึ้น ซึ่งจะเกิดจากการทำงานของวงจรการทำงานของแม่พิมพ์ รอยกดที่จะทำให้เกิดการสึกหรอที่มีรอยร้าวในส่วนมากจะเกิดในจุดที่เป็นรอยกดของบริเวณพื้นที่ ๆ เป็นจุดวิกฤตในแม่พิมพ์ ที่ใช้เหล็กอ่อนในการทำ ในการที่จะลดรอยร้าวที่เกิดจากการกดนั้น จะสำคัญมาก ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์นั้นสูงขึ้นส่วนใหญ่แล้วจะใช้ชนิดของเหล็กในการทำแม่พิมพ์ได้ตาม American National Standards Institute (ANSI)

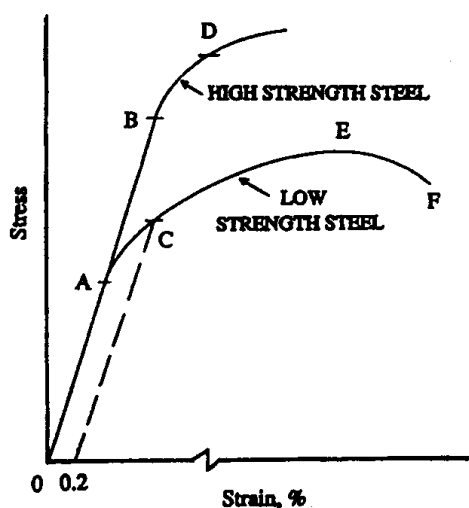
- 4140 และ 4130 alloy steel สำหรับตัวแม่พิมพ์ที่ต้องการความทนทาน
- 420 , S45 C และ P 10 tool steel สำหรับรูปทรงของชิ้นงานในแม่พิมพ์
- H13 hot - rolled steel สำหรับตัวดันชิ้นงานออก (ejectors)
- 6150 alloy steel สำหรับหัวฉีด (nozzles)

ข้อมูลเกี่ยวกับการเลือกใช้เหล็กในการผลิตแม่พิมพ์สามารถที่จะเลือกได้จากผู้จัดจำหน่ายและมาตรฐานต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ และการสร้างแม่พิมพ์ ตัวอย่างในเหล็กคาร์บอนสามารถที่จะแบ่งกลุ่มออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

- กลุ่มที่มีคาร์บอนต่ำ (low carbon (มีคาร์บอนไม่เกิน 0.35%)) จะมีราคาถูกที่สุด และสามารถเพิ่มความแข็งได้โดยการเพิ่มคาร์บอน (carburizing) เท่านั้น
- กลุ่มที่มีคาร์บอนปานกลาง (medium carbon (0.35% ถึง 0.5%)) สามารถที่จะทำให้แข็งได้ประมาณ 54 Rc ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคาร์บอนที่มีอยู่
- กลุ่มที่มีคาร์บอนสูง (high carbon (0.5 ถึง 1%)) สามารถที่จะทำให้ความแข็งที่สูงได้ คาร์บอนที่มีอยู่ประมาณ 0.3% สามารถที่จะทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นได้ โดยปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่สูงจะทำให้ผลกระทบในการปรับปรุงความแข็งนั้นน้อยลง ซึ่งระบบ ANSI จะอธิบายได้ดังนี้ ตัวอย่างเหล็ก 4140 , 41 เป็นตัวเลขที่บอกชนิดของโลหะผสมที่มีอยู่ ซึ่งในที่นี้จะ ได้แก่ Chromium และ Molybdenum, และ 40 จะบอกถึงเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอน คือ มีคาร์บอนอยู่ 0.4%

การสึกหรอที่เกิดขึ้นนั้นโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในรูปของการสึกหรอของการขูดขีด (abrasive wear) และการสึกหรอโดยการยึดติด (adhesive wear) การสึกหรอโดยการขูดขีดนั้นจะเกิดเมื่อส่วนที่แข็งกดลงไปบนบริเวณของแม่พิมพ์ โดยสังเกตได้จากบริเวณที่โดนกดนั้นจะมีลักษณะเป็นรอยมันวาวเกิดขึ้นในลักษณะที่เพิ่มขึ้น การสึกหรอโดยการยึดติด ลักษณะการเกิดจะเกิดขึ้นคล้ายกันทั้งในวัสดุที่มีความแข็งและอ่อน ซึ่งจะเกิดที่หน้าสัมผัสของแม่พิมพ์ที่มีความแข็งที่แตกต่างกัน 4 ถึง 8 จุดในความแข็ง Rc ซึ่งจุดที่จะเกิดการสึกหรอนั้นจะเกิดกับเหล็กที่มีความแข็งแรงที่ต่ำกว่า

ความเค้นครากนั้นเป็นค่าที่สำคัญตัวหนึ่งที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบแม่พิมพ์ ซึ่งค่าความเค้นครากของเหล็กนั้น จะทำการวัดโดยการดึงหรือการอัด โดยการกำหนดในตัววัสดุ ถ้าจุดนั้นได้รับแรงและกลับมาที่จุดเดิม นั้น เราจะเรียกว่าอยู่ในช่วงของการยืดตัวในช่วงอีลาสติก (elastic deformation) หรือช่วงอีลาสติก และในช่วงที่ค่าความเค้นของวัตถุนั้นอยู่เหนือจุดความเค้นคราก จะเกิดการยืดตัวอย่างถาวร โดยปกติค่าของความเค้นครากในรูปของค่าเหลือมของความเค้นคราก โดยจะอยู่ที่ 0.10% ถึง 0.2% ของความเครียด ดังภาพที่ 22 จะแสดงเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น - ความเครียดของเหล็กซึ่งจะมีความสัมพันธ์กัน



**ภาพที่ 22** แสดงถึงเส้นความสัมพันธ์ของความเค้น - ความเครียด

ที่มา: Sommer (2003)

เหล็กที่มีความแข็งแรงสูงกับด้าและแสดงเส้นเหลื่อมของเส้นสำหรับความเครียดที่ 0.2% ที่เหล็กความแข็งแรงต่ำ ที่จุด A นั้นจะแสดงถึงจุดความเค้นคราก ของเหล็กที่มีความแข็งแรงต่ำ ; B ความเค้นครากสำหรับเหล็กที่มีความแข็งแรงสูง ; C เป็นจุดแสดงเส้นที่ 0.2% ของความเค้นครากของเหล็กความแข็งแรงต่ำ ; D แสดงเส้นที่ 0.2% ของจุดความเค้นคราก สำหรับเหล็กที่มีความแข็งแรงสูง ; E เป็นจุดสูงสุดของความเค้นของเหล็กที่แข็งแรงต่ำ ; F ความเค้นที่จะทำให้เกิดการขาดสำหรับเหล็กความแข็งแรงต่ำ

โดยทั่วไปแล้วที่ความเค้นที่เกิดขึ้น 10,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) จะนิยมใช้ความแข็งแรงที่ 44 Rc และใช้เหล็กที่มีความแข็งแรงสูง ซึ่งโดยทั่วไปในการควบคุมการทำงานที่อุณหภูมิdannั้นจะสำคัญมากสำหรับวัสดุที่เป็นยาง (TSEs) ค่ายังโมดูลัส (Young's Modulus) สำหรับเหล็กคาร์บอนจะลดลงประมาณ 10% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิปกติไปเป็น 250°C หรือ 400 °F และสำหรับแม่พิมพ์ที่ทำมาจากเหล็กสแตนเลส ค่าจะเพิ่มเป็น 10.9% ที่อุณหภูมิ 68°F ไปเป็น 400 °F สิ่งสำคัญคืออุณหภูมินั้นจะทำให้เหล็กเกิดการขยายตัวซึ่งจะเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบทั้งแม่พิมพ์ตัวบนและตัวล่าง

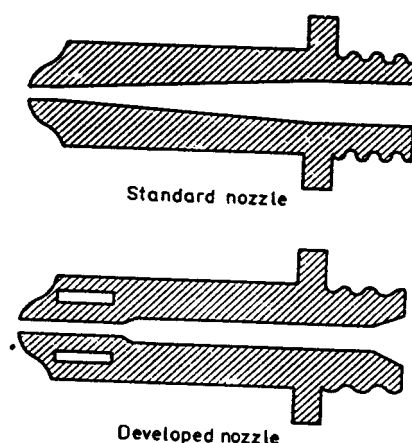
ส่วนใหญ่แล้วแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กหล่อจะมีค่าความเค้นคราก จะอยู่ประมาณ 50,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ซึ่งจะมีค่าความปลอดภัยอยู่ที่ 7 โดยความเค้นที่ใช้ในการทำงานโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในประมาณ 700 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ควรที่จะทำหน้าสัมผัสของแม่พิมพ์ตัวบนให้มีหน้าสัมผัสที่น้อยในการที่จะสัมผัสกับแม่พิมพ์ตัวล่างเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงความเสียหายหน้าสัมผัสของแม่พิมพ์ตัวล่างพื้นส่วนใหญ่จะเกิดการสึกหรอเมื่อมีการใช้งานไปแล้วระยะหนึ่ง

ที่สำคัญต้องพิจารณาว่าการเลือกยางนั้นเลือกชนิดไหนและมีส่วนผสมอะไรบ้างแล้วจึงพิจารณาในการที่จะเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ทำแม่พิมพ์และดูความสะดวกในการขึ้นรูปและความแตกต่างในระดับของการขัดเงา (polishing) ในเหล็ก P20 และการดูแลรักษาแม่พิมพ์

### การออกแบบหัวฉีด (Nozzle Design)

ในการออกแบบหัวฉีดเป็นตัวอย่างของ Izod และ Morris หัวฉีดมาตรฐานจะมีลักษณะเป็นกรวยจากใหญ่ไปเล็ก (tapering) ผ่านเข้าไปในรูฉีด ยางจะผ่านเข้ามาและไหลออกไปโดยจะสัมผัสที่ผิวภายในของหัวฉีด

การออกแบบใหม่ของหัวฉีด ดังแสดงในภาพที่ 23 จะช่วยในการสร้างการไหลวนและช่วยให้หัวฉีดนั้นปราศจากเนื้อเยื่อที่ติดระหว่างการฉีดที่จุดปลายของหัวฉีดจะมีช่องที่ทะลุผ่าน โดยมีตัวควบคุมอุณหภูมิโดยของเหลวที่ไหลวนอยู่ ซึ่งจะขัดขวางการยุบตัวของเนื้อเยื่อที่บริเวณปลายของหัวฉีด โดยจะเกิดเมื่อกระบอกฉีดมีอุณหภูมิที่สูงและหัวฉีดนั้น ไปสัมผัสกับอุณหภูมิที่สูงของแม่พิมพ์ ซึ่งความร้อนจะผ่านเข้ามาได้



**ภาพที่ 23** หัวฉีดที่ได้มีการพัฒนาจากมาตรฐานเดิม

ที่มา: Sommer (2003)

### **การออกแบบแม่พิมพ์ (Mould design)**

ในการออกแบบแม่พิมพ์สิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาคือเมื่อมีการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดนั้น จะต้องพิจารณาที่จุดการเชื่อมโยงกันขององค์ประกอบต่าง ๆ ทั้งหมดในการทำงานและควบคุมแม่พิมพ์โดยทั่วไปแล้วในการเปลี่ยนชิ้นงานไปจากเดิมนั้นจะต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ซึ่งจะต้องดูถึงจำนวนของผลกระทบของส่วนผสมของยางที่ไหลไปในช่องทางไหลในช่องรูที่จะเข้าแม่พิมพ์ (sprue) และตลอดทางเดินของยางภายในเครื่องฉีดยางตลอดจนที่เนื้อยางไหลเข้าไปในแม่พิมพ์จนเต็มแม่พิมพ์



ในการฉีดยางนั้นจะต้องพิจารณาถึงปัจจัยที่เกิดขึ้นทั้งกระบวนการ ซึ่งจะมีความสำคัญมาก เพราะในการออกแบบแม่พิมพ์จะต้องออกแบบระยะเวลาในการทำงานของขั้นตอนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ฉีดจนเสร็จกระบวนการ ในความสำเร็จของการควบคุมแม่พิมพ์ฉีดนั้นจะขึ้นอยู่กับ การออกแบบแม่พิมพ์ที่ดี

Mulligan (1967) กล่าวว่าไม่มีหนังสือคู่มือในการสร้างแม่พิมพ์ และกระบวนการ ในการออกแบบในการสร้างแม่พิมพ์ฉีดยางและการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดนั้นจะต้องใช้ความสามารถ และการทดลองเท่านั้น และการออกแบบแม่พิมพ์นั้นจะเป็นกุญแจสำคัญในการช่วยลดกำลังคนลงซึ่งจะขึ้นอยู่กับระบบในการออกแบบว่าดีมาน้อยแค่ไหน

ในช่วงแรกนั้นจะพิจารณาเริ่มต้นที่เครื่องจักรก่อนว่าเป็นเครื่องที่ฉีดในแนวตั้งหรือแนวนอนเพราะจะต้องพิจารณาในการเปิดแม่พิมพ์ออก เครื่องที่เปิดแม่พิมพ์ในแนวนอนจะได้เปรียบโดยที่เมื่อขณะที่แม่พิมพ์เปิดออก แม่พิมพ์จะแยกจากกันได้ง่ายโดยน้ำหนักของตัวเอง หรือจะใช้กลไกอัตโนมัติในการแยกออกจากกันโดยอุปกรณ์ในการเคลื่อนที่ขึ้นลง

แม่พิมพ์ที่เปิดในแนวตั้งโดยปกติจะจ่ายเนื้อยางไปในช่องทางที่เชื่อมต่อกันเข้าไปในผิวของรูปทรงชิ้นงาน โดยจะเข้าไปพบกันที่กึ่งกลางของแม่พิมพ์ แม่พิมพ์ที่เปิดในแนวนอนโดยปกติจะจ่ายเนื้อยางผ่านเข้าไปในช่องทางจ่ายผ่านช่องทางไหลซึ่งจะสร้างขึ้น จะตัดกันที่ครึ่งของแม่พิมพ์

ในการพิจารณาที่ความต้องการ โดยให้ขนาดของเรื่องฉีดในการใช้ขึ้นอยู่กับ

1. ขนาดและปริมาตรขององค์ประกอบในการสร้าง
2. จำนวนของแม่พิมพ์ในการสร้างต่อครั้ง
3. พื้นที่ของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์และแรงที่ใช้ในการเลือกแม่พิมพ์
4. การฉีดหรือการส่งถ่ายความดันนั้นจะสำคัญต่อเนื้อยางที่จะไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของแม่พิมพ์และตัวเนื้อยาง

ที่เห็นได้ชัดเจนแบบคร่าว ๆ คือ ความจุของเนื้อยางภายในรูปทรงชิ้นงาน (shot capacity) แรงดันในการกด และแรงดันในการฉีดของเครื่องจักร กฎในการออกแบบแม่พิมพ์ ผลที่เกิดจากแรงดันในการฉีด และพื้นที่ผิวของแม่พิมพ์รวมกับช่องทางไหลน้อยกว่าแรงปิดของแม่พิมพ์มาก

วัสดุที่จะนำมาสร้างแม่พิมพ์นั้นมีส่วนสำคัญมาก แม่พิมพ์ที่ดีนั้นจะทำให้เกิด flash แบบอิสระ หรือ flash ทั่วทั้งหมวดของผิวแม่พิมพ์ ซึ่งจะต้องสร้างจากเหล็กที่แข็งแรงทนต่อแรงดันในการฉีด  $137\text{--}206\text{ MN/m}^2$  ( $20,000\text{--}30,000\text{ lbf/in}^2$ ) ที่กระทำ การปิดตัวจะทำให้เกิด flash และความเค้นจะต้องไม่มีก่อนที่จะเสร็จ และจะต้องหลีกเลี่ยงการปิดตัวเนื่องจากความร้อน และแรงที่กดและบริเวณผิวที่ประกบกันนั้นจะต้องเรียบสนิทกัน แรงกดที่กระทำนั้นจะต้องทำในบริเวณผิวรอบ ๆ ผิวรูปทรงชิ้นงาน ช่องทางไหล ช่องทางเข้า และช่องทางจ่าย และต้องทำให้พื้นที่ส่งจ่ายและรอยต่อนั้นแนบสนิทกันเวลาปิดแม่พิมพ์

การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดสำหรับยางนั้นสำคัญที่จะต้องคำนึงถึง

1. การควบคุมอุณหภูมิสูงในการทำงานบ่อยครั้ง  $200\text{--}230\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $392\text{--}446\text{ }^{\circ}\text{F}$ )
2. การเป็นของเหลวของเนื้อยาง
3. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหลว (เนื้อยาง) โดยรวดเร็ว

เมื่อแม่พิมพ์มีความร้อนเกินกว่า  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $392\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) แม่พิมพ์จะเกิดจากการขยายตัวให้มีการเคลื่อนตัวที่สูง ทำให้ตำแหน่งต่าง ๆ นี้ไม่ได้แนวตามเดิมซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ ใช้หมดเหล็กในการนำร่องเครื่องขับออก (ejectors) จะต้องทำให้มีความหนา ถ้าไปขัดขวางการเคลื่อนของแม่พิมพ์ในการปิดควรที่จะแก้ไขให้ถูกต้อง ในกรณีที่ไม่ได้ขนาดของแม่พิมพ์ตามที่กำหนด อาจจะทำให้เกิด flash ขึ้นอย่างมากได้ แท่งเหล็กในการกำหนดระยะการทำให้เป็นแท่งเรียงเพื่อที่จะทำให้ตำแหน่งนั้นแม่นยำ และจะต้องพิจารณาถึงความแตกต่างกันของการขยายตัวระหว่างวัตถุทั้งสอง ซึ่งจะต้องสร้างช่องที่สร้างขึ้นระหว่างแท่งให้เรียวขึ้น ซึ่งอาจจะสูญเสียแนวเส้นในการปิด ตัวแท่งเหล็กกำหนดระยะตัวเมียนั้นจะสวมอยู่รอบตัวผู้ เนื้อยางจะไหลเข้าไปในช่อง วิธีการในการกำหนดตำแหน่งจะทำการกำหนดที่สี่ตำแหน่งที่มุมด้านขวาของแต่ละชิ้น และทำการจำกัดการขยายตัวให้หมดไปในทิศทางเคลื่อนที่

ได้แนะนำให้ใช้พินท์และมุดในการให้ตำแหน่งที่ถูกต้องโดยจะมีลักษณะที่เดียวในการสวมกัน และที่สำคัญจะต้องมีความแข็งแรงเพื่อที่จะรักษารูปร่างเดิมไว้เมื่อมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อน

ระดับของเหล็กที่ใช้จะต้องดีกว่าโดยปกติทั่วไปที่ใช้ทำแม่พิมพ์อัด เช่น ต้องการสเตนเลส (stainless) เพื่อป้องกันสนิม มีความแข็งแรง มีการทำให้แข็งและเหล็กนั้นจะต้องเรียบ

เหล็กที่มีความหนาแน่นสูงนั้นจะช่วยให้ระยะเวลาในการใช้แม่พิมพ์นานขึ้น โดยเฉพาะในพื้นที่สัมผัสกับเนื้อยาง ในการเพิ่มขึ้นของอายุการใช้งานของพื้นที่สัมผัสกับยางนั้นควรที่จะทำการขัดให้มีความมันวาวที่สูง และควรทำในชุด Pins และตัวแผ่นประกบด้วยการขัดให้มันวาวขึ้นจะทำให้คุณสมบัติในการไหลดีขึ้นในช่องทางไหล

### การให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ (Mould Heating)

ในการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์โดยทั่วไปแล้ว จะเลือกใช้แบบการใช้ไฟฟ้าโดยใช้ขดลวดให้ความร้อนเป็นแผ่นหรือแบบปลอกในการให้ความร้อน ซึ่งจะเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อย ๆ ก็คือการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ที่มีพื้นที่ที่กว้าง และการทำให้อุณหภูมิคงที่ในการจะส่งถ่ายความร้อนให้แก่แม่พิมพ์เครื่องจ่ายความร้อนที่บิดตัวตามรูปทรงภายในชิ้นงานสามารถที่จะทำให้เกิดจุดความร้อนที่บริเวณต่าง ๆ ได้การระบายความร้อนสามารถที่จะลดอุณหภูมิที่จะผ่านไปยังผิวของแม่พิมพ์ที่จะไหลผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์

การให้ความร้อนโดยกระแสไฟฟ้าโดยความต้านทานหรือการนำปอกติจะใช้แหล่งจ่ายให้กับตัวรับประมาณ  $1.22 \text{ w/cm}^2$  ( $20 \text{ w/in}^2$ ) ชุดโทโมคัมเปิลจะเป็นตัวที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิในการเปิดและปิด ขดลวดให้ความร้อนที่อยู่รอบ ๆ แม่พิมพ์จะทำให้ความร้อนที่จ่ายคงที่ และจะค่อย ๆ จ่ายความร้อนน้อยลง และตัดการจ่ายไฟเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนในการสูญเสียตำแหน่งที่เกิดจะเกิดกับแม่พิมพ์ที่มีความยาว การจ่ายความร้อนโดยใช้ขั้วคาร์โทดจะใช้คลื่นความถี่ในแม่พิมพ์ที่มีความบาง (หนาสูงสุดประมาณ 7.6 ซม. (3 นิ้ว) ต่อหนึ่งด้าน) ความร้อนภายในแม่พิมพ์นั้นไม่จำเป็นโดยจะจ่ายความร้อนโดยใช้แผ่นประกบให้ความร้อนแทน

ของเสียที่เกิดจากเนื้อวัสดุในขั้นตอนในการฉีดจะเกิดขึ้นในช่องทางไหลและช่องทางจ่าย ซึ่งของเสียนั้นจะทำให้น้ำหนักของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อเสร็จกระบวนการ

ระบบช่องทางไหลเย็นได้คิดขึ้นมาเพื่อที่จะลดของเสียที่เกิดจากการไหลของเนื้อภายในระบบช่องทางไหล โดยทั่วไปจะทำให้เย็นช่องภายในแม่พิมพ์โดยการขยายกระบอกฉีดของเครื่องจักร โดยจะทำการฉีดเนื้อเข้าไปในรูปทรงชิ้นงานโดยตรงในแต่ละชั้นขณะที่เปิดแม่พิมพ์ออก แม่พิมพ์จะแยกเนื้อที่ไหลไปในช่องและจะมีระยะทางที่สั้นในแต่ละชั้น

แม่พิมพ์จะประกอบด้วย

1. พื้นที่ของรูปทรงภายในแม่พิมพ์ฉีด
2. มีบริเวณฉนวนกันความร้อน
3. มีบริเวณที่กักเก็บเนื้อที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดที่จะทำให้เนื้อเกิดการเกิดปฏิกิริยา

ในการที่จะทำให้ปลอดภัยของความหลากหลายของอุณหภูมิที่จะทำให้ต่ำกว่าจุดที่จะทำให้เนื้อเกิดการเกิดปฏิกิริยา (vulcanisation) อุณหภูมิจะอยู่ที่ประมาณ  $120 - 130^{\circ}\text{C}$  ( $248 - 266^{\circ}\text{F}$ ) ในการที่จะตรวจสอบเช็คดูอาจจะทำได้จากการดูเนื้อที่เก็บไว้ภายในหัวฉีดของเครื่องฉีดหลังจากการหน่วงเวลาการหมุนของสกรู โดยจะดูได้จากลักษณะของยางว่าเกิด fresh และสังเกตจากสีที่เกิดขึ้น

การใช้ระบบช่องทางไหลแบบเย็นนั้นจะทำให้ประหยัดเนื้อภายในการฉีดแต่จะต้อง stripped ในแต่ละชั้นของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ ซึ่งจะเป็นส่วนที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาสำหรับการออกแบบที่ดี ในการออกแบบช่องทางไหลของเนื้อที่คืนนั้นจะต้องดูนอกเหนือจากการคุ้มทุนด้วยซึ่งจะต้องพิจารณาถึงการช่วยในการควบคุมชิ้นงานที่จะออกมาจากแม่พิมพ์

### ช่องทางไหลเข้าในแม่พิมพ์ (Sprue)

ตัวช่องทางไหลนั้นจะเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเครื่องฉีดกับแม่พิมพ์ฉีดยางซึ่งสามารถที่จะพิจารณาได้จากชิ้นงานและแม่พิมพ์ลักษณะทางเข้าจะมีลักษณะที่เข้าไปในช่องรูที่เล็กแล้วขยายออกไปจนใหญ่ มีลักษณะเป็นรูที่เรียว (taper) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นทางเข้าและออกหลังจาก

เสร็จจากร่างงานซึ่งบางที่เราสามารถที่จะออกแบบช่องทางเข้าให้ตรงกับตัวโพรงของชิ้นงานได้เลย ถ้าอยู่ในลักษณะของชิ้นงานเดี่ยวแต่โดยปกติแล้วชิ้นงานจะมีอยู่หลายชิ้นซึ่งจะต้องทำช่องทางวิ่งให้เนื้อยางไหลเข้าไปในตัวแม่พิมพ์

### การออกแบบช่องทางไหล (Runner Design)

โดยทั่วไปแล้วการออกแบบช่องทางวิ่งนั้นจะออกแบบเป็นทรงกลมซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการไหลของเนื้อยางและง่ายต่อการเปลี่ยนทิศทางแต่จะทำให้ต้นทุนของการทำแม่พิมพ์สูงขึ้น โดยทั่วไปจะออกแบบทั้งเป็นแบบช่องทางวิ่งที่ร้อนหรือช่องทางวิ่งที่เย็น (hot or cold runner)

ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดยาง เนื้อยาง (compound) ในช่องทางวิ่งที่ร้อนจะเกิดการยึดตัวกันภายในเนื้อยางเมื่อโดนความร้อน (cross links) และที่อยู่ในกระบวนการทำงาน แต่ในระบบทางวิ่งเย็นนั้นจะไม่เกิดขึ้น

ในการพิจารณาระยะทางระหว่างหัวฉีดจะถึงตัวชิ้นงานต้องมีการออกแบบที่เหมาะสม โดยปกติชิ้นการไหลของเนื้อยางจะไหลออกจากหัวฉีดเข้าไปในช่องทางจ่ายยางผ่านเข้าไปในช่องทางไหลผ่าน ช่องทางไหลเข้าไปในทางเข้าและจะไหลผ่านเข้าไปในรูปชิ้นงานในแม่พิมพ์

ช่องทางไหลมีลักษณะเป็นช่องภายในแม่พิมพ์โดยจะได้รับเนื้อยางจากช่องทางจ่ายที่จุดศูนย์กลาง ช่องทางไหลนั้นจะต้องพิจารณาถึงฉนวนที่อยู่รอบ ๆ ช่องทางไหลต้องการออกแบบให้มีระยะทางสั้นและตรงกับรูปทรงชิ้นงานภายในแม่พิมพ์มากที่สุดเพื่อที่จะเป็นการลดของเสียจากเนื้อยางให้น้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้ระยะเวลาในการฉีดเนื้อยางเข้าไปในแม่พิมพ์นั้นสั้นลง ในการเลือกช่องทางไหลที่ดีนั้นจะต้องเหมาะสมที่จะใช้หน้าตัดของช่องทางไหลแบบไหน ซึ่งจะแบ่งเป็นแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม เป็นทรงกลม และครึ่งวงกลม ในการไหลนั้นจะต้องไหลผ่านโดยง่ายและที่มุมจะต้องทำเป็นแนวโค้งเพื่อลดความดันที่สูญเสียไป

ในการออกแบบช่องทางไหลนั้นสามารถใช้สมการในการช่วยได้โดยใช้คุณสมบัติของการไหล สมการ Poiseuille's สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (laminar (non-turbulent))

การไหลของของไหลแบบนิวโตเนียนในท่อ capillary แสดงดังสมการที่ 90

$$\frac{P}{\pi r^4} = 8L\mu V \quad (90)$$

โดยที่  $P$  = ความดันที่แตกต่างกันระหว่างจุดปลายและในท่อ  
 $L$  = ความยาวของท่อ  
 $\mu$  = ค่าความหนืดของของไหล  
 $V$  = ปริมาตรอัตราการไหล  
 $r$  = รัศมีของท่อ

การไหลของปริมาตรของของไหลแบบนิวโตเนียนจะเป็นอัตราส่วนของกำลังสี่ของรัศมีของท่อหรือพื้นที่หน้าตัดของท่อ โดยที่จะไม่มีการเพิ่มขึ้นของรัศมีของหัวฉีด ช่องทางไหล และช่องทางเข้า ซึ่งจะหาค่าของความแตกต่างในอัตราส่วนการไหลของของไหลที่ผ่านเข้าไปในตัวชิ้นงาน

ความดันที่สูงเกินไปหรือความต้านทานของการไหลจะเกิดที่บริเวณรอบ ๆ ท่อ ซึ่งจะขนานไปกับท่อซึ่งจะเป็นไปตามสัดส่วนของความยาวจะเป็นเหตุผลที่จะต้องออกแบบให้ช่องทางไหลที่มีความยาวน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ความดันที่ใช้ในการฉีดจะสูญเสียไปโดยไม่มีประโยชน์สำหรับช่องทางที่ยาวและแคบ

ความดันของเครื่องฉีดจะมีข้อกำหนดโดยความดันที่ลดลงขณะที่ไหลไปในช่องทางไหล แต่ถ้าใช้ความดันสูงสุดของเครื่องในการฉีดเนื้อเข้าไปในตัวแม่พิมพ์แล้วยังไม่สามารถที่จะชนะแรงดันที่สูงเกินไปนั้น ควรที่จะแก้ไขที่การเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางไหล และช่องทางไหลเข้าแม่พิมพ์ และจะต้องพิจารณาถึงขนาดที่ใหญ่ขึ้น

สมการที่กล่าวมานั้นในรายละเอียดของช่องทางไหลนั้นไม่สามารถที่จะนำไปใช้ได้กับของไหลที่ไม่ใช่ของไหลแบบนอนนิวโตเนียน (non – newtonian) ตัวอย่างของความหนืดของยางนั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนแต่ในการกำหนดความหนืดของยางให้ขึ้นอยู่กับอัตราเฉือน (อัตราการไหล) นั้นไม่ง่ายในกระบวนการฉีด ในการใช้สมการนั้นจะมีความยุ่งยากที่จะนำไปใช้ในช่วงที่มีอุณหภูมิที่ค่อยเพิ่มขึ้น (และทำให้ความหนืดนั้นสูงขึ้นด้วย) และความดันที่ค่อย ๆ ลดลงในช่องทางไหล และเป็นการยากที่สมการกับการไหลแบบปั่นป่วน

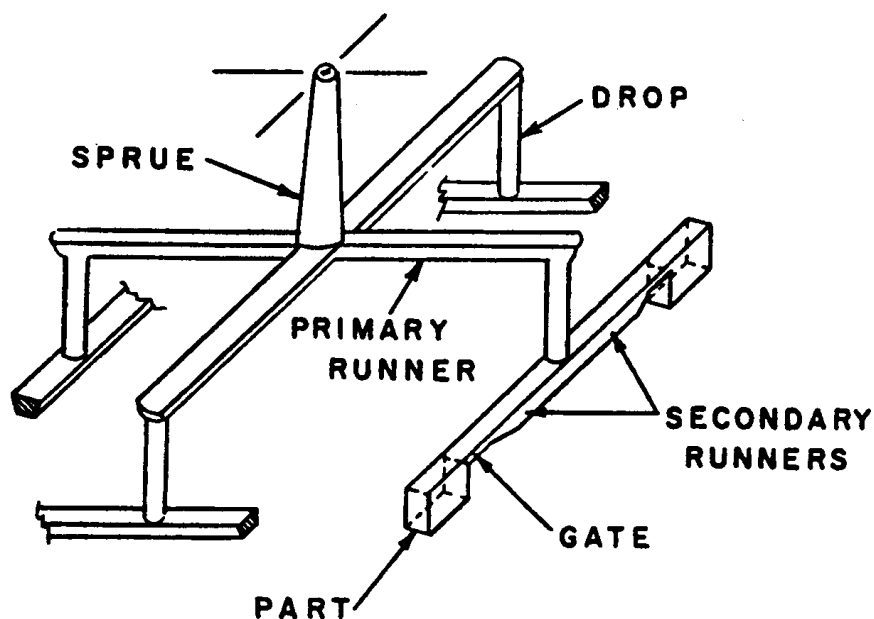
ตัวอย่างของพฤติกรรมการไหลของยางที่เป็นแบบนอนนิวโตเนียน ซึ่งจะทำให้เข้าใจถึงสภาพที่เกิดขึ้น ของไหลนิวโตเนียนนั้นจะไหลแบบราบเรียบภายในท่อและใช้ความดันตามหลังเพิ่มขึ้น 25% จะทำให้อัตราส่วนในการไหลเพิ่มขึ้น 25% การเพิ่มขึ้น 25% ของการไหลแบบนอนนิวโตเนียน (non-newtonian) นั้นจะทำให้อัตราการไหลเพิ่มเป็น 40-50%

### **ช่องทางวิ่งร้อน (Hot runner)**

ในการให้ความร้อนแก่เนื้อยาง (compound) ในช่องทางวิ่งร้อนโดยทั่วไปแล้วจะทิ้งยางส่วนนี้ออกไปเมื่อเสร็จกระบวนการแต่บางเวลาจะทำให้เกิดการติดของเศษขึ้นยางที่ตายแล้วผสมกับเนื้อยางที่เข้ามาใหม่ในการผลิตครั้งต่อไปเศษขึ้นยางที่ติดเข้าไปจากช่องทางวิ่งร้อนจะเป็นข้อเสียเปรียบหลัก ๆ เพราะจะทำให้เกิดการเสียดันทุนในมูลค่าของเมื่อยางที่เสียไปแต่จะแก้ได้โดยการกำจัดเนื้อยางที่ติดอยู่ออกไปก่อนที่จะทำการผลิตครั้งต่อไป

ในระบบทางวิ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับการกระจายแจกจ่ายน้ำในท่อประปา โดยการไหลของน้ำที่มาก ๆ จะไหลภายในท่อหลักซึ่งมีขนาดใหญ่ (เปรียบได้กับช่องทางไหลเข้า) และท่อหลักที่เล็กลงมาอีกที่จะจ่ายให้กับแต่ละบ้าน (ทางวิ่งหลัก (primary runner)) และแจกจ่ายไปตามท่อรอบ ๆ เพื่อที่จะจ่ายให้กับบ้านแต่ละหลัง (ทางวิ่งรอง (secondary runner)) และท่อทางวิ่งภายในบ้าน (ช่องทางเข้า (gates)) เป็นลำดับต่อมา ช่องทางเข้าที่ปรับได้ (adjustable gates) ในแต่ละแม่พิมพ์ฉีดนั้นจะเป็นตัวควบคุมการไหลของยางที่จะเข้าไปในรูปทรงชิ้นงานเปรียบเสมือนก๊อกน้ำที่ควบคุมการไหลของน้ำดังแสดงตัวอย่างไว้ในภาพที่ 24

ในส่วนผสมของยางนั้นจะมีความหนืดที่สูงซึ่งจะมีลักษณะเป็นของไหลแบบนอนนิวโตเนียน (non-newtonian) ซึ่งหลักของการไหลจะมีความซับซ้อนมากกว่าน้ำซึ่งจะต้องทำการออกแบบช่องทางวิ่งที่ซับซ้อนกว่า ซึ่งโดยทั่วไปจะออกแบบช่องทางวิ่งเป็นลักษณะวงกลมหรือโค้ง ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนทิศทางของการวิ่งดีกว่าแบบอื่น แต่ก็ทำให้มีราคาที่สูงขึ้นซึ่งในหน้าตัดนั้นไม่สามารถที่จะทำให้เล็กลงได้เพราะจะมีลักษณะการทำงานโดยการประกบกันทั้งสองส่วน



**ภาพที่ 24** แสดงถึงระบบการไหลของแม่พิมพ์แบบฉีด

ที่มา: Sommer (2003)

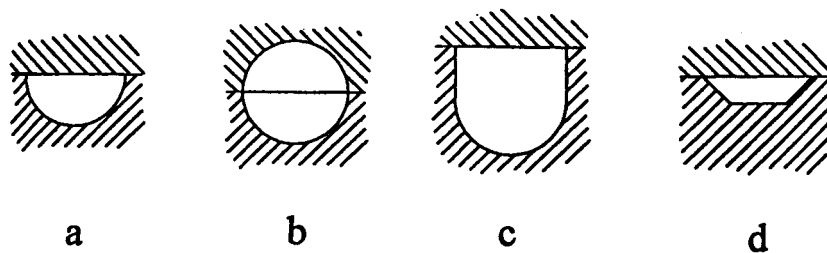
วัตถุประสงค์ในการออกแบบระบบช่องทางไหลเพื่อที่จะทำให้เนื้อยางไหลเข้าไปในรูปทรงชิ้นงานของแม่พิมพ์ฉีดในลักษณะที่พร้อมกันเพื่อที่จะทำให้เนื้อยางนั้นมีสถานะที่เหมือนกันทุก ๆ ส่วนในช่วงเวลาที่ทำให้ความร้อน ในออกแบบระบบทางไหลให้สมดุลกันของการไหลของเนื้อยางนั้นเป็นข้อกำหนดที่สำคัญและเป็นวัตถุประสงค์หลักในการออกแบบช่องทางเข้าและองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น อุณหภูมินั้นจะมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการไหลของเนื้อยาง

ในการออกแบบช่องทางวิ่งจะมีลักษณะที่คล้าย ๆ กันของทั้ง TSEs และ TPEs ซึ่งในการออกแบบนั้นจะต้องเข้าใจในพฤติกรรมการไหลของระบบและตัวเนื้อยางและดูที่ความสมดุลของการไหลที่จะเข้าไปในแม่พิมพ์ของแต่ละชนิดของตัวเนื้อยาง

โดยปกติแล้วการออกแบบช่องทางวิ่งนั้นเราจะออกแบบตามหลักเกณฑ์การออกแบบที่กำหนดไว้และบ่อยครั้งที่จะออกแบบตามรูปทรงของแม่พิมพ์โดยใช้ประสบการณ์เพราะบางทีการออกแบบโดยใช้หลักเกณฑ์นั้นอาจจะไม่พอเพียงในการออกแบบที่จะทำแม่พิมพ์



ที่จะทำแม่พิมพ์ชนิดนั้นจะออกแบบให้ช่องทางวิ่งนั้นมีขนาดเล็กกว่าขนาดธรรมดาเพื่อที่จะดูลักษณะการไหลก่อนแต่ก็สามารถที่จะทำให้ช่องทางของทางไหลมีขนาดใหญ่ขึ้นตามที่ต้องการได้ เป็นการง่าย ที่จะทำการขึ้นรูปช่องทางไหลใหม่โดยทำการเชื่อมโลหะเข้าไปในช่องทางไหลและนำมาทำการขึ้นรูปช่องทางไหลใหม่ ดังภาพที่ 25 ซึ่งจะแสดงให้เห็นหน้าตัดของช่องทางไหลในรูปแบบต่าง ๆ ในการออกแบบ



**ภาพที่ 25** ภาพหน้าตัดของช่องทางไหล ‘a’ รูปครึ่งวงกลม ‘b’ วงกลม ‘c’ ครึ่งทรงกลม ที่มีการขยายแนวยาว และ ‘d’ รูปทรงสี่เหลี่ยม

ที่มา: Sommer (2003)

ในรูปแบบความแตกต่างกันของพื้นที่หน้าตัดของช่องทางไหลจะมีทั้งข้อได้เปรียบและเสียเปรียบซึ่งช่องทางไหลแบบครึ่งวงกลมดังรูป “a” จะทำการขึ้นรูปที่แม่พิมพ์ที่แม่พิมพ์อันเดียว ตัวอย่างเช่น การใช้หัวกัดเป็นรูปทรงกลม (ball-shaped end mill) ซึ่งการขึ้นรูปแบบนี้จะไม่ค่อยได้ความแม่นยำในการสร้างแนวเส้นตรงเท่าไร ในการให้ความร้อนกับช่องทางไหลนั้นจะมีความสัมพันธ์กันของการเคลื่อนที่กับการเข้าและออกของเนื้อเยื่อที่อยู่ภายใน

ในแม่พิมพ์ซึ่งมีขนาดที่เล็กนั้นจะต้องออกแบบแม่พิมพ์ไม่ให้อัตราส่วนของปริมาตรของช่องทางไหลสูงเมื่อเทียบกับปริมาตรของแม่พิมพ์และในช่องทางไหลที่เล็กภายในแม่พิมพ์ที่มีส่วนผสมของยางที่ไหลมีความหนืดสูง (high viscosity) อาจจะทำให้ยางนั้นไหลช้าก่อนที่จะไปถึงภายในเป่าของแม่พิมพ์ซึ่งจะต้องดูช่องทางไหลให้เหมาะสมกับเวลาในการสุกตัวของยางภายในแม่พิมพ์ช่องทางไหลแบบทรงครึ่งวงกลมจะทำให้การสุกตัวของยางนั้นเร็วกว่าแบบทรงกลมเมื่อมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเดียวกันในการให้ความร้อนแก่ยางในเวลาที่เราของหน้าตัดแบบครึ่งวงกลมนั้นจะได้เปรียบกว่าแบบวงกลมถ้าไม่คิดถึงความดันที่เพิ่มขึ้นอย่างสูงของช่องทางไหลแบบครึ่งวงกลม

ค่าข้อมูลของรีโอมิเตอร์นั้นจะใช้คำนวณค่าความดันที่สูญเสียไป (pressure drop) ที่ขนาดของความแตกต่างของขนาดช่องทางการไหลในหน้าตัดแบบครึ่งวงกลม, วงกลม และแบบสี่เหลี่ยมสำหรับยางนีโอพรีน (neoprene elastomer) ดังตัวอย่างความดันที่ตกลงของ ช่องทางไหลแบบครึ่งวงกลมและแบบวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 นิ้ว จะอยู่ที่ 13,827 และ 11,686 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) เมื่อเปรียบเทียบกับกันดูแล้วที่เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันแบบ ครึ่งวงกลมนั้นจะมีความดันที่ตกลงน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับด้านเดียว และความดันจะลดลง 14,124 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ที่ช่องทางไหลแบบสี่เหลี่ยม ความกว้าง 0.2 นิ้ว และลึก 0.133 นิ้ว

ในช่องทางไหลแบบวงกลม “b” ดังแสดงในภาพที่ 11 นั้นจะต้องขึ้นรูปในแม่พิมพ์ ทั้งตัวล่างและตัวบนให้มีแนวเดียวกันซึ่งในปัจจุบันพื้นที่สามารถที่จะทำการขึ้นรูปช่องทางไหล ให้ตรงกันได้อย่างแม่นยำ, ช่องทางไหลแบบ “b” สามารถที่จะให้การไหลได้ง่ายกว่าแบบ “a” ซึ่งจะเหมือนเอาแบบ “a” มาปะกบกันสองด้าน

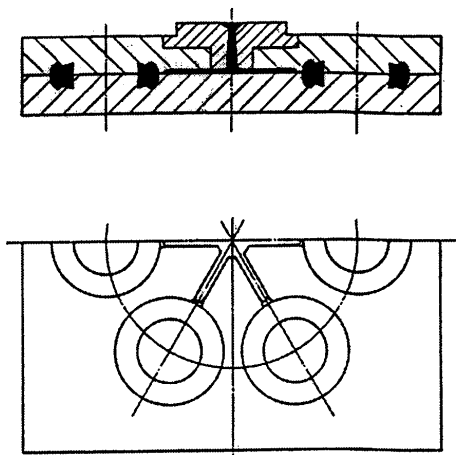
ในการปรับปรุงช่องทางไหลแบบครึ่งวงกลมแบบ “c” นั้นจะทำให้ลึกลงไปอีก โดยการสร้างนี้จะทำได้ยากกว่าช่องทางไหลแบบ “a” หรือ “b” เพราะความลึกของช่องทาง ไหล “c” นั้นจะลึกเกินกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางหรือเท่ากับพื้นที่ฉายของวงกลม ซึ่งจะมีปริมาตร ของช่องทางไหลมากกว่าแบบ “a” ซึ่งจะสามารถที่จะให้แรงกดของแฉ้ม (champ force) เดิมได้ เพราะในการเพิ่มปริมาตรนั้นจะไม่ต้องการแรงกดของแฉ้มที่เพิ่มขึ้นในคอนปิดแม่พิมพ์ และแรงที่ใช้ในคอนเปิดแม่พิมพ์ออกนั้นจะใช้ความดันของยางซึ่งเป็นอิสระต่อช่องทางวิ่ง ที่ลึกลงไป

สำหรับแม่พิมพ์ที่มีความบางซึ่งไม่สามารถที่จะทำช่องทางวิ่งให้มีลักษณะเป็นทรงกลมได้ ซึ่งจะสามารถทำเป็นช่องสี่เหลี่ยมดังรูป “d” ได้ โดยสามารถสร้างช่องสี่เหลี่ยมโดยใช้หัวกัด แบบเอียง (tapered end mill) โดยขึ้นรูปไปบนผิวหน้าของแม่พิมพ์ สำหรับช่องทางวิ่งแบบ “d” มีโอกาสทำให้เนื้อยางที่อ่อนนิ่มได้ขณะที่ทำการไหลเนื่องจากมีมุมที่คมที่ร่องทั้งสองด้าน และจะมีโอกาสที่จะทำให้เกิดสิ่งสกปรกไปติดอยู่ในมุมของร่องทางไหลได้ การกำจัดมุมที่คม ออกโดยทำให้มีลักษณะโค้งจะทำให้ลดปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งสองได้

การออกแบบนั้นจะต้องทำให้ช่องทางไหลมีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และยังสามารถที่จะควบคุมความสมดุลของการไหลของระบบสำหรับแม่พิมพ์แบบฉีดที่จะฉีดเข้าไปในรูปทรงของชิ้นงาน โดยใช้วิธีการของพื้นฐานที่ขึ้นอยู่กับความหนืดในการไหลโดยให้กฎการยกกำลัง (power-law viscosity model) ภายได้ข้อกำหนดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงซึ่งจะไปมีผลกระทบที่สำคัญต่อค่าความหนืดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางไหลในทิศตามน้ำจากการเชื่อมต่อกันสามารถคำนวณโดยการหารเส้นผ่านศูนย์กลางของทางไหลที่ทวนน้ำ และรากที่สามของจำนวนท่อทางไหลที่ตามน้ำที่เชื่อมต่อกัน ต่อมาในภายหลังได้กำหนดกฎสำหรับการออกแบบช่องทางไหลให้มีปริมาณเล็กที่สุดโดยใช้หลักการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

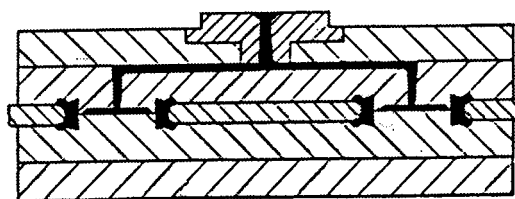
ในความแตกต่างของยางตัวอย่าง ในแม่พิมพ์แบบสี่หลุม (ชิ้นงาน) โดยใช้การไหลของช่องทางไหลสั้นสองและแบบยาวสองในการกำหนดพฤติกรรมการไหลในช่องทางไหล ตัวอย่างของความแตกต่างกันของยางธรรมชาติ (NR) และยางซิลิโคน (silicone compound) แสดงให้เห็นความแตกต่างกันภายในแม่พิมพ์ อธิบายโดยการพิจารณาคุณสมบัติทางรีโอโลยีของยางเมื่อออกแบบแม่พิมพ์

ระบบช่องทางไหลแบบร้อนสามารถออกแบบเป็นระบบสองหรือสามชั้นของแม่พิมพ์แบบฉีดในภาพที่ 26 แสดงการออกแบบเป็นแบบสองแผ่น โดยเนื้อยางจะไหลจากหัวฉีด (injection nozzle) เข้าไปในช่องทางไหลหกทางและไหลผ่านช่องทางเข้าเพื่อที่จะเข้าไปภายในตัวชิ้นงาน หลังจากทีเนื้อยางไหลเข้าไปภายในตัวแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างเป็นชิ้นงานแล้วตอนแรกจะเกิดการทำให้ปฏิกิริยาของเนื้อยาง (crosslinking) ที่บริเวณช่องทางเข้าก่อน (gates) เพราะว่าที่ช่องทางเข้านั้นจะมีความหนาที่น้อยกว่าช่องทางไหลและควรทำให้มีกระจายความร้อนที่ต่ำเพราะเนื้อยางภายในช่องทางเข้าจะมีความบางและจะทำให้เกิดปฏิกิริยาของเนื้อยาง (crosslinking) ก่อนและเกิดการทำให้ปฏิกิริยาภายในตัวชิ้นงานเนื่องจากพื้นที่ของช่องทางเข้ามีขนาดเล็ก ชั้นของแม่พิมพ์จะแยกออกจากช่องทางไหลที่ช่องทางไหลเข้า ช่องทางไหลเข้าที่เล็กนั้นเป็นตัวกันเศษสิ่งสกปรกที่จะไหลเข้าไปในตัวชิ้นงานที่กล่าวมาเป็นแบบง่ายโดยใช้ต้นทุนต่ำสำหรับแบบสองชั้น และแบบสามชั้นจะแสดงดังภาพที่ 27



**ภาพที่ 26** ออกแบบแม่พิมพ์ฉีดเป็นแบบสองชั้น

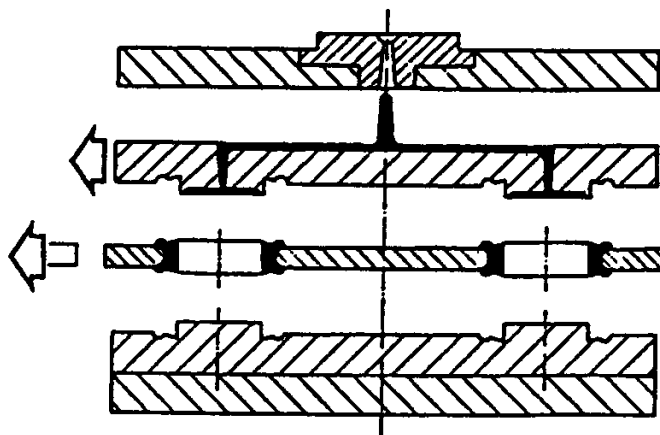
ที่มา: Sommer (2003)



**ภาพที่ 27** ออกแบบแม่พิมพ์ฉีดเป็นแบบสามชั้น

ที่มา: Sommer (2003)

เนื้อยางจะไหลเข้าที่ช่องเข้าและไหลลงไปในช่องทางไหลเพื่อที่จะเข้าไปในตัวชิ้นงาน แต่ละตัวภายในแม่พิมพ์ ภาพที่ 26 จะแสดงระบบช่องทางไหลที่มีช่องทางไหลลงเพื่อที่จะจ่ายให้ช่องทางไหลที่สองก่อนที่จะเข้าไปภายในตัวชิ้นงานจะต้องผ่านชุดกริบของทางเข้า (fan gate) ในความแตกต่างกันของการออกแบบขอบทางเข้าแสดงดังภาพที่ 27 จะมีลักษณะทางเข้าเป็นทรงวงแหวนเพื่อที่จะผ่านเนื้อยางที่เข้าไปในตัวชิ้นงานหลังจากนั้นจะทำการบ่มโดยการให้ความร้อนเพื่อที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาของเนื้อยางแม่พิมพ์ที่แยกส่วนเปิดออกมาแสดงในภาพที่ 28



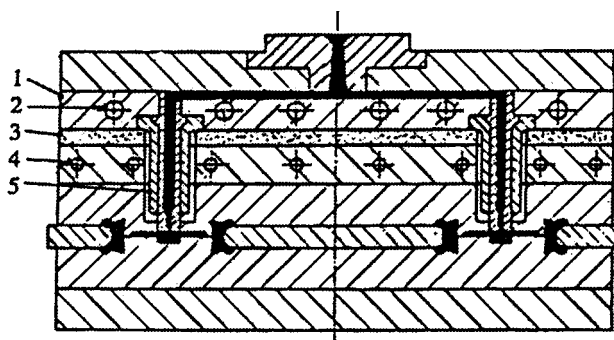
**ภาพที่ 28** การทำงานแม่พิมพ์ฉีดเมื่อมีการแยกส่วน

ที่มา: Sommer (2003)

ทิศทางของลูกสรแสดงถึงทิศทางในการเคลื่อนที่ของแผ่นแม่พิมพ์สำหรับการเคลื่อนที่ซึ่ง อาจทำให้เกิดเศษสกรปรกหรือการเสียดสีกันของแม่พิมพ์สิ่งที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์ร่วมกันของแม่พิมพ์ทั้ง 2 แผ่น ในการที่จะแก้ไขปรับปรุงลักษณะของการไหลเข้าให้มีลักษณะที่เข้าในแต่ละโมดูลเท่า ๆ กันนั้นจะทำโดยการปรับปรุงช่องทางเข้ารูปวงแหวน และการทำให้สิ่งปลอมปนน้อยที่สุดที่เกิดขึ้นจากแม่พิมพ์โดยปกติจะเกิดขึ้นโดยการมีช่องทางเข้าแบบพัดหรือแบบเข็ม ( fan or pin gate) ในการใช้ระบบช่องทางการไหลแบบเย็น (cold runner) นั้นจะเป็นการลดปริมาณยางที่เสียภายในช่องทางไหลต่ำกว่าแบบระบบช่องทางการไหลแบบร้อน

### ช่องทางไหลแบบเย็น (Cold Runner)

ในภาพที่ 29 จะแสดงถึงช่องทางไหลแบบเย็น (cold runner)

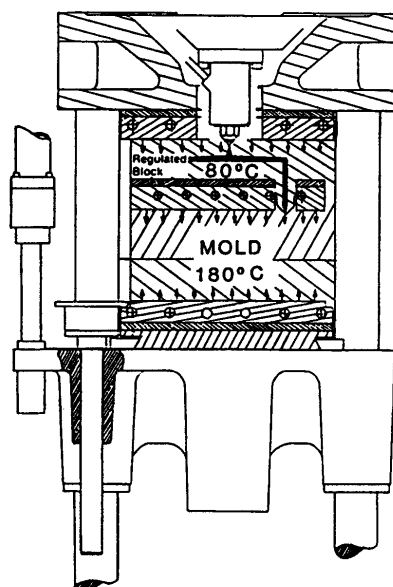


ภาพที่ 29 จะแสดงถึงภาพหน้าตัดของแบบระบบช่องทางไหลแบบเย็น

ที่มา: Sommer (2003)

การถ่ายเทความร้อนของช่องทางไหลต้องการให้การไหลของอุณหภูมิภายในท่อของช่องทางไหลแบบเย็นของแผ่นช่องทางไหลเย็น (cold runner plate) ซึ่งจะควบคุมอุณหภูมิของหัวฉีดช่องทางไหลแบบเย็นและตัวเนื้ออย่างแผ่นจนวนระหว่างแผ่นอุณหภูมิต่ำกับแผ่นที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งจะมีหน้าที่ทำให้ของการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดระหว่างสองแผ่น และช่องทางรอบ ๆ หัวฉีดในช่องทางไหลแบบเย็นซึ่งจะทำให้ความร้อนถ่ายเทไปให้หัวฉีดน้อยที่สุด โดยที่แผ่นความร้อนที่สูงจะได้รับความร้อนโดยชุดให้ความร้อน จุดที่เชื่อมต่อกันเป็นเนื้ออย่างที่จะได้รับความร้อนและไม่ได้รับความร้อน (uncured-cured material) จะเกิดขึ้นที่ฐานด้านล่างของหัวฉีด

ในการออกแบบแม่พิมพ์นั้นต้องการรอยต่อของแม่พิมพ์เพียงหนึ่งรอยเท่านั้นดังภาพที่ 30 แสดงแม่พิมพ์ฉีดแบบช่องทางไหลเย็น ซึ่งตำแหน่งในการ कै้มจะอยู่ในแนวตั้งของเครื่องฉีด



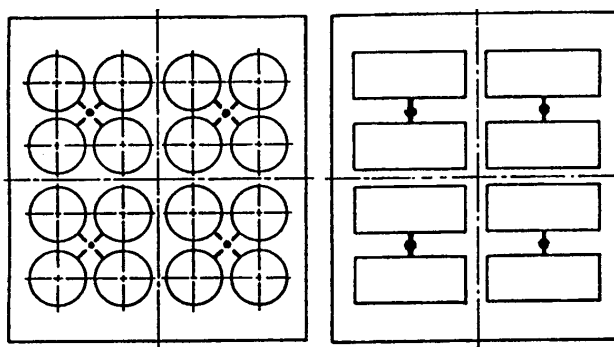
**ภาพที่ 30** แม่พิมพ์ฉีดแบบช่องทางไหลเย็นซึ่งตำแหน่งในการ कै้มจะอยู่ในแนวตั้งของเครื่องฉีด

ที่มา: Sommer (2003)

โดยที่แม่พิมพ์ที่ควบคุมโดยชุดแผ่นควบคุม (block regulated) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่สูงด้านล่างของแม่พิมพ์โมดูลที่ 180 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของชุดแผ่นควบคุมที่แสดงให้เห็นจะอุณหภูมิครึ่งกลางซึ่งมีค่าระหว่าง 65 ถึง 90 องศาเซลเซียส สำหรับระบบช่องทางไหลแบบเย็น ในการเพิ่มหรือปรับปรุงช่องทางไหลเย็นจะถูกจำกัดโดยความต้องการของการควบคุมหรือการเคลื่อนที่ของกลไกในระบบการไหล ข้อเสียเปรียบของช่องทางไหลแบบเย็นจะทำให้ต้นทุนสูงและความซับซ้อนที่เพิ่มขึ้นโดยจำนวนของหัวฉีดในช่องทางไหลที่อยู่ภายในแม่พิมพ์ในการสร้างจำนวนของหัวฉีดในจำนวนมากนั้นจะทำให้ยากที่จะเพิ่มเข้าไปภายในแม่พิมพ์ ดังนั้นแม่พิมพ์ต้องสร้างกระปุกความเย็น (cold-pot) ในการถ่ายเทความร้อนเมื่อต้องการจำนวนที่มากขึ้นสำหรับแม่พิมพ์ที่มีขนาดเล็ก

ในแม่พิมพ์แบบสองระดับโดยมีช่องทางไหลแบบแผ่นอยู่ตรงกลางสามารถใช้กับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ เช่น ตัวกันกระแทกของทางการแพทย์ (medical stoppers) ในข้อกำหนดอื่น ๆ ของช่องทางไหลแบบเย็นโดยมีสัหัวฉีดนั้นจะต้องให้โพรงของชิ้นงานแบ่งออกเป็นแถว โดยจะแยกออกเป็นการจ่ายของแต่ละหัวฉีดภายในแม่พิมพ์ ในการใช้ข้อกำหนดนั้นจะทำให้ส่วน

ลดต้นทุนที่สูงโดยใช้ระบบช่องทางไหลแบบเย็น เมื่อเปรียบเทียบกับแบบช่องทางไหลที่ร้อน และจะช่วยให้การไหลเป็นไปด้วยดีภายในรูปทรงของชิ้นงานเพราะช่องทางไหลในระบบทางไหลแบบเย็นนั้นตำแหน่งจะอยู่ในชุดของช่องทางไหลแบบเย็นซึ่งจะไม่เหมือนในแม่พิมพ์ที่แสดงให้เห็นในภาพที่ 26 สำหรับระบบช่องทางไหลแบบร้อนในแม่พิมพ์แบบสองแผ่นในภาพที่ 31 จะแสดงการวางตำแหน่งของชิ้นงานและช่องทางไหลในแบบเย็นสำหรับสี่หัวฉีด



**ภาพที่ 31** การวางตำแหน่งของชิ้นงานและช่องทางไหลแบบเย็นสำหรับสี่หัวฉีด

ที่มา: Sommer (2003)

ในความแตกต่างของการถ่ายเทความร้อนของของไหลนั้นจะควบคุมโดยแผ่นที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิซึ่งจะมีความสัมพันธ์กันของข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบ น้ำ และน้ำกับน้ำยาผสมกัน ซึ่งจะถ่ายเทความร้อนได้ดี แต่เมื่อทำงานไประยะหนึ่งจะเกิดคราบตะกอนเคลือบบริเวณผิว ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง

### การออกแบบช่องทางไหลเข้า (Gate Design)

ช่องทางไหลจะไปสิ้นสุดที่ช่องทางไหลเข้าที่รูปทรงของชิ้นงานในแม่พิมพ์ซึ่งจะเป็นช่องทางที่เนื้อยางจะไหลเข้าไปในรูปทรงของชิ้นงานในแม่พิมพ์ ช่องทางไหลเข้าจะมีหน้าที่คล้ายกับหัวฉีด และสามารถออกแบบขนาดและรูปร่าง และจะเป็นช่วงสุดท้ายของเนื้อยางที่จะได้รับความร้อนก่อนที่จะเข้าไปในแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตามจะเป็นการยากที่จะรู้ถึงอุณหภูมิที่สูงขึ้นที่จุดนี้เพราะไม่สามารถที่จะติดตั้งวัดอุณหภูมิในตำแหน่งนี้ได้ ดังนั้นจึงแก้ไขโดยการติดตั้งวัดไว้ที่แม่พิมพ์รอบ ๆ จุดช่องทางไหลเข้าแต่อย่างไรก็ตามในการเปิดแม่พิมพ์อย่างรวดเร็ว



ตัววัดอุณหภูมิจะไม่สามารถอุณหภูมิตอนสุดท้ายได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นอุณหภูมิสุดท้ายจึงกำหนดให้เป็นอุณหภูมิของเนื้อเยื่อที่ไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ และกำหนดให้ค่าการนำความร้อนของยางนั้นค่าดังนั้นจะทำให้ความร้อนที่ผิวของแม่พิมพ์จะใช้เวลานานในการเข้าไปถึงตำแหน่งตรงกลางของแม่พิมพ์

ปัจจัยอื่น ๆ ของช่องทางไหลเข้าที่ควรพิจารณาถึงขนาดที่เล็กที่เพียงพอที่จะทำให้เนื้อเยื่อไหลเข้าไปได้ง่ายและมีลักษณะที่เป็นระเบียบที่แน่นอนและไม่จำเป็นที่จะต้องตกแต่งชิ้นงานอีกหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการ ในการออกแบบช่องทางไหลเข้านั้นควรจะไม่ไปมีผลกระทบกับองค์ประกอบอื่น ๆ ในการออกแบบ

ถึงแม้ว่าการออกแบบช่องทางไหลเข้านั้นจะมีขนาดและรูปร่างไม่แน่นอนในการออกแบบ แต่ก็ควรที่จะมีขนาดที่ใหญ่พอที่จะทำให้เนื้อเยื่อไหลเข้าไปในปริมาตรที่ต้องการของรูปทรงชิ้นงานในแม่พิมพ์และจะต้องสอดคล้องกับระยะเวลาในการไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ ช่องทางไหลเข้าควรที่จะมีความแข็งแรงที่พอเพียงที่จะรับแรงของเนื้อเยื่อในการไหลซึ่งจะทำให้การไหลเข้าไปในแม่พิมพ์นั้นคงที่และรวดเร็วและมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆที่ต่อเนื่องกัน แต่ถ้ามีความแข็งแรงไม่พอเพียงจะทำให้เนื้อเยื่อที่เข้าไปมีลักษณะที่เป็นกึ่งหรือเป็นก้อน ซึ่งจะทำให้ได้ผลผลิตไม่ดีในการผลิต

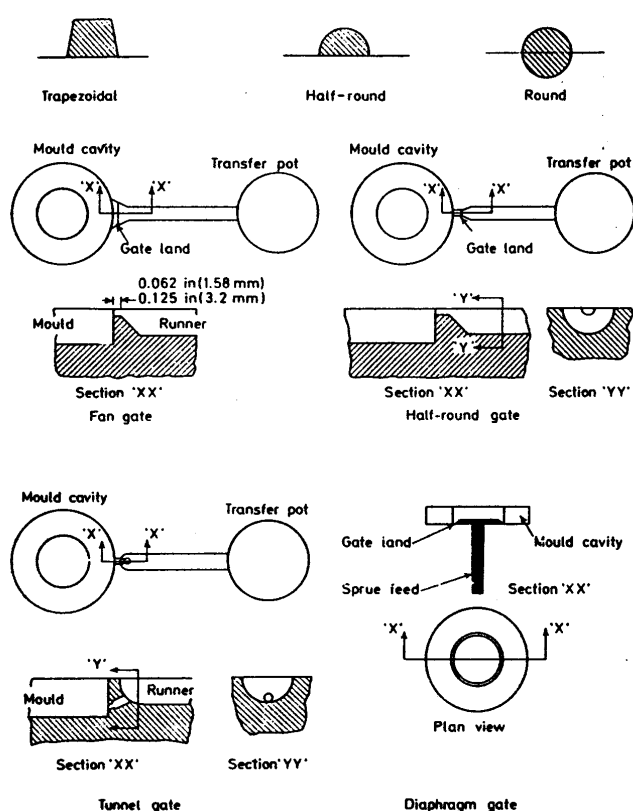
หน้าตัดของช่องทางไหลเข้าโดยทั่วไปจะทำให้มีพื้นที่หน้าตัดเหมือนกับช่องทางไหล (Runner) แต่จะลดขนาดลงมาเหลือประมาณ 0.25 – 0.38 มม. (0.010 – 0.015 นิ้ว) สำหรับความหนาที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 มม. (1/32 นิ้ว) ขนาดสุดท้ายของช่องทางไหลเข้านั้นจะต้องทำการทดสอบเพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่ทำให้เกิดความร้อนที่เกินความจำเป็นในการไหลของยางที่จะเข้าไปภายในแม่พิมพ์ ในการออกแบบนั้นตอนแรกจะทำให้ช่องทางไหลเข้ามีขนาดเล็กก่อนและทำการทดลองจริงแล้วค่อยขยายขนาดของช่องทางไหลเข้าให้ใหญ่ขึ้นตามความเหมาะสม

ช่องทางไหลเข้าของแม่พิมพ์แบบฉีดนั้นจะต้องมีการออกแบบที่ดีซึ่งการไหลของเนื้อเยื่อที่จะเข้าไปภายในรูปทรงชิ้นงานนั้นจะเป็นการไหลโดยการฉีดเข้าแบบต่อเนื่องเข้าไปไม่ใช่การไหลแบบรวดเร็วทันทีทันใด

ในการเลือกช่องทางไหล และระบบช่องทางไหลเข้า จะพิจารณาได้ในภาพที่ 32

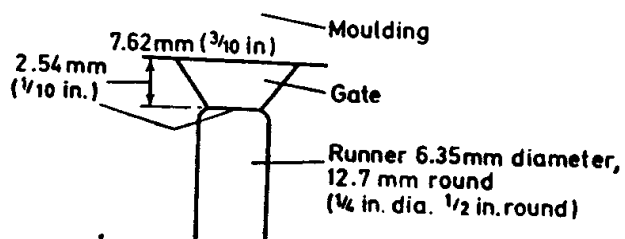
จากการหาผลกระทบของช่องทางไหลเข้าแบบพัด (fan gate) ดังแสดงในภาพที่ 33 ที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความลึกโดยใช้เนื้อยางในการทดสอบเป็น butyl . ความลึกของช่องทางจ่ายที่ 0.254, 0.508, 0.762 และ 1.016 มม. (0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04 นิ้ว) และจะแสดงถึงผลกระทบของเวลาในการฉีดและเวลาของการเกิดปฏิกิริยาของเนื้อยาง (vulcanisation) ซึ่งจะแสดงให้เห็นในตารางที่ 5

ในความลึกของช่องทางไหลเข้าที่ 1.016 มม. (0.04 นิ้ว) ซึ่งจะทำให้ระยะเวลาในการฉีดมีความรวดเร็วและเวลาในการบ่มตัวของเนื้อยางจะเร็วขึ้นช่องทางไหลเข้าที่ใช้ในการเชื่อมต่อโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดดังแสดงในตารางที่ 6 ที่การฉีดแบบเร็วที่หัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.18 มม. (1/8 นิ้ว) และอุณหภูมิในการฉีดต่ำและเวลาในการบ่มเนื้อยางนานขึ้นที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กจะให้อุณหภูมิในต่อนฉีดที่สูงและเวลาในการบ่มที่สั้นลง



**ภาพที่ 32** ชนิดของช่องทางไหลและช่องทางไหลเข้าในรูปแบบต่าง ๆ

ที่มา: Wheelans (1974)



**ภาพที่ 33** ทางไหลเข้าแบบพัดที่มีความลึก 0.254 มม. (0.01 นิ้ว) และทำการเปลี่ยนแปลงความลึกที่ขนาด 0.508 มม. (0.02 นิ้ว), 0.762 (0.03 นิ้ว), 1.016 มม. (0.04 นิ้ว)

ที่มา: Wheelans (1974)

**ตารางที่ 6** แสดงถึงผลกระทบของความลึกของช่องทางไหลเข้าที่มีความลึกต่างๆ

| Fan gate depth, mm | Fan gate depth, in | Injection time (s) | Vulcanising time (s) |
|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| 0.254              | 0.010              | 5.4                | 35                   |
| 0.508              | 0.020              | 2.8                | 35                   |
| 0.762              | 0.030              | 2.1                | 35                   |
| 1.015              | 0.040              | 2.0                | 30                   |

ที่มา: Wheelans (1974)

ในตารางที่ 6 นั้นจะเป็นการทดสอบช่องทางไหลแบบครึ่งวงกลม (half round) 6.35 มม. (1/4 นิ้ว) เครื่องฉีด Daniels Edgwick 45 SR; อุณหภูมิของกระบอกฉีด 113°C (235°F); อุณหภูมิของแม่พิมพ์ 204 °C (400 °F); ความเร็วของสกรู 100 รอบต่อนาที; ความดันในการฉีดของเนื้อยาง 108 MN/m<sup>2</sup> (15640 lbf/in<sup>2</sup>); เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด 1.98 มม. ( 5/64 นิ้ว); ปริมาตรในการฉีด 48 ลูกบาศก์เซนติเมตร (2.93 ลูกบาศก์นิ้ว); ยาง butyl ที่ 40 ชอร์เอ

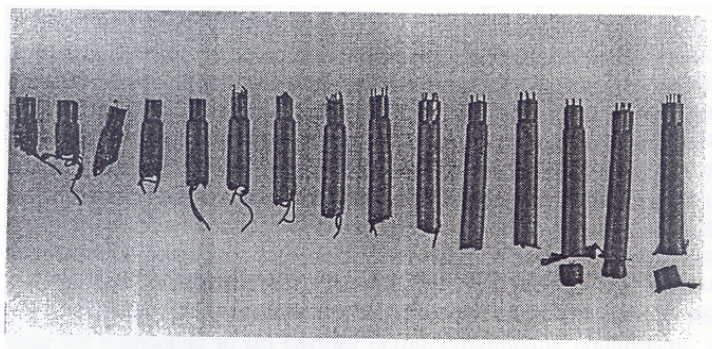
**ตารางที่ 7** แสดงถึงผลกระทบของขนาดที่เปลี่ยนแปลงของขนาดหัวฉีด

| Nozzle diameter<br>(mm.) | Injection time (s)<br>Into mould | Injection<br>temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Vulcanising time<br>(s) |
|--------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|
| 1.19                     | 23.5                             | 146                                             | 35                      |
| 1.59                     | 5.3                              | 151                                             | 35                      |
| 1.98                     | 2.9                              | 145.5                                           | 35                      |
| 2.38                     | 2.2                              | 140.5                                           | 35                      |
| 3.17                     | 1.3                              | 132                                             | 40                      |

ที่มา: Wheelans (1974)

ในตารางที่ 7 จะใช้เครื่องฉีด Daniels Edgwick 45 SR; อุณหภูมิของกระบอกฉีด  $107^{\circ}\text{C}$  ( $225^{\circ}\text{F}$ ); อุณหภูมิของแม่พิมพ์  $204^{\circ}\text{C}$  ( $400^{\circ}\text{F}$ ); ความเร็วของสกรู 100 รอบต่อนาที; ความดันในการฉีดของเนื้อยาง  $113\text{ MN/m}^2$  ( $16320\text{ lbf/in}^2$ ); ช่องทางไหลแบบครึ่งวงกลม (half round) 6.35 มม. ( $1/4$  นิ้ว) ความลึกของช่องทางไหลเข้าแบบพัด 1.015 มม. ( $0.040$  นิ้ว); ยาง butyl ที่ 40 ชอร์เอ

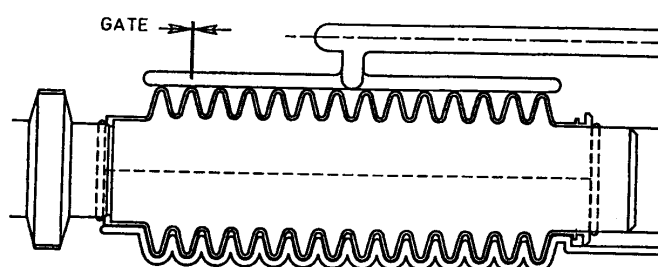
ในตำแหน่งของช่องทางเข้านั้นจะมีผลต่อการไล่อากาศออกขณะที่เนื้อยางไหลเข้ามาในป้านงานอากาศที่อยู่ภายในจะถูกไล่ออกไป การเพิ่มปริมาณของเนื้อยางเข้าไปในแม่พิมพ์ฉีดจะช่วยกำหนดตำแหน่งของช่องลมซึ่งจะเป็นวิธีการในการกำหนดสร้างขั้นตอนในการไหลดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 34



**ภาพที่ 34** ขั้นตอนของการไหลของน้ำที่เข้าไปภายในแม่พิมพ์ฉีด

ที่มา: Wheelans (1974)

ในภาพที่ 35 เป็นตัวอย่างของหน้าตัดของแม่พิมพ์ฉีดของยางเครื่องสูบลมซึ่งในตำแหน่งช่องทางเข้าจะอยู่ในตำแหน่งที่สูงสุดที่ความยาวของด้านบนสุด



**ภาพที่ 35** หน้าตัดของแม่พิมพ์ฉีดของยางเครื่องสูบลมซึ่งแสดงตำแหน่งช่องทางเข้า

ที่มา: Sommer (2003)

ในการออกแบบช่องทางเข้า การไหลของน้ำจะเข้าไปในแม่พิมพ์ที่กึ่งกลางในแนวแกนของยางเครื่องสูบลม, ลักษณะการไหลจะไหลไปตามแนวแกน, อากาศจะถูกไล่ออกไปยังที่ริมสุดของแม่พิมพ์เพื่อที่จะออกไปจากแม่พิมพ์ และจะเกิดการไหลตัวของน้ำไปในทิศทางรอบ ๆ เส้นรอบวงของด้านยัด ช่วงสุดท้ายของตำแหน่งการไหลจะสิ้นสุดที่ตำแหน่งด้านล่างสุดของชิ้นงานที่ตรงกันข้ามกับช่องทางไหล การไหลของน้ำจะเข้าไปในแม่พิมพ์จากทางด้านบนและด้านล่าง

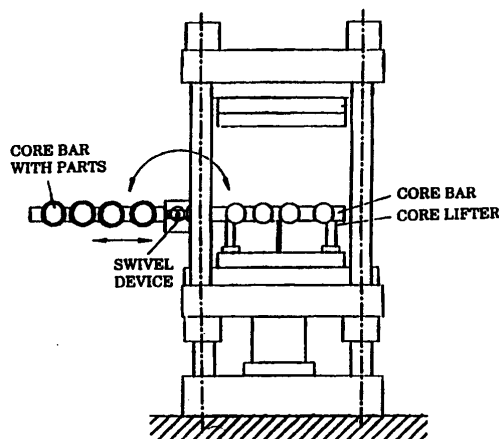
พร้อม ๆ กันนั้นก็สามารที่จะเพิ่มเป็นแบบสองทางเข้าซึ่งก็จะต้องการเนื่อภายในการไหลมากขึ้น ซึ่งจะทำให้การทำงานนั้นเร็วขึ้น

การรักษาความดันของอากาศจะนำไปใช้ในการเชื่อมต่อกันระหว่างจุดที่สุดของชิ้นงาน (ยางเครื่องสูบลม) และ คัมจับยึด การกระทำของสารหล่อลื่นจะทำให้การเคลื่อนย้ายชิ้นงาน ออกมาได้ง่ายดำหนึที่บริเวณผิวของชิ้นงานจะเกิดการฉีกขาดบริเวณทางเข้าหรือบางที่จะเกิด คำนิจจากการไหลของเนื่อภายในออกมาที่คัมจับยึดโดยอากาศที่ถูกบีบอัด ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ ต้องการการออกแบบใหม่ของช่องทางเข้าโดยการลดความดันที่ตกค้างบริเวณทางเข้า

รูปทรงของตัวชิ้นงานและตำแหน่งของทางเข้าจะสัมพันธ์กับผลกระทบของการไหลเข้าไป ในแม่พิมพ์ของตัวเนื่อภายในระหว่างการไหลพฤติกรรมของการไหลแบ่งออกได้หลายชนิด เช่น การไหลออกมาอย่างรวดเร็ว (jetting filling) จะเกิดขึ้นเมื่อการไหลของเนื่อภายในออกมาจาก ช่องทางจ่ายและช่องทางเข้าแม่พิมพ์เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูงมากกระทบที่บริเวณผิวของ แม่พิมพ์ชิ้นงาน การไหลเข้าจะเพิ่มขึ้นโดยเนื่อภายในที่พุ่งไปชนแม่พิมพ์นั้นจะพับตัวขึ้นเป็นชั้น ๆ การไหลออกมาอย่างรวดเร็วจะเกิดในรูปทรงชิ้นงานที่มีพื้นที่หน้าตัดที่กว้างการไหลแบบเร็วนี้ จะเป็นที่ต้องการ

ระหว่างการไหลแบบเร็วเข้าไปในแม่พิมพ์เนื่อภายในจะมีลักษณะเปียกที่ผนังของแม่พิมพ์ หลังจากออกมาจากช่องทางจ่าย (squire) หรือช่องทางเข้า (gate) จะทำให้เกิดการอัดแน่นตัวของ เนื่อภายในเวลาที่ไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ หลังจากการอัดแน่นเนื่อภายในจะไหลเข้ามาเลื่อนที่ผิวหน้า ทำให้ระดับผิวหน้าของเนื่อภายในเคลื่อนที่ และบังคับอากาศและช่วยเหลือการผลิตให้ชิ้นงานมี ความหนาแน่นสูง การไหลของเนื่อภายในแบบผิวหน้า (frontal filling) นิยมใช้กับชิ้นงานที่มี หน้าตัดเล็ก ๆ เช่น ยางปิดน้ำฝน เป็นต้น

ในการใช้แกนแบบหมุนหรือแกนแบบแท่งเป็นการเพิ่มผลิตชิ้นงานในแม่พิมพ์ของยาง เครื่องสูบลม การใช้แท่งแบบธรรมดาเปรียบเทียบกับแบบแท่งกึ่ง และแกนแบบหมุนที่มีแกนยื่น ออกมา (แกนแบบกึ่งไม้) ชิ้นงานสามารที่จะนำออกมาได้ในด้านหนึ่งของแกนหมุนและอีกด้านหนึ่ง ของแกนหมุนก็จะทำขบวนการในการผลิตต่อไป ขั้นตอนของช่วงเวลาในขั้นตอนที่จะเอาชิ้นงาน ออกและทำความสะอาดนั้นจะสั้นกว่าเวลาในการบ่มยาง ดังในภาพที่ 36



**ภาพที่ 36** แกนแบบแท่งในแม่พิมพ์ของยางเครื่องสูบลม

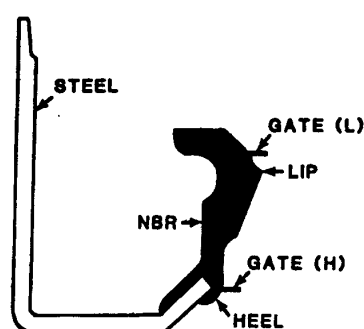
ที่มา: Sommer (2003)

หลังจากเสร็จกระบวนการจนครบวงจร แกนแท่งของเหล็กจะเคลื่อนที่ไปทางซ้าย เพื่อนำชิ้นงานออกและทำความสะอาด ซึ่งเวลาจะน้อยกว่าการหมุนในอีกรอบหนึ่ง

เมื่อพิจารณาที่ช่องทางเข้าเดียนั้นเมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการฉีดและจะเห็นชิ้นงานที่ทางเข้าจุดศูนย์ด้วยคลายเข็มบาง ๆ ตำแหน่งเดียวในการไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ของยางแบบช่องทางเดียว (pin) นั้นจะสนใจบริเวณที่ยังไม่มีการเติมของเนื้อยางรูฉุดที่มีขนาดเล็กควรจะยึดติดอย่างมั่นคงที่บริเวณปลายหรือทำเป็นทรงเรียว (tapered) เพื่อที่จะลดการถอดตัวของเนื้อยาง, ในการออกแบบควรได้รับการพิจารณาเป็นอย่างมากในตำแหน่งช่องทางเข้า

ตำแหน่งของตัวแทรก (insert) ภายในแม่พิมพ์ซึ่งจะรวมเข้าไปในตัวชิ้นงานภายในชั้นแม่พิมพ์จำเป็นจะต้องเป็นวัตถุที่แข็งแรงทนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งภายในแม่พิมพ์นั้นจะมีความดันที่สูงโดยเฉพาะการพิจารณาที่จะใช้พลาสติกแทนเหล็กเป็นตัวแทรกภายในชิ้นงาน ตัวอย่างเช่น การใช้ตัวแทรกในการปิดผนึกต่าง ๆ (seal)

ในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับยางปิดผนึกด้านข้าง (lip seal) ดังภาพที่ 37 แสดงตัวอย่าง และให้ความสำคัญของตำแหน่งทางเข้าของเนื้อยางในตำแหน่งที่จะเข้าสู่ชิ้นงานมีความสำคัญต่อ ผลกระทบซึ่งอาจเกิดการรั่วไหลของเนื้อยางหลังจากการทดสอบ ช่องทางเข้าในบริเวณลาดเอียง (heel-gated) ของตัวปิดผนึกจะรั่วหลังจากการทดสอบในระยะเวลา 15 ถึง 18 นาที และช่องทางเข้าที่ เข้าจากด้านข้างจะไม่รั่วหลังจากทดสอบไปแล้วนานเกิน 300 ชม. สิ่งอื่น ๆ จะต้องพิจารณาคือ รอยตำหนิที่เกิดขึ้นบริเวณทางเข้าและสิ่งมลทินที่เกิดจากแม่พิมพ์หลังจากการแยกแม่พิมพ์ออกจากกันในขั้นตอนการผลิต

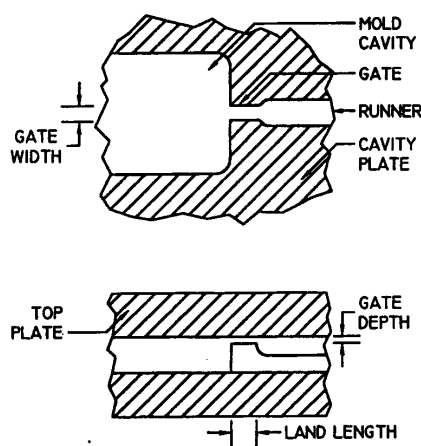


**ภาพที่ 37** ทางเข้าของเนื้อยางในตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของยางปิดผนึกด้านข้าง

ที่มา: Sommer (2003)

เนื้อยาง (compound) ที่แข็งจะสร้างผลกระทบให้เกิดรอยที่บริเวณผิวด้านบนของ ช่องทางไหลเข้าของตัวแม่พิมพ์, ตำแหน่งที่เกิดจะเกิดขึ้นชัดเจน คือ เกิดการยุบตัวลงไปที่ บริเวณผิวหรือเกิดเป็นลักษณะเหมือนภาพฉายทำให้เกิดเงาที่บริเวณผิว เนื้อยางที่อ่อนกว่า 50 ชอร์ (shore) จะทำให้เกิดลักษณะของการยุบตัวหรือภาพฉายขึ้น (depression or projection) จากผิวอยู่ที่ประมาณ 0.015 นิ้ว และถ้าแข็งกว่า 50 ชอร์เอ ค่าจะอยู่ที่ 0.007 นิ้ว ในภาพที่ 38 แสดงช่องทางไหล และช่องทางไหลเข้าและตัวรูปทรงชิ้นงานภายในแม่พิมพ์





**ภาพที่ 38** ช่องทางไหลและช่องทางไหลเข้าและตัวรูปทรงชิ้นงานภายในแม่พิมพ์

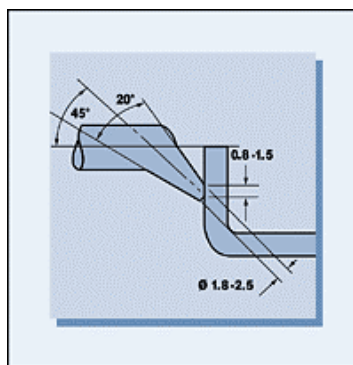
ที่มา: Sommer (2003)

ในช่องทางไหลแบบครึ่งวงกลม (semi circular) ดังรูปสามารถออกแบบให้การส่งผ่านเนื้อยางไปยังช่องทางจ่ายโดยมีความแตกต่างที่บริเวณหน้าตัดช่องทางเข้าขนาดของช่องทางเข้าขนาดของช่องทางไหลเข้าควรจะสัมพันธ์กับเวลาและปริมาตรของรูปทรงชิ้นงาน บ่อยครั้งที่สร้างมีขนาดเล็กกว่าในขั้นต้นซึ่งสามารถที่จะทำให้ใหญ่ขึ้นได้ในภายหลัง สำหรับช่องทางไหลเข้าที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่หน้าตัด (tap gate) สำหรับความยาวของพื้นที่หน้าตัดที่ 0.125 นิ้ว ซึ่งความลึกทั้งสองฝั่งของช่องทางเข้าจะเท่ากัน ซึ่งทางเข้าจะลึกอยู่ 0.01 ถึง 0.015 นิ้ว ช่องทางเข้าที่ลึกจะทำให้เหมาะสมกับค่าปัจจัยในการสร้างแม่พิมพ์ เช่น ใช้สำหรับเนื้อยางที่มีความหนืดสูง ความลึกนั้นจะมีความสำคัญสำหรับช่องทางไหลเข้าที่มีขนาดเล็กซึ่งจะเป็นตัวกำหนดเวลาในการเกิดปฏิกิริยาภายในเนื้อยาง (crosslinking time) สำหรับเนื้อยางในช่องไหลเข้า ช่องทางที่ไหลเข้าที่ลึก 0.02 นิ้ว และน้อยกว่า จะทำให้เวลาในการฉีดสัมพันธ์กับเนื้อยางที่มีความอ่อน ดังนั้นความลึกของช่องทางไหลเข้าจะเป็นผลกระทบกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาภายในเนื้อยาง และเวลาในการเติมเนื้อยางเข้าไปในรูปทรงแม่พิมพ์ ในช่องทางไหลครึ่งวงกลมที่เป็นร่องทั้งด้านบนและด้านล่างมาประกบกันจะเป็นรูปทรงวงกลมและช่องทางไหลเข้าจะเป็นลักษณะรูเข็มที่ทางไหลเข้า (pin gates) ช่องทางไหลเข้าแบบรูเข็ม จะมีขนาดอยู่ที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.010 ถึง 0.150 นิ้ว ควรที่จะใช้ในตำแหน่งที่มีผลกระทบน้อยที่สุดที่จะเกิดกับแม่พิมพ์ โดยปกติจะใช้เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.032 นิ้ว ลักษณะของช่องทางไหลเข้าแบบครึ่งวงกลมสองด้าน

ประกอบและแบบวงกลมนั้นจะสร้างได้โดยใช้หัวกัดแบบวงกลม แต่จะมีราคาที่สูงกว่า การใช้หัวกัดแบบราบเรียบที่ให้ขึ้นรูปช่องทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม ข้ออื่น ๆ ที่ควรจะพิจารณา

- การใช้เครื่องมือที่เป็นขนาดมาตรฐานจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายลง
- หัวกัดแบบทรงกลมสามารถสร้างช่องทางไหลที่มีขนาดเล็กลงทันทีทันใดได้สะดวก
- ช่องทางเข้าแบบวงกลมจำกัดการไหลน้อยกว่าช่องทางเข้าแบบครึ่งวงกลมและแบบสี่เหลี่ยมที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน

ร่องของรูทางไหลเข้าที่อยู่เหนือเนื้อเยื่อที่ไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ที่ตำแหน่งรอยต่อของชิ้นงาน (mould parting line) หลังจากการสุกตัวของเนื้อเยื่อเสร็จสิ้นลงแล้ว แม่พิมพ์จะเปิดออก และช่องทางไหลจะแยกตัวออกจากชิ้นงานโดยการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ โดยการขยายตัวและการฉีกขาดของเนื้อเยื่อที่สุกแล้วในช่องทางไหลเข้า การฉีกขาดของเนื้อเยื่อจำเป็นอย่างยิ่งที่จะเกิดขึ้นไม่ว่าจะด้านบนหรือด้านล่างของผิวยาง ส่วนที่ฉีกขาดออกเช่นร่องทางไหลจะถูกนำแยกออกไป ส่วนมากจะใช้ช่องทางเข้าแบบเอียงทำมุมเข้าด้านล่าง (submarine gates) ดังแสดงในภาพที่ 39 จะดีกว่าในการควบคุมด้านที่จะฉีกขาดออกไป



**ภาพที่ 39** ช่องทางเข้าแบบเอียงทำมุมเข้าด้านล่าง (submarine gates)

ที่มา: Sommer (2003)

ช่องทางเข้าแบบเอียงทำมุมเข้าด้านล่างจะจ่ายเนื้อยางเข้าไปในตัวแม่พิมพ์ในตำแหน่งที่ไกลจากรอยต่อของแม่พิมพ์ (parting line) และจะมีมุมประมาณ 45 องศา เพราะว่าช่องทางเข้าแบบเอียงเข้า (submarine gates) นั้นจะฉีกขาดด้วยแรงเลื่อนแทนแรงดึงการเอียงตัวของช่องทางไหลเข้าจะทำให้เนื้อยางไหลเข้าไปที่ผนังจะคงที่ทำให้ชิ้นงานดีขึ้น ช่องทางแบบเอียงเข้าสามารถที่ขยายตัวได้โดยการขึ้นรูป เพราะสามารถที่จะทำการเอียงตัวแม่พิมพ์ระหว่างทำการขึ้นรูปได้ ควรจะหลีกเลี่ยงในการสร้างช่องทางไหลเข้าที่แม่พิมพ์มีขนาดเล็ก ควรที่จะสร้างตัวแผ่นเหล็กแทรกเข้าไปในช่องภายในแม่พิมพ์, ช่องทางไหลเข้าแบบวงแหวนก็แสดงให้เห็นและขึ้นรูปทรงอื่น ๆ ของทางเข้าที่ใช้กับแม่พิมพ์ฉีด โดยหมุนตรงกลาง เช่น ตรงรอบแหวน (washers) และยางสำหรับร้อยสายไฟฟ้าผ่าน แผ่นโลหะ (gronnets)

### **แบบของแม่พิมพ์ (Mould layout)**

แบบของแม่พิมพ์นั้นจะต้องพิจารณาถึงการออกแบบสำหรับรูปทรงชิ้นงานในแม่พิมพ์ (cavities) ชุดให้ความร้อน (heaters) เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (thermocouples) ตำแหน่งของ dowels ฉนวน (insulation) ช่องทางจ่ายยาง (sprue) ช่องทางไหล (runners) ช่องทางเข้า (gates) ชุดกระทุ้งออก (ejectors) ช่องลม (vents) ช่องในการฉีกขาด (fear off grooves) และระบบสุญญากาศ (vacuum attachments)

### **แบบของรูปทรงชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ (Cavity layout)**

แบบของรูปทรงชิ้นงานที่คตินั้นจะต้องพิจารณาโดยเฉพาะอย่างยิ่งจำนวนของรูปทรงชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ เพราะจะคุ้มค่าในการลงทุนซึ่งจะต้องมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ภายในแม่พิมพ์ ซึ่งจะต้องพิจารณาในการออกแบบของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมและต้องมีประสิทธิภาพด้วย

ในการไหลของยางเข้าไปในรูปทรงของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์นั้นต้องการการไหลเข้าไปในแต่ละชิ้นงานนั้นเวลา ณ. ตำแหน่งต่าง ๆ ต้องเท่ากัน อัตราการไหลต้องเท่ากันโดยจะต้องทำการควบคุมสมดุลย์กันของการไหลรอบ ๆ จุดศูนย์กลางในการจ่ายยาง

### รูปทรงชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ (Cavities)

รูปทรงของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์จะแสดงให้เห็นรูปร่างของตัวเนื่ออย่างซึ่งจะสำคัญสำหรับความทนทานต่อการเกิดความดันที่สูงและความเค้นที่เกิดขึ้นหลังจากที่เนื่ออย่างไหลเข้าไปและอากาศที่กักภายในแม่พิมพ์ เวลาที่ไม่สม่ำเสมอของการไหลเข้าของเนื่ออย่างที่เข้าไปในแม่พิมพ์สามารถทำให้ผนังของรูปทรงชิ้นงานเกิดจุด yield point ซึ่งความหนาแน่นจะไม่พอเพียงในการเพิ่มเติมตัวแม่พิมพ์นั้นจะห่อหุ้มรูปทรงของชิ้นงานอยู่ความหนาที่พอเพียงนั้นจะต้องทนต่อการเกิดการบิดงอซึ่งจะมีส่วนทำให้เกิดผิวที่มีลักษณะมันวาวเนื่องจากการกระแทกรอยขีด

ความหนาต่ำสุดอยู่ที่ 0.875 นิ้ว ซึ่งจะแนะนำให้ใช้กับแม่พิมพ์ตัวบน ตัวแม่พิมพ์นั้นจะต้องมีความทนทาน และทนต่อจำนวนรอบในการทำงานที่สูงซึ่งจะต้องมีการบำรุงรักษาตามระยะเวลาที่กำหนด

องค์ประกอบความสำคัญอื่น ๆ ได้แก่ รูปแบบในการวางของรูปทรงภายในแม่พิมพ์ (cavity layout) และพื้นที่ภายในรูปทรงของชิ้นงานในแม่พิมพ์ (cavity spacing) ในการวางรูปแบบของตัวชิ้นงานในแม่พิมพ์และช่องทางไหลต้องการผลที่จะได้คือต้องการที่จะทำให้ความดันที่กระจายตัวนั้นค่อนข้างที่จะคงที่โดยกระทำตามขวางกับพื้นผิวของแม่พิมพ์บริเวณรอยต่อของแม่พิมพ์ (parting line) การกระจายตัวที่ไม่ได้รูป มีแนวโน้มที่จะทำให้แม่พิมพ์มีการเปิดตัวออกจากกันที่ บริเวณรอยต่อซึ่งจะทำให้เกิดการสึกหรอที่ผิวได้ เช่นเกิดการมันวาวขึ้น เป็นต้น

การเกิดแฟลช (flash) เป็นลักษณะของแผ่นฟิล์มบาง ๆ ของบริเวณภายนอกของเนื่ออย่างที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวแม่พิมพ์ภายในรูปทรง

ในการกำหนดการเกิดฟิล์มบาง ๆ ในชิ้นงานบางชนิดนั้นจำเป็นที่จะต้องเกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ในฉนวนกันกระแสไฟฟ้าในการออกแบบแม่พิมพ์ฉนวนโดยปกติจะออกแบบให้ตัวยึด (clamped) รวมกันในแนวแกนของชิ้นงาน การเกิดฟิล์มบาง ๆ ที่รอยต่อของแม่พิมพ์ชิ้นงานฉนวนในแม่พิมพ์ตรงบริเวณนี้จะต้องขัดให้มีผิวเรียบเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการเกิดรอยต่อของชิ้นงานขึ้นเป็นแนวยาวในแนวแกนเมื่อเกิดรอยต่อชิ้นงานจะต้องทำการแก้ไขในการปรับปรุงออกแบบแม่พิมพ์เปลี่ยนตำแหน่งของการประกอปกกับของแม่พิมพ์จากแนวนอนเป็นแนวเส้นรอบวงและลดแนวการประกอปกของกันแนวนอนของแม่พิมพ์

แผ่นฟิล์มบาง ๆ เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด เช่น การออกแบบโอริง (o-ring) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโอริงที่มีขนาดเล็ก (small o-ring) แผ่นฟิล์มบาง ๆ ที่เกิดบนโอริงจะเกิดที่บริเวณด้านในสุดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กของโอริง (inside diameters, I.D.) เป็นอย่างมากและเป็นการยากที่จะทำให้ลดลง ในการออกแบบแม่พิมพ์ที่จะทำให้อุณหภูมิเย็นเมื่อใช้แท่งสอตรงกลางของชิ้นงาน และทำการลดฟิล์มบาง ๆ ลงโดยทำการหลังการเกิดปฏิกิริยาแผ่นฟิล์มบาง ๆ ที่ผิวด้านนอก (O.D.) สามารถลดลงได้โดยวิธีการธรรมดา เช่น การ Cryogenic tumbling

\*(ความสมมาตรที่เท่ากันนั้นจำเป็นในการออกแบบรูปทรงชิ้นงานในแม่พิมพ์ เช่น แผลงหน้าปัดด้านหน้าของรถ การขัดให้ชิ้นงานภายในรูปทรงชิ้นงานในแม่พิมพ์ในการขัดนั้นเมื่อเสร็จแล้วความละเอียดจะอยู่ที่ 10 ถึง 20 ไมครอนก็จะเป็นที่ยอมรับได้ ข้อที่ควรจำการขัดเงาที่จะได้ผลดีจะต้องทำโดยวิธีการที่ถูกต้องและใช้กระดาษทรายเบอร์ 320 ในขั้นตอนสุดท้าย)

ในความเป็นไปได้ของการมีจำนวนรูปทรงชิ้นงานภายในแม่พิมพ์มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้นั้นยังเป็นปัญหาอยู่ในหลายข้อที่จะต้องคำนึงถึงหนึ่งในนั้นคือแรงกระทำกับผิวที่รอบของรูปทรง เช่น งานที่บริเวณริมขอบของแม่พิมพ์ตอนแม่พิมพ์ปิด ซึ่งจะทำให้การควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในรูปทรงชิ้นงานนั้นยาก ซึ่งจะเกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งของรูปทรงชิ้นงานและยังมีปัญหาของต่อชิ้นงานอยู่ที่บริเวณมุมของแม่พิมพ์ สำหรับแม่พิมพ์พลาสติกระยะทางการอยู่ที่ 3 นิ้ว จากผิวของรูปทรงแม่พิมพ์กับผิวนอกสุดของแม่พิมพ์ แต่ควรจะเริ่มที่สี่นิ้วขึ้นไป การทำให้แม่พิมพ์มีความเที่ยงตรงในการลงมาประกบกัน ซึ่งจะทำให้พื้นที่ที่ออกแบบไว้ตรงกันสามารถกำหนดได้หลายวิธี เช่น ให้เข็มนำ (leader pins), ใช้บล็อกนำ (bushings) และการใช้สลักร้อย การใช้สลักร้อยนั้นจะเป็นตัวกลางในการเลื่อนขึ้นลงระหว่างแม่พิมพ์ที่อยู่กับที่กับตัวที่เคลื่อนที่ และต้องพิจารณาตอนประกอบกันของช่องจะต้องตัดกันที่บริเวณขอบ การเชื่อมต่อสำหรับท่อสุญญากาศ และระบบช่องทางไหล

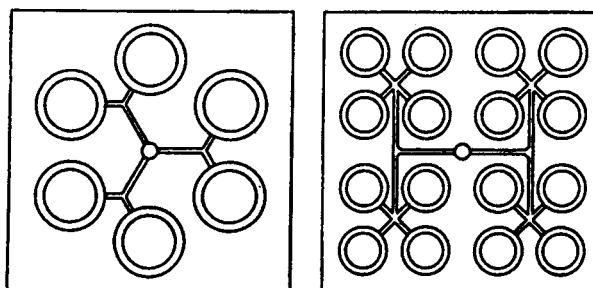
การวางตำแหน่งของช่องทางไหลเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาในการเชื่อมต่อกันของช่องว่างซึ่งต้องพิจารณาดังตัวอย่างช่องทางไหลของของไหลที่ถ่ายเทความร้อนและชุดการให้ความร้อนนั้นจะออกแบบให้ผนังของรูปทรงชิ้นงานนั้นจะต้องมีความหนาแน่นพอเพื่อที่จะขัดขวางการเปลี่ยนแปลงรูปทรงไปของผนังในรูปทรงชิ้นงาน ในการออกแบบแม่พิมพ์นั้นจะต้องคำนึงถึงกฎเกณฑ์ข้อบังคับในการออกแบบและพิจารณาองค์ประกอบอื่น ๆ

ประกอบด้วยโดยอาจจะเปรียบเทียบกับระบบของโทโมพลาสติก ซึ่งจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดยางได้เป็นอย่างดี

กฎเกณฑ์ในการออกแบบสำหรับระบบช่องทางไหลพิจารณาในรายละเอียดดังนี้

- ออกแบบให้ระบบช่องทางไหลมีปริมาณน้อยที่สุด
- ออกแบบสำหรับช่องทางไหลของความดันที่สูงเสียก่อนข้างดี
- พิจารณาการเชื่อมต่อของตำแหน่งช่องทางจ่าย (gate) ทุก ๆ ตำแหน่ง

ความพร้อมกันของการไหลเข้าที่ภายในแม่พิมพ์ของเนื้อยางภายในแม่พิมพ์เป็นจุดมุ่งหมายหลักสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ การทำให้ช่องทางไหลมีการสอดคล้องกันของการไหลนั้นสำคัญ แต่ยังไม่พอเพียงที่จะทำให้บรรลุถึงจุดมุ่งหมายที่จะทำให้เนื้อยางไหลเข้าพร้อม ๆ กัน เพราะยังมีปัจจัยอื่น ๆ เช่น ขนาดของทางเข้าและอุณหภูมิเนื้อยางที่มีผลกระทบต่อการไหลเข้าไปในรูปทรงชิ้นงาน ภาพที่ 40 แสดงการจัดการรูปทรงชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์ฉีด



**ภาพที่ 40** แสดงการจัดการรูปทรงชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์

ที่มา: Sommer (2003)

แม่พิมพ์ฉีดที่แสดงในภาพที่ 40 จะแสดงให้เห็นการเชื่อมต่อของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ในแต่ละอัน ซึ่งจะต้องพิจารณาถึงความสมดุลกันควบคู่ไปกับความสมมาตรกันของจำนวนรูปทรงชิ้นงาน หลังจากการทดสอบการไหลแล้วรูปทรง H จะขาดความสมดุลดังแสดงในภาพที่ 3.26 ซึ่งผลสรุปคือการออกแบบนี้ใช้กับการออกแบบที่เป็นแม่พิมพ์ของเทอร์โมพลาสติกและก็สามารถที่จะเริ่มนำไปใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์เป็นยางได้

ความเค้นเฉือนและความร้อนจะเปลี่ยนแปลงตลอดในตัวโพลิเมอร์ในการไหลไป  
ในช่องทางไหล ทำให้เกิดการไหลที่ไม่สมดุลภายในแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างแบบ H จะแก้ไขปัญหา  
ที่เกิดกับการไหลไม่สมดุลว่า “Melt Flipper” (การละลายของครีป) การทำให้โพลิเมอร์เกิด  
การหมุนและวิธีการในการที่จะทำให้การไหลที่สมดุลกันนั้นมีอยู่หลายวิธี เช่น การที่มุมที่  
เป็นกึ่งเพิ่มเข้าไปในตัวช่องทางไหลและอัตราส่วนของการฉีดที่จะต้องสัมพันธ์กัน มุมที่เป็นกึ่ง  
นั้นจะเป็นมุมที่อยู่ระหว่างช่องไหลที่เชื่อมต่อกับตัวชิ้นงานและตัวกึ่งเอง การเพิ่มขึ้นของมุมที่กึ่ง  
จะทำให้การควบคุมการเพิ่มขึ้นและการไหลไม่สมดุลภายในรูปทรงแม่พิมพ์

หลายวิธีที่แตกต่างกันในการใช้สร้างรูปทรงภายในแม่พิมพ์ โดยการขึ้นรูปโดยเครื่องจักร  
เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด วิธีการขึ้นรูปสามารถทำรวมกันได้โดยการขึ้นรูปโดยเครื่องจักรแล้วตาม  
ด้วยวิธีการ hobbing ทำโดยการลดความแข็งแรงลงโดยการให้แรงกระทำให้เหล็กนั้นอ่อนลงบริเวณ  
ภายในรูปทรงของชิ้นงาน การทำ hobbing จะเหมาะสมกับที่จะใช้กับแม่พิมพ์ที่มีจำนวนชิ้นงาน  
มากและมีความซับซ้อนของความโค้งสูง แต่มีข้อกำหนดในรูปทรงที่มุมแหลมคม และมีส่วนตัด  
ภายใน (under cuts) และแม่พิมพ์มีการขัดเงาที่สูงและมีการทำมุมทุกด้าน

การขึ้นรูปโดยใช้กระแสไฟในการขับไล่โลหะออก (EDM) เป็นวิธีใหม่ที่เป็นที่นิยม  
ในการขึ้นรูปร่างชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ EDM ต่างจากการทำ Hobbing ในการที่จะสร้างรูปร่าง  
ของตัวชิ้นงานนั้นจะต้องนำขั้วไฟฟ้าจมลงไปในแผ่นเหล็กที่ต้องการขึ้นรูปหรือใช้เส้นลวดลาก  
ผ่านแผ่นโลหะในการขึ้นรูปแบบ EDM นี้จะไปทำให้เกิดแรงที่กระทำสูงในขณะที่ทำการควบคุม  
การขึ้นรูปซึ่งปกติจะเกิดการขึ้นรูปโดยเครื่องจักรและแบบ hobbing

EDM สามารถใช้ในการขึ้นรูปร่วมกับวิธีการขึ้นรูปอื่น ๆ ในการสร้างร่องที่มีความลึก  
ซึ่งถ้าต้องการความลึกในแม่พิมพ์ที่กำหนดไว้ครั้งหนึ่งซึ่งสามารถจะใช้หัวกันได้ แต่ต้องสร้าง  
ร่องต่อโดยใช้ EPM ก็จะใช้เวลาการขึ้นรูปเท่า ๆ กัน โดยปกติแล้วแนวทางการเลือกในการทำ  
ร่องจะต้องใช้หัวกับความเร็วสูง (high-speed milling) ในการกัดร่องให้ลึกลงไป 30 mm ต่อจาก  
นั้นใช้ EDM ตามจนได้ความลึกตามที่ต้องการ

แม่พิมพ์สำหรับผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่เป็นแนวหน้าปิดด้านหน้าของรถ (fascia)  
ซึ่งจะต้องการความเที่ยงตรงเป็นอย่างสูงและต้องการแข็งแรง และความต้านทานต่อลมที่ปะทะ  
ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างระหว่างที่เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูง ขนาดของอนุภาคที่กำหนดกัน

ที่จะบรรจุนั้นจะอยู่ในระดับสูงภายในตัวเนื้อยาง (compound) ซึ่งสามารถทำให้เกิดความแข็งแรงได้แต่ถ้ามากเกินไปจะทำให้ตัวเนื้อยางมีความหนืดสูงภายในตัวแม่พิมพ์ฉีด ในการเลือกตัวผสมที่เป็นโพลิเมอร์ และส่วนผสมอื่น ๆ ในเนื้อยางผสมแบบ EPDM เพื่อจะทำให้เกิดความสมดุลย์ในการไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์ ระยะเวลาในการไหลของยาง ความแข็งและอื่น ๆ ที่ต้องการตามคุณสมบัติ สำหรับวิธีการและเหตุผลทางเศรษฐกิจเป็น EPDM ในภายหลังใช้โพลิโพรไพรีน (polypropylene) ในการสร้างโพลิโพลีเอสเตอร์ โพลิเอทิลีน (thermoplastic polyolefin (TPO)) เป็นองค์ประกอบ

### **ช่องลมภายในแม่พิมพ์ (Mould venting)**

สำหรับการผลิตที่มีอัตราส่วนของชิ้นงานที่สูงและจะต้องใช้เวลาในการไหลเข้าที่ควบคุมให้มีระยะเวลาที่สั้นที่สุดในการไหลของเนื้อยางเข้าไปในแม่พิมพ์ในเวลาอย่างน้อยว่าหนึ่งวินาที และอากาศที่อยู่ภายในแม่พิมพ์จะต้องไหลออกไปสู่ภายนอกในเวลาเดียวกันด้วยดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องสร้างช่องทางระบายอากาศของช่องลมไว้

ในเวลาที่มีการฉีดแบบเร็วขึ้นในการฉีดนั้นบ่อยครั้งจะมีความยุ่งยากของตำแหน่งของช่องลมภายในแม่พิมพ์ซึ่งจะต้องทำการออกแบบโดยวิธีการนำพาอากาศออกแบบ Diamond – scratching. ในการเปลี่ยนแปลงของอากาศเพียงเล็กน้อยจะทำให้เกิดปฏิกิริยาของเนื้อยางกับออกซิเจนได้รุนแรง

ช่องลมนั้นจะมีลักษณะที่แคบเป็นท่อเล็กๆ ส่วนใหญ่จะทำการออกแบบให้อยู่ในแนวรอยต่อกันของแม่พิมพ์ โดยปกติตำแหน่งของช่องลมนั้นจะอยู่ตรงกันข้ามกับช่องทางไหลเข้าหรือจุดจ่ายและในระบบการจ่ายเนื้อยางแบบหลายทางนั้นจะให้ช่องลมอยู่ระหว่างจุดจ่าย

ขนาดของช่องลมจะขึ้นอยู่กับปริมาตรของอากาศที่เคลื่อนที่ออกแต่จะอยู่ประมาณ 0.05 มม. (0.002 นิ้ว) สำหรับความกว้าง และจะลึก 3.2 มม. (1/8 นิ้ว) โดยทั่วไปในการผลิตนั้นจะไม่ค่อยได้สังเกตตำแหน่งของช่องลมเพราะในแบบนั้นช่องลมจะมีลักษณะที่เล็กและการกำหนดลงไปภายในแบบของแม่พิมพ์ซึ่งจะทำให้เกิดการละเลยขึ้นได้



การเกิดหลุดของอากาศ (air trapping) ภายในตัวชิ้นงานที่อยู่ภายในแม่พิมพ์จะเกิดเป็นแนวยาวและลึกลงไปภายในชิ้นงาน ในการที่จะลดการเกิดนั้นจะต้องมีการเลือกระบบสุญญากาศที่ติดไว้ภายในช่องลมซึ่งปั๊มสุญญากาศนั้นจะต้องพิจารณาถึงอากาศที่ไหลออกที่ต้องใช้เวลาน้อยกว่าหนึ่งวินาทีภายหลังจากทำการปิดแม่พิมพ์และจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นอย่างสูงที่สุด

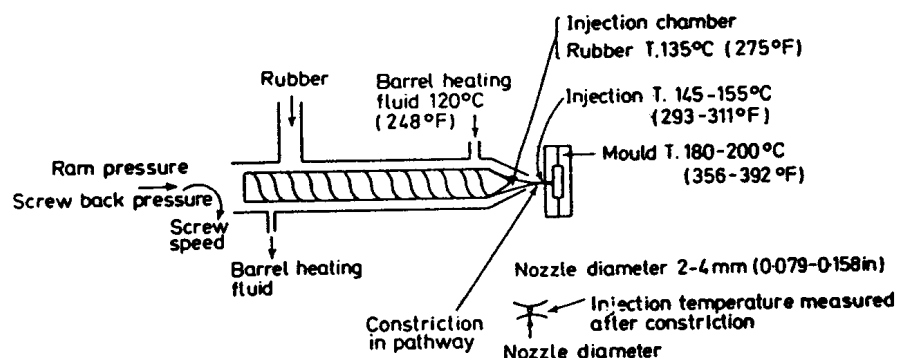
### ผลกระทบที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดยาง

เมื่อพิจารณาคู่กันระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ของเครื่องจักรและตัวแปรของเนื้อยางซึ่งทั้งคู่จะมีผลกระทบกับอัตราส่วนของการบ่มตัวของยาง อัตราส่วนของการไม้ และประสิทธิภาพทั่วไปของแม่พิมพ์ฉีด ในตอนแรกของการทดสอบจะทำการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ของเนื้อยางโดยให้เป็นเนื้อยางธรรมชาติ (natural rubber compound) และดูผลกระทบหลักของกระบวนการต่าง ๆ ของเครื่อง ซึ่งจะต้องกำหนดตัวแปรของเครื่องให้สะดวกในการทดสอบต่อจากนั้นค่อยทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในเนื้อยาง บางทีจะต้องใช้ตัวอย่างที่เป็นมาตรฐานในการทดสอบ

การเปลี่ยนแปลงตัวแปรของเครื่องฉีดยางนั้นจะต้องพิจารณาในขั้นตอนการทำงานที่จะเกิดในแต่ละกระบวนการซึ่งจะพิจารณาไว้ 2 กลุ่ม

1. โดยการควบคุมการให้ความร้อนและช่วงหลอมเหลวของยางขณะที่อยู่ในช่วงแรกของการฉีดขณะที่ปริมาตรที่จะเข้าไปในแม่พิมพ์จะถูกบรรจุอยู่บริเวณผิวหน้าของก้านกระทุ้ง (ram) ภายในกระบอกฉีด (injection chamber) ตัวอย่างความเร็วของสกรู (screw speed) อุณหภูมิของกระบอกฉีด (barrel temperature) และ แรงดันกลับของสกรู (screw back pressure)

2. การกำหนดขั้นตอนต่างๆ ในการไหลเข้าแม่พิมพ์ (mould filling) ตัวอย่างเส้นผ่าศูนย์กลางของรูฉีดเข้า (nozzle orifice diameter) แรงดันตอนฉีดและความเร็วของด้ามกระทุ้งในการฉีด ในการเปลี่ยนแปลงในกลุ่มที่ 2 จะพึงพาวาอาศัยซึ่งกันและกันการเปลี่ยนแปลงผลกระทบจะแสดงให้เห็นภาพที่ 41



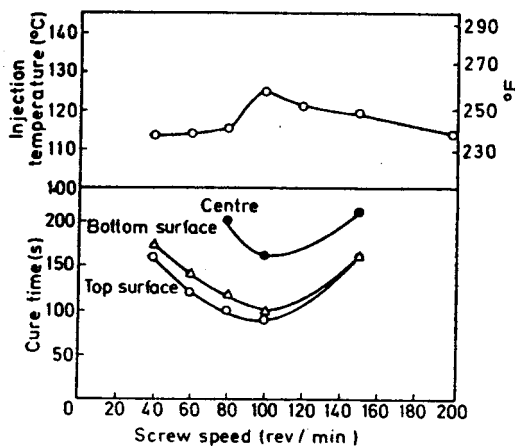
**ภาพที่ 41** แสดงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการฉีดยางในขั้นตอนต่าง ๆ

ที่มา: Wheelans (1974)

ในช่วงแรกนั้นจะพิจารณาถึงอุณหภูมิกระบอกฉีดเป็นตัวแปรสำคัญตัวเดียวที่มีผลกระทบกับอุณหภูมิในการฉีด ในอุณหภูมิที่ต่ำของกระบอกฉีดนั้น จะมีผลต่อองค์ประกอบของยางภายในกระบอกฉีด และในด้านหน้าของตัวสกรูที่ใช้ดันในการฉีด และจะตัดผลกระทบตัวอื่น ๆ ของการเปลี่ยนแปลงของเครื่องฉีดออก โดยเฉพาะเมื่อสกรูหมุนหรือสกรูเลื่อนมาข้างหลัง (screw back) การควบคุมโดยการเลื่อนสกรูกลับมาหลังจากที่ฉีดไปแล้วจะมีการถ่ายเทความร้อนก่อนที่จะทำการฉีดในกระบวนการต่อไป

#### ผลกระทบของความเร็วของสกรู (Effect of Screw Speed)

การทำงานของสกรูจะทำการส่งถ่ายตัวเนื้อยางไปยังตำแหน่งที่พร้อมจะฉีดออกไป ที่สำคัญในการเครื่องฉีดยางนั้นสามารถที่จะควบคุมความเร็วของสกรูโดยผ่านชุดเครื่องควบคุมความเร็ว ในภาพที่ 42 แสดงการเพิ่มขึ้นของความเร็วของตัวสกรูในเครื่อง peco ยางในกระบอกฉีดนั้นจะมีความร้อน และจะทำให้อุณหภูมิในการฉีดสูง และเวลาในการฉีดเนื่องานนั้นสั้นลง เวลาในการบ่มจะกำหนดโดยค่าความแข็งของตำแหน่งบน กลาง และล่าง ของแม่พิมพ์ที่กำลังปิดอยู่และมีอุณหภูมิของการฉีดและสถานะที่อยู่ภายใต้ความดันทั่วไปของความดันกลับ และอุณหภูมิของกระบอกสูบ



**ภาพที่ 42** การเพิ่มขึ้นของความเร็วของตัวสกรูในเครื่อง peco ที่มีผลต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการบ่มตัวของเนื้อยางในตำแหน่งต่าง ๆ

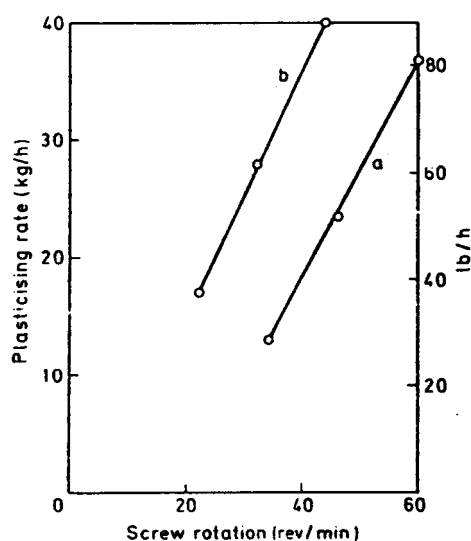
ที่มา: Wheelans (1974)

จากกราฟจะได้จุดเหมาะสมของความเร็วของสกรูที่ 100 รอบต่อนาที (rev/min) ความเร็วที่สูงกว่า 100 รอบต่อนาที จะทำให้การส่งถ่ายเนื้อยางเร็ว ซึ่งอาจจะทำให้เกิดช่องทางของอากาศภายในชิ้นงาน (some air trapping) ความสูงของแรงดันกลับจะช่วยทำให้อากาศที่เกิดขึ้นขณะทำการฉีดยางเข้าไปในแม่พิมพ์ลดลงและช่วยให้ความเร็วของสกรูเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิที่เป็นไปได้

ในความสัมพันธ์ของความสัมพันธ์กันระหว่างอุณหภูมิในการฉีด และเวลาในการบ่ม และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการฉีดประมาณ  $10^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจะมีผลกระทบสูงในการลดของเวลาในการบ่มลง จากกราฟจะให้ข้อมูลที่เพิ่มขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงตัวแปรของเครื่องฉีด และผลกระทบของเวลาในการบ่ม

ในการเลือกความเร็วของสกรูจะขึ้นอยู่กับเครื่องฉีด และส่วนผสมของเนื้อยางแต่การเลือกที่ดีที่สุดจะอยู่บนพื้นฐานของความเป็นจริงที่สามารถที่จะทำได้ โดยที่จุดที่เหมาะสมของความเร็วของสกรูในเครื่อง Desma 900 ให้ความเร็วระหว่าง 50 ถึง 125 รอบต่อนาที (rev/min) ที่ความเร็วต่ำแนะนำสำหรับส่วนผสมที่มีความหนืดสูง

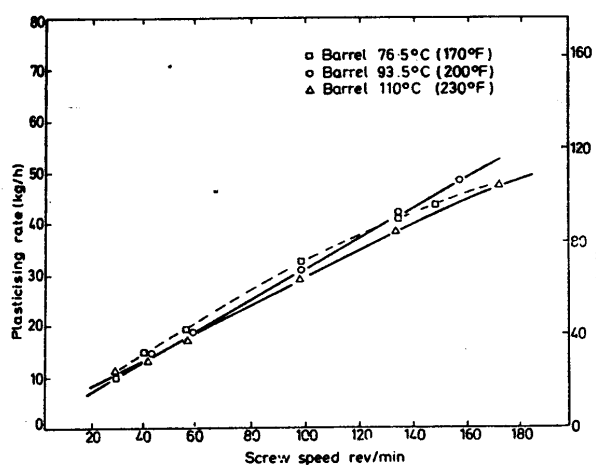
Klein-Albers and Franck (1974) ได้ทำการใช้ความเร็วของสกรูระหว่าง 22 ถึง 60 รอบต่อนาที โดยใช้เครื่อง Ankerwerk machine ซึ่งจะเสนอการปรับปรุงในประสิทธิภาพของการหลอมตัวของเนื้อมะพร้าวในสกรูที่มีขนาดของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางในภาพที่ 43 แสดงค่าความจุของเนื้อมะพร้าวตามปกติโดยตั้งค่าความเร็วของสกรูและความดันกลับของสกรู โดยให้การจ่ายแบบเต็มทีในตัวสกรูจ่ายก่อนที่จะกระบวนการจะสมบูรณ์



**ภาพที่ 43** ค่าความจุของเนื้อมะพร้าวตามปกติโดยตั้งค่าความเร็วของสกรูและความดันกลับของสกรู โดยการใช้การจ่ายแบบเต็มที

ที่มา: Klein-Albers and Franck (1974)

ผลกระทบความเร็วของสกรูและอุณหภูมิในตัวเนื้อมะพร้าวอัตราส่วนโดยการทดสอบ โดยเครื่อง Daniels Edgwick 45 SR จะแสดงคู่กันในภาพที่ 44 ผลของอุณหภูมินั้นจะมีผลกระทบ น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วของสกรู



**ภาพที่ 44** ผลของอุณหภูมิกับความเร็วของสกรูที่มีผลกระทบต่อการฉีดเนื้อยาง

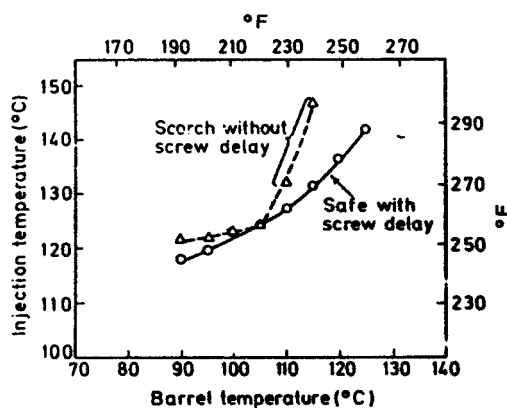
ที่มา: Wheelans (1974)

#### **ผลกระทบของอุณหภูมิกะบอกลัด (Effect of barrel Temperature)**

อุณหภูมิของกระบอกฉีดอาจเป็นผลกระทบสำคัญในการควบคุมปัจจัยของเครื่องฉีดยาง อุณหภูมิของกระบอกฉีดนั้นควบคุมโดยวัสดุโดยมีค่าความจุความร้อนที่สูงกว่าน้ำหรือใช้น้ำที่มี การผสม glycol หรือน้ำมันโดยจะควบคุมโดยตัวโทโมสต์สในการควบคุมในการที่จะไหลเข้าไป ในกระบอกฉีด ในบางเครื่องฉีดจะใช้สองหรือสาม (desma 900 series) แยกในการควบคุม บริเวณของพื้นที่ความร้อนตามบริเวณความยาวของกระบอกฉีด การให้ความร้อนโดยกระบวนการ ทางไฟฟ้าแบบบล็อกใช้ในบางเวลาแต่จะไม่ปลอดภัยแต่จะเป็นการง่ายในการปรับปรุง เมื่อต้องการให้เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเร็วตามที่ต้องการ ในความจริงนั้นในการพัฒนาของ การจ่ายความร้อนโดยน้ำในกระบอกฉีดสำหรับแม่พิมพ์ฉีดยางจะมีความเป็นไปได้โดยสามารถ ที่จะควบคุมการเกินของอุณหภูมิภายในของกระบอกฉีดได้ดี

ในปัจจัยของการไหลของของเหลวที่มีความร้อนและเนื้อยางที่ได้รับความร้อนในพื้นที่ การไหลภายในกระบอกฉีดและรักษาซึ่งอุณหภูมิในการไหลที่สอดคล้องโดยอิสระจากการไหล หลังจากที่มีการถ่ายเทความร้อนจากสกรู และตัวเนื้อยางในปลายสกรูพร้อมที่จะฉีดยางออกมา

ในการใช้อุณหภูมิที่สูงของกระบอกฉีดยางในสกรูที่หมุนและในพื้นที่ด้านหน้าของก้าน กระทั่งสามารถที่จะรักษาอุณหภูมิที่สูงไว้ได้ ในภาพที่ 45 แสดงถึงอุณหภูมิในการฉีดที่สูงขึ้น โดยการทำให้ความร้อนของกระบอกสูบสูงขึ้น



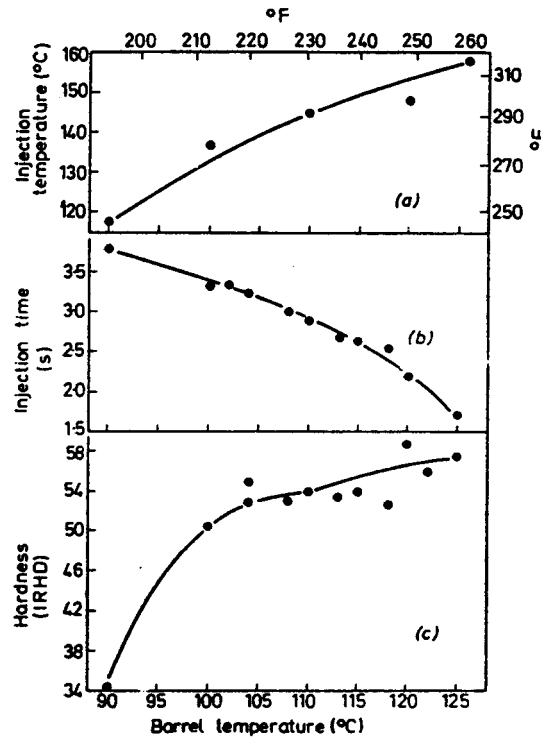
**ภาพที่ 45** อุณหภูมิในการฉีดที่สูงขึ้นโดยการทำให้ความร้อนของกระบอกสูบสูงขึ้น

ที่มา: Wheelans (1974)

เมื่อไม่มีการถ่วงเวลาในการควบคุมสกรูอุณหภูมิที่ต่ำกว่า  $105^{\circ}\text{C}$  ( $221^{\circ}\text{F}$ ) เหนืออย่างจะยังไม่เหลวตัวเต็มที่ (premature vulcanization) ในกระบอกฉีดอุณหภูมิที่สูงภายในกระบอกฉีด บางที่จะรักษาระดับของอุณหภูมิไว้เมื่อมีการหน่วงเวลาของสกรูในขั้นตอนในการเตรียมที่จะฉีด ในขั้นตอนต่อไป อุณหภูมิในการฉีดที่อยู่เหนือ  $140^{\circ}\text{C}$  ( $284^{\circ}\text{F}$ ) จะทำให้การไหม้หมดไป และการไหลเข้าแม่พิมพ์จะดีโดยค่าอุณหภูมิกระบอกฉีดที่อยู่ในช่วง  $90\text{--}125^{\circ}\text{C}$  ( $194\text{--}257^{\circ}\text{F}$ ) จะต้องพิจารณาแล้วแต่กรณี

การล่าช้าของสกรู อุณหภูมิของกระบอกฉีดอยู่ต่ำกว่า  $125^{\circ}\text{C}$  ( $157^{\circ}\text{F}$ ) จะก่อให้เกิดการที่เหนืออย่างยังไม่เหลวตัวแบบสมบูรณ์ภายในกระบอกฉีด

เมื่อใช้เครื่อง Daniels 45 SR โดยใช้แม่พิมพ์ทดสอบเพื่อที่จะหาค่าการสูงขึ้นของ อุณหภูมิของกระบอกฉีดโดยการเพิ่มข้อกำหนดเข้าไปตามข้อคือ เพิ่มอุณหภูมิในการฉีดและ ลดเวลาในการฉีดกับเวลาในการบ่ม ภาพที่ 46 (a, b และ c) ผลกระทบของเวลาในการบ่ม จะแสดงให้เห็นในตารางที่ 7 โดยการเพิ่มอุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  ( $63^{\circ}\text{F}$ ) ในอุณหภูมิกระบอกสูบและ ลดเวลาในการบ่มของชิ้นงานตัวอย่างที่หนา 1 ซม. (0.394 นิ้ว) โดยปัจจัยต่าง ๆ ทั้งสี่



**ภาพที่ 46** การสูงขึ้นของอุณหภูมิของกระบอกฉีดโดยการเพิ่มข้อกำหนดโดยเพิ่มอุณหภูมิในการฉีดและลดเวลาในการฉีดกับเวลาในการบ่ม

ที่มา: Wheelans (1974)

**ตารางที่ 8** ผลกระทบของอุณหภูมิของกระบอกฉีดที่มีต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการบ่ม

|                                                   |          |          |          |
|---------------------------------------------------|----------|----------|----------|
| Barrel temperature, °C (°F)                       | 90(194)  | 100(212) | 125(257) |
| Injection temperature, °C (°F)                    | 118(244) | 137(279) | 158(317) |
| Injection time, s                                 | 3.8      | 3.3      | 1.7      |
| Time to cure 1 cm thick section, s                | 180      | 90       | 45       |
| Daniels-Edgwick 45 SR machine; RAPRA beaker mould |          |          |          |

ที่มา: Wheelans (1974)

ในการกำหนดค่าอื่นของเครื่องจักรนั้นจะต้องใกล้เคียงหรือเป็นไปได้ในการเพิ่มอุณหภูมิของกระบอกฉีดซึ่งทำให้เวลาในการบ่มเร็วขึ้นเช่นกัน ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการไหม้ที่บริเวณกระบอกหรือหัวฉีดในเครื่อง Daniels ที่อุณหภูมิกระบอกสูบ  $128^{\circ}\text{C}$  ( $263^{\circ}\text{F}$ ) จะทำให้ความปลอดภัยลดลงเพียงเล็กน้อย ถ้าเกิดการไหม้ภายในแม่พิมพ์จะต้องลดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ลงเวลาในการฉีดจะทำให้เกิดรอบฟองอากาศซึ่งจะเห็นโดยชัดเจน ช่องของแม่พิมพ์หรือช่องสูญญากาศในแม่พิมพ์เป็นสิ่งจำเป็น ในการเลือกขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางรูฉีดลดลงจะทำให้เพิ่มระยะเวลาในการไหลเข้าและจะไล่อากาศออกจากแม่พิมพ์ ในขั้นตอนต่อมาควรปรับอุณหภูมิของการฉีด

### **ผลกระทบของแรงดันของสกรู (Effect of screw back pressure)**

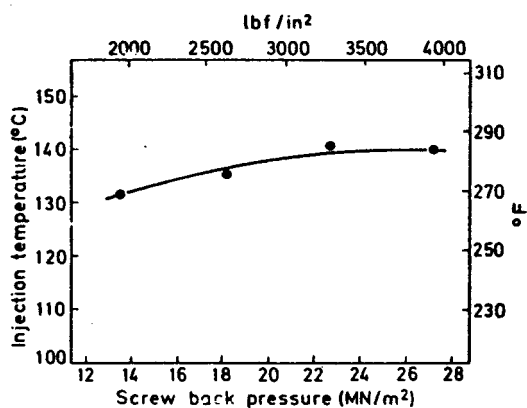
ความต้านทานของการเคลื่อนที่ของสกรูจะขึ้นอยู่กับความหนืดของยางที่ไหลผ่าน โดยจะมีมวลของเนื้อยางอยู่ด้านหน้า แรงดันของสกรูที่ดันหรือแรงดันของสกรูกลับจะเป็นแรงที่จะไปไล่อากาศให้ออกจากเนื้อยาง (เกิดจากการป้อนเนื้อยางเร็ว) และไล่ความร้อนที่ผ่านเข้ามาในช่องทางไหล

ในความดันที่สูงของเครื่องฉีดยางนั้นสามารถที่จะสร้างขึ้นและควบคุมจากภายนอก โดยการปรับชุดวาล์วไฮโดลิกสกรูความดัน – สกรูแรงดันสามารถที่จะปรับโดยใช้แรงดันของไฮโดลิก ซึ่งจะกระทำกับเนื้อยางภายในกระบอกสูบระหว่างที่สกรูหมุนอยู่

แรงดันของสกรูจะทำให้แรงเสียดทานภายในเพิ่มขึ้น และต้องการแรงในการขับสกรูในการป้อนยางมากขึ้นด้วย ในภาพที่ 47 แสดงถึงการควบคุมเครื่อง Peco โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการฉีดที่ความเร็วรอบ 80 รอบ/นาที จะได้แรงดันที่คืออยู่  $23 \text{ MN/m}^2$  ( $3250 \text{ lbf/in}^2$ ) โดยที่ไม่เกิดความล่าช้าของสกรูซึ่งจะทำให้แรงดันของสกรูเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

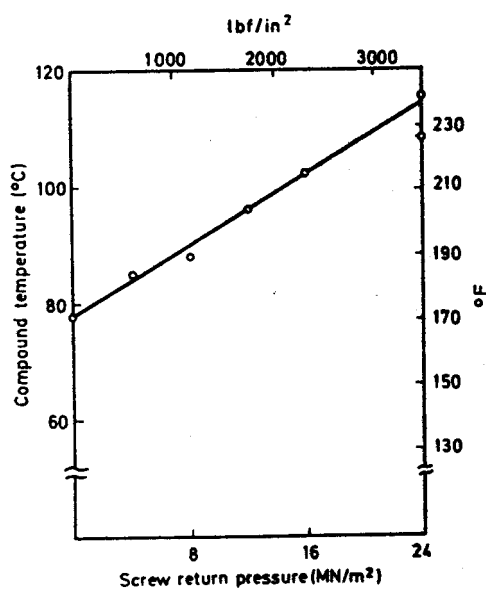
Kleine – Albers and Frank (1974) แสดงแรงดันกลับของสกรูของเครื่อง Ankerwerk โดยอุณหภูมิของกระบอกสกรูอยู่ที่  $50^{\circ}\text{C}$  ( $121^{\circ}\text{F}$ ) และเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง เป็น 78 และ  $115^{\circ}\text{C}$  (172 และ  $240^{\circ}\text{F}$ ) ดังแสดงในภาพที่ 48 โดยการควบคุมแรงดันกลับของสกรูจะรวมเอาแรงเสียดทานของสกรูและอุณหภูมิของเนื้อยางจะต้องรักษาไว้ที่  $30^{\circ}\text{C}$  ( $54^{\circ}\text{F}$ ) ซึ่งอยู่เหนืออุณหภูมิของกระบอกฉีดโดยวิธีการที่ทำให้กระบอกฉีดเย็นจะลดความเสี่ยงในการเกิดการทำปฏิกิริยาเมื่อโดนความร้อน (vulcanisation) ที่บริเวณผนังกระบอกฉีด





ภาพที่ 47 แสดงถึงการควบคุมเครื่อง Peco โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการฉีด

ที่มา: Kleine – Albers and Frank (1974)



ภาพที่ 48 แสดงแรงดันกลับของสกรูของเครื่อง Ankerwerk ที่มีผลกับอุณหภูมิของเนื้อยาง

ที่มา: Kleine – Albers and Frank (1974)

### ผลกระทบของแรงดันฉีด (Effect of injection pressure)

ความดันในการฉีดนี้มีความสำคัญต่อการควบคุมการไหลของเนื้อยางเข้าไปในแม่พิมพ์ ความดันของการฉีดนั้นมีความสำคัญอย่างมากที่จะต้องรู้ว่ามีความอยู่ที่เท่าไร และการเกิดความร้อนจะเป็นตัวกำหนดความสูงที่เกิดขึ้นของความร้อน

การทำงานของลูกสูบที่ทำให้เกิดความดัน (P) และปริมาตร (V) ที่ผ่านไปด้วยเหตุนี้ งานที่กระทำต่อลูกสูบปริมาตร (unit volume) ของเนื้อยางซึ่งเท่ากับ P สมมุติงานทั้งหมดที่ใช้ในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเนื้อยาง อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกำหนดให้เท่ากับสมการที่ 91

$$\frac{\Delta\theta}{\rho S} = P \quad (91)$$

โดยที่

$\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของยาง

S คือ ค่าความร้อนจำเพาะ

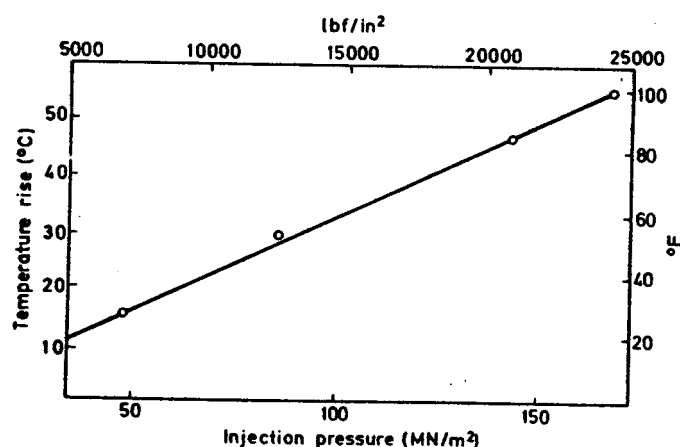
สมมุติค่าความหนาแน่นอยู่ที่  $1.15 \text{ Mg/m}^3$  ( $\text{g/cm}^3$ ) และค่าความร้อนจำเพาะ  $2.0934 \text{ J/g}^\circ\text{C}$  ( $0.5 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ ) เหมาะสมสำหรับยางที่มี 5 phr carbon black (ผงคาร์บอน) ในทางทฤษฎีอุณหภูมิจะได้โดยกำหนดให้ความดันที่  $6.895 \text{ MN/m}^2$  ( $70.3 \text{ kgf/cm}^2$  หรือ  $1000 \text{ lbf/in}^2$ ) ซึ่งจะได้ดังนี้

$$\frac{6.895 \text{ MN/m}^2}{1.15 \times 2.0934 (\text{mg/m}^2)(\text{J/g}^\circ\text{C})}$$

(แรงดันในตอนเริ่มต้นวัดเป็น  $\text{lbf/in}^2$  สามารถคำนวณได้เช่นกัน)

$$\frac{1000 \times 70.3 \times 981}{4.18 \times 1.15 \times 0.5 \times 10^7} = 2.87^\circ\text{C}$$

ในการทดสอบนั้นความร้อนที่สูงเสียและการสูญเสียที่เกิดจากการเคลื่อนที่ภายในปั๊ม นั้นจะไม่ไปกระทบต่อเวลาที่จะทำให้ความดันถึงจุดสูงสุดในการทำงาน แต่อย่างไรก็ตาม Izod and Skam แสดงดังภาพที่ 49 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นโดยใช้ Yates and Thom รับเบอร์โอมิเตอร์ (rubber ometer) ในการวัดโดยใช้เครื่อง CTA – 2 – 805

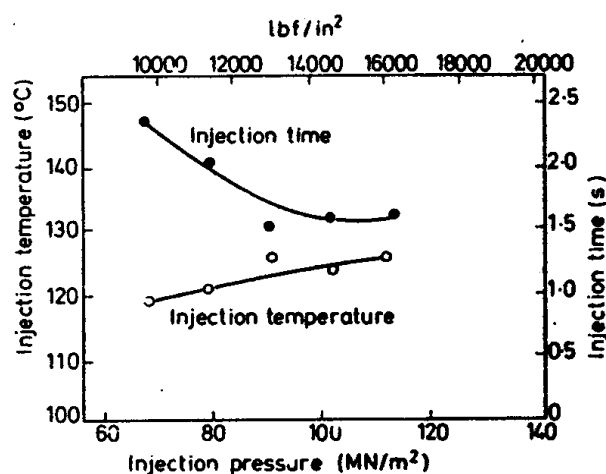


**ภาพที่ 49** ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้น

ที่มา: Wheelans (1974)

ในการอธิบายถึงผลกระทบของความดันในการฉีดที่ต้องการจะต้องพิจารณาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่เน้อย่างไหลผ่านในการฉีด ความสัมพันธ์ของความกว้างของหัวฉีดโดยใช้เครื่อง Peco ในการศึกษาประสิทธิภาพของเวลาในการไหลของยางเข้าไปในแม่พิมพ์ โดยความสัมพันธ์ของความกว้างของหัวฉีดที่ช่องทางจ่าย (3.2 มม. (1/8 นิ้ว)) โดยการเพิ่มความดันในการฉีดสามารถที่จะทำให้เกิดอุณหภูมิในการฉีดและจะทำให้เวลาในการฉีดนั้นลดลงดังแสดงในภาพที่ 50

ในการใช้เครื่อง Daniels 45 SR และแม่พิมพ์ในการทดลองของ RAPRA ระยะเวลาในการไหลเข้าไปในแม่พิมพ์จะมากจนเกินกว่าค่าที่กำหนดเพราะมีช่องที่ไหลยาวจนเกินไป ในการลดลงของแรงดันในการฉีดจะมีผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการฉีดและจะลดอุณหภูมิของการฉีดลงและจะทำให้เกิดผลกระทบต่อการไหลของยางเข้าไปในแม่พิมพ์มากขึ้นด้วย



**ภาพที่ 50** ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการฉีด

ที่มา: Wheelans (1974)

ตารางที่ 9 แสดงถึงค่าสูงสุดของความดันซึ่งจะทำให้เวลาในการฉีดนั้นลดลง 33% หรือมากกว่าครึ่งหนึ่งของระยะเวลาในการหาความสัมพันธ์โดย Izod และ Morris (1965) ได้สรุปว่าการจะใช้ความดันที่น้อยกว่าความดันสูงสุด เนื้อยางที่มีความอ่อนนุ่มกว่าจะมีแนวโน้มที่จะไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ก่อนที่จะถูกขับไล่ออกหมด ดังนั้นจึงสามารถที่จะลดแรงดันลงได้

**ตารางที่ 9** ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีต่อเวลาในการฉีดกับอุณหภูมิ

|                                                                 |                |             |
|-----------------------------------------------------------------|----------------|-------------|
| Injection pressure, MN/m <sup>2</sup> (lbf / i n <sup>2</sup> ) | 103.5 (15 000) | 69 (10 000) |
| Injection time, s                                               | 5.6            | 12.0        |
| Injection temperature, °C (°F)                                  | 127(260)       | 109(228)    |

ที่มา: Wheelans (1974)

จากตารางที่ 9 ทดสอบโดยเครื่อง Daniels Edgwick 45 SR และแม่พิมพ์ทดลองของ RAPRA ขนาดฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.17 mm (1/8 in) อุณหภูมิกระบอกฉีด, 90°C (194°F); อุณหภูมิแม่พิมพ์ 180°C (357 °F) ความหนืด Mooney, ML3, 120°C (248F), 5, Mooney Scorch 120 °C (248°F), 29 นาที

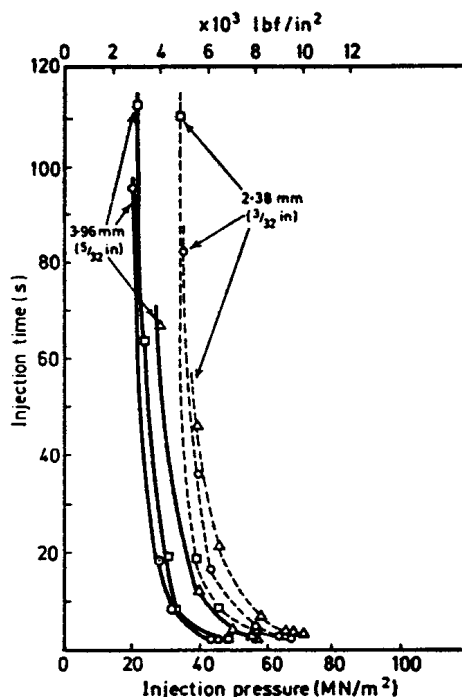
Izod and Morris (1965) แสดงภาพที่ 51 โดยทำการทดสอบโดยเครื่อง Daniels และแม่พิมพ์ทดสอบแต่แตกต่างกันที่เปลี่ยนแปลงส่วนผสมของยาง (SBR) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขอบเขตของอุณหภูมิของกระบอกฉีด และเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดและความดันที่ใกล้เคียงกับความดันที่สามารถทำได้เพื่อที่จะให้เวลาในการฉีดเร็วขึ้น ความดันที่ต่ำกว่าความสูงสุดจะทำให้เวลาในการฉีดนั้นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีโอกาสในการเกิดการไหม้ของเนื้อยางขณะที่ฉีดเนื้อยางเข้าไปในแม่พิมพ์ จุดที่อยู่ต่ำกว่าความดันสูงสุดจะมีความแตกต่างกันระหว่างเนื้อยางและเนื้อขึ้นไปจะไม่สำคัญ

การพิจารณาที่สำคัญในการที่จะซื้อเครื่องฉีดยางนั้นจะต้องดูว่าเครื่องนั้นสามารถที่จะสร้างความดันในการฉีดเนื้อยางในแต่ละชนิดได้ในความดันที่กำหนดหรือไม่

ในการทดสอบโดยใช้เวลานานในการฉีดนั้นจะไม่เหมาะสมกับการลงทุน ในการใช้อุณหภูมิที่สูงสุดแต่อยู่ในช่องความปลอดภัยและให้ความดันสูงสุด แต่เวลาในการฉีดยังนานอยู่จำเป็นที่จะต้องปรับขนาดที่ฉีดให้กว้างขึ้น หรือทำให้ช่องทางไหลกว้างขึ้นหรือช่องทางไหลเข้าที่ใหญ่ขึ้น แต่ต้องพิจารณาในตำแหน่งที่เข้าด้วย

โดยทั่วไปนั้นต้องไม่จำเป็นที่จะต้องใช้ความดันสูงสุดในการฉีด แต่จะใช้อยู่ที่ประมาณ 80-90% ของค่าความดันสูงสุดเพื่อที่จะป้องกันการสึกหรอหรือการฉีกขาดของเครื่องจักรในขั้นตอนการควบคุมความดันนั้นจะควบคุมโดยใช้วาล์วเพื่อที่จะสามารถปรับเปลี่ยนความดันให้ไปใช้กับเนื้อยางส่วนผสมอื่น ๆ ได้

Booth (1966) ได้แสดงถึงผลกระทบของแรงดันในการฉีดต่อเวลาในการฉีดและอุณหภูมิโดยใช้เครื่อง Daniels 45 SR แต่เปลี่ยนรูปร่างของแม่พิมพ์เป็นรูปทรงวงกลม (flower pot mould) ดังแสดงในภาพที่ 52 และ 53 จะได้ผลดีของการยื่นยื่นรายงานครั้งก่อน ๆ ที่ได้ทำการทดลองกันมาและแสดงผลกระทบที่เหมือนกันของความดันต่ออย่างธรรมชาติ, ยางสังเคราะห์ โพลีไอโซพรีน (synthetic polyisoprene), SBR, butyl, chlorotutyl และ polyobbbprene



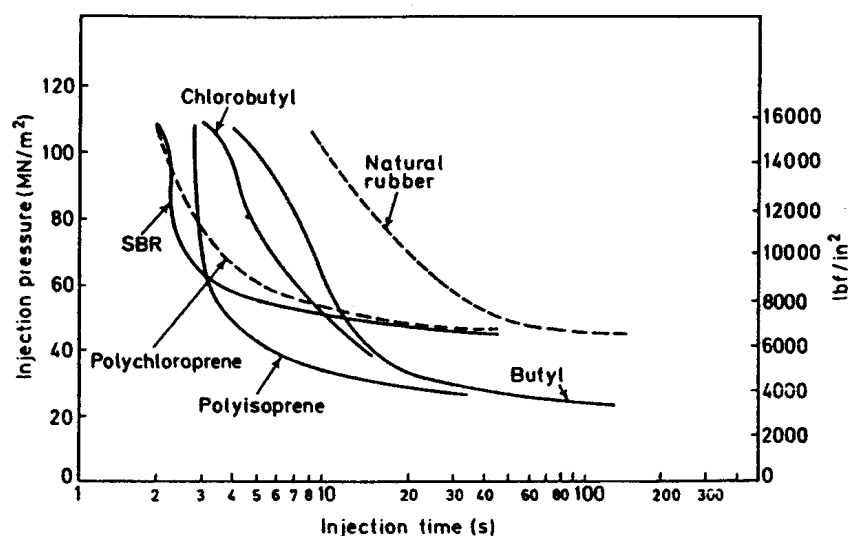
**ภาพที่ 51** ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีผลต่อเวลาในการฉีดโดยการเปลี่ยนแปลง  
อุณหภูมิกระบอกฉีดและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด

ที่มา: Wheelans (1974)

#### ผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (Effect of nozzle orifice diameter)

เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดของเครื่อง Peco ที่ลดลงดังแสดงในภาพที่ 54 จะทำให้  
อุณหภูมิในการฉีดสูงขึ้นแต่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 2 มม. (0.08 นิ้ว) เครื่องจะไม่สามารถฉีดได้  
ด้านล่างของเส้นผ่านศูนย์กลางคู่กับเวลาในการฉีดอาจจะเกิดการไหม้ของยางระหว่างที่เนื้อยาง  
ไหลเข้าไปในแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งจะไม่ได้ผลประโยชน์ในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ  
ในการฉีด สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กจะต้องใช้ความดันในการฉีดอย่างเต็มที่และจะเป็น  
ตัวกำหนดอุณหภูมิการฉีด ถึงแม้ว่าจะเป็นที่น่าพอใจที่หัวฉีดสามารถสร้างอุณหภูมิในการฉีดให้  
สูงขึ้นแต่ก็ต้องพิจารณาถึงการเกิดการไหม้ขึ้นและที่ยางไหลเข้าไปในแม่พิมพ์

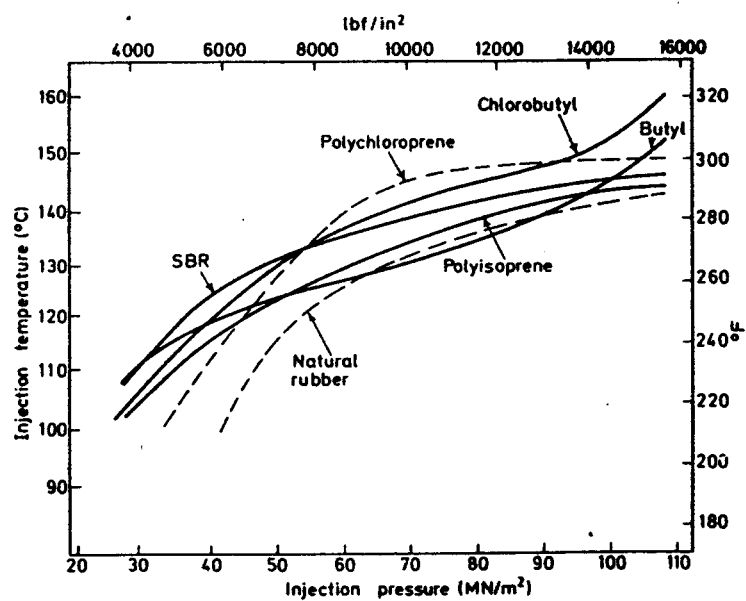
สำหรับแม่พิมพ์ฉีดที่รูปทรงกระบอกเป็นชิ้นงาน ควรที่จะใช้เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ที่สอดคล้องกับความปลอดภัย (1-2 วินาที) ของเวลาในการฉีดซึ่งจะประมาณ 2 - 2.5 มม. (0.08 - 0.1 นิ้ว) เมื่อไรก็ตามเวลาในการฉีดมีระยะเวลานาน ควรที่จะทำให้น้อยกว่าสองวินาทีโดยการใช้ความดัน สูงสุดในการฉีด หรือขยายเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดให้สูงขึ้น



**ภาพที่ 52** ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีต่อเวลาในการฉีดของเนื้อยางชนิดต่าง ๆ

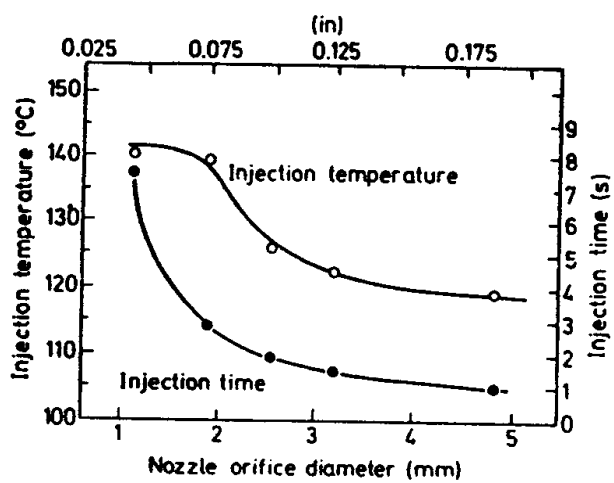
ที่มา: Wheelans (1974)

เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดนั้นจะสำคัญในการที่เนื้อยางจะไหลเข้าไปในแม่พิมพ์นั้น จะใช้ระยะเวลาเท่าไร โดยเฉพาะอย่างยิ่งเนื้อยางที่ไหลเข้าไปทางไหลที่แคบและยาวภายใน แม่พิมพ์ ในการเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดจะมีผลกระทบอย่างมากก่อนระยะเวลา ในการฉีดของเวลาในการฉีด ตารางที่ 10 แสดงสถานะภายใต้ข้อกำหนดในการเปลี่ยนแปลง ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดขนาด 3.2 - 4 มม. (1/8 - 5/32 นิ้ว) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงจะทำให้การผลิตนั้นดีขึ้น การไหม้ของเนื้อยางที่บริเวณผิวของรูปทรงชิ้นงานในแม่พิมพ์ จากตาราง จะแสดงถึงช่วงเวลาในการไหม้ของยางโดยจะอยู่ระหว่าง 3.8 ถึง 8.8 วินาทีที่เนื้อยางไหลเข้าไปในแม่พิมพ์



ภาพที่ 53 ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีต่ออุณหภูมิในการฉีดของเนื้อยางชนิดต่าง ๆ

ที่มา: Wheelans (1974)



ภาพที่ 54 ผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่มีต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการฉีด

ที่มา: Wheelans (1974)

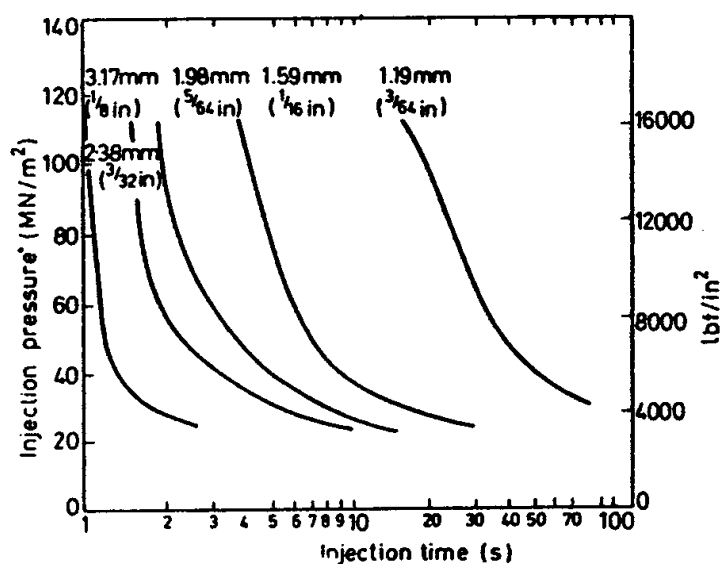


**ตารางที่ 10** ผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่มีต่อเวลาในการฉีด

|                                |            |             |
|--------------------------------|------------|-------------|
| Nozzle diameter, mm (in)       | 3.17 (1/8) | 3.97 (5/32) |
| Injection time, s              | 8.8        | 3.8         |
| Injection temperature, °C (°F) | 120 (248)  | 118 (244)   |
| Appearance of moulding         | scorched   | good        |

ที่มา: Wheelans (1974)

Izod and Morris (1965) จะมีข้อมูลที่ครอบคลุมและช่วงการทดลองของ Booth (1966) ดังแสดงในภาพที่ 55 จะแนะนำถึงผลกระทบในการเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการฉีด  $V$  เส้นความดันในการฉีดก็เช่นกัน ตัวแปรอื่น ๆ ก็มีลักษณะที่เหมือนกัน ความต้องการเวลาในการฉีดที่จะควบคุมโดยหัวฉีดเพียงอย่างเดียว นั้น ความดันจะต้องพอเพียงด้วย



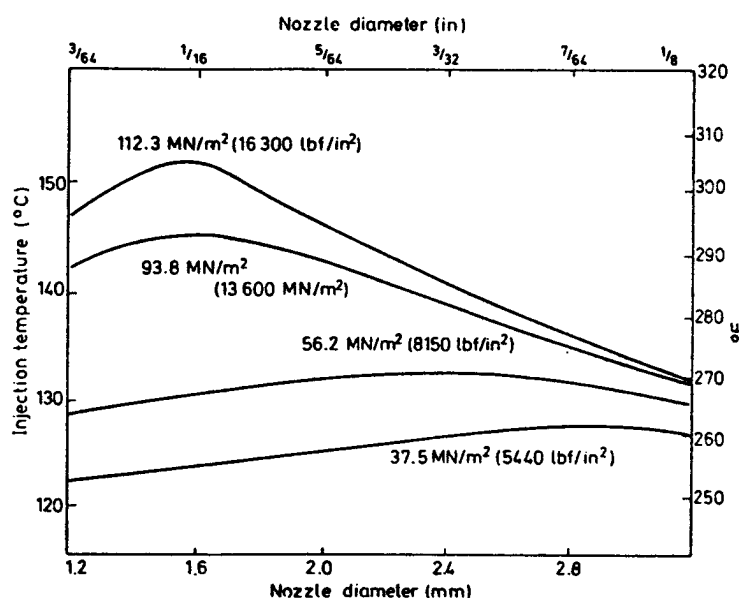
**ภาพที่ 55** ผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่มีต่อเวลาในการฉีด

ที่มา: Wheelans (1974)

การพล็อตกราฟอุณหภูมิในการฉีดสำหรับยาง butyl จะขัดแย้งกันกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (ที่ความดันคงที่) Booth ได้แสดงว่ามีการคงอยู่ของการเกิดความร้อนสูงสุดและตำแหน่งที่เกิดอุณหภูมิสูงสุดจะขึ้นอยู่กับความดันในการฉีด และเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ดังแสดงในภาพที่ 56

Booth (1966) ได้ทำการแสดงภาพที่ 57 ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการฉีดจะทำให้ปริมาตรในการฉีดเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งผลกระทบจะขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด แต่จะน้อยลงเพื่อเนื้อยางที่ฉีดเข้าไปมากกว่า 50% แล้ว โดยปกติจะทำการกำหนดเวลาที่แท้จริงในการฉีด ก่อนที่กำหนดอัตราส่วนความดันในการฉีดเต็มที่

ผลสรุปซึ่งหลักเลียงไม่ได้เมื่อมีการสร้างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่ถูกต้องจะทำให้ให้อุณหภูมิในการฉีดสูง และเวลาในการฉีดเร็วขึ้น

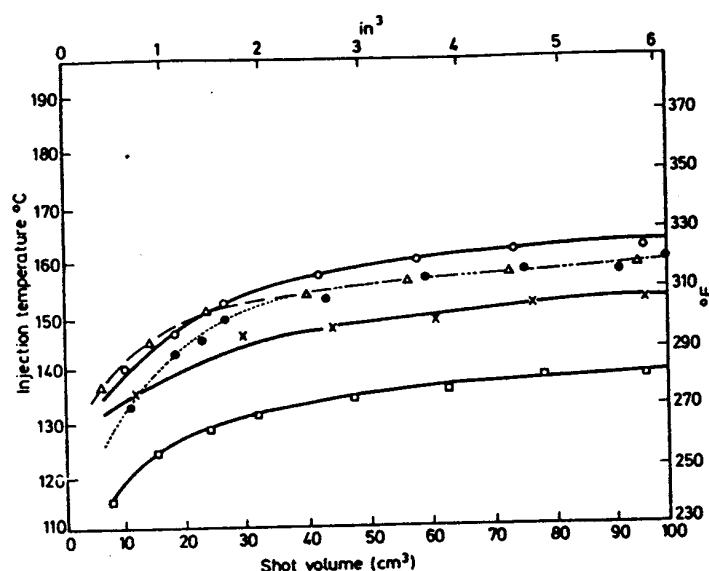


**ภาพที่ 56** อุณหภูมิในการฉีดสำหรับยาง butyl กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่ความดันคงที่

ที่มา: Wheelans (1974)

### ผลกระทบของความเร็วในการฉีดของหัวจ่าย (Effect of injection ram speed)

การเคลื่อนที่ในแนวแกนของสกรู เนื้อยางสามารถฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ด้วยความเร็ว 50 - 350 cm<sup>3</sup>/s (5 - 21 in<sup>3</sup>/s) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราการออกแบบเครื่องจักรเวลาต่ำสุดในการฉีดจะอยู่ที่หนึ่งวินาทีที่สามารถจะฉีดได้ การควบคุมโดยไฮโดลิกสามารถควบคุมระยะเวลาได้โดยไม่จำกัดสูงขึ้นเป็น 25 วินาที หรือมากกว่านั้น ในความเป็นจริงความเร็วในการฉีดขึ้นอยู่กับความดันในการฉีดและเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด การเพิ่มขึ้นของความเร็วสกรูดังแสดงในภาพที่ 58 โดยให้อุณหภูมิในการฉีดสูง และการบ่มตัวเร็วแต่มีความเร็วที่สูง (โดยการเสริมเครื่องอัดปริมาตร (pump capacity ในเครื่อง Peco) ซึ่งจะทำให้ไม่มีการผิดพลาดซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมาก



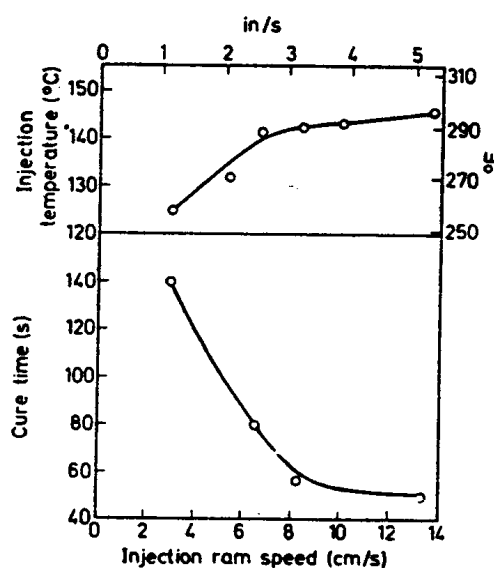
ภาพที่ 57 ปริมาตรในการฉีดเนื้อยางกับอุณหภูมิในการฉีดที่หัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ

ที่มา: Wheelans (1974)

ในภาพที่ 58 แสดงถึงความหนาของแม่พิมพ์ที่ 2.1 ซม. (0.8 นิ้ว) สามารถที่จะบ่มให้สุกได้ในเวลาที่ต่ำกว่า 60 วินาทีโดยมีเงื่อนไขว่าอุณหภูมิในการฉีดต้องสูงกว่า 140 °C (284 °F)

### อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mould temperature)

ในความให้การปลดปล่อยอย่างมากแก่อุณหภูมิของกระบอกฉีดคือไม่ควรให้อุณหภูมิสูงมากจนเกินไปและ อุณหภูมิที่สูงของเนื้อยางที่เพิ่มขึ้นในขณะที่เนื้อยางไหลผ่านหัวฉีด จะเป็นประโยชน์ถ้าให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่สูงเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งจะต้องสอดคล้องกับการไหม้ของเนื้อยางที่ไหลเข้าที่อุณหภูมิกระบอกฉีดที่  $90^{\circ}\text{C}$  ( $194^{\circ}\text{F}$ )



**ภาพที่ 58** ผลกระทบของความเร็วในการฉีดที่มีต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการบ่มเนื้อยาง

ที่มา: Wheelans (1974)

อุณหภูมิในการฉีดของเครื่อง Daniels ไปถึง  $120 - 125^{\circ}\text{C}$  ( $248 - 257^{\circ}\text{F}$ ) และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่  $180 - 200^{\circ}\text{C}$  ( $357 - 392^{\circ}\text{F}$ ) ซึ่งเป็นที่น่าพอใจ จากนั้นให้อุณหภูมิของกระบอกสูบสูงขึ้น  $120 - 125^{\circ}\text{C}$  ( $248 - 257^{\circ}\text{F}$ ) และอุณหภูมิของการฉีดสูงขึ้นประมาณ  $150 - 160^{\circ}\text{C}$  ( $302 - 320^{\circ}\text{F}$ ) อุณหภูมิแม่พิมพ์เหมาะสมประมาณ  $180^{\circ}\text{C}$  ( $336^{\circ}\text{F}$ ) ซึ่งจะหลีกเลี่ยงการไหม้ที่ผิวของรูปทรงขึ้นงานในแม่พิมพ์ เพื่อความปลอดภัยควรเลือกอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ปลอดภัยโดยการค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิอย่างช้า ๆ จนกระทั่งมีการเกิดการไหลขึ้นเป็นคลื่นเล็ก ๆ บนผิวของที่ติดกับแม่พิมพ์ และลดอุณหภูมิลงมาจากเดิม  $3 - 5^{\circ}\text{C}$  ( $5 - 9^{\circ}\text{F}$ )

ถึงแม้ว่าเวลาบ่มเนื้ออย่างค่อนข้างจะเร็วแต่ควรจะให้เหมาะสมโดยที่จะลดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ลง และอุณหภูมิของการฉีด แต่จะไม่ดีสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งควรที่จะเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ให้สูงขึ้น

ในการทดลองที่ผ่านมาอุณหภูมิในการฉีดที่สูงกว่า  $165^{\circ}\text{C}$  ( $329^{\circ}\text{F}$ ) จะทำให้ปราศจากความเสี่ยงในการเกิดการไหม้ในกระบอกฉีด อุณหภูมิฉีดที่สูงที่เป็นไปได้โดยใช้เครื่องจักรที่มีหัวฉีดแบบพิเศษ (cut-off) กลไกโดยการสร้างความดันที่สูงภายในสกรูที่หมุนเพื่อที่จะดันเนื้ออย่าง

ในทางกลับกันสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการลดลงที่แตกต่างกัน ระหว่างอุณหภูมิในการฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตามสิ่งที่ควรที่จะให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์สูงกว่าอุณหภูมิในการฉีดเล็กน้อยเพราะการขยายตัวของยางในแม่พิมพ์มีส่วนทำให้เนื้อยางเขาไปเต็มในแม่พิมพ์

#### องค์ประกอบอื่น ๆ ในการควบคุมเครื่องจักร (Other machine controls)

ในการควบคุมเครื่องฉีดยางนั้นจะมีความสำคัญมากซึ่งจะต้องมีการพิจารณา แต่ยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีกที่สามารถพิจารณาควบคุม หรือออกแบบเครื่องจักรให้มีความสมบูรณ์ที่สุด โดยจะทำการพิจารณาที่ชิ้นส่วนหลัก ๆ ทั้งส่วนที่อยู่ในแม่พิมพ์ และประสิทธิภาพของเครื่องจักร

#### การระบายความร้อนที่สกรู (Screw cooling)

ในเครื่องจักรฉีดยางที่ใหญ่ขึ้นจะมีการระบายความร้อนของสกรู เช่นเครื่อง Desma 905 ซึ่งจะมีเครื่องมือในการระบายความร้อนให้สกรูโดยอากาศหรือของเหลว

ของเหลวในกระบอกฉีดจะเป็นระบบไหลวนโดยจะแยกการควบคุมกับระบบให้ความร้อนซึ่งจะไหลหมุนเวียนผ่านสกรู

### **การควบคุมความดันและช่วงเวลา (Pressure control and timing)**

เครื่องจักรบางเครื่อง เช่น Peco 21 TS ความดันในการฉีดนั้นจะมีความสำคัญมากเพราะในระบบเวลาไม่ถึงวินาทีที่อาจจะทำให้เกิดจุดวิกฤตในการทำงานของการฉีดขึ้น

เกือบจะทั้งหมดของเครื่องจักรจะทำการคงความดันของการฉีดไว้เมื่อเนื้อยางไหลเข้าไปในแม่พิมพ์จนเกือบที่จะเต็ม ช่วงเวลาในการคงความดันไว้จะอยู่ในช่วงเวลานึงหรือน้อยกว่าหนึ่งวินาที แต่สิ่งที่สำคัญคือ การเกิดฟิล์มบาง ๆ ที่ผิวของเนื้อยางในการคงความดันไว้นั้นควรจะคงไว้จนเกิด flash เป็นอย่างน้อย และช่วยในการทำให้เนื้อยางรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียวในแม่พิมพ์ และในเรื่องของการขยายตัวของยางที่ไหลเข้ามาในช่องทางไหลที่จะเข้าไปในแม่พิมพ์และแรงดันจะช่วยในการขยายตัวของเนื้อยางที่เกิดขึ้นหลังจากการบ่มนั้นคงที่ ปริมาณของเนื้อยางที่พุ่งออกมาผ่านช่องทางไหลที่จะเข้าไปในแม่พิมพ์นั้นขึ้นอยู่กับความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิในการฉีดและอุณหภูมิของแม่พิมพ์