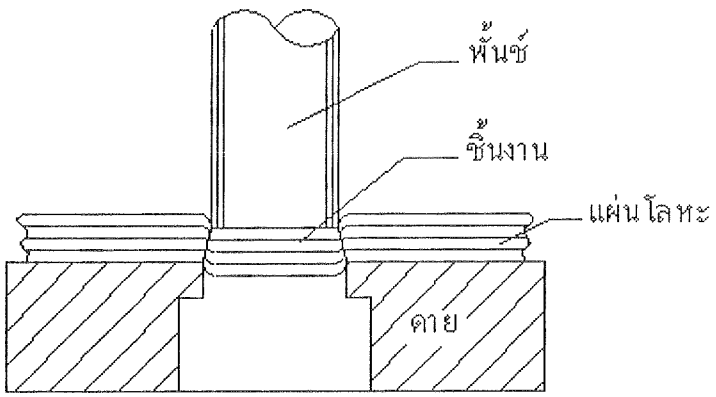
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

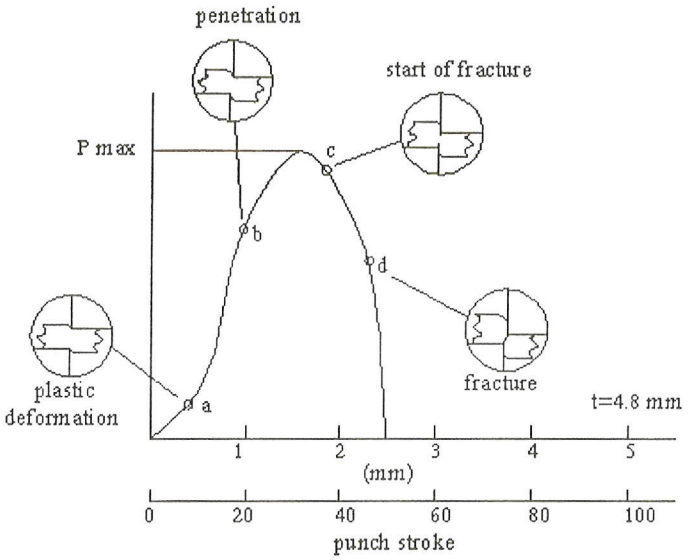
1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกลไกในการตัด (Blanking Mechanism)

กระบวนการตัดคือ การตัดโลหะออกจากกันโดยใช้คมตัดของพันช์และดายกดลงบนเนื้อโลหะจนเลยจุดความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Strength) ซึ่งจะทำให้โลหะฉีกขาดออกจากกัน



ภาพที่ 1 การตัดชิ้นงานด้วยพันช์และดาย

ขั้นตอนในการตัดเริ่มจากการที่พันช์กดลงบนโลหะ และพาเนื้อโลหะเข้าไปในช่องว่างของดาย จนเลยจุดค่าความยืดหยุ่น (Elastic Limits) ของโลหะช่วงนี้ทางผิวด้านล่างของโลหะเริ่มย้อยเข้าไปในดาย และทางผิวด้านบนก็จะถูกพันช์กดลง เมื่อแรงกดเพิ่มขึ้น พันช์จะเจาะเข้าไปในเนื้อของโลหะ โดยความลึกของส่วนที่ถูกกดทางผิวด้านบนจะเท่ากับส่วนที่ถูกกดลงในดายทางผิวด้านล่าง ดังภาพที่ 1 เมื่อขนาดแรงกดของพันช์เพิ่มขึ้นจนเลยจุดความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength) ของโลหะแล้ว โลหะจะฉีกขาดออกจากกัน รายละเอียดของขั้นตอนดูได้จากภาพที่ 2 [1] การฉีกขาดของโลหะจะดีหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับระยะช่องว่างคมตัด (Clearance) ระหว่างพันช์กับดาย ถ้าช่องว่างคมตัดมากไปหรือน้อยไป จะทำให้มีผลต่อแรงที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน ทำให้ส่งผลต่อการสึกหรอของพันช์และดาย นอกจากนั้น ยังทำให้มีผลต่อรอยฉีกขาดและครีบที่ชิ้นงานอีกด้วย

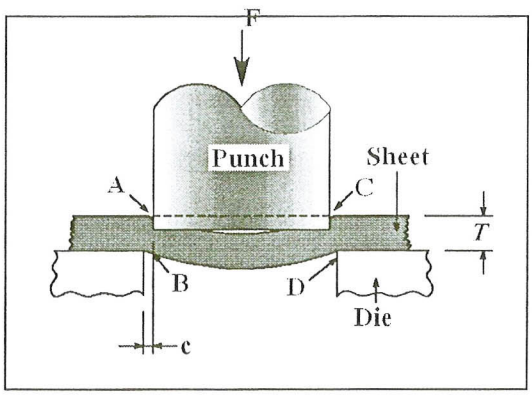


ภาพที่ 2 ลำดับขั้นตอนของการตัดโลหะ [1]

จากภาพที่ 2
a. พันช์เริ่มกดลงบนเนื้อโลหะ
b. พันช์เพิ่มแรงกดลงบนเนื้อโลหะ
c. โลหะเริ่มฉีกตัว
d. การฉีกขาดของโลหะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

1.1 ความหมายและกลไกลของการตัด

กระบวนการตัด คือ การตัดโลหะออกจากกันโดยใช้คมตัดของพันช์และดายกดลงบนเนื้อโลหะจนความเค้นเกิดขึ้นในชิ้นงานมีค่าสูงกว่าความต้านทานของแรงดึงสูงสุดของวัสดุซึ่งทำให้โลหะฉีกขาดออกจากกัน โดยชุดแม่พิมพ์ตัดจะประกอบด้วยพันช์ (Punch) ดาย (Die) ชิ้นงาน และแผ่นปลดชิ้นงานดังรูป



ภาพที่ 3 แสดงส่วนประกอบของแม่พิมพ์ตัด

สำหรับขั้นตอนการตัดแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 4

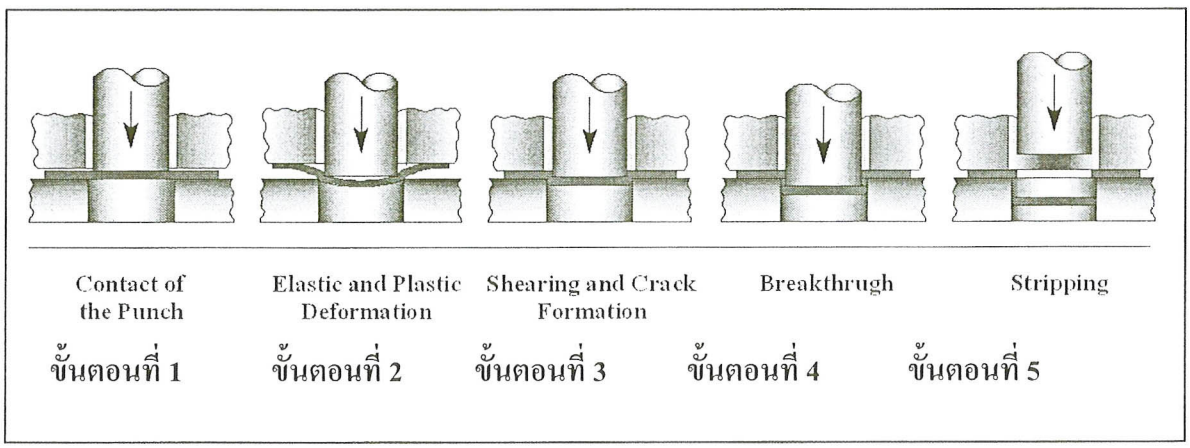
ขั้นตอนที่ 1 : พันช์เลื่อนลงมาสัมผัสกับเนื้อวัสดุชิ้นงาน โดยจะมีแรงกดจากแผ่นปลดชิ้นงานกดแผ่นงานที่ระดับหนึ่ง

ขั้นตอนที่ 2 : วัสดุชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น (Elastic Deformation) มีการดัดตัว (Bending) และพาเนื้อโลหะเข้าไปในช่องว่างของดาย และเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) เมื่อแรงกดเพิ่มขึ้น

ขั้นตอนที่ 3 : วัสดุชิ้นงานถูกตัดเฉือนและเกิดการแตก เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนนี้ผิวหน้าของพันช์กับดายจะอยู่ในระดับเดียวกัน

ขั้นตอนที่ 4 : พันช์จะดันให้ชิ้นงานทะลุลงไปในช่องของดาย หลังจากสิ้นสุดการตัดแล้ววัสดุบริเวณรูมีการดีดมายังพันช์ เนื่องจากการดีดตัวกลับ (Spring back) ของวัสดุส่วนที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วงยืดหยุ่น หรืออาจเกิดจากในบางขณะจะมีการเชื่อมติดกัน (Cold welding) ระหว่างเนื้อวัสดุกับผิวพันช์ เช่นเดียวกับด้านนอกของแผ่นมีการดีดตัวกลับมายังช่องบนดาย

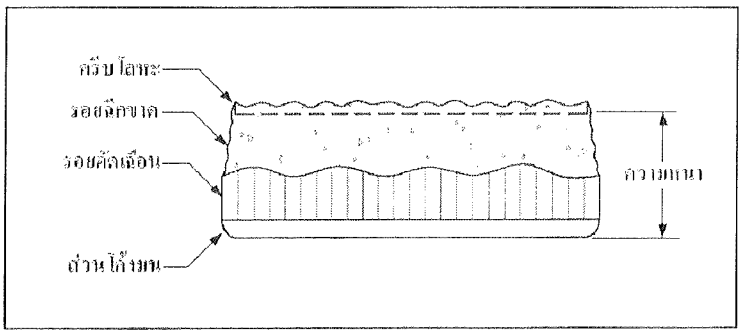
ขั้นตอนที่ 5 : การปลดชิ้นงานให้หลุดจากพันช์ ความเค้นในแนวเส้นสัมผัสและแนวรัศมีที่เหลือค้างในเนื้อวัสดุทำ ให้เกิดความเสียดทานระหว่างพันช์กับผนังรูเจาะเพิ่มมากขึ้นในขณะที่พันช์ถอยกลับ



ภาพที่ 4 แสดงขั้นตอนการตัด

2. ขอบชิ้นงานที่ได้จากการตัด (Cutting Edge)

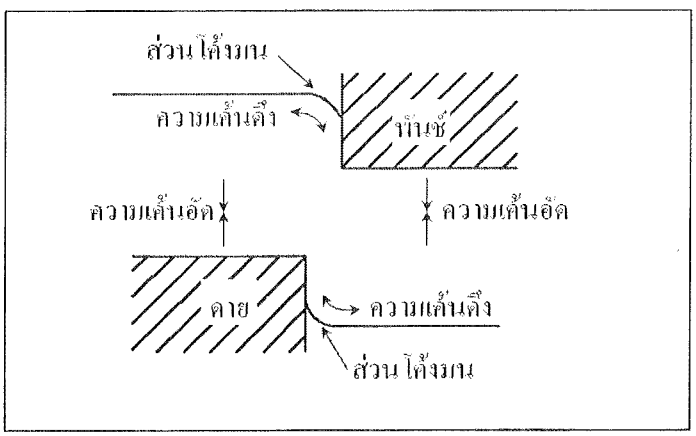
โดยทั่วไปเมื่อนำเอาโลหะมาตัดด้วยพันช์และดาย เมื่อกำหนดให้ช่องระหว่างพันช์กับดายน้อยกว่าความหนาของแผ่นชิ้นงาน ซึ่งปกติช่องว่างดังกล่าวจะมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ของความหนาชิ้นงาน จะพบว่าขอบตัดที่ได้สามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังแสดงในภาพ 5



ภาพที่ 5 แสดงงานที่ได้จากการตัดโดยทั่วไป

2.1 ช่วงโค้งมน (Roll over)

ส่วนที่เกิดขึ้นเมื่อพันช์กดชิ้นงานให้ไหลตัวลงไปในช่องว่างระหว่างพันช์กับดายทำให้มีรูปร่างคล้ายกับก้นถ้วยส่วนโค้งมนจะเกิดมากขึ้นถ้าโลหะนั้นเป็นโลหะอ่อน สาเหตุการเกิดส่วนโค้งมน เกิดจากพันช์เมื่อเริ่มต้นกดชิ้นงานลงไปในดาย เนื้อชิ้นงานบริเวณใต้พันช์และเหนือดายจะมีความเค้นอัดที่มีค่าสูงมากระทำ ในขณะที่เนื้อชิ้นงานบริเวณด้านข้างของพันช์และดายจะมีความเค้นดึงมากระทำ ดังภาพที่ 6 ทำให้เนื้อชิ้นงานตรงบริเวณนี้ถูกดึงให้ไหลตามการเคลื่อนที่ของพันช์ ก่อให้เกิดส่วนโค้งมนขึ้น



ภาพที่ 6 แสดงกลไกการเกิดส่วนโค้งมน

2.2 ช่วงการตัดเฉือน (Shear Zone)

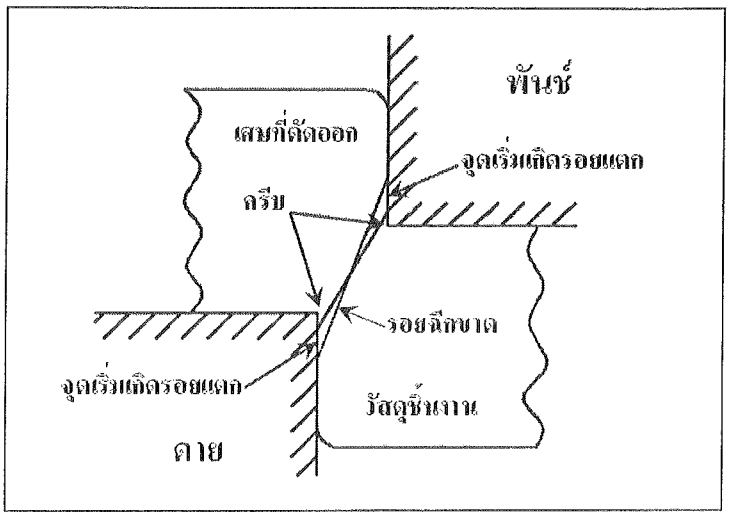
เป็นส่วนที่เกิดขึ้นหลังจากแท่งพันช์ถูกกดกินลึกลงไปในเนื้อของโลหะระยะหนึ่งแล้วจะเกิดหน้าตัดเฉือนในแนวดิ่ง ระหว่างขอบคมตัดของพันช์และเนื้อของโลหะที่ถูกตัด ส่วนที่ถูกตัดตรงบริเวณพื้นที่นี้จะมีลักษณะเป็นมันวาวและแนวที่ถูกตัดจะได้ฉากกับผิวหน้าของแผ่นชิ้นงาน หน้าตัดเฉือนเป็นส่วนที่สำคัญมากเพราะขนาดและความเที่ยงตรงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกกำหนดไว้ที่ส่วนนี้

2.3 ช่วงการแตก (Fracture Zone)

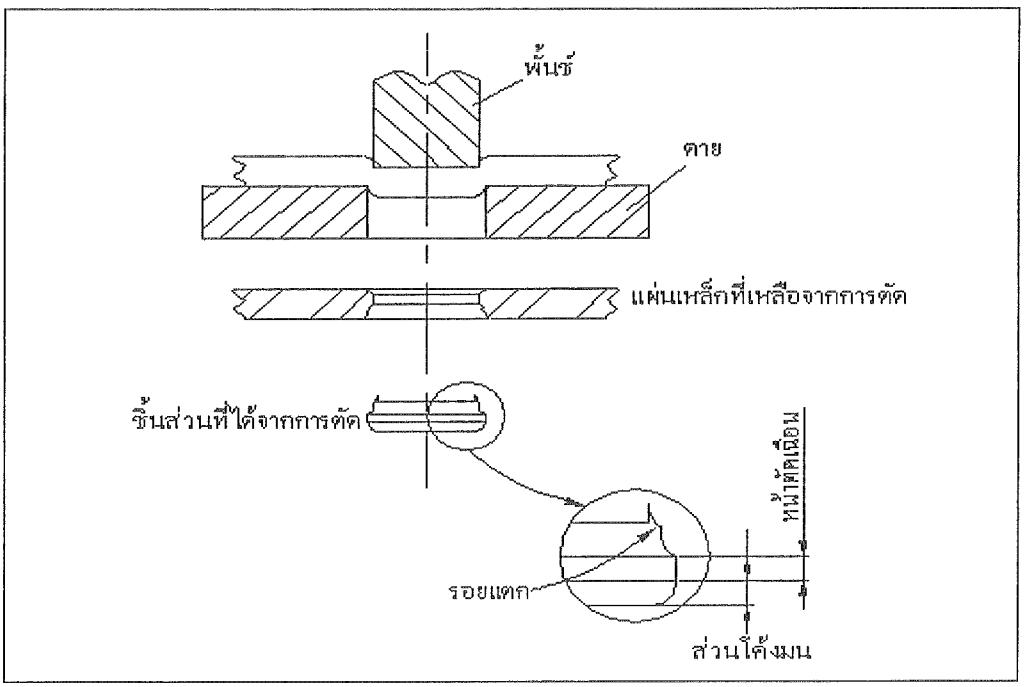
เป็นส่วนที่เกิดหลังจากมีการตัดเฉือนของพั้นช์บนแผ่นชิ้นงานแล้ว แรงที่ใช้บนแท่งพั้นช์จะทำให้เกิดความเค้นดึงสูงกว่าความแข็งแรงสูงสุดของโลหะนั้นจึงทำให้เกิดการแตกขึ้น การแตกจะเกิดขึ้นในลักษณะถูกดึงขาด ดังนั้นรูปร่างของรอยแตกจึงมีรูปร่างขรุขระไม่เป็นระเบียบความสัมพันธ์ของรอยแตกที่เกิดขึ้นและขนาดของช่องว่างระหว่างพั้นช์และดายนั้นจะแตกต่างกับความสัมพันธ์ในส่วนอื่นๆ ในกรณีที่ใช้ขนาดของช่องว่างน้อยกว่า 10 % ของความหมายของแผ่นชิ้นงานจะทำให้ความกว้างของรอยแตกเล็กลงตามลำดับ แต่ถ้าใช้ขนาดของช่องว่างมากกว่า 10 ถึง 25 % เกือบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่รอยแตก แต่ถ้าขนาดของช่องว่างที่ใช้มากกว่า 25 % จะทำให้ความกว้างของรอยแตกเพิ่มขึ้นอีก และถ้าใช้ขนาดของช่องว่างมาก ที่มุมรอยแตกกระทำกับพื้นผิวของแผ่นชิ้นงานก็จะยิ่งโตขึ้นดังนั้นจึงควรกำหนดขนาดของช่องว่างที่ใช้ให้เหมาะสมสำหรับงานนั้นๆ

2.4 ครีบ (Burr)

มีลักษณะบางๆ ไม่เรียบเกิดขึ้นที่ขอบล่างรอบๆแนวตัด ส่วนนี้จะเกิดจากขอบคมตัดพันช์ และดายเกิดการสึกหรอ ถ้าขอบคมตัดสึกหรอมากก็จะเกิดครีบขึ้นมากสาเหตุการเกิดครีบตามที่อธิบายหลักการและขั้นตอนของการตัดไว้ข้างต้น โดยปกติการเริ่มเกิดรอยแตกในเนื้อวัสดุจะไม่ได้เกิดตรงคมตัดพอดี แต่จะเกิดขึ้นเหนือคมตัดเล็กน้อย ดังในภาพที่ 7 เนื่องจากความเค้นดึงจะมีค่าสูงสุดเกิดขึ้นตรงจุดดังกล่าว [8] หลังจากรอยแตกในเนื้อวัสดุจากด้านพันช์ และดายมาบรรจบกันจะทำให้วัสดุแยกออกจากกันแต่ส่วนเนื้อวัสดุบริเวณด้านข้างของคมตัดจะยังเหลืออยู่ที่ขอบตัดซึ่งส่วนนี้ก็คือครีบที่เกิดขึ้นนั่นเอง



ภาพที่ 7 แสดงกลไกการเกิดครีบ



ภาพที่ 8 แสดงรูปร่างหน้าตัดเฉือน

3. ระยะกดลึก (Penetration)

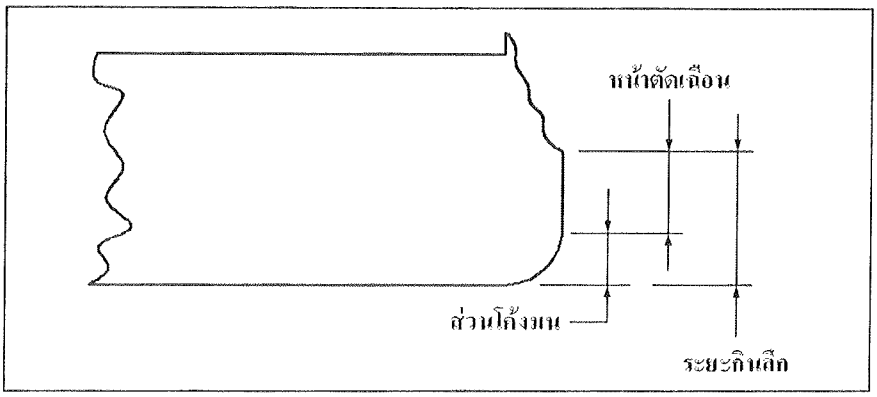
ระยะกินลึกหมายถึงระยะที่ขอบคมตัดของแท่งพั้นช์และแท่งดายกดกินลึกลงในเนื้อโลหะจนกระทั่งรอบแตกเริ่มปรากฏขึ้น ระยะกินลึกหาได้จากระยะความสูงของหน้าตัดเฉือนรวมกับระยะความสูงของส่วนโค้งมน ระยะกินลึกนั้นตามปกติจะพูดกันในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของความ

หนาของโลหะแผ่นที่ถูกตัดดังนั้นจึงมักจะเรียกเทอมนี้ว่าเปอร์เซ็นต์ระยะกินลึก (Percent penetration) เปอร์เซ็นต์ระยะกินลึกของโลหะชนิดต่างๆได้แสดงไว้ในภาพที่ 9 โลหะแผ่นที่มีความแข็งจะมีเปอร์เซ็นต์ระยะกินลึกน้อย ดังนั้นโลหะแข็งจะมีระยะโค้งมนและระยะหน้าตัดเฉือนน้อย

การเปรียบเทียบระยะกินลึกของโลหะสองชนิดทำได้โดยดูจากระยะหน้าตัดเฉือนของโลหะนั้นหรืออาจทำได้โดยการวัดความแข็ง (Hardness) ของมัน ในกรณีที่เป็นโลหะชนิดเดียวกันถูกนำมาตัด โลหะที่มีความหนากว่าต้องการระยะกินลึกมากกว่าโลหะที่บาง

ตารางที่ 1. แสดงระยะกดลึกของวัสดุต่างๆ

ชนิดวัสดุ	% ระยะกินลึก
ตะกั่ว	50
ดีบุก	40
อลูมิเนี่ยม	60
สังกะสี	50
ทองแดง	55
ทองเหลือง	50
บรอนซ์	25
เหล็กกล้า 0.10 C	50 อบคืนตัว
	38 รีดเย็น
เหล็กกล้า 0.20 C	40 อบคืนตัว
	28 รีดเย็น
เหล็กกล้า 0.30 C	33 อบคืนตัว
	22 รีดเย็น
เหล็กกล้าซิลิกอน	30
นิเกิล	55



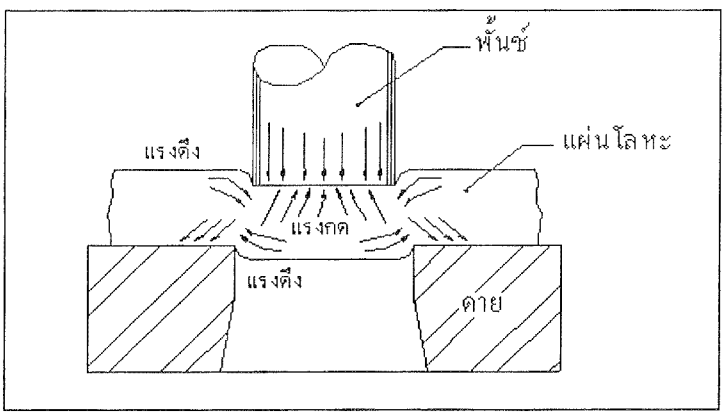
ภาพที่ 9 แสดงระยะกินลึก

4. การเลือกขนาดกำลังของเครื่องเพลส

ในการเลือกขนาดของเครื่องเพลส จำเป็นที่จะต้องเลือกเครื่องเพลส ที่สามารถสร้างแรงอัดได้มากกว่าค่าแรงที่ต้องการใช้ในการตัดที่คำนวณได้ 30 – 50% ทั้งนี้เพื่อช่วยให้สามารถตัดชิ้นงานได้ในกรณีที่วัตถุดิบมีความหนาไม่สม่ำเสมอ วัสดุชิ้นงานเกิดการทำให้แข็งด้วยความเครียด (strain hardening)การเลือกใช้สารหล่อลื่นต่างชนิด ขนาดช่องว่างคมตัดระหว่างพันช์และดายที่เปลี่ยแปลง และกรณีที่คมตัดของดายทื่อเป็นต้น

5. แรงตัดเฉือน (Cutting Force)

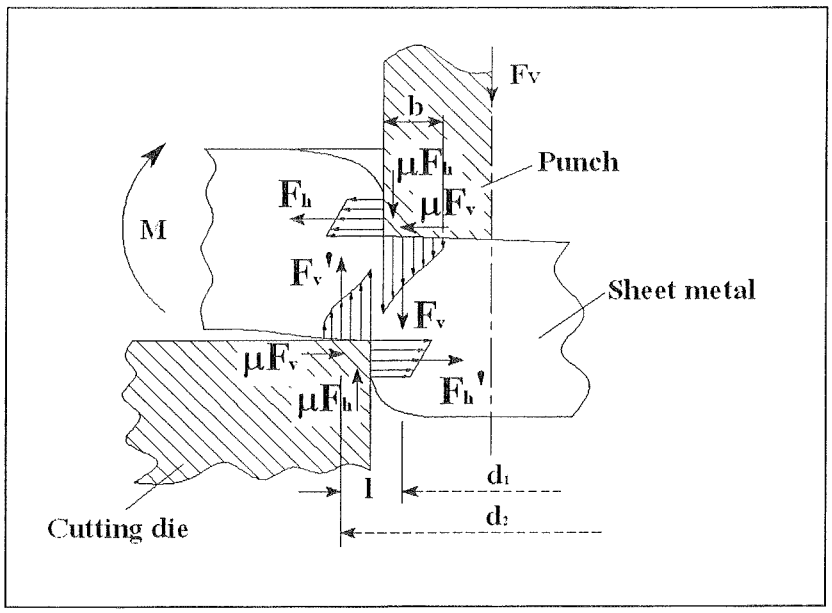
คือแรงที่ใช้ในการกดพันช์ให้ทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุ ถ้าแม่พิมพ์ชุดหนึ่งใช้พันช์และดายหลายตัวในเวลาเดียวกัน แรงตัดก็จะเพิ่มขึ้นโดยรวมจากจำนวนพันช์แต่ละตัวที่ใช้ สำหรับงานแม่พิมพ์ตัดทั่วไปแรงตัดเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเลือกใช้เครื่องปั๊มโลหะ



ภาพที่ 10 แสดงทิศทางความเค้นในการตัดโลหะ

6. การคำนวณแรงตัดเฉือน (Cutting Force)

แรงย่อยในการตัดเฉือน แรง F_V และ $F_{V'}$ กระทำห่างออกจากคมตัดเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการที่ความเค้นกดในบริเวณใกล้คมตัดกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอ แรงที่กระทำห่างกันเป็นระยะ L ทำให้เกิดโมเมนต์ ซึ่งพยายามดัดหรือเอียงชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 11 จึงเกิดโมเมนต์ปฏิกิริยาขึ้นในทิศตรงกันข้ามซึ่งเป็นผลมาจากการดัดและความเค้นตั้งฉากในแนวระดับบนชิ้นงานและแม่พิมพ์ตัด (พันซ์และดาย)



ภาพที่ 11 แสดงแรงย่อยในการตัดเฉือน

ความเค้นตั้งฉากในแนวระดับสามารถแทนด้วยผลลัพธ์ F_H และ $F_{H'}$ นอกจากนั้นยังมีแรงในแนวระดับเกิดขึ้นเมื่อแม่พิมพ์ตัด (พันซ์และดาย) มีมุมที่ขอบไม่เท่ากับ 90° หรือเมื่อผิวรอยตัดไม่ตั้งฉากกับระนาบของโลหะแผ่น นอกจากแรง F_v , $F_{v'}$, F_H , $F_{H'}$ แล้วยังมีแรงเสียดทานกระทำพันซ์และดายอีกด้วยแรงในแนวระดับ F_H และ $F_{H'}$ ทำให้เกิดแรงเสียดทานบนผิวด้านข้างของพันซ์และดาย นั่นคือ μF_H และ $\mu F_{H'}$ แรงตัดเฉือนซึ่งทำให้วัสดุเลื่อนไปบนผิวของพันซ์และดายทำให้เกิดแรงเสียดทาน μF_v และ $\mu F_{v'}$

สมการสำหรับคำนวณหาค่าแรง F_s ที่ต้องการใช้ในการตัดหรือเจาะวัสดุที่กำหนดโดยให้ผิวหน้าตัดของพันซ์และดายมีลักษณะเรียบ นั่นคือ ไม่มีการเอียงของคมเฉือน ดังรูป 12

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

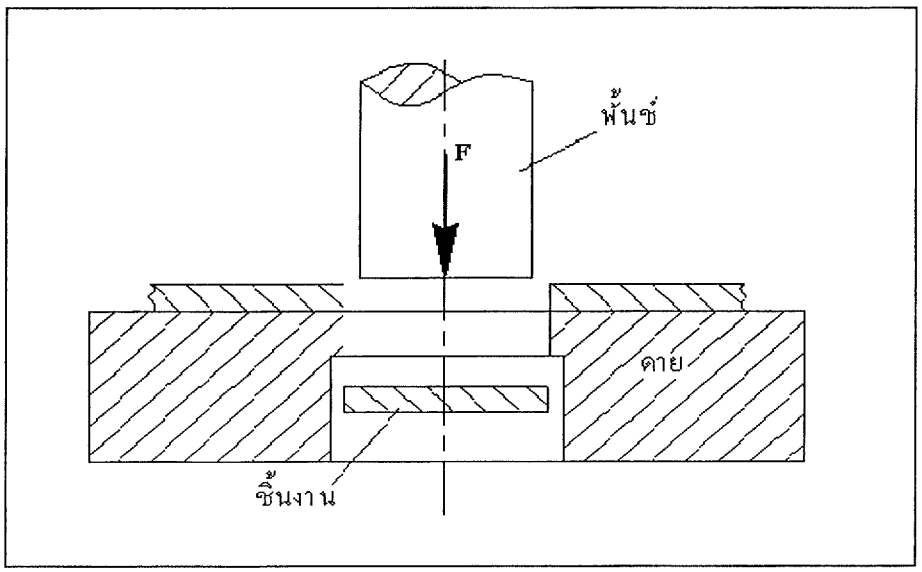
แรงที่ใช้ในการตัดสามารถหาได้จากสมการ

$F_s = k_s.l_s.t$ (N) , สำหรับงานตัดรูปทรงใดๆ

$F_s = k_s.\pi.d.t$ (N) , สำหรับงานตัดรูปวงกลม

เมื่อ

k_s	=	ความต้านทานแรงเฉือนของวัสดุ	N/mm^2
l_s	=	ความยาวรอยตัด	mm
d	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	mm
t	=	ความหนาของวัสดุ	mm



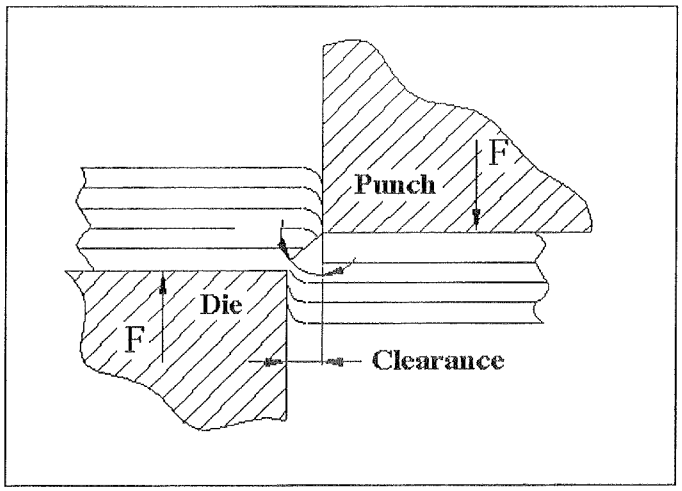
ภาพที่ 12 แสดงพันช์และดายในงานแม่พิมพ์ตัด(Blanking Die)

7. ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากตัวแปรที่เกี่ยวกับช่องว่างระหว่างพั้นช์และดาย (Clearance)

ช่องว่างระหว่างพั้นช์และดายมีผลต่อการตัดโลหะแผ่นบนดายมาก ถ้าเลือกใช้ขนาดของช่องว่างไม่ถูกต้องจะมีผลทำให้การผลิตชิ้นงานออกมาไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการ หรืออาจทำให้แท่งพั้นช์และแท่งดายที่ใช้ทื่อเร็วกว่าปกติ ขนาดของช่องว่างระหว่างพันช์และดายมักจะเรียกกันในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของความหนาของโลหะแผ่นที่นำมาตัด ถ้าใช้ขนาดของช่องว่าง 10 ถึง 15 % จะได้ผลเกิดขึ้นที่ของรอยตัด

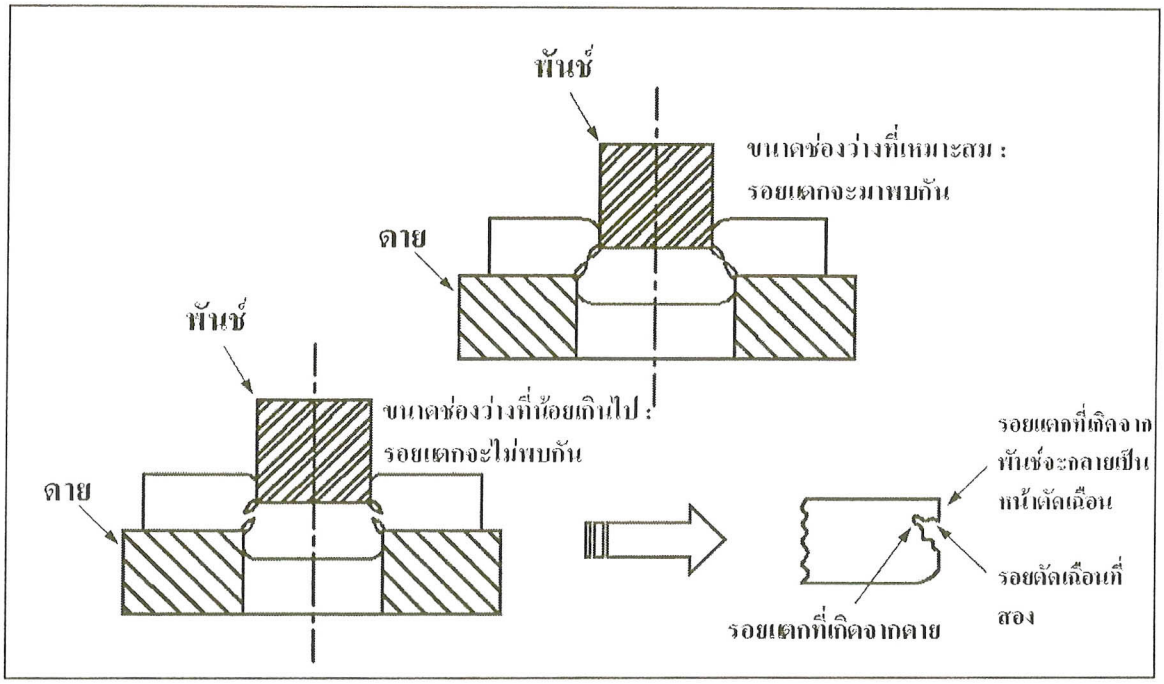
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 19 มิ.ย. 2555
เลขทะเบียน 243394

ในภาพที่ 13 จะเห็นได้ว่าเมื่อแท่งพั้นช์กดลงมารอยแตกจะยิ่งโตขึ้น ต่อมารอยแตกที่เกิดขึ้นขอบคมตัดของพั้นช์และดายจะมาบรรจบกันทำให้ขบวนการตัดเสร็จสิ้นสมบูรณ์ รอยแตกที่เกิดขึ้นจะทำมุม θ กับทิศทางกดลงของพั้นช์ จุดเริ่มต้นของรอยแตกทั้งสองข้างมีระยะห่างเท่ากับขนาดของช่องว่างที่ใช้ ถ้าพั้นช์และดายมีช่องว่างเหมาะสมตามคุณสมบัติและความหนาของโลหะแผ่นแล้ว รอยแตกทั้งสองด้านจะมาบรรจบกันพอดีที่ทำให้เกิดแรงต้านทานของชิ้นงานเกิดขึ้นน้อยที่สุด

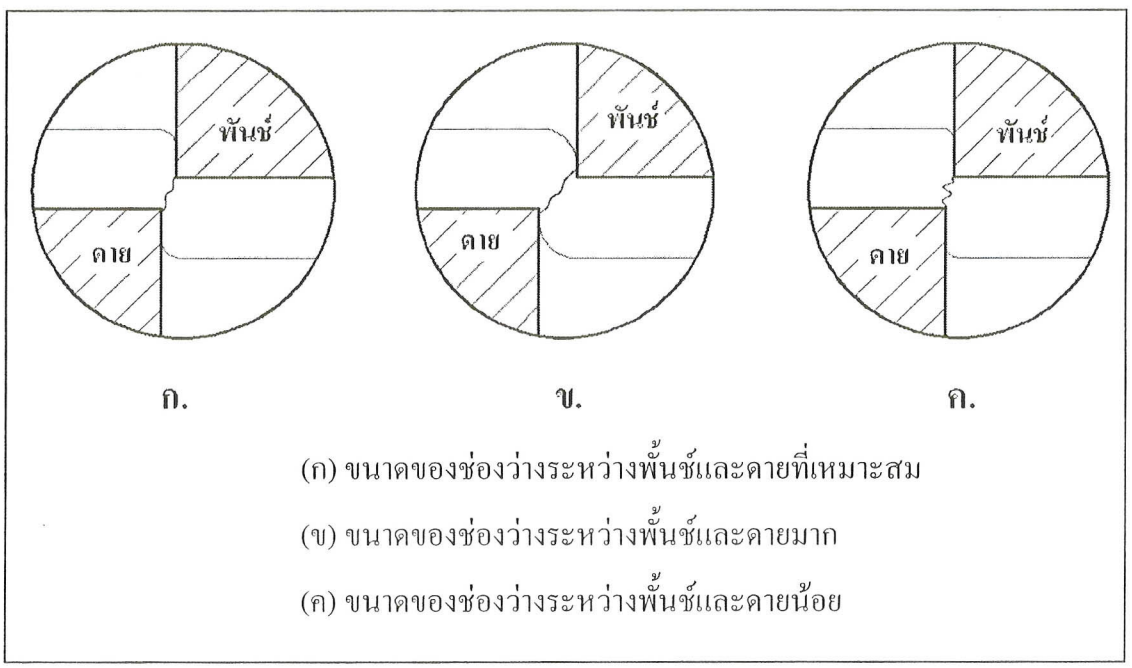


ภาพที่ 13 แสดงทิศทางขอแรงฉีกขาด

เนื่องจากทิศทางของรอยแตกซึ่งขยายตัวโตขึ้นมีทิศทางมุ่งไปยังคมตัดตรงกันข้าม ฉะนั้นรอยแตกจะมาบรรจบกันพอดีหรือไม่นั้นย่อมขึ้นอยู่กับว่าขนาดของช่องว่างที่ใช้นั้นมีมากน้อยเพียงใด กล่าวคือถ้าขนาดของช่องว่างน้อยเกินไปรอยแตกจะเยื้องกัน ดังภาพที่ 14 ซึ่งจะมีรอยตัดเฉือนที่สอง (Secondary shear) เกิดขึ้น ทำให้ผิวหน้าเฉือนไม่สวย ถ้าขนาดของช่องว่างมากเกินไปรอยแตกจะไม่บรรจบกันที่ตำแหน่งพอเหมาะทำให้ผิวหน้าเฉือนไม่สวยและ จะเกิดส่วนโค้งมนและส่วนขรุขระขึ้นมากด้วย



ภาพที่ 14 แสดงรอยตัดเฉือนที่สอง



(ก) ขนาดของช่องว่างระหว่างพั้นช์และดายที่เหมาะสม

(ข) ขนาดของช่องว่างระหว่างพั้นช์และดายมาก

(ค) ขนาดของช่องว่างระหว่างพั้นช์และดายน้อย

ภาพที่ 15 แสดงลักษณะของรอยตัดเฉือนแบบต่างๆ ตามขนาดของช่องว่างที่ใช้

8. การเลือกขนาดของช่องว่างระหว่างพั้นช์และดาย

การเลือกขนาดของช่องว่างระหว่างพั้นช์และดายที่ จะใช้ย่อมขึ้นอยู่กับผลสุดท้ายที่ต้องการจะได้รับการใช้ขนาดของช่องว่างมากกว่า 15 % ทำให้ไม่ต้องคำนึงถึงแนวศูนย์กลาง (alignment) ของเครื่องปั๊มโลหะกับดายมากนัก และมีโอกาสน้อยมากที่ขอบคมตัดของพั้นช์และดายจะมากระทบกัน แต่อย่างไรก็ตามการเกิดส่วนโค้งมนมากอาจจะไม่เป็นที่ต้องการก็ได้การใช้ขนาดของช่องว่างน้อยกว่า 10 % นั้นได้ถูกใช้เพื่อทำให้เกิดรอยตัดเฉือนที่สองขึ้นมา เพื่อต้องการให้ได้รับขอบที่เต็มของชิ้นงานที่ถูกตัด การใช้ขนาดของช่องว่างที่น้อยจะเป็นสาเหตุทำให้ขอบคมตัดของพั้นช์และดายสึกหรออย่างมากเนื่องจากต้องตัดเฉือนขอบของชิ้นงานมากขึ้น และโลหะที่ถูกตัดจะไปติดอยู่ที่แท่งพั้นช์และดายจึงต้องเพิ่มแรงผลักดันชิ้นส่วนที่หลุดออกมาจากการตัดให้หลุดออกไปจากรูของแท่งดาย โดยต้องใช้แรงดันแผ่นชิ้นงานให้หลุดออก (Stripping force) อย่างมากเพื่อดันเอาแผ่นชิ้นงานออกจากแท่งพั้นช์

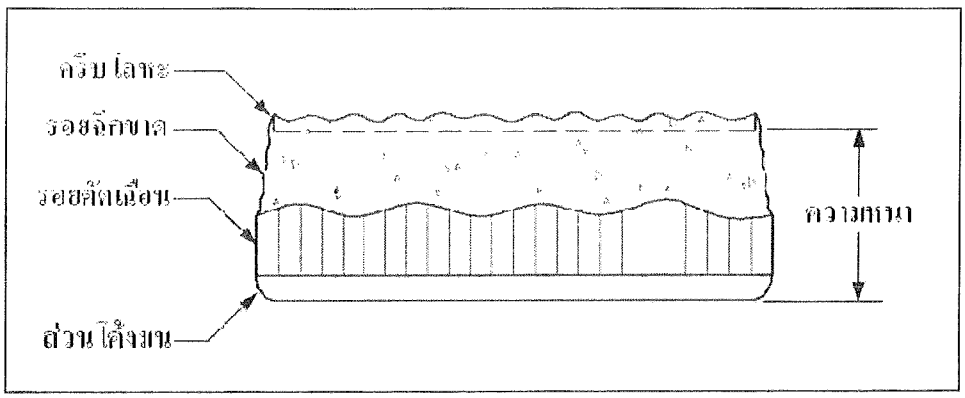
การใช้ขนาดของช่องว่างที่เหมาะสม (Proper clearance) จะทำให้ได้ขอบของชิ้นงานที่ถูกตัดเรียบและได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนตัดเฉือนตามที่ระบุไว้ในพิมพ์เขียว นอกจากนั้นยังไม่เกิดความยุ่งยากในการตัดชิ้นงานบนดายขนาดของช่องว่างที่เหมาะสมหมายถึงขนาดของช่องว่างระหว่างพั้นช์และดายที่กำหนดขึ้นมาใช้ โดยที่มีการเกิดส่วนโค้งมนที่ขอบของชิ้นงานเกิดขึ้นน้อยที่สุดและไม่มีรอยตัดเฉือนที่สองเกิดขึ้น การหาขนาดของช่องว่างเหมาะสมทำได้โดยวิธีการลองผิดลองถูก ไม่มีสูตรหรือตารางกำหนดขนาดของช่องว่างที่แน่นอนขึ้นมาใช้ หลักการทั่วๆ ไปในการกำหนดขนาดของช่องว่างระหว่างพั้นช์และดายที่เหมาะสม มีดังต่อไปนี้

1. โลหะหนาต้องการขนาดของช่องว่างมาก
2. โลหะอ่อนต้องการขนาดของช่องว่างมาก
3. โลหะแข็งจะมีขนาดของช่องว่างประมาณ 6 ถึง 10 % ของความหนาของชิ้นงาน
4. โลหะอ่อนจะมีขนาดของช่องว่างประมาณ 10 ถึง 18 % ของความหนาของชิ้นงาน
5. โลหะแข็งจะเกิดส่วนโค้งมนและส่วนรอยตัดเฉือนน้อย
6. โลหะหนาจะเกิดส่วนโค้งมนมาก
7. โลหะอ่อนจะมีมุมของการแตกมาก

9. อิทธิพลของช่องว่างคมตัดที่มีต่อชิ้นงาน

ผลที่เกิดจากการกำหนดช่องว่างระหว่างคมตัดในลักษณะต่างๆ (Effects of Cutting Clearance)ระยะช่องว่างระหว่างพันช์และดายที่เหมาะสมสามารถดูจากสภาพรอยตัดของชิ้นงานได้ดังนี้

9.1 กรณีที่ระยะช่องว่างคมตัดเหมาะสม (Optimum Cutting Clearance)

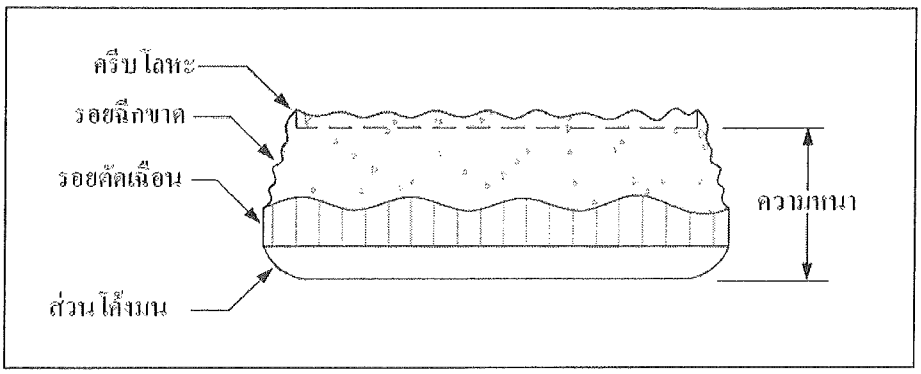


ภาพที่ 16 แสดงลักษณะชิ้นงานจากการใช้ระยะช่องว่างคมตัดที่เหมาะสม

จากภาพที่ 16 เป็นชิ้นงานหรือเศษที่ได้จากสภาพการตัดที่เหมาะสม จากสภาวะในขั้นตอนแรกของการเปลี่ยนรูป (Plastic Deformation) ระหว่างคมตัดจะเกิดขอบโค้งมน (Edge Radius) ขึ้นที่ขอบของชิ้นงาน รอยตัด (Shear Surface) ซึ่งเป็นแนวเส้นตรงมีลักษณะเงามัน เกิดจากสภาวะการตัดในขั้นตอนที่ 2 การกดลึก (Penetration) ความกว้างของรอยตัดจะมีขนาดประมาณ 1/3 ของความหนาวัสดุและสัดส่วนของรอยฉีกขาดเกิดจากปฏิกิริยาการตัดในขั้นตอนที่ 3 จะเป็นลักษณะของรอยตัดหรือการฉีกขาด (Fracture Surface)

9.2 กรณีของระยะช่องว่างคมตัดมากเกินไป (Excessive Cutting Clearance)

ผลที่เกิดจากการใช้ช่องว่างคมตัดระหว่างพันช์และดายมากเกินไป จากการเปรียบเทียบการใช้ระยะช่องว่างคมตัดระหว่างพันช์และดายให้มากที่สุดเท่าที่จะทำการตัดวัสดุได้นั้น ผลที่ได้จากปฏิกิริยาการตัดในครั้งแรกจะเหมือนการขึ้นรูปมากว่าการตัด ขอบโค้งมนของชิ้นงานจะใหญ่และรอยตัดจะแคบและไม่ราบเรียบสม่ำเสมอมีลักษณะเป็นรอยขรุขระดังภาพที่ 17

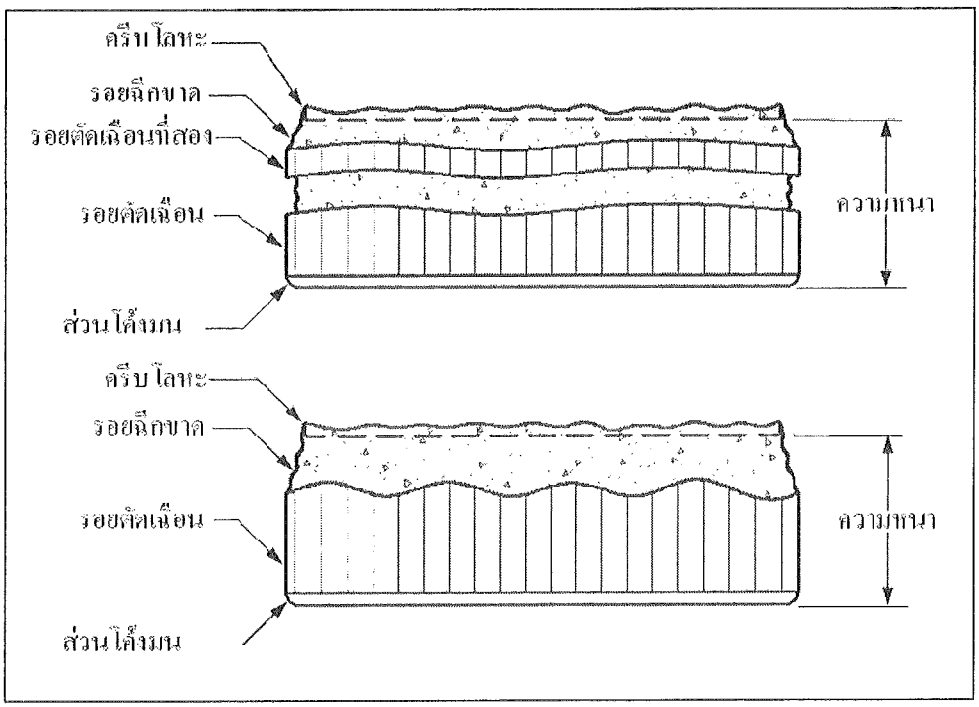


ภาพที่ 17 แสดงลักษณะชิ้นงานจากการใช้ช่องว่างคมตัดที่มากเกินไป

รอยฉีกขาดจะกว้างเนื่องจากการฉีกขาดและอาจจะแผ่ขยายถึงรอยตัดและตรงมุม ทำให้เกิดเสี้ยนหรือครีบ (Burr) ขึ้นที่รอยฉีก

9.3 กรณีที่ระยะช่องว่างคมตัดน้อย(Insufficient Cutting Clearance)

แสดงผลที่เกิดจากช่องว่างคมตัดระหว่างพันช์และดายน้อยไป สภาพของรอยตัด จะมีรอยกว้างไม่สม่ำเสมอและอาจเกิดขึ้นมากกว่า 2 แห่ง ดังภาพที่ 18

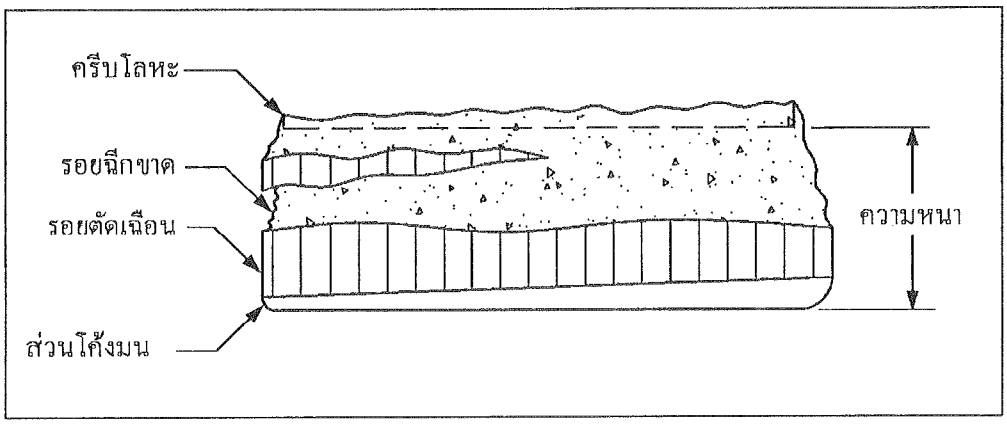


ภาพที่ 18 แสดงลักษณะชิ้นงานจากการใช้ระยะช่องว่างที่น้อยเกินไป

เนื่องจากมุมที่สูงชันมากเกินไประหว่างพันซ์และดาย เป็นอุปสรรคต่อการฉีกขาดของวัสดุเพิ่มมากขึ้นทำให้ต้องใช้แรงกดในการฉีกเนื้อวัสดุในครั้งแรกสูงกว่าปรกติ ถ้ารอยแตกขยายยาวออกไปแต่ไม่บรรจบกันทำให้รอยฉีกของวัสดุไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นเป็นบางส่วนเท่านั้น แรงกดที่ยังคงมีอยู่ที่พันซ์จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการครั้งที่สองขึ้นผลก็คือทำให้เกิดรอยฉีกครั้งท่สองเกิดขึ้นที่รอยตัดชิ้นงาน

9.4 ตำแหน่ง พันซ์และดายเยื้องศูนย์กัน

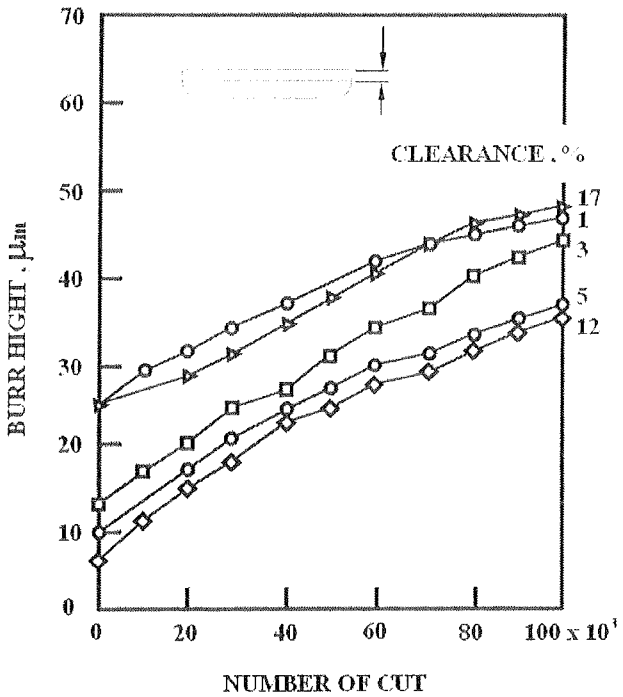
จากตำแหน่งของพันซ์และดายเยื้องศูย์กันและกันจะทำให้พันซ์และดายจะได้รับแรงไม่เท่ากันทุกจุด ทำให้รอยตัดของชิ้นงานมีลักษณะไม่เหมือนกันทุกด้าน คือด้านหนึ่งอาจมีลักษณะแบบเดียวกับชิ้นงานที่ได้จากการกำหนดช่องว่างคมตัดน้อยเกินไป ส่วนอีกด้านหนึ่งจะเกิดในลักษณะการกำหนดระยะช่องว่างคมตัดมากเกินไป ซึ่งจะส่งผลทำให้อายุการใช้งานของพันซ์และดายสั้นลงและเป็นตัวบ่งถึงความสามารถของเครื่องมือเครื่องจักรและผู้สร้างแม่พิมพ์ตัด ในการติดตั้งแม่พิมพ์ตัดซึ่งสามารถตรวจพบและแก้ไขตำแหน่งการเยื้องศูนย์ได้ระหว่างการใช้งาน



ภาพที่ 19 แสดงลักษณะชิ้นงานที่เกิดจากตำแหน่งของพันซ์และดายที่เยื้องศูนย์กัน

เสี้ยนหรือครีบโลหะที่เกิดขึ้นบนขอบชิ้นงาน อันเนื่องมาจากการใช้ช่องว่างคมตัดน้อยไป จะดูแตกต่างจากครีบโลหะท่เกิดจากชิ้นงานที่ใช้ช่องว่างคมตัดมาก เพราะถ้าหากระยะช่องว่างคมตัดมากครีบโลหะจะเกิดจากการดึงเนื้อโลหะให้ขาดออกจากกัน แต่ช่องว่างคมตัดน้อยครีบโลหะจะเกิดจากแรงกดที่ทำให้เนื้อโลหะขาดออกจากกัน ตามทฤษฎีของ John A.Schey ซึ่งได้กล่าวไว้ว่าความสูงของครีบที่เพิ่มขึ้นนอกจากอิทธิพลของช่องว่างคมตัดที่เพิ่มแล้วยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีผล

ต่อการเกิดครีบเช่นกัน เช่นลักษณะของคมตัดและคุณสมบัติของวัสดุชิ้นงาน เป็นต้น ซึ่งแนวโน้มของการเกิดครีบที่ระดับช่องว่างคมตัดต่างๆดูได้จากภาพที่ 20



ภาพที่ 20 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูงครีบ

10. การคำนวณแรงที่ใช้ตัดโลหะแผ่น

ในการตัดโลหะแผ่นโดยใช้พันช์และดาย มักจะใช้ปลายคมตัดแบนราบ คือผิวหน้าคมตัดทำมุม 90 องศากับเส้นผ่านศูนย์กลางของดาย ขณะที่ดายเริ่มต้นทำงาน การตัดจะเริ่มต้นขึ้นที่เส้นรอบรูปของพันช์อย่างต่อเนื่อง และหลักการเช่นเดียวกันนี้ก็จะเกิดที่ดายเหมือนกันบางโอกาสเมื่อต้องการตัดโลหะแผ่นที่หนามากขึ้น เพื่อลดแรงในการตัดจำเป็นต้องลับคมตัด ของพันช์หรือดายให้เอียงเป็นมุมจะทำให้คมตัดของพันช์หรือดายค่อยๆจมลึกลงไปในเนื้อโลหะแผ่น ทีละน้อย ซึ่งเรียกการตัดนั้นว่า การตัดเฉือน (Shear) การตัดโลหะแผ่นโดยใช้แม่พิมพ์ตัดทุกกระบวนการจะมีการยึดติดระหว่างชิ้นงานส่วนที่รูกับด้านข้างของพันช์ ดังนั้นจึงต้องมีการนำเอาโลหะแผ่นออกจากพันช์ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการคำนวณหาแรงและพลังงานที่ใช้ในการตัด ซึ่งมีดังต่อไปนี้

- แรงที่ใช้ในการตัดโดยใช้ผิวหน้าคมตัดแบนราบ
- แรงที่ใช้ในการตัดโดยผิวหน้าคมตัดถูกตัดเฉือน

- แรงปลดแผ่นชิ้นงานให้หลุดออก (Stripping force)
- งานหรือพลังงานที่ใช้

สูตรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณในบทนี้ สามารที่จะนำไปดัดแปลง ใช้ได้กับกระบวนการตัดอื่นทุกกระบวนการ การคำนวณหาแรง ก็เพื่อนำไปใช้เลือกขนาดจำนวนตันที่เหมาะสมของเครื่องปั้มโลหะ และนำไปคำนวณหาขนาดของชิ้นส่วนที่จะใช้ทำแม่พิมพ์ งานหรือพลังงานที่ใช้จะถูกนำไปคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ของเครื่องปั๊มโลหะ ขณะที่แรงดันแผ่นชิ้นงานให้หลุดออกได้ถูกใช้หาขนาดและการอัดตัวของสปริง หรือขนาดของยางยูริเทน หรือขนาดของท่อลม ซึ่งสิ่งต่างๆเหล่านี้จะเป็นตัวบังคับให้แผ่นปลดชิ้นงานทำงาน บางครั้งเพื่อลดแรงในการตัดก็ต้องคำนวณหาระยะคมตัดเฉือนด้วย

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

แรง = ความแข็งแรงเฉือน x เส้นรอบรูปของการตัด x ความหนาของโลหะแผ่น

หรือ

$$F = \frac{LtS_S}{1000} \qquad (2.1)$$

ในที่นี้

F = แรงที่ใช้ตัด (ตัน)

L = ความยาวเส้นรอบรูปการตัด (มิลลิเมตร)

t = ความหนาของโลหะแผ่น (มิลลิเมตร)

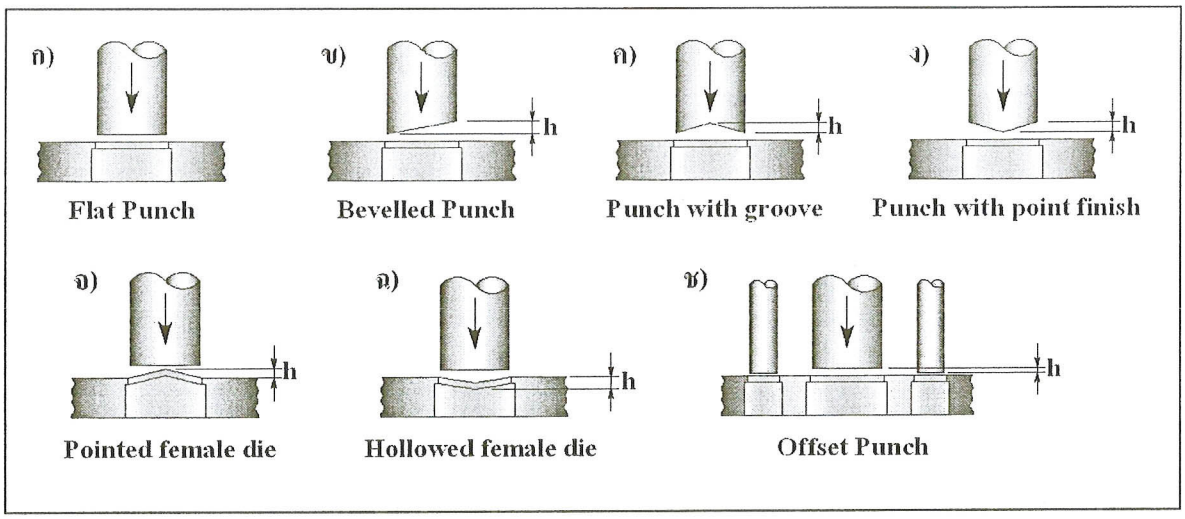
S_S = ความแข็งแรงเฉือน (นิวตันต่อรางมิลลิเมตร)

ความแข็งแรงเฉือนของโลหะใดคือ ความต้านทานการตัดของโลหะนั้นในแม่พิมพ์จะมีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ความแข็งแรงเฉือนจะเป็นสิ่งชี้ให้เห็นถึงว่า ความเค้นที่ถูกกระทำขึ้นมาบนโลหะนั้นเกิดการเฉือนขาดได้

11. แรงที่ใช้ตัดโดยใช้ผิวหน้าคมตัดแบบตัดเฉือน

การที่ลับผิวหน้าคมตัดของพันช์หรือดายให้เป็นมุมจะเป็นการช่วยลดแรงที่ต้องใช้ในการตัดลง การสร้างมุมเอียงที่ผิวหน้าคมตัดมีข้อดีทางกลก็คือ ถ้ามุมเอียงยิ่งมากแรงที่ใช้ยิ่งน้อยลง ดังนั้นถ้าหากว่าแรงที่ใช้ตัดมีมากกว่าขนาดของเครื่องปั๊มโลหะ มุมนี้จะทำให้ขนาดของเครื่องปั๊ม

โลหะที่มีอยู่ใช้ตัดโลหะได้ดีขึ้นการตัดเฉือนคมนั้นอาจจะตัดคมขึ้นหรือลงก็ได้ ระยะที่ตัดจะถูกวัดเป็นมิลลิเมตร ลักษณะของการตัดเฉือนคมตัดได้แสดงในภาพที่ 21 คืออาจจะตัดเอียงเป็นมุมเดียว ตัดเอียงสองมุมร่วมกัน ตัดเป็นรูปโค้งเข้า รูปโค้งออก หรือรูปร่างอย่างอื่น การตัดเฉือนที่คมตัดของพันช์นั้นจะใช้สำหรับการตัดรู แผ่นชิ้นงานที่หลุดออกมาจากการตัดจะบิดงอ ส่วนการตัดเฉือนที่คมตัดของดายใช้สำหรับการตัดแผ่นชิ้นงานให้หลุดออกและการตัดขลิบริม โลหะแผ่นที่ถูกตัดเหลือเศษเป็นโครงร่าง (Scrap skeleton) จะบิดงอ



ภาพที่ 21 แสดงแบบต่างๆ ของการตัดเฉือนบนคมตัด

12. แรงปลดแผ่นชิ้นงานให้หลุดออก (Stripping force)

โลหะแผ่นเมื่อตัดรูออกไปแล้ว รูจะติดพันช์ขึ้นไปทั้งนี้เนื่องจากการกระเด้งตัวกลับของเนื้อโลหะบางส่วนที่อยู่รอบๆรูที่ตัดยังอยู่ในภาวะยืดหยุ่นตัว โลหะแผ่นที่มีความแข็งกว่าและบางกว่าต้องการใช้แรงปลดแผ่นชิ้นงานให้หลุดออกน้อยมาก โลหะที่ผ่านการอบคืนตัวและโลหะที่อ่อนมีแนวโน้มที่จะเกิดการเชื่อมแบบเย็นตัวได้ง่ายต้องใช้แรงปลดแผ่นชิ้นงานออกมากกว่า กฎในการออกแบบแม่พิมพ์ตัดคือ จะกำหนดให้แรงปลดแผ่นชิ้นงานให้หลุดออกมามีค่าเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ ของแรงที่ใช้ในการตัด แต่ถ้าขนาดช่องว่างระหว่างพันช์มากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ แรงปลดแผ่นชิ้นงานให้หลุดออกจะลดลง 5 เปอร์เซ็นต์ ของแรงที่ใช้ตัด

ข้อควรพิจรณาเกี่ยวกับแรงปลดแผ่นชิ้นงานให้หลุดออกจากพันช์มีดังนี้

1. โลหะที่อ่อนต้องใช้แรงปลดแผ่นชิ้นงานมากกว่า
2. การใช้ขนาดช่องว่างแม่พิมพ์น้อยต้องใช้แรงปลดแผ่นชิ้นงานมากกว่า

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

3. การตัดที่เกิดขึ้นใกล้ๆขอบของโลหะแผ่น ต้องการใช้แรงปลดแผ่นชิ้นงานน้อย เพราะ โลหะแผ่นสามารถดีดตัวออกจากพันช์ได้ง่าย

4. การตัดที่มีความเร็วสูงกว่าจะเป็นตัวทำให้พันช์ร้อนได้ง่าย จะเกิดการเชื่อมแบบเย็นตัวมากขึ้น ต้องใช้แรงปลดแผ่นชิ้นงานมาก

5. สารหล่อลื่นช่วยลดแรงปลดแผ่นชิ้นงานได้

6. การเจียรนัยพันช์และดายในแนวดิ่ง จะมีผลทำให้ใช้แรงปลดแผ่นชิ้นงานน้อยลง

แรงปลดแผ่นชิ้นงานสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$fs = 3500L_t \qquad (2.2)$$

ในที่นี้

fs คือ แรงปลดแผ่นชิ้นงาน (ตัน)

13. การชุบแข็ง (Hardening) [4]

การชุบเคลือบผิว และการชุบแข็งเป็นเทคโนโลยีที่มีมานาน มีวัตถุประสงค์ เพื่อปรับปรุงผิวชิ้นงานให้มีความแข็ง เพื่อทนต่อการสึกหรอ การเสียดสี ความร้อน รวมถึงป้องกันการกัดกร่อน การชุบเคลือบ เป็นการเอาวัสดุมาเคลือบ ติดกับผิวชิ้นงาน ได้แก่ การพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า การเคลือบผิว ด้วยไอกายภาพ และไอเคมี การทาสี การเคลือบสารแม่เหล็กลงบนแผ่นดิสก์ อุตสาหกรรมเกือบทุกประเภทมักผ่านการชุบเคลือบทั้งสิ้น ได้แก่ อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเลียม ตลอดจน ชิ้นส่วนทางการแพทย์ส่วนการชุบแข็งเหล็กกล้า เป็นการทำให้เหล็กกล้า มีความแข็งเพิ่มขึ้นโดยการให้ความร้อนเพื่อทำให้เหล็กกล้า เปลี่ยนโครงสร้างผลึก จากนั้นจึงทำให้เย็นตัวลง โดยอัตราการเย็นตัวต้องเร็วพอที่จะทำให้เหล็กกล้า เปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็น มาร์เทนไซด์ซึ่งมีความแข็งสูง

การชุบแข็งเหล็กกล้าแบ่งเป็น 2 วิธี คือ การชุบแข็งทั้งชิ้นงาน และการชุบผิวแข็ง การชุบแข็งทั้งชิ้นงาน สามารถทำได้โดยการชุบโดยตรง ในสารชุบ ซึ่งได้แก่ น้ำ, น้ำเกลือ, น้ำมัน, ก๊าซไนโตรเจน หรืออากาศ ขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กกล้านั้นๆ การเลือกสารชุบ พิจารณาจากความร้อนในการเย็นตัว ของเหล็กกล้า ขณะชุบลงในสารชุบ ต้องสูงกว่าอัตราเย็นตัววิกฤต ของเหล็กชนิดนั้นๆ เพื่อให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซด์ นอกจากนี้ควรคำนึงถึง การเสียรูป การแตกร้าว ซึ่งอาจเกิดขึ้นกับชิ้นงานในขณะชุบด้วย ปัจจัยดังกล่าว ทำให้ได้ความลึกของผิวแข็ง สำหรับการชุบผิวแข็งเป็นการชุบแข็งชิ้นงาน เพื่อให้ชิ้นงานมีความแข็งเฉพาะผิว โดยบริเวณแกนกลาง ยังคงความเหนียว

อยู่ ชิ้นงานที่ผ่านการชุบ จะทนต่อการเสียดสี และสามารถรับแรงกดอัด ที่ผิวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผิวที่ผ่านการชุบแข็งยังสามารถป้องกันการแตกร้าวจากความล้าได้ดี การชุบผิวแข็งมีหลายวิธี ได้แก่ การชุบผิวแข็งด้วยเปลวไฟ การชุบผิวแข็งด้วยกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การชุบผิวแข็งแบบคาร์บูไรซิ่ง การชุบผิวแข็งแบบคาร์โบไนไตรด์ดิ่ง การชุบผิวแข็งแบบไนไตรดิ่ง ภายหลังการชุบแข็งต้องทำการตลอดสอบคุณภาพ ชิ้นงานชุบแข็ง ได้แก่ การเกิดออกซิเดชั่นที่ผิว การเสียรูป การบิดตัว การขยายตัว การหดตัวของชิ้นงาน การแตกร้าว นอกจากนี้ ยังต้องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และวัดค่าความแข็งที่เกิดขึ้นด้วยการชุบเคลือบและการชุบแข็ง มีบทบาทสำคัญ ในการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน บางกรณี อาจต้องใช้เทคโนโลยีหลายอย่างผสมกัน เพื่อให้ได้สมบัติของชิ้นงานที่ดีที่สุด และราคาถูกที่สุด ซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบ ทั้งด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมด้วยการชุบแข็ง ทำเพื่อให้ชิ้นงานแข็งทน การสึกหรอทำ โดยการอบที่อุณหภูมิที่กำหนดเวลาอบแช่สำหรับเหล็กกล้า คาร์บอน และเหล็กกล้าผสมต่ำ 5 -15นาที จุ่มชุบในสารชุบ ตามข้อกำหนดของเกรด เหล็กนั้นๆ สารที่ชุบมี น้ำ,น้ำมัน,ลม, เกลือหลอมเหลว

ตารางที่ 2. แสดงเกรดมาตรฐานของเหล็กชนิดต่างๆ [4]

เกรดมาตรฐานทั่วไป									
S45C	C1045	CK45	S45C	S45C	S45C	-	-	CK45	R 4
S50C	C1050	CK50	S50C	S50C	S50C	760	CM50	-	-
S55C	C1055	CK55	S55C	-	-	-	CM55	CK55	-

ตารางที่ 3. แสดงเปอร์เซ็นส่วนผสมต่างๆ

ส่วนผสม (%) Composition					
	C	Si	Mn	P	S
S45C	0.42-0.48	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030max.	0.035max.
S50C	0.47-0.53	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030max.	0.035max.
S55C	0.52-0.58	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030max.	0.035max.

ตารางที่ 4. แสดงค่าความแข็ง

ความแข็ง Hardness		
	สภาพปกติ (Normalized)	หลังการอบ-ชุบ (Tempered)
S45C	167-229 HB (4.4-20.5 HRC)	201-269 HB (13.8-27.6 HRC)
S50C	179-235 HB (8.0-21.7 HRC)	212-277 HB (16.0-28.8 HRC)
S55C	183-255 HB (9.0-25.4 HRC)	229-285 HB (20.5-29.9 HRC)

ตารางที่ 5. แสดงการอบชุบ

การอบ-ชุบ (°c) Heat treatment				
	Normalizing	อบอ่อน(Annealing)	ชุบแข็ง(Hardening)	อบคืนไฟ(Tempering)
S45C	820-870 (Air coolimg)	810 (Furnace cooling)	820-870 (Water quenching)	550-650 (Rapid quenching)
S50C	810-860 (Air coolimg)	800 (Furnace cooling)	810-860 (Water quenching)	550-650 (Rapid quenching)
S55C	800-850 (Air coolimg)	790 (Furnace cooling)	800-850 (Water quenching)	550-650 (Rapid quenching)

ตารางที่ 6. แสดงคุณสมบัติของเหล็ก

คุณสมบัติเหล็ก
เหล็กกล้าคาร์บอน แม่พิมพ์ทั่วไป
S45C เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel)
S50C เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel)
S55C เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel)

14. ทฤษฎีเกี่ยวกับสารหล่อลื่น

14.1 ชนิดสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมาย ซึ่งถ้าแบ่งตามสถานะจะแบ่งออกได้เป็นสี่ชนิด คือ ก๊าซ ของเหลว สารกึ่งของแข็ง (Semi – Solid) และของแข็ง สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กันมากที่สุดเพราะมีคุณสมบัติหลากหลายเมื่อนำไปใช้งาน และสามารถรับแรงที่กระทำได้มาก ของเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นมีน้ำ สารละลายน้ำ (Aqueous Solution) น้ำมันแร่ (Mineral Oil) น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ และน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Oil)

14.1.1 น้ำมันแร่ (Mineral Base Oil)

เป็นนำมันหล่อลื่นที่ได้จากกากระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในหอกลั่น ได้จากการเอาส่วนที่อยู่ก้นหอกลั่นภายใต้แรงดันสุญญากาศมาผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศซึ่งคุณสมบัติสำคัญที่ถูกควบคุมโดยการกลั่นสุญญากาศคือ ความหนืด (Viscosity) จุดวาบไฟ (Flash Point) และกากคาร์บอน (Carbon Residual)แยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดใสและชนิดข้นออกมาที่เหลือเป็นกากก็สามารถนำไปผลิตยางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบที่นำมากลั่น มันแร่ที่ได้จากน้ำมันดิบ พวกพาราฟินิก (Paraffinic) มักจะมีไขสูงต้องผ่านขบวนการขจัดเอาไขออก น้ำมันที่ได้จากการกลั่นแยกภายใต้สุญญากาศนี้มักจะมีคุณภาพไม่ดีพอที่จะนำมาใช้ผลิตสารหล่อลื่น ต้องผ่านกระบวนการต่างๆเพื่อขจัดเอาสารที่ไม่ต้องการออก เพื่อให้มีความอยู่ตัวทางเคมีและเชิงความร้อนดี

14.1.2 น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ (Vegetable or Animal Base Oil)

เนื่องจากน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ที่ได้จากธรรมชาติมักจะมีความอยู่ตัวทางเคมีต่ำ เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะใช้งานจึงต้องผ่านขบวนการปรับปรุงคุณภาพซึ่งราคาก็จะแพงขึ้นมาก จึงหมดความนิยมไปปัจจุบันมีการใช้น้ำมันพืชหรือสัตว์เป็นน้ำมันพื้นฐานน้อยมาก และใช้เฉพาะงานหล่อลื่นที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางประการเท่านั้น ส่วนใหญ่มักจะใช้เป็นตัวเติมเพิ่มคุณภาพให้น้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียมเช่น เพื่อเพิ่มความลื่นและความสามารถในการเข้ากับน้ำมัน เป็นต้น

14.1.3 น้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Base Oil)

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่ที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบนั้น แม้ว่าจะผ่านกระบวนการมากมายที่ใช้กำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไปแต่น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้ ออกมานั้นยังคงเป็นของผสมสารประกอบหลายตัว ซึ่งมี่ทางที่จะเลือกเฉพาะสารที่มีคุณสมบัติดีที่สุดได้ และถ้ามีก็จะได้ผลผลิตต่ำ เป็นผลทำให้น้ำมันแร่มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน ดังนั้น ได้มีการพัฒนาน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันสังเคราะห์ขึ้นมา น้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมัน

พื้นฐานที่ได้จากกระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักจะนำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งเป็นการรวมตัวของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำให้ได้น้ำมันที่มีความหนืดเพียงพอที่จะใช้หล่อลื่น ข้อดี ของน้ำมันสังเคราะห์เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่คือ สามารถนำไปใช้งานที่ช่วงอุณหภูมิได้กว้างกว่าน้ำมันแร่ คือ ใช้ได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำและสูงกว่าน้ำมันแร่ นอกจากนี้น้ำมันสังเคราะห์บางประเภทยังให้สมบัติเฉพาะ เช่น ผสมเข้ากับน้ำได้ และไม่ติดไฟ มีการระเหยต่ำ เป็นต้น อย่างไรก็ตามน้ำมันสังเคราะห์จะมีข้อได้เปรียบกว่าน้ำมันแร่เมื่อนำไปใช้งานบางประเภท น้ำมันสังเคราะห์ยังมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมทุกด้าน จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันสังเคราะห์โดยการใส่สารเพิ่มคุณภาพซึ่งจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางด้านเคมีและกายภาพ

14.1.4 สารหล่อลื่นของแข็ง (Solid Lubricants)

เป็นสารหล่อลื่นที่มีความสามารถในการรับแรงกดแนวตั้งฉากได้ดีและในขณะเดียวกันก็มีความสามารถในการเลื่อนไถลไปได้อย่างง่ายในชั้นผิวเมื่อมีแรงมากระทำในแนวราบหรือเมื่อมีแรงเฉือน สารหล่อลื่นของแข็งจะอยู่ระหว่างคู่ผิวโลหะที่เคลื่อนที่และจะช่วยปกป้องการเสียดสีระหว่างผิวโลหะทำให้ช่วยลดการสึกหรอและการเสียดสีรวมถึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำด้วย สารหล่อลื่นของแข็งที่ใช้กันโดยทั่วไปปัจจุบัน คือ กราไฟต์ โมลิบดินั่มไดซัลไฟด์ และแผ่นพลาสติก

15. สมบัติของสารหล่อลื่น [5]

น้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดจะมีสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นในการเลือกใช้จำเป็นต้องรู้สมบัติของสารหล่อลื่นและในการผลิตก็จะต้องมีการควบคุมสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นให้ได้ตามต้องการสำหรับสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่สำคัญทั้งสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี มีดังต่อไปนี้

15.1 ความหนืด (Viscosity)

เป็นสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัส ความหนืด คือ ความข้นของน้ำมันโดยวัดที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง น้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะไหลง่าย แต่ฟิล์มหล่อลื่นก็บางมากด้วย สำหรับน้ำมันที่มีความข้นสูงย่อมไหลยากแต่จะมีฟิล์มหล่อลื่นหนากว่า หรือ แข็งกว่าน้ำมันที่มีความข้นต่ำหน่วยวัดความหนืดมีหลายระบบและอุณหภูมิที่วัดก็ต่างๆกัน ซึ่งอาจสรุปได้ดังตารางที่ 7

<u>ตารางที่ 7.</u> แสดงระบบหน่วยและอุณหภูมิที่วัดความหนืดของน้ำมัน [5]

ประเภทหรือระบบ	หน่วยความหนืด	อุณหภูมิที่ใช้วัด
1. ระบบสากล (เมตริก)	เซนติสโตก (Centistoke; cSt)	40 และ 100 องศาเซลเซียส
2. สหรัฐอเมริกา	วินาทีเซย์โบลต์ (Saybolt Universal Seconds; SUS)	100 และ 210 องศาฟาเรนไฮต์
3. สหราชอาณาจักร	เรดวูด No.l (Redwood Seconds; RWl)	70,100,140,200 องศาฟาเรนไฮต์
4. เยอรมันและประเทศในยุโรป	อิงเลอร์ (Engler Degree; E)	20,50,100 องศาเซลเซียส

หลักการวัดค่าของความหนืด ประกอบด้วยแผ่นวัตถุถูกดึงไปบนฟิล์มของน้ำมันด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ฟิล์มของน้ำมันติดอยู่ทั่วผิววัตถุที่เคลื่อนที่และที่อยู่กับที่ ซึ่งเมื่อพิจารณาให้น้ำมันประกอบขึ้นด้วยชั้นหลายๆชั้น ชั้นน้ำมันที่อยู่ติดกับผิวที่เคลื่อนที่ก็เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเดียวกับผิวที่เคลื่อนที่ (U) ส่วนชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่อยู่กับที่ก็จะมีความเร็วเป็นศูนย์ ชั้นน้ำมันที่อยู่ระหว่างชั้นบนสุดและชั้นล่างสุดก็จะถูกดึงไป ด้วยน้ำมันที่อยู่ด้านบนถัดไปให้มีความเร็วส่วนหนึ่งของความเร็ว U ซึ่งความเร็วแต่ละชั้นของน้ำมันดังกล่าวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากผิววัตถุที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นน้ำมันนั่นเอง และเนื่องจากแรงนี้เป็นผลมาเนื่องจากความหนืด โดยแรงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนืด ดังนั้นความหนืดก็สามารถหาได้จากการวัดแรงที่ต้องใช้เพื่อเอาชนะความเสียดทานของน้ำมัน ความหนืดที่หาได้ในที่นี้เรียกว่า “ความหนืดสัมบูรณ์” (Absolute Viscosity) หรือ “ความหนืดเชิงพลศาสตร์” (Dynamic Viscosity)

หน่วยความหนืดเชิงพลศาสตร์ที่นิยมใช้กัน คือ หน่วยเป็น พอยส์ (Poise: P) ซึ่งเป็นหน่วยในระบบCGS (Centimeter Gram Second)

1 Poise = 1 Dyne s /cm^2 = 1g / cm.c

1 Centipoises (cp) = 1×10^{-2} Poise (P)

โดยทั่วไปเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความหนืดจะไม่สามารถวัดค่าความหนืดเชิงพลศาสตร์ได้โดยตรง ดังนั้นจึงได้กำหนดค่าความหนืดที่เรียกว่า ความหนืดเชิงจลศาสตร์ (Kinematic Viscosity) โดยให้ความหนืดเชิงจลศาสตร์ เท่ากับ ความหนืดเชิงพลศาสตร์ หารด้วยความหนาแน่นของน้ำมันหรือของไหลนั้นๆดังสมการ

$$\nu = \eta/\rho \qquad (2.3)$$

เมื่อ

ν ความหนืดเชิงจลศาสตร์ (สโตก)

η ความหนืดเชิงพลศาสตร์ (พอยส์)

ρ ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

หน่วยความหนืดที่นิยมใช้กันก็คือ หน่วย Stoke (St) ซึ่งเป็นหนึ่งในระบบ CGS เช่นเดียวกันโดย

1 Stoke (St) = 1 cm^2

1 Centistoke (CSt) = 1×10^{-2} Stoke (St)

ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะไม่คงที่ แต่จะแปรผันตามสภาวะการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะแปรผันกับอุณหภูมิและความดันในการใช้งาน ในด้านของอุณหภูมิความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

15.2 ความต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน

ดังที่ได้ทราบแล้วว่า น้ำมันเป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เมื่อสารไฮโดรคาร์บอนประกอบกับออกซิเจนในอากาศก็จะเกิดการทำปฏิกิริยากันทำให้เกิดสิ่งที่ไม่พึงประสงค์หลายชนิด เช่น กรด ความเหนียว นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิสูงอัตราการรวมตัวก็ยิ่งเกิดเร็วขึ้นอีก สำหรับน้ำมันที่ดีย่อมรวมตัวกับออกซิเจนได้ยาก

15.3 จุดวาบไฟ

คือ อุณหภูมิของน้ำมันที่ได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอ แล้วลุกวาบเมื่อโดนเปลวไฟ จุดวาบไฟมีความสำคัญเกี่ยวกับความปลอดภัย

15.4 จุดไหลเท

คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันจะไหลได้โดยไม่มีอะไรรบกวน สำหรับในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ จำเป็นที่จะเลือกใช้น้ำมันที่จุดไหลเทต่ำ

15.5 ดัชนีความหนืด

ความหนืดของน้ำมันจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ คือ น้ำมันจะข้นน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจะข้นมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง จึงมีการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงนี้ออกมาเป็นค่าดัชนีความหนืด (Viscosity Index) หรือเรียกว่าค่า VI ถ้าน้ำมันที่มีความหนืดเปลี่ยนแปลง

น้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมาก แสดงว่าน้ำมันหล่อลื่นมีค่า VI สูง ถ้าค่าความหนืดของน้ำมันเปลี่ยนแปลงมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงน้อยก็แสดงว่าน้ำมันมีค่า VI ต่ำ สมการที่ใช้ในการหาค่าดัชนีความหนืดของน้ำมัน หรือ ค่า VI

$$VI = (L-U) / (L-H)) \times 100 \qquad (2.4)$$

เมื่อ U คือ ความหนืดที่ 100 องศาฟาเรนไฮต์ ของน้ำมันที่ต้องการหาค่า VI

L คือ ความหนืดที่ 100 องศาฟาเรนไฮต์ ของน้ำมันมาตรฐานที่มีค่า VI เท่ากับศูนย์ และจะมีค่าความหนืดที่ 210 องศาฟาเรนไฮต์ เหมือนกับน้ำมันที่นำมาหาค่า VI ที่ 210 องศาฟาเรนไฮต์

H คือ ความหนืดที่ 100 องศาฟาเรนไฮต์ของน้ำมันมาตรฐานที่มีค่า VI เท่ากับ 100 และจะมีค่าความหนืดเทียบกับน้ำมันที่จะนำมาหาค่า VI ที่ 210 องศาฟาเรนไฮต์

15.6 สี

สีของน้ำหล่อลื่นที่มองเห็นเมื่อมีแสงผ่านนั้นจะมีสีต่างๆกัน ตั้งแต่ใสมากจนถึงดำ ซึ่งอาจมีสีเหลือง สีของน้ำมันหล่อลื่นเป็นผลมาจากชนิดน้ำมันดิบที่นำมาผลิต วิธีการกลั่น จำนวนและสารเพิ่มคุณภาพ

15.7 สภาพความเป็นกรดด่าง

น้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะมีสภาพความเป็นกรดอยู่เล็กน้อย สภาพความเป็นกรดด่าง ของน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจน ซึ่งทำให้เกิดกรดอินทรีย์ขึ้น สภาพความเป็นกรดจะกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะได้ สภาพความเป็นกรดจะมีตัวเลขต่ำ

15.8 สารเพิ่มคุณภาพ (Additives)

สารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานโดยทั่วไปเป็นสารประกอบทางเคมี สารเพิ่มคุณภาพแต่ละตัวจะปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเฉพาะอย่างซึ่งมีผลทำให้น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีสมบัติออกเป็นสามพวก คือ พวกแรกจะเป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ให้สมบัติใหม่ที่เป็นประโยชน์ต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน พวกที่สองเป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ปรับปรุงคุณสมบัติที่มีอยู่แล้วให้ดีขึ้น และพวกสุดท้ายเป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ทำหน้าที่ในการลดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการเกิดในช่วงการทำงานลง ดังนั้นในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชนิดใดชนิดหนึ่ง ขึ้นมาจะต้องมีการศึกษา ค้นคว้า และวิจัยถึงหน้าที่ที่น้ำมันหล่อลื่นประเภทนั้น

จะต้องทำงานอยู่ในสภาวะต่างๆ เช่น ขณะหล่อลื่นเครื่องจักรกลและเครื่องยนต์ จากนั้นจึงจะสามารถกำหนดสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ต้องการใช้งานได้ แล้วจึงเลือกน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่จะนำมาผลิต และเลือกสารเพิ่มคุณภาพที่เติมในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อผลิตน้ำมันหล่อลื่นให้ทำงานได้อย่างมีคุณภาพและเหมาะสมกับงานที่ต้องการ จากนั้นจึงมีการทดสอบกับงานจริง และประเมินผลเพื่อให้แน่ใจว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ผลิตได้ดังกล่าวมีคุณภาพดีจริงๆตรงตามความต้องการ ทำให้น้ำมันหล่อลื่นที่มีจำหน่ายในท้องตลาดแต่ละชนิดใช้น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ชนิด และปริมาณของสารเพิ่มคุณภาพที่ไม่เหมือนกัน และราคาก็แตกต่างกัน น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่อเติมสารเพิ่มคุณภาพเข้าไปแล้วก็จะ เรียกว่า น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปซึ่งบริษัทผู้ผลิตแต่ละรายมักจะตั้งชื่อเฉพาะของแต่ละผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมา ดังนั้นการเลือกใช้จึงต้องเลือกให้ถูกชนิดด้วย สำหรับสารเพิ่มคุณภาพที่นิยมใช้เติมในน้ำมันหล่อลื่นนั้น จะสามารถทำการหล่อลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถแสดงได้ในตารางที่ 8

ตารางที่ 8. แสดงทฤษฎีเกี่ยวกับสารหล่อลื่น [5]

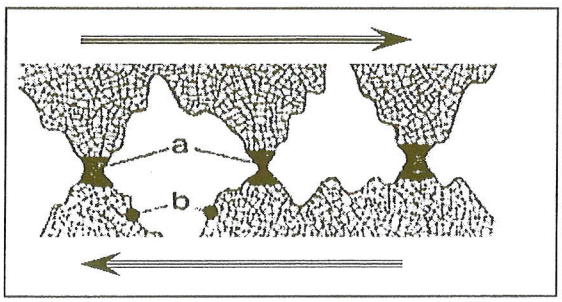
ประเภทของสารเพิ่มคุณภาพ	ชนิดของสารเคมี	ประโยชน์
1. สารต้านคุณภาพด้านเคมี 1.1 สารต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Anti-oxidants)	- ซิงก์ไดอัลคิลไดโธโอฟอสเฟส (Zincdialkndithiophosphate)(ZDDP) - บิทฟีนอล (Bis-Phenols) -อะโรแมติกเอมีน(AromaticAmines)	- ใช้กับน้ำมันหล่อลื่นในงานที่มีอุณหภูมิสูง และน้ำมันต้องสัมผัสกับอากาศ - ใช้ลดการเกิดยางเหนียวและตะกอนจากน้ำมัน
1.2 สารป้องกันสนิม (Anti-rust additives)	- สารประกอบประเภทเมทาลิกโซฟแบบมีขั้ว (Polar compounds such as metallicsoaps , esters , ethers) - กรดอินทรีย์ (Organic acid) - เอมีน (Amines)	- ใช้เพื่อป้องกันการเกิดสนิมในงานที่อาจมีความชื้นหรือน้ำเข้ามาสัมผัสกับผิวโลหะ
2. สารเพิ่มคุณภาพทางกายภาพ 2.1 สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (Viscosity-index improver)	- โพลีไอโซบิวทีล(Polyisobutylene) - เมทาครีเลต (Methacrylate) - อะครีเลตโคโพลีเมอร์	- ใช้ลดอัตราการเปลี่ยนแปลงความข้นใสตามอุณหภูมิของน้ำมัน ใช้ในน้ำมันชนิดมัลติเกรดหรือเกรดรวม

ตารางที่ 8. แสดงทฤษฎีเกี่ยวกับสารหล่อลื่น [5] (ต่อ)

ประเภทของสารเพิ่มคุณภาพ	ชนิดของสารเคมี	ประโยชน์
2.2 สารลดจุดไหลเท (Pour point depressants)	- เมทาคริเลตโพลีเมอร์ (Methacrylate polymers) - แวกซ์อัลคีเลตฟีนอล และ โพลีเมอร์ของแวกซ์อัลคีเลตฟีนอล	- ใช้ลดจุดแข็งของตัวน้ำมัน ซึ่งเกิดขึ้นเพราะไขมันในน้ำมันแยกตัวเป็นผลึก โดยป้องกันมิให้ไขเกาะตัวเป็นกลุ่มทำให้น้ำมันสามารถไหลได้ในอุณหภูมิต่ำ
2.3 สารเพิ่มความลื่น (Oiliness)	- น้ำมันหมู - กรดโอลิอิก (Oleic) - แทลโลว์ (Tallow) - สเปอร์มออยล์ (Sperm oil)	- ใช้เพิ่มความลื่นและเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มน้ำมัน และทำให้น้ำมันเข้ากับน้ำได้บ้าง
2.4 สารช่วยให้น้ำมันผสมเข้ากับน้ำ (Emulsifiers)	- เซอร์แฟกแทนต์ (Surfactant) - สบู่ที่ได้จากไขมันและกรดไขมัน - โซเดียมซัลโฟเนต - สารประกอบประเภทที่มีขั้ว	- ใช้ลดแรงตึงผิวระหว่างน้ำกับน้ำมัน ทำให้น้ำมันสามารถแขวนตัวเป็นเม็ดละเอียดในน้ำใช้สำหรับใส่ในน้ำมันสบู่

15.9 สารรับแรงกด(Extreme Pressure Additives (EP))

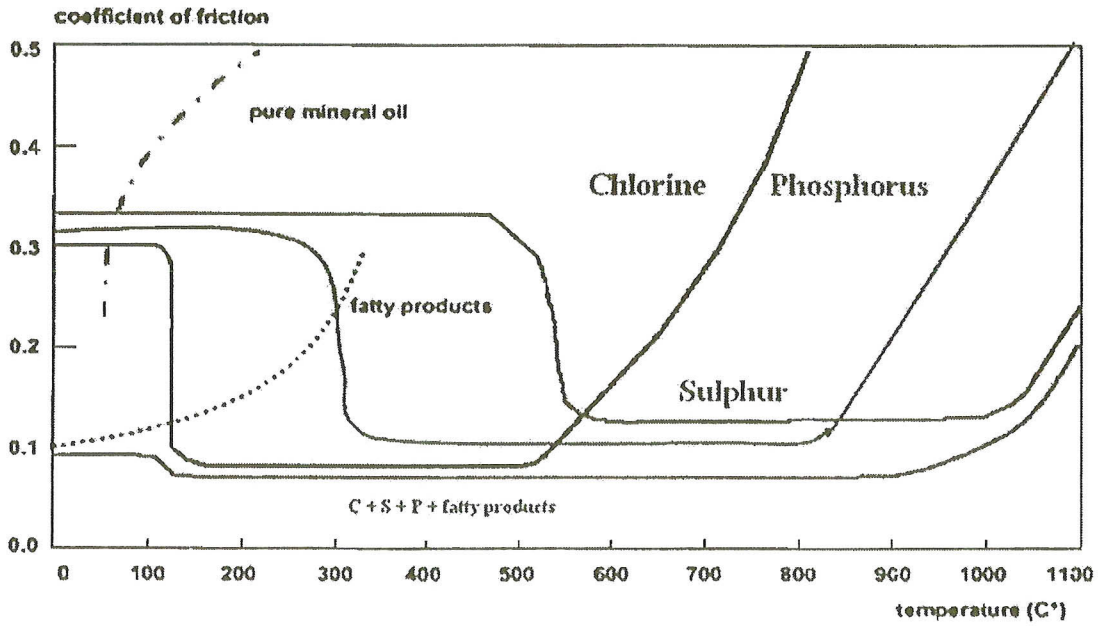
ผิวสัมผัสสองผิวที่มีสารหล่อลื่นอยู่ เมื่อมีแรงกดจะเกิดแรงกดและแรงเฉือนขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสของสารหล่อลื่น สารรับแรงกดจะเป็นตัวช่วยในการเพิ่มคุณภาพการรับแรงกดคือช่วยลดความเสียดทานและการสึกหรอภายใต้สภาวะความดันสูงมาก โดยจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับผิวโลหะทำให้เกิดชั้นฟิล์มเคลือบที่ผิวโลหะป้องกันการสัมผัสโดยตรงดังภาพที่ 22 สารรับแรงกดทั่วจะเป็นสารประกอบซัลเฟอร์ คลอลีน หรือฟอสฟอรัส ตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายๆตัวช่วยกันเพื่อให้เกิดผลสัมฤทธิ์ที่ดีที่สุดและทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเฉพาะจุดที่กำลังมีการขัดสีที่มีสารปรับปรุงแต่งที่เหมาะสมเท่านั้น ดังนั้นผลกระทบจากสารเคมีที่จะเข้าไปทำลายผิวสัมผัสจึงมีน้อยมาก



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ภาพที่ 22 แสดงโครงสร้างของชั้นฟิล์มป้องกันจากสารปรุงแต่ง(a. สารรับแรงกด(EP) b. เนื้อโลหะ)

สารรับแรงกด EP ที่รับภาระสูงๆประกอบด้วย คลอรีน กำมะถัน และฟอสฟอรัส โดยสารรับแรงกด EP แต่ละตัวจะเริ่มทำงานที่อุณหภูมิต่างกัน ดังภาพที่2.21 โดยคลอรีนจะเริ่มทำงานก่อนตามด้วย กำมะถัน และฟอสฟอรัสตามลำดับ ในการใช้งานอาจใช้สารรับแรงกด EP หลายตัวเข้ามาผสมเข้าด้วยกันเพื่อให้สารหล่อลื่นสามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น ในช่วงแรกในการทำงานที่อุณหภูมิต่ำสารรับแรงกด EP ยังไม่เริ่มทำงานจึงต้องมีการผสมกรดไขมันเข้าไปในสารหล่อลื่นเพื่อช่วยให้สามารถลดแรงเสียดทานในช่วงที่อุณหภูมิต่ำ

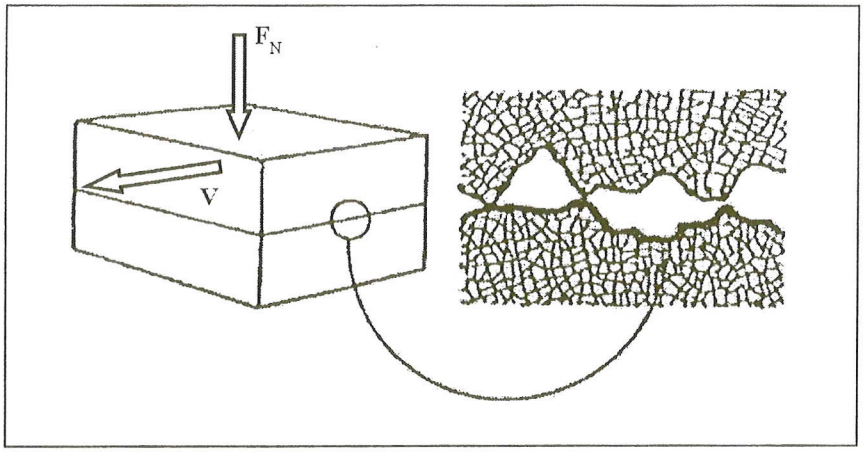


ภาพที่ 23 แสดงช่วงอุณภูมิของการทำงานของสารรับแรงกด

16 ขอบเขตการหล่อลื่น

16.1 สภาวะไร้สารหล่อลื่น(Non Lubricant)

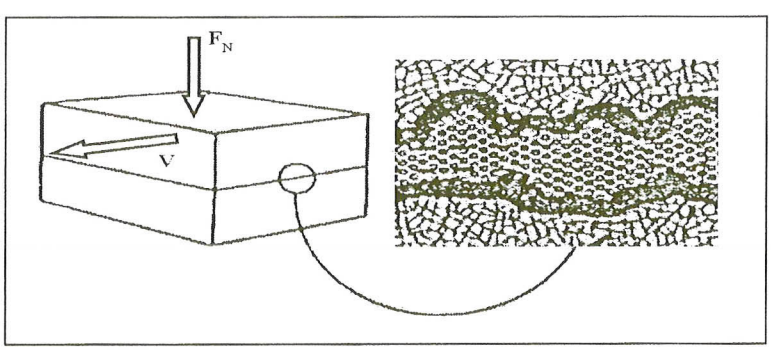
ในสภาวะการหล่อลื่นแบบนี้ผิวสัมผัสของคู่วัสดุจะสัมผัสกันโดยตรงและมีผลทำให้เกิดการเสียหาย หรือการสึกหรออย่างรุนแรงบนผิวหน้าของคู่สัมผัส ความเรียบจะมีอิทธิพลมากในการหล่อลื่นซึ่งคู่สัมผัสจะเป็นตัวหล่อลื่นเอง



ภาพที่ 24 แสดงสภาวะไร้สารหล่อลื่น

16.2 การหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ (Full Film Lubricant)

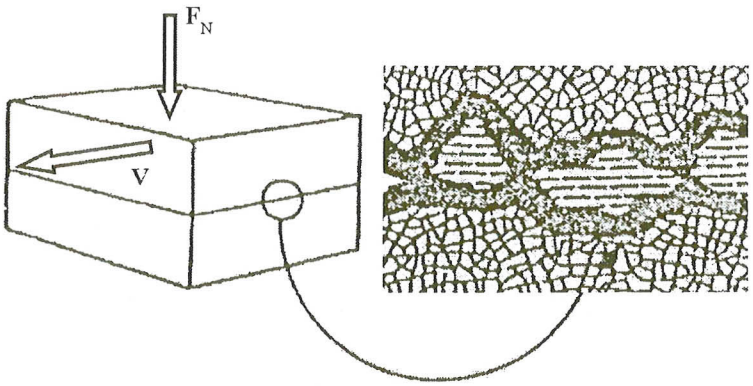
เป็นขอบเขตที่มีการใช้สารหล่อลื่นที่ทำให้เกิดฟิล์มน้ำมันหนาพอที่จะแยกผิวคู่วัสดุที่มีการเคลื่อนที่ให้แยกออกจากกันได้โดยสิ้นเชิงสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จะขึ้นอยู่กับค่าของสัมประสิทธิ์การเสียดทานของชั้นสารหล่อลื่น ซึ่งขึ้นกับค่าความหนืดของสารหล่อลื่นนั้นเพียงอย่างเดียวไม่ขึ้นอยู่กับความเรียบผิวแม่พิมพ์และความเรียบของผิวชิ้นงาน ภายใต้สภาวะการหล่อลื่นในแบบสมบูรณ์นั้นแรงกระทำในแนวดิ่งถูกรองรับโดยสารหล่อลื่นโดยตรงผิวคู่สัมผัสที่มีการเคลื่อนที่จะถูกแยกออกจากกันโดยสิ้นเชิงด้วยตัวของสารหล่อลื่น



ภาพที่ 25 แสดงการหล่อลื่นแบบสมบูรณ์

16.3 การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์ (Mixed Film Lubricant)

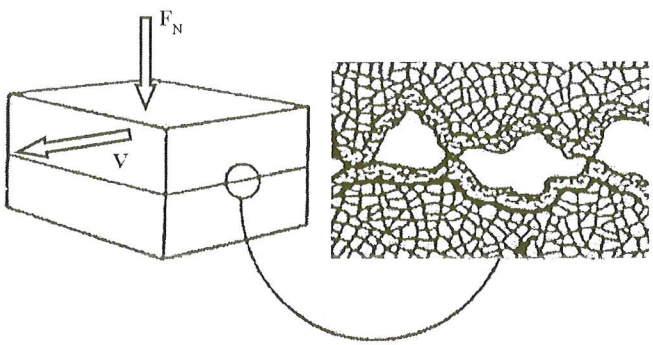
ภายใต้การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์นี้ผิวสัมผัสที่ลื่นไถลไปจะมีฟิล์มน้ำมันแยกเนื้อวัสดุออกได้เพียงบางส่วนที่ยอดผิวของเนื้อวัสดุ (Asperities) จะสัมผัสกันโดยตรง ผลที่เกิดขึ้น คือแรงกระทำในแนวดิ่งบางส่วนจะถูกรองรับไว้โดยแรงดันของฟิล์มน้ำมัน แต่ยังมีแรงกระทำที่เกิดขึ้นอีกบางส่วนที่รองรับโดยผิวเนื้อวัสดุ



ภาพที่ 26 แสดงการหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์

16.4 การหล่อลื่นแบบบาวน์ดาวรี่ (Boundary Lubricant)

ในลักษณะนี้ผิวคู่สัมผัสโดยส่วนใหญ่จะถูกปกคลุมด้วยชั้นผิวหน้าของวัสดุที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีหรือ การดูดกลืนอะตอม (Atomic absorption) ดังนั้นในระหว่างการขัดสี (ลื่นไถล) ในการใช้งานชั้นผิวเหล่านี้จะถูกขัดสีแทนเนื้อวัสดุเนื่องจากค่าความต้านทานต่อการเฉือนตัวที่ต่ำกว่าเนื้อคู่สัมผัส จึงทำให้ชั้นผิวหน้าเหล่านี้สึกหรอออกไปก่อนและจะตามด้วยชั้นผิวใหม่ที่อาจจะเกิดจากปฏิกิริยาหรือการดูดกลืนอะตอมขึ้นมาทดแทนผิวหน้าเดิมไปเป็นระยะๆการใช้สารหล่อลื่นไม่เพียงแต่ช่วยทำให้เกิดผิวชั้นเหล่านี้ขึ้นมาใหม่แต่ยังจะทำให้มีการปิดหรืออุดบริวณที่เป็นร่องหลุมบนผิวด้านในของคู่สัมผัสได้อีกด้วย



ภาพที่ 27 แสดงการหล่อลื่นแบบบาวน์ดาวรี่

17. ทฤษฎีเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่น [5]

ความเสียดทานเป็นแรงด้านทางการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างผิว 2 ผิว ลักษณะของการเคลื่อนที่อาจจะเป็นการเลื่อนไถล (sliding) ของผิวหนึ่งไปบนอีกผิวหนึ่ง ซึ่งอาจจะสัมผัสกันโดยตรงหรือมีของเหลวหรือฟิล์มคั่นอยู่ระหว่างผิวที่มีการเคลื่อนที่ปัญหาสำคัญของความเสียดทานคือ ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานจึงมีความสำคัญในวิทยาการสมัยใหม่ ขนาดหรือระดับของค่าความเสียดทานทั่วไปใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เป็นตัววัดโดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.6

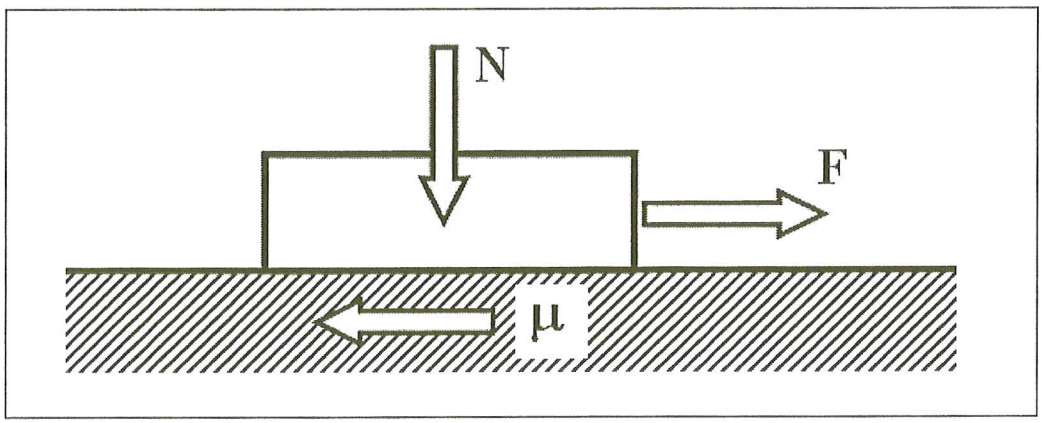
$$\mu = F/N \qquad (2.6)$$

เมื่อ

μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

F คือ แรงดึงเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่

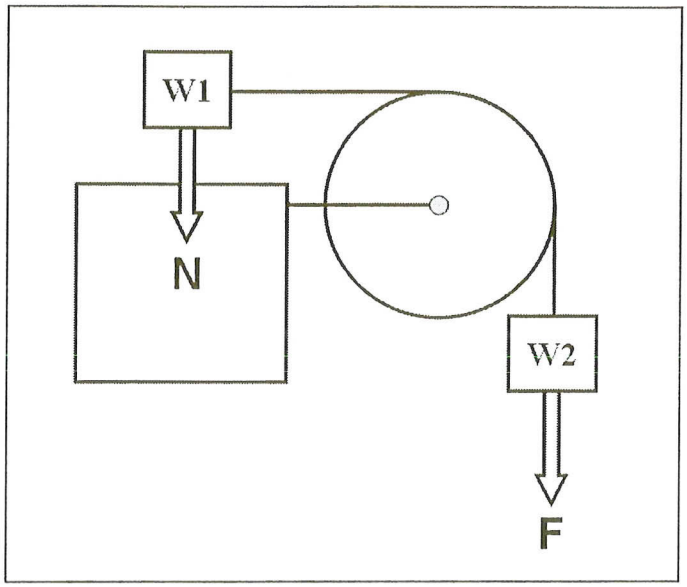
N คือ แรงตั้งฉากหรือแรงกดวัตถุ



ภาพที่ 28 แสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน [5]

17.1 การวัดค่าความเสียดทาน

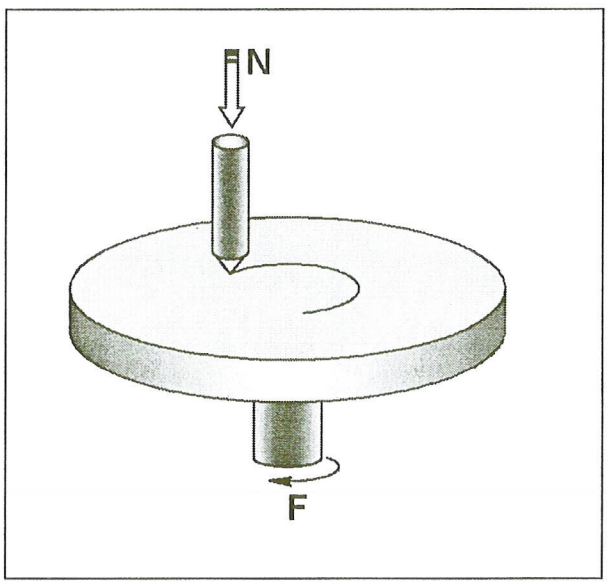
การวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเกี่ยวข้องกับการวัดแรง 2 ส่วน คือ F แรงที่ทำให้เริ่มหรือรักษาสภาวะการเคลื่อนที่สัมพันธ์ และ N แรงตั้งฉากหรือแรงที่ทำให้ผิว 2 ผิว ยึดติดกันดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 แสดงการวัดค่าความเสียดทานโดยดึงวัตถุผ่านรอก [5]

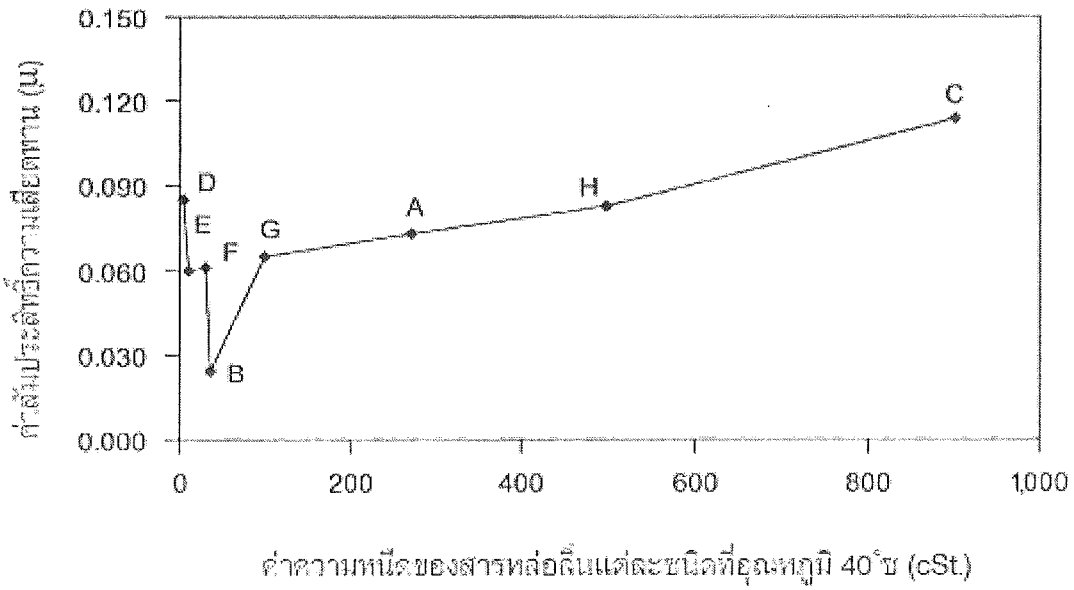
การวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอย่างง่ายทำได้ตามรูป โดยใช้แรงจากตุ้มน้ำหนัก W2 ดึงตุ้มน้ำหนัก W1 ผ่านรอก เพิ่มแรง F จนกระทั่งตุ้มน้ำหนัก W1 เกิดการเคลื่อนที่ ค่าที่ได้จากการคำนวณจะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ($\mu = Fs/N$)

ตัวอย่างเครื่องมือวัดความเสียดทานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ (Ball-on-disk) หมุดยึดโดยคานที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรง เคลื่อนที่สัมพันธ์บนจาน (disk) ที่หมุนโดยมอเตอร์ ดังรูปเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ง่ายและได้ผลความเสียดทานที่รวดเร็ว



ภาพที่ 30 แสดงหลักการทำงานของ Ball-on-disk [5]

การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ) ของสารหล่อลื่น ด้วยวิธีบอลบนแผ่นจานหมุน (Ball on disk) โดยการทดสอบมีสภาวะเงื่อนไขที่ใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานจริง จึงสามารถนำผลการทดสอบนี้ไปวิเคราะห์หาแนวโน้ม และอ้างอิงค่าสภาวะการทำงานจริงได้ ซึ่งในการวิเคราะห์ผลการทดลองจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมการเกิดความเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะทำการดัดขึ้นรูป ซึ่งในการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานนั้นจะทำการทดสอบโดยใช้เครื่องไตรโบมิเตอร์ การทดสอบเลือกใช้วิธีบอลบนจานหมุน (Ball-on-disk) เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ) ระหว่างบอลที่เป็นวัสดุ SKD 11 และจานหมุนวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด AISI 304 กับน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดต่างกันดังนั้นเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์จึงต้องใช้แรงที่มากพอในการเอาชนะแรงยึดติดแยกสองผิวออกจากกัน เนื่องจากโอกาสในการแทรกตัวเข้าไปที่หน้าสัมผัสระหว่างบอลและจานหมุนเกิดได้ยาก ส่งผลให้โอกาสในการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างบอลและจานหมุนเกิดง่ายขึ้นเมื่อนำผลดังกล่าวมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับค่าความหนืดของสารหล่อ โดยจะพบว่าเมื่อสารหล่อลื่นมีค่าความหนืดมากเกินไปจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีแนวโน้มสูงตามไปด้วย



ภาพที่ 31 แสดงอิทธิพลความหนืดของสารหล่อลื่นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน [5]