บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการตัด (Machining process) [6]

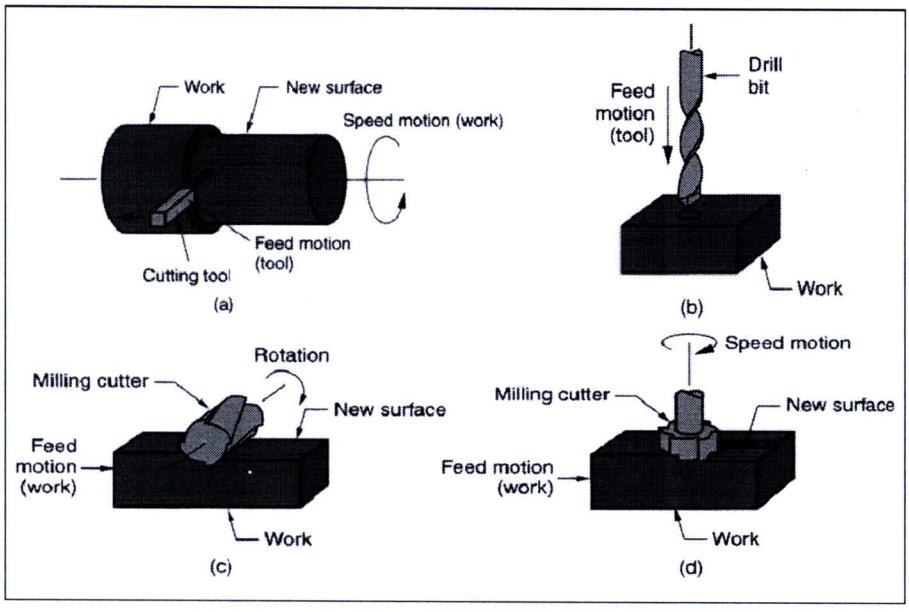
กระบวนการตัด หมายถึง การใช้เครื่องมือตัดเพื่อกำจัดส่วนเกินของเนื้อวัสดุเพื่อให้ได้ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานตามที่ต้องการ กระบวนการตัดเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญทั้งเชิงพาณิชย์และเทคโนโลยี

ข้อดี

1) ใช้ได้กับวัสดุหลายประเภท
2) สร้างชิ้นงานขนาดและรูปร่างต่างๆ
3) มีความแม่นยำสูง
4) ผิวชิ้นงานสุดท้ายมีคุณภาพดี

ข้อเสีย

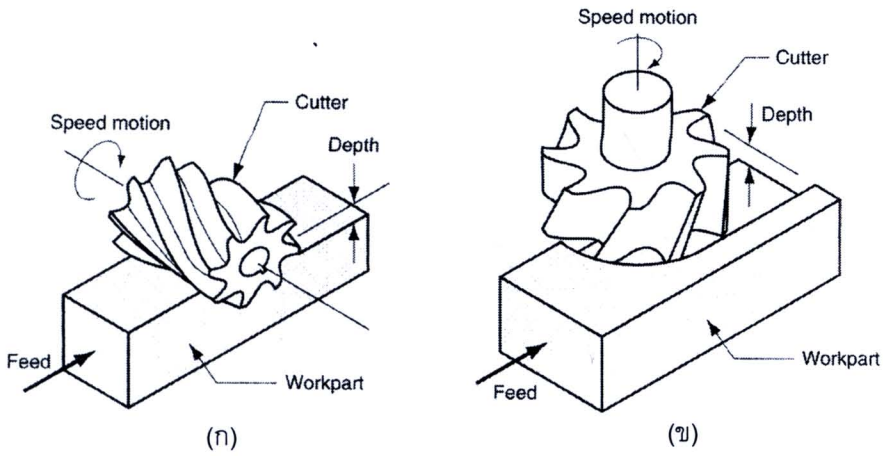
1) มีเศษวัสดุที่ต้องทิ้งมาก
2) ใช้เวลาในการตัดนาน



รูปที่ 2.1 กระบวนการตัดต่าง ๆ ที่เป็นพื้นฐานสำคัญ

2.1.1 ชนิดของกระบวนการกัด

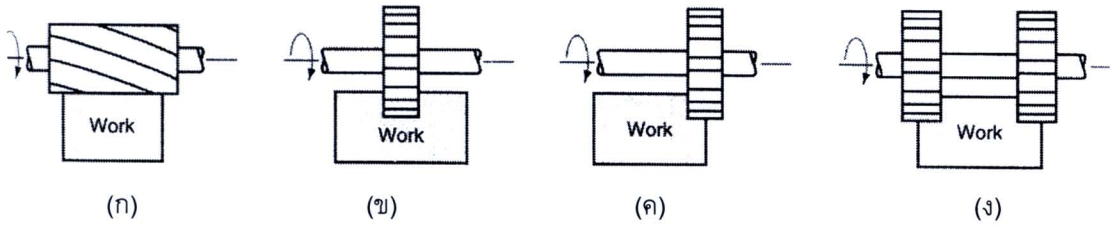
ประกอบด้วย 2 ลักษณะ คือ การกัดแนวราบ และการกัดแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ชนิดของกระบวนการกัด ก) การกัดแนวราบ ข) การกัดแนวตั้ง

การกัดแนวราบ (Peripheral milling or plain milling) คือ การกัดที่มีแกนหมุนขนานกับพื้นผิวชิ้นงาน และบริเวณตัด คือ ส่วนเส้นรอบวงของมีดตัด แบ่งออกเป็น

- Slab milling การกัดแนวราบที่มีดตัดกว้างกว่าชิ้นงานทั้งสองด้าน
- Slot milling การกัดแนวราบที่มีดตัดแคบกว่าชิ้นงาน ทำให้เกิดเป็นช่อง (Slot)
- Side milling การกัดแนวราบที่มีดตัดตัดด้านข้างของชิ้นงาน
- Straddle milling เหมือนกับการกัดด้านข้างแต่กระทำกับทั้งสองด้าน

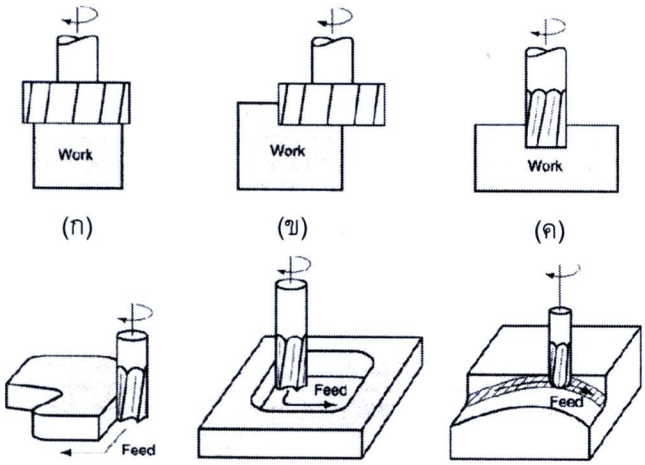


รูปที่ 2.3 รูปแบบของการกัดแนวราบ (ก) Slab milling (ข) Slot milling (ค) Side milling (ง) Straddle milling

การกัดแนวตั้ง (Face milling or end milling) คือ การกัดที่มีแกนหมุนตั้งฉากกับพื้นผิวชิ้นงาน และกระบวนการกัดเกิดขึ้นบริเวณเส้นรอบวงของมีดตัด แบ่งออกเป็น

- Conventional face milling การกัดแนวตั้งที่มีดตัดมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าความกว้างชิ้นงาน
- Partial face milling การกัดแนวตั้งที่กระทำกับชิ้นงานเพียงด้านเดียว

- End milling การกัดแนวตั้งที่มีดตัดมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าผิวชิ้นงาน
- Profile milling การกัดแนวตั้งที่มีดตัดกระทำต่อขอบด้านนอกของชิ้นงาน
- Pocket milling การกัดแนวตั้งที่มีดตัดเจาะรูและกัดชิ้นงานให้เรียบ
- Surface contouring การกัดแนวตั้งด้วยมีดตัดหัวบอลกระทำผิวเกิดเป็นส่วนโค้งสามมิติ

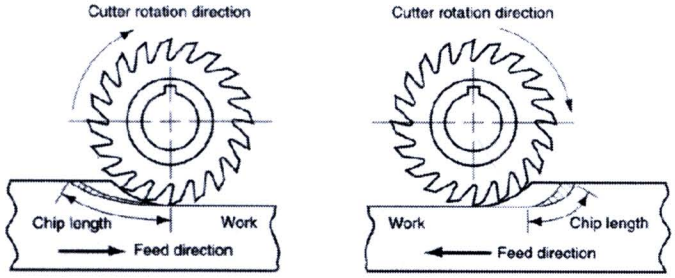


(ก) (ข) (ค) (ง) (จ) (ฉ)

รูปที่ 2.4 รูปแบบของการกัดแนวตั้ง (ก) Conventional face milling (ข) Partial face milling (ค) End milling (ง) Profile milling (จ) Pocket milling (ฉ) Surface contouring

2.1.2 ทิศทางการกัด

1) Up milling (Conventional milling): ทิศทางมีดตัดตรงข้ามกับทิศทางป้อนตัด ซึ่งจะทำให้เกิดเศษโลหะลักษณะบางไปหนา ผิวชิ้นงานขรุขระน้อยกว่าการกัดลง
2) Down milling (Climb milling): ทิศทางมีดตัดไปทางเดียวกับทิศทางป้อนตัดซึ่งจะทำให้เกิดเศษโลหะลักษณะหนาไปบาง มีความยาวน้อยกว่าการกัดขึ้น

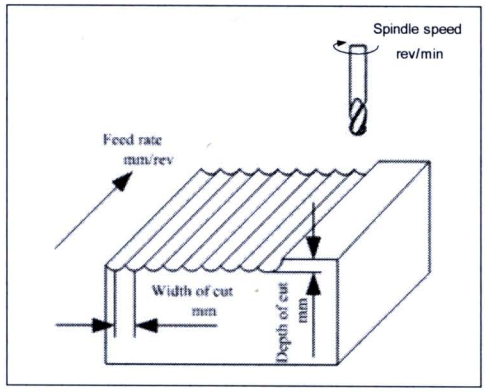


(ก) (ข)

รูปที่ 2.5 ทิศทางการกัด (ก) Up milling (ข) Down milling **[6]**

2.2 เงื่อนไขการตัด (Cutting conditions) ในกระบวนการกัด

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการตัดจะประกอบด้วยปัจจัยต่างๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการสำหรับงานวิจัยนี้



รูปที่ 2.6 การตัดในกระบวนการกัด

1) ความเร็วการตัด (Cutting speed, v) คำนวณได้จาก

$$v = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \tag{2.1}$$

หน่วย มิลลิเมตรต่อนาที

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)

N คือ ความเร็วรอบในการตัด (รอบต่อนาที)

2) ความเร็วรอบในการตัด (Spindle rotation speed, N) คำนวณได้จาก

$$N = \frac{1000v}{\pi \times D} \tag{2.2}$$

หน่วย รอบต่อนาที

เมื่อ v คือ ความเร็วในการตัด (มิลลิเมตรต่อนาที)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)

3) อัตราป้อน (Feed rate, f_r) คำนวณได้จาก

$$f_r = N \times n_t \times f \tag{2.3}$$

หน่วย มิลลิเมตรต่อนาที

เมื่อ N คือ ความเร็วรอบในการตัด (รอบต่อนาที)

n_t คือ จำนวนฟันของมีดตัด

f คือ การป้อนกัดต่อฟัน (Chip load) (มิลลิเมตรต่อฟัน)

4) อัตราการกำจัดเนื้อโลหะในกระบวนการกัด (R_{MR}) แบบ Slab milling ดังรูปที่ 2.7 คำนวณได้จาก

$$R_{MR} = w \times d \times f_r \tag{2.4}$$

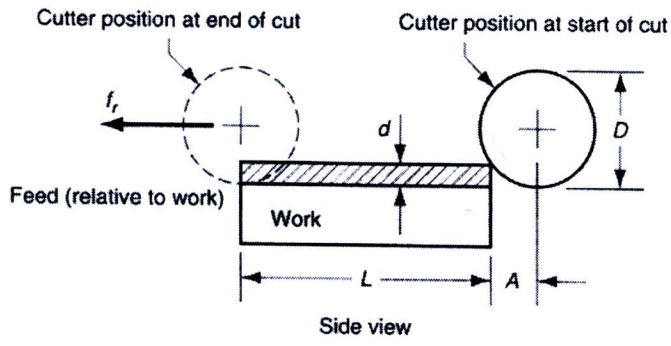
หน่วย ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที

เมื่อ w คือ ความกว้างของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

d คือ ความลึกในการกัด (มิลลิเมตร)

f_r คือ อัตราป้อน (Feed rate) (มิลลิเมตรต่อนาที)

สมการที่ 2.4 สามารถปรับใช้กับ end milling, side milling, face milling และการกัดแบบอื่น โดยการคำนวณพื้นผิวการตัด



รูปที่ 2.7 การกัดแบบ Slab milling

5) เวลาในการกัด (T_m)

1) สำหรับ Slab milling ต้องคำนวณระยะทางเข้าตัด (A) ที่จะเข้าถึงความลึกมีดทั้งหมดจากสมการ

$$A = \sqrt{d(D-d)} \tag{2.5}$$

หน่วย มิลลิเมตร

เมื่อ d คือ ความลึกในการตัด (มิลลิเมตร)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)

สามารถคำนวณเวลาที่ใช้ในการตัด (T_m) ได้จาก

$$T_m = \frac{L+A}{f_r} \tag{2.6}$$

หน่วย นาที

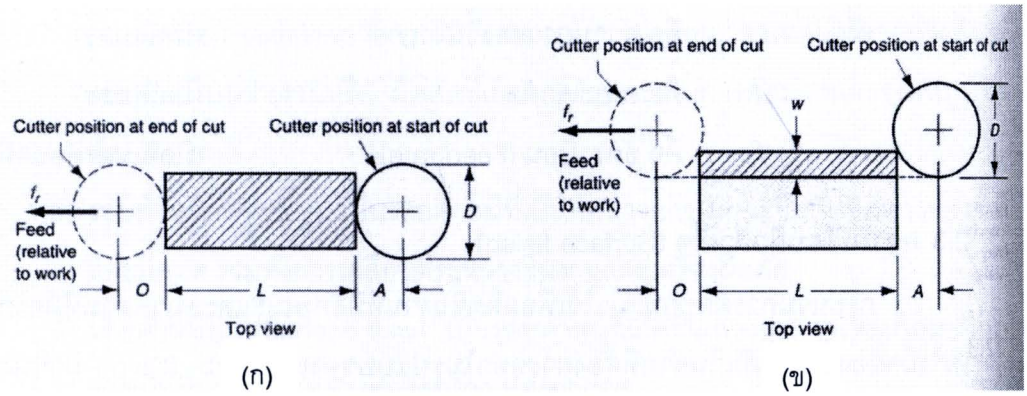
เมื่อ L คือ ความยาวของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

A คือ ระนะเข้าตัด (มิลลิเมตร)

f_r คือ อัตราป้อน (Feed rate) (มิลลิเมตรต่อนาที)

2) สำหรับการตัดแนวตั้ง หรือการกัดผิวหน้า (Face milling) แยกได้เป็นสองกรณี ดังรูปที่ 2.8

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย



รูปที่ 2.8 การคำนวณเวลาในการตัด (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 2

กรณีที่ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางหรือขนาดของมีดตัดโตกว่าชิ้นงาน (ระยะ A และ O มีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด) นั่นคือ

$$A = O = \frac{D}{2} \tag{2.7}$$

หน่วย นาที

เมื่อ D คือ ผ่านศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)

กรณีที่ 2 เมื่อมีดตัดอยู่ในตำแหน่งที่เกินออกมาจากด้านหนึ่ง และตัดชิ้นงานลึกเข้าไป (w) จะคำนวณระยะเข้า และออกของการตัดได้จาก

$$A = O = \sqrt{w(D-w)} \tag{2.8}$$

หน่วย นาที

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)

w คือ ความกว้างการตัดชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

สามารถคำนวณเวลาที่ใช้ในการตัด (T_m) ของทั้ง 2 กรณีได้จาก

$$T_m = \frac{L+2A}{f_r} \tag{2.9}$$

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 25 ก.ย. 2555
เลขทะเบียน 246357
เลขเรียกหนังสือ

หน่วย นาที

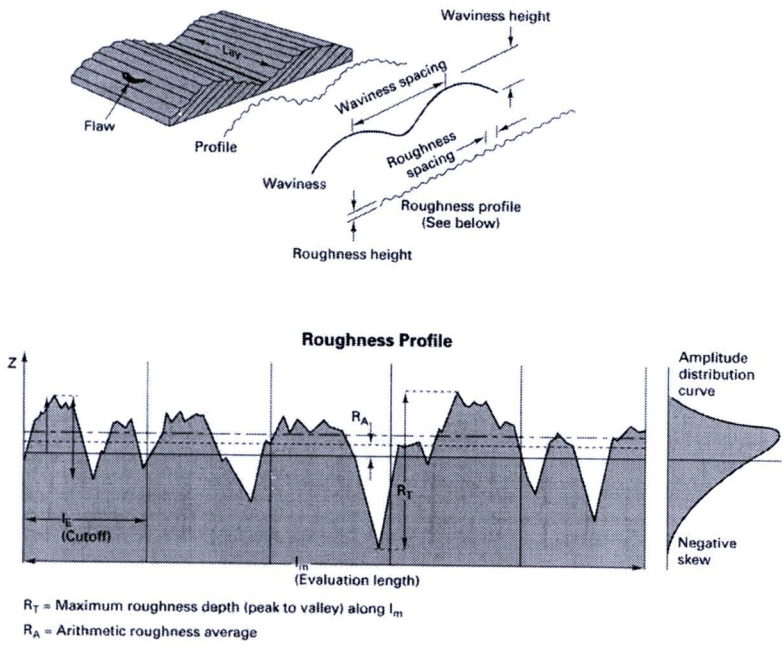
เมื่อ L คือ ความยาวของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

A คือ ระยะเข้าตัด (มิลลิเมตร)

f_r คือ อัตราป้อน (Feed rate) (มิลลิเมตรต่อนาที)

2.3 **ความเรียบผิวสำเร็จ** (Surface finish)

กระบวนการตัดถูกนำมาใช้เพื่อผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะและขนาดตามที่ต้องการ โดยการเอาเนื้อของชิ้นงานที่เกินจากที่ต้องการออกในรูปแบบของเศษโลหะ (Chip) ผิวชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ลักษณะของผิวสำเร็จจะแสดงในรูปของคุณสมบัติที่จะกล่าวดังต่อไปนี้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 รายละเอียดของผิวชิ้นงาน

ลักษณะของความเรียบผิว (Surface finish) จะแสดงในรูปของคุณสมบัติของผิวชิ้นงานที่จะกล่าวดังต่อไปนี้

1) ความขรุขระ (Roughness): จะประกอบไปด้วยช่องว่างขนาดเล็กและละเอียดที่ชิดกันหลายๆช่อง สาเหตุหลักเกิดจากรอยที่เหลือไว้จากการทำตำหนิด้วยเครื่องมือตัด ความสูงเฉลี่ยหรือความลึกเฉลี่ยถูกวัดโดยกำหนดช่วงความยาวหนึ่งเรียกว่า “cutoff length” หรือ “roughness sampling length”

2) รอยคลื่น (Waviness): ประกอบไปด้วยรอยขรุขระบนชิ้นงานซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า "roughness sampling length" (ประมาณ 1 ไมครอน) สาเหตุเกิดจากการสั่นหรือมีรอยตำหนิบนชิ้นงานหรือ มีดตัดที่เกิดจากรับภาระในการตัดมากและอุณหภูมิในการตัด

3) รอยตำหนิยาว (Lay): เป็นรอยตำหนิที่เป็นทิศทางยาว มักจะขึ้นกับทิศทางของชิ้นงานและมีดตัด รวมทั้งการเคลื่อนที่ระหว่างชิ้นงานและเครื่องมือตัด

4) รอยตำหนิสุ่ม (Surface flaw): เป็นรอยตำหนิที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม สาเหตุเกิดมาจากรอยตำหนิที่มีมาแต่แรกแล้ว เช่นรอยร้าว ฟองอากาศ

5) ความเรียบผิว (Surface finish) มีความสำคัญต่อการสวมประกอบและการจัดวางของชิ้นงาน การสวมประกอบและการจัดวางต่างๆจะเกิดขึ้นได้ก็ต้องอาศัยการทาสีหรือทำตำหนิเข้าช่วย บางทีก็ใช้เป็นลักษณะก๊าซหรือของไหลไหลผ่าน บางทีก็ใช้สายตาดูโดยอาศัยความมันวาวของชิ้นงาน บางทีก็ใช้แสงที่มีคุณสมบัติการสะท้อนได้สูง

ความเรียบผิวสำเร็จมีผลมาจากพารามิเตอร์ในการตัดหลายอย่างซึ่งรวมถึงรูปทรงของมีดตัด รูปทรงของชิ้นงาน ความแข็งแรงของเครื่องจักร วัสดุชิ้นงาน ปัจจัยในการตัด และวัสดุมีดตัด โดยทั่วไปแล้ว ค่าความหยาบผิวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนตัดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดได้ ซึ่งค่าความหยาบผิว (R_i) ทางทฤษฎีสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$R_i = \frac{0.125 f^2}{\frac{D}{2} \pm \frac{f \times n}{\pi}} \qquad (2.10)$$

หน่วย มิลลิเมตร

เมื่อ f คือ อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/ฟัน)

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)

n คือ จำนวนฟันของดอกกัด

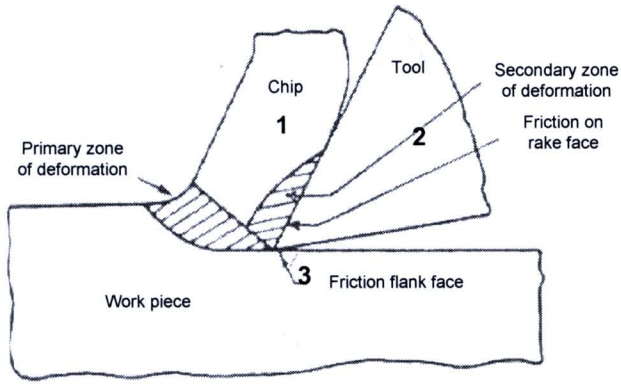
โดย เครื่องหมาย + หมายถึงการกัดแบบ Up milling

เครื่องหมาย - หมายถึงการกัดแบบ Down milling

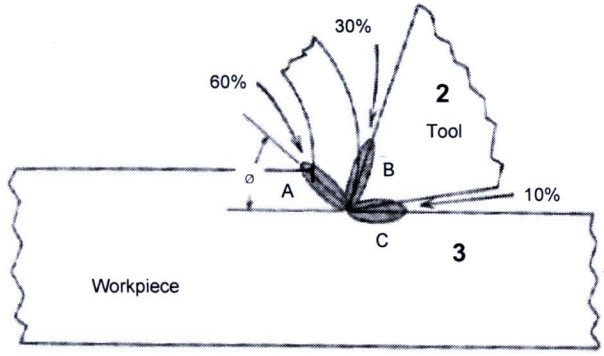
2.4 **ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการตัด** (Cutting temperature) [7,8]

กระบวนการตัดโลหะจะทำให้บริเวณการตัดที่ 1 และ 2 เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) ผลกระทบจากการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะทำให้เกิดความร้อนบริเวณ

การตัดที่ 2 เป็นการเสียดสีของเศษโลหะบนผิวคายของมีดตัด ส่วนบริเวณการตัดที่ 3 คือการเสียดสีระหว่างชิ้นงานกับผิวหลบ แหล่งที่มาของความร้อนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 บริเวณที่เกิดความร้อนขณะตัด



รูปที่ 2.11 สัดส่วนความร้อนที่เกิดขณะตัด

จากพลังงานที่ใช้ไปในกระบวนการตัดโลหะพบว่า 60% จะถูกใช้ในการเปลี่ยนรูปบริเวณการตัดลำดับที่ 1 และการตัดลำดับที่ 2 อีก 30% จะเสียพลังงานไปในรูปแรงเสียดทานที่เกิดบนผิวคาย อีก 10% จะเสียรูปในรูปแรงเสียดทานที่เกิดบนผิวหลบ

2.5 **การสึกหรอของมีดตัด** (Tool wear)

ในการตัดชิ้นงาน มีดตัดจะต้องทนต่อแรงและอุณหภูมิที่สูงในระหว่างการตัด ถ้าแรงในการตัดมากเกินไปจะทำให้มีดตัดหักได้ หรือถ้าอุณหภูมิตัดสูงเกินไปก็จะทำให้มีดตัดอ่อนและเสื่อมได้เร็วเช่นเดียวกัน เทคโนโลยีด้านมีดตัดจะให้ความสำคัญกับประเด็นหลัก 2 ประการคือ เรื่องวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดและรูปร่างของมีดตัด ทั้งนี้ก็เพื่อทำให้อายุการใช้งานของมีดตัดนานขึ้น ใน

ด้านวัสดุของมีดตัดนั้นจะเกี่ยวข้องกับการพัฒนาวัสดุที่สามารถทนทานต่อแรง อุณหภูมิ และการสึกหรอในกระบวนการตัด ส่วนในด้านรูปทรงของเครื่องมือตัดจะพัฒนาเกี่ยวกับการหารูปทรงที่เหมาะสมของมีดตัดสำหรับวัสดุของมีดตัด และสำหรับกระบวนการตัดความเสียหายของมีดตัดเกิดขึ้นได้ด้วยสาเหตุหลัก 3 อย่าง ดังตารางที่ 2.1 โดยทั่วไปแล้ว การสึกหรอของมีดตัดจะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป (Gradual wear) ซึ่งกลไกต่างๆที่ทำให้เกิดการสึกหรอบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับเศษกลึงโลหะ และบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานในระหว่างการตัด

ตารางที่ 2.1 รูปแบบการชำรุดของมีดตัด [1,6]

รูปแบบการชำรุด	สาเหตุ	ผลลัพธ์
1. Fracture failure	แรงในการตัดมากเกินไป	เครื่องมือตัดแตกทันที
2. Temperature failure	อุณหภูมิในการตัดสูง	เครื่องมือตัดจะอ่อนและเสียรูป จนทำให้ความคมของมีดตัดลดลง
3. Gradual wear	เกิดการสึกหรอของคมตัด	เนื้อมีดตัดจะหายไปบางส่วน ทำให้ประสิทธิภาพในการตัดลดลง เกิดการสึกหรออย่างรวดเร็วสุดท้ายแล้วความเสียหายก็จะคล้ายกับความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิ

กลไกต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการสึกหรอบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับเศษโลหะ และบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานในระหว่างการตัด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งกลไกการสึกหรอทั้ง 5 แบบจะเกิดได้เร็วยิ่งขึ้นในสภาวะที่ใช้ความเร็วในการตัดสูง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลไกการสึกหรอแบบ Diffusion และ Chemical reaction จะยิ่งเกิดง่ายที่อุณหภูมิสูง

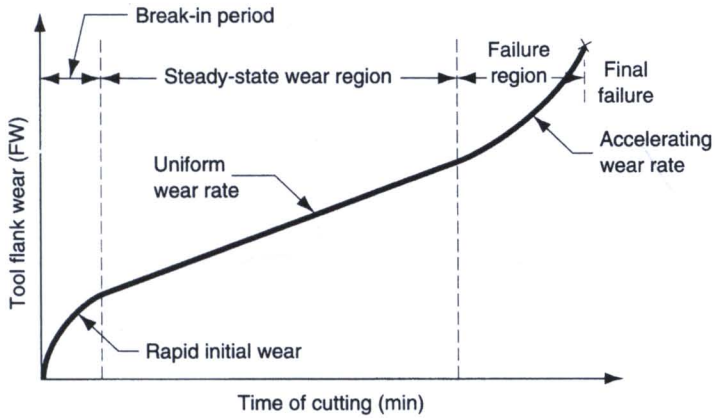
ตารางที่ 2.2 กลไกการสึกหรอของมีดตัด [6]

กลไก	สาเหตุ	ผล
Abrasion	อนุภาคที่แข็งของชิ้นงานจะทำให้บางส่วนเครื่องมือตัดค่อย ๆ หลุดติดออกมา	ทำให้เกิดรอยสึกหรอบนผิวหลบและผิวคาย
Adhesion	โลหะสองอย่างถูกทำให้ติดกันภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่สูง	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวคาย
Diffusion	เกิดการแลกอะตอมกันระหว่างผิวหน้าของวัสดุ 2 ชนิด อะตอมของมีดตัดจะหายไป ความแข็งลดลง ทำให้ง่ายต่อการเกิดกลไก Abrasion และ Adhesion	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวคาย
Chemical reaction	ความเร็วตัดสูงและอุณหภูมิที่สูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น ทำให้เครื่องมือตัดอ่อนลง	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวคาย
Plastic deformation	เกิดอุณหภูมิที่สูงบริเวณคมตัด คมตัดจะเริ่มเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ทำให้ง่ายต่อการเกิดกลไก Abrasion	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวหลบ

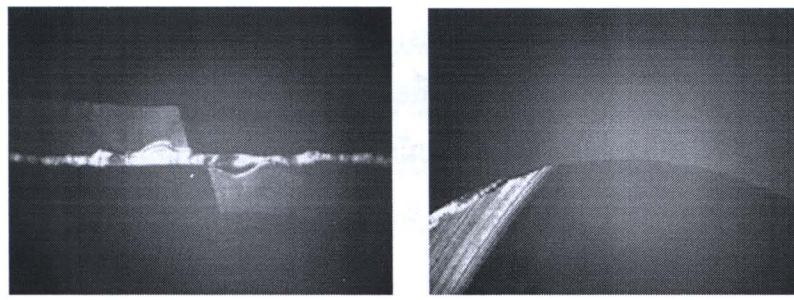
2.6 **อายุของมีดตัด** (Tool life) [2,3,6]

อายุเครื่องมือตัด หมายถึง เวลาตัดโดยนับจากเครื่องมือเริ่มต้นใช้งานโดยที่เครื่องมือตัดไม่เคยใช้งานมาก่อนบนชิ้นงานชนิดเดียวและในสภาวะเดียวกัน จนกระทั่งไม่สามารถใช้เครื่องมือตัดนั้นต่อไปได้ ในขณะที่กำลังทำการตัดจะเกิดกลไกการสึกหรอต่างๆ บนมีดตัด ซึ่งจะมีอัตราที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอของมีดตัดกับระยะเวลาที่ใช้ในการตัดแสดงดังรูปที่ 2.12 ซึ่งความสัมพันธ์ในรูปจะแสดงถึงรอยสึกหรอบนผิวหลบ (Frank wear) ดังรูปที่ 2.13 ส่วนรอยสึกหรอบนผิวคาย (Crater wear) ดังรูปที่ 2.13 ก็จะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกัน

ในกระบวนการตัดจะพบว่าการที่จะใช้เครื่องมือตัดไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเสียหาย แล้วค่อยนำกลับมาลับคมตัดใหม่เป็นสิ่งที่ไม่สมควรทำ เพราะถ้ามีดตัดแตกแล้วการลับคมตัดให้คมเหมือนเดิมจะทำได้ยากกว่าปกติ และคุณภาพของชิ้นงานก็จะออกมาไม่ดีด้วย



รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยสึกหรอบนผิวคายและเวลาที่ใช้ในการตัด



(ก) (ข)

รูปที่ 2.13 ลักษณะการสึกหรอของมีดกัด (ก) รอยสึกหรอบนผิวหลบ (Frank wear) (ข) รอยสึกหรอบนผิวคาย (Crater wear)

2.7 **วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด** (Cutting material)

2.7.1 **เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมปานกลาง** (Carbon and medium-alloy steels)

เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุที่เก่าแก่ที่สุดและใช้มากในงานเจาะ ต๊าป (Tapping) มีดตัดที่ทำจากเหล็กกล้าผสมปานกลางจะมีอายุมีดตัดจะนานกว่า ถึงแม้ว่าวัสดุนี้จะมีราคาถูก แล้วลับให้คมได้ง่าย แต่ว่าความแข็งและการทนต่อการสึกหรอต่ำสำหรับการตัดที่ความเร็วสูง มีดตัดชนิดนี้จึงใช้กับงานตัดที่ความเร็วรอบต่ำ

2.7.2 **เหล็กกล้ารอบสูง** (High-speed steels)

ใช้มากในงานตัดความเร็วรอบสูง ทนต่อการสึกหรอ และราคาไม่แพงมากเมื่อเทียบกับคุณสมบัติของมีดตัด เนื่องจากวัสดุประเภทนี้ทนต่อแรงกระแทกและการแตกหัก ดังนั้นจึงมักใช้ในงานตัดที่มีการสั่นสะเทือนได้ดี

2.7.3 **โคบอลต์หล่อผสม** (Cast-cobalt alloys)

มีความแข็งสูง (58-64 HRC) ทนต่อการสึกหรอได้ดี มีความแข็งสูงแม้ว่าอุณหภูมิใช้งานจะสูงตาม วัสดุนี้ทนแรงกระแทกได้น้อย จึงไม่เหมาะจะใช้กับงานตัดรอบสูง ส่วนใหญ่ใช้กับงานตัดหยาบ

2.7.4 **คาร์ไบด์** (Cemented or sintered carbide)

มีความแข็งสูงทุกๆอุณหภูมิ โมดูลัสความยืดหยุ่นและนำความร้อนสูง แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ คือ ทังสเตนคาร์ไบด์และไทเทเนียมคาร์ไบด์ การผสมโคบอลต์จะช่วยทำให้รับแรงกระแทกได้ดี แต่จะลดความแข็งและการทนต่อการสึกหรอ สามารถเพิ่มความแข็งและการทนต่อการสึกหรอได้ด้วยการผสมคาร์ไบด์ของไทเทเนียมและแทนทาลัม วัสดุประเภทนี้เหมาะกับการตัดที่ความเร็วรอบต่ำ เพราะไม่เหมาะต่อการสั่น มีดตัดชนิดนี้ใช้กับการตัดแบบลมเป่าได้

2.7.5 **โคดต์ทูล** (Coated tools)

ใช้กับงานตัดรอบสูง เพื่อลดเวลาในการทำงาน อายุมีดตัดนานกว่ามีดตัดที่ไม่ได้เคลือบสารถึง 10 เท่า วัสดุที่ใช้เคลือบมักจะเป็นพวกไทเทเนียมไนไตรด์ ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และเซรามิก ความหนาชั้นเคลือบประมาณ 5-10 ไมครอน

2.7.6 **เซรามิก** (Ceramics)

ทำจากอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีความละเอียดและความบริสุทธิ์สูง วัสดุนี้ทนต่อการขัดสีได้สูง ทนความร้อนได้ดี ลดการติดของเศษโลหะบนชิ้นงานได้ ผิวชิ้นงานหลังตัดมีความเรียบสูง แต่ข้อเสียที่สำคัญคือมีดตัดชนิดนี้ไม่ทนต่อการกระแทก

2.7.7 **คิวบิกโบรอนไนไตด์** (Cubic boron nitride)

เป็นวัสดุที่มีความแข็งมากที่สุด ทนต่อการสึกหรอและมีคมตัดที่แข็งแรง แต่เปราะจึงไม่เหมาะต่องานที่มีการสั่นสะเทือน เหมาะต่อการตัดเหล็กที่มีความแข็งสูง

2.7.8 **ไดมอนด์** (Diamond)

ทนต่อการสึกหรอได้ดี ลับคมได้ง่ายใช้กับงานที่ต้องการความละเอียดสูง

2.8 **ประเภทของสารหล่อเย็น** (Cutting fluids) [9]

แบ่งประเภทตามหน้าที่การทำงาน

1) สารหล่อเย็น (Coolant) มีน้ำเป็นส่วนประกอบสำคัญ มีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อใช้ที่ความเร็วสูง ๆ นิยมใช้ในการกลึงและการกัด และมีคุณสมบัติดังนี้
   - ลดความร้อนระหว่างมีดตัดและชิ้นงาน
   - เพิ่มอายุของมีดตัด

- เพิ่มความสามารถในการลดอุณหภูมิ

2) สารหล่อลื่น (Coolant) มีน้ำมัน ที่มีส่วนประกอบของ ซัลเฟอร์ คลอรีน และฟอสฟอรัส เป็นส่วนประกอบสำคัญ มีประสิทธิภาพมากเมื่อใช้ที่ความเร็วต่ำ นิยมใช้กับการเจาะและต๊าปเกลียว (Tapping) และมีคุณสมบัติดังนี้

- ลดแรงเสียดทานระหว่างเครื่องมือตัด เศษวัสดุ และชิ้นงาน
- เพิ่มอายุของมีดตัด

แบ่งประเภทตามส่วนประกอบสารเคมี

1) สารจำพวกน้ำมัน (Cutting oils or insoluble oils)

น้ำยาประเภทนี้ไม่มีส่วนประกอบของน้ำ ใช้เป็นสารหล่อเย็น ทำให้ผิวชิ้นงานสุดท้ายเรียบ และป้องกันสนิม น้ำมันประเภทนี้จะได้มาจากการกลั่นน้ำมันแร่ส่วนใหญ่จะมีการใส่น้ำมันสัตว์ น้ำมันพืช ผสมลงไปเพื่อทำให้เหลวขึ้นและเพิ่มคุณสมบัติในการหล่อลื่น น้ำยาหล่อเย็นประเภทนี้จะใช้กับงานตัดปานกลางถึงหนัก มีความต้องการสารเติมแต่ง (Additives) น้อยกว่าในกรณีของอิมัลชั่น (Emulsion) น้ำยาหล่อเย็นประเภทนี้แบ่งย่อยได้ออกเป็น 3 ชนิดคือ น้ำมันแร่ (Mineral oils), น้ำมันไขมัน (Fatty oils) และส่วนผสมของสารทั้ง 2 น้ำมันเหล่านี้จะให้คุณสมบัติในการหล่อเย็นลื่นแต่มีคุณสมบัติในการดูดซับความร้อนได้ต่ำ อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยน้ำมัน 3 ชนิดนี้จะมีค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับน้ำยาหล่อเย็นแบบอื่นๆ ดังนั้นน้ำมันเหล่านี้จึงเหมาะสำหรับการตัดที่ความเร็วต่ำๆ

2) สารจำพวกอีมัลชัน (Emulsified oils or soluble oils)

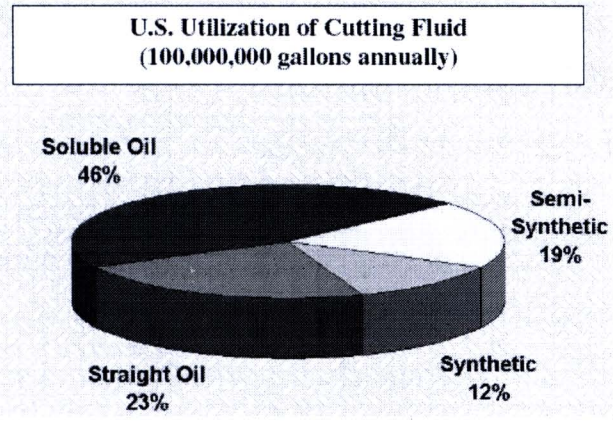
สารจำพวกนี้เป็นพวกน้ำมันแร่ (Mineral oils) ไขมันผสม (Fat mixture) และพวกอิมัลชั่นที่เติมลงไปในน้ำ น้ำมันจะถูกจับอยู่ในรูปของหยดเล็ก ๆ ในน้ำ (หรือที่เรียกว่า คอลลอยด์) มีลักษณะสีขาวแบบน้ำนม เนื่องจากองค์ประกอบหลักเป็นสารจำพวกน้ำ จึงทำให้น้ำยาหล่อเย็นนี้เป็นสารหล่อเย็นที่ดี ใช้เพื่อหล่อเย็น น้ำยาหล่อเย็นประเภทนี้จะช่วยป้องกันการหลอมติดของเศษโลหะกับมีดตัดและผิวชิ้นงาน และลดการสึกหรอของมีดตัดจากการเสียดสีที่อุณหภูมิสูงได้ ป้องกันการบิดเบี้ยวของชิ้นงานที่เกิดจากความร้อนที่ตกค้างในชิ้นงานหลังการตัด ส่วนผสมที่ใช้ทำน้ำยาหล่อเย็น มีแตกต่างกันไปตามแต่ความต้องการในการระบายความร้อน หรือการหล่อเย็น ถ้าต้องการให้มีการระบายความร้อนได้สูงขึ้น ก็ควรจะผสมน้ำมันในอัตราส่วนน้อยๆ ถ้าต้องการให้มีการหล่อเย็นที่ดีขึ้น ก็ควรจะผสมพวกน้ำมันในอัตราส่วนที่มากขึ้นอัตราส่วนที่ใช้ในการผสมมีได้ตั้งแต่ 1:5 ถึง 1:100 (น้ำมันต่อน้ำ)

3) สารจำพวกกึ่งสังเคราะห์ (Semi-chemical fluids or semi-synthetic metalworking fluids)

สารหล่อเย็นหล่อเย็นประเภทนี้จะมีส่วนผสมของน้ำมัน 5-30% ผสมด้วยการเติมสารเติมแต่งอื่นๆ เช่น ไนไตรด์ เอไมน์ เพื่อช่วยลดการกัดกร่อนของมีดตัดและชิ้นงาน นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของ น้ำมันแร่ (Mineral oils) ได้โดยการเพิ่มสารเติมแต่งซึ่งเป็นสารประกอบจำพวกซัลเฟอร์ (Sulfur) และ คลอรีน (Chlorine) การเติมสารจำพวกซัลเฟอร์จะช่วยลดโอกาสที่เศษโลหะหลอมละลายติดบนผิวคายของมีดตัด นอกจากนี้ สารเติมแต่งยังช่วยเพิ่มความเสถียรและป้องกันสนิม ในบางครั้งอาจมีการเติมสารจำพวกยาฆ่าแมลงลงไปเพื่อป้องกันการเติบโตของสารอินทรีย์ และสารจำพวกไขมันก็ใช้เติมลงไปเพื่อเพิ่มการหล่อลื่น น้ำมันจำพวกนี้ใช้สำหรับงานเบาและงานหนักที่ความเร็วในการตัดต่ำถึงปานกลาง

4) สารสังเคราะห์ (Chemical fluids synthetic metalworking fluids)

สารหล่อเย็นประเภทนี้เป็นสารสังเคราะห์ ไม่มีส่วนผสมของน้ำมัน ส่วนมากจะเป็นพวกสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ มีคุณสมบัติหล่อเย็น ลดการเกิดละออง ลดการออกซิเดชั่น และป้องกันสนิม ส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติในการลดความร้อนดีแต่หล่อเย็นไม่ดี สารเคมีจำพวกนี้จะมีความเสถียรสูง ใช้ได้ดีกับงานตัดหนัก



รูปที่ 2.14 สัดส่วนการใช้สารหล่อเย็นในประเทศสหรัฐอเมริกา

2.9 ประโยชน์ โทษ และการเลือกใช้สารหล่อเย็น

ประโยชน์

1) เพิ่มอายุของมีดตัด
2) เพิ่มความเรียบของผิวชิ้นงาน
3) ช่วยในการกำจัดเศษวัสดุ
4) ลดการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน
5) ลดแรงในการตัด (Cutting force)

โทษ

1) ไอระเหยของสารหล่อเย็นเป็นอันตรายต่อสุขภาพของพนักงาน
2) ทำลายสิ่งแวดล้อม
3) ทำลายบรรยากาศในการทำงาน
4) สารหล่อเย็นบางชนิดอาจทำให้ผิวของชิ้นงานเสียหายเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี
5) สารหล่อเย็นบางชนิดอาจเป็นสารไวไฟ

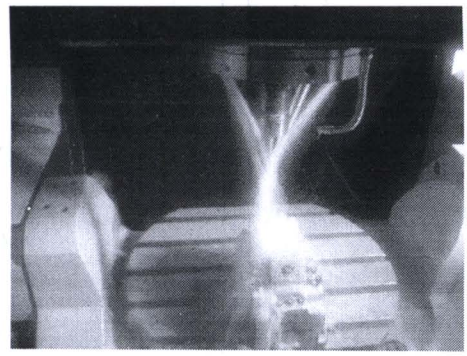
การเลือกใช้สารหล่อเย็น

1) มีความสามารถในการดูดความร้อนได้สูง
2) ไม่เกิดควันพิษเมื่อถูกความร้อน
3) มีความเสถียรสูง
4) จุดวาบไฟสูง
5) ไม่ทำให้ผิวชิ้นงานเสียหาย

2.10 การประยุกต์ใช้สารหล่อเย็น [7]

2.10.1 การหล่อเย็นแบบเปียก (Flooding application or flood cooling)

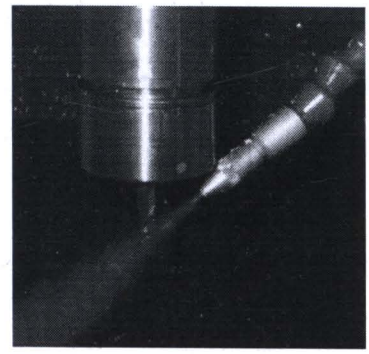
น้ำยาหล่อเย็นจะถูกจ่ายผ่านท่อจ่ายน้ำยาหล่อเย็นที่บริเวณเพลาหมุนของเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซนเตอร์ ลักษณะของน้ำยาหล่อเย็นจะเป็นลำน้ำ ความสามารถในการเข้าถึงบริเวณพื้นที่ตัดเฉือนระหว่างมีดตัดกับชิ้นงานจะไม่ดีเมื่อเทียบกับการหล่อเย็นแบบละออง เนื่องจากขนาดอนุภาคของน้ำยาหล่อเย็นจะโตกว่าการหล่อเย็นแบบละออง จึงทำให้การเข้าถึงบริเวณพื้นที่ตัดเฉือนได้ยากกว่า



รูปที่ 2.15 การหล่อเย็นแบบเปียก

2.10.2 **การหล่อเย็นแบบละออง** (Mist application or mist cooking)

น้ำยาหล่อเย็นจะถูกจ่ายโดยหัวฉีดที่ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะ น้ำยาหล่อเย็นที่ใช้จะมีน้ำเป็นส่วนผสมหลัก ขนาดของละอองน้ำ ขนาดเล็ก ๆ ที่ละเอียด ตั้งแต่ 5 ถึง 25 ไมครอน ละอองนี้จะถูกฉีดเข้าไปด้วยความเร็วสูงตรงบริเวณการตัด (Cutting zone) โดยอาศัยอากาศที่มีความดันสูงเป็นตัวขับดัน ถึงแม้การหล่อเย็นแบบละอองจะต้องการระบบระบายอากาศที่ดีและมีความสามารถในการหล่อเย็นที่จำกัด วิธีนี้มีข้อได้เปรียบว่าวิธีการหล่อเย็นแบบเปียก (Flood application) เพราะช่วงที่เกิดละออง อุณหภูมิของน้ำยาหล่อเย็นจะลดลงเนื่องจากการขยายตัว ซึ่งจะทำให้เกิดการดูดซับเอาความร้อนมากได้มากขึ้น เนื่องจากวิธีนี้จะฉีดสารหล่อเย็นเข้าไปโดยตรงด้วยความเร็วสูงจึงทำให้มีผลการหล่อเย็นที่ดีกว่า วิธีนี้มีจุดเด่นตรงที่สามารถฉีดไปยังบริเวณที่เข้าถึงได้ยากและยังทำให้สามารถเห็นชิ้นงานขณะการตัดได้ชัดเจน ในกระบวนการตัดโลหะโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ใช้มีดตัดคาร์ไบด์ในการตัด จะพบว่าวิธีการหล่อเย็นแบบเปียก (Flood application) อาจทำให้มีดตัดเกิดรอยแตกร้าวได้ ในกรณีนี้ วิธีการหล่อเย็นแบบละออง (Mist application or mist cooling) จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการยืดอายุของมีดตัด



รูปที่ 2.16 การกัดแบบใช้สารหล่อเย็นแบบละออง

2.10.3 **การหล่อเย็นแบบลำน้ำความดันสูง** (High jet method)

เป็นวิธีที่ถือได้ว่ามีข้อได้เปรียบกว่าระบบเดิม ที่ถูกเสนอโดย Pigott และ Colwell และต่อมาก็กลายมาเป็นหัวข้อสำคัญให้กับนักวิจัยหลายๆคนที่สนใจ วิธีนี้จะอาศัยลำขนาดเล็กที่มีความเร็วสูงฉีดไปยังผิวหลบของมีดตัด ของเหลวที่ใช้เป็นได้ทั้งสารจำพวกน้ำ และน้ำมัน (Water-based and oil-based)

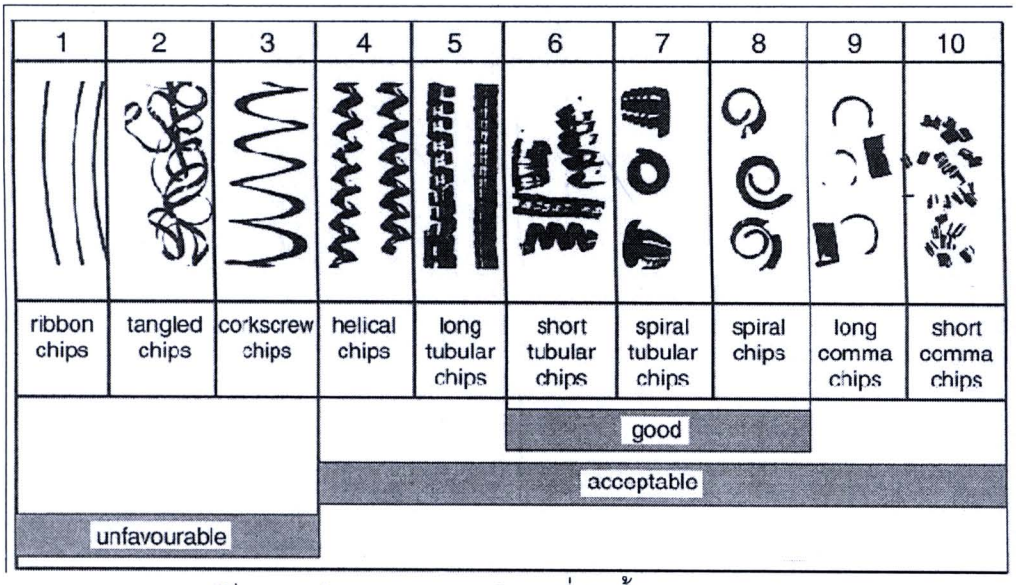
2.11 **เศษโลหะ** [6]

ผิวชิ้นงานที่ผ่านการกลึงแล้ว รูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความหนาของเศษโลหะ (to) ในขณะที่เศษกลึงโลหะกำลังก่อตัวตามระนาบเฉือน ความหนาของเศษโลหะจะลดลงเป็น tc อัตราส่วนระหว่าง to กับ tc เรียกว่า Chip thickness ratio หรือ Chip ratio อัตราส่วนนี้จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอในการเกิดเศษโลหะจริงในการตัดจะแตกต่างจากการตัดแบบมุมตั้งฉาก เพราะว่ากระบวนการการเปลี่ยนรูปจะไม่ได้เกิดบนระนาบเท่านั้น แต่จะเกิดเป็นบริเวณ (Zone) รูปแบบการเกิดเศษโลหะที่เกิดขึ้นจริง ลักษณะของเศษโลหะที่เกิดขึ้นนี้ จะขึ้นกับปัจจัยต่างๆเช่น ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการตัด สภาวะในการตัดต่างๆ รูปแบบการเกิดของเศษโลหะสามารถแยกได้เป็น 3 แบบคือ

(1) เศษโลหะเกิดการแตกเป็นชิ้นเล็ก เกิดกับวัสดุที่เปราะและแตกง่าย ความเร็วในการตัดต่ำความร้อนที่เกิดต่ำ ผิวชิ้นงานไม่ดี อายุเครื่องมือตัดยาวนาน

(2) เศษโลหะยาว ม้วนเป็นเส้น เกิดกับวัสดุเหนียว มุมคายมาก ความเร็วในการตัดสูงกว่าแบบ แรก ผิวชิ้นงานที่ได้เรียบ ใช้แรงตัดต่ำ

(3) เศษโลหะเกิดการหลอมตัดกับเครื่องมือตัดหรือชิ้นงาน เกิดกับวัสดุเหนียว มุมคายน้อย ความเร็วในการตัดต่ำ ผิวชิ้นงานที่ได้ไม่เรียบ ใช้แรงตัดสูง นอกจากนี้เศษโลหะที่เกิดอาจแบ่งได้ตามรูปร่างของเศษโลหะที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ประเภทของเศษโลหะที่เกิดขึ้นแบ่งตามรูปร่าง

2.12 **การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ** (Model adequacy checking) [11]

การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบที่นิยมใช้มี 3 กรณี คือ

1) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิการตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2)

เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง หรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนเท่าใด ค่า R^2 ยิ่งมากสมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่า R^2 มีความไวในการเปลี่ยนแปลง คือ เมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรอิสระในสมการค่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ จึงใช้ค่าที่ทำการปรับค่าแล้ว (R^2_{adj}) แทน

2) การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-Fit test; LOF)

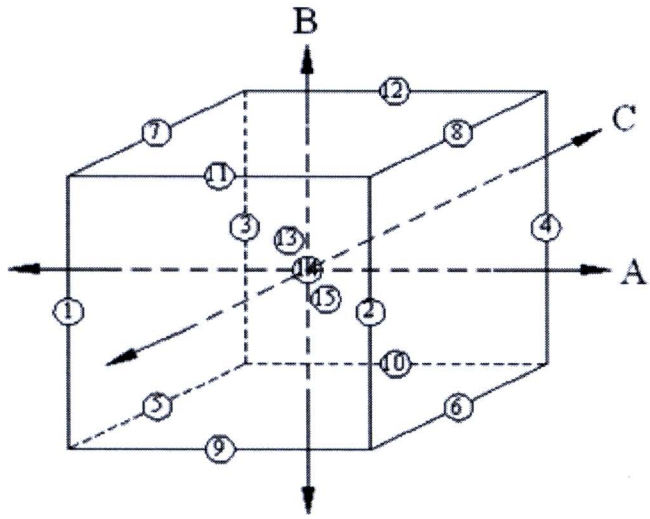
การทดสอบนี้จะทำขึ้นเฉพาะกรณีที่มีการเก็บข้อมูลซ้ำ แต่ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าต่างกัน มักจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เนื่องจากต้องทำการเก็บค่าซ้ำ โดยพิจารณาจากค่า P-Value ของ LOF ถ้ามีค่ามากกว่าค่า α ที่กำหนดแล้ว สมการมีความเหมาะสม

3) การทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยและการประมาณค่าแบบช่วง (Hypothesis testing for regression coefficients and interval estimation)

การทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยจัดได้ว่าเป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนที่จะนำสมการไปใช้ในการพยากรณ์ โดยจะทำการประมาณค่าพยากรณ์ที่ต้องการโดยใช้ค่าประมาณแบบจุดและชาวงต่อไป เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการนำไปประยุกต์ใช้เมื่อทราบค่าประมาณความแปรปรวนของตัวประมาณดังกล่าวแล้ว จะสามารถดำเนินการทดสอบสมมติฐาน และการประมาณแบบช่วงได้ โดยทั่วไปมักนิยมทดสอบสมมติฐานเฉพาะค่าสมประสิทธิ์ในสมการถดถอยซึ่งจะทำให้ทราบว่าสมการถดถอยที่สร้างขึ้นจะสามารถลดรูปลงอีกได้หรือไม่ สำหรับการประมาณแบบช่วงมักจะทำขึ้นเพื่อประโยชน์การพยากรณ์ กรณีสมการถดถอยอย่างง่ายมักจะทำการสร้างช่วงสำหรับค่าความชัน

2.13 การทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน (Box – Behnken design) [11]

การทดลองนี้เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้มากสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ (3 level design) โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการตัวแปรเมื่อปัจจัยเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative factors) เช่น เวลา ความดัน เป็นต้น โดยใช้หลักการของการทดลองของแฟคทอเรียลเต็มรูปผนวกกับจุดกึ่งกลาง (Central points) รวมเข้าไป



รูปที่ 2.18 การออกแบบบออกแบบบอกซ์-เบห์นเคนแบบ 3 ตัวแปร

2.14 ทบทวนวรรณกรรม

ในวงการอุตสาหกรรม การศึกษาเงื่อนไขการตัด(Cutting conditions) มีจุดประสงค์เพื่อให้ได้เงื่อนไขการกัดที่ดีที่สุดซึ่งจะพิจารณาปัจจัยที่ทำให้เกิดผลลัพธ์การตัดแตกต่างกัน 2 ด้าน

คือ ลักษณะการใช้สารหล่อเย็น (Cutting fluid) และค่าตัวแปรต้นในการตัด (Cutting parameters) [12,14]

การใช้สารหล่อเย็นในกระบวนการตัดมีจุดประสงค์เพื่อให้สามารถใช้ความเร็วการกัดสูงในการเพิ่มผลิตภาพ และสำหรับชิ้นงานบางอย่างเช่น Titanium alloys ซึ่งมีอัตราการนำความร้อนต่ำ สารหล่อเย็นเป็นสิ่งจำเป็นในกระบวนการตัดโดยจะทำหน้าที่เป็นน้ำยาหล่อลื่น และน้ำยาหล่อเย็น กระบวนการตัดสามารถเพิ่มความเร็วได้ถึง 30 % อย่างไรก็ตาม การใช้สารหล่อเย็นก่อให้เกิดผลลบทางด้าน เศรษฐศาสตร์ สิ่งแวดล้อม และ สุขภาพ [14,15] และเมื่อพิจารณาต้นทุนพบว่าสูงถึง 17% จากต้นทุนการผลิตทั้งหมด และจากการทดลองการกัดเหล็กกล้าแข็ง (ASSAB DF3) ด้วยความเร็วสูง คิดต้นทุนสารหล่อเย็นได้เป็น 7-17% ซึ่งสูงมากเมื่อเทียบกับต้นทุนมีดตัด (Titanium) ที่คิดเป็น 4% และ 2-4% สำหรับการตัดด้วยมีดตัดเหล็กกล้า (AISI 4340) จากต้นทุนการผลิตทั้งหมด

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยการหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมคือการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบ (Response surface analysis) แบ่งการทดลองเป็นสองแบบได้แก่ การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) และการออกแบบบอกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) โดยการเลือกวิธีการจะพิจารณาจากจำนวนการทดลอง การตั้งค่าเครื่องจักร ลักษณะของข้อมูล ฯลฯ [10,11]

การศึกษาปัจจัยที่เป็นตัวแปรต้นในการตัด ได้แก่ การใช้ตัวแปรต้น 3 ตัวได้แก่ ความเร็วการตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed rate) และมุมมีดตัดด้านข้าง (Side Cutting Edge Angle, SCEA) [12] อีกรูปแบบหนึ่งคือ การใช้ตัวแปรต้นสี่ตัวโดยใช้ตัวแปรสามตัวที่กล่าวมาแล้วและเพิ่มความลึกการตัด(Depth of cut) เข้าไป [13] แล้วนำมาออกแบบการทดลอง(Design of Experiment, DOE) ด้วยโปรแกรม Minitab, Design expert software หรือโปรแกรมทางสถิติต่าง ๆ เป็นต้น เพื่อสร้างโมเดลสมการถดถอย และสร้างโมเดลพื้นผิวผลตอบต่อไป

ผลตอบที่นำมาพิจารณาได้แก่ แรงในการกัดสามแกน (Axial forces) [12-14] และ ความขรุขระของชิ้นงาน (Surface roughness) หลังการตัด โดยนำมาสร้างเป็นแผนภูมิพื้นผิวผลตอบ (Response surface model) แสดงความเหมาะสมของการใช้เงื่อนไขการตัด

M.A. Dabnun, M.S.J. Hashmi และ M.A. El-Baradie วิจัยเกี่ยวกับความขรุขระผิวชิ้นงานหลังการตัดว่าความขรุขระผิวชิ้นงานสัมพันธ์กับ ความเร็วมีดตัด (V), อัตราการป้อน (f)

และความลึกการตัด (d) ดังสมการ $R_a = CV^k f^i d^m$ โดย i,k,l,m คือค่าคงที่ [16] เช่นเดียวกัน Y. Sahin และ A.R. Motorcu ได้ใช้สมการ $R_a = CV^n f^m d^p e$ โดย n, m, p คือค่าคงที่และ e คือ error ซึ่งไม่นำมุมมีดตัดด้านข้างซึ่งเป็นหนึ่งในตัวแปรต้นมาพิจารณา ส่วน Junakarn, Chansit, Papichaya (2551) เลือกใช้สมการ $R = CV^{a1} f^{a2} R_n^{a3} D^{a4} (Fy/Fz)^{a5}$ โดย Rn,Fy/Fz คือ Nose Radius และ อัตราส่วนแรงการตัดในแนวแกน y และแกน z หรือเรียกอัตราส่วน แรงที่ป้อนต่อแรงหลัก ตามลำดับ และ a1-a5 คือค่าคงที่

เมื่อพิจารณาปัจจัยตัวแปรต้นของแต่ละงานวิจัยพบว่าแต่ละตัวแปรจะประกอบไปด้วยข้อมูลสามค่าคือ ค่าต่ำ ค่ากลาง และค่าสูง เพื่อให้เพียงพอต่อการออกแบบการทดลองนั่นเอง Basim และ Bashir (2009) ใช้เงื่อนไขกลึงแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ M.Y.Noordin, V.C. Venkatesh, S.Sharif, S.Elting, A.Abdullahที่ทำการทดลองการกลึงเหล็ก AISI 1045 แบบไม่ใช้สารหล่อเย็น และ N.H. Elmagrabi, C.H. Che Haron ทดลองขึ้นรูปวัสดุไททาเนียมอัลลอยด์

ข้อสังเกตก็คือ ในปัจจุบันที่ยังทำกันน้อยคือการออกแบบกระบวนการตัดโดยใช้ปัจจัยเงื่อนไขการใช้สารหล่อเย็น (Cutting fluid) ด้วยเงื่อนไขในการทดลองคือ 1.การตัดโดยใช้สารหล่อเย็น 2.การตัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น 3. การตัดแบบใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด รวมไปถึงการออกแบบโดยกำหนดตัวแปรต้นเป็นความเร็วรอบมีดตัด (Spindle speed) และความสึกหรอมีดตัด (Flank wear) จึงเป็นที่มาของการออกแบบการทดลองการหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบนี้ อีกเหตุผลหนึ่งคือในปัจจุบันการทดสอบกระบวนการกัดอลูมิเนียมด้วยมีดตัดหัวบอลยังทำกันไม่มาก และไม่แพร่หลาย ซึ่งเมื่อได้ผลการทดลอง จะสามารถบอกได้ว่าการตัดที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่การตั้งเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ค่าปัจจัยใด