

การศึกษาเปรียบเทียบชนิดของสารเคลือบผิว
และสารหล่อลื่นในกระบวนการตัดเจาะเหล็กซิลิกอน

**COMPARATIVE STUDY OF COATING MATERIAL AND
LUBRICANT TYPE IN SILICON STEEL PIERCING PROCESS**

เคลือวัลย์ มั่นระวัง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาเปรียบเทียบชนิดของสารเคลือบผิว
และสารหล่อลื่นในกระบวนการตัดเจาะเหล็กซิลิกอน

เคลือวัลย์ มั่นระวัง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาเปรียบเทียบชนิดของสารเคลือบผิวและสารหล่อลื่นในกระบวนการตัดเจาะเหล็กซีลิกอน

Comparative Study of Coating Material and Lubricant Type in Silicon Steel Piercing Process

ชื่อ - นามสกุล

นางสาวเคลือวัลย์ มั่นระวัง

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

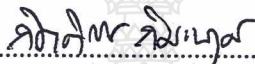
อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.Eng.

ปีการศึกษา

2558

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุชา วัฒนาภา, Ph.D.)


..... กรรมการ
(อาจารย์ชัยยะ ปราณิตพลกรัง, D.Eng.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.Eng.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 19 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเปรียบเทียบชนิดของสารเคลือบผิวและสารหล่อลื่นในกระบวนการตัดเจาะเหล็กซีลิกอน
ชื่อ-นามสกุล	นางสาวเคลือวัลย์ มั่นระวัง
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.Eng.
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

กระบวนการเจาะเหล็กซีลิกอน 27PH100 มีการผลิตอย่างต่อเนื่องเป็นจำนวนมาก เป็นเหตุให้เกิดการสึกหรอของแม่พิมพ์อย่างรวดเร็วทำให้ชิ้นงานเกิดครีบส่งผลต่อค่าทดสอบทางไฟฟ้า รวมทั้งแม่พิมพ์ที่สั่งจากต่างประเทศมีราคาสูง จึงมีการสั่งแม่พิมพ์ที่มีขายทั่วไปภายในประเทศเป็นเหล็ก SKH51 มาใช้ทดแทนและมีการนำเทคโนโลยีด้านการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งและสารหล่อลื่นเข้ามาช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์มากขึ้น

ขอบเขตของการศึกษาจะทำการยึดอายุพันธ์เจาะรู เหล็ก ซีลิกอน 27PH100 ความหนา 0.27 มม. โดยนำพันธ์ SKH51 ที่ไม่มีการเคลือบผิว เคลือบผิวด้วย TiCN, TiAlN ด้วยกระบวนการ PVD ทั้งหมด 9 ตัว มาติดตั้งบนแม่พิมพ์ชุดเดียวกัน และขณะทำการเจาะรูได้ทำน้ำมันหล่อลื่น 3 ชนิดคือน้ำมันสังเคราะห์ น้ำมันแร่ น้ำมันมะพร้าว ซึ่งแบ่งการทดลองเป็น 9 ชุดการทดลอง เพื่อทำการเปรียบเทียบด้วยการวัดอัตราการสึกหรอของพันธ์ด้วยการชั่งน้ำหนักของพันธ์ วัดระยะการสึกหรอของพันธ์ที่ผิวด้านข้าง และเปรียบเทียบคุณภาพของขอบตัดชิ้นงาน

ผลการทดลองพบว่า การเคลือบผิวพันธ์และสารหล่อลื่นมีผลต่อการสึกหรอของพันธ์ และเมื่อเกิดการสึกหรอที่พันธ์ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างคมตัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงมีอิทธิพลต่อคุณภาพของขอบตัดชิ้นงานจากการเปรียบเทียบผลการทดลองพบว่าพันธ์ที่ไม่มีการเคลือบผิวและใช้สารหล่อลื่นที่เป็นน้ำมันสังเคราะห์มีอัตราการสึกหรอสูงสุด ส่วนพันธ์ที่เกิดการสึกหรอน้อยที่สุดคือพันธ์ที่เคลือบผิวด้วย TiAlN และใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น และการผลิตในปริมาณที่น้อยกว่า 25,000 ชิ้น ควรเลือกใช้พันธ์แบบใหม่จะส่งผลให้ได้ผลกำไรที่สูงกว่า แต่ถ้ามีความต้องการในการผลิตที่สูงกว่า 25,000 ชิ้น ควรเลือกใช้พันธ์แบบเดิมจะได้ผลกำไรที่สูงกว่า

คำสำคัญ: พันธ์ ฟิล์มแข็ง ขอบตัดชิ้นงาน

Thesis Title	Comparative Study of Coating Material and Lubricant Type in Silicon Steel Piercing Process
Name-Surname	Miss Kluawan Manrawang
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Sirichai Torsakul, D.Ing.
Academic Year	2015

ABSTRACT

The continuous and nonstop process of cutting silicon steel 27DH100 causes a rapid deterioration of mold which makes molded parts burr and thus, creates effect to the value of electrical testing. The molds imported from overseas are very expensive. However, the SKH51 steel molds, which are sold locally, are generally preferred as an alternative instead of importing. Nowadays, the technology of film hardness coating and the use lubricant can be utilized to extend the mold life.

The scope of this study was to determine the lifespan of 27PH100 silicone steel punch with the thickness of 0.27 mm. The simulation testing used was SKH51 steel punch without TiCN, TiLAN coating and PVD process installed in the same mold. During the punching process, three kinds of lubricants were used which were housing oil, mineral oil and coconut oil. The study was separated into nine trials then a comparative analysis was conducted by measuring the rate of deterioration of punch and the weight of punch. The deterioration of punch was measured from side surface and then compared to the quality of molded parts edge.

The results showed that the coating of punch and lubricants affected the deterioration of the punch resulting in an increased of gap in the cutting edge. Furthermore, the results revealed that no punch coating and lubricant has the highest deterioration rate while the punch coated with TiALN and coconut oil has minimal deterioration rate. In order to increase the profitability of this product from the production process, it is recommended to use the new punch method if the production requirement is slightly over than 25,000 pieces. However, if the production requirement is greatly over than 25,000 pieces, it is recommended to still use the traditional punch method.

Keywords: piercing, coating, cutting edge



กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ กรรมการสอบ, ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง กรรมการสอบ, และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุชา วัฒนาภา ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณคณะรุ่นพี่สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่าน ที่ให้ความรู้และใช้เครื่องมือเครื่องจักรในการทำงานวิจัย จนสำเร็จ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกทุกท่านในครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ และทุนทรัพย์ในการศึกษาตลอดมา จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

เคลือวัลย์ มั่นระวัง



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	3
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	4
กิตติกรรมประกาศ.....	6
สารบัญ.....	7
สารบัญ.....	9
สารบัญรูป.....	10
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	15
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวข้อง.....	17
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกลไกในการตัด.....	17
2.2 งานตัด.....	18
2.3 ขอบตัดของชิ้นงาน.....	19
2.4 ระยะช่องว่างระหว่างคมตัด.....	22
2.5 การเลือกขนาดของช่องว่างระหว่างฟันซ์และตาย.....	28
2.6 การคำนวณหาแรงตัด.....	30
2.7 การสึกหรอของฟันซ์ในงานตัดโลหะแผ่น.....	34
2.8 สารหล่อลื่น.....	37
2.9 การชุบเคลือบผิวแบบไอกายภาพ.....	42
2.10 ธาตุซิลิกอน.....	49
2.11 เหล็กกล้าซิลิกอน.....	51
2.12 เหล็กแผ่นรีดร้อน.....	54
2.13 เหล็กแผ่นสำหรับงานทางไฟฟ้า.....	57
2.14 การสูญเสียกระแสไหลวน (Eddy Current Loss)	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.15 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน.....	62
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	64
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	69
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	69
3.2 การออกแบบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	71
3.3 การเตรียมวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....	72
3.4 การออกแบบชุดแม่พิมพ์ตัดเจาะ.....	73
3.5 การเตรียมเคลือบผิวและสารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง.....	74
3.6 การบันทึกผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	77
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	81
4.1 อัตราการสึกหรอ.....	81
4.2 คุณภาพของขอบตัดชิ้นงาน.....	86
4.3 กรอบต่อการสูญเสียในกระแสไหลวน (Eddy Current Loss).....	92
4.4 วิเคราะห์จุดคุ้มทุนของการซื้อพันธึ่แบบเดิมและแบบใหม่.....	93
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	98
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	98
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	99
บรรณานุกรม.....	101
ภาคผนวก	103
ภาคผนวก ก คุณสมบัติ.....	104
ภาคผนวก ข บันทึกข้อมูลการทดลอง.....	113
ภาคผนวก ค คุณภาพของขอบตัดชิ้นงาน.....	124
ภาคผนวก ง แบบแม่พิมพ์.....	134
ภาคผนวก จ ผลงานตีพิมพ์.....	143
ประวัติผู้จัดทำวิทยานิพนธ์.....	152

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกลของโลหะชนิดต่าง.....	30
ตารางที่ 2.2 เพอร์เซ็นต์ penetration ของ steel.....	33
ตารางที่ 2.3 เพอร์เซ็นต์ penetration ของ steel แบ่งตามค่าของ shearing strength.....	33
ตารางที่ 2.4 เหล็กแผ่นรีดเย็นตามมาตรฐาน JIS G3141 สำหรับอุตสาหกรรม การผลิตชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า.....	56
ตารางที่ 2.5 Symbol of quality.....	57
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของชุดแม่พิมพ์.....	72
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเหล็กซิลิกอน 27 PH100.....	72
ตารางที่ 3.3 รายละเอียดการเคลือบผิวพ่นซ์.....	73
ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างใบบันทึกผลการทดลองคุณภาพของขอบตัดชิ้นงาน.....	78
ตารางที่ 4.1 แสดงการคำนวณจุดคุ้มทุนแม่พิมพ์แบบเดิม	95
ตารางที่ 4.2 แสดงการคำนวณจุดคุ้มทุนแม่พิมพ์แบบใหม่.....	96



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การตัดชิ้นงานด้วยฟันซ์และคาย.....	17
รูปที่ 2.2 ลำดับขั้นตอนของการตัดโลหะ.....	18
รูปที่ 2.3 แสดงการตัดที่ต้องการนำส่วนที่ถูกตัดไปแปรสภาพเป็นชิ้นงาน.....	18
รูปที่ 2.4 แสดงการตัดเจาะรูเพื่อนำรูไปใช้งาน.....	19
รูปที่ 2.5 ส่วนต่างๆของขอบตัดของชิ้นงาน.....	19
รูปที่ 2.6 ความเค้นในเนื้อวัสดุระหว่างกระบวนการตัด.....	21
รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดส่วนโค้งงอ.....	21
รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดครีป.....	22
รูปที่ 2.9 รูปร่างหน้าตัดเฉือน.....	23
รูปที่ 2.10 ทิศทางของรอยฉีกขาด.....	23
รูปที่ 2.11 ลักษณะชิ้นงานจากการกำหนดระยะช่องว่างคมตัดที่เหมาะสม.....	24
รูปที่ 2.12 ลักษณะชิ้นงานจากการกำหนดระยะช่องว่างคมตัดที่มากเกินไป.....	25
รูปที่ 2.13 ลักษณะชิ้นงานจากการกำหนดระยะช่องว่างที่น้อยเกินไป.....	25
รูปที่ 2.14 ลักษณะชิ้นงานที่เกิดจากตำแหน่งของฟันซ์และคายที่เอียงศูนย์กลาง.....	26
รูปที่ 2.15 ลักษณะรอยตัดเฉือนในแบบต่างๆ ตามขนาดระยะช่องว่างคมตัด.....	26
รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบค่าความสูงครีป.....	27
รูปที่ 2.17 แสดงความเปรียบเทียบคุณภาพผิวชิ้นงานในระดับช่องว่างแม่พิมพ์กับวัสดุต่างๆ	28
รูปที่ 2.18 แรงตัด.....	30
รูปที่ 2.19 การลดแรงตัด.....	32
รูปที่ 2.20 แสดงตำแหน่งการสึกหรอของฟันซ์และคาย.....	34
รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะแนวโน้มการสึกหรอ.....	35
รูปที่ 2.22 ลักษณะการสึกหรอแบบจุดขีด.....	36
รูปที่ 2.23 ลักษณะการสึกหรอแบบขีดติด.....	36
รูปที่ 2.24 ลักษณะการสึกหรอแบบล้าตัว.....	36
รูปที่ 2.25 แสดงชั้นเคลือบผิวในรูปแบบต่าง ๆ.....	44

สารบัญรูป (ต่อ)

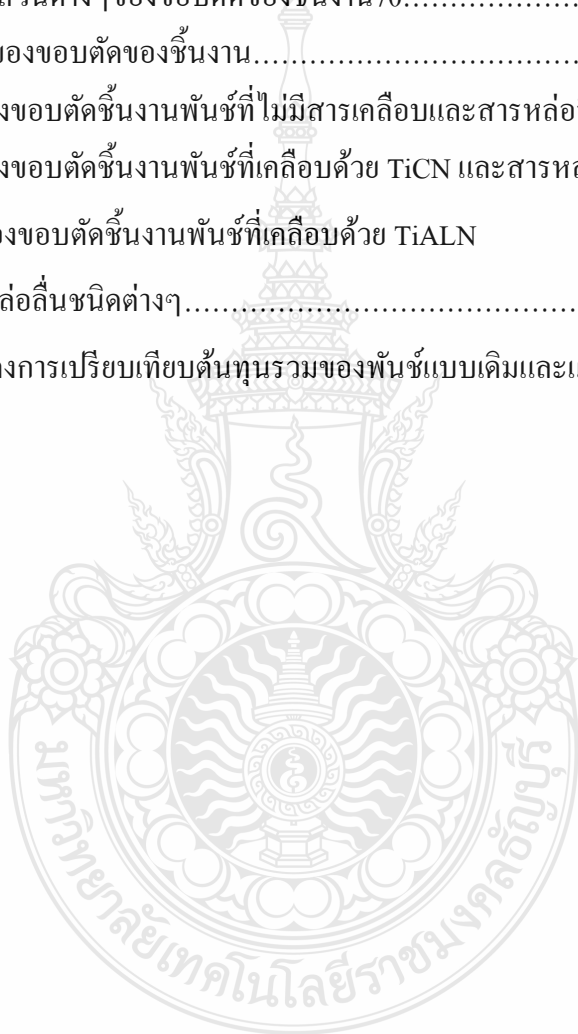
	หน้า
รูปที่ 2.26 แสดงคุณสมบัติของผิวเคลือบ.....	44
รูปที่ 2.27 แสดงคุณลักษณะของผิวเคลือบแต่ละชนิด.....	45
รูปที่ 2.28 PVD ARC Technology.....	45
รูปที่ 2.29 PVD Sputter technology.....	46
รูปที่ 2.30 PVD Sputter ก่อนเคลือบผิว.....	46
รูปที่ 2.31 PVD Sputter CrN coated (1.6 μm) หลังเคลือบ.....	46
รูปที่ 2.32 การทำงานของ PVD ARC and Sputter.....	47
รูปที่ 2.33 เครื่อง PVD ARC and Sputter.....	47
รูปที่ 2.34 ผลของปริมาณซิลิกอนต่อความหนาชั้นสังกะสี.....	50
รูปที่ 2.35 ส่วนที่ Fe เป็นหลักในแผนภูมิสมมูล Fe-Si กับผลของคาร์บอน 0.07% โดยน้ำหนักต่อพื้นที่ $\alpha + \gamma$	52
รูปที่ 2.36 ปริมาณของ Si กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนจากเหนียวเป็นเปราะ.....	52
รูปที่ 2.37 ปริมาณธาตุกับความต้านทานทางไฟฟ้า.....	53
รูปที่ 2.38 แมกนีโทสตริกชัน.....	53
รูปที่ 2.39 ปริมาณธาตุซิลิกอนกับสมบัติต่างๆ.....	54
รูปที่ 2.40 ลักษณะผิวของเหล็กแผ่นรีดร้อนและผิวของเหล็กแผ่นรีดเย็น.....	55
รูปที่ 2.41 ขั้นตอนการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น.....	56
รูปที่ 2.42 การผลิตเหล็กกล้า Non-oriented electrical steel สำหรับงานไฟฟ้า.....	59
รูปที่ 2.43 การใช้งานของ Electrical steel sheet.....	60
รูปที่ 2.44 แสดงการไหลของ eddy current.....	61
รูปที่ 2.45 แสดงแผนภูมิการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน.....	64
รูปที่ 2.46 ลักษณะการกำหนดขนาดและรูปร่างของพันธ์และคาย.....	64
รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินการวิจัยการการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพ ชิ้นงาน สำหรับแม่พิมพ์ตัดเจาะเหล็กซิลิกอน.....	70
รูปที่ 3.2 แม่พิมพ์เจาะ.....	72

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.3 แบบแม่พิมพ์เจาะ	71
รูปที่ 3.4 แผ่นเหล็กซิลิกอน	73
รูปที่ 3.5 พันซ์.....	73
รูปที่ 3.6 ดाय	74
รูปที่ 3.7 พันซ์ที่ใช้ไม่มีการใช้สารเคลือบ.....	74
รูปที่ 3.8 พันซ์ที่ใช้สารเคลือบ TiNC (PVD).....	74
รูปที่ 3.9 พันซ์ที่ใช้สารเคลือบ TiALN (PVD).....	75
รูปที่ 3.10 น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์.....	75
รูปที่ 3.11 น้ำมันแร่.....	75
รูปที่ 3.12 น้ำมันมะพร้าว.....	75
รูปที่ 3.13 แสดงการวัดความหนาของฟิล์มน้ำมันด้วยกล้องจุลทรรศน์ Microscope Laser	76
รูปที่ 3.14 ความหนาของฟิล์มน้ำมันสังเคราะห์หนาประมาณ 15.25 μm	76
รูปที่ 3.15 ความหนาของฟิล์มน้ำมันแร่หนาประมาณ 16.176 μm	76
รูปที่ 3.16 ความหนาของฟิล์มน้ำมันมะพร้าวหนาประมาณ 20.124 μm	77
รูปที่ 3.17 ตำแหน่งการการสึกหรอด้านข้างของพันธ์.....	77
รูปที่ 3.18 ตำแหน่งการวัดความสูงต่างๆของขอบตัดชิ้นงาน.....	78
รูปที่ 3.19 การวัดขนาดการสึกหรอของพันธ์โดยการชั่งน้ำหนัก.....	79
รูปที่ 3.20 เครื่องจัดชิ้นงานแบบจานหมุน.....	79
รูปที่ 3.21 วัดขนาดการสึกหรอของพันธ์.....	80
รูปที่ 4.1 แสดง % การลดลงของน้ำหนักของพันธ์ที่ไม่มีการเคลือบ.....	81
รูปที่ 4.2 แสดง % การลดลงของน้ำหนักของพันธ์ที่มีการเคลือบผิวด้วย TiCN.....	82
รูปที่ 4.3 แสดง % การลดลงของน้ำหนักของพันธ์ที่มีการเคลือบผิวด้วย TiALN.....	82
รูปที่ 4.4 รูปแสดง % การเปรียบเทียบน้ำหนักของพันธ์ที่เปลี่ยนแปลง.....	83
รูปที่ 4.5 ลักษณะการสึกหรอของคมตัด (Punch) ที่ไม่มีสารเคลือบ.....	84
รูปที่ 4.6 ลักษณะการสึกหรอของคมตัด (Punch) ที่เคลือบด้วย TiCN.....	84
รูปที่ 4.7 ลักษณะการสึกหรอของคมตัด (Punch) ที่เคลือบด้วย TiALN.....	85

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 รูปแสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอของคมตัด.....	85
รูปที่ 4.9 แบบจำลองส่วนต่างๆของขอบตัดของชิ้นงาน70.....	86
รูปที่ 4.10 ส่วนต่างๆของขอบตัดของชิ้นงาน.....	87
รูปที่ 4.11 คุณภาพของขอบตัดชิ้นงานพังก์ที่ไม่มีสารเคลือบและสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ.	87
รูปที่ 4.12 คุณภาพของขอบตัดชิ้นงานพังก์ที่เคลือบด้วย TiCN และสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ	89
รูปที่ 4.13 คุณภาพของขอบตัดชิ้นงานพังก์ที่เคลือบด้วย TiALN และสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ.....	90
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบต้นทุนรวมของพังก์แบบเดิมและแบบใหม่.....	97



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทย มีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมการผลิตสูงมาก โดยเฉพาะอุตสาหกรรมทางการผลิตชิ้นส่วนจากโลหะแผ่น ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมทางการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ อุตสาหกรรมผลิตเครื่องใช้ในครัวเรือน หรืออุตสาหกรรมในด้านอื่นๆ ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากโลหะแผ่น ซึ่งต้องผ่านกระบวนการผลิตต่างๆ เช่นการตัดแผ่นเปล่า การเจาะรู การลากขึ้นรูปเป็นต้น เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตรงตามความต้องการของตลาดกระบวนการผลิตเหล่านี้ล้วนต้องใช้แม่พิมพ์ในการผลิต ดังนั้นแม่พิมพ์จึงมีความสำคัญ ถ้าแม่พิมพ์มีคุณภาพหรือมีความเที่ยงตรงก็จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพด้วย

การตัดเจาะรูเพื่อนำรูปไปใช้งาน (Piercing) เป็นการตัดเจาะรูเพื่อนำรูปไปใช้งานต่างจากการตัดที่ต้องการนำส่วนที่ถูกตัดไปแปรสภาพเป็นชิ้นงาน คือการตัดเจาะรูเพื่อนำรูปไปใช้งาน เป็นการนำรูปไปใช้งาน คือส่วนที่วางอยู่บน ดาย ส่วนที่หล่นลงไปคือ เศษ [1] เราจะเลือกใช้วัสดุในการทำแม่พิมพ์ที่มีราคาถูกเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิต แต่ถ้าหากว่าต้องการผลิตผลิตภัณฑ์จำนวนมากๆ จำเป็นจะต้องเลือกใช้วัสดุในการทำแม่พิมพ์ที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมเพื่อป้องกันการด้อยคุณภาพของชิ้นงานที่เกิดจากการสึกหรอของแม่พิมพ์ โดยการพิจารณาจากจำนวนของผลิตภัณฑ์และชนิดของโลหะแผ่นที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ นอกจากการเลือกใช้วัสดุในการทำแม่พิมพ์แล้ว จะต้องคำนึงถึงการออกแบบแม่พิมพ์ที่ถูกต้องเหมาะสม เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพและช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ซึ่งจะส่งผลทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลง เพราะจะมีผลต่ออัตราการสึกหรอของแม่พิมพ์และคุณภาพของขอบตัดชิ้นงานที่ได้

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาลักษณะของแม่พิมพ์ โดยการกำหนดชนิดของสารเคลือบผิว[11][12] และสารหล่อลื่น[7] ที่ใช้ในการตัดต่างๆ กัน เพื่อให้ทราบถึงการสึกหรอของคมตัด [6]

และคุณภาพของขอบตัดชิ้นงาน[3] เพื่อเปรียบเทียบอุปสรรคประสิทธิภาพของแม่พิมพ์ ลักษณะการสึกหรอ และคุณภาพของขอบตัดชิ้นงาน โดยวัดผลจากคุณภาพของรูเจาะที่ได้ในปัจจุบัน ได้อาศัยการวัดความสูงของเลี่ยนด้วยไมโครมิเตอร์เพื่อวัดความสูงโดยประมาณของรอยเลี่ยนที่เกิดขึ้นเป็นเกณฑ์ตัดสินว่าการป้อนนี้สามารถผลิตชิ้นงานได้จำนวนเท่าใดหรือกี่ชิ้นในช่วงระยะเวลาหนึ่งแล้วจึงนำแม่พิมพ์มาเจียรระไน(grinding) ผิวยาวเพื่อลบรอยสึกหรอและความทื่อของแม่พิมพ์ บริเวณพื้นผิวของแม่พิมพ์ เพื่อให้แม่พิมพ์มีคมตัดแล้วใช้งานต่อไป ทำให้ไม่ทราบถึงค่าระยะสึกหรอที่เกิดการสึกหรอบริเวณคมตัดของแม่พิมพ์ ทำให้เล็งเห็นความสำคัญของการศึกษาพฤติกรรมของการสึกหรอแม่พิมพ์ตัดบริเวณพื้นผิวของพันธ์และตาย และศึกษาจากคุณภาพของรูเจาะที่เกิดขึ้นเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงการสึกหรอของคมตัด จากค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของแม่พิมพ์ตัด และลักษณะการสึกหรอของคมตัด รวมถึงคุณภาพของขอบตัดชิ้นงาน การศึกษาครั้งนี้เพื่อนำไปลดต้นทุนและรักษาคุณภาพของชิ้นงานในอุตสาหกรรมการผลิตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบผิวและสารหล่อลื่นที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของคมตัด และคุณภาพของขอบชิ้นงานที่ได้

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

3.1 งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและทดลองการตัดเหล็กแผ่นซิลิกอน 27PH100ซึ่งเป็นเหล็กซิลิกอนที่มีปริมาณการผลิตสูงสุด เส้นผ่าศูนย์กลาง 8.4 mm. ความหนา 0.27 mm.

3.2 ออกแบบชุดแม่พิมพ์เจาะรู

3.3 การเคลือบผิวพันธ์ SKH51

3.3.1 ไม่มีการเคลือบผิว

3.3.2 เคลือบผิวด้วย TiCN (ไทเทเนียม-คาร์บอน-ไนโตร) (PVD) ความหนา 3 μm .

3.3.3 เคลือบผิวด้วย TiALN (ไทเทเนียม-อลูมิเนียม-ไนโตร) (PVD) ความหนา 3 μm .

3.4 สารหล่อลื่น

3.4.1 น้ำมันสังเคราะห์ GP-906 ของ บริษัท กรีนแพค เทคโนโลยี

3.4.2 น้ำมันแร่ GP-9020 ของ บริษัท กรีนแพค เทคโนโลยี

3.4.3 น้ำมันมะพร้าว

3.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

3.5.1 ค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของแม่พิมพ์ตัดที่เกิดจากการสึกหรอ

3.5.2 คุณภาพของขอบตัดชิ้นงาน

3.5.2.1 ค่าความสูงของส่วนโค้งมน (Edges Radius)

3.5.2.2 ค่าความสูงของส่วนเรียบตรง (Shear Band)

3.5.2.3 ค่าความสูงของรอยร้าว (Band Fracture)

3.5.2.4 ค่าความสูงของครีบชิ้นงาน (Burr)

3.5.3 วิเคราะห์จุดคุ้มทุนของการซื้อพันธแบบเดิมและแบบใหม่

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

4.1 เพื่อเลือกใช้สารเคลือบผิวของพันธ ให้ถูกต้องและเหมาะสมกับจำนวนและคุณภาพของชิ้นงาน

4.2 เพื่อเลือกใช้สารหล่อลื่น ให้ถูกต้องและเหมาะสมกับจำนวนและคุณภาพของชิ้นงาน

4.3 ลดปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในกระบวนการตัดชิ้นงานด้วยเครื่องเจาะ

4.4 สามารถนำผลสรุปจากงานวิจัยนี้ไปใช้ในการพัฒนาการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ตัดในอุตสาหกรรมงานโลหะแผ่น ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดต้นทุนการผลิตและช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์

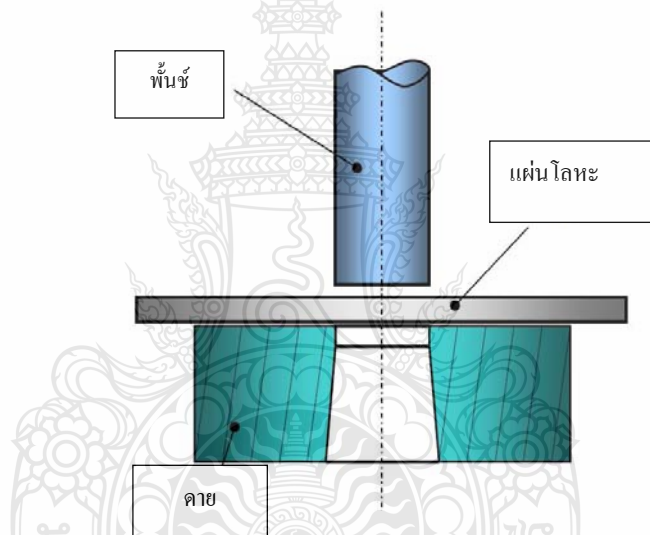
4.5 เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมแม่พิมพ์ตัดและเป็นแนวทางเพื่อนำข้อมูลที่เกี่ยวข้องไปประยุกต์ใช้ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกลไกในการตัด (Blanking Mechanism)

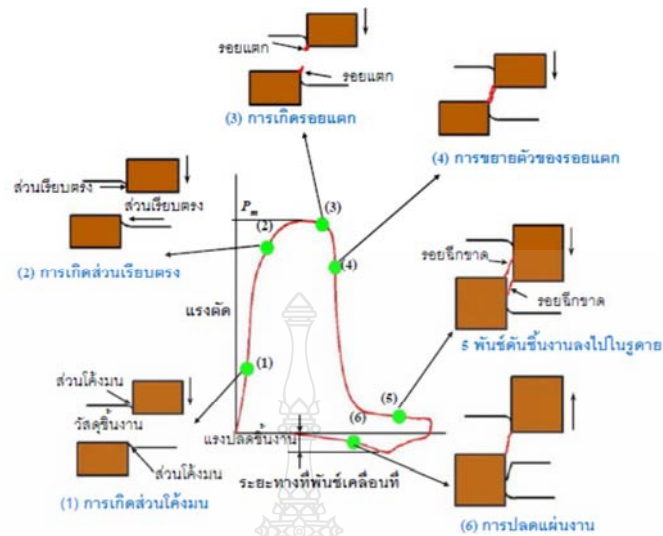
กระบวนการตัดคือ การตัดโลหะออกจากกันโดยใช้คมตัดของพUNCHและคายนกลงบนเนื้อโลหะจนเลยจุดความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Strength) ของโลหะ ซึ่งจะทำให้โลหะฉีกขาดออกจากกัน



รูปที่ 2.1 การตัดชิ้นงานด้วยพUNCHและคายน

ที่มา: ชาญชัย ทรัพย์ากรณ์ และคณะ

ขั้นตอนในการตัดเริ่มจากการที่พUNCHกดลงบนโลหะ และพาเนื้อโลหะไหลเข้าไปในช่องว่างของคายนจนเลยจุดขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limits) ของโลหะ ช่วงนี้ผิวทางด้านล่างของโลหะเริ่มย้อยเข้าไปในคายน และผิวทางด้านบนก็จะถูกพUNCHกดลง เมื่อแรงกดเพิ่มขึ้น พUNCHจะเจาะเข้าไปในเนื้อของโลหะ โดยความลึกของส่วนที่ถูกกดทางผิวด้านบนจะเท่ากับส่วนที่ถูกกดลงในคายนทางผิวด้านล่างเมื่อขนาดแรงกดของพUNCHเพิ่มขึ้นจนเลยจุดความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength) ของโลหะแล้ว โลหะจะฉีกขาดออกจากกัน รายละเอียดของขั้นตอนดูได้จากรูปที่ 2.2 [1]



รูปที่ 2.2 ลำดับขั้นตอนของการตัดโลหะ

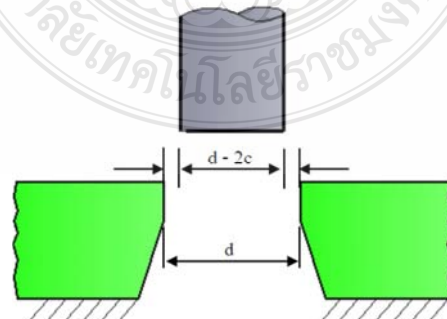
จากรูปที่ 2.2

- พื้นที่เริ่มกดลงบนเนื้อโลหะ
- พื้นที่เพิ่มแรงกดลงบนเนื้อโลหะ
- โลหะเริ่มฉีกตัว
- การฉีกขาดของโลหะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง
ที่มา: ชาญชัย ทรัพย์ากรณ์ และคณะ

2.2 งานตัด (Shearing)

การตัดโลหะ แบ่งได้ 2 แบบ คือ การตัดแบบเปิด เช่น การตัดที่คล้ายกับตัดด้วยกรรไกร และการตัดแบบปิด ผู้วิจัยขอกล่าวลักษณะของงานตัดที่ถูกตัดขาด 2 ลักษณะงาน คือ

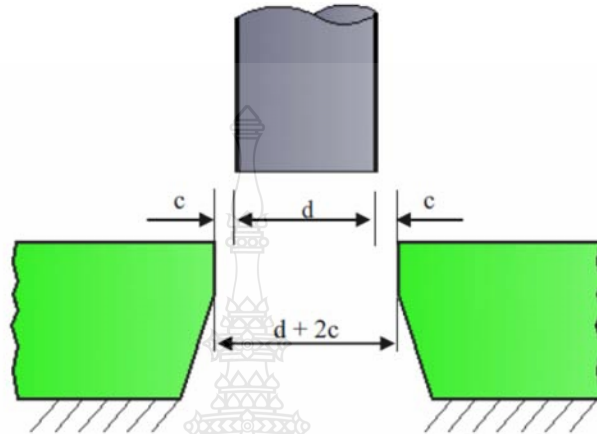
2.2.1 การตัดที่ต้องการนำส่วนที่ถูกตัดไปแปรสภาพเป็นชิ้นงาน (Blanking) เป็นงานตัดที่ต้องการนำส่วนที่ถูกตัดไปแปรสภาพเป็นชิ้นงานต่อไป (ส่วนที่หล่นลงไป) โดยส่วนที่ถูกตัดมีรูปร่างตามแม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการตัดที่ต้องการนำส่วนที่ถูกตัดไปแปรสภาพเป็นชิ้นงาน

ที่มา: มาโนชริทินโย

2.2.2 การตัดเจาะรูเพื่อนำรูไปใช้งาน (Piercing) เป็นการตัดเจาะรูเพื่อนำรูไปใช้งานต่างจากการตัดที่ต้องการนำส่วนที่ถูกตัดไปแปรสภาพเป็นชิ้นงาน คือการตัดเจาะรูเพื่อนำรูไปใช้งาน เป็นการนำรูไปใช้งาน คือส่วนที่วางอยู่บน คาย ส่วนที่หล่นลงไปคือ เศษ แสดงดังรูปที่ 2.4[2]



รูปที่ 2.4 แสดงการตัดเจาะรูเพื่อนำรูไปใช้งาน

ที่มา : มาโนชริทินโย

2.3 ขอบตัดของชิ้นงาน

ขอบตัดของชิ้นงานที่ได้จากการตัดโดยใช้แม่พิมพ์จะมีลักษณะเฉพาะ ซึ่งขอบของการตัดจะเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขของการตัด และสามารถบ่งบอกได้ว่าเงื่อนไขการตัดที่กำหนดไว้เหมาะสมหรือไม่อย่างไร ขอบตัดของชิ้นงานสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ส่วนต่างๆของขอบตัดของชิ้นงาน

ที่มา: วารุณี เปรมานนท์และพงศ์พันธ์ แก้วดาทิพย์

1. ส่วนโค้งมน (Die Roll หรือ Rollover) เป็นการเปลี่ยนรูปของขอบตัดเนื่องจากเนื้อชิ้นงานถูกดึงในช่วงแรกของการตัด การเกิดส่วนโค้งมนมีข้อเสียคือ ทำให้ความหนาของชิ้นงานบริเวณขอบตัดน้อยลงเมื่อเทียบกับความหนาของแผ่นชิ้นงานเริ่มต้น โดยเฉพาะกรณีการเจาะรูเพื่อร้อยอุปกรณ์ยึด การเกิดส่วนโค้งมนจะทำให้สูญเสียพื้นที่ในการยึดบริเวณรอบๆ และทำให้ความแข็งแรงของคาร์ยัดต่ำลง

2. ส่วนเรียบตรงหรือส่วนตัดเฉือน (Smooth Sheared Surface หรือ Burnished Surface) เป็นส่วนที่เกิดจากคมตัดของพันทัดและคายที่เฉือนลงบนชิ้นงานจนได้ผิวเรียบ เป็นส่วนที่ให้ขนาดของชิ้นงานเหมือนกับที่ออกแบบไว้ และเป็นส่วนที่ต้องการให้มีมากที่สุด โดยเฉพาะการตัดที่มีความเที่ยงตรงสูง เช่น งานตัดละเอียด (Fine Blanking) ที่ต้องการขอบตัดที่มีส่วนเรียบตรงเกือบทั้งหมด โดยไม่มีรอยแตก

3. ส่วนที่เป็นรอยแตกหรือรอยฉีกขาด (Fractured Surface) เนื่องจากในกระบวนการตัดต้องทำให้วัสดุขาดออกจากกัน ซึ่งการขาดของวัสดุเกิดจากความเค้นดึงมีค่าสูงเกินขีดจำกัดที่วัสดุสามารถรับได้ ทำให้เกิดการแตกของเนื้อวัสดุก่อนที่จะถูกคมตัดของพันทัดและคายเฉือน รอยแตกดังกล่าวจะมีความขรุขระ ไม่เรียบและไม่ได้ฉาก

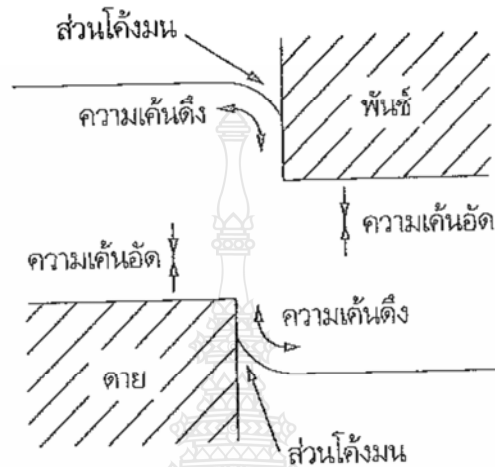
4. ครีบ (Burr) หรือบางครั้งเรียกว่า เลี้ยน เกิดขึ้นที่ขอบถัดจากรอยแตก ครีบเป็นเนื้อโลหะบางๆ ที่มีความคม ขนาดของครีบขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการตัด คือ ช่องว่างแม่พิมพ์หรือระยะเคลียแรนซ์ (Clearance) และสมบัติของวัสดุ ครีบของขอบตัดจะมีความแข็งแรงและคมมาก อาจทำให้เกิดอันตรายเมื่อสัมผัส และกรณีที่ต้องการนำชิ้นงานตัดไปใช้ในการผลิตหรือประกอบเป็นชิ้นส่วนอื่นๆ ครีบอาจเป็นอุปสรรคที่ทำให้ชิ้นงานดังกล่าวไม่สามารถนำไปให้ต่อได้ จึงจำเป็นต้องกำจัดครีบออกก่อน ซึ่งต้องใช้วิธีเฉพาะที่มีหลายรูปแบบอาจเรียกโดยรวมว่า “ดีเบอร์ริง (Deburring)” ซึ่งจะส่งผลการผลิตสูงขึ้น ดังนั้นบางกรณี ขนาดของครีบที่ยอมรับได้จะเป็นเกณฑ์ที่สำคัญในการกำหนดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ตัด กลไกหรือสาเหตุของการเกิดครีบจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

และเมื่อรวมความสูงของทั้ง 4 ข้อเข้าด้วยกัน จะต้องได้เท่ากับความหนาของวัสดุชิ้นงาน ส่วนครีบจะเป็นส่วนที่เกินออกจากความหนาเดิมของชิ้นงาน

2.3.1 กลไกหรือสาเหตุของการเกิดส่วนโค้งมน

กลไกหรือสาเหตุของการเกิดส่วนโค้งมนสามารถอธิบายได้ดังนี้ พิจารณารูปที่ 2.6 เมื่อพันทัดเริ่มต้นกดชิ้นงานลงไปในคาย เนื้อชิ้นงานบริเวณใต้พันทัดและเหนือคายจะมีความเค้นดึงเกิดขึ้น และถูกดึงให้ไหลตามการเคลื่อนที่ของพันทัดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปลักษณะคล้ายกันงาน ซึ่งก็คือส่วนโค้งมนขึ้น นอกจากนั้น การเกิดส่วนโค้งมนยังสามารถอธิบายได้โดยรูปที่ 2.7 นั่นคือ กรณีที่

ช่องว่างแม่พิมพ์เป็นศูนย์ (ไม่มีเคลือบเรณู) รูปที่ 2.7 (ก) เนื้อวัสดุที่เติมเต็มได้พอดีไม่เกิดสถานะที่เนื้อวัสดุไม่พอเหมือนกับรูปที่ 2.7 (ข) ที่ช่องว่างแม่พิมพ์เป็นบวกจะเห็นได้ว่าในบริเวณ A ที่ลูกศรชี้ (ที่แรงเสียดทาน) จะเกิดช่องโหว่ขึ้นเนื่องจากเนื้อวัสดุไม่พอ จึงมีส่วนโค้งมนเกิดขึ้นทั้งในส่วนของขอบตัดฝั่งรูปและฝั่งชิ้นงานนั่นเอง



รูปที่ 2.6 ความเค้นในเนื้อวัสดุระหว่างกระบวนการตัด
ที่มา: วารุณี เปรमानนท์และพงศ์พันธ์ แก้วตาพิพย์



(ก) กรณีไม่มีเคลือบเรณู

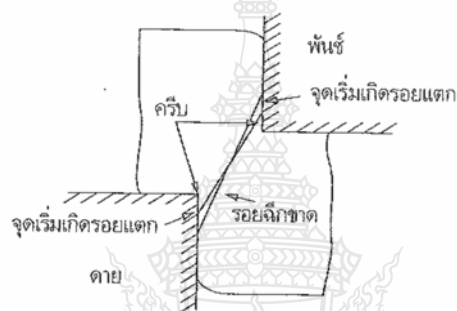
(ข) กรณีเคลือบเรณูเป็นบวก

รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดส่วนโค้งมน

ที่มา: วารุณี เปรमानนท์และพงศ์พันธ์ แก้วตาพิพย์

2.3.2 กลไกหรือสาเหตุการเกิดครีบก

จากหลักการและขั้นตอนของการตัดอไบยังไว้เบื้องต้น จะเริ่มเกิดรอยแตกในเนื้อวัสดุจะไม่ได้เกิดตรงขอบตัดพอดี แต่จะเกิดขึ้นเหนือขอบตัดเล็กน้อยดังรูปที่ 2.8 เนื่องจากจะเกิดความเค้นดึงสูงสุดขึ้นตรงจุดดังกล่าว ดังนั้นเมื่อรอยแตกในเนื้อวัสดุจากด้านพื้นซ์และคายมาบรรจบกัน ก็จะทำให้วัสดุแยกออกจากกัน ส่วนเนื้อวัสดุบริเวณด้านข้างของคมตัดจะยังเหลืออยู่ที่ขอบตัด ส่วนนี้ก็คือครีบกที่เกิดขึ้นนั่นเอง โดยทั่วไปเมื่อช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคายเพิ่มมากขึ้น หรือเมื่อคมตัดของพื้นซ์และคายเกิดการสึกหรอ ตำแหน่งที่เริ่มเกิดรอยแตกจะห่างจากคมตัดมากขึ้น ทำให้เนื้อวัสดุที่เหลือบนขอบตัดหรือครีบกมีขนาดใหญ่มากขึ้น [3]

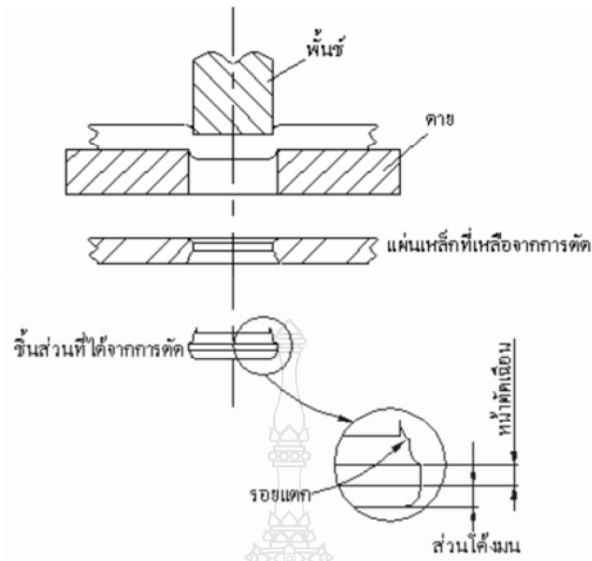


รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดครีบก

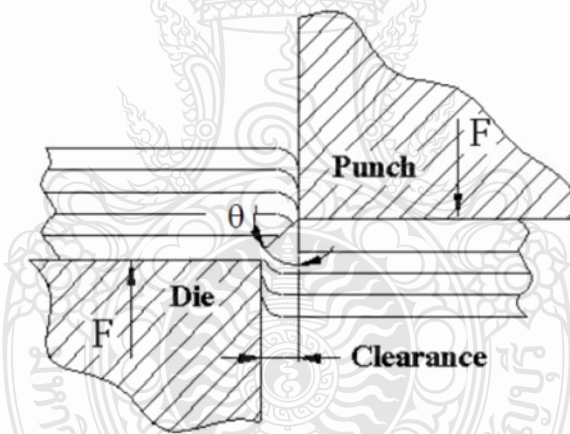
ที่มา: วารุณี เปรมานนท์และพงศ์พันธ์ แก้วดาทิพย์

2.4 ระยะช่องว่างระหว่างคมตัด (Cutting Clearance)

ช่องว่างคมตัดระหว่างพื้นซ์และคาย (Clearance) มีผลต่อการตัดโลหะแผ่นของแม่พิมพ์มาก ถ้าเลือกใช้ขนาดของช่องว่างคมตัดไม่เหมาะสมจะมีผลทำให้การผลิตชิ้นงานออกมาไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการ หรืออาจทำให้พื้นซ์และคายที่ใช้สึกหรอเร็วกว่าปกติ ขนาดของช่องว่างคมตัดระหว่างพื้นซ์และคาย มักจะเรียกกันในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของความหนาของโลหะแผ่นที่ใช้ในการตัด และผลจากการตัดจะมีลักษณะของรอยตัดที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 รูปร่างหน้าตัดเฉือน
ที่มา: จุลศิริ ศรีงามพ่อง



รูปที่ 2.10 ทิศทางของรอยฉีกขาด
ที่มา: จุลศิริ ศรีงามพ่อง

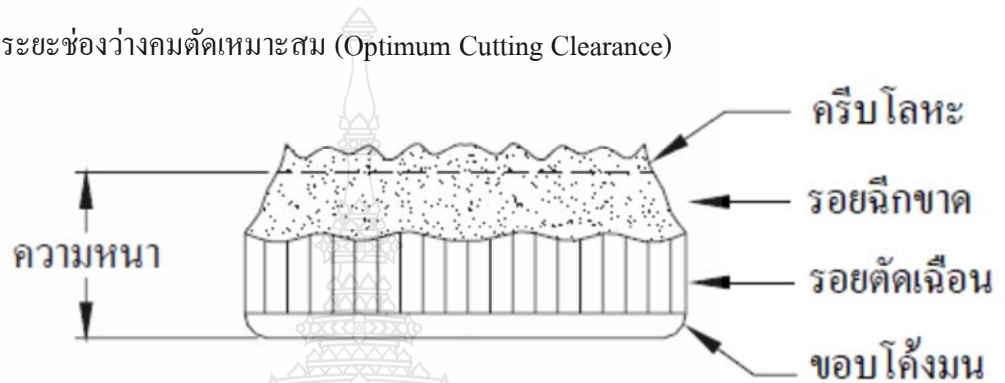
ในรูปที่ 2.10 เมื่อพินช์กดลงมารอยแตกจะขยายยาวขึ้น จนกระทั่งรอยแตกที่เกิดขึ้นที่ขอบคมตัดของพินช์และคายนจะมาบรรจบกันทำให้ขบวนการตัดเสร็จสิ้นสมบูรณ์ รอยแตกที่เกิดขึ้นจะทำมุม θ กับทิศทางกดของพินช์ ระยะห่างของจุดเริ่มต้นรอยแตกทั้งสองข้างจะมีขนาดเท่ากับระยะช่องว่างคม

ตัดที่ใช้ ถ้าพินซ์และคายมีช่องว่างคมตัดเหมาะสมกับคุณสมบัติและความหนาของโลหะแล้ว รอยแตกทั้งสองด้านจะมาบรรจบกันพอดี ทำให้เกิดแรงต้านทานของชิ้นงานเกิดขึ้นน้อยที่สุด

2.4.1 อิทธิพลของช่องว่างคมตัดที่มีต่อชิ้นงาน

ผลที่เกิดจากการกำหนดช่องว่างระหว่างคมตัดในลักษณะต่าง ๆ (Effects of Cutting Clearance) ระยะช่องว่างระหว่างพินซ์และคายที่เหมาะสมสามารถดูจากสภาพรอยตัดของชิ้นงานได้ดังนี้

1. กรณีที่ระยะช่องว่างคมตัดเหมาะสม (Optimum Cutting Clearance)



รูปที่ 2.11 ลักษณะชิ้นงานจากการกำหนดระยะช่องว่างคมตัดที่เหมาะสม

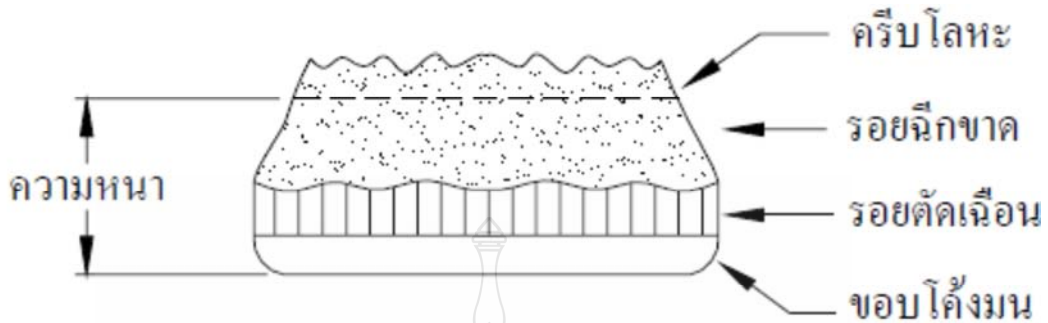
ที่มา: จุลศิริ ศรีงามผ่อง

จากรูปที่ 2.11 เป็นชิ้นงานหรือเศษที่ได้จากสภาพการตัดที่เหมาะสม จากสภาวะในขั้นตอนแรกของการเปลี่ยนรูป (Plastic Deformation) ระหว่างการตัดจะทำให้เกิดขอบโค้งมน (Edge Radius) ขึ้นที่ขอบของชิ้นงาน รอยตัดเฉือน (Shear Surface) ซึ่งเป็นแนวตรงมีลักษณะเงามัน เกิดจากสภาวะการตัดในขั้นตอนที่ 2 คือการกดลึก (Penetration) ความกว้างของรอยตัดเฉือนจะมีขนาดประมาณ 1/3 ของความหนาวัสดุและส่วนของรอยฉีกขาดเกิดจากปฏิกิริยาการตัดในขั้นตอนที่ 3 เป็นลักษณะของรอยแตกหรือการฉีกขาด (Fracture Surface) และขั้นตอนที่ 4 เกิดขึ้นหลังจากการเกิดรอยแตกจะเป็นส่วนของการเกิดครีบล (Burr) ซึ่งตัวแปรที่ส่งผลต่อการเกิดครีบลคือตำแหน่งเริ่มต้นของการเกิดรอยแตกขณะการตัดชิ้นงาน ซึ่งครีบลจะเกิดขึ้นปานกลาง

2. กรณีของระยะช่องว่างคมตัดมากเกินไป (Excessive Cutting Clearance)

ผลที่เกิดจากการใช้ช่องว่างคมตัดระหว่างพินซ์และคายมากเกินไป จากการเปรียบเทียบการใช้ระยะช่องว่างคมตัดระหว่างพินซ์และคายให้มากที่สุดเท่าที่จะทำการตัดวัสดุได้นั้น ผลที่ได้จาก

ปฏิกิริยาการตัดในขั้นตอนแรกจะเหมือนการขึ้นรูปมากกว่าการตัด ขอบโค้งมนของชิ้นงานจะใหญ่ และรอยตัดเฉือนจะแคบและไม่ราบเรียบสม่ำเสมอมีลักษณะเป็นรอยขรุขระดังรูปที่ 2.12

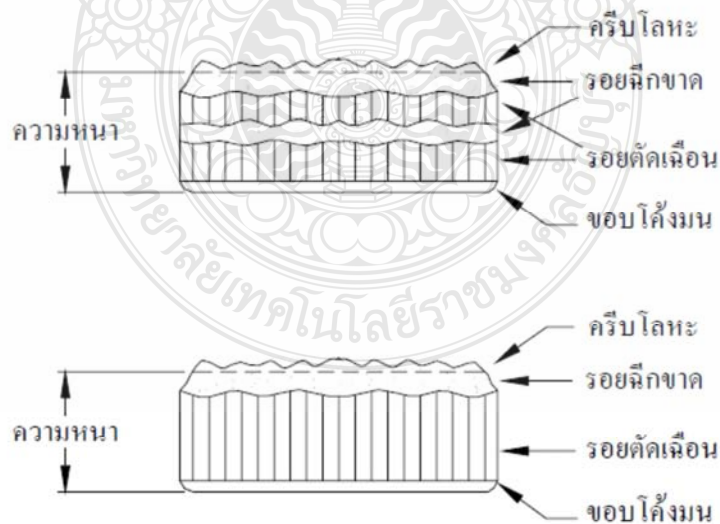


รูปที่ 2.12 ลักษณะชิ้นงานจากการกำหนดระยะช่องว่างคมตัดที่มากเกินไป
ที่มา: จุลศิริ ศรีงามพ่อง

รอยฉีกขาดจะกว้าง เนื่องจากการฉีกขาดและอาจจะแผ่ขยายมาถึงรอยตัดเฉือนและตรงมุม ทำให้เกิดเสี้ยนหรือครีปโลหะ (Burr) ขึ้นที่ขอบรอยตัดสูง

3. กรณีที่ระยะช่องว่างคมตัดน้อย (Insufficient Cutting Clearance)

แสดงผลที่เกิดจากช่องว่างคมตัดระหว่างฟันซ์และคายน้อยไป สภาพของรอยตัดเฉือน จะมีรอยกว้างไม่สม่ำเสมอและอาจเกิดขึ้นมากกว่า 1 แห่งดังรูปที่ 2.13

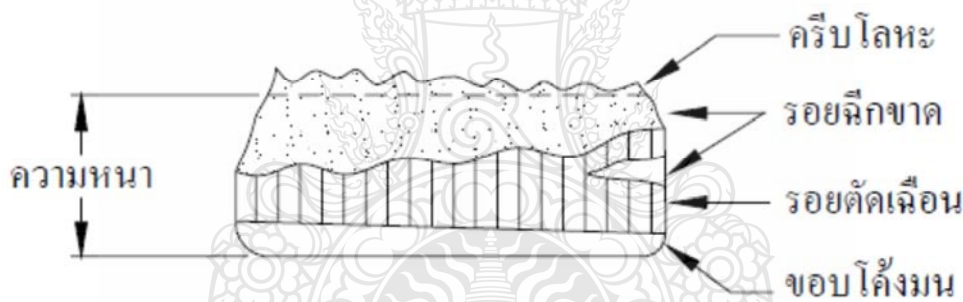


รูปที่ 2.13 ลักษณะชิ้นงานจากการกำหนดระยะช่องว่างที่น้อยเกินไป
ที่มา: จุลศิริ ศรีงามพ่อง

เนื่องจากมุมที่สูงชันมากเกินไประหว่างพินซ์และคาย เป็นอุปสรรคต่อการฉีกขาดของวัสดุเพิ่มมากขึ้นทำให้ต้องใช้แรงกดในการฉีกวัสดุในขั้นแรกสูงกว่าปกติ ถ้ารอยแตกขยายยาวออกไปแต่ไม่บรรจบกันทำให้รอยฉีกของวัสดุไม่สมบูรณ์เกิดเป็นบางส่วนเท่านั้น แรงกดที่ยังคงมีอยู่ที่พินซ์จะเป็นสาเหตุ ทำให้เกิดการฉีกครั้งที่สองขึ้นผลก็คือทำให้เกิดรอยตัดฉีกครั้งที่สองเกิดขึ้นที่รอยตัดชิ้นงาน

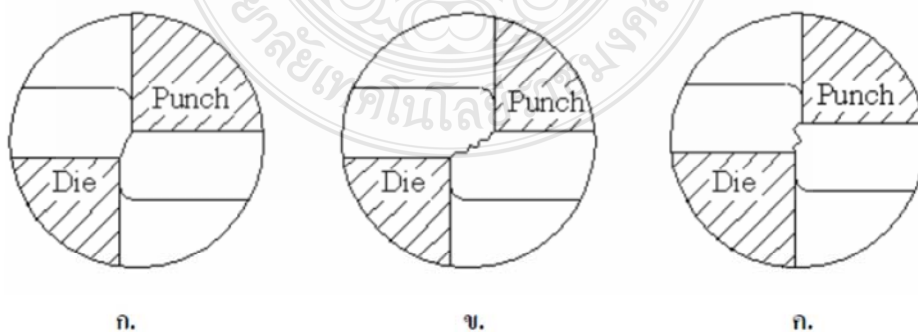
4. ตำแหน่งพินซ์และคายเยื้องศูนย์กลางกัน

จากตำแหน่งของพินซ์และคายที่เยื้องศูนย์กลางกันและกันจะทำให้พินซ์และคายจะได้รับแรงไม่เท่ากันทุกจุด ทำให้รอยตัดของชิ้นงานมีลักษณะไม่เหมือนกันทุกด้าน คือด้านหนึ่งอาจจะมีลักษณะแบบเดียวกับชิ้นงานที่ได้จากการกำหนดระยะช่องว่างคมตัดน้อยเกินไป ส่วนอีกด้านจะเกิดในลักษณะการกำหนดระยะช่องว่างคมตัดมากเกินไป ซึ่งจะส่งผลให้อายุการใช้งานของพินซ์และคายสั้นลง สาเหตุของการเยื้องศูนย์กลางของพินซ์และคายอาจเกิดจากความไม่เที่ยงตรงของเครื่องจักรในการขึ้นรูป หรือเกิดจากการผลิตแม่พิมพ์ที่ไม่เที่ยงตรง ในการทางานกับแม่พิมพ์ตัดสามารถตรวจพบและแก้ไขตำแหน่งการเยื้องศูนย์กลางได้ระหว่างการใช้งาน



รูปที่ 2.14 ลักษณะชิ้นงานที่เกิดจากตำแหน่งของพินซ์และคายที่เยื้องศูนย์กลาง

ที่มา: จุลศิริ ศรีงามพอง



รูปที่ 2.15 ลักษณะรอยตัดฉีกในแบบต่างๆ ตามขนาดระยะช่องว่างคมตัด

(ก) ลักษณะรอยตัดฉีกของขนาดระยะช่องว่างคมตัดที่เหมาะสม

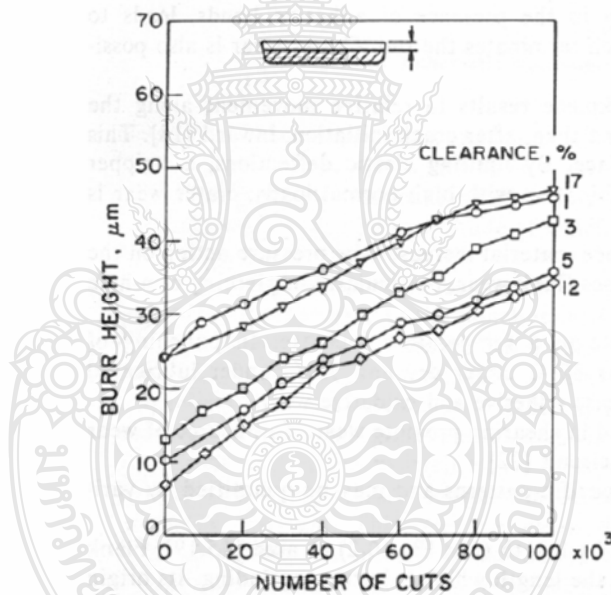
(ข) ลักษณะรอยตัดเฉือนของขนาดระยะช่องว่างคมตัดที่มากเกินไป

(ค) ลักษณะรอยตัดเฉือนของขนาดระยะช่องว่างคมตัดที่น้อยเกินไป

ที่มา: จุลศิริ ศรีงามผ่อง

เสี้ยนหรือครีบลโลหะที่เกิดขึ้นบนขอบตัดชิ้นงานอันเนื่องมาจากการใช้ช่องว่างระหว่างคมตัดน้อย จะแตกต่างกับชิ้นงานที่ได้จากการกำหนดระยะช่องว่างระหว่างคมตัดมาก เพราะถ้าหาระยะช่องว่างระหว่างคมตัดมาก ครีบลโลหะจะเกิดจากการดึงเนื้อโลหะให้ขาดจากกัน แต่ช่องว่างคมตัดน้อย ครีบลโลหะจะเกิดจากแรงกดที่ทำให้เนื้อโลหะขาดออกจากกัน

ตามทฤษฎีของ Schey ซึ่งได้กล่าวไว้ว่าความสูงครีบที่เพิ่มขึ้นนอกจากอิทธิพลของช่องว่างคมตัดที่เพิ่มขึ้นแล้วยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการเกิดครีบเช่นกัน เช่นลักษณะของคมตัดและ คุณสมบัติของวัสดุชิ้นงาน เป็นต้น ซึ่งแนวโน้มของการเกิดครีบที่ระดับช่องว่างคมตัดต่างๆ ดูได้จากรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบค่าความสูงครีบ

ที่มา: จุลศิริ ศรีงามผ่อง

ในส่วนของการโค้งมนที่เกิดบนรอยตัดชิ้นงาน ชิ้นงานที่ได้จากแม่พิมพ์ที่มีช่องว่างคมตัดมาก จะเกิดส่วนโค้งมนสูง [4]

2.5 การเลือกขนาดของช่องว่างระหว่างพันธและคาย

การเลือกขนาดของช่องว่างระหว่างพันธและคายที่จะใช้ขึ้นอยู่กับผลสุดท้ายที่ต้องการจะได้รับการใช้ขนาดของช่องว่างมากกว่า 15% ทำให้ไม่ต้องคำนึงถึงแนวศูนย์กลาง (alignment) ของเครื่องปั๊มโลหะกับคายมากนักและมีโอกาสน้อยมากที่คมตัดของพันธและคายจะกระทบกัน แต่อย่างไรก็ตามการเกิดส่วนโค้งมนมากอาจจะไม่เป็นที่ต้องการก็ได้ การใช้ขนาดของช่องว่างน้อยกว่า 10% นั้นได้ถูกใช้เพื่อทำให้เกิดรอยตัดเฉือนที่สองขึ้นมา เพื่อต้องการให้ได้รับขอบที่เต็มของชิ้นงานที่ถูกตัด การใช้ขนาดของช่องว่างที่น้อยจะเป็นสาเหตุทำให้ขอบคมตัดของพันธและคายสึกหรออย่างมากเนื่องจากการตัดเฉือนขอบของชิ้นงานมากขึ้น และโลหะที่ถูกตัดจะไปติดอยู่ที่แท่งพันธและคาย จึงต้องเพิ่มแรงผลักดันชิ้นส่วนที่หลุดออกมาจากการตัดให้หลุดออกไปจากรูของแท่งคาย โดยต้องใช้แรงดันแผ่นชิ้นงานให้หลุดออก (Stripping force) อย่างมากเพื่อดันเอาแผ่นชิ้นงานออกจากแท่งพันธ

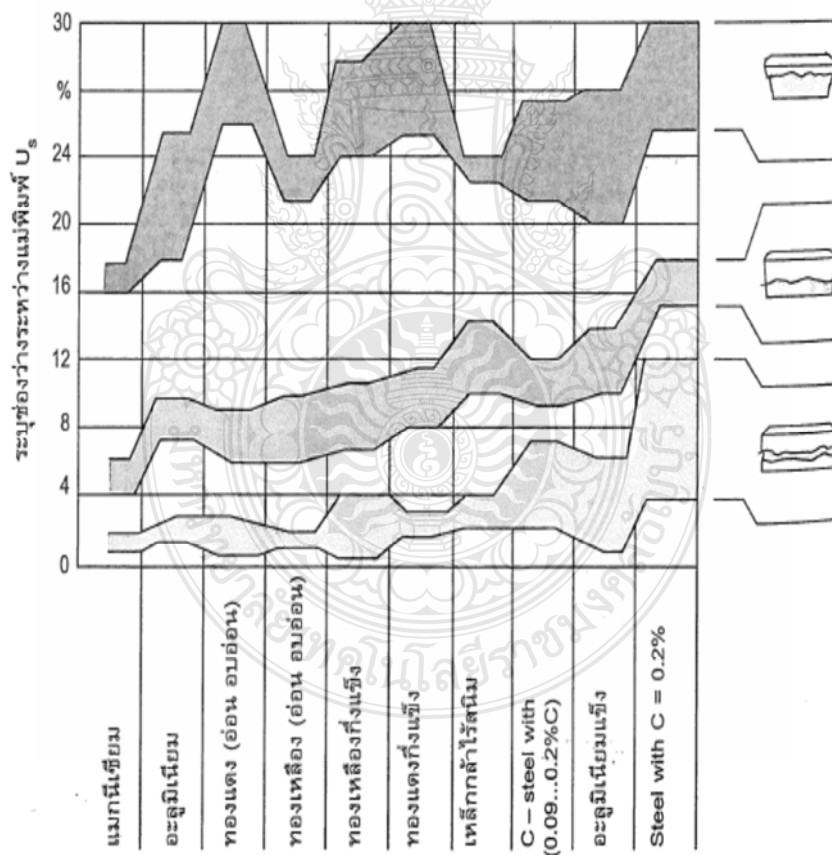
การใช้ขนาดของช่องว่างที่เหมาะสม (Proper clearance) จะทำให้ได้ขอบของชิ้นงานที่ถูกตัดเรียบ และได้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนตัดเฉือนตามที่ระบุไว้ในพิมพ์เขียว นอกจากนั้นยังไม่เกิดความยุ่งยากในการตัดชิ้นงานบนคายขนาดของช่องว่างที่เหมาะสมหมายถึงขนาดของช่องว่างระหว่างพันธและคายที่กำหนดขึ้นมาใช้ โดยมีการเกิดส่วนโค้งมนที่ขอบของชิ้นงานเกิดขึ้นน้อยที่สุดและไม่มีรอยตัดเฉือนที่สองเกิดขึ้น การหาขนาดของช่องว่างที่เหมาะสมทำได้โดยวิธีการลองผิดลองถูกไม่มีสูตรหรือตารางกำหนดขนาดของช่องว่างที่แน่นอนขึ้นใช้ หลักการต่างๆ ไปในการกำหนดขนาดของช่องว่างระหว่างพันธและคายที่เหมาะสม มีดังนี้

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

2. การคำนวณหาขนาดช่องว่างแม่พิมพ์ [5]

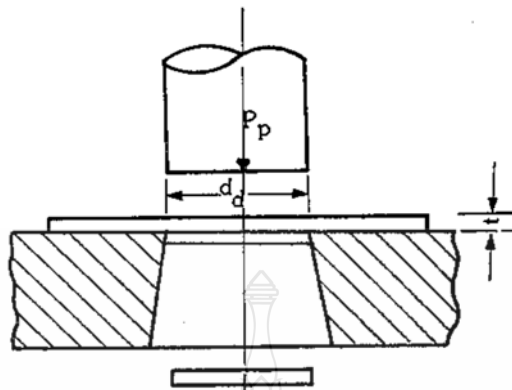
$$U_s = CS\sqrt{\tau_\beta}$$

- เมื่อ U_s คือช่องว่างแม่พิมพ์ตัด (mm)
 s คือความหนาของชิ้นงาน (mm)
 τ_β คือความแข็งแรงเฉือน ($\tau_\beta = 0.8 R_m$)
 C คือค่าสัมประสิทธิ์ของแม่พิมพ์
 $C = 0.005$ (ผิวสำเร็จดี)
 $C = 0.035$ (แรงตัดต่ำ)
 $C = 0.015 - 0.018$ (วัสดุเครื่องมือ)



รูปที่ 2.17 แสดงความเปรียบเทียบคุณภาพผิวชิ้นงานในระดับช่องว่างแม่พิมพ์กับวัสดุต่างๆ
 ที่มา: สิริชัย ต่อสกุล และอนุชา วัฒนา

2.6 การคำนวณหาแรงตัด (Cutting Force)



รูปที่ 2.18 แรงตัด

ที่มา: ชาญชัย ทรัพย์ากรณ์ และคณะ

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกลของโลหะชนิดต่าง

MATERIAL	SHEAR		TENSILE		PENETRATION
	STRENGTH		STRENGTH		
	SOFT	HARD	SOFT	HARD	
LEAD	2 - 3	-	2.5 - 4	-	50
TIN	3 - 4	-	4 - 5	-	40
ALUMINUM	7 - 11	13 - 16	8 - 12	17	60 - 30
DURALUMIN	22	38	26	-	-
ZINC	12	20	15	22	50 - 25
				48	
				25	

SPN 1	8	26 UP	26 UP	28 UP	28	60 - 38
SPN 1	3	26 UP	28 UP	28 UP	UP	60 - 38
MILD STEEL , DEEP	30 - 35	-		32 - 28	28	60 - 38
DRAWING	27 - 36	27 - 36	33 - 44	UP	40 - 28	
SS 34	33 - 42	33 - 42	41 - 52	-	40 - 28	
SS 41					33	
					-	
					44	
					33	
					-	
					44	
STEEL 0.1%C	25	32	34	40	50 - 38	
STEEL 0.2%C	32	40	40	50	40 - 28	
STEEL 0.3%C	36	48	45	60	33 - 22	
STEEL 0.4%C	45	56	56	72	27 - 17	
STEEL 0.6%C	56	72	72	90	20 - 9	
STEEL 0.8%C	72	60	90	110	15 - 5	
STEEL 1.0%C	80	105	100	130	10 - 2	
STAINLESS STEEL	52	56	65 - 70	-	-	
NICKEL	25	-	44 - 50	57 -	55	
					63	
MIC t = 0.5 mm.	8				-	
MIC t = 2	5				-	
FIBRE		9 - 18			-	

Penetration คือ ระยะที่ punch กดเข้าไปในเนื้อโลหะก่อนที่โลหะจะขาดออกจากกัน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับความหนาของโลหะ

สูตรการคำนวณหาแรงตัด

$$P_p = A \sigma_s \frac{1}{1000}$$

เมื่อ P_p = แรงตัด (ตัน)

A = พื้นที่ของส่วนที่ถูกตัด (ตารางมิลลิเมตร)

σ_s = shearing strength (กิโลกรัม/มิลลิเมตร²)

เมื่อ $A = l \times t$

l = ความยาวของส่วนที่ถูกตัด (มม.)

t = ความหนาของชิ้นงาน (มม.)

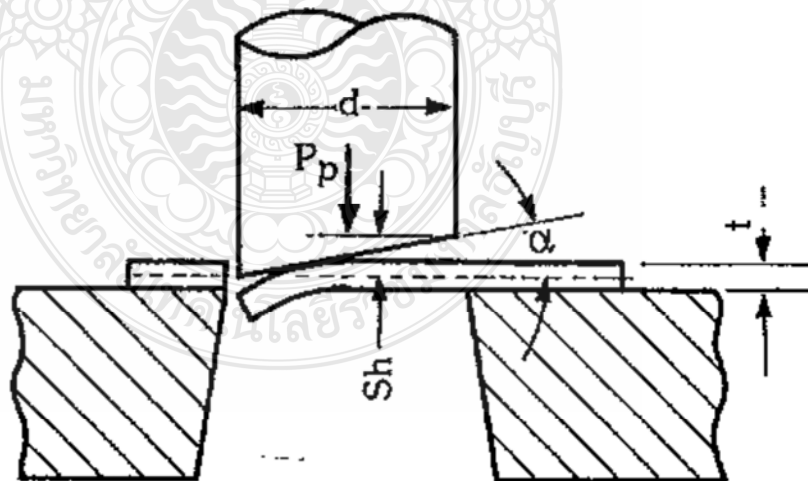
ในกรณีของการตัดรูกลม (ตัดเจาะ)

$$P_p = d\pi t \sigma_s \frac{1}{1000}$$

เมื่อ d = เส้นผ่านศูนย์กลางของรู

2.6.1 การลดแรงในการตัด (Reduction of Shearing Force)

ในการตัดทั่วไปนั้นผิวหน้าของคมตัดของ Punch และ Die จะเป็นแบบเรียบหรือแบบขนานกัน ซึ่งแบบนี้จะใช้แรงในการตัดมาก เพราะการตัดเกิดขึ้นพร้อมกันทุกจุด เราสามารถที่จะลดแรงในการตัดได้ โดยการออกแบบแบบคมตัดของ Punch และ Die ให้มีความเอียงลาดเพื่อที่จะทำให้การตัดเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน ซึ่งแรงที่ใช้ตัดจะลดลงไปด้วย [1]



รูปที่ 2.19 การลดแรงตัด

ที่มา: ชาญชัย ทรัพย์ากรณ์ และคณะ

สูตร

$$P_{ps} = P_p \frac{t f_p}{S_h}$$

P_{ps} = แรงตัดที่เกิดจากการลดมุม Shear (ตัน)

t = ความหนาของชิ้นงาน (มม.)

f_p = ดูจากตารางที่ 2.3 และ 2.4

f_p = ระยะที่ Punch กดเข้าไปในเนื้อโลหะก่อนที่จะขาดออกจากกัน

S_h = ระยะความเอียงของคมตัด (มม.)

ในกรณีการตัดเป็นรูปกลม

$$P_{ps} = \pi t^2 \sigma_s \cot \alpha \frac{1}{1000}$$

α = shear angle

และ $\tan \alpha = \frac{S_h}{d}$

ตารางที่ 2.2 เปอร์เซ็นต์ penetration ของ steel

MATERIAL	IN.	1	3/4	5/8	1/2	3/8	5/16	1/4	3/16	1/8	3/32	1/16	1/32
THICKNESSES						8	6	4	6	8	2	6	2
S	MM	25.	19.	15.	12.	9.	7.9	6.	4.8	3.	2.4	1.6	0.8
	.	4	1	9	7	5		4		2			
PENETRATION %		25	31	35	37	44	47	50	56	62	67	75	87

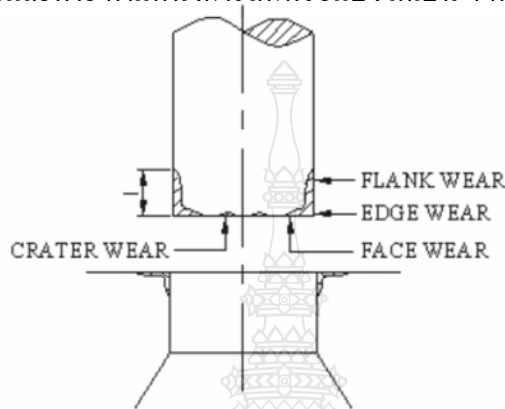
ตารางที่ 2.3 เปอร์เซ็นต์ penetration ของ steel แบ่งตามค่าของ shearing strength

MATERIAL	THICKNESS (mm)			
	UPTO 1	1 - 2	2 - 4	4 AND OVER
STEEL				
($\sigma_s = 50 - 70 \text{ kg/mm}^2$)	75 - 70	70 - 65	65 - 55	50 - 40
($\sigma_s = 50 - 70 \text{ kg/mm}^2$)	65 - 60	60 - 55	55 - 48	45 - 35
($\sigma_s = 50 - 70 \text{ kg/mm}^2$)	50 - 47	47 - 45	44 - 38	35 - 25
ALUMINUM	} 80 - 75	} 75 - 70	} 70 - 60	} 65 - 50
COPPER				

$\sigma_s = \text{shearing strength}$

2.7 การสึกหรอของฟันซ์ในงานตัดโลหะแผ่น

การสึกหรอเกิดจากการแยกหลุดของอนุภาคเล็กๆของชุดคมตัดแม่พิมพ์ เมื่อเกิดกระบวนการทางกลหรือทางเคมี พฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญๆ เช่น การสัมผัสกัน ลักษณะการเคลื่อนไหว ภาระการรับภาระการทำงาน การสึกหรอที่เกิดขึ้นในงานตัดเกิดขึ้นในสองจุดที่สำคัญคือ บริเวณฟันซ์และคาย ตำแหน่งการสึกหรอแบ่งได้เป็น 4 ตำแหน่ง แสดงดังรูป 2.20

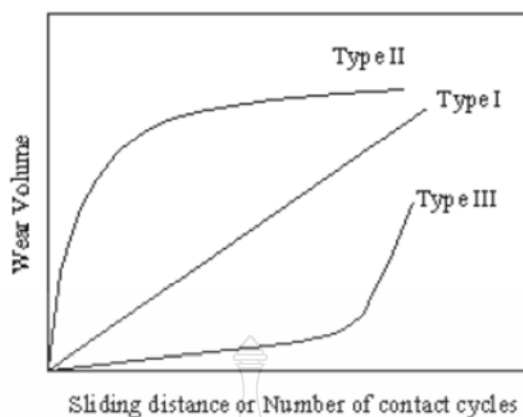


รูปที่ 2.20 แสดงตำแหน่งการสึกหรอของฟันซ์และคาย

ที่มา : ชาญยุทธ มะกะ

การสึกหรอที่เกิดบนแม่พิมพ์ตัดจะเกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆ ดังนี้

1. การสึกหรอด้านข้างแม่พิมพ์ (Flank Wear) จะเกิดตามแนวยาวของฟันซ์ หรือเป็นพื้นที่การสึกหรอบริเวณด้านข้างของฟันซ์ซึ่งมีความสำคัญเพราะจะมีผลต่อขนาดชิ้นงานสำเร็จ เพราะถ้าเกิดการสึกหรอที่บริเวณด้านข้างจะทำให้ขนาดคมตัดของฟันซ์เปลี่ยนไปและจะมีผลทำให้ค่าช่องว่างคมตัดของแม่พิมพ์เปลี่ยนไปด้วย
2. การสึกหรอบริเวณมุมคมตัดฟันซ์ (Edge Wear) จะเกิดขึ้นก่อนการเกิดการสึกหรอบริเวณด้านข้างของฟันซ์ ซึ่งจะมีผลต่อการเกิดครีบบนชิ้นงานเพราะถ้าคมตัดเกิดการสึกหรอการตัดจะไม่สมบูรณ์และจะทำให้เกิดครีบสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อทำการตัดไปปริมาณมากๆ
3. การสึกหรอด้านหน้าคมตัด (Face Wear) เกิดจากการกระแทกซ้ำๆ กับชิ้นงานซึ่งจะทำให้เกิดความล้าขึ้นและจะมีผลมากเมื่อมีการตัดชิ้นงานจำนวนมากๆ
4. การสึกหรอบริเวณศูนย์กลางฟันซ์ (Crater Wear) เกิดจากกระแทกซ้ำๆ ระหว่างผิวหน้าของฟันซ์กับ ผิวชิ้นงานและเกิดจากการยึดหยุ่นของชิ้นงานขณะทำการตัดเนื่องเพราะจะมีการเสียดสีกันระหว่างผิวหน้าของฟันซ์กับผิวของชิ้นงานแนวโน้มการสึกหรอแบ่งรูปแบบได้ 3 ลักษณะ แสดงดังรูป



รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะแนวโน้มการสึกหรอ

ที่มา : ชาญยุทธ มะกะ

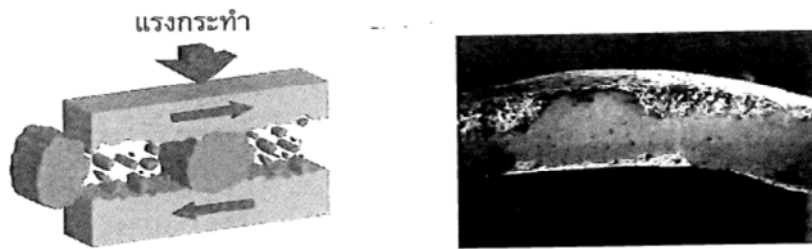
จากรูปที่ แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองการสึกหรอ โดยสามารถแบ่งรูปแบบการสึกหรอ ออกเป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

ลักษณะที่ 1 (type I) เป็นลักษณะของการเกิดอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดการทดลอง

ลักษณะที่ 2 (type II) อัตราการสึกหรอเกิดขึ้นสูงในช่วงแรกจากนั้นอัตราการสึกหรอเริ่มลดลง และมีแนวโน้มคงที่ การสึกหรอแบบนี้เกิดกับวัสดุที่เป็น โลหะ

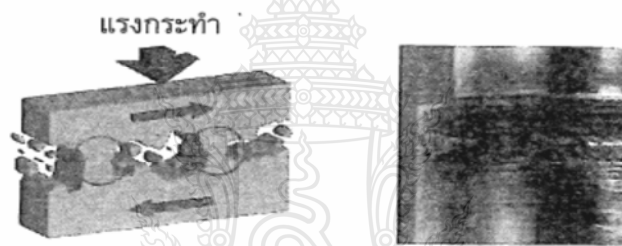
ลักษณะที่ 3 (type III) อัตราการเกิดการสึกหรอจะเกิดขึ้นต่ำในช่วงแรกและเพิ่มสูงขึ้นเมื่อจำนวน [6] การทดลองเพิ่มขึ้นจากการแตกของวัสดุเนื่องจากการล้า การสึกหรอแบบนี้เกิดกับวัสดุที่เป็นเซรามิก การสึกหรอที่เกิดขึ้นกับพันธะเกิดได้ 6 ลักษณะ คือ

1. การสึกหรอแบบการเกาะติด (Adhesive Wear) คือผลเนื่องจากกระบวนการเกาะติดของโลหะซึ่งจะทำให้โลหะเกิดการยึดติดกัน จะเกิดขึ้นเมื่อมีโลหะ 2 อันเสียดสีกัน โดยพื้นผิวที่สัมผัสกัน มีขนาดเล็กมาก จะทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นเท่ากับหรือเกินจุดคราก (Yield Point) ของวัสดุ ถึงแม้ว่าแรงกระทำจะไม่สูงมากก็ตาม และจะทำให้เกิดแรงเกาะกันทางโมเลกุลขึ้น จะมีผลทำให้อนุภาคของวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าถูกดึงหลุดออกมาหรือเนื้อโลหะยึดติดกันได้



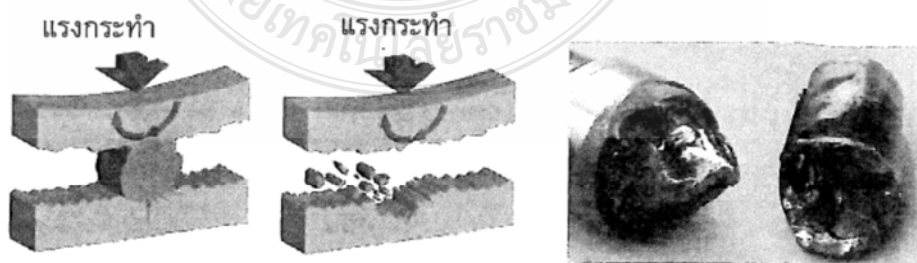
รูปที่ 2.22 ลักษณะการสึกหรอแบบชูดขีด
ที่มา: ศิริชัย ต่อสกุล และอนุชา วัฒนา

2. การสึกหรอแบบขีดข่วน (Abrasive Wear) เกิดขึ้นในลักษณะการขีดข่วน ถู เชื้อน หรือกระแทกซึ่งการกระทำเหล่านี้จะทำให้เนื้อวัสดุหลุดออกไปในลักษณะอนุภาคเล็กๆ



รูปที่ 2.23 ลักษณะการสึกหรอแบบขีดขีด
ที่มา: ศิริชัย ต่อสกุล และอนุชา วัฒนา

3. การสึกหรอเนื่องจากความล้า (Fatigue Wear) เป็นการสึกหรอเนื่องจากการล้าตัวของเครื่องมือตัดเนื่องจากการได้รับการกระแทกซ้ำๆ (Cyclic Load) จะส่งผลให้เครื่องมือตัดเกิดการแตกหรือหลุดออกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย จะทำให้เกิดความเสียหายในลักษณะเป็นหลุมบ่อหรือรอยร้าวขึ้นได้



รูปที่ 2.24 ลักษณะการสึกหรอแบบล้าตัว
ที่มา: ศิริชัย ต่อสกุล และอนุชา วัฒนา

4. การสึกหรอแบบ Crater Wear คือผลที่เกิดต่อเนื่องจากการเกิดการสึกหรอแบบยึดติดหรือเกาะติดและการสึกหรอแบบการขีดข่วนมาก่อนทำให้ต้องใช้แรงในการตัดเฉือนชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นกว่าปกติโดยลักษณะการเกิดจะเกิดบริเวณขอบของคมตัดวิ่งเข้าสู่จุดศูนย์กลางของพินซ์

5. การสึกหรอแบบการแตกแยกชั้น (Delamination Wear) เกิดจากเศษที่หลุดจากการสึกหรอในลักษณะการขีดข่วนทำปฏิกิริยาทำให้เกิดออกไซด์ (Oxide) เศษนี้ทำให้เกิดการสึกหรอแบบขีดข่วนเพิ่มขึ้น การสึกหรอในลักษณะการแตกแยกชั้นนี้รวมถึงการเจียน (Macroscopic Machining) ที่เกิดได้จากการที่รอยแตกจากความล้าตัวของผิวที่มีตัวหล่อลื่นเข้ามาติดอยู่ และเมื่อมีแรงกระทำระหว่างผิวตัวหล่อลื่นจะเป็นเหมือนกับลิ้มดันให้เกิดรอยแตกและขยายรอยแตกออก (Bhushan, B. and Gupta, B.K.) กระบวนการสึกหรอขึ้นอยู่กับการทำงานเป็นส่วนใหญ่เพราะการทำงานเป็นตัวบ่งบอกถึงวัสดุที่ใช้ ลักษณะการเคลื่อนไหวและแรงที่กระทำ ทำให้สามารถจำแนกลักษณะของการเกิดการสึกหรอได้ ลักษณะโดยทั่วไปในงานทางด้านแม่พิมพ์ตัดที่เกิดกระบวนการตัดเฉือนแผ่น Strip ทำให้เกิดการสึกหรอขึ้น ส่วนของพินซ์เกิดการสึกหรอบริเวณผิวด้านหน้าคมตัดและด้านข้าง ส่วนของตายเกิดการสึกหรอบริเวณคมตัดและตายแลนค์ (Die Land) ซึ่งส่วนมากเป็นการสึกหรอแบบยึดติดและการสึกหรอแบบการขีดขูด เมื่อแม่พิมพ์ตัดเกิดการสึกหรอแบบยึดติดและการสึกหรอแบบการขีดขูด ทำให้ต้องใช้แรงตัดเฉือนเพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ ทำให้เกิดการสึกหรอแบบเป็นหลุมตามมา[5]

2.8 สารหล่อลื่น

2.8.1 ชนิดของสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมาย ซึ่งถ้าแบ่งตามสถานะจะแบ่งออกเป็นสี่ชนิดคือ ก๊าซของเหลว สารกึ่งแข็ง (Semi - Solid) และ ของแข็ง สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กันมากที่สุดเพราะสามารถแยกผิววัตถุทั้งสองได้อย่างสมบูรณ์ และสามารถรับแรงที่กระทำได้มาก ของเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นมีน้ำ สารละลายกับน้ำ (Aqueous Solution) น้ำมันแร่ (Mineral Oil) น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ และน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Oil)

1. น้ำมันแร่

เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในหอกถัน โดยได้จากการเอาส่วนที่อยู่กันหอกถันบรรยากาศมาผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญที่ถูกควบคุมโดยการกลั่นสุญญากาศ ก็คือ ความหนืด (Viscosity) จุดวาบไฟ (Flash Point) และกากคาร์บอน (Carbon Residual) แยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดใสและชนิดข้นออกมา ที่เหลือเป็นกากก็สามารถนำไปผลิตยางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ขึ้นอยู่กับชนิดของ

น้ำมันดิบที่นำมากลั่นน้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นแยกภายใต้สุญญากาศนี้ ปกติจะมีคุณภาพที่ไม่ดีพอที่จะนำมาใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นต้องผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อขจัดเอาสารที่ไม่ต้องการออก เพื่อให้มีความอยู่ตัวเชิงเคมีและเชิงความร้อนดีน้ำมันหล่อลื่นที่ทำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม เช่น เพื่อเพิ่มความลื่น และความสามารถในการเข้ากับน้ำเป็นต้น

น้ำมันแร่ Mineral oil GP-9020 บริษัท กรีนแพค เทคโนโลยี จำกัด เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่สามารถละลายน้ำได้ ผลิตจากเนื้อครีมอิมัลชัน สามารถใช้ได้ครอบคลุมหลายลักษณะงานเหมาะสำหรับงานตัดกลึงโลหะทั้งที่เป็นโลหะกลุ่มเหล็กและนอกกลุ่มเหล็ก ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี [7]

คุณสมบัติของสารหล่อลื่น

ลักษณะทั่วไปที่หน้าสนใจ	สะอาด, น้ำมันสีเหลือง
ความถ่วงจำเพาะ @ 30 °C	0.88
การกัดกร่อนแผ่นทองแดง, D-130	1 A
Ph (100 ppm. น้ำ (CoCo))	
การเจือจางที่ 2 %	8.8
การเจือจางที่ 1 %	9.1
ความคงตัวของอิมัลชัน, IP 263	
5% in 400 ppm. น้ำ (CaCo ₃)	
(ml oil / ml cream)	0.05/ mil
การขึ้นรูป (ml) (50-ml skhaken gof 15 S.20:1)	
Ph (100 ppm. น้ำ (CoCo))	
เริ่มแรก	20
ผ่านไป 30 วินาที	0

2. น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์

เนื่องจากน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ที่ได้จากธรรมชาติ จะมีความอยู่ตัวทางเคมีต่ำเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะใช้งานจึงต้องผ่านขบวนการการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งราคาก็จะแพงขึ้นมาก จึงหมดความนิยมไป ปัจจุบันมีการใช้น้ำมันพืชหรือสัตว์เป็นน้ำมันพื้นฐานน้อยมาก และใช้เฉพาะในงานหล่อลื่นที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางประการเท่านั้น ส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้เป็นตัวเติมเพิ่ม

คุณภาพให้โมเลกุลของน้ำมันจะเคลื่อนออกห่างกัน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลง และเป็นผลให้ความหนืดลดลงด้วย

น้ำมันมะพร้าวเป็นน้ำมันพืชมีสีเหลือง ใช้ในงานเจาะรูเหล็กกล้าและเหล็กกล้าไร้สนิม การนำไปใช้งานจะใช้สารหล่อลื่นโดยตรง ไม่ผสมกับน้ำ [7]

คุณสมบัติของสารหล่อลื่น

ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส (cSt)	40.61
ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส (cSt)	8.200
ดัชนีความหนืด	182
สี	เหลือง

3. น้ำมันสังเคราะห์

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่ ที่ได้จากระบวนการกลั่นน้ำมันดิบนั้น แม้ว่าจะผ่านกระบวนการมากมายที่ใช้กำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป แต่น้ำมันหล่อลื่น พื้นฐานที่ได้ออกมา นั้นยังคงเป็นของผสมของสารประกอบหลายตัว ซึ่งไม่มีทางที่จะเลือกเอาเฉพาะสารที่มีสมบัติที่ดีที่สุดได้ หรือถ้ามีก็จะได้ผลผลิตต่ำ เป็นผลให้น้ำมันแร่มีข้อจำกัดในการนำไปใช้ ดังนั้นได้มีการพัฒนา น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันสังเคราะห์ขึ้นมา น้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันพื้นฐานที่ได้จากกระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งเป็นการรวมตัวของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำให้ได้น้ำมันที่มีความหนืดเพียงพอที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่น ข้อดีของน้ำมันสังเคราะห์เมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ สามารถนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าน้ำมันแร่ คือ ใช้ได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำและสูงกว่าน้ำมันแร่ นอกจากนี้ น้ำมันสังเคราะห์บางประเภทยังให้คุณสมบัติเฉพาะ เช่น ผสมเข้ากับน้ำได้ และไม่ติดไฟ มีการระเหยต่ำ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม น้ำมันสังเคราะห์จะมีข้อได้เปรียบกว่าน้ำมันแร่ เมื่อนำไปใช้งานบางประเภท น้ำมันสังเคราะห์ยังไม่มีสมบัติที่เหมาะสมทุกด้าน จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันสังเคราะห์โดยการใส่สารเพิ่มคุณภาพจะช่วยเพิ่มสมบัติทางด้านเคมีและด้านกายภาพ[7]

น้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic oil) GP-906 บริษัท กรีนแพค เทคโนโลยี จำกัด เป็นน้ำมันสังเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพและราคาเหมาะสม มีความสามารถในการยืดอายุเครื่องมือที่ใช้กับงานโลหะ ระบายความร้อนได้ดีเยี่ยม ,ลดแรงเสียดทาน, ลดแรงกด ป้องกันการเกิดสนิมให้กับเครื่องมือมีส่วนผสมของ คลอรีน และกำมะถัน เหมาะกับเครื่องจักรที่มีความเร็วรอบสูง งานเหมาะในการใช้

เช่น งานคว้านรู งานกัดกรียว งานเจาะ งานกัด งานกลึง งานเลื่อย ทำเกลียว การรีม งานขัดผิว สามารถใช้กับวัสดุได้หลายชนิด เช่น เหล็กหล่อ เหล็กคาร์บอน เหล็กกล้าประสมสูง และสแตนเลส คุณสมบัติของสารหล่อลื่น

ลักษณะทั่วไปที่หน้าสนใจ	สะอาด, ของเหลวสีเหลือง
ความถ่วงจำเพาะ@ 30 °C	1.045
ความสามารถในการละลายน้ำ	ผสมกันได้
ความดัน Hg 25 °C	ต่ำมาก
Ph (100 ppm. น้ำ (CoCo,)	9.2 (@5%)
ขีดจำกัดในการติดไฟ :LEL	0
:UEL	0
จุดวาบไฟ C.(N/A)	ปิด
(N/A)	เปิด

2.8.2 สมบัติของสารหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดแตกต่างกัน ดังนั้นในการเลือกใช้ จึงจำเป็นต้องรู้สมบัติของสารหล่อลื่นและในการผลิตก็จะต้องมีการควบคุมสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น ให้ได้ตามต้องการ สำหรับคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่สำคัญทั้งสมบัติทางด้านฟิสิกส์และเคมี มีดังต่อไปนี้

1. ความหนืด (Viscosity)

เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัส ความหนืด คือ ความใสและความข้นของน้ำมัน โดยวัดที่อุณหภูมิหนึ่ง น้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะไหลง่าย แต่ฟิล์มหล่อลื่นก็บางมากด้วย สำหรับน้ำมันที่มีความข้นใสสูงย่อมไหลยากแต่จะมีฟิล์มหล่อลื่นหนากว่าหรือแข็งกว่าน้ำมัน ที่มีความข้นใสต่ำหน่วยวัดความหนืดมีหลายระบบและอุณหภูมิที่วัดก็ต่าง ๆ กัน ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะไม่คงที่ แต่จะผันแปรตามสถานะการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะแปรผันกับอุณหภูมิและความดันในการใช้งาน ในด้านของอุณหภูมิความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมัน ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของเหลวจะขยายตัว

2. ความต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน

สิ่งที่ได้ทราบแล้วว่า น้ำมันเป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เมื่อสารไฮโดรคาร์บอนสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศก็จะเกิดการทำปฏิกิริยากัน ทำให้เกิดสิ่งไม่พึงประสงค์หลายชนิด เช่น กรด ความเหนียว นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิสูงอัตราการรวมตัวก็ยิ่งเกิดเร็วอีก สำหรับน้ำมันที่ดีย่อมรวมตัวกับออกซิเจนได้ยาก

3. จุดวาบไฟ (Flash Point)

คืออุณหภูมิของน้ำมันที่ดี ย่อมร้อนจนกลายเป็นไอแล้วลุกวาบเมื่อโดนเปลวไฟ จุดวาบไฟมีความสำคัญเกี่ยวกับความปลอดภัย

4. จุดไหลเท

คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันจะไหลได้โดยไม่มีอะไรบกวน สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้นและจะขึ้นขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง จึงมีการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงนี้ออกมาเป็นค่า

5. ดัชนีความหนืด (Viscosity Index)

หรือ ที่เรียกว่าค่า VI ถ้าน้ำมันที่มีความหนืดเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมาก แสดงว่าน้ำมันหล่อลื่นมีค่า VI ต่ำ สมการที่ใช้ในการหาค่าดัชนีความหนืดของน้ำมัน หรือค่า VI คือ

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

เมื่อ U คือความหนืดที่ 100 องศาฟาเรนไฮต์ ของน้ำมันที่ต้องการหาค่า VI

L คือความหนืดที่ 100 องศาฟาเรนไฮต์ ของน้ำมันมาตรฐานที่มีค่า VI เท่ากับ ศูนย์ และจะมีค่าความหนืดที่ 210 องศาฟาเรนไฮต์ เหมือนกับน้ำมันที่นำมาหาค่า VI ที่ 210 องศาฟาเรนไฮต์

H คือความหนืดที่ 100 องศาฟาเรนไฮต์ของน้ำมันมาตรฐานที่มีค่า VI เท่ากับ 100 และจะมีค่าความหนืดเทียบเท่ากับน้ำมันที่จะนำมาหาค่า VI ที่ 210 องศาฟาเรนไฮต์

6. สี (Color)

สีของน้ำมันหล่อลื่นที่เห็นเมื่อมีแสงผ่านนั้นจะมีสีต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ใสมากจนถึงดำ ซึ่งอาจมีสีเหลืองแดง สีของน้ำมันหล่อลื่นเป็นผลมาจากชนิดน้ำมันดิบที่นำมาผลิต ทั้งวิธีการกลั่น จำนวน และสารเพิ่มคุณภาพ

7. สภาพความเป็นกรดต่าง (Acid / Base)

น้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะมีสภาพความเป็นกรดอยู่เล็กน้อย สภาพความเป็นกรด ของน้ำมันหล่อลื่น โดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเกิดการรวมตัวกับออกซิเจน ซึ่งจะทำให้เกิดกรดอินทรีย์ขึ้น สภาพความเป็นกรดจะกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะได้ สภาพความเป็นกรดจะมีตัวเลขค่า

8. สารเพิ่มคุณภาพ (Additive)

สารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน โดยทั่วไปเป็สารประกอบทางเคมี สารเพิ่มคุณภาพ ๆ แต่ละตัวจะปรับปรุงคุณภาพของ น้ำมันหล่อพื้นฐานเฉพาะอย่าง ซึ่งมีผลต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานออกเป็นสามพวก คือ พวกแรก จะเป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ให้สมบัติใหม่ที่เป็นประโยชน์ต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน พวกที่สองเป็นสารเพิ่มคุณภาพ ที่ปรับปรุงสมบัติที่มีอยู่แล้วให้ดีขึ้น และพวกสุดท้ายเป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ทำหน้าที่ในการลดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการ ซึ่งเกิดในช่วงการทางานลง ดังนั้นในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชนิดใดชนิดหนึ่งขึ้นมาจะต้องมีการศึกษาค้นคว้า วิจัยถึงหน้าที่ที่น้ำมันหล่อลื่น ประเภทนั้นจะต้องทางานอยู่ในสภาวะต่างๆ เช่น ขณะหล่อลื่น เครื่องจักรกลและเครื่องยนต์ จากนั้นจึงจะสามารถกำหนดสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ต้องการใช้งานได้ แล้วจึงเลือกน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่จะนำมาผลิต และเลือกสารเพิ่มคุณภาพที่จะเติมในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อผลิตน้ำมันหล่อลื่นให้ทางานได้อย่างมีคุณภาพดีและเหมาะสมกับงานที่ต้องการจากนั้นจึงมีการทดสอบกับงานจริง และประเมินผลเพื่อให้แน่ใจว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ผลิตได้ดังกล่าวมีคุณภาพดีจริง ๆ ตรงตามความต้องการ จึงทำให้น้ำมันหล่อลื่นที่ผลิตได้ดังกล่าวมีคุณภาพดีจริง ๆ ตรงตามความต้องการ จึงทำให้น้ำมันหล่อลื่นที่มีจำหน่ายในท้องตลาดแต่ละชนิดจะใช้ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ชนิดและปริมาณของสารเพิ่มคุณภาพที่ไม่เหมือนกัน และราคาก็แตกต่างกัน น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่อเติมสารเพิ่มสารเพิ่มคุณภาพเข้าไปแล้วก็จะเรียกว่า น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป ซึ่งบริษัทผู้ผลิตแต่ละรายมักจะตั้งชื่อเฉพาะของแต่ละผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมา ดังนั้นการเลือกใช้จึงต้องการถูกชนิดด้วย สำหรับสารเพิ่มคุณภาพที่นิยมใช้เติมน้ำมันหล่อลื่นนั้นจะสามารถทำการหล่อลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ[8]

2.9 การหุบเคลือบผิวแบบไอกายภาพ Physical Vapour Deposition (PVD)

การเคลือบผิวแข็ง(Hard Coating)ขึ้นงาน โดยวิธีอาร์คไฟฟ้าด้วยการใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำแต่กระแสสูง ที่บริเวณผิวของวัสดุที่เคลือบ(Target)เกิดการหลอมละลายที่ผิวหน้าของวัสดุที่เคลือบกลายเป็นไอระเหย เรียกว่า พลาสมา(Plasma) เป็นประจุบวกอยู่ในรูปของไอออนเมื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซไนโตรเจน(N_2) หรือมีเทน(C_2H_2)ขึ้นอยู่กับกระบวนการ เนื่องจากขึ้นงานเป็นขั้วลบไอระเหยเป็น

ประจุบวกจึงวิ่งเข้าหาผิวชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ ซึ่งกระบวนการเคลือบผิวแข็งกระทำอยู่ภายใต้สถานะสุญญากาศจึงไม่ปนเปื้อนกับสิ่งแปลกปลอมต่างๆ ผิวเคลือบจึงมีความสมบูรณ์ และวัสดุที่เคลือบผิวชิ้นงานมีความหนาตั้งแต่ 1 ถึง 10 μm ทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานเมื่อนำไปใช้งานมีความทนทานและอายุการใช้งานนานยิ่งขึ้น [9]

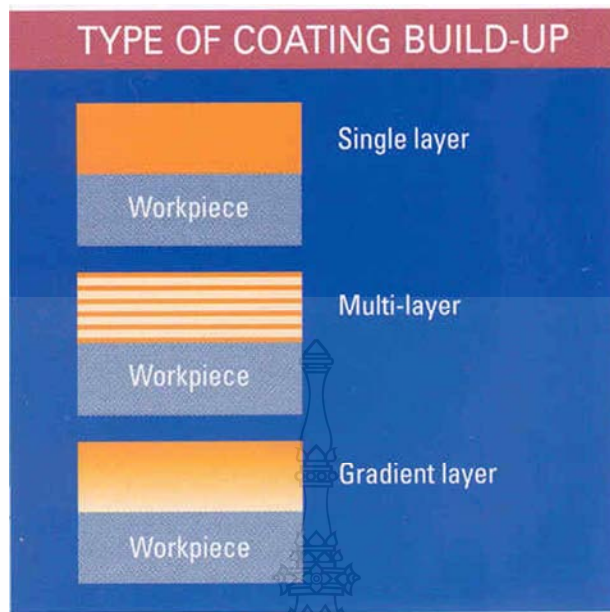
เป็นเทคนิคสำคัญอันหนึ่งสำหรับวิทยาการสมัยใหม่หลายแขนง เช่น วัสดุศาสตร์ Nanotechnology วิศวกรรมผิววัสดุ (Surface Engineering) การชุบ PVD นั้น มีอยู่หลายระบบ ปกติจะทำการชุบในเตาสุญญากาศ กระบวนการชุบมักจะเกี่ยวข้องกับสุญญากาศสูง (High Vacuum) สามารถสร้างฟิล์มบาง (Thin Film) ได้หลายชนิดสำหรับงานแตกต่างกันไปในปัจจุบัน ได้มีการนำเครื่อง PVD ระบบต่างๆ มาทำการชุบงานทั้งทางด้านประดับตกแต่ง อุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และการชุบผิวแข็งให้แก่เครื่องมือตัดเจาะขึ้นรูป รวมถึงอุตสาหกรรมในการผลิตเหรียญในต่างประเทศโดยเฉพาะประเทศในแถบยุโรป โดยใช้ในการเคลือบผิวดวงตราเพื่อยืดอายุการใช้งานของดวงตรา[10]

2.9.1 ประโยชน์ของการชุบเคลือบ และรูปแบบการเคลือบผิวแบบ PVD

การชุบเคลือบผิวแบบ PVD มีประโยชน์กับอุตสาหกรรมที่หลากหลายรวมถึงในอุตสาหกรรมการผลิตเหรียญ สามารถป้องกันการสึกหรอ มีความแข็งสูงถึงประมาณ 2500 HV – 3500 HV ที่ความหนา 1-5 μm มีความต้านทานต่อสารเคมีสูง สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ผิวเรียบ การนำความร้อนต่ำ มีการยึดเกาะของแต่ละชั้นดีเยี่ยมแม้จะใช้อุณหภูมิในการเคลือบต่ำทั่วไปไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส

รูปแบบการเคลือบผิวบนชิ้นงาน (Type of Coating Build-up) ดังนี้

- 1) ผิวเคลือบชั้นเดียว (Single Layer)
- 2) ผิวเคลือบหลายชั้น (Multi Layer) (แต่ละชั้น เคลือบด้วยวัสดุต่างชนิดสลับกัน)
- 3) ผิวเคลือบผสม (Gradient Layer) (ผิวเคลือบชั้นเดียวแต่วัสดุเคลือบถูกผสมรวมด้วยวัสดุหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียมดีเตเนียม AlTi)



รูปที่ 2.25 แสดงชั้นเคลือบผิวในรูปแบบต่าง ๆ

ที่มา : Sulzer Metaplas



รูปที่ 2.26 แสดงคุณสมบัติของผิวเคลือบ

ที่มา : Sulzer Metaplas

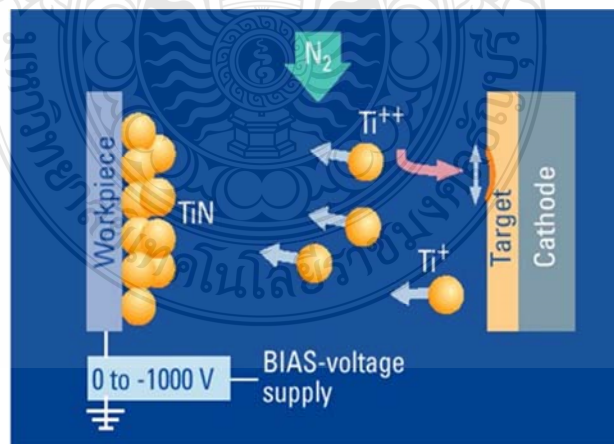
SELECTED COATING PROPERTIES						
Coating material	TiN	TiCN	CrN	ZrN	AlTiN	W-C:H
Hardness HK (1N)	2500 ±400	2900 ±400	2300 ±300	2400 ±400	3000 ±400	900 to 1400
Temperature resistance °C	550 ±50	450 ±50	650 ±50	600 ±50	800 ±50	350 ±50
Electr. resistance $\mu\Omega$ cm	60 ±20	8 ±20	640	30 ±10	4000– 7000	– –
Thermal conductivity ($Ws^{0.5}$)/m ² K	8800 ±1000	8100 ±1400	8100 ±2600		7000 ±400	7600 ±1000
Coefficient of friction (100Cr6)	0.65– 0.70	0.40– 0.50	0.50– 0.60	0.50– 0.60	0.55– 0.65	0.15– 0.30
Layer thickness (μ m)	2–4	2–4	3–8	2–4	2–4	1–5
Colour	gold- yellow	red-brown/ grey	silver	light gold	anthracite	anthracite/ blue-grey
Ductility	good	satisfactory	very good	good	satisfactory	–

รูปที่ 2.27 แสดงคุณลักษณะของผิวเคลือบแต่ละชนิด

ที่มา : Sulzer Metaplas

2.9.2 เทคโนโลยี PVD แบบ ARC

มีการยึดเกาะของสารเคลือบกับพื้นผิวดีเยี่ยมเนื่องจากใช้ประจุไฟฟ้าสูงพื้นผิวจะถูกทำลายเล็กน้อยทำให้เกิดการยึดเกาะที่ดี

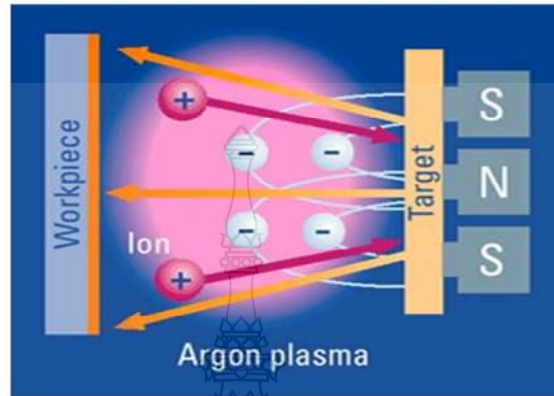


รูปที่ 2.28 PVD ARC Technology

ที่มา : Sulzer Metaplas

2.9.3 เทคโนโลยี PVD แบบ Sputter

มีพื้นผิวหลังการเคลือบเรียบและสะอาดมีการเกิดเป็นประจุไฟฟ้าต่ำทำให้การยึดเกาะลดน้อยลง



รูปที่ 2.29 PVD Sputter technology

ที่มา : Sulzer Metaplas



รูปที่ 2.30 PVD Sputter ก่อนเคลือบผิว

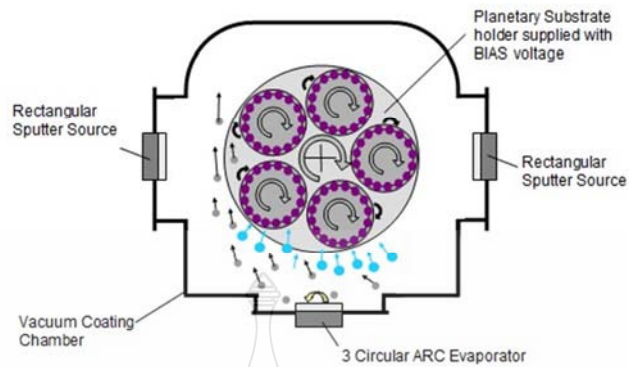
รูปที่ 2.31 PVD Sputter CrN coated (1.6 μm) หลังเคลือบ

ที่มา : Sulzer Metaplas

ที่มา : Sulzer Metaplas

2.9.4 เทคโนโลยี PVD แบบ ARC and Sputter

เป็นระบบเดียวที่นำเทคโนโลยีทั้งหมดมารวมไว้มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูงเป็นชนิดที่ใช้งานอยู่ที่สำนักกษาปณ์ [11]



รูปที่ 2.32 การทำงานของ PVD ARC and Sputter

ที่มา : Sulzer Metaplas



รูปที่ 2.33 เครื่อง PVD ARC and Sputter

ที่มา : Sulzer Metaplas

พ่นเคลือบแบบเคลือบ TiCN

พ่นเคลือบแบบเคลือบ TiCN (ไทเทเนียม-คาร์บอน-ไนไตร) ด้วยการเคลือบไอออน ซึ่งเป็นวิธี PVD (Physical Vapor Deposition) วิธีหนึ่งการเคลือบ TiCN มีข้อดีหลายอย่าง เช่นทำให้มีความแข็งแรงสูง และสัมประสิทธิ์การเสียดทานต่ำ ความทนต่อการเสียดสีของพื้นจะดีขึ้น อีกทั้งผลผลิต และคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะสูงขึ้นด้วย เนื่องจากพ่นเคลือบนี้ได้รับการเคลือบในสุญญากาศที่อุณหภูมิ 500°C การเคลือบวัสดุพื้นฐานที่อุณหภูมิ 500°C หรือสูงกว่าจึงสามารถทำได้โดยไม่ทำให้ความแข็งแรง

ของวัสดุพื้นฐานลดลงหรือเสียรูปทรงเพราะความร้อน สิ่งนี้ช่วยให้มั่นใจว่าส่วนปลายจะยังคงแหลมหลังจากที่เคลือบแล้ว ซึ่งเป็นหนึ่งข้อดีอย่างหนึ่งของวิธีนี้

ข้อมูลทางเทคนิคของการเคลือบ TiCN

ความทน (HV)	3000
ความหนาของการเคลือบ (μm)	3 - 5
สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน (ต่อเหล็กแห้ง)	0.3
ความทนต่อความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	400
สี	น้ำตาล เทา

คุณสมบัติของพื้นผิวเคลือบ TiCN

1. ความแข็งสูง

การเคลือบ TiCN มีความแข็ง 3000HV ซึ่งแข็งกว่าคาร์ไบด์ ความแข็งนี้ช่วยป้องกันคมตัดไม่ให้เกิดการชุบขีดได้ดี มีอายุการใช้งานนานขึ้นถึง 10 เท่าก่อนที่จะต้องเจียรใหม่

2. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ

การเคลือบ TiCN ทำให้มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่อเหล็กต่ำ และมีความเหนียวทางเคมี ทำให้ไม่เกิดความล้าที่ผิว ซึ่งเป็นสาเหตุของการแตกหักได้ การเคลือบผิวนี้ยังช่วยให้ผิวของพื้นผิวไม่สัมผัสกับผิวของวัสดุชิ้นงาน ดังนั้น แมื่อน้ำมันหล่อเย็นจะสูญเสียคุณสมบัติทางเคมีแล้ว แต่ยังมีผลด้านการหล่อลื่นได้ TiCN ยังมีคุณสมบัติของการเลื่อนดีเยี่ยมจึงสามารถป้อนด้วยอัตราการชักสูงได้ ประสิทธิภาพดีขึ้นในวัสดุชิ้นงานที่มีความตึงเครียดสูงอย่างเช่น โลหะเบา โลหะที่ไม่ใช่เหล็ก และสแตนเลส เป็นต้น

3. คุณภาพผลิตภัณฑ์ดีขึ้น

การเคลือบ TiCN ช่วยให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีครีบน้อย อายุการใช้งานนานขึ้น ผิวหน้าตัดมีเส้นน้อย และมีความเรียบลื่นมาก

พื้นเคลือบแบบเคลือบ TiAlN

พื้นเคลือบแบบเคลือบ TiAlN (ไทเทเนียม-อลูมิเนียม-ไนโตร) มีความแข็งสูงมาก สามารถทนความร้อนได้สูงป้องกันการกัดกร่อนรวมทั้งมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เพราะมีส่วนผสมของอลูมิเนียมเหมาะสำหรับการตัดแบบแห้งและใช้ความเร็วในการตัดสูง จึงมีการนำมาเคลือบบนผิวเครื่องจักรต่างๆ เช่น ดอกสว่านและเครื่องมือตัดเจาะอื่นๆ ทำให้แข็งแรงมากขึ้นถึง 20 GPa อีกทั้งยังช่วยป้องกันการเกิดออกไซด์ชั้นที่อุณหภูมิสูงถึง 700 °C การชุบด้วยฟิล์มชนิดนี้ของเราจะมีหลายแบบให้เลือกเพื่อให้เหมาะสมกับงานตัดแต่ละชนิดด้วยการชุบแบบหลายแบบนี้จะทำให้งานตัดของท่านได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

ข้อมูลทางเทคนิคของการเคลือบ TiAlN

ความทน (HV)	3000
ความหนาของการเคลือบ (μm)	3 - 5
ความแข็งแรง (GPa)	20
ความทนต่อความร้อน (°C)	700
สี	ดำ

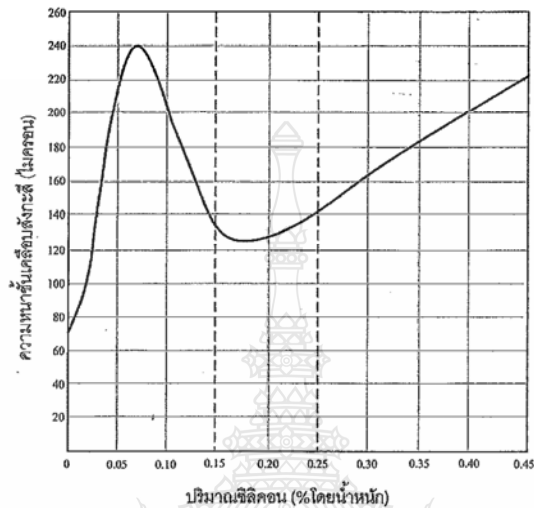
2.10 ซัลฟิวไรด์

2.10.1 ซัลฟิวไรด์เป็นตัวกำจัดออกซิเจนที่สำคัญในการผลิตเหล็กกล้า ปริมาณซัลฟิวไรด์ขึ้นกับการกำจัดออกซิเจน เหล็กกล้าที่ใช้ซัลฟิวไรด์เป็นตัวกำจัดออกซิเจนทั้งหมดโดยปกติจะมีซัลฟิวไรด์ 0.15-0.03% แต่ถ้ามีตัวกำจัดออกซิเจนอื่นด้วย จะมีปริมาณซัลฟิวไรด์ลดลงได้

2.10.2 ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซัลฟิวไรด์ทำให้คุณภาพเหล็กไม่ดี และผลนี้รุนแรงขึ้นในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่เติมกำมะถันเพิ่ม (resulfurized)

เหล็กแผ่นที่เป็นเหล็กกล้าซัลฟิวไรด์ซึ่งมีซัลฟิวไรด์ 2.0-4.5% เกิดการแตกที่ผิวและรอยบกพร่องที่ผิวระหว่างรีดร้อน การทำให้อุณหภูมิที่ผิวกับเนื้อเหล็กในแนวความหนาไม่แตกต่างกันมาก จะแก้ปัญหาที่ผิวขณะรีดร้อนของเหล็กกล้าเกรดนี้ๆ ได้

2.10.3 เหล็กแผ่นที่ต้องการชุบเคลือบสังกะสีด้วยวิธีการจุ่มร้อน ต้องให้มีธาตุซิลิกอนต่ำมากในปริมาณที่ทำให้สังกะสีเกาะติดอยู่ไม่หนามากเกินไปดังแสดงในรูป 2.35 เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีซิลิกอนในช่วง 0.03-0.15% และมากกว่า 0.30% มีสังกะสีเกาะติดหนา



รูปที่ 2.34 ผลของปริมาณซิลิกอนต่อความหนาชั้นสังกะสี

ที่มา : ประสงค์ ศรีเจริญชัย

2.10.4 ซิลิกอนในเหล็กกล้าละลายได้สมบูรณ์ในเฟอร์ไรต์ เมื่อมีปริมาณซิลิกอนน้อยกว่า 0.30% ความแข็งจะเพิ่มขึ้นโดยความเหนียวลดลงไม่มาก เมื่อมีปริมาณซิลิกอนมากกว่า 0.40% ความเหนียวลดลงมากในเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา มีผลเสียต่อความสามารถการขึ้นรูปเย็น โดยเฉพาะการทุบขึ้นรูปเย็น (cold heading) หัวสลักกัณฑ์ จึงต้องจำกัดปริมาณซิลิกอนในเหล็กกล้าที่ต้องการทุบขึ้นรูปเย็น

2.10.5 ในเหล็กกล้าคาร์บอนที่ต้องการชุบแข็ง การมีซิลิกอนรวมอยู่กับแมงกานีสหรือโมลิบดีนัมนั้น ซิลิกอนอาจช่วยทำให้ความสามารถในการชุบแข็งเพิ่มมากขึ้น

หมายเหตุ: ประเด็นความสามารถในการชุบแข็งของซิลิกอนร่วมกับแมงกานีสนี้ ลองพิจารณาเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เติมซิลิกอนในเหล็กกล้าเทียบกับเหล็กกล้า AISI 1045H หรือ S45C ที่มีปริมาณซิลิกอน 0.15-0.35% ด้วยเงื่อนไขการชุบแข็งในน้ำมันเหมือนกัน เหล็กกล้า AISI 1045 ที่ไม่เติมซิลิกอนจะมีความแข็งหลังชุบแข็งต่ำกว่าเหล็กกล้า S45C

เหล็กที่ชุบแข็งและอบคืนตัวจะเติมซิลิกอนเพิ่มเป็นระหว่าง 0.5-0.8% ซิลิกอนช่วยลดอัตราการเย็นตัววิกฤตและรักษาความแข็งไม่ให้ลดลงเร็วในช่วงอบคืนตัวเพราะซิลิกอนขัดขวางการเกิดซีเมนไทต์ไม่ให้คาร์บอนแพร่จากมาร์เทนไซต์มารวมตัวเป็นคาร์ไบด์ได้สำหรับชิ้นงานที่หนาขึ้น โดยยัง

มีความสามารถในการชุบแข็งดี สามารถหลีกเลี่ยงการเพิ่มปริมาณซิลิกอนได้ต่อเมื่อมีปริมาณโมลิบดีนัมเพิ่มขึ้น

2.10.6 ในเหล็กกล้าทริป ที่มีปริมาณซิลิกอนประมาณ 1.5% ธาตุซิลิกอนได้คาร์บอนออกจากเฟอร์ไรต์ไปอยู่ในออสเทนไนต์และขัดขวางการเกิดวิเมนไทต์ในช่วงการอบออสเทมเปอร์ิ่งเพื่อให้เกิดเปไนต์ ทำให้เป็นเปไนต์ที่ไม่มีคาร์ไบด์คือเป็นเบนดิกเฟอร์ไรต์ ส่วนข้างๆ เฟอร์ไรต์เป็นออสเทไรต์ที่มีคาร์บอนละลายเพิ่มขึ้น จึงเพิ่มความเสถียรจนรักษาสภาพเป็นออสเทนไนต์เหลือค้างที่อยู่ร่วมกับเบนดิกเฟอร์ไรต์

2.10.7 ในเหล็กกล้าซิลิกอนหรือเหล็กกล้าทางไฟฟ้า (electrical steels) ซิลิกอนเพิ่มความแข็งแรงของเฟอร์ไรต์โดยไม่ทำให้ความเหนียวเสียไป ปริมาณซิลิกอนที่สูงจะเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดสเกลในอากาศและลดการสูญเสียฮีตเทอริซิซของเหล็กกล้าทางไฟฟ้า

2.10.8 ปริมาณซิลิกอนต่ำถึง 0.5% ทำให้ค่า ITT ต่ำลง แต่ปริมาณซิลิกอนที่มากกว่า 0.5 % โดยเฉพาะช่วง 1.5-3.0% เพิ่มค่า ITT ให้สูงขึ้น

2.10.9 ซิลิกอนช่วยเพิ่มขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit) จึงดีต่อเหล็กกล้าสปริง แต่ทำให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวซึ่งเป็นผลเสียต่อความล้า จึงต้องกลึงผิวที่สูญเสียคาร์บอนออก

2.11 เหล็กกล้าซิลิกอน

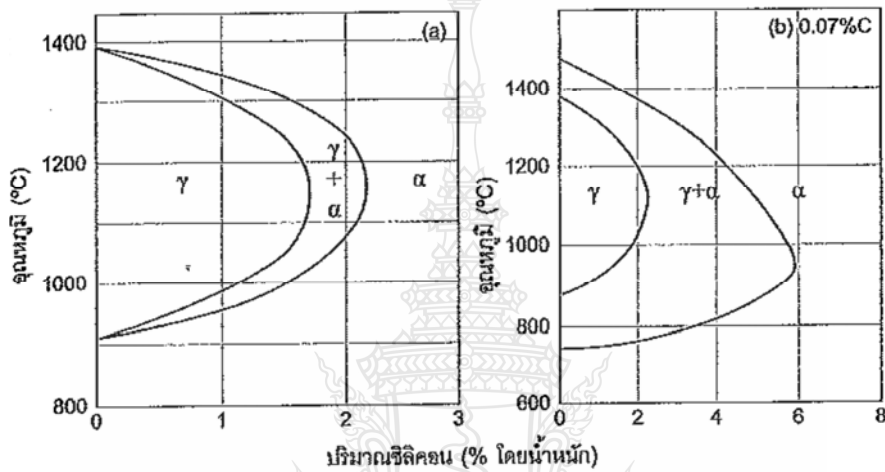
โลหะผสมเหล็ก-ซิลิกอนที่ใช้งานแม่เหล็กมีปริมาณซิลิกอนได้ถึง 4% เรียกว่าเหล็กกล้าซิลิกอน เหล็กกล้าซิลิกอนนอนไอเรียนเตดใช้ทั่วไปในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก รีเลย์ และหม้อแปลงขนาดเล็ก ซึ่งไม่ได้คำนึงถึงประสิทธิภาพมากนัก ขณะที่เหล็กกล้าซิลิกอนเกรนไอเรียนเตดใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ หม้อแปลงขนาดใหญ่ซึ่งน้ำหนักกับประสิทธิภาพเป็นสิ่งสำคัญมาก

โลหะผสมเหล็ก-ซิลิกอนควรให้เป็นเนื้อเฟสเดียว (เฟอร์ไรต์) โดยการลดปริมาณคาร์บอนให้ต่ำที่สุด ซึ่งในการผลิตเหล็กกล้าชนิดนี้มีขั้นตอนการลดคาร์บอน (decarburization) ให้เหลือประมาณ 0.005% เพราะการมีปริมาณคาร์บอนมากขึ้น ทำให้พื้นที่ออสเทนไนต์เพิ่มขึ้น การทำให้ได้เฟสเดียวต้องมีปริมาณซิลิกอนเพิ่มขึ้น เช่นปริมาณ 0.07% ทำให้ต้องมี 6%Si จึงจะได้เฟสเดียวของเฟอร์ไรต์ แต่การมีซิลิกอนทำให้เหล็กกล้ามีความเปราะมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.36

เหล็กกล้าที่ใช้ทำแกนหม้อแปลงควรมีความต้านทานไฟฟ้าสูงเพื่อให้การสูญเสียกระแสไหลวนต่ำ รูปที่ 2.31 แสดงผลของปริมาณธาตุต่อความต้านทานทางไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าธาตุซิลิกอนละลายอะลูมิเนียม 2- 3 % ก็เพิ่มความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนรูปที่ 2.37 แสดงผลการเติมปริมาณซิลิกอนต่อสมบัติแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆ เช่นการเติม 3% si ลดความเป็นแม่เหล็กไม่เท่ากันทุก

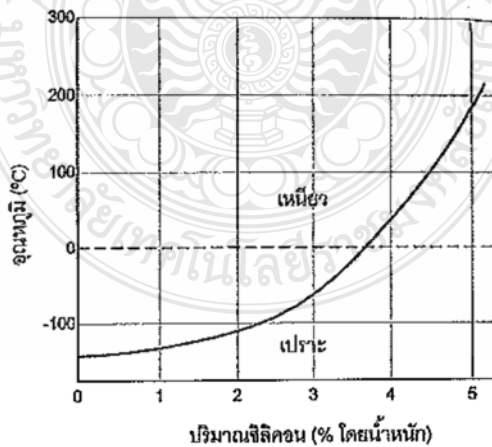
ทิศทางของลิก และลดแมกนี-โทสตริกชัน (magnetostriction) แต่ก่อให้เกิดข้อเสียคือ ลดความเหนียว รูปที่ 5.30 ลดการเหนียวอิมตัวและลดอุณหภูมิคูรี(วัสดุไม่เป็นแม่เหล็กหรืออุณหภูมิคูรี)

หมายเหตุ: แมกนีโทสตริกชันเป็นปรากฏการณ์ที่ซึ่งเหล็กกล้าทางไฟฟ้าเปลี่ยนรูปขณะที่ทำให้เป็นแม่เหล็ก มีการเปลี่ยนแปลงความยาวของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกในทิศทางของการทำให้เป็นแม่เหล็ก เนื่องจากสนาม แม่เหล็กที่กระทำทำให้เหล็กแผ่นมีเกรนที่ยึดตัวและหดตัว รูปที่ 2.32 ในเหล็กกล้า เกรน โอริเจนเตดที่มีซิลิกอน 3% แมกนีโทสตริกชันมาจากการเคลื่อนที่ของผนัง โดเมน 180°



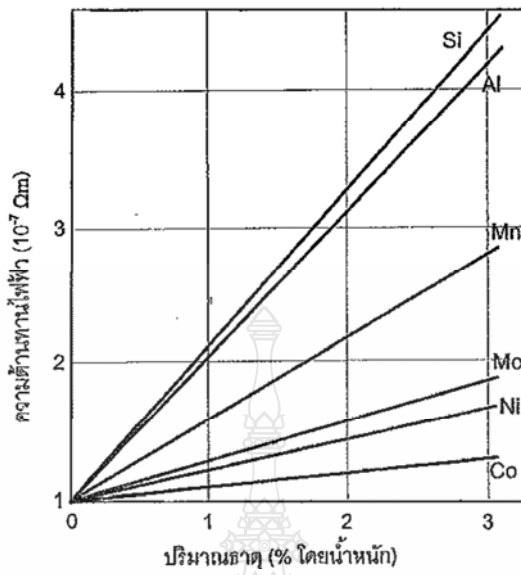
รูปที่ 2.35 ส่วนที่ Fe เป็นหลักในแผนภูมิสมดุล Fe-Si กับผลของคาร์บอน 0.07% โดยน้ำหนักต่อพื้นที่ $\alpha + \gamma$

ที่มา : ประสงค์ ศรีเจริญชัย



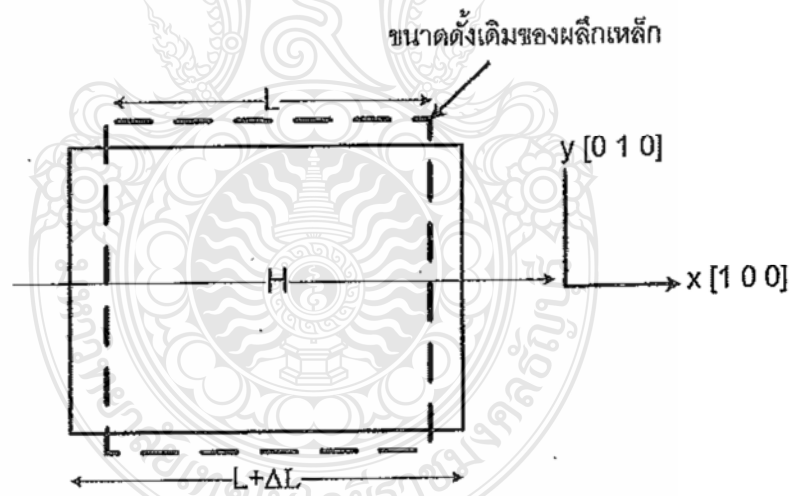
รูปที่ 2.36 ปริมาณของ Si กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนจากเหนียวเป็นเปราะ

ที่มา : ประสงค์ ศรีเจริญชัย



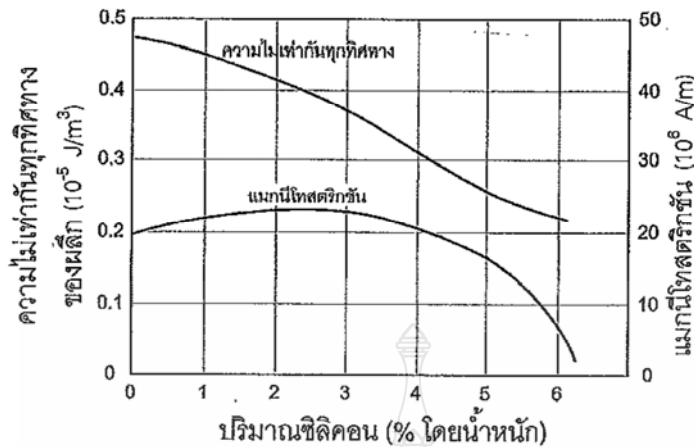
รูปที่ 2.37 ปริมาณธาตุกับความต้านทานทางไฟฟ้า

ที่มา : ประสงค์ ศรีเจริญชัย



รูปที่ 2.38 แมกนีโทสตริกชัน

ที่มา : ประสงค์ ศรีเจริญชัย



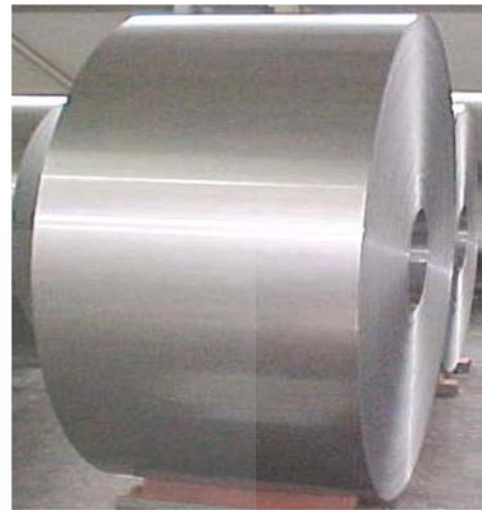
รูปที่ 2.39 ปริมาณธาตุซิลิกอนกับสมบัติต่าง
ที่มา : ประสงค์ ศรีเจริญชัย

เมื่อเหล็กกล้าซิลิกอนถูกเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็ก การทำให้แม่เหล็กอิ่มตัวไม่ได้เปลี่ยนแปลง มี 2 กระบวนการที่ทำให้โดเมนเปลี่ยนแปลงคือ ที่ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ต่ำ โดเมนเปลี่ยนตามการโตของโดเมนที่เรียงตัวดีกว่า (favorably oriented) ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กสูง ในเหล็กกล้าซิลิกอนในช่วง ในช่วง 0.5-4.7% การเพิ่มซิลิกอนช่วยลดแรงโคเออร์ซิฟได้ [12]

2.12 เหล็กแผ่นรีดเย็น (Cold rolled steel sheet)

เหล็กแผ่นรีดร้อนเมื่อผ่านการผลิตมาจนอยู่ในรูปของม้วนเหล็ก (Coil) แล้ว มักจะมีสนิม (Scale) หรือ Ironoxide อยู่ที่ผิวเนื่องจากการออกซิเดชันระหว่างขั้นตอนการผ่านแท่นรีดสุดท้ายจนถึงการม้วนที่ Coiler ชั้นสนิมเหล่านี้สามารถหลุดออกไปในขั้นตอนที่เกี่ยวกับการแปรรูป อย่างไรก็ตาม หากมีสนิมบนเหล็กแผ่นสำหรับงานลากขึ้นรูป (Drawing) ก็จะทำให้อายุการใช้งานของ Die สั้นลง และเกิดผิวที่ไม่เรียบบนผลิตภัณฑ์สำเร็จนอกจากนี้หากจะนำเหล็กไปเคลือบก็จะต้องขจัดสนิมออกก่อนเพื่อให้โลหะเคลือบสามารถเกาะติดได้ดีสำหรับการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นก็ต้องขจัดสนิมจากเหล็กแผ่นรีดร้อนก่อนรีดเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของผิวเหล็กแผ่นรีดเย็น

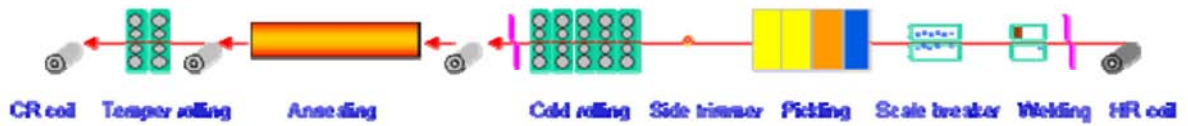
การรีดเย็นทำให้สามารถผลิตเหล็กแผ่นให้มีความต่ำกว่าและและความเรียบสูงกว่าเหล็กแผ่นรีดร้อนทั้งนี้เนื่องจากการรีดเย็นกระทำที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ผิวที่ได้จากการรีดเย็นยังให้ความสวยงามกว่าผิวจากการรีดร้อน



รูปที่ 2.40 ลักษณะผิวของเหล็กแผ่นรีดร้อนและผิวของเหล็กแผ่นรีดเย็น
ที่มา : สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

การผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นจะใช้เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน (HR coil) เป็นวัตถุดิบในการผลิต โดยเริ่มจากการตัดส่วนปลายของม้วนเหล็กแผ่นรีดร้อนและทำการเชื่อมเพื่อให้สามารถผ่านกระบวนการกัดกรด(Pickling) อย่างต่อเนื่องได้ จากนั้นเหล็กแผ่นรีดร้อน จะถูกทำให้เคลื่อนตัวผ่านเครื่องกำจัดสนิมเหล็กทางกล(Scale breaker) เพื่อให้สนิมที่ผิวแตกและง่ายต่อการกัดกรด เหล็กแผ่นผ่าน Scale breaker แล้วจะถูกทำให้เคลื่อนตัวต่อลงสู่อ่างกรดเพื่อทำการกัดสนิม เหล็กแผ่นที่ผ่านการกัดกรดขจัดสนิมแล้วจะมีสีขาวเทา ซึ่งอาจจะผ่านเครื่องตัดขอบ (Side trimmer) เพื่อให้ขอบเรียบและลดการรบกวนจากขอบของเหล็กเมื่อทำการรีดลดขนาดปริมาณมาก เหล็กที่ผ่านการกัดขอบแล้วจะถูกนำไปรีดเย็นต่อเพื่อลดขนาดความหนา โดยการรีดเย็น (Cold rolling) จะทำที่อุณหภูมิห้อง (แตกต่างจากเหล็กแผ่นรีดร้อนซึ่งโดยทั่วไปรีดที่อุณหภูมิสูงกว่า 870 °C ซึ่งเนื้อเหล็กขณะรีดร้อนยังมีฮีเลียมและสามารถเกิดสนิมขณะรีดได้) เหล็กแผ่นที่ผ่านการรีดเย็นมาจะมีผิวสีขาวเทาและผิวจะมันกว่าเหล็กแผ่นรีดร้อนซึ่งมีผิวที่ด้าน อย่างไรก็ตาม เหล็กแผ่นที่ผ่านการรีดมายังมีความเครียดภายในเนื้อเหล็กเหลือค้าง ทำให้มีความแข็งแรงสูง ความสามารถในการยืดตัว (Elongation) ต่ำ ตลอดจนมีความไม่สม่ำเสมอของคุณสมบัติเชิงกลในทิศทางต่างๆ สูง จึงไม่เหมาะแก่การใช้งานในลักษณะที่ต้องการนำไปขึ้นรูป จึงต้องผ่านการอบ (Annealing) เพื่อให้คลายความเครียดในเนื้อเหล็กลง เหล็กที่ผ่านการอบแล้วจะผ่านการรีดเย็นอีกครั้งเล็กน้อยด้วยความหนาแทบไม่เปลี่ยนแปลง (Temper rolling) เพื่อปรับ

ความเรียบ คุณภาพผิว และขจัดคาร์ไบด์ตัว ณ. จุดคดาก (Yield point elongation) ซึ่งช่วยให้เหล็กแผ่นแปรรูปได้อย่างสม่ำเสมอยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.41 ขั้นตอนการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น

ที่มา : สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

ตารางที่ 2.4 เหล็กแผ่นรีดเย็นตามมาตรฐาน JIS G3141 สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า

		Chemical Composition (Max ,%)				Tensile Strength	Elongation (%) (min)					
		C	Mn	P	S	(kgf/mm ²)	0.2	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
							5	-	-	-	-	-
							0.4	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
							0					
1	SPCC	0.1	0.5	0.040	0.045	28	32	34	36	37	38	39
		2	0									
2	SPCD	0.1	0.4	0.035	0.035	28	34	36	38	39	40	41
		0	5									
3	SPCE	0.0	0.4	0.03	0.03	28	36	38	40	41	42	43
		8	0									
4	SPCEN	0.0	0.4	0.03	0.03	28	36	38	40	41	42	43
		8	0									

ตารางที่ 2.5 :Symbol of quality

Symbol of quality	Remarks
SPCC	Commercial quality
SPCD	Drawing quality
SPCE	Deep drawing quality
SPCEN	Deep drawing special killed quality (non-aging)

2.13 เหล็กแผ่นสำหรับงานทางไฟฟ้า (Electrical steel sheet)

เหล็กแผ่นสำหรับงานทางไฟฟ้า หมายถึง เหล็กแผ่นที่มีคุณสมบัติ Core loss ต่ำ โดยที่ Core loss คือคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่วัดโดย Epstein test ซึ่งเป็นการวัดประสิทธิภาพด้านคุณสมบัติของเหล็กกล้าในการนำสนามแม่เหล็กสลับ (Alternating magnetic field) โดยมีหน่วยเป็น วัตต์/กิโกลรัม เหล็กกล้าชนิดแผ่นที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับงานทางไฟฟ้าจะมีค่า Core loss (วัตต์/กิโกลรัม) ต่ำ ดังนั้นค่า Core loss จึงถูกใช้เป็นข้อมูลในการเลือกวัสดุสำหรับทำแกนของอุปกรณ์/เครื่องใช้ไฟฟ้า

Core loss สามารถแปลความหมายอย่างง่ายได้ คือ พลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียไปในเหล็กกล้าที่เป็นแกน(Core steel) โดยไม่ก่อให้เกิดงานของตัวอุปกรณ์นั้นๆ พลังงานส่วนใหญ่ที่สูญเสียไปนี้จะอยู่ในรูปของความร้อนและบางส่วนใช้ไปในการทำให้เหล็กเป็นแม่เหล็ก (Magnetizing) ในทางปฏิบัติ การควบคุมปริมาณการสูญเสียในรูปของความร้อนเป็นสิ่งสำคัญมาก เพื่อหลีกเลี่ยงการเสียหายของวัสดุที่ป้องกัน (Insulate) แกนแม่เหล็กจากวงจรไฟฟ้า นอกจากนี้การสูญเสียนี้ยังส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้านั้นด้วย (สิ้นเปลืองไฟฟ้ามาก)

ปัจจุบันนิยมใช้เหล็กแผ่นรีดเย็นในด้านนี้อย่างกว้างขวาง โดยเหล็กกล้ากลุ่มนี้มักผสมซิลิกอน โดยซิลิกอนในเหล็กกล้าจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางแม่เหล็กโดยลด Core loss ทำให้สามารถพัฒนาเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีกำลังและประสิทธิภาพสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณซิลิกอนในเหล็กกล้าก็มีข้อจำกัดในทางปฏิบัติเนื่องจากการผสมซิลิกอนในปริมาณที่สูงจะทำให้เหล็กกล้าเปราะที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้น ปริมาณซิลิกอนจะถูกจำกัด โดยเหล็กกล้าชนิดแผ่นรีดเย็นจะผสมซิลิกอนสูงสุดประมาณ 3%นอกจากปริมาณซิลิกอนแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติ Core loss โดยเหล็กแผ่นที่บาง มีปริมาณซิลิกอนผสมสูง ไม่มีความเค้นเหลือค้าง (โดยขึ้นกับการอบหลังการรีดเย็น) การเรียงตัวของผลึกที่เหมาะสม และมีสิ่งเจือปนต่ำ จะมีค่า Core loss ต่ำเหมาะสำหรับทำอุปกรณ์ด้านงานไฟฟ้า

การแบ่งประเภทของเหล็กแผ่นสำหรับงานไฟฟ้า

เหล็กแผ่นสำหรับงานทางไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

- Oriented steels เป็นเหล็กกล้าผสมซิลิกอนที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่ดีเป็นพิเศษในทิศทางการรีด เหล็กกล้าประเภทนี้จะถูกควบคุมให้มีคาร์บอนผสมต่ำมาก ($\sim 0.003\%C$) การใช้งานจะเน้นเพื่อใช้ทำอุปกรณ์ที่ต้องการประสิทธิภาพสูง (เหล็กกล้าประเภทนี้จะมีค่า Core loss ต่ำกว่าประเภท Non-oriented steels) และอุปกรณ์ที่ออกแบบให้คุณสมบัติแม่เหล็กผ่านตามทิศทาง เช่น Power transformers, Distribution transformers, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ (Large generators) โดยมีความหนามาตรฐานที่ 0.23, 0.27, 0.30, 0.35 มม.

- Non-oriented steels เป็นเหล็กที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กในทิศทางรีดใกล้เคียงกับในทิศทางขวางแนวรีด Nonoriented steels โดยจะใช้กับงานที่ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้คุณสมบัติตามทิศทางการใช้งานอย่างกว้างขวางในกลุ่มของ Rotating equipment, Relay cores, Motors, Lighting (Ballast) โดยมีความหนามาตรฐาน 0.35, 0.50, 0.65 มม.

สำหรับการเลือกใช้เหล็กแผ่นประเภทต่างๆ สำหรับงานไฟฟ้าที่กล่าวมาเป็นเพียงแนวทางเท่านั้น ในทางปฏิบัติ ผู้ออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าจะพิจารณาในเรื่องอื่นๆ อาทิ ความหนาของเหล็กกล้า (ซึ่งเหล็กกล้าที่บางจะมี Core loss ต่ำกว่า) ฉนวนที่ผิวเหล็กกล้า ราคา/ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน พื้นที่ที่ต้องการ (Space

requirement) ประกอบด้วย ซึ่งในการผลิตอุปกรณ์ทางไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ผู้ผลิตบางรายอาจเลือกเกรดเหล็กชนิดหนึ่ง ผู้ผลิตอีกรายอาจเลือกเกรดเหล็กที่ต่างกันแต่สามารถผลิตอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ออกมาเกือบเหมือนกันได้ประเทศไทยนำเข้าเหล็กกล้ารีดเย็นกลุ่มนี้ (Electrical steel sheet) ปีละกว่า 200,000 ตันต่อปี เนื่องจากยังไม่มีการผลิตเหล็กกล้ากลุ่มนี้ในประเทศ สำหรับขบวนการผลิตเหล็กกล้าผสมซิลิกอนรีดเย็นชนิดเรียงตัว (Oriented steel) นั้น จะเพิ่มบางขั้นตอนที่นอกเหนือจากขบวนการผลิตเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นทั่วไป อาทิ

- ขั้นตอนการอบ (Normalizing) เหล็กแผ่นรีดร้อนก่อนที่จะทำการรีดเย็น

- การอบหลังการรีดเย็นครั้งแรก

- การรีดเย็นครั้งที่สอง

- การทำ Decarburization และการเคลือบผิวเพื่อช่วยขจัดซัลเฟอร์ระหว่างการอบ Batch annealing

- การอบ Batch annealing เพื่อพัฒนาการเรียงตัวของผลึกและการโตของเกรน

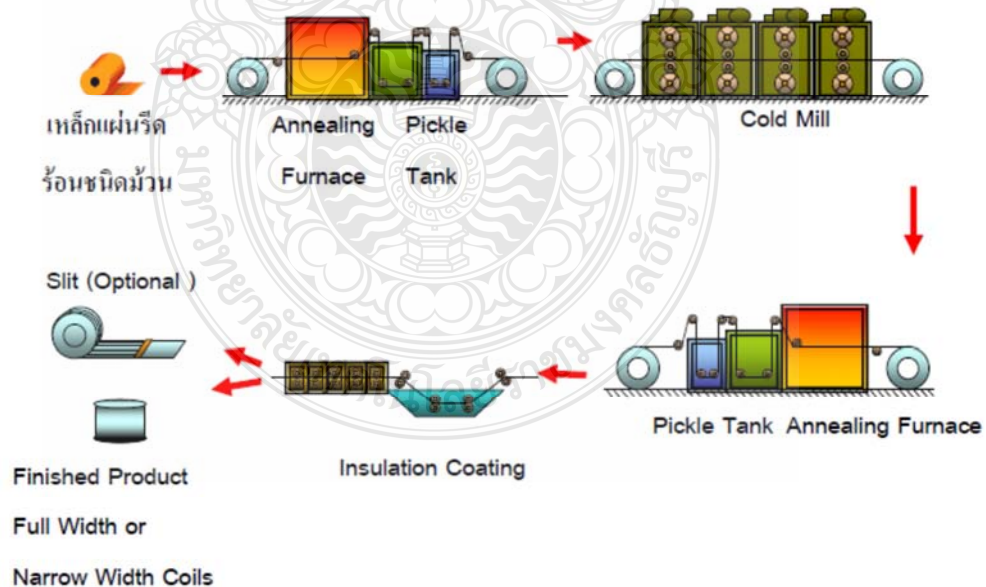
- การเคลือบผิว “Insulation coating” or “Core Plating” (คือ การเคลือบเหล็กกล้าชนิดแผ่นด้วยชั้นบางๆของ Varnish หรืออินทรีย์ (Inorganic material) ที่มีความต้านทานทางไฟฟ้าดี เพื่อป้องกันการไหลของกระแสระหว่างชั้น (Lamination) ของแกนอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งมักจะประกอบด้วยชั้นบางๆ หลายชั้น)

ส่วนขบวนการผลิต Non-oriented electrical sheets ไม่ยืดยาวเหมือนของ Oriented electrical sheets

คุณสมบัติทางแม่เหล็กขึ้นกับปริมาณคาร์บอนและซิลเฟอร์ ความบริสุทธิ์ (Cleanliness) ระดับของความเค้น

ปริมาณของซิลิกอนและอลูมิเนียม ซึ่งข้อจำกัดโดยธรรมชาติของเหล็กกล้ารีดเย็นที่ผสมซิลิกอนจะผสมซิลิกอนได้ไม่เกินประมาณ 3% เนื่องจากเหล็กจะเปราะ

Non-oriented electrical steel สามารถผลิตได้โดยการหลอมด้วยเตาไฟฟ้าหรือ BOF ก็ได้ และต้องการเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีสิ่งเจือปนน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยซิลิกอนและอลูมิเนียมจะถูกเติมเข้าไปในน้ำเหล็กขณะที่อยู่ใน Ladle การทำ Degasification, Decarburization และบางกรณี Desulphurization ของน้ำเหล็กกล้าหลอมเหลวเป็นสิ่งจำเป็น จากนั้นจะผ่านการหล่อและรีดต่อไป โดยในกรณีของ Non-oriented electrical steel ที่ผสม Si สูงจะทำการอบ Normalizing และ Shot blasting ก่อนรีดเย็นด้วย



รูปที่ 2.42 การผลิตเหล็กกล้า Non-oriented electrical steel สำหรับงานไฟฟ้า

ที่มา : สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

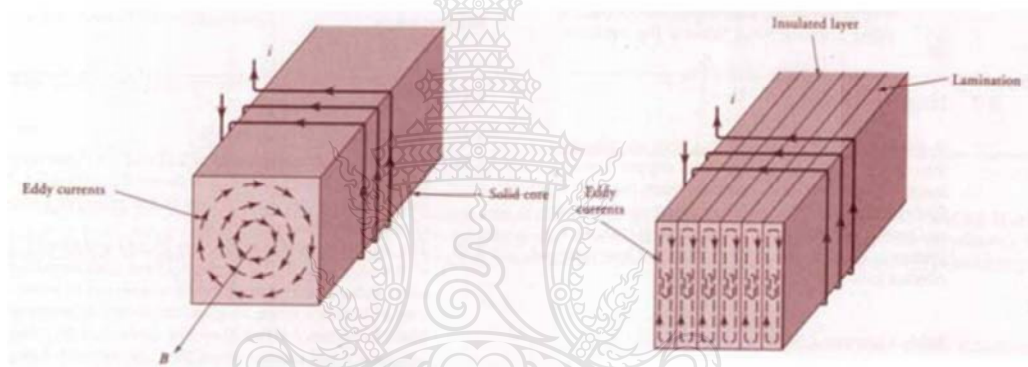
ปัจจุบันการใช้งานนิยมใช้เฉพาะที่เป็นเหล็กแผ่นรีดเย็น เนื่องจากมีความบางทำให้ Core loss ต่ำ
 สำหรับตัวอย่างการใช้งานของ Electrical steel sheet แสดงในรูปที่ 2.44

		Grades of Electrical Steel													
		TRAN-COR		Oriented				Nonoriented							
		H-0 and H-0 DR	H-1 and H-1 DR	M-2	M-3	M-4	M-6	M-15	M-19	M-22	M-27	M-36	M-43	M-45	M-47
Transformers	Large Power	*	*	*	*	*	*								
	High Efficiency Distribution	*	*	*	*	*	*								
	Dry Type Distribution					*	*	*	*	*					
	Current (Instrument)					*	*								
	Voltage-Regulator					*	*	*	*	*	*	*			
	Lighting (Ballast)					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Welding and Battery Charger					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Adjustable Variable					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Television and Electronic Power							*	*	*					
	Audio and Chokes							*	*	*	*	*			
Motors and Generators	Large Rotating (Over 200 HP)					*	*	*	*						
	Standard Efficiency Integral (1-200 HP)									*	*	*	*	*	
	High Efficiency Integral (1-200 HP)									*	*	*	*	*	
	Fractional Industrial												*	*	
	Domestic Appliance and Refrigerator												*	*	
Other	Stand-By and Small Generators						*	*	*	*	*				
	Watt-hour Meters								*	*					
	Relay Cores and Pole Pieces											*	*		
	Magnetic Amplifiers Saturable Reactors					*	*								
	Electromagnetic Shielding					*	*	*	*	*	*				

รูปที่ 2.43 การใช้งานของ Electrical steel sheet
 ที่มา : สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

2.14 การสูญเสียกระแสไหลวน (Eddy Current Loss)

เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าสลับมีการเปลี่ยนแปลงขนาด และทิศทางการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจึงเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางตลอดเวลา ด้วยการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กดังกล่าว จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าตามกฎของไมเคิลฟาราเดย์ เนื่องจากแกนเหล็กนั้น เป็นตัวนำชนิดหนึ่ง และในแกนเหล็กนั้นจะเป็นวงจรปิดและมีความต้านทานอยู่ด้วย จึงทำให้เกิดกระแสไหลวนขึ้นในแกนเหล็กและการสูญเสีย เนื่องจากผลกระแสไฟฟ้ายกกำลังสอง และความต้านทานของแกนเหล็ก (I^2R) จะแสดงผลในรูปของความร้อน การสูญเสียจะสามารถทำให้ลดลงได้ โดยการใช้แผ่นเหล็ก บางๆการสูญเสียในแกนเหล็กจะสามารถทำได้โดยการทดสอบสภาวะเปิดวงจร[13]



รูปที่ 2.44 แสดงการไหลของ eddy current

ที่มา: ธนัตชัย กุลวรวานิชพงษ์

การสูญเสียกระแสไหลวนสามารถลดลงได้สองวิธีด้วยกัน

1. เลือกแกนเหล็กที่มีความต้านทานสูง แกนเหล็กชนิดนี้ทำได้โดยการเพิ่มสารซิลิคอนประมาณ 4% ในเนื้อเหล็ก
2. เลือกใช้แกนเหล็กที่เป็น แกนเหล็กอัด (Laminated core) แต่ละแผ่นจะมีฉนวนหุ้มไว้แผ่นอัดตามทิศทางเดินเส้นแรงแม่เหล็ก

2.15 การวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุน

การวิเคราะห์ตัดสินใจเลือกลงทุนโครงการต่าง ๆ บางครั้งต้องการจะทราบว่าจำนวนผลผลิตที่จะผลิตคุ้มทุนควรเป็นเท่าไรเพื่อเป็นเครื่องช่วยในการตัดสินใจ จุดคุ้มทุน (break – even analysis) คือจุดที่รายได้กับรายจ่ายเท่ากัน นั่นคือกำไรเป็นศูนย์นั่นเอง การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นทุน รายได้ และผลกำไรที่ปริมาณการผลิตต่าง ๆ การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนเหมือนกันโครงการระยะสั้น เงื่อนไขต่าง ๆ ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดโครงการ เพราะถ้ามีการเปลี่ยนแปลงก็จะมีผลทำให้การตัดสินใจคลาดเคลื่อนได้ [14]

การคำนวณหาจุดคุ้มทุนโครงการเดียว
กำหนดให้

C	คือต้นทุนรวมในการผลิต
F	คือต้นทุนคงที่
V	คือต้นทุนแปรผัน
N*	คือจำนวนที่ผลิตที่จุดคุ้มทุน
N	คือจำนวนการผลิตที่จุดใด ๆ
v	คือต้นทุนแปรผันต่อหน่วย
R	คือรายได้
P	คือกำไร
p	คือราคาขายต่อหน่วย

$$\text{ต้นทุนรวมในการผลิต } C = F + V \quad (2.1)$$

$$\text{แต่ } V = vN \quad (2.2)$$

แทนค่าในสมการที่ (4.1) จะได้

$$C = F + vN \quad (2.3)$$

$$\text{รายได้ (R)} = pN \quad (2.4)$$

$$\text{กำไร (P)} = \text{รายได้ (R)} - \text{ต้นทุนรวม (C)} \quad (2.5)$$

แทนค่าสมการที่ (4.3) และ (4.4) ลงในสมการที่ (4.5)

$$\text{กำไร (P)} = pN - (F + vN)$$

ให้กำไร (P) เท่ากับศูนย์ จะได้ต้นทุนเท่ากับรายได้

$$0 = pN - (F + vN)$$

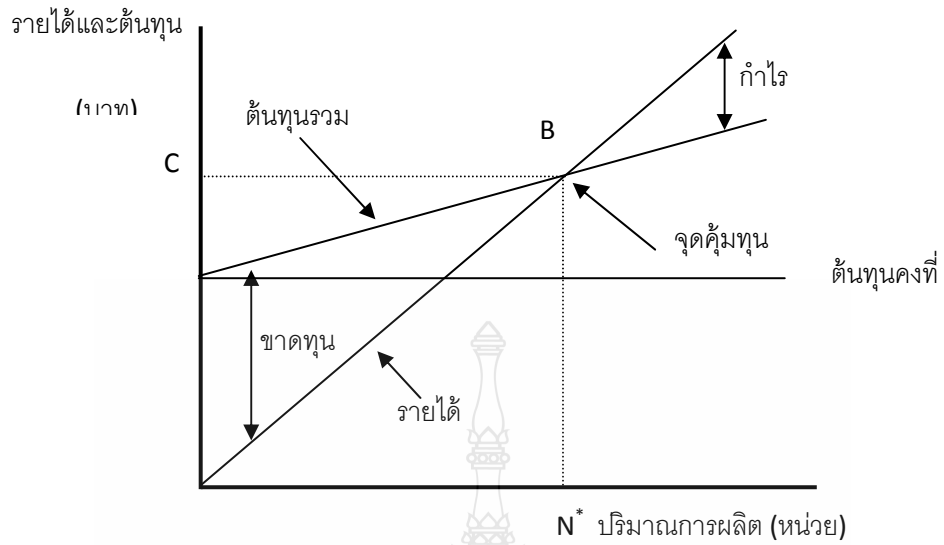
$$0 = pN - F - vN$$

$$pN - vN = F$$

$$N(p - v) = F$$

$$N^* = \frac{F}{p - v} \quad (2.6)$$

เมื่อ N^* เป็นปริมาณที่จุดคุ้มทุนพอดี จากการคำนวณดังกล่าวสามารถนำไปแสดงด้วยแผนภูมิ
ได้ดังรูปที่ 2.26

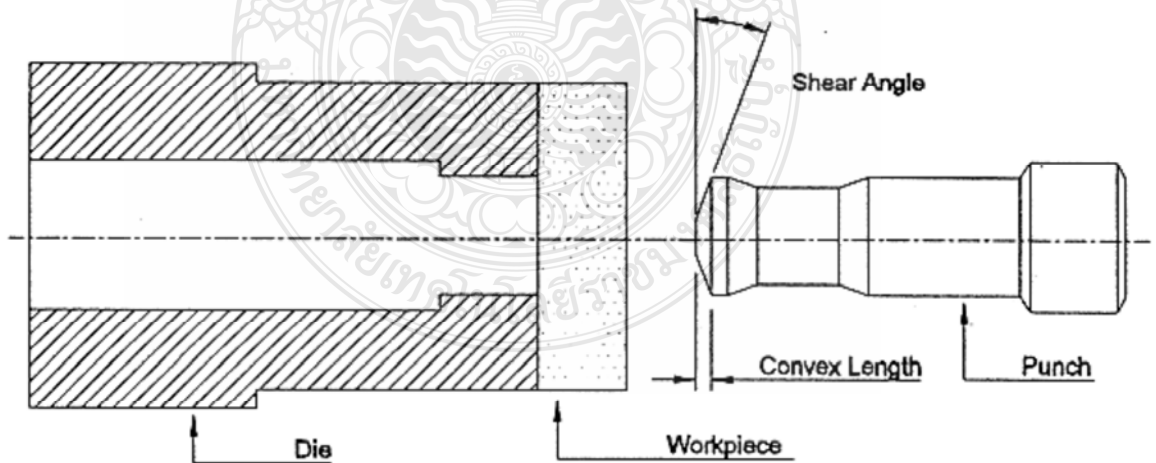


รูปที่ 2.45 แสดงแผนภูมิการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

ที่มา: นวพร ทองนุช

2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

LUO[15] ทำการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของฟันซี่ในงานตัดโลหะแผ่นเป็นชิ้นงานกลมโดยใช้วัสดุ AISI 5210 ที่มีค่าความหนาต่างๆ



รูปที่ 2.46 ลักษณะการกำหนดขนาดและรูปร่างของฟันซี่และตาย

ที่มา : LUO

โดยการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟันซี่ที่ 13.6 มม. และ 15.7 มม. และกำหนดมุมตัดรวมในการตัดเฉือนของฟันซี่ที่ 12.5 องศา และ 20 องศา ดังรูปที่ 2.27 และกำหนดลักษณะของผิวฟันซ์เป็นแบบขัดมันและเคลือบผิว โดยกำหนดวัสดุที่ใช้ทำฟันซ์เป็นเหล็กโรบสูง (High Speed Steel) และกำหนดค่าความแข็งที่ 65 – 67 HRC ทำการทดลองตัดชิ้นงานแล้วทำการสังเกตและวัดค่าการสึกหรอของฟันซ์โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และเครื่อง Optical Stereoscope จากผลการทดลองรูปแบบการสึกหรอของฟันซี่ที่มีมุมตัดรวม 12.5 องศา การสึกหรอจะเกิดบริเวณด้านข้างของคมตัด (Side Wear) เป็นลักษณะการสึกหรอเนื่องจากการเกาะติด (Adhesive Wear) ส่วนรูปแบบการสึกหรอของฟันซี่ที่มีมุมตัดรวม 20 องศา การสึกหรอจะเกิดบริเวณด้านข้างคมตัด (Flank Wear) และผิวด้านหน้า (Face Wear) ของคมตัดเนื่องมาจากความล้า (Fatigue Wear) ทำให้เกิดการสึกหรอที่ผิวด้านหน้าของฟันซี่มากขึ้น วิเคราะห์ได้ว่ารูปแบบการเกิดการสึกหรอเป็นผลมาจากรูปร่างของคมตัด ถ้าหากมีพื้นที่สัมผัสระหว่างผิวชิ้นงานและผิวด้านหน้าของฟันซี่สูงก็จะเกิดการสึกหรอที่บริเวณด้านหน้าของฟันซี่สูงไปด้วยเนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดจากการสัมผัสกันโดยตรงของฟันซี่และชิ้นงาน

ชาญยุทธ มะกา [6] ศึกษาอิทธิพลของชนิดของวัสดุทำแม่พิมพ์ที่มีผลต่อการสึกหรอของแม่พิมพ์ตัด โดยทำการศึกษาการสึกหรอของชุดคมตัดที่ทำจากวัสดุที่มีปริมาณคาร์บอนแตกต่างกัน 4 ชนิด คือ เหล็ก JIS SKD11 SKS3 SKH51 และ S50C กำหนดให้ชุดคมตัดที่ทำจากวัสดุทั้ง 4 ชนิด มีความแข็งเท่ากันคือ 59(+1) HRC ใช้ช่องว่างแม่พิมพ์คงที่ คือ ร้อยละ 5 ของความหนาชิ้นงาน โดยทำการตัดเหล็กแผ่น JIS G3141 SPCC (AISI 1012) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชุดคมตัด 25 มิลลิเมตร ความหนาของชิ้นงาน 0.8 มิลลิเมตร โดยชุดคมตัดแต่ละชนิดทำการตัดชิ้นงานจำนวน 10,000 ชิ้น จากการทดลองพบว่าเหล็กที่มีอัตราการสึกหรอน้อยที่สุดคือเหล็ก SKD11 รองลงมาคือ เหล็ก SKS3 SKH51 และเหล็ก S50C ตามลำดับ

ทั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าเนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็กแต่ละชนิดต่างกัน กล่าวคือเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูงทำให้อัตราการเกิดคาร์ไบด์สูงซึ่งทำให้ความแข็งจุลภาคของเหล็กสูงตามไปด้วย เป็นผลให้อัตราการสึกหรอเกิดขึ้นน้อยกว่าเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ จากการทดลองพบว่าความเรียบผิวเริ่มต้นของชุดคมตัดที่เรียกว่าส่งผลให้การสึกหรอที่เกิดขึ้นน้อยกว่าความเรียบผิวของชุดคมตัดที่หยาบกว่าปริมาณการสึกหรอของเหล็ก SKD11 มีการสึกหรอน้อยกว่า SKS3 ร้อยละ 43.46 เหล็ก

SKH51 ร้อยละ 133.07 และเหล็ก S50C ร้อยละ 251.99 เพราะลักษณะผิวที่มีความเรียบดี ลักษณะมุมยอดผิวมีค่ามากเมื่อเกิดการเสียดสีลักษณะมุมดังกล่าวจะทนต่อการเสียดสีดีกว่ามุมที่มีขนาดน้อยกว่า

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ [16] ศึกษาการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนแม่พิมพ์ตัดที่ทำจากเหล็กเครื่องมือที่มีปริมาณคาร์บอนและโครเมียมสูง เกรด JIS SKD11 ชุบแข็งที่ระดับ 60 HRC ตัดวัสดุชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดเฟอร์ริติก AISI 430 แผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ความหนา 0.5 มิลลิเมตร โดยมุ่งเน้น ศึกษาอิทธิพลของระยะช่องว่างคมตัดระหว่างแม่พิมพ์ ที่มีต่ออัตราการสึกหรอของแม่พิมพ์ การตรวจสอบการสึกหรอทำทั้งทางตรงคือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นที่ชุดคมตัด โดยการวัดค่าแรงตัดชิ้นงาน น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง ระยะการสึกหรอของชุดคมตัด ด้านข้างและด้านหน้า และทางอ้อมคือการตรวจสอบที่ขอบตัดของชิ้นงานที่ได้ ด้วยการวัดความสูงของครีบทที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นตัดจนถึงจำนวนการตัดที่ 10,000 ครั้งของทุกชุดแม่พิมพ์ ผลการทดลองพบว่าแม่พิมพ์ที่มีช่องว่างคมตัดน้อย การสึกหรอของชุดคมตัดจะเกิดขึ้นด้วยอัตราที่สูงกว่าแม่พิมพ์ที่มีช่องว่างคมตัดมาก ความสูงของครีบทเพิ่มขึ้นตามปริมาณการสึกหรอของแม่พิมพ์ เมื่อเกิดการสึกหรอจนถึงสภาวะคงที่ ซึ่งตัวบ่งชี้ถึงปริมาณการสึกหรอของแม่พิมพ์คือแรงแนวตั้งฉากกับแนวแกนของชุดคมตัด และดูจากค่าแรงตัดชิ้นงาน ซึ่งชุดแม่พิมพ์ที่ช่องว่างคมตัดร้อยละ 3 ร้อยละ 8 และ ร้อยละ 18 ของความหนาชิ้นงาน แรงตัดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นร้อยละ 24.91, 23.79 และ 21.17 ของความหนาชิ้นงานตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับแรงตัดจากแม่พิมพ์เริ่มต้น

K. Mori n, Y.Abe,Y.Kidoma,P.Kadarno [17] ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ การลดขนาดของรถยนต์เพื่อประหยัดการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิง โดยลดการใช้เหล็กแผ่น สำหรับการผลิตชิ้นส่วนที่เป็นตัวถังรถยนต์และต้องมีความแข็งแรงเพื่อตอบสนองตามมาตรฐานความปลอดภัยการปกป้องผู้โดยสาร การใช้แผ่นเหล็กที่มีความต้านทานแรงดึงเกินกว่า 1 GPa มีความแข็งแรงดีกว่า คุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า การเจาะแผ่นเหล็กที่มีความแข็งแรงเป็นพิเศษทำให้ เครื่องมือมีแนวโน้มที่จะสึกหรออายุการใช้งานสั้น เครื่องมือเสื่อมสภาพ คุณภาพของขอบตัดชิ้นงานไม่ดี การที่จะทำให้คุณภาพของขอบตัดไม่ได้เป็นเรื่องง่าย ในการปรับเปลี่ยนช่องว่างระหว่างคมตัดเล็กน้อย การที่พันธะมีผิวด้านข้างที่เป็นส่วนโค้ง พันธะที่มีขอบกลมเล็กจะช่วยชะลอการแตกและเพิ่มประสิทธิภาพขอบตัดแผ่นเหล็ก ความแข็งแรงสูงพิเศษ ผลที่ได้ดังต่อไปนี้

1. ขอบกลมเล็กจะช่วยลดการเสีรูปของขอบตัดให้เบาบางลงและช่วยชะลอการแตกของขอบพันธะทำ

ให้พื้นผิวมีความมันมากขึ้น

2. รัศมีของขอบขนาดเล็กมาก 0.13 มม. ส่งผลให้ขอบตัดแผ่นเหล็กความแข็งแรงสูงพิเศษมี
ประสิทธิภาพสูง

3. ประสิทธิภาพสูงของขอบขนาดเล็กรัศมี 0.13 มม. ถูกกำหนดโดย slight clearance ระหว่าง
ฟันซ์และคาย

4. สำหรับแผ่นเจาะฟันซ์มีขอบกลมเล็กจะลดการแตกหักป้องกันไม่ให้เกิดความล้าเนื่องจาก
ความเครียดอัดมากรอบขอบตัด

Fjodor Sergejev , Priidu Peetsalu , Alina Sivitski , Mart Saarna , Eron Adoberg,[18] มีหลาย
ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานของเครื่องมือ (1) การออกแบบเครื่องมือ fine blanking เป็นวิธี
หนึ่งที่จะลดความเครียดสัมผัสของเครื่องมือ ; (2) โลหะแผ่นที่ใช้ในการ fine blanking เป็น
องค์ประกอบที่สำคัญมากและมีอิทธิพลโดยตรงต่อการสึกหรอและความอดทนของเครื่องมือ; (3) การ
เคลือบวัสดุเครื่องมือเป็นอีกวิธีที่นิยม สำหรับการปรับปรุงความทนทานของเครื่องมือซึ่งได้มาจาก
การศึกษาในด้านคุณสมบัติของความล้าของเหล็ก HSS

การทดลองในอุตสาหกรรม มีการเคลือบฟันซ์แบบ PVD ในกระบวนการ fine blanking แล้ว
ศึกษาการสึกหรอของฟันซ์โดยวิเคราะห์ในเรื่อง รูปทรงฟันซ์ ตำแหน่งของฟันซ์และคาย และวัด
หลังจากฟันซ์ไหลดสูงสุดที่ 100,000 รอบ ส่วนการทดลองเปรียบเทียบรอยหยักของผิวเคลือบและ
พื้นผิวที่สึกหรอจากความล้าได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ระหว่างทดสอบรอยหยักบนพื้นผิว
เคลือบแบบไดนามิกใช้ Vickers indenter ในการทดสอบการสึกหรอของพื้นผิวที่ล้าใช้ hardmetal ball
indenter กดเป็นวงกลมบนพื้นผิวเคลือบจำนวนครั้งโดยประมาณของรอบการไหลด ทดสอบก่อนที่
สารเคลือบผิวจะเริ่มลบบอกไป จากพื้นผิวฟันซ์ที่สามารถคาดการณ์ได้จาก Wohler เป็นเส้นโค้ง การ
วิเคราะห์ผลการทดสอบรวมถึงการตรวจสอบ fractographical มีการใช้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอน
(SEM) การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดย X-ray spectroscopy (EDS) และการศึกษาโครงสร้างผลึก
ของการเคลือบโดย X-ray Diffraction (XRD).

การสึกหรอของฟันซ์ในการกระบวนการ fine blanking ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย และการ
ปรับปรุงอายุการใช้งานของฟันซ์ เป็นสิ่งสำคัญที่จะหลีกเลี่ยงการสึกหรอแบบยึดติดโดยการให้หล่อ
ลื่นที่เหมาะสมและลดอนุภาคที่มีฤทธิ์กัดกร่อนและลดการสึกหรอของจำนวนของเสี้ยวระหว่างการ
กระบวนการตรวจสอบความถูกต้องขององค์ประกอบทางเคมี พื้นผิวที่ขรุขระเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ
ที่สุดที่มีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานของฟันซ์ การยึดเกาะและค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานมีน้อย

A.I. Fernández-Abia, J. Barreiro, J. Fernández-Larrinoa, L.N. López de Lacalle[19] การเคลือบแบบ เทคโนโลยี CVD ได้รับการศึกษามาเป็นเวลานานและได้มีการพัฒนารูปทรงที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบเครื่องมือสำหรับประเภทนี้ ในขณะเดียวกันไม่สามารถกล่าวเกี่ยวกับการเคลือบแบบ PVD เนื่องจากกระบวนการเคลือบแบบ PVD ได้ถูกนำมาใช้โดยทั่วไปใน rotational tools ในกระบวนการต่างๆเช่น ยังคงต้องการพัฒนาต่อไป เมื่อเทคโนโลยี CVD จะใช้ในเครื่องมือที่มีขอบโค้งมน แต่การเคลือบแบบ PVD เน้นไปที่ขอบที่มีความคมมาก เน้นแรงอัดสูง รูปทรงเครื่องมือที่ออกแบบมาสำหรับการเคลือบแบบ CVD จึงไม่เพียงพอสำหรับเทคโนโลยีการเคลือบแบบ PVD

วิธีการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือที่เคลือบแบบ PVD การเคลือบด้วยสารทั้งสี่ประเภทถูกนำมาทำการทดสอบ : AlTiSiN (nACo®), AlCrSiN (nACRo®), AlTiN และ TiAlCrN. สรุปว่า การเคลือบที่ดีที่สุดที่สุด เป็นสารเคลือบ nACo® และ AlTiN เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ปัจจัยหลายประการที่ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของเครื่องมือใช้แรงตัดน้อย ส่วนที่ขรุขระมีค่า Ra ต่ำกว่า 2 เมตร แม้ในขั้นตอนสุดท้ายของการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบการเคลือบ ทั้งสองชนิด การเคลือบ nACo ดีกว่า เคลือบ AlTiN เนื่องจากมีโครงสร้าง nano-crystalline ซึ่ง ช่วยในการกระจายความร้อนได้อย่างรวดเร็ว การก่ตัวของชั้นป้องกัน ที่ ดัดขัด การยึดเกาะของสแตนเลส และลดการนำความร้อน

S.Y. Luo[20] เพื่อให้ได้ชิ้นส่วนที่มีความแม่นยำสูง ยืดอายุการใช้งานของฟันซ์และเครื่องมือต่างๆ และมีขอบตัดชิ้นงานที่ดี ได้ทำการทดลองโดยการเจาะรูที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตรบนแผ่นเหล็กอ่อนที่มีความหนา 6.35-41 มม. พบว่าเมื่อใช้ฟันซ์ ที่มีมุมมนเนียนคู่ เกิน 10 องศา จะผลิตชิ้นงานได้ไม่ดีและ ค่ารัศมีช่องห่างระหว่างคมตัด ควรจะมีมุมเนียนประมาณ 10-15% ของความหนาของแผ่นวัสดุชิ้นงานเพื่อลด punch load

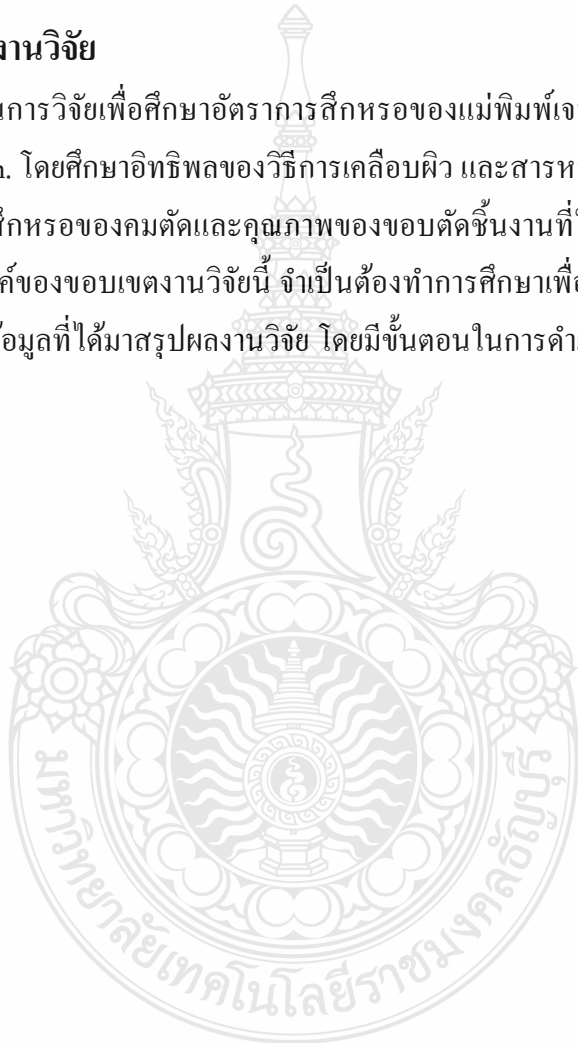
และจากงานวิจัย พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของคมตัด ได้แก่ มุมของคมตัด ปริมาณคาร์บอนและ โครเมียมของเครื่องมือตัด รูปร่างของคมตัด ประสิทธิภาพของการเคลือบผิวเครื่องมือตัด ระยะห่างระหว่างฟันซ์และคาย การสึกหรอจะเกิดบริเวณด้านข้างคมตัด(Flank Wear) และผิวด้านหน้า (Face Wear) ของคมตัด และวิธีการวัดการสึกหรอนั้นมีหลายวิธี เช่น การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดย X-ray spectroscopy (EDS) และการศึกษาโครงสร้างผลึกของการเคลือบโดย X-ray Diffraction (XRD) และการวัดที่คุณภาพของขอบตัดชิ้นงาน คือ ส่วนโค้งมน รอยตัดเนียน รอยฉีกขาด และครีบก

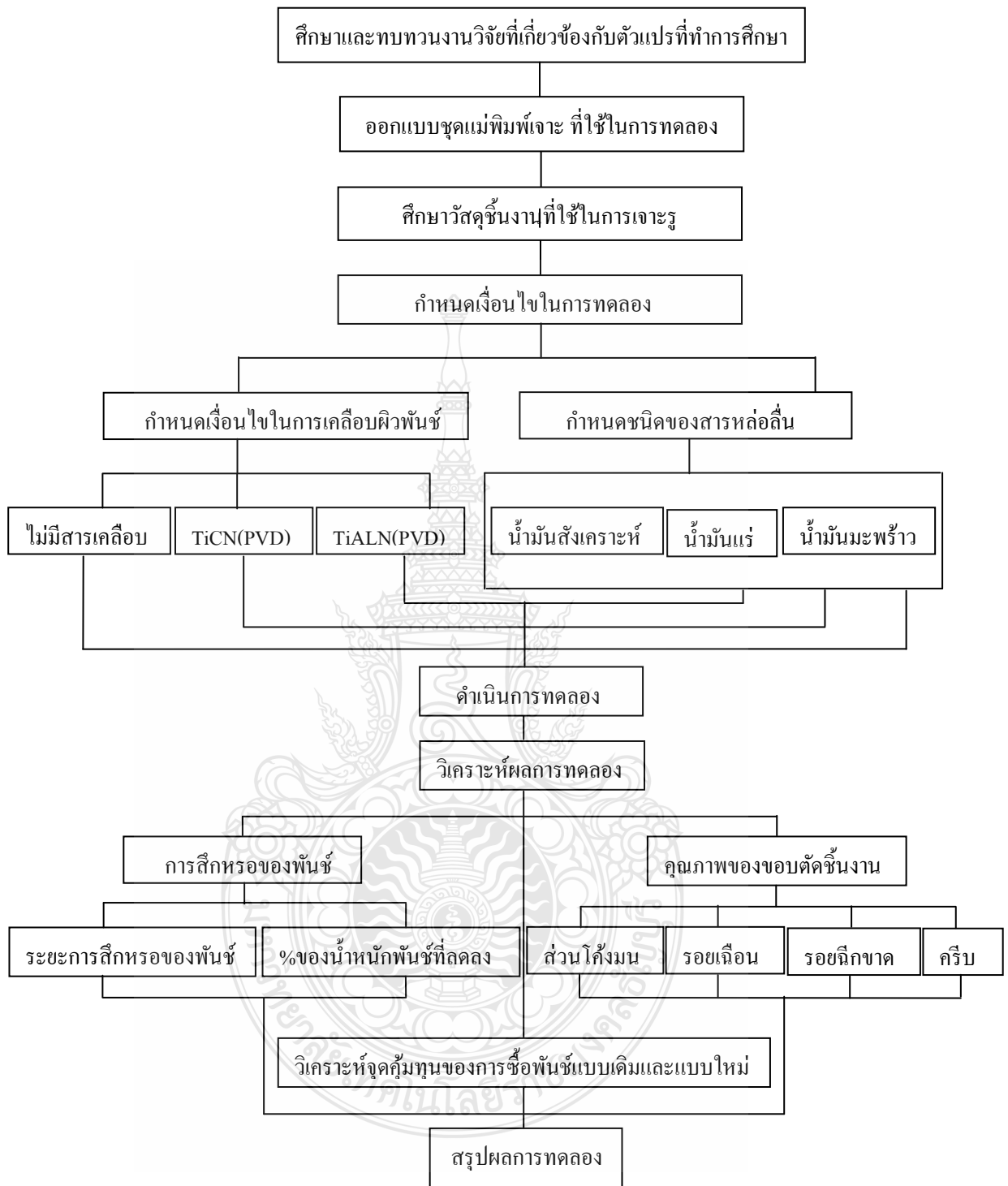
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาอัตราการสึกหรอของแม่พิมพ์เจาะรู สำหรับเจาะเหล็กแผ่น ซีลิกอน หนา 0.27 mm. โดยศึกษาอิทธิพลของวิธีการเคลือบผิว และสารหล่อลื่นที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ทราบถึงอัตราการสึกหรอของคมตัดและคุณภาพของขอบตัดชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษา และเพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของขอบเขตงานวิจัยนี้ จำเป็นต้องทำการศึกษาเพื่อเก็บข้อมูลในการวิจัย และทำการทดลองเพื่อนำข้อมูลที่ได้อาสรุปผลงานวิจัย โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานดังนี้

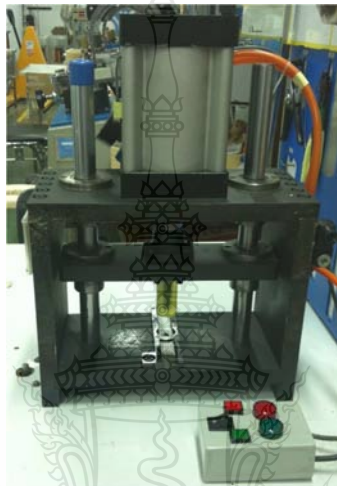




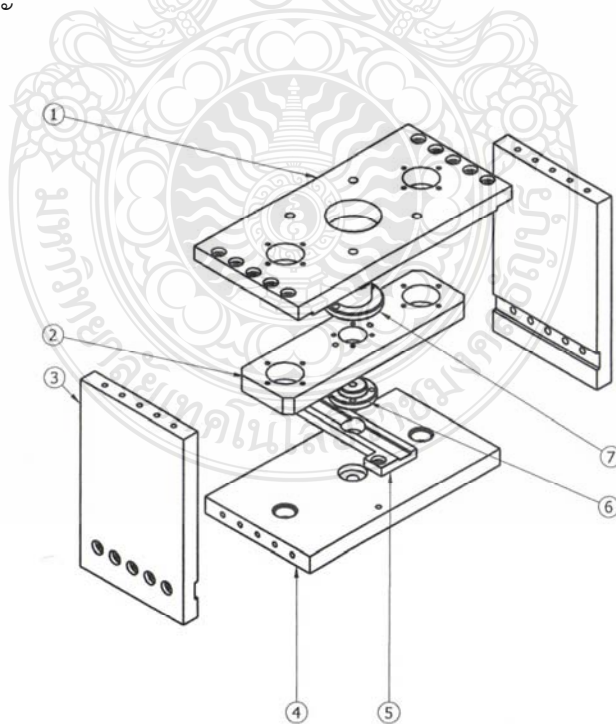
รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินการวิจัยการศึกษาเปรียบเทียบชนิดของสารเคลือบผิวและสารหล่อลื่น
ในกระบวนการตัดเจาะเหล็กชิลิกอน

3.2 การออกแบบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อทำการศึกษารายละเอียดต่างๆ ของแม่พิมพ์ตัดเรียบเรียบร้อยแล้ว ได้ทำการออกแบบแม่พิมพ์ตัด โดยคำนึงถึงความปลอดภัยในการทำงาน ความสะดวกรวดเร็ว รวมถึงประสิทธิภาพและความเที่ยงตรงของแม่พิมพ์ตัด เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เที่ยงตรงมากที่สุด สำหรับแม่พิมพ์ตัดที่ใช้ในการทดลองตัดชิ้นงานเหล็กซิลิกอน 27PH100 ดังนั้นในการพิจารณาเลือกวัสดุที่ใช้ทำส่วนต่างๆของแม่พิมพ์ต้องมีความเหมาะสม ลักษณะแม่พิมพ์ที่ทำการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แม่พิมพ์เจาะ



รูปที่ 3.3 แบบแม่พิมพ์เจาะ

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของชุดแม่พิมพ์

ลำดับ	ชื่อ	วัสดุ
1	Top M/C	AISI 1020
2	Support Center Hole M/C	AISI 1020
3	Side M/C	AISI 1020
4	Bottom M/C	AISI 1020
5	Silicon Insert	AISI 1020
6	Center Hole	AISI 1020
7	Support Rod Cylinder M/C	AISI 1020

3.3 การเตรียมวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

เลือกใช้แผ่นเหล็กซิลิกอน ซึ่งมีปริมาณซิลิกอน 4 % กลุ่มเหล็กกล้าซิลิกอนเกรด โอเรียนเตด มีลักษณะทั่วไปคือ

1. มีความต้านทานทางไฟฟ้าสูง

2. มีการสูญเสียกระแสไฟฟ้าไหลวนต่ำ

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเหล็กซิลิกอน 27PH100

Thickness (mm)	Tensile Strength (N/m ²)		Yield Point (N/m ²)		Elongation (%)		Hardness Hv1	Lamination Factor (%)
	L	C	L	C	L	C		
0.27	370	412	337	367	7	38	195	97.5



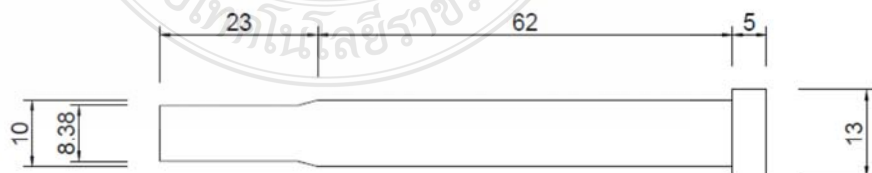
รูปที่ 3.4 แผ่นเหล็กซิลิกอน

3.4 การออกแบบชุดแม่พิมพ์ตัดเจาะ

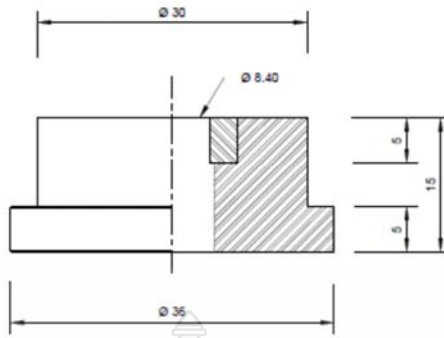
ในการทดลองจะประกอบด้วยแผ่นที่มีรูปทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.38 mm. ดังรูปที่ 3.5 และคายดังรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดการเคลือบผิวแผ่น

Coating Film	Material	Description (mm)	Scratch (g)	Thickness (μm)
TiCN	SKH51	13×90	400	3
TiAlN	SKH51	13×90	400	3



รูปที่ 3.5 แผ่น



รูปที่ 3.6 คาย

3.5 การเตรียมเคลือบผิว และสารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง

3.5.1 ชุดแม่พิมพ์ที่ใช้วิธีการเคลือบที่ต่างชนิดกันดังนี้

3.5.1.1 พันซ์ที่ไม่มีการเคลือบผิวผลิตจากเหล็ก SKH 51



รูปที่ 3.7 พันซ์ที่ใช้ไม่มีการใช้สารเคลือบ



รูปที่ 3.8 พันซ์ที่ใช้สารเคลือบ TiNC (PVD)



รูปที่ 3.9 พันซ์ที่ใช้สารเคลือบ TiAlN (PVD)

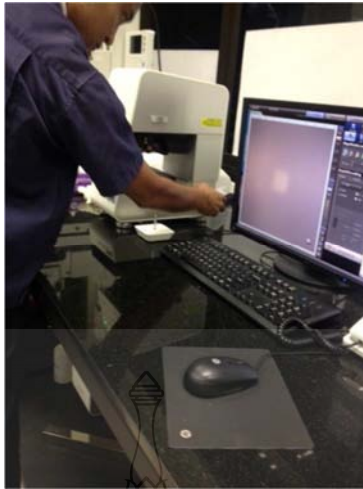
3.5.2 สารหล่อลื่นต่างชนิดกันดังนี้



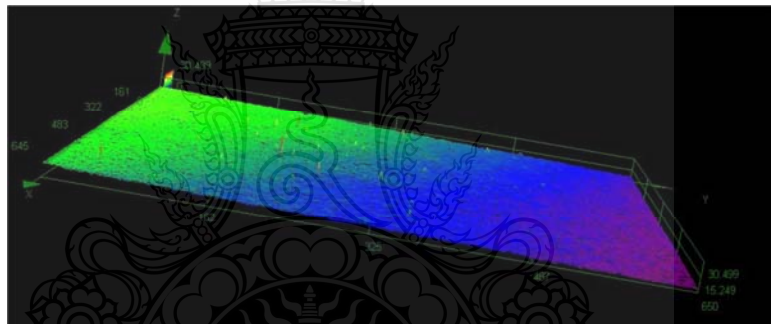
รูปที่ 3.10 น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ (GP-906) รูปที่ 3.11 น้ำมันแร่ (GP-9020) รูปที่ 3.12 น้ำมันมะพร้าว

3.5.2.1 ความหนาของฟิล์มน้ำมันที่ทาลงบนเหล็กแผ่น

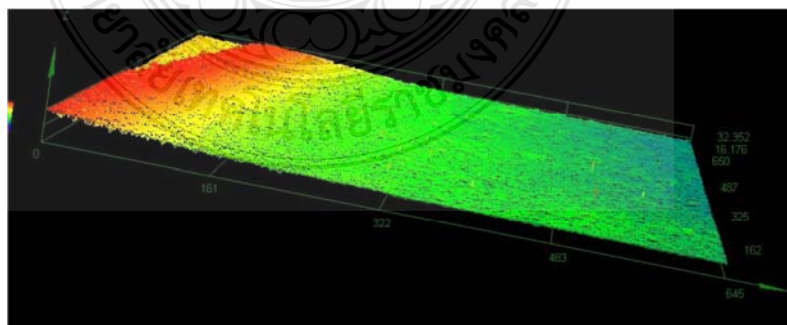
ความหนาของฟิล์มน้ำมันแต่ละชนิดที่ทำด้วยแปลงลงบนแผ่นเหล็กซิลิกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์ Microscope Laser ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละชนิดจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.15-3.18



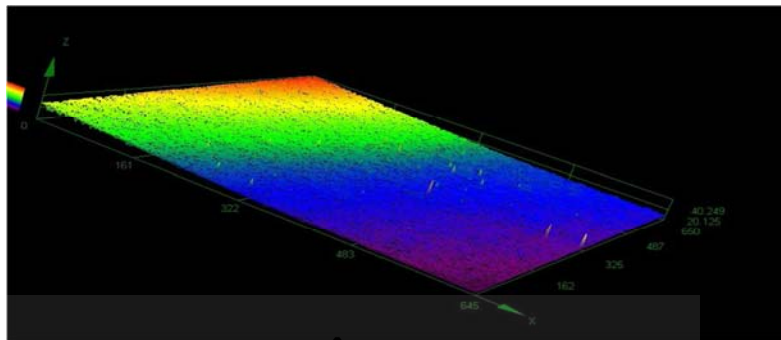
รูปที่ 3.13 แสดงการวัดความหนาของฟิล์มน้ำมันด้วยกล้องจุลทรรศน์ Microscope Laser



รูปที่ 3.14 การกระจายตัวของฟิล์มน้ำมันสังเคราะห์ประมาณ 15.00-17.00 μm .



รูปที่ 3.15 การกระจายตัวของฟิล์มน้ำมันแร่ประมาณ 16.00-18.00 μm .

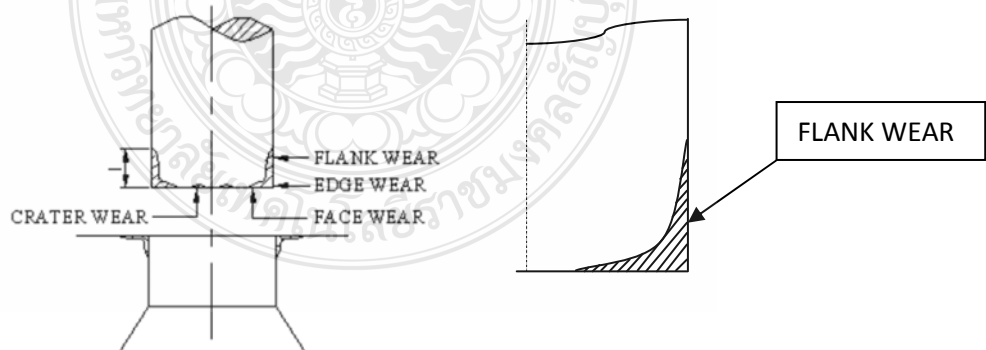


รูปที่ 3.16 กระจายตัวของฟิล์มน้ำมันมะพร้าวประมาณ 20.00-22.00 μm

3.6 การบันทึกข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

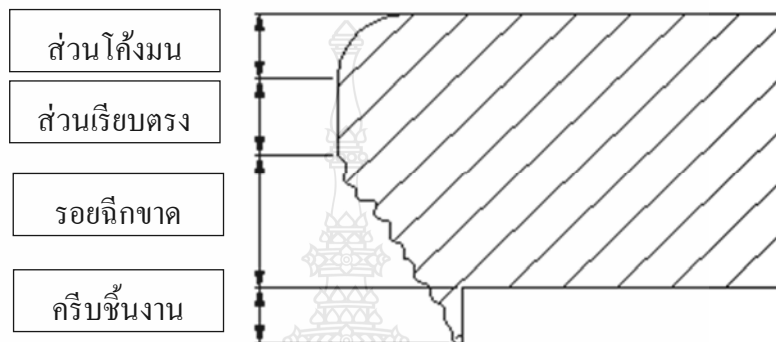
กำหนดช่วงการเก็บผลการทดลองเพื่อศึกษาอัตราการสึกหรอของคมตัด และคุณภาพของขอบตัด ชิ้นงานดังนี้คือ บันทึกข้อมูลทุกๆ 300 ชิ้น จนกระทั่งครบ 3,000 ชิ้น จะได้ข้อมูลทั้งหมดในลักษณะต่างๆซึ่งประกอบไปด้วย

- วัดขนาดการสึกหรอของคมตัด โดยการชั่งน้ำหนัก
- วัดขนาดการสึกหรอของคมตัด โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจสอบการสึกหรอ



รูปที่ 3.17 ตำแหน่งการการสึกหรอด้านข้างของฟันซี่

- ค่าความสูงของส่วน โคนึ่งมน (Edges Radius)
- ค่าความสูงของส่วนเรียบตรง (Shear Band)
- ค่าความสูงของรอยฉีกขาด (Band Fracture)
- ค่าความสูงของครีบก้นงาน (Burr)



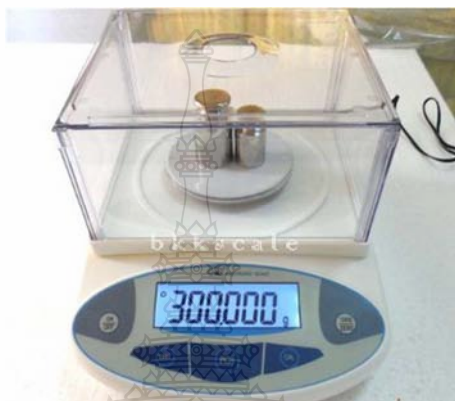
รูปที่ 3.18 ตำแหน่งการวัดความสูงต่างๆของขอบตัดชิ้นงาน

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างใบบันทึกผลการทดลองคุณภาพของขอบตัดชิ้นงาน

ลำดับที่	ไม่มีสารเคลือบกับน้ำมันสังเคราะห์			
	ส่วนโคนึ่งมน	ส่วนเรียบตรง	รอยฉีกขาด	ครีบก้นงาน
1				
2				
3				
4				
5				
—				
x				

3.6.1 วัดอัตราการสึกหรอของฟันซ์โดยการชั่งน้ำหนัก

การวัดอัตราการสึกหรอของฟันซ์ โดยการชั่งน้ำหนักของฟันซ์ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล 3 ตำแหน่ง ค่าความแม่นยำ 0.001 กรัม กรณีฟันซ์มีการสึกหรอ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของฟันซ์จะลดลง หลังจากการเจาะที่ 3,000 ครั้ง แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.19 การวัดอัตราการสึกหรอของฟันซ์โดยการชั่งน้ำหนัก

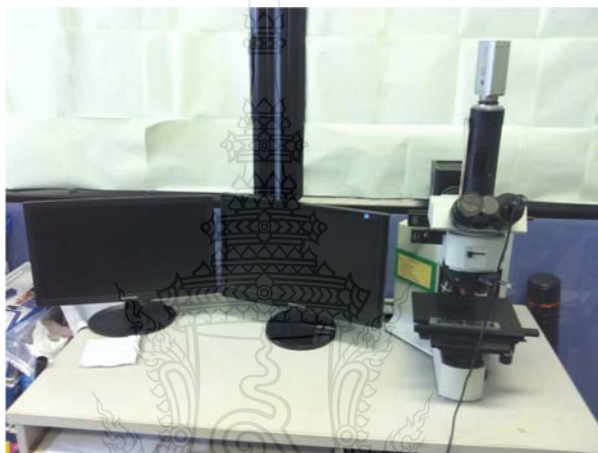
3.6.2 การวัดคุณภาพของขอบตัดชิ้นงาน

เครื่องขัดชิ้นงานแบบจานหมุน เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการขัดผิวชิ้นงานให้มีความเรียบผิวที่ละเอียด เพราะเครื่องขัดชิ้นงานแบบจานหมุนสามารถเปลี่ยนแผ่นขัดได้ ตั้งแต่แผ่นขัดแบบหยาบไปจนถึงแผ่นขัดแบบละเอียด แสดงดังรูปที่ 3.22 จนสามารถนำชิ้นงานไปทำการส่องกล้องจุลทรรศน์ Optical Microscopes



รูปที่ 3.20 เครื่องขัดชิ้นงานแบบจานหมุน

การวัดขนาดการสึกหรอของฟันซ์ โดยการวัดค่าความสูงของรอยการสึกหรอและคุณภาพของขอบตัดชิ้นงาน คือ ค่าค่าความสูงของส่วนโค้งมน (Edges Radius),ค่าความสูงของส่วนเรียบตรง (Shear Band) ค่าความสูงของรอยฉีกขาด (Band Fracture),ค่าความสูงของครีบน้ำมัน (Burr) (วัดที่ขอบของชิ้นงาน) ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscopes) กรณีฟันซี่มีการสึกหรอมากขนาดของส่วนเรียบตรงหรือส่วนหน้าตัดเนื้อจะมีค่าน้อยลง แต่ส่วนโค้งมนและรอยแตกจะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 วัดขนาดการสึกหรอของฟันซ์

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาลักษณะการออกแบบแม่พิมพ์ โดยการกำหนดสารเคลือบของฟันซ์และชนิดของสารหล่อลื่น ที่แตกต่างกัน เพื่อให้ทราบถึงคุณภาพของขอบตัดชิ้นงานและการสึกหรอของคมตัดที่เกิดขึ้นกับฟันซ์ที่เคลือบผิวต่างชนิดกันและใช้สารหล่อลื่นต่างชนิดกัน โดยวัดผลจากคุณภาพของขอบตัดชิ้นงานและลักษณะการสึกหรอที่ผิวของฟันซ์

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

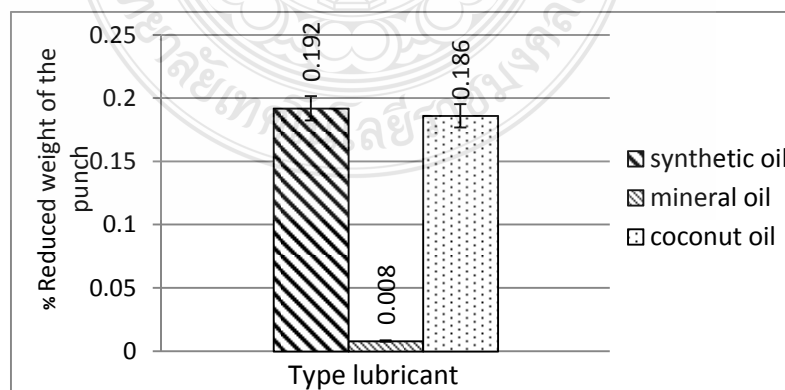
ในกระบวนการทดลองของงานวิจัยฉบับนี้ ต้องการศึกษอิทธิพลการเคลือบผิวของพันธ์ และสารหล่อลื่น ที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน กำหนดให้ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ไม่มีสารเคลือบเคลือบผิวด้วย TiCN เคลือบผิวด้วย TiAlN และสารหล่อลื่น คือ น้ำมันสังเคราะห์ น้ำมันแร่และน้ำมันมะพร้าว ทำการเจาะวัสดุชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าชนิด 45 เป็นหลักก้านซิลิกอน ลักษณะกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.4 มม. ความหนา 0.27 มม. ผู้วิจัยได้ทำการเก็บผลการทดลองที่ได้จากน้ำหนักพันธ์ที่ลดลง ลักษณะการสึกหรอของคมตัด และคุณภาพของขอบตัด โดยการกำหนดส่วนของการเก็บข้อมูลการทดลอง จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง สำหรับการวิเคราะห์ผลการวิจัย ซึ่งสามารถแยกผลการทดลองออกเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 อัตราการสึกหรอ

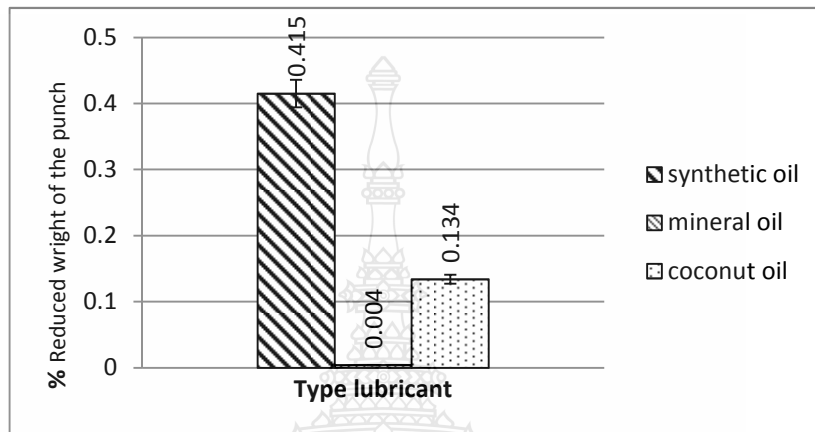
4.1.1 อัตราการสึกหรอของคมตัดโดยพิจารณาจากน้ำหนักของพันธ์

เมื่อป้อนชิ้นงานชิ้นที่ 3,000 และชั่งน้ำหนักพันธ์ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล 3 ตำแหน่ง ค่าความแม่นยำ 0.001 กรัม พบว่าการลดลงของน้ำหนักของพันธ์ที่ไม่มีการเคลือบและใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น มีน้ำหนักลดลงจากเดิม น้อยที่สุด เท่ากับ 0.008% รองลงมาคือใช้น้ำมันสังเคราะห์เป็นสารหล่อลื่น ลดลง 0.186% และใช้น้ำมันสังเคราะห์เป็นสารหล่อลื่นน้ำหนักลดลงจากเดิมมากที่สุด เท่ากับ 0.192% ตามลำดับ



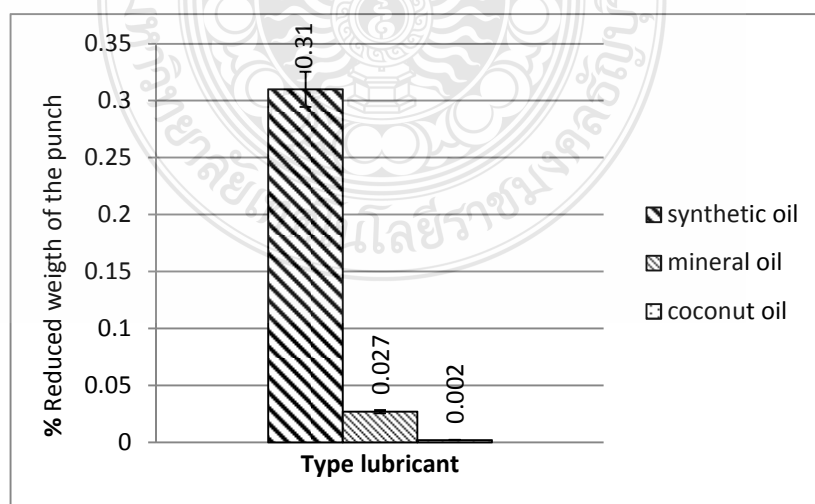
รูปที่ 4.1 แสดง % การลดลงของน้ำหนักของพันธ์ที่ไม่มีการเคลือบ

เมื่อป้อนชิ้นงานชิ้นที่ 3,000 และซังน้ำหนักรีดด้วยเครื่องซังน้ำหนักรีด 3 ตำแหน่ง ค่าความแม่นยำ 0.001 กรัม พบว่า การลดลงของน้ำหนักของพันธที่มีเคลือบผิวด้วย TiCN และใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น มีน้ำหนักลดลงจากเดิม น้อยที่สุด เท่ากับ 0.004% รองลงมาคือใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น ลดลง 0.134%, และใช้น้ำมันสังเคราะห์เป็นสารหล่อลื่นน้ำหนักลดลงจากเดิมมากที่สุด เท่ากับ 0.415 % ตามลำดับ

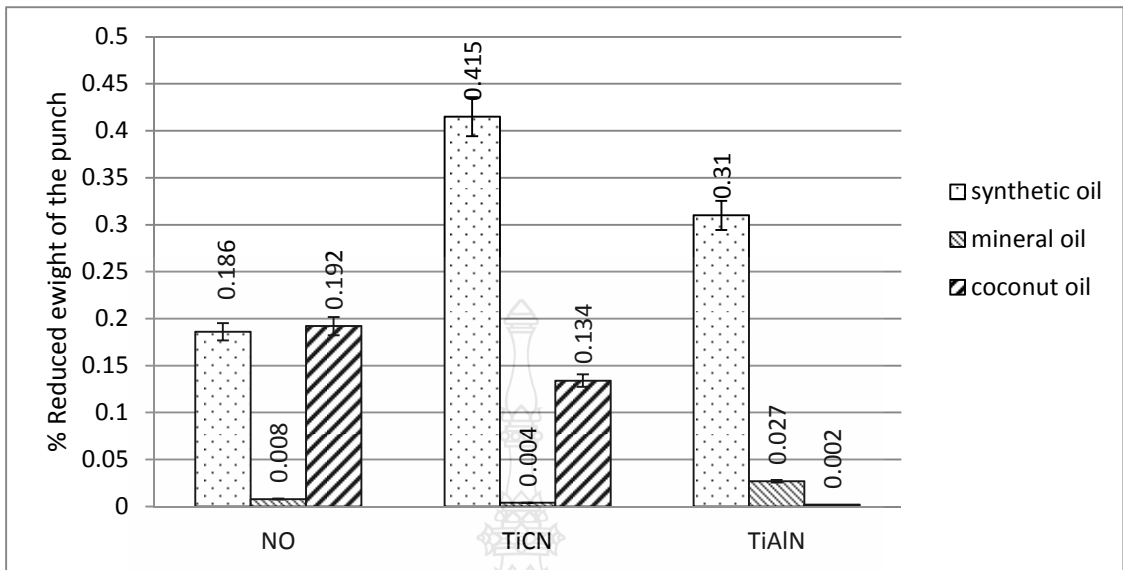


รูปที่ 4.2 แสดง % การลดลงของน้ำหนักของพันธที่มีเคลือบผิวด้วย TiCN

เมื่อป้อนชิ้นงานชิ้นที่ 3,000 และซังน้ำหนักรีดด้วยเครื่องซังน้ำหนักรีด 3 ตำแหน่ง ค่าความแม่นยำ 0.001 กรัม พบว่า การลดลงของน้ำหนักของพันธที่มีเคลือบผิวด้วย TiALN และใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น มีน้ำหนักลดลงจากเดิม น้อยที่สุด เท่ากับ 0.002% รองลงมาคือใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น ลดลง 0.027%, และใช้น้ำมันสังเคราะห์เป็นสารหล่อลื่นน้ำหนักลดลงจากเดิมมากที่สุด เท่ากับ 0.31 % ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 แสดง % การลดลงของน้ำหนักของพันธที่มีเคลือบผิวด้วย TiALN



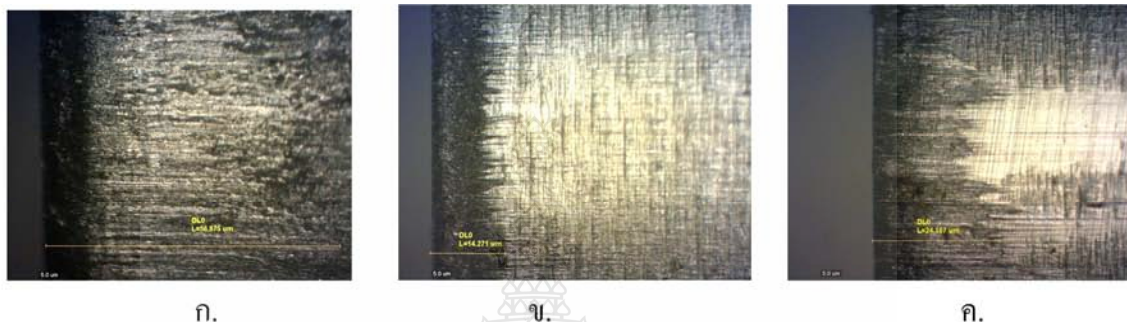
รูปที่ 4.4 รูปแสดง % การเปรียบเทียบน้ำหนักของพื้นที่เปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 4.4 แสดงอิทธิพลของสารเคลือบผิวและสารหล่อลื่นที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของพื้นที่หลังจากการตัดชิ้นงานที่ 3,000 ชิ้น โดยค่าของน้ำหนักของพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงได้คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการลดลงของน้ำหนัก จากกราฟพบว่าพื้นที่ที่ใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่นมีการลดลงของน้ำหนักพื้นที่ต่ำที่สุด เพราะน้ำมันแร่มีความถ่วงจำเพาะหรือความหนาแน่นสูงจึงช่วยลดการสึกหรอบแบบเกาะติดและลดอนุภาคที่มีฤทธิ์กัดกร่อนทำให้มีการสึกหรอของพื้นที่ลดลง [18] พื้นที่ที่มีการเคลือบผิวด้วย TiAlN มีการสึกหรอน้อยที่สุดเนื่องจากมีโครงสร้างทางจุลภาคที่ช่วยในการกระจายความร้อนได้อย่างรวดเร็ว การยึดเกาะของสแตนเลสจะช่วยลดการนำความร้อนได้ดีจึงทำให้เกิดการสึกหรอน้อยลงไปด้วย [19]

4.1.2 วิเคราะห์ลักษณะการสึกหรอของคมตัด

การสึกหรอของคมตัดเป็นผลที่ได้มาจากการนำพื้นที่ผ่านการตัดชิ้นงานจำนวน 3000 ชิ้น ในแต่ละสารเคลือบผิวและสารหล่อลื่นมาวัดการสึกหรอ โดยวัดจากกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscopes) เปรียบเทียบขนาดการสึกหรอและบันทึกผล

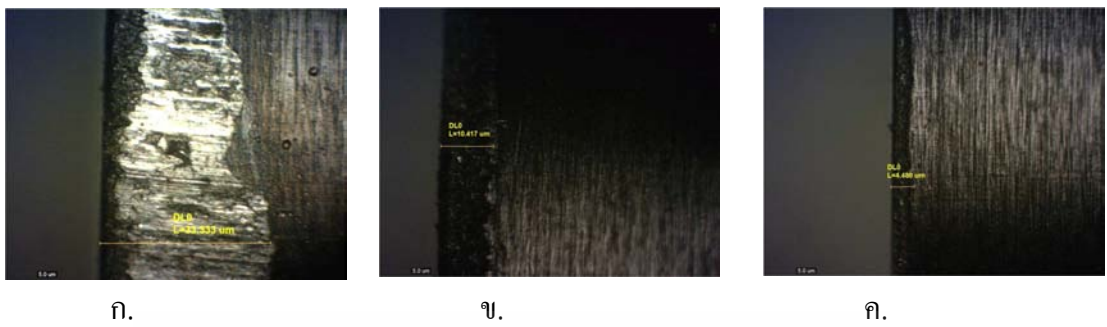
ลักษณะการสึกหรอของคมตัด (Punch) แต่ละชนิดที่ทำการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.5-4.7



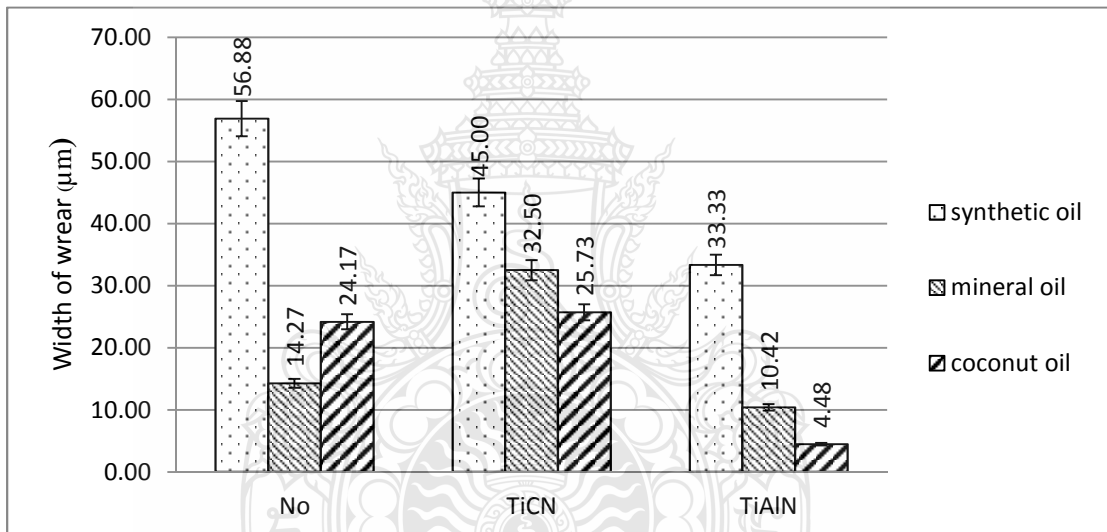
รูปที่ 4.5 ลักษณะการสึกหรอของคมตัด (Punch) ที่ไม่มีสารเคลือบ ก. สารหล่อลื่นน้ำมันสังเคราะห์
ข. สารหล่อลื่นน้ำมันแร่
ค. สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว



รูปที่ 4.6 ลักษณะการสึกหรอของคมตัด (Punch) ที่เคลือบด้วย TiCN ก. สารหล่อลื่นน้ำมันสังเคราะห์
ข. สารหล่อลื่นน้ำมันแร่
ค. สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว



รูปที่ 4.7 ลักษณะการสึกหรอของคมตัด (Punch) ที่เคลือบด้วย TiAlN ก.สารหล่อลื่นน้ำมันสังเคราะห์
 ข.สารหล่อลื่นน้ำมันแร่
 ค. สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว



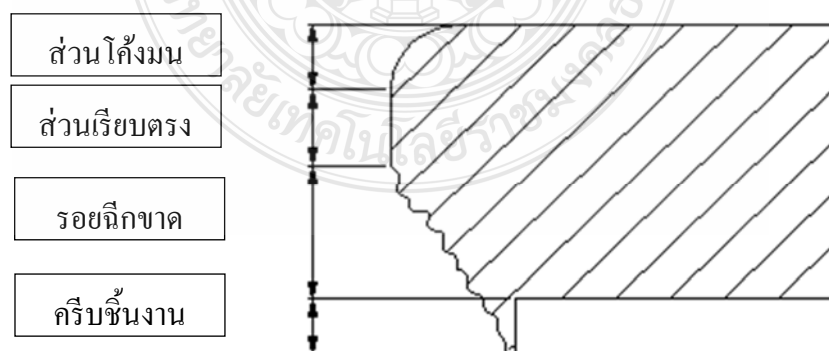
รูปที่ 4.8 รูปแสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอของคมตัด

จากรูปที่ 4.5 - 4.7 แสดงผลภาพถ่ายลักษณะการสึกหรอของฟันซ์ เมื่อพิจารณาภาพการสึกหรอของฟันซ์ ซึ่งเป็นฟันซ์ที่ผ่านการตัดเฉือนชิ้นงานมาจำนวน 3,000 ชิ้น พบว่าบริเวณคมตัดด้านข้างของฟันซ์เกิดการสึกหรอเกิดขึ้น โดยสังเกตจากความกว้างของแถบขาวที่เกิดขึ้นบริเวณด้านข้างของฟันซ์จะเห็นได้ว่าบริเวณด้านข้างของฟันซ์ ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการตัดเฉือน และเป็นสาเหตุที่ทำให้ผิวที่เคลือบอยู่หลุดร่อนออกซึ่งเกิดจากการสึกหรอแบบการเกาะติด (Adhesive Wear) คือผลเนื่องมาจากกระบวนการเกาะติดของโลหะซึ่งจะทำให้โลหะเกิดการยึดติดกัน จะเกิดขึ้นเมื่อมีโลหะ 2 อันเสียดสี

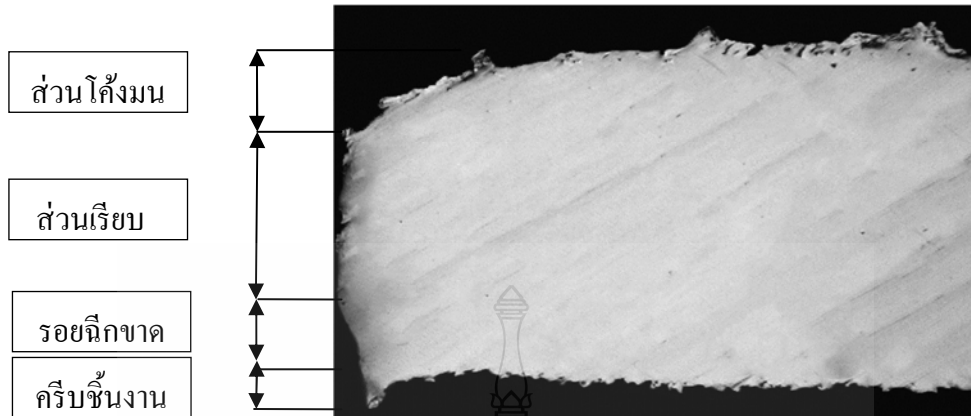
กัน โดยพื้นผิวที่สัมผัสกันมีขนาดเล็กมาก จะทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นเท่ากับหรือเกินจุดคราก (Yield Point) ของวัสดุ ถึงแม้ว่าแรงกระทำจะไม่สูงมากก็ตาม และจะทำให้เกิดแรงเกาะกันทางโมเลกุลขึ้นมีผลทำให้อนุภาคของวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าถูกดึงหลุดออกมาหรือเนื้อโลหะยึดติดกันได้ และเนื่องจากการป้อนกลับไปกลับมาส่งผลให้เกิดการสึกหรอแบบ Crater Wear คือผลที่เกิดต่อเนื่องจากการเกิดการสึกหรอแบบยึดติดหรือเกาะติดและการสึกหรอแบบการขีดข่วนมาก่อนทำให้ต้องใช้แรงในการตัดเฉือนชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นกว่าปกติโดยลักษณะการเกิดจะเกิดบริเวณขอบของคมตัดวิ่งเข้าสู่จุดศูนย์กลางของฟันซี่[5] จากภาพจะสังเกตเห็นได้ว่าฟันซี่ที่มีการสึกหรอน้อยที่สุดคือ ฟันซี่ที่มีการเคลือบผิวด้วย TiAlN และใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น จะสังเกตเห็นว่าฟันซี่ที่ใช้น้ำมันสังเคราะห์เป็นสารหล่อลื่นจะมีความกว้างของแถบขาวสูงทุกๆชุดการทดลองเพราะน้ำมันสังเคราะห์มีลักษณะใสมีความหนืดต่ำ การเกาะติดที่ผิววัสดุได้ไม่ดีเท่าที่ควรจึงส่งผลต่อการระบายความร้อนต่ำ ช่วยลดแรงเสียดทานได้น้อย ส่งผลให้เกิดการสึกหรอสูงสุด

4.2 คุณภาพของขอบตัดชิ้นงาน

จากการทดลอง ในกระบวนการตัดเจาะเหล็กซิลิกอน โดยนำชิ้นงานที่ได้จากการทดลองทำการส่องกล้องจุลทรรศน์ เพื่อตรวจสอบลักษณะขอบตัดของชิ้นงานและเก็บผลใน (ภาคผนวก ค) จะเห็นได้ว่าขอบตัดของชิ้นงานประกอบด้วย 4 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนของการเกิดโค้งมน (Edge Radius) ส่วนเรียบตรง (Shear Surface) รอยร้าว (Fracture Surface) และครีบก้น (Burr)

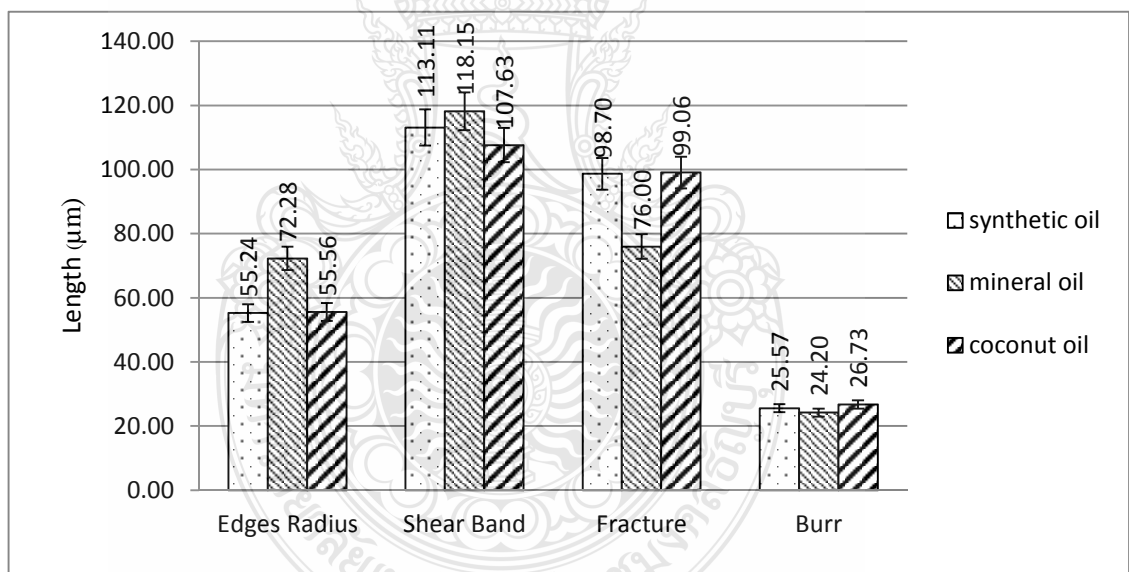


รูปที่ 4.9 แบบจำลองส่วนต่างๆของขอบตัดของชิ้นงาน



รูปที่ 4.10 ส่วนต่างๆของขอบตัดของชิ้นงาน

4.2.1 การวิเคราะห์คุณภาพของขอบตัดชิ้นงานพื้นที่ไม่มีสารเคลือบและสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.11 คุณภาพของขอบตัดชิ้นงานพื้นที่ไม่มีสารเคลือบและสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ

วิเคราะห์คุณภาพของขอบชิ้นงานของพื้นที่ไม่มีสารเคลือบผิวได้ส่วนประกอบของขอบคมตัดชิ้นงานแตกต่างกันดังนี้

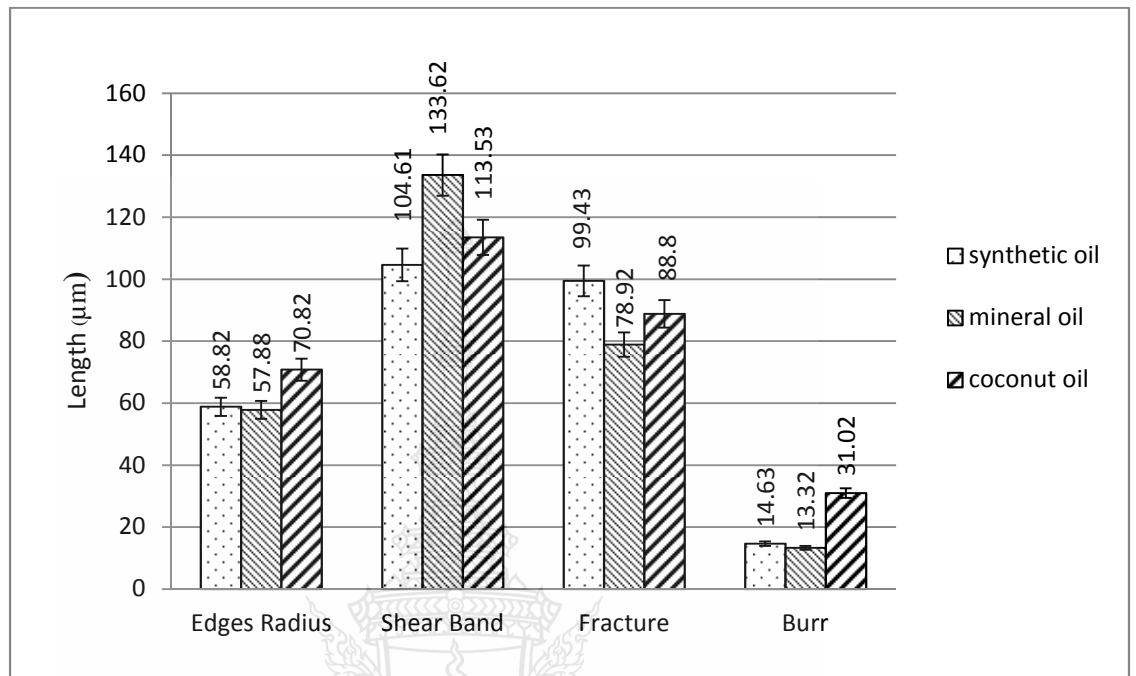
- 1) ขอบชิ้นงานที่เกิดจากการใช้น้ำมันสังเคราะห์เป็นสารหล่อลื่น ลักษณะของชิ้นงานที่สังเกตจากส่วน โค้งมน (Edges Radius)ที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยที่วัดได้คือ 55.24 µm. การเกิดรอยตัดเฉือน

(Shear band) เกิดขึ้นขอบของชิ้นงาน โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 113.11 μm .รอยฉีกขาด (Fracture) เกิดขึ้นมาก โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 98.70 μm .ครีป (Burr) เกิดขึ้นน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัด คือ 25.60 μm . ค่าที่ออกมาถือว่าไม่เป็นค่าที่ไม่น่าพอใจแต่จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ

2) ขอบชิ้นงานที่เกิดจากการใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น ลักษณะของชิ้นงานที่ดีกว่าการใช้น้ำมันสังเคราะห์และการใช้สารหล่อลื่นชนิดน้ำมันมะพร้าวสังเคราะห์จากส่วนโค้งมน (Edges Radius) ที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยที่วัดได้คือ 72.28 μm . รอยตัดเฉือน (Shear band) เกิดขึ้นขอบของชิ้นงาน โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 118.15 μm .รอยฉีกขาด (Fracture) เกิดขึ้นน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 76.00 μm .ครีป (Burr) เกิดขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 24.20 μm . เพราะในการสร้างแผ่นฟิล์มเกิดขึ้นดีกว่าสารหล่อลื่นชนิดสังเคราะห์มีความหนาและการจับตัวของแผ่นฟิล์มที่ดีจึงช่วยในการตัดชิ้นงานได้ดีขึ้น

3) ขอบชิ้นงานที่เกิดจากการใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น ลักษณะของชิ้นงานที่สังเคราะห์จากส่วนโค้งมน (Edges Radius) ที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยที่วัดได้คือ 55.56 μm . การเกิดรอยตัดเฉือน (Shear band) เกิดขึ้นขอบของชิ้นงาน โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 107.63 μm .รอยฉีกขาด (Fracture) เกิดขึ้นมาก โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 99.06 μm .ครีป (Burr) เกิดขึ้นน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัด คือ 26.73 μm . เพราะมีการสร้างแผ่นฟิล์มทำให้ช่วยในการตัดชิ้นงานได้ดีขึ้นกว่าการใช้น้ำมันสังเคราะห์เป็นสารหล่อลื่น

4.2.2 การวิเคราะห์คุณภาพของขอบตัดชิ้นงานพันธที่เคลือบด้วย TiCN และสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.12 คุณภาพของขอบตัดชิ้นงานพันธที่เคลือบด้วย TiCN และสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ

วิเคราะห์คุณภาพของขอบชิ้นของพันธที่ไม่มีสารเคลือบผิวได้ส่วนประกอบของ ขอบคมตัด ชิ้นงานแตกต่างกันดังนี้

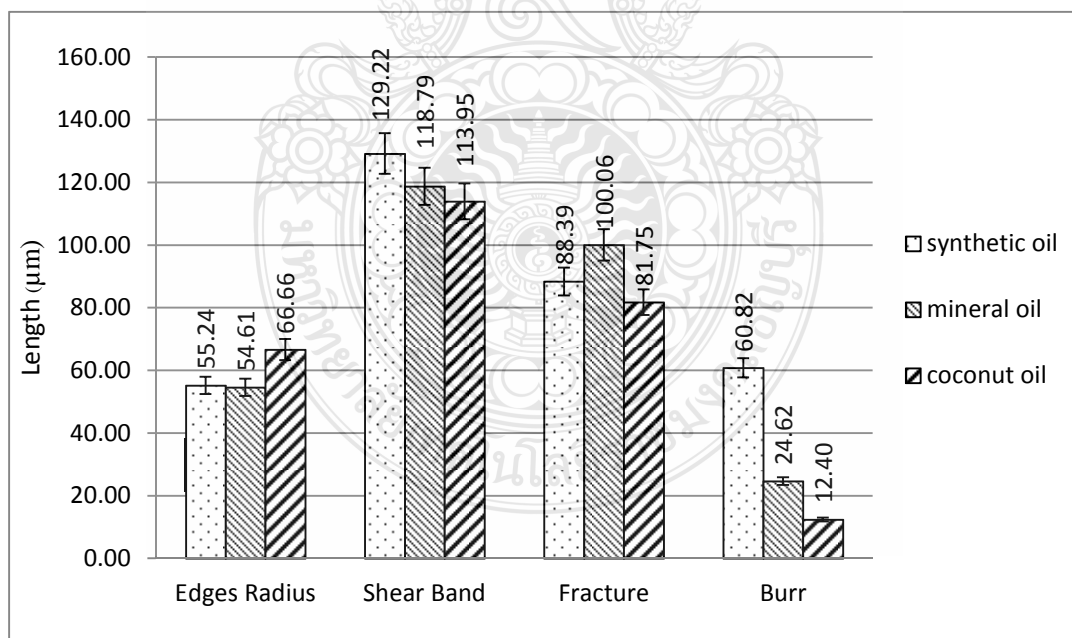
1) ขอบชิ้นงานที่เกิดจากการใช้น้ำมันสังเคราะห์เป็นสารหล่อลื่น ลักษณะของชิ้นงานที่สังเกตจากส่วนโค้งมน (Edges Radius) ที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยที่วัดได้คือ 58.82 μm . การเกิดรอยตัดเฉือน (Shear band) เกิดขึ้นขอบของชิ้นงาน โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 104.61 μm . รอยฉีกขาด (Fracture) เกิดขึ้นน้อยโดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 99.43 μm . ครีบ (Burr) เกิดขึ้นน้อยโดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 14.63 μm . ค่าที่ออกมาถือว่าไม่เป็นค่าที่ไม่น่าพอใจแต่จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ

2) ขอบชิ้นงานที่เกิดจากการใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น ลักษณะของชิ้นงานที่ดีกว่าการไม่ใช้น้ำมันสังเคราะห์และการใช้สารหล่อลื่นชนิดน้ำมันมะพร้าวสังเกตจากส่วนโค้งมน (Edges

Radius) ที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยที่วัดได้คือ 57.88 μm . รอยตัดเฉือน (Shear band) เกิดขึ้นขอบของชิ้นงาน โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 133.63 μm . รอยฉีกขาด (Fracture) เกิดขึ้นน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 78.92 μm . ครีบ (Burr) เกิดขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 13.32 μm . เพราะในการสร้างแผ่นฟิล์มเกิดขึ้นดีกว่าสารหล่อลื่นชนิดสังเคราะห์มีความหนาและการจับตัวของแผ่นฟิล์มที่ดีจึงช่วยในการตัดชิ้นงานได้ดีขึ้น

3) ขอบชิ้นงานที่เกิดจากการใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น ลักษณะของชิ้นงานที่สังเกตจากส่วนโค้งมน (Edges Radius) ที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยที่วัดได้คือ 70.82 μm . การเกิดรอยตัดเฉือน (Shear band) เกิดขึ้นขอบของชิ้นงาน โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 113.53 μm . รอยฉีกขาด (Fracture) เกิดขึ้นมาก โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 88.80 μm . ครีบ (Burr) เกิดขึ้นน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 31.02 μm . เพราะมีการสร้างแผ่นฟิล์มทำให้ช่วยในการตัดชิ้นงานได้ดีขึ้น

4.2.3 การวิเคราะห์คุณภาพของขอบตัดชิ้นงานพื้นที่เคลือบด้วย TiALN และสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.13 คุณภาพของขอบตัดชิ้นงานพื้นที่เคลือบด้วย TiALN และสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ

วิเคราะห์คุณภาพของขอบชิ้นของพันธที่เคลือบผิวด้วย TiAlN ได้ส่วนประกอบของขอบคมตัดชิ้นงานแตกต่างกันดังนี้

1) ขอบชิ้นงานที่เกิดจากการใช้น้ำมันสังเคราะห์เป็นสารหล่อลื่น ลักษณะของชิ้นงานที่สังเกตจากส่วน โคนงมน (Edges Radius)ที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยที่วัดได้คือ 55.24 μm . การเกิดรอยตัดเฉือน (Shear band) เกิดขึ้นขอบของชิ้นงาน โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 129.22 μm . รอยฉีกขาด (Fracture) เกิดขึ้นมาก โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 88.39 μm . ครีบ (Burr) เกิดขึ้นน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัด คือ 60.82 μm . ค่าที่ออกมาถือว่าไม่เป็นค่าที่ไม่น่าพอใจแต่นำไปใช้เปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ

2) ขอบชิ้นงานที่เกิดจากการใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น ลักษณะของชิ้นงานที่สังเกตจากส่วน โคนงมน (Edges Radius) ที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยที่วัดได้คือ 54.61 μm . การเกิดรอยตัดเฉือน (Shear band) เกิดขึ้นขอบของชิ้นงาน โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 118.79 μm . รอยฉีกขาด (Fracture) เกิดขึ้นมาก โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 110.06 μm . ครีบ (Burr) เกิดขึ้นน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัด คือ 24.62 μm . เพราะมีการสร้างแผ่นฟิล์มทำให้ช่วยในการตัดชิ้นงานได้ดีขึ้น

3) ขอบชิ้นงานที่เกิดจากการใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น ลักษณะของชิ้นงานที่ดีกว่าการไม่ใช้น้ำมันสังเคราะห์และการใช้สารหล่อลื่นชนิดน้ำมันมะพร้าวสังเกตจากส่วน โคนงมน (Edges Radius)ที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยที่วัดได้คือ 66.66 μm . รอยตัดเฉือน (Shear band) เกิดขึ้นขอบของชิ้นงาน โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 113.95 μm . รอยฉีกขาด (Fracture) เกิดขึ้นน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 80.75 μm . ครีบ (Burr) เกิดขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยจากการวัดคือ 12.40 μm . เพราะในการสร้างแผ่นฟิล์มเกิดขึ้นดีกว่าสารหล่อลื่นชนิดสังเคราะห์มีความหนาและการจับตัวของแผ่นฟิล์มที่ดีจึงช่วยในการตัดชิ้นงานได้ดีขึ้น

วิเคราะห์ผลเกี่ยวกับลักษณะของขอบตัดชิ้นงาน

จากผลการทดลองเมื่อนำชิ้นงานที่ได้จากการตัดด้วยแม่พิมพ์ ที่เคลือบผิวและใช้สารหล่อลื่นที่ต่างชนิดกัน กล่าวได้ว่าขอบตัดชิ้นงานที่มีคุณภาพจำเป็นจะต้องมีความสูงของรอยตัดเฉือนที่มาก ส่วน โคนงมนน้อย รอยฉีกขาดน้อยและครีบที่น้อย และจากการทดลองพบว่า

-รอยตัดเนื้อที่เกิดขึ้นบนขอบตัดชิ้นงานก่อนเกิดการสึกหรอ ความสูงของรอยตัดเนื้อจะเกิดขึ้นสูงที่สุดกับชิ้นงานที่ผ่านการตัดด้วยแม่พิมพ์ที่ยังไม่มีการสึกหรอ และเมื่อมีการสึกหรอเกิดขึ้น ความสูงของรอยเนื้อจะมีแนวโน้มลดลงทุกๆชุดแม่พิมพ์ ค่าเฉลี่ยของรอยตัดเนื้อที่ได้จากชุดแม่พิมพ์ที่เคลือบผิวด้วย TiCN และใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่นจะมีค่าเฉลี่ยความสูงของรอยตัดเนื้อสูงที่สุดมาก เพราะน้ำมันแร่มีความถ่วงจำเพาะหรือความหนาแน่นสูงจึงช่วยลดการสึกหรอเมื่อไม่เกิดการสึกหรอของคมตัดก็จะทำให้ขอบตัดชิ้นงานที่ออกมามีคุณภาพดี

-ความสูงของโค้งมนที่เกิดบนขอบตัดชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานที่ได้จากแม่พิมพ์ที่มีการสึกหรอที่ผิวด้านข้างของแม่พิมพ์จะส่งผลให้ช่องว่างระหว่าง Punch และ Die จะมีค่าความสูงของส่วนโค้งมนที่เกิดขึ้นบนขอบตัดชิ้นงานมากเนื่องจากเกิดลักษณะของการตัดชิ้นสูง และความสูงของส่วนโค้งมนจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อจำนวนการตัดมากขึ้น เนื่องจากเกิดการสึกหรอที่บริเวณคมตัด เมื่อคมตัดเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้เกิดการตัดที่บริเวณขอบตัดเกิดสูงขึ้นเกิดเป็นลักษณะของการโค้งมนมากขึ้น

- ความสูงของรอยฉีกขาดที่เกิดขึ้นบนขอบตัดชิ้นงาน ก่อนเกิดการสึกหรอความสูงของรอยฉีกขาด ที่ขอบตัดชิ้นงานที่ได้จากแม่พิมพ์ที่มีการสึกหรอน้อยที่สุด และเมื่อมีการสึกหรอเกิดขึ้นระยะความสูงของรอยฉีกขาดจะเพิ่มขึ้นจากชิ้นงานที่ได้จากการตัดทุกชุดแม่พิมพ์

- ค่าความสูงของครีบบนขอบตัดชิ้นงาน จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าครีบบนจะไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยในช่วงการทดลองแรกๆของทุกชุดการทดลองเป็นผลมาจากพันธที่ยังไม่เกิดการสึกหรอ แต่เมื่อพันธเกิดการสึกหรอบนขอบตัดชิ้นงานจะเริ่มเห็นครีบบนปรากฏขึ้นและเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆตามจำนวนชิ้นงานที่เพิ่มมากขึ้น และครีบบนจะเกิดขึ้นสูงกับชิ้นงานที่ได้จากชุดแม่พิมพ์ที่ไม่มีการเคลือบผิวและใช้น้ำมันสังเคราะห์ เพราะมีการสึกหรอที่ด้านข้างของคมตัดสูงสุดถึง 56.88 μm . เป็นผลให้ค่าระยะห่างของช่องว่างคมตัดเพิ่มสูงขึ้นทำให้ขอบตัดชิ้นงานมีการเกิดครีบบนและชุดการทดลองที่มีครีบบนเกิดขึ้นต่ำสุดมีความใกล้เคียงกัน คือ พันธที่เคลือบด้วย TiCN ใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น กับพันธที่เคลือบด้วย TiAlN ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น

4.3 ครีบบนต่อการสูญเสียในกระแสไหลวน (Eddy Current Loss)

จากบทที่ 2 การสูญเสียในกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) แต่เมื่อมีครีบบนเกิดขึ้นจะทำให้แกนเหล็กแบบแผ่นอัดที่จะการสูญเสียกระแสไหลวน(Eddy Current Loss) น้อยกลายเป็นแกนเหล็กแบบก้อน เนื่องจากครีบบนของแต่ละแผ่นที่สัมผัสกันกระแสที่ไหลรอบเส้นทางปิด มีค่าน้อยลงส่งผลให้เกิดการสูญเสียในกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) มากขึ้น

4.4 วิเคราะห์จุดคุ้มทุนของการซื้อพันธบัตรแบบเดิมและแบบใหม่

วิธีการจุดคุ้มทุนนั้น โดยปกติแล้วจะใช้ในการหาปริมาณการขายสินค้าที่ทำให้กำไรเท่ากับขาดทุน ทั้งนี้ เพื่อที่จะช่วยให้การบริหารจัดการการขายหรือการผลิต เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็สามารถนำวิธีการจุดคุ้มทุนนี้มาประยุกต์ใช้ในการเลือกเครื่องจักรได้เช่นกัน โดยจะใช้จุดคุ้มทุนในการตัดสินใจว่าถ้าต้องผลิตสินค้าจำนวนหนึ่งแล้ว ควรจะเลือกซื้อเครื่องจักรใด เพื่อที่จะทำให้มีค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด หรือถ้ามีการเปลี่ยนแปลงจำนวนสินค้าที่จะต้องผลิตซึ่งแตกต่างจาก เดิมขึ้นมา ก็ยังจะทราบอีกด้วยว่าควรจะเลือกซื้อ เครื่องจักรเดิมหรือเครื่องจักรอื่น โดยใช้วิธีการจุดคุ้มทุน ดังกล่าวนี้ได้อีกด้วย

การคำนวณหาจุดคุ้มทุน

กำหนดให้

ความต้องการในการผลิต 84,000 ชิ้น/เดือน

ราคาขายต่อชิ้น 3 บาท/ชิ้น

ต้นทุนคงที่ แบบเดิม 16,040 บาทต่อชิ้นผลิตชิ้นงานได้ 42,000 ชิ้น

แบบใหม่ 1,350 บาทต่อชิ้นผลิตชิ้นงานได้ 2,700 ชิ้น

ต้นทุนแปรผันแบบเดิม คือ 1.58 บาท/ชิ้น มาจาก

1. ค่าวัสดุ 1.2 บาท/ชิ้น

2. ค่าไฟฟ้า 11,760 บาท/เดือน

3. ค่าแรง 12,400 บาท/เดือน

4. ค่าดำเนินการ 6,500 บาท/เดือน

5. ค่าเสียโอกาสในการผลิต 8 ชิ้น/นาที การติดตั้งแต่ละครั้งใช้เวลา 20 นาที

คิดเป็นค่าเสียโอกาสในการผลิต 160 ชิ้น / ครั้ง

เปลี่ยนแม่พิมพ์ 2 ครั้ง / เดือน = 320 ชิ้น / เดือน = 960 บาท / เดือน

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนแปรผัน} &= 1.2 + [84,000 / (11,760 + 12,400 + 6,500 + 960)] \\ &= 1.5764 \text{ บาท/ชิ้น} \end{aligned}$$

ต้นทุนแปรผันแบบใหม่ คือ 1.74 บาท/ชิ้น มาจาก

1. ค่าวัสดุ 1.2 บาท/ชิ้น
2. ค่าไฟฟ้า 11,760 บาท /เดือน
3. ค่าแรง 12,400 บาท/เดือน
4. ค่าดำเนินการ 6,500 บาท/เดือน
5. ค่าเสียโอกาสในการผลิต 8 ชิ้น/นาที การติดตั้งแต่ละครั้งใช้เวลา 20 นาที

คิดเป็นค่าเสียโอกาสในการผลิต 160 ชิ้น / ครั้ง

เปลี่ยนแม่พิมพ์ 31 ครั้ง / เดือน = 4,960 ชิ้น / เดือน = 14,880 บาท / เดือน

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนแปรผัน} &= 1.2 + [84,000 / (11,760 + 12,400 + 6,500 + 14,880)] \\ &= 1.7421 \text{ บาท/ชิ้น} \end{aligned}$$

รายได้ = ราคาขายต่อหน่วย \times จำนวนการผลิตที่จุดใด ๆ (สูตร 2.4)

ต้นทุนรวมในการผลิต = ต้นทุนคงที่ + ต้นทุนแปรผันต่อหน่วย (สูตร 2.1)

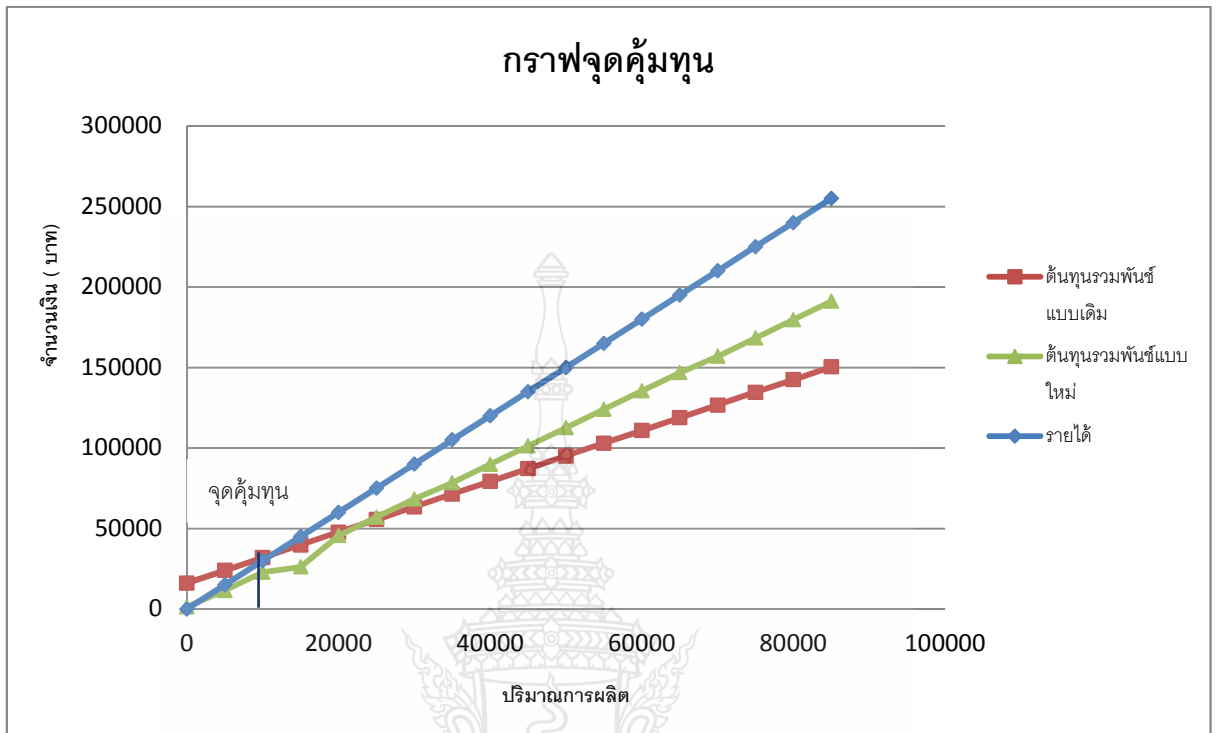
กำไร = รายได้ - ต้นทุนรวม (สูตร 2.5)

ตารางที่ 4.1 แสดงการคำนวณจุดคุ้มทุนแม่พิมพ์แบบเดิม

ราคาต่อหน่วย	3	จำนวนที่ขายได้	รายได้	ต้นทุนรวม	กำไร	ขาดทุน
ต้นทุนคงที่	16,040	0	0	16040	0	16040
ค่าใช้จ่ายแปรผันต่อหน่วย	1.58	5000	15000	23940	0	8940
		10000	30000	31840	0	1840
ข้อมูลเข้า		15000	45000	39740	5260	0
จำนวนหน่วยที่ขายหรือผลิต	84000	20000	60000	47640	12360	0
		25000	75000	55540	19460	0
ผลลัพธ์		30000	90000	63440	26560	0
จำนวนเงินที่ขายได้(รายได้รวม)	252000	35000	105000	71340	33660	0
ค่าใช้จ่ายรวม	148760	40000	120000	79240	40760	0
กำไร	103240	45000	135000	87140	47860	0
		50000	150000	95040	54960	0
		55000	165000	102940	62060	0
		60000	180000	110840	69160	0
	16040	65000	195000	118740	76260	0
		70000	210000	126640	83360	0
		75000	225000	134540	90460	0
		80000	240000	142440	97560	0
		85000	255000	150340	104660	0

ตารางที่ 4.2 แสดงการคำนวณจุดคุ้มทุนแม่พิมพ์แบบใหม่

ราคาต่อหน่วย	3	จำนวนที่ขายได้	รายได้	ต้นทุนรวม	กำไร	ขาดทุน
ค่าใช้จ่ายคงที่	1350	0	0	1350	0	1350
ค่าใช้จ่ายแปรผันต่อหน่วย	1.74	5000	15000	11400	3600	0
		10000	30000	22800	7200	0
ข้อมูลเข้า		15000	45000	26100	18900	0
จำนวนหน่วยที่ขายหรือผลิต	84000	20000	60000	45600	14400	0
		25000	75000	57000	18000	0
ผลลัพธ์		30000	90000	68400	21600	0
จำนวนเงินที่ขายได้(รายได้รวม)	252000	35000	105000	78450	26550	0
ค่าใช้จ่ายรวม	147510	40000	120000	89850	30150	0
กำไร	104490	45000	135000	101250	33750	0
		50000	150000	112650	37350	0
		55000	165000	124050	40950	0
		60000	180000	135450	44550	0
		65000	195000	146850	48150	0
		70000	210000	156900	53100	0
		75000	225000	168300	56700	0
		80000	240000	179700	60300	0
		85000	255000	191100	63900	0



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบต้นทุนรวมของพันธบัตรแบบเดิมและแบบใหม่

จากผลการทดลองพบว่าพันธบัตรแบบเดิมที่มีราคา 16,040 บาท จะมีประสิทธิภาพในการเจาะเหล็กซีลิกอนได้ถึง 42,000 ชิ้น แต่พันธบัตรแบบใหม่มีราคา 1,350 บาท จะมีประสิทธิภาพในการเจาะเหล็กซีลิกอนได้เพียง 2,700 ชิ้น จากรูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบต้นทุนรวมของพันธบัตรแบบเดิมและแบบใหม่ จะเห็นได้ว่าต้นทุนรวมของพันธบัตรแบบเดิมจะมีการขาดทุนในช่วงปริมาณการผลิตที่ 0-10,000 ชิ้น จะเริ่มมีผลกำไรเมื่อมีปริมาณการผลิตที่ 20,000 ชิ้นเป็นต้นไป และต้นทุนรวมของพันธบัตรแบบใหม่จะมีผลกำไรตั้งแต่การผลิตที่ 10,000 ชิ้นแรก แต่จะสังเกตได้ว่าพันธบัตรแบบเดิมจะมีต้นทุนรวมที่ต่ำกว่าพันธบัตรแบบใหม่มากเมื่อมีการผลิตมากกว่า 70,000 ชิ้น เป็นต้นไป จึงสามารถสรุปได้ว่า การผลิตในปริมาณที่น้อยกว่า 25,000 ชิ้น ความจะเลือกใช้พันธบัตรแบบใหม่จะส่งผลให้ได้ผลกำไรที่สูงกว่า แต่ถ้ามีความต้องการในการผลิตที่สูงกว่า 25,000 ชิ้น ควรจะเลือกใช้พันธบัตรแบบเดิมจะได้ผลกำไรที่สูงกว่านั่นเอง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การสรุปผลการทดลองสามารถแบ่งผลการสรุปออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

5.1.1 การสึกหรอของคมตัด

การเคลือบผิวพ่นซ์และการใช้สารหล่อลื่นสามารถทำให้สามารถลดการสึกหรอเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระหว่างการสึกหรอของพ่นซ์เห็นได้จากค่าความสึกหรอโดยพ่นซ์ที่มีการสึกหรอมากที่สุดคือพ่นซ์ที่ไม่มีเคลือบผิวพ่นซ์และใช้สารน้ำมันสังเคราะห์ จะเกิดการสึกหรอมากเนื่องจากเกิดหน้าสัมผัสในการตัดชิ้นงานมากทำให้เกิดการเสียดสีของพ่นซ์กับชิ้นงานและยังขาดการหล่อลื่นที่เป็นตัวช่วยระบายความร้อนและลดการเสียดสีจึงทำให้เกิดการสึกหรอรวมถึงพ่นซ์ที่ไม่มีเคลือบผิวจึงทำให้เมื่อเกิดการเสียดสีแล้วมีการสึกหรอได้ง่ายกว่าโดยวัดค่าการสึกหรอได้ $56.875 \mu\text{m}$. และเมื่อใช้สารน้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่นมีการสึกหรอลดลงวัดค่าการสึกหรอได้ $14.271 \mu\text{m}$. เมื่อใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่นมีการสึกหรอสูงกว่าใช้น้ำมันแร่แต่น้อยกว่าน้ำมันสังเคราะห์วัดค่าการสึกหรอได้ $24.167 \mu\text{m}$. ส่วนพ่นซ์ที่มีการสึกหรอน้อยที่สุดคือพ่นซ์ที่มีการเคลือบผิวพ่นซ์ด้วย TiAlN และใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่นวัดค่าการสึกหรอได้ $4.48 \mu\text{m}$. และเมื่อใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่นมีการสึกหรอลดลงวัดค่าการสึกหรอได้ $10.417 \mu\text{m}$. ใช้น้ำมันสังเคราะห์มีการสึกหรอมากที่สุดวัดค่าการสึกหรอได้ $33.333 \mu\text{m}$. พ่นซ์ที่มีการเคลือบผิวด้วย TiCN และใช้น้ำมันสังเคราะห์วัดค่าการสึกหรอได้ $45 \mu\text{m}$. ใช้น้ำมันแร่วัดค่าการสึกหรอได้ $32.5 \mu\text{m}$. และใช้น้ำมันมะพร้าววัดค่าการสึกหรอได้ $25.729 \mu\text{m}$.

จุดคุ้มทุนของการสั่งซื้อพ่นซ์แบบเดิมและพ่นซ์แบบใหม่ คือการผลิตในปริมาณที่น้อยกว่า 25,000 ชิ้น ความจะเลือกใช้พ่นซ์แบบใหม่จะส่งผลให้ได้ผลกำไรที่สูงกว่า แต่ถ้ามีความต้องการในการผลิตที่สูงกว่า 25,000 ชิ้น ควรจะเลือกใช้พ่นซ์แบบเดิมจะได้ผลกำไรที่สูงกว่านั่นเอง

5.1.2 ขอบชิ้นงาน

ในกรณีที่ต้องการวัดคุณภาพขอบคมตัดของชิ้นงานที่ดีจะดูจากค่าของ รอยตัดเฉือน (Shear band) ที่มาก ในขณะที่เดียวกันค่าของส่วนโค้งมน (Edge Radius) รอยแตกหัก (Fracture) และ ครีป (Burr) ควรมีค่าน้อย ซึ่งจากการทดลองตัดชิ้นงาน โดยการเคลือบผิวพ่นซ์ 3 ชนิด และน้ำมันหล่อลื่นทั้ง 3 ชนิด ได้ผลการทดลองออกมาคือ พ่นซ์ที่เคลือบผิวด้วย TiAlN และใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่นทำให้ลักษณะขอบชิ้นงานได้คุณภาพดีที่สุด คือ ได้ค่ารอยตัดเฉือน (Shear band) สูงที่สุดคือ 113.9467 μm . ค่าของส่วนโค้งมน (Edge Radius) ค่ารอยแตกหัก (Fracture) และ ครีป (Burr) น้อยที่สุดคือ 66.6632 μm . 80.7505 μm . และ 17.0489 μm . ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่น แต่ขอบตัดชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบผิวจะให้คุณภาพต่ำซึ่งค่ารอยตัดเฉือน (Shear band) สูงที่สุดคือ 113.1055 μm . ค่าของส่วนโค้งมน (Edge Radius) ค่ารอยแตกหัก (Fracture) และ ครีป (Burr) น้อยที่สุดคือ 55.2432 μm . 98.6982 μm . และ 25.569 μm . ตามลำดับ พ่นซ์ที่เคลือบผิวด้วย TiAlN และใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่นทำให้ลักษณะขอบชิ้นงานได้คุณภาพดีที่สุด เพราะว่า มีการเคลือบผิวเพื่อเพิ่มความแข็งและสารหล่อลื่นชนิดน้ำมันมะพร้าวสามารถเกิดแผ่นฟิล์มสม่ำเสมอได้ดีกว่า

5.1.3 จุดคุ้มทุนของการสั่งซื้อพ่นซ์แบบเดิมและพ่นซ์แบบใหม่

จุดคุ้มทุนของการสั่งซื้อพ่นซ์แบบเดิมและพ่นซ์แบบใหม่ คือการผลิตในปริมาณที่น้อยกว่า 25,000 ชิ้น ความจะเลือกใช้พ่นซ์แบบใหม่จะส่งผลให้ได้ผลกำไรที่สูงกว่า แต่ถ้ามีความต้องการในการผลิตที่สูงกว่า 25,000 ชิ้น ควรจะเลือกใช้พ่นซ์แบบเดิมจะได้ผลกำไรที่สูงกว่านั่นเอง

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

5.2.1 สภาพการใช้งานแม่พิมพ์ที่ใช้สารหล่อลื่นต่างชนิดกัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่มีผลต่อการสึกหรอของแม่พิมพ์ ดังนั้นควรมีการใช้สารหล่อลื่นที่มีความแตกต่างกันมากขึ้น เช่น สารหล่อลื่นจากน้ำมันพืช น้ำมันปาล์ม เป็นต้น เพื่อลดการสึกหรอของแม่พิมพ์ให้ลดลง

5.2.2 ควรศึกษาพฤติกรรมการสีกหรือของแม่พิมพ์ตัดที่ใช้งานกับวัสดุอย่างอื่น เช่น อะลูมิเนียม ทองเหลือง ว่าจากผลการวิจัยจะเป็นการสีกหรือเหมือนกับเหล็กชิลิกอนหรือไม่

5.2.4 ควรจะปรับใช้กับวัสดุอื่นๆ เป็นต้นในการศึกษาครั้งต่อไป



บรรณานุกรม

- [1] ชาญชัย ทรัพย์ยากรณ์ และคณะ, 2534 ,การออกแบบแม่พิมพ์, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.
- [2] มาโนช ริทินโย. 2551. การออกแบบแม่พิมพ์โลหะ (Punch and Die Design). ครั้งที่พิมพ์ 3. นครราชสีมา: แผนงานเอกสารการพิมพ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.
- [3] วาภูมิ เปรมานนท์และพงศ์พันธ์ แก้วดาทิพย์ 2555. แม่พิมพ์โลหะแผ่น, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.
- [4] จุลศิริ ศรีงามส่อง, 2539, วิศวกรรมงานแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่นเบื้องต้น, มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต, กรุงเทพฯ
- [5] ศิริชัย ต่อสกุล และอนุชา วัฒนาภา. 2554. พื้นฐานเทคโนโลยีการขึ้นรูป. กรุงเทพฯ
- [6] ชาญยุทธ มะกา,2545,การศึกษาอิทธิพลของชนิดของวัสดุทำแม่พิมพ์ที่มีผลต่อการสึกหรอของแม่พิมพ์ตัด,วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีขึ้นรูปโลหะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [7] วีระศักดิ์ ภัยวิเชียร, 2544, น้ำมันหล่อลื่น, กรุงเทพฯ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.กรุงเทพฯ
- [8] ประเสริฐ เทียนนิมิต และคณะ 2541, เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น,กรุงเทพฯ
- [9] Donald M. Mattox Society of Vacuum Coaters Albuquerque, New Mexico HANDBOOK OF PHYSICAL VAPOR DEPOSITION (PVD) PROCESSING Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control 1998 by Noyes Publications
- [10] http://www.nanoshield-pvd.com/pvd_thai.html
- [11] Sulzer Metaplas World Money Fair February/1st, 2007
- [12] ประสงค์ ศรีเจริญชัย,2557, เหล็กกล้า, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ
- [13] ธนัตชัย กุลรวานิชพงษ์,วงจรแม่เหล็กและวัสดุแม่เหล็ก,วิศวกรรมไฟฟ้า.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [14] นวพร ทองนุช,การวิเคราะห์จลคัมพูน ,สาขาบัญชี.มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
- [15] Luo, S.Y., 1999, “Effect of the Geometry and the Surface Treatment of Punching Tools on The Tool life and Wear Conditions in the Piercing of Thick Steel Plate”, In Journal of Materials Processing Technology,
- [16] ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ. 2545. การศึกษาอิทธิพลของช่องว่างคมตัดระหว่างพUNCHและดาYที่มีผลต่อ

บรรณานุกรม (ต่อ)

พฤติกรรมการสึกหรอของแม่พิมพ์ตัด. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- [17] K. Mori n, Y.Abe,Y.Kidoma,P.Kadarno, “**Slight clearance punching of ultra-high strength steel sheets using punch having small round edge**”, Department of Mechanical Engineering, Toyohashi University of Technology, Toyohashi
- [18] Fjodor Sergejev , Priidu Peetsalu , Alina Sivitski , Mart Saarna , Eron Adoberg, “**Surface fatigue and wear of PVD coated punches during fine blanking operation**”, Materials Engineering, Tallinn University of Technology
- [19] A.I. Fernández-Abia, J. Barreiro, J. Fernández-Larrinoa, L.N. López de Lacalle, A.Fernández-Valdivielso, O.M. Pereira, “**Behaviour of PVD coatings in the turning of austenitic stainless steels**” , University of León .
- [20] S.Y. Luo, “**Studies on the wear conditions and the sheared edges in punching**”. Huafan College of Humanities and Technology



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

คุณสมบัติ





บริษัท กรีนแพค เทคโนโลยี จำกัด
GREENPACK TECHNOLOGY CO., LTD.

GREEN PACK : 906 SYNTHETIC GREEN COOL

DESCRIPTION

GP : 906 SYNTHETIC GREEN COOL is a cost-effective, fully synthetic metalworking fluid applicable to a wide range of machining operations and metals. It is ideal for operations that demand excellent cooling, lubricity, extreme pressure activity and rust protection. It contains both chlorine and sulfur to protect the tool and facilitate chip formation. GP : 906 SYNTHETIC GREEN COOL mixes easily with water to form a transparent blue-green solution which provides excellent visibility of the work piece.

APPLICATION

GP : 906 SYNTHETIC GREEN COOL is suitable

- For high speed machining operations requiring good cooling and lubricity.
- As a coolant in many machining operations such as drilling, tapping, boring, milling, turning, sawing, threading, reaming and grinding.
- For machining a wide range of materials including cast iron, carbon steels, high alloy steels and stainless steels.

RECOMMENDED DILUTION

- Broaching, threading and tapping 1 : 10
- Turning, drilling and milling 1 : 25
- Grinding 1 : 40

BENEFITS

- Improved cooling and faster machining.
- Excellent visibility of the work piece.
- Longer tool life.
- Wide range of applications in cutting and grinding.

6/20 หมู่ที่ 4 ตำบลลำลูกกา อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12150
6/20 Moo 4 Lumlukka, Lumlukka, Patumtanee 12150
Tel : 0-2987-1150-1 Fax : 0-2987-1152
www.greenpack.co.th / www.greenpacktechnology.com
E-mail : greenpack@hotmail.com



บริษัท กรีนแพค เทคโนโลยี จำกัด
GREENPACK TECHNOLOGY CO., LTD.

HEALTH HAZARD INFORMATION	
HEALTH EFFECTS :	
Swallowed	Harmful if swallowed – irritation to the stomach lining, feeling of discomfort and possible nausea.
Eye:	Mild irritant.
Skin:	Mild irritant with prolonged or repeated contact.
Inhaled:	If mist and fumes generated – irritation to mucous membranes and respiratory tract may occur.
FIRST AID :	
Swallowed:	Contact a doctor or Poisons Information Center.
Eye:	Flush with water for 15 minutes – if irritation persists call a doctor.
Skin:	Remove contaminated clothing and shoes – wash off with soap and water.
Inhaled:	Remove from area to fresh air – keep at rest until fully recovered. Loosen tight clothing.
Advice to doctor:	Treat for mild alkalinity and mineral oil effects.
PRECAUTIONS FOR USE	
EXPOSURE LIMITS:	If mist and/or vapours generated – keep below 5 mg./cum.
VENTILATION:	Work in a well ventilated area.
PERSONAL PROTECTION:	Avoid saturated clothing in contact with the skin. Use chemical resistant protective clothing such as apron, gloves, footwear. Wear safety goggles.
FLAMMABILITY:	Not flammable – contains water.
SAFE HANDLING INFORMATION	
STORAGE & TRANSPORT:	Store in a cool, dry area away from strong oxidants – no special requirements for transport.
SPILLS & DISPOSAL:	Contain spill with sand/earth etc. Transfer back to containers – wash away residual – contact supplier for suitability for further use.
FIRE/EXPLOSION HAZARD:	Not considered a hazard.
OTHER INFORMATION:	Not considered hazardous under normal conditions of industrial use.

6/20 หมู่ที่ 4 ตำบลทุ่งนก อำเภอทุ่งนก จังหวัดบุรีรัมย์ 12150
6/20 Moo 4 Lumlukka, Lumlukka, Patumtanee 12150
Tel : 0-2987-1150-1 Fax : 0-2987-1152
www.greenpack.co.th / www.greenpacktechnology.com
E-mail : greenpack@hotmail.com



บริษัท กรีนแพค เทคโนโลยี จำกัด
GREENPACK TECHNOLOGY CO., LTD.

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

COMPANY		
Company Name :	GREENPACK TECHNOLOGY CO., LTD	
Address :	6/20 MOO 2 LUMLUKKA, LUMLUKKA, PATUMTANEE 12150	
Tel. :	0-2987-1150-1	
Fax. :	0-2987-1152	
IDENTIFICATION		
PRODUCT NAME :	GP : 906 SYNTHETIC GREEN COOL	
TRADE NAME :	As above	
USE :	Metal Cutting Fluid Concentrate	
UN.NUMBER:	N/A	
DAINGEROUS GOODS.CLASS	N/A	
SUBSIDIARY RISK:	N/A	
HAZCHEM CODE:	N/A	
POISONS SCHEDULE	N/A (N/A = None allocated)	
PHYSICAL PROPERTIES:		
Appearance	Clear, Amber Liquid	pH 9.2 (@ 5%)
Odour	Mild	Vap. Pressure mmHg 25 C. Very low
Density 30 C.(Kg/l)	1.045	Flammability Limits: LEL Nil
Flash Point C. (N/A) Closed		: UEL Nil
(N/A) Open		
Solubility in water	Miscible	
INGREDIENTS:		
INGREDIENT NAME	CAS NO.	PROPORTION
Triethanolamine	102-71-6	> 15 %
Polyether		> 15 %
Monethanolamine	141-43-5	> 5 %
Phosphate Ester	-	< 10 %
Biocide & Defoamer	-	< 5 %
Other	-	> 5 %
Water	-	> 40 %

6/20 หมู่ที่ 4 ตำบลลำลูกกา ตำบลลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12150
6/20 Moo 4 Lumlukka, Lumlukka, Patumtanee 12150
Tel : 0-2987-1150-1 Fax : 0-2987-1152
www.greenpack.co.th / www.greenpacktechnology.com
E-mail : greenpack@hotmail.com



บริษัท กรีนแพค เทคโนโลยี จำกัด
GREENPACK TECHNOLOGY CO., LTD.

CERTIFICATE OF QUALITY ANALYSIS

PRODUCT : SOLUBLE CUTTING OIL	CUSTOMER : คุณทวีชัย มีนระ วัจ
BATCH No. : 06062015/GP-9020	ORDER No. : —
MANUFACTURING DATE : 6/6/2015	QAC No. : —
PHYSICAL DESCRIPTION / PROPERTIES	
Appearance - concentrate	Clear, Amber oil
Specific Gravity @ 30 °C	0.88
Sponiancity	Excellent
Copper Corrosion test, D-130	1 A
Ph (100 ppm. Water (CoCo.)	
2% dilution	8.8
1% dilution	9.1
Emulsion Stability , IP 263	
5% in 400 ppm. Water (CaCo3)	
(ml oil / ml cream)	0.05 / ml
Forming(ml) (50-ml skhaken gof 15 S.20 : 1)	
Ph (100 ppm. Water (CoCo.)	
Initial	20
After 30 sec.	0

WEIGHT CONTROL :

PREPARED BY / จัดทำโดย :


(TANANYA PHONCHAROEN)
Date 6/6/15

APPROVED BY / อนุมัติโดย :


(MR.SUVICHAI PAKSUPSKI)
Date 6/6/15

PASSED



บริษัท กรีนแพค เทคโนโลยี จำกัด
GREENPACK TECHNOLOGY CO., LTD.

SOLUBLE CUTTING OIL

DESCRIPTION

A phenol not rote free general purpose soluble oil. From a milky emulsion to cover the widest range of metal working operation. Suitable for metal cutting and grinding of ferrous and non – ferrous metal , Good corrosion protection and excellent spontaneity.

TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES

Appearance . N cat	Clear, Amber oil
Specific Gravity @ 30 °C	0.88
Sponiancity	Excellent
Copper Corrosion test, D-130	1 A
Emulsion Stability , IP 263 5 % in 400 ppm. Water (CaCo3) (ml oil / ml cream)	0.05 / nil
Ph (100 ppm. Water (CoCO) 2% dilution 10% dilution	8.8 9.1
Forming (ml) (50-ml shaken gof 15 S.20 :1) (100 ppm Water CaCo.) Initial After 30 sec.	20 0

COMPOSITION

Mineral oil

Emulsifier Package

6/20 หมู่ที่ 4 ตำบลลุมพุก อำเภอลุมพุก จังหวัดพทุมธานี 12150
6/20 Moo 4 Lumlukka, Lumlukka, Patumtanee 12150
Tel : 0-2937-1150-1 Fax : 0-2937-1152



บริษัท กรีนแพค เทคโนโลยี จำกัด
GREENPACK TECHNOLOGY CO., LTD.

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

PRODUCT NAME : SOLUBLE CUTTING OIL			
COMPANY DETAILS			
Company Name :	GREENPACK TECHNOLOGY CO.,LTD		
Address :	6/20 MOO 4 LUMLUKKA,LUMLUKKA, PATUMTANEE 12150		
Tel. :	0-2987-1150-1		
Fax. :	0-2987-1152		
PRODUCT IDENTIFICATION			
Product Name	SOLUBLE OIL LFT SP1	UN NUMBER	N/A
Other Name	Not Available	DANGEROUS GOODS CLASS	N/A
Trade Name	As above	SUBSIDIARY RISK	N/A
Product Type	General purpose Cutting and Grinding Fluid	HAZCHEM CODE	N/A
	Metal Cutting Fluid Concentrate	POISONS SCHEDULE	N/A
Product Use	Metal working coolant	*****	
Method of Application	Diluted with water	N/A = NONE ALLOCATED	
PHYSICAL AND CHEMICAL DATA			
Appearance	Clear Fluids	pH @ 5% in 100 ppm water	9.1-9.3
Colour	Light Amber	Solubility in Water	Emulsifiable
Odour	Mild	Flammability Limits	LEL LEL
Specific Gravity @ 15°C (Kg/L)	0.88		Not known Not Known
Flash Point (*C,Closed Cup)	>110 after water evaporated	vapour Pressure (mm, Hg @ 25°C)	Very low
CHEMICLE COMPONENTS			
NAME	CAS No.	PROPORTION	
Mineral Oil	64742-52-5	> 80 - 90 %	
Sulfonate Emulsifier	Confidential	> 10 - 20 %	
Fatty acid		< 2 - 5%	
Biocida		< 2 - 5%	
Defamer (non Silicone Type)		Trace	

5/20 หมู่ที่ 4 ตำบลลำลูกกา อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12150
6/20 Moo 4 Lumlukka, Lumlukka, Patumtanee 12153
Tel : 0-2987-1150-1 Fax : 0-2987-1152



HEALTH HAZARD INFORMATION	
Health Effects	
Ingestion	: Harmful if swallowed – irritation to the stomach lining, feeling of discomfort and possible nausea.
Eye	: May cause mild irritation.
Skin	: Mild irritant with repeated or prolonged contact.
Inhalation	: If mist and fumes generated – irritation to mucous membranes and respiratory tract may occur.
First Aid	
Ingestion	: Contact a doctor or Poisons Information Centre. Do not induce vomiting.
Eye	: Flush with fresh water for 15 minutes, if irritation persists call a doctor.
Skin	: Remove contaminated clothing and shoes, wash off with soap and water.
Inhalation	: remove to fresh air, if effect persist, seek medical assistance.
First Aid Facilities	: Water suitable for eyes and skin should be available in, or near, workplace.
PERCAUTION FOR USE	
Exposure Limits	
Other Exposure Info	: TLV – 5 mg/cu.m. if mists and/or vapours generated – keep the level below 5 mg/cu.
Ventilation	: Ensure ventilation is adequate to maintain air concentrations below TLV.
Personal Protection	
Protection Equipment	: Avoid saturated clothing in contact with the skin. Where necessary, to prolonged contact, use chemical resistant protective clothing such as apron, gloves, footwear, safety goggles.
Flammability	
Fire Hazards	: Low hazard classified – combustible – Class C2
SAFE HANDLING INFORMATION	
Storage Precaution	: Store in a cool, dry area away from heat source and naked flames – keep clear of strong Oxidants. No special requirements for transport.
Spills and Disposal	: Contain spill with absorbent materials (eg. Sand, earth etc.) Transfer back to containers – contact supplier for suitability for disposal.
Fire/Explosion Hazards	: If ignited – will give off fumes of oxides of carbon. Firefighters wear respirators use CO ₂ Dry Chemical or Foam extinguisher.
Other information	: Not considered hazardous under normal conditions of industrial use.

NOTE : This information presented is believed to be correct and reliable. However no representation, warranty or guarantee is made as to this accuracy, reliability or completeness. Condition of use and suitability of the product for particular uses are beyond our control. All risk of use of the product are therefore assumed by the user.



บริษัท กรีนแพค เทคโนโลยี จำกัด
GREENPACK TECHNOLOGY CO., LTD.

CERTIFICATE OF QUALITY ANALYSIS


PRODUCT : SYNTHETIC GREEN COOL	CUSTOMER : คุณตรีวิทย์ มีนระวัง
BATCH No. : 06062015/GP-906	ORDER No. : —
MANUFACTURING DATE : 6/6/2015	QAC No. : —
PHYSICAL DESCRIPTION / PROPERTIES	
Appearance - concentrate	Clear, Amber Liquid
Specific Gravity @ 30 °C	1.045
Solubility in water	Miscible
Vap. Pressure mmHg 25 °C	Very low
Ph (100 ppm. Water (CoCo.))	9.2 (@ 5%)
Flammability limits : LFL	Nil
: UEL	Nil
Flash Point C. (N/A)	Closed
(N/A)	Open

WEIGHT CONTROL :

PASSED

PREPARED BY / จัดทำโดย :

APPROVED BY / อนุมัติโดย :


(TANANYA PHONCHAROEN)
Date 6/6/58.


(MRS. SUVICHAI PAKSUPSRI)
Date 6/6/58.



ภาคผนวก ข

บันทึกข้อมูลการทดลอง



ตารางที่ ก.1 บันทึกค่าน้ำหนักที่ลดลงของแม่พิมพ์

ชนิด		น้ำหนักแม่พิมพ์		ลดลง
สารเคลือบ	น้ำมันหล่อลื่น	ก่อน	หลัง	
ไม่มีสารเคลือบ	น้ำมันสังเคราะห์	52.171	52.074	0.097
ไม่มีสารเคลือบ	น้ำมันแร่	52.076	52.072	0.004
ไม่มีสารเคลือบ	น้ำมันมะพร้าว	52.094	51.994	0.1
TiCN	น้ำมันสังเคราะห์	52.096	51.88	0.216
TiCN	น้ำมันแร่	52.096	52.094	0.002
TiCN	น้ำมันมะพร้าว	52.096	52.026	0.07
TiALN	น้ำมันสังเคราะห์	52.082	52.066	0.016
TiALN	น้ำมันแร่	52.076	52.062	0.014
TiALN	น้ำมันมะพร้าว	52.064	52.063	0.001

ตารางที่ ก.2 บันทึกคุณภาพของขอบตัดชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบผิวและใช้น้ำมันสังเคราะห์

ชั้นที่	Edge Radius	Shear Surface	Fracture Surface	Burr
300	67.343	178.861	31.581	0
600	47.357	126.257	76.811	0
900	47.345	95.742	122.044	13.677
1200	50.512	123.101	92.591	15.782
1500	39.994	162.028	64.179	17.886
1800	50.512	92.591	78.915	31.581
2100	72.603	87.331	117.841	38.928
2400	43.149	116.789	85.227	42.084
2700	73.647	73.655	167.285	43.136
3000	59.97	74.7	150.451	52.616
เฉลี่ย	55.2432	113.1055	98.6925	25.569

ตารางที่ ก.3 บันทึกคุณภาพของขอบตัดชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบผิวและใช้น้ำมันแร่

ชั้นที่	Edge Radius	Shear Surface	Fracture Surface	Burr
300	69.447	139.93	61.022	0
600	37.89	114.68	90.487	12.625
900	103.112	75.759	107.625	12.625
1200	50.501	125.201	74.7	16.834
1500	89.429	101.002	76.811	23.146
1800	68.387	125.205	72.595	27.355
2100	59.979	135.726	55.772	27.355
2400	132.57	86.273	59.97	33.667
2700	44.188	117.841	102.054	38.928
3000	67.343	159.924	58.918	49.46
เฉลี่ย	72.2846	118.1541	75.9954	24.1995

ตารางที่ ก.4 บันทึกคุณภาพของขอบตัดชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบผิวและใช้น้ำมันมะพร้าว

ชั้นที่	Edge Radius	Shear Surface	Fracture Surface	Burr
300	59.97	83.123	108.372	10.527
600	42.097	87.331	125.205	14.729
900	62.083	113.632	85.227	19.99
1200	62.074	163.08	51.564	20.018
1500	71.543	83.123	115.732	21.042
1800	71.543	127.309	78.915	29.478
2100	38.942	71.543	133.622	35.772
2400	56.824	115.737	78.908	35.787
2700	46.305	160.972	57.343	36.839
3000	44.201	70.499	155.715	43.136
เฉลี่ย	55.5582	107.6349	99.0603	26.7318

ตารางที่ ก.5 บันทึกคุณภาพของขอบตัดชิ้นงานที่มีการเคลือบผิวด้วย TiCN และใช้น้ำมันสังเคราะห์

ชั้นที่	Edge Radius	Shear Surface	Fracture Surface	Burr
300	30.511	116.789	103.112	0
600	58.927	128.361	64.187	0
900	57.875	96.794	132.565	0
1200	69.439	78.908	116.784	0
1500	75.752	109.424	86.279	14.729
1800	46.293	105.455	61.022	22.094
2100	82.071	123.097	93.643	22.119
2400	70.499	118.893	84.175	26.324
2700	38.928	96.8	125.205	27.355
3000	57.866	71.551	127.305	33.667
เฉลี่ย	58.8161	104.6072	99.4277	14.6288

ตารางที่ ก.6 บันทึกคุณภาพของขอบตัดชิ้นงานที่มีการเคลือบผิวด้วย TiCN และใช้น้ำมันแร่

ชั้นที่	Edge Radius	Shear Surface	Fracture Surface	Burr
300	57.875	133.622	78.915	0
600	75.752	142.038	69.447	0
900	89.435	105.211	91.539	0
1200	85.277	106.268	75.759	0
1500	102.606	147.299	37.876	0
1800	65.231	113.632	94.69	19.92
2100	43.136	109.419	108.372	25.251
2400	122.044	126.257	67.343	33.667
2700	76.804	108.372	98.904	41.046
3000	79.795556	121.34644	80.31611	13.3204444
เฉลี่ย	57.875	133.622	78.915	13.32

ตารางที่ ก.7 บันทึกคุณภาพของขอบตัดชิ้นงานที่มีการเคลือบผิวด้วย TiCN และใช้น้ำมันมะพร้าว

ชั้นที่	Edge Radius	Shear Surface	Fracture Surface	Burr
300	56.814	150.451	88.383	0
600	79.967	110.467	79.96	0
900	51.564	93.643	107.315	8.417
1200	45.247	118.893	90.481	14.229
1500	98.904	92.591	95.742	24.221
1800	82.064	112.58	66.283	25.251
2100	45.253	149.403	81.019	25.727
2400	43.136	90.487	143.09	26.324
2700	94.69	130.466	61.022	28.407
3000	110.476	86.279	74.707	157.663
เฉลี่ย	70.8115	113.526	88.8002	31.0239

ตารางที่ ก.8 บันทึกคุณภาพของขอบตัดชิ้นงานที่มีการเคลือบผิวด้วย TiALN และใช้น้ำมันสังเคราะห์

ชั้นที่	Edge Radius	Shear Surface	Fracture Surface	Burr
300	70.499	137.83	63.135	16.834
600	25.272	120.997	117.841	23.17
900	29.459	113.632	114.685	24.198
1200	37.876	165.767	99.956	27.375
1500	44.201	108.367	118.893	28.407
1800	37.89	115.377	116.784	36.839
2100	68.395	167.285	42.084	76.804
2400	70.499	130.466	54.72	78.915
2700	96.794	117.836	67.434	133.622
3000	71.551	114.685	88.377	162.028
เฉลี่ย	55.2436	129.2242	88.3909	60.8192

ตารางที่ ก.9 บันทึกคุณภาพของขอบตัดชิ้นงานที่มีการเคลือบผิวด้วย TiALN และใช้น้ำมันแร่

ชั้นที่	Edge Radius	Shear Surface	Fracture Surface	Burr
300	43.149	76.811	158.868	0
600	51.564	120.997	90.481	0
900	70.499	209.372	25.272	0
1200	50.501	137.83	85.221	22.064
1500	55.772	87.331	135.726	23.17
1800	58.927	94.695	111.528	24.221
2100	46.305	109.424	124.153	32.632
2400	45.253	104.159	111.523	38.928
2700	87.331	112.58	62.074	43.149
3000	36.772	134.67	95.748	62.083
เฉลี่ย	54.6073	118.7869	100.0594	24.6247

ตารางที่ ก.10 บันทึกคุณภาพของขอบตัดชิ้นงานที่มีการเคลือบผิวด้วย TiALN และใช้น้ำมันมะพร้าว

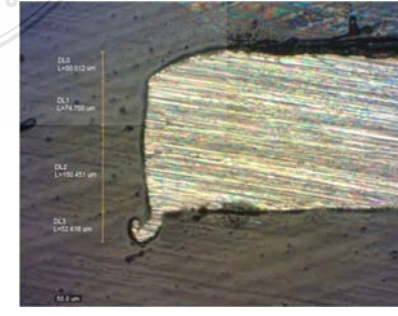
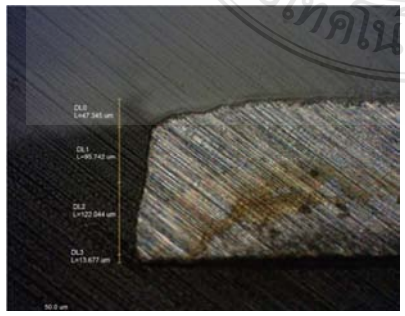
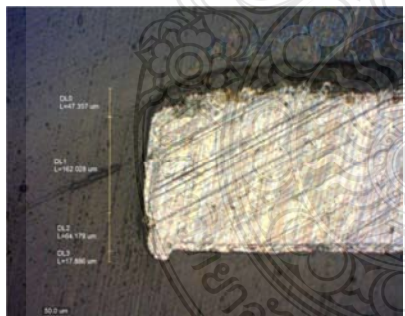
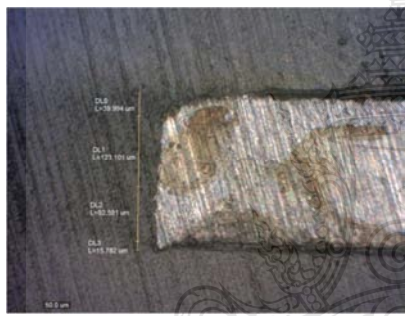
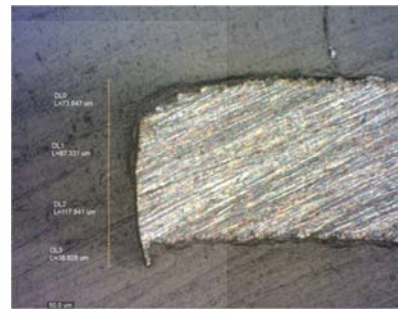
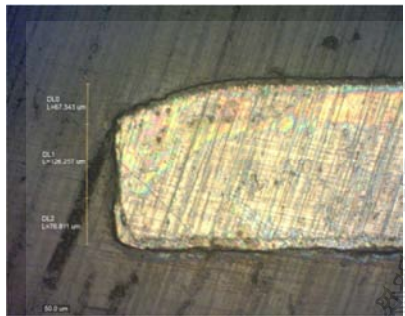
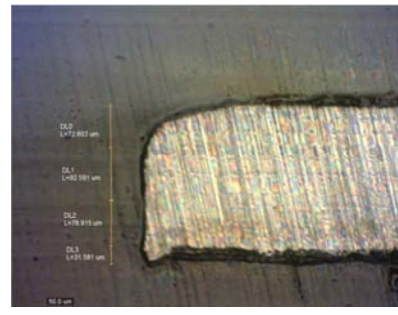
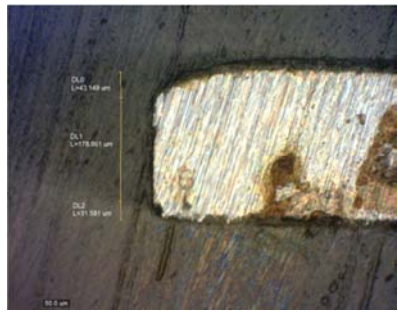
ชั้นที่	Edge Radius	Shear Surface	Fracture Surface	Burr
300	56.814	200.955	0	0
600	69.447	113.628	72.595	0
900	70.499	93.643	94.69	0
1200	73.647	108.372	82.071	0
1500	83.123	86.273	107.32	0
1800	48.408	107.32	103.106	10.521
2100	52.605	114.685	89.429	22.094
2400	52.161	154.663	73.655	24.24
2700	84.169	89.429	86.273	31.563
3000	75.759	70.499	108.367	39.980
เฉลี่ย	66.6632	113.9467	81.7506	12.8398

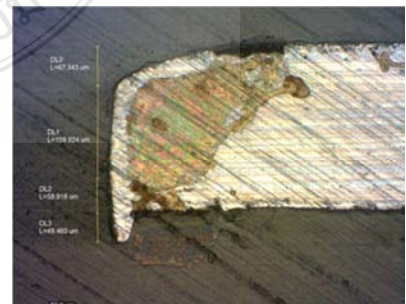
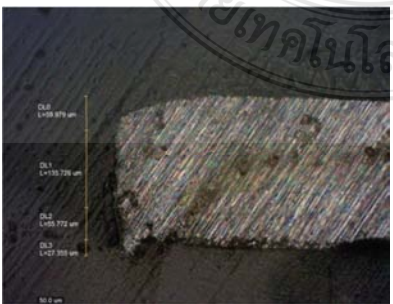
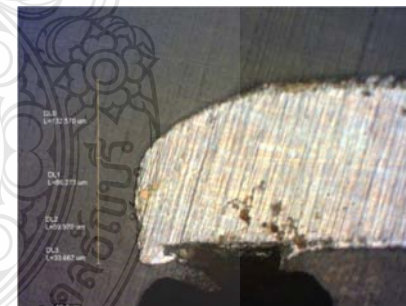
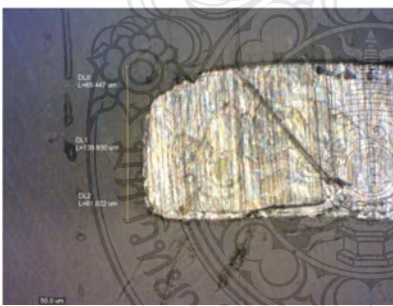
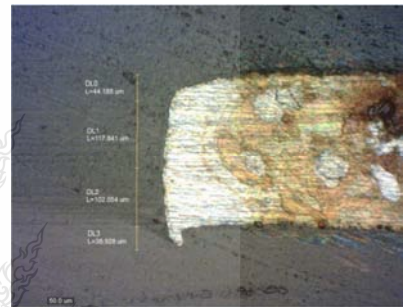
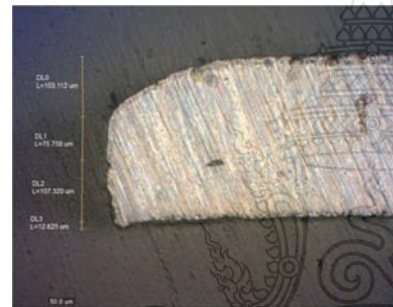
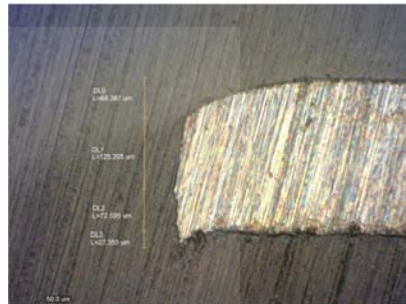
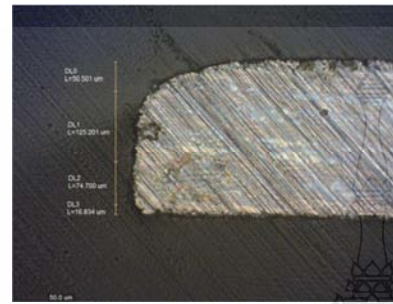
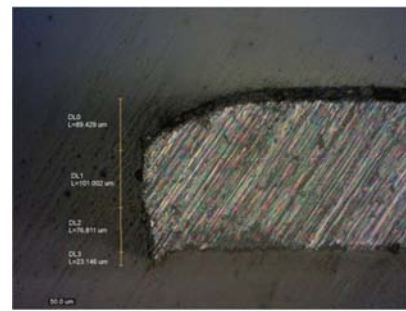
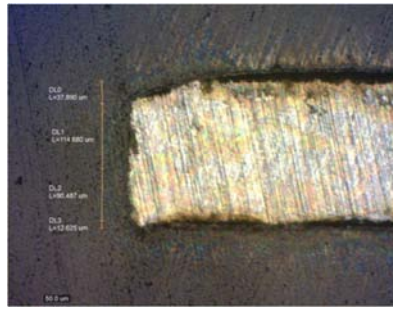


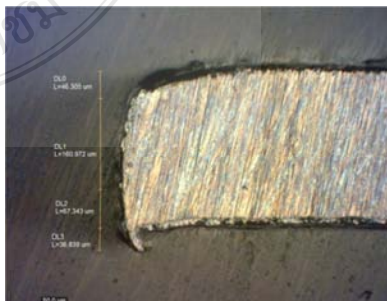
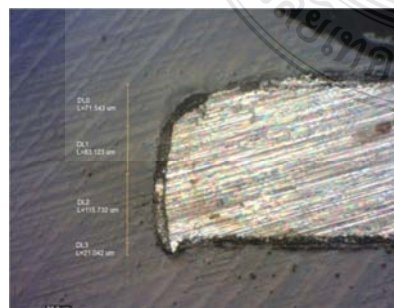
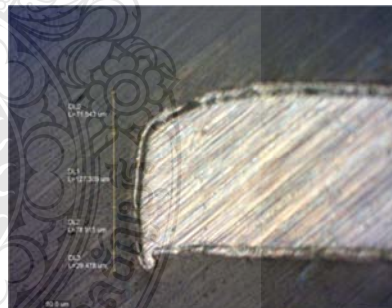
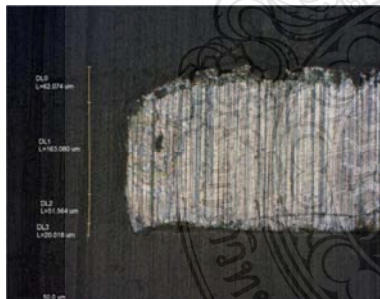
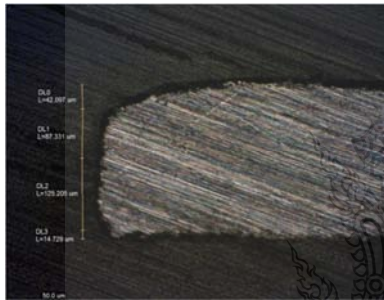
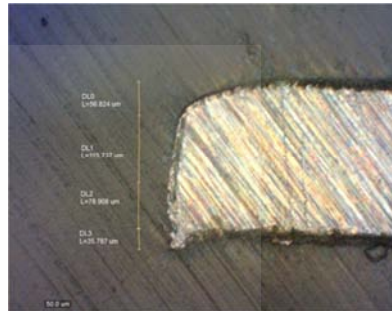
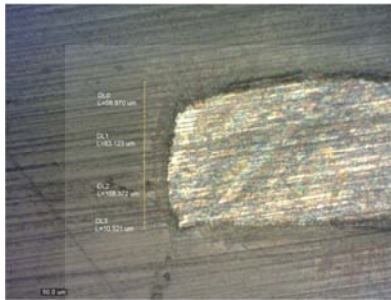
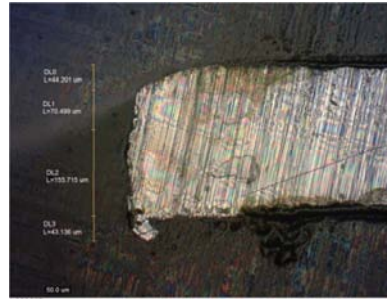
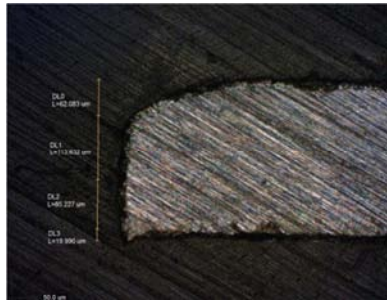
ภาคผนวก ค

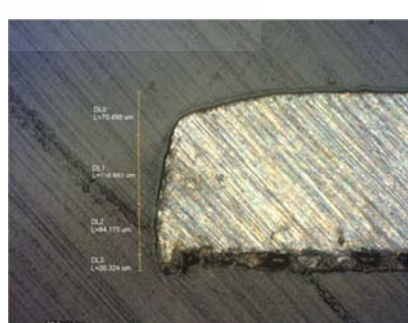
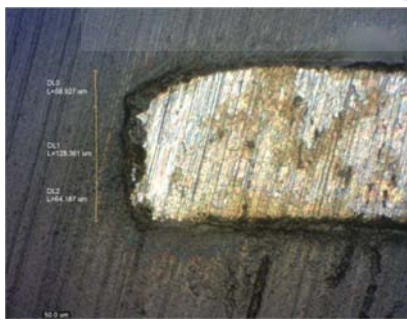
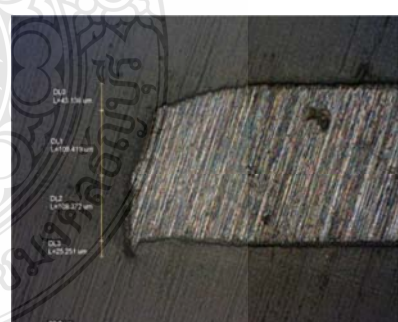
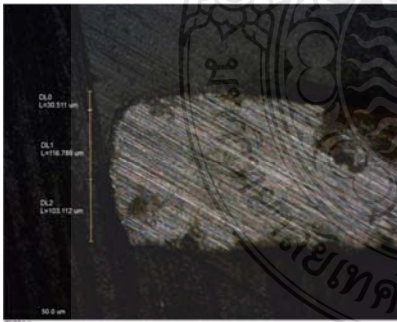
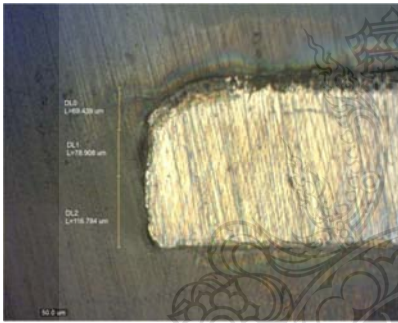
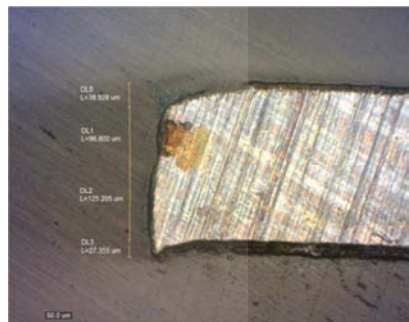
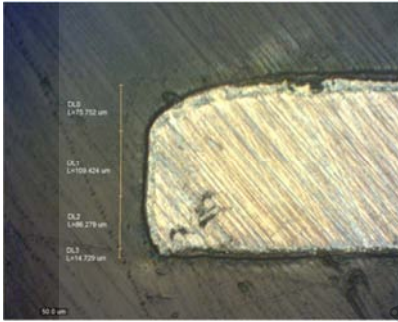
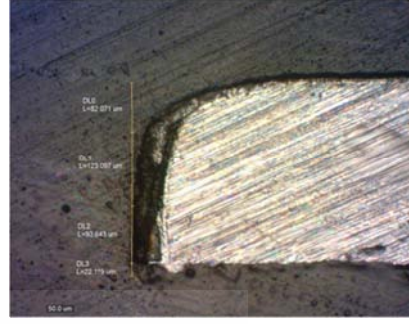
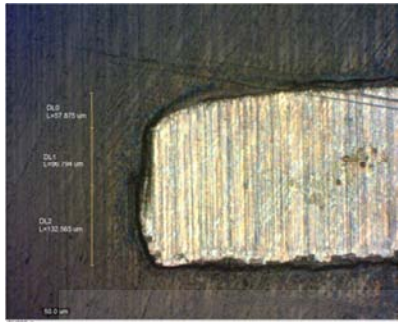
คุณภาพของขอบตัดชิ้นงาน

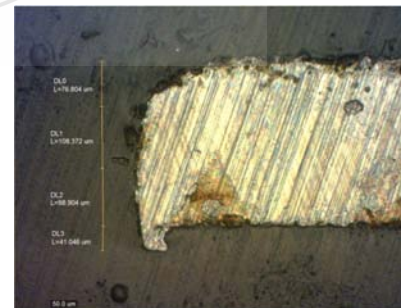
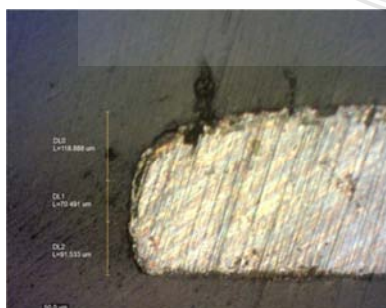
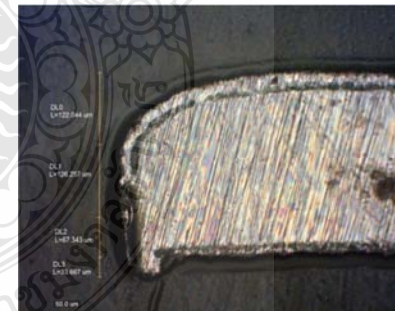
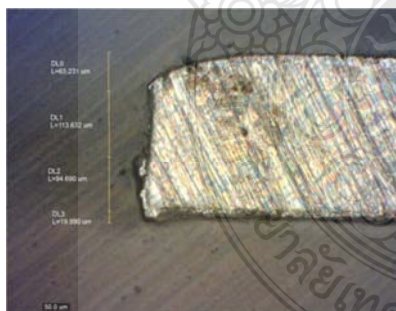
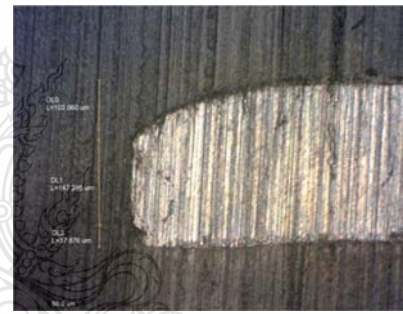
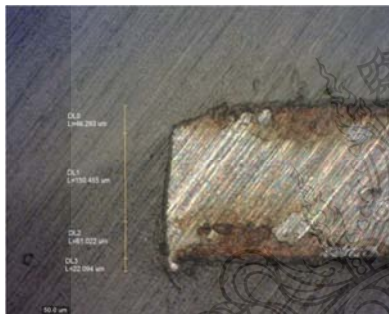
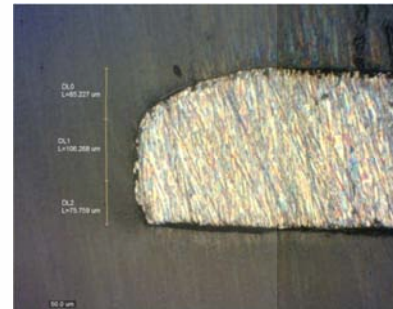
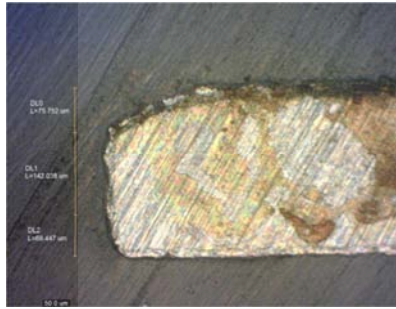
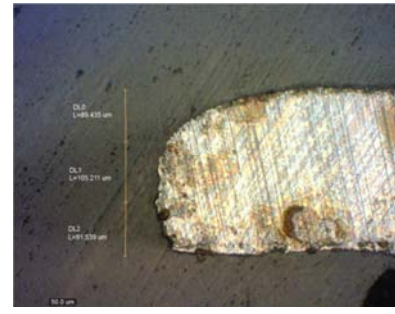
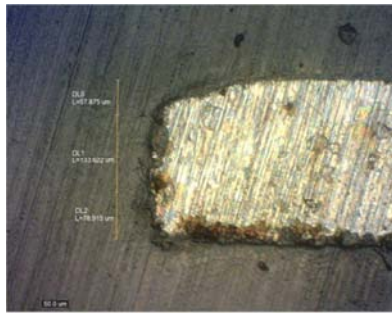
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลบุรีรัมย์

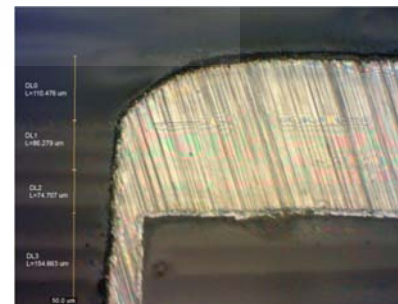
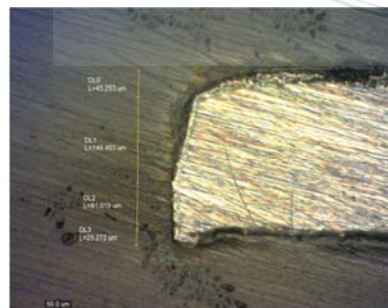
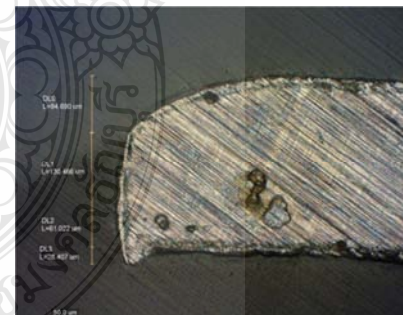
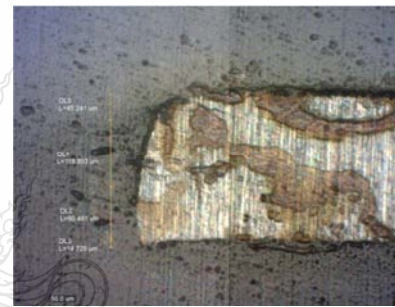
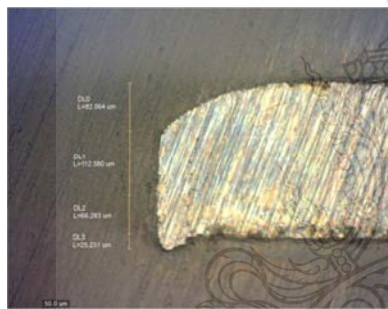
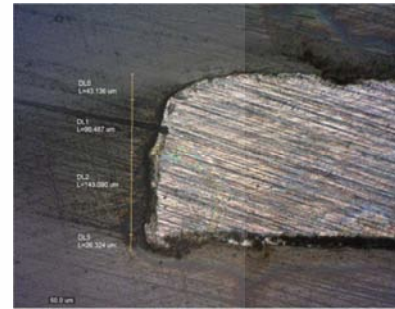
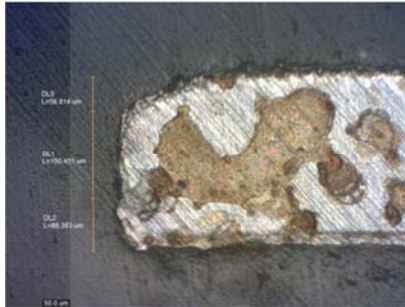
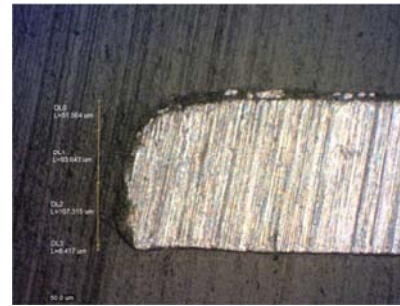
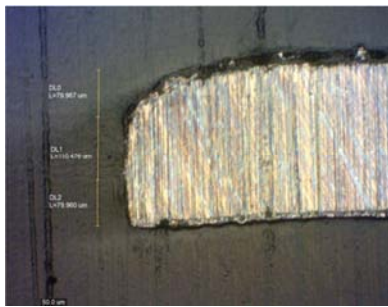


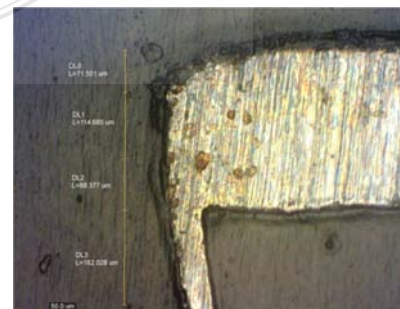
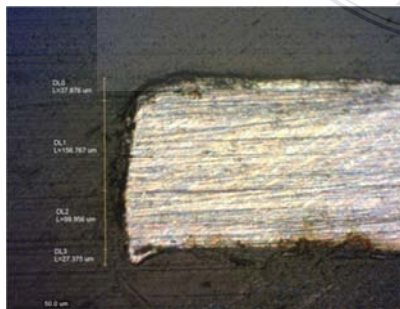
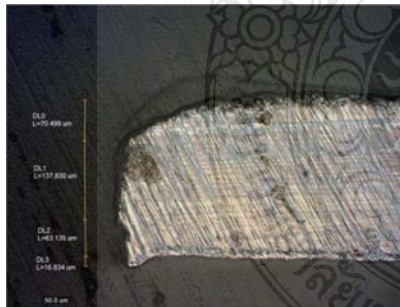
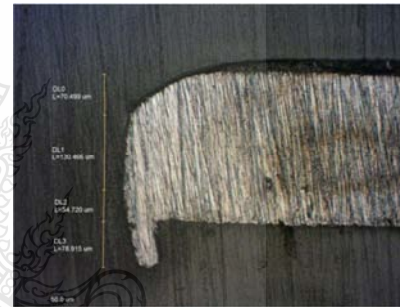
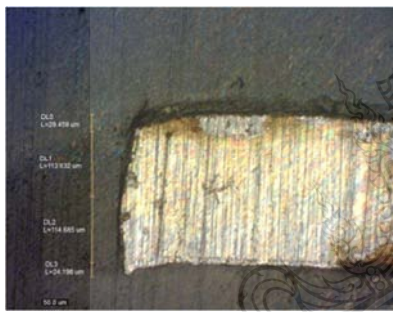
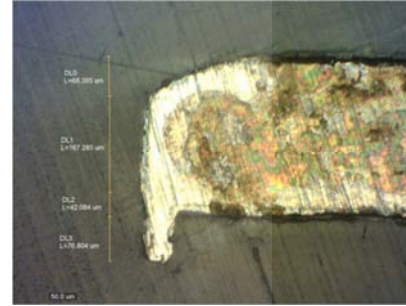
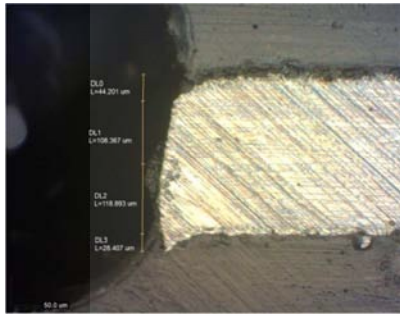
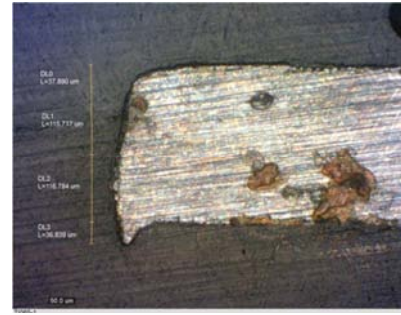
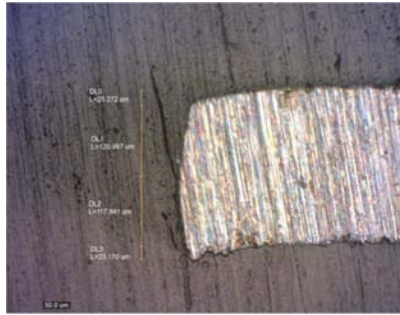


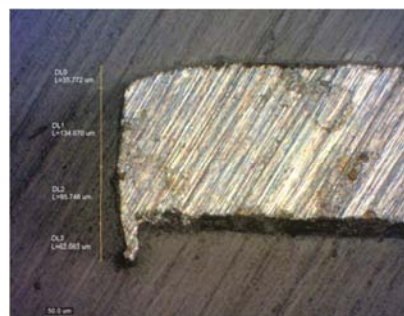
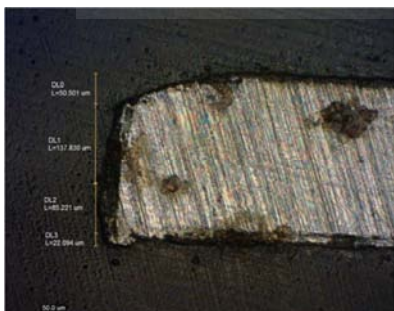
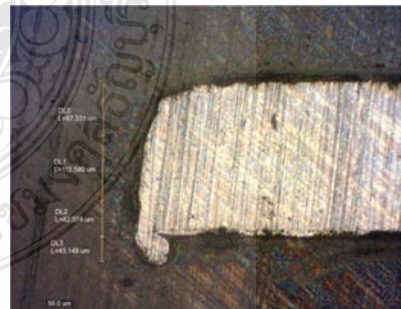
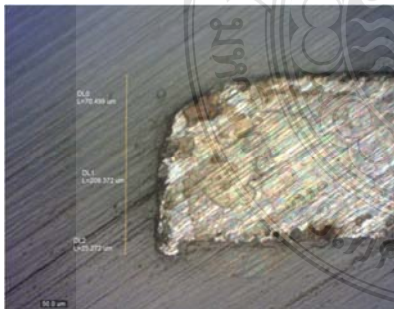
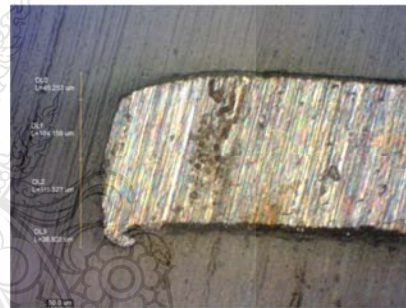
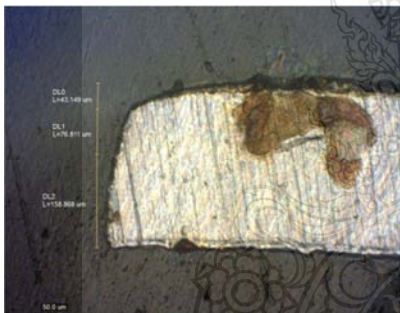
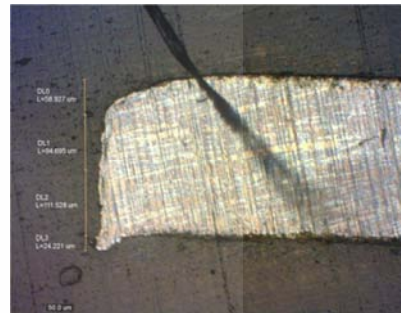
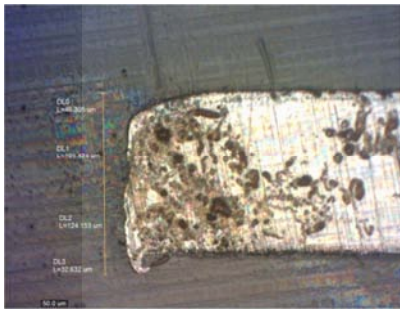
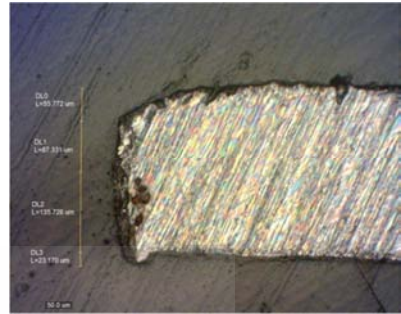
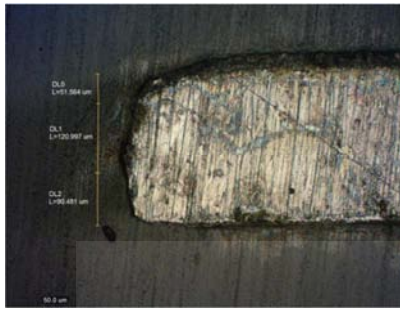


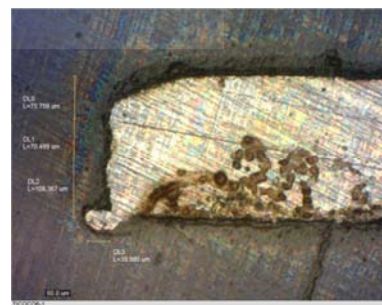
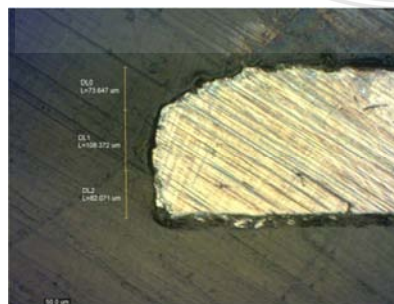
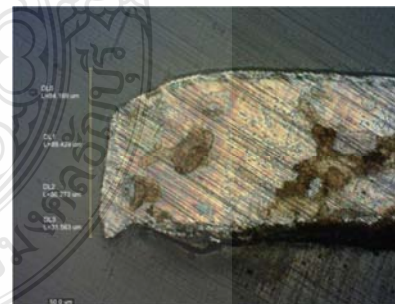
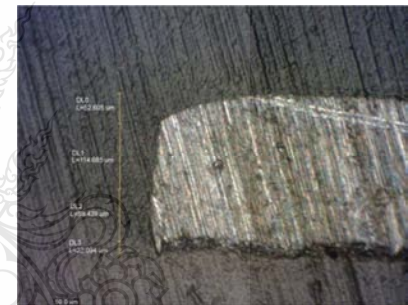
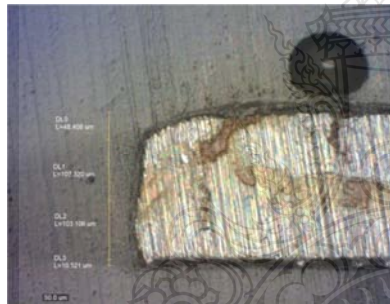
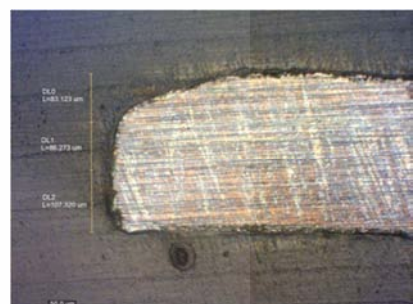
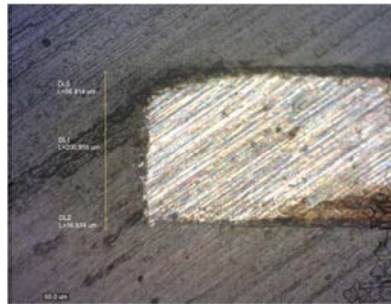
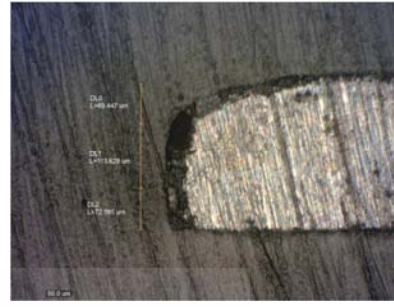
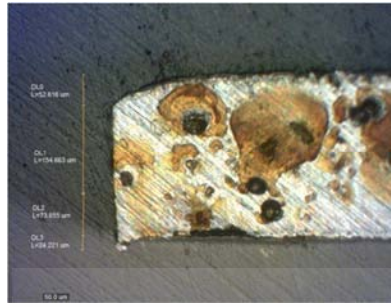








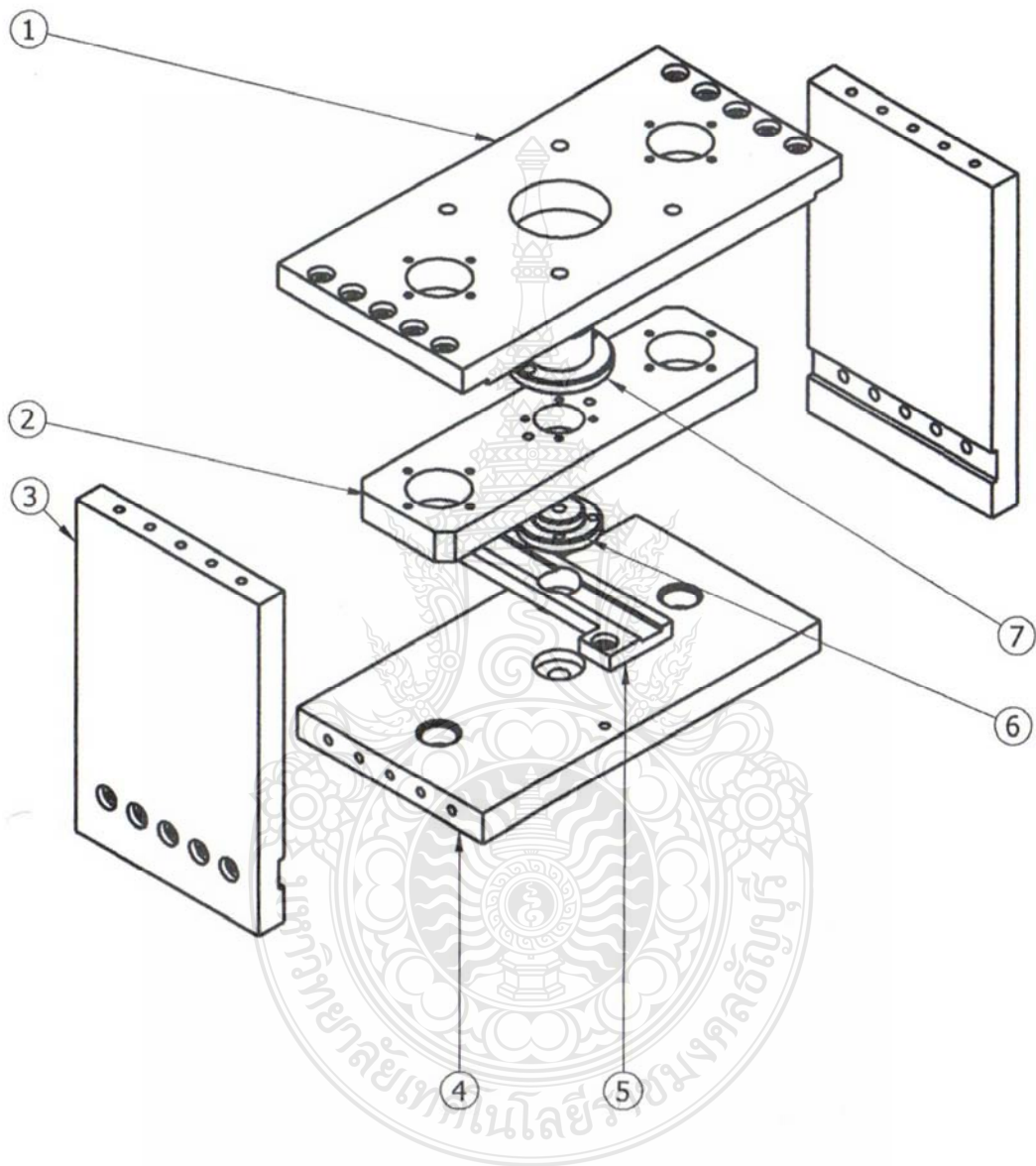




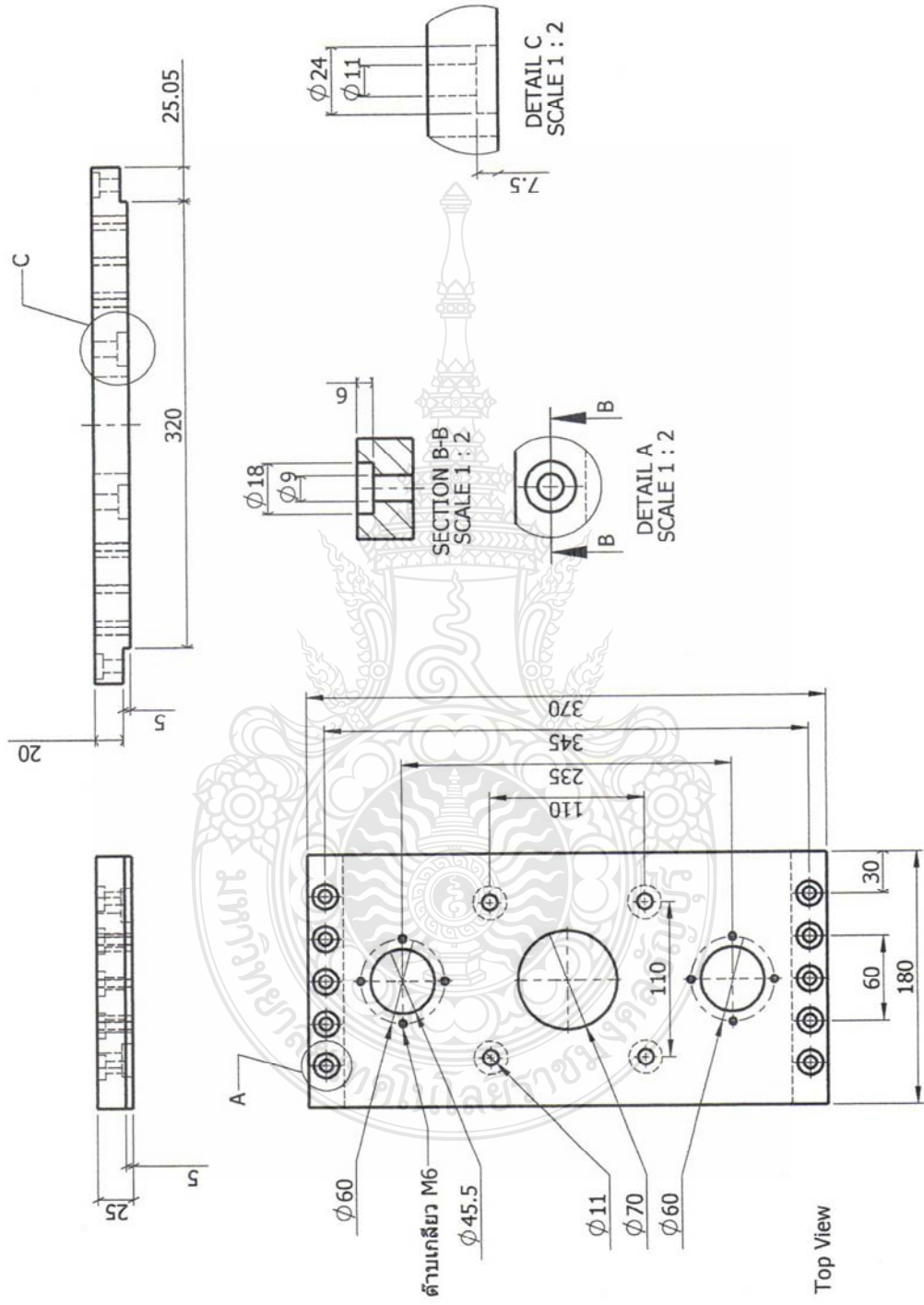


ภาคผนวก ง

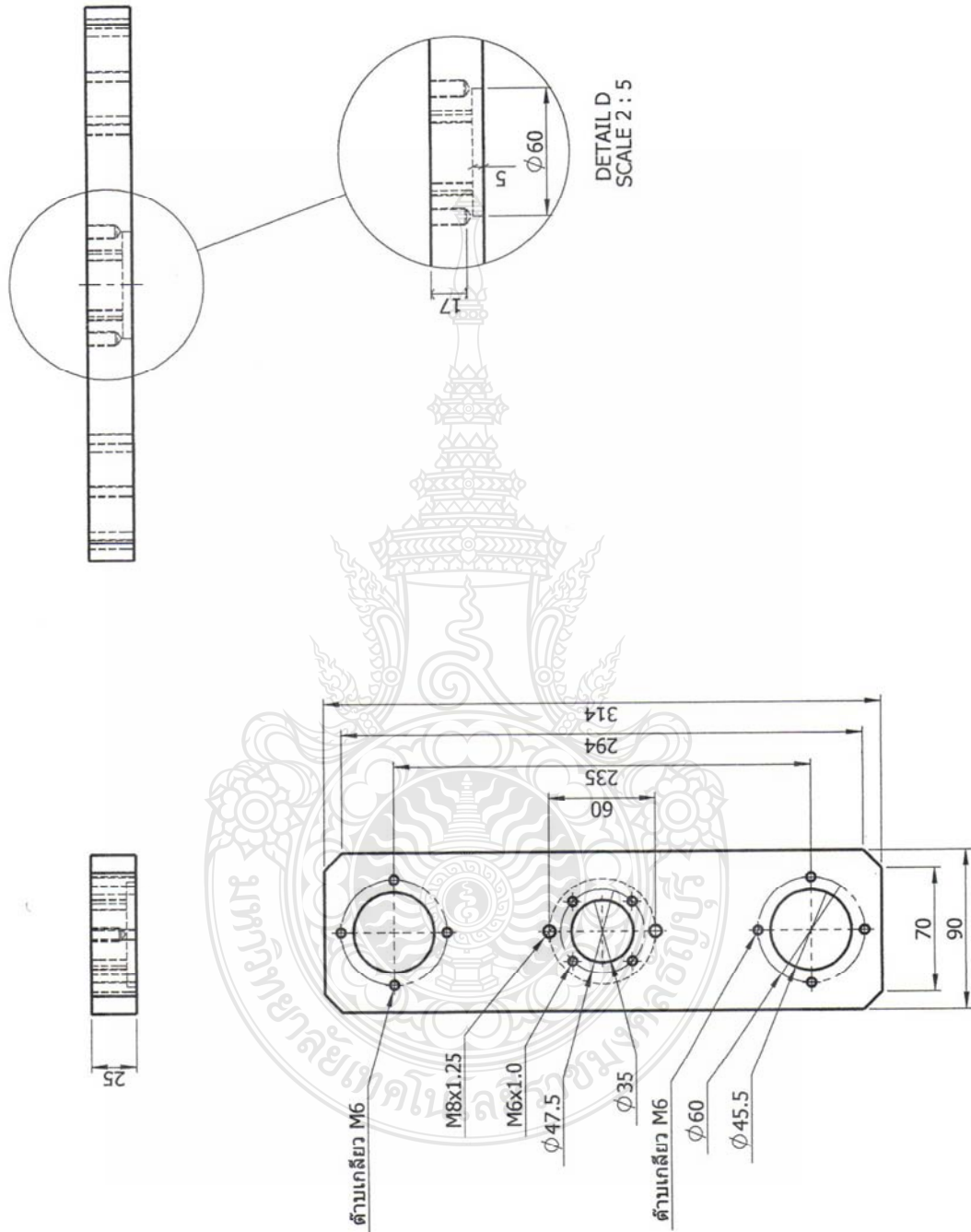
แบบแม่พิมพ์



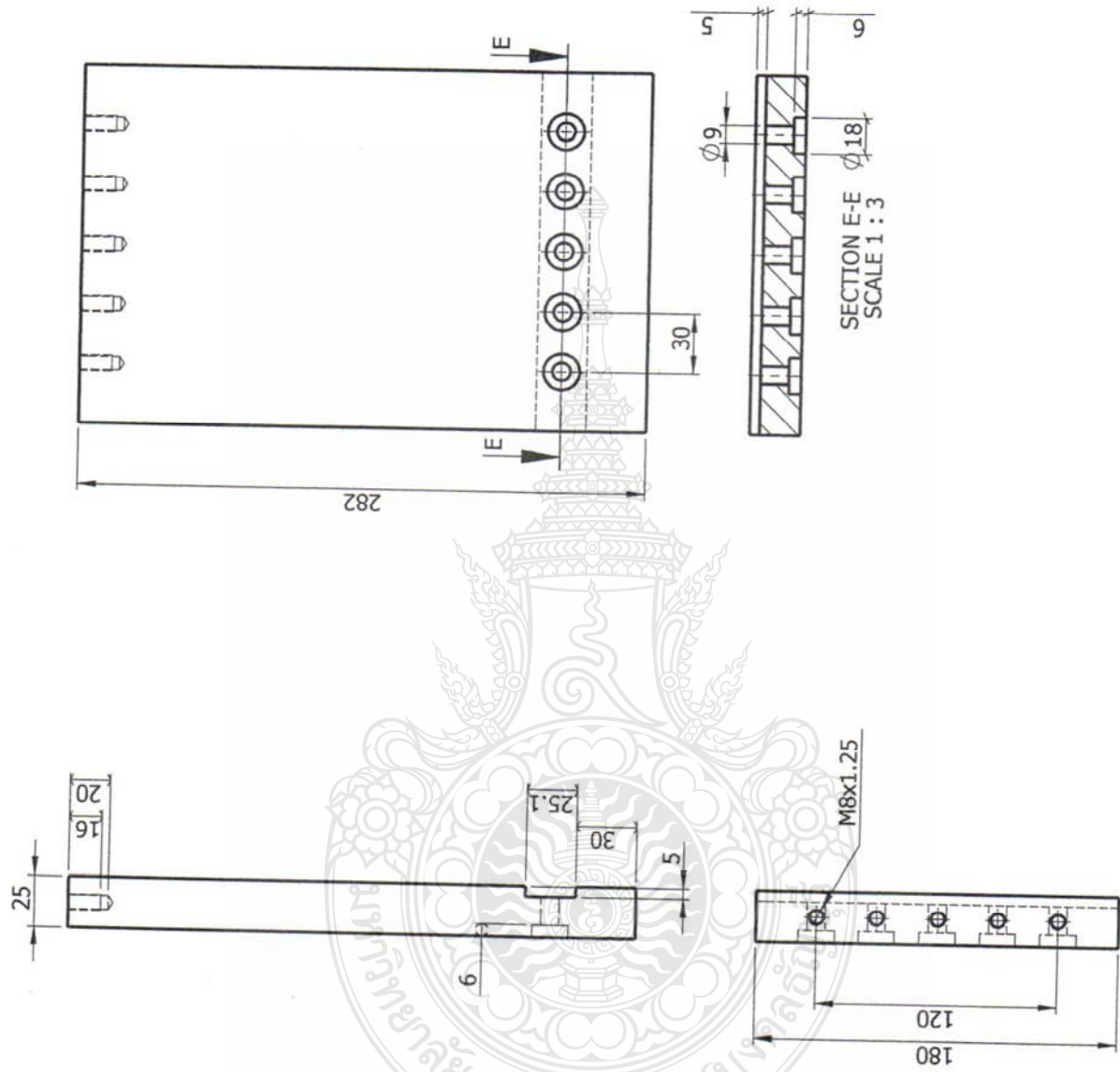
รูปที่ 1 แม่พิมพ์



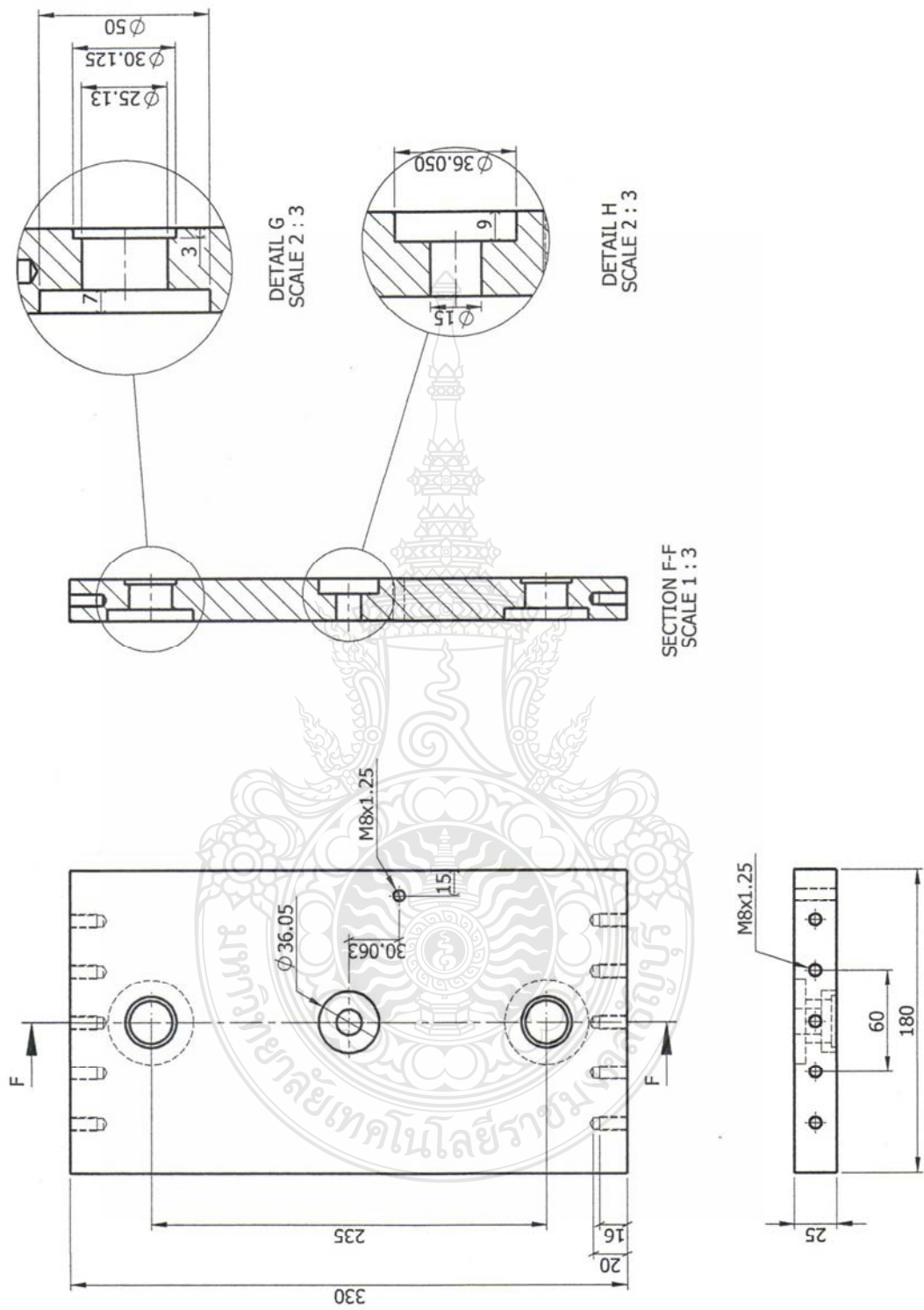
รูปที่ 2 Top M/C



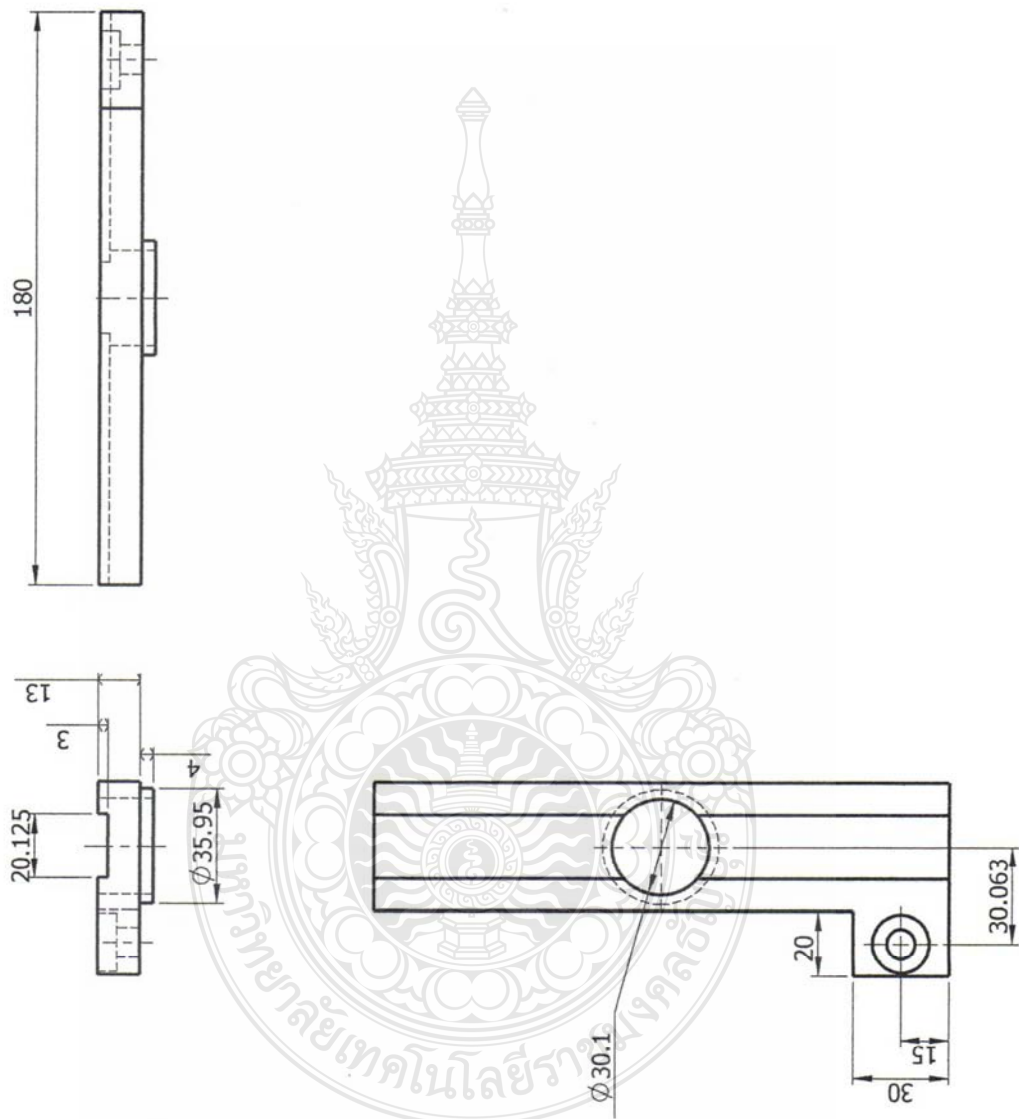
รูปที่ 3 Support Center Hole M/C



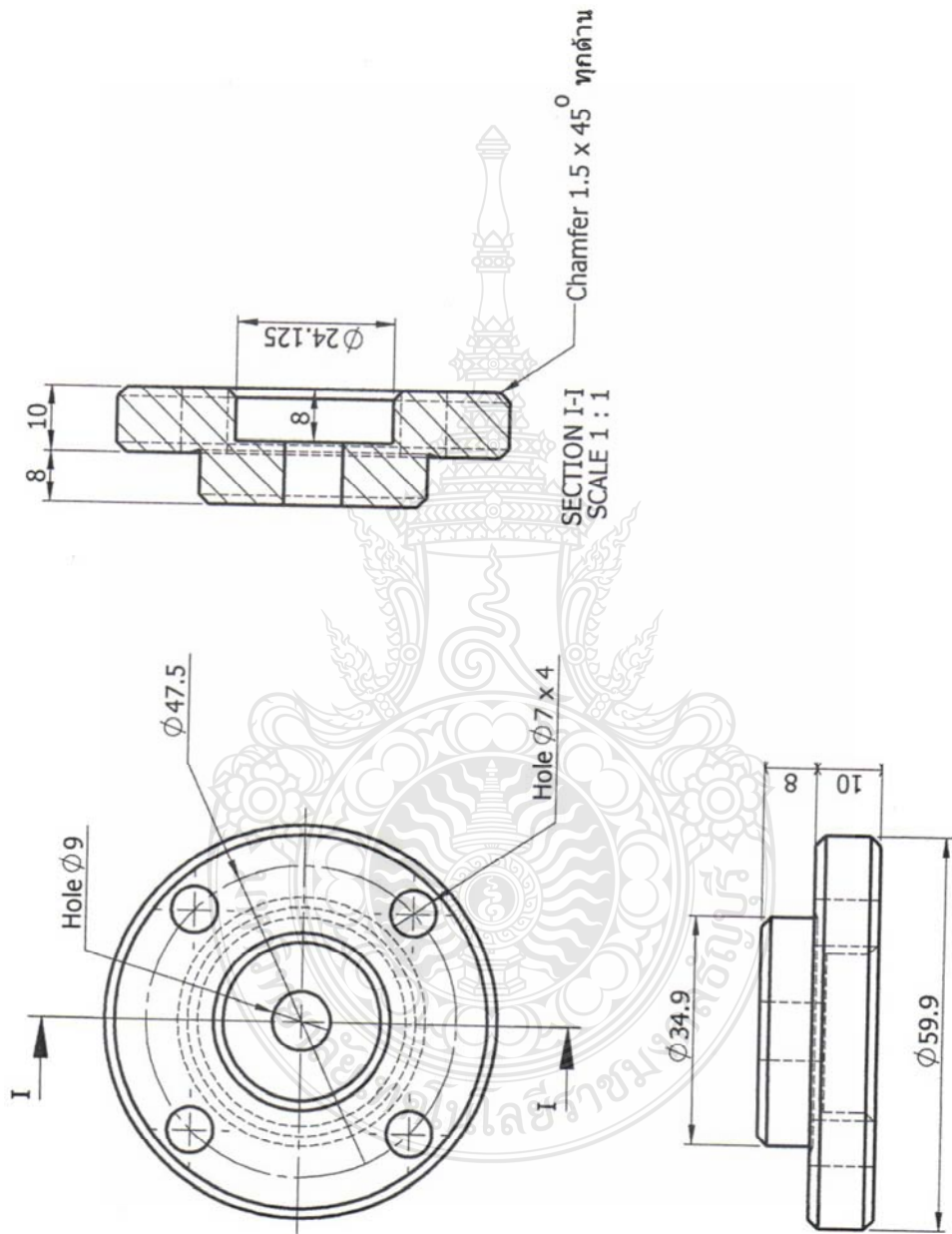
รูปที่ 4 Side M/C



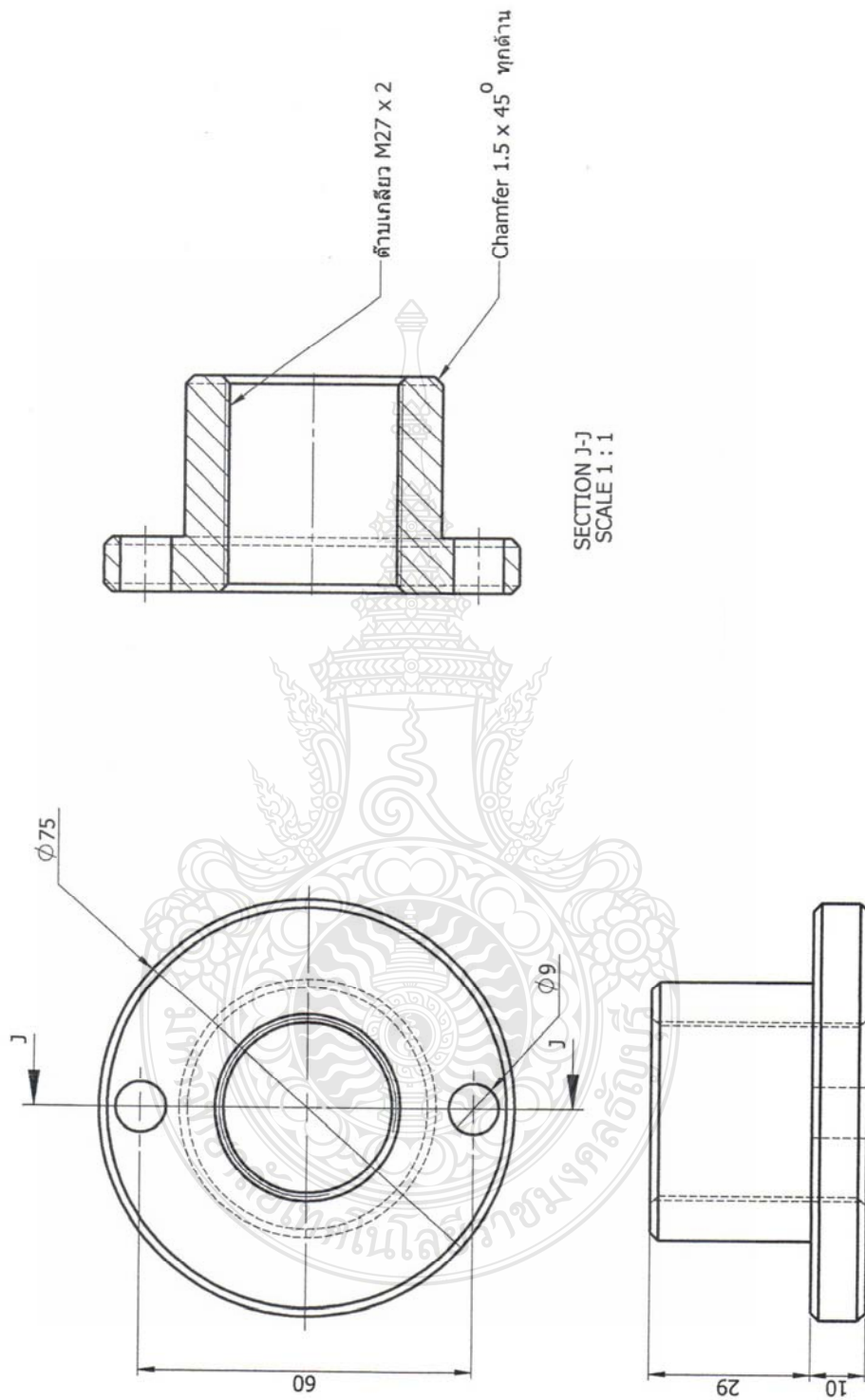
รูปที่ 5 Bottom M/C



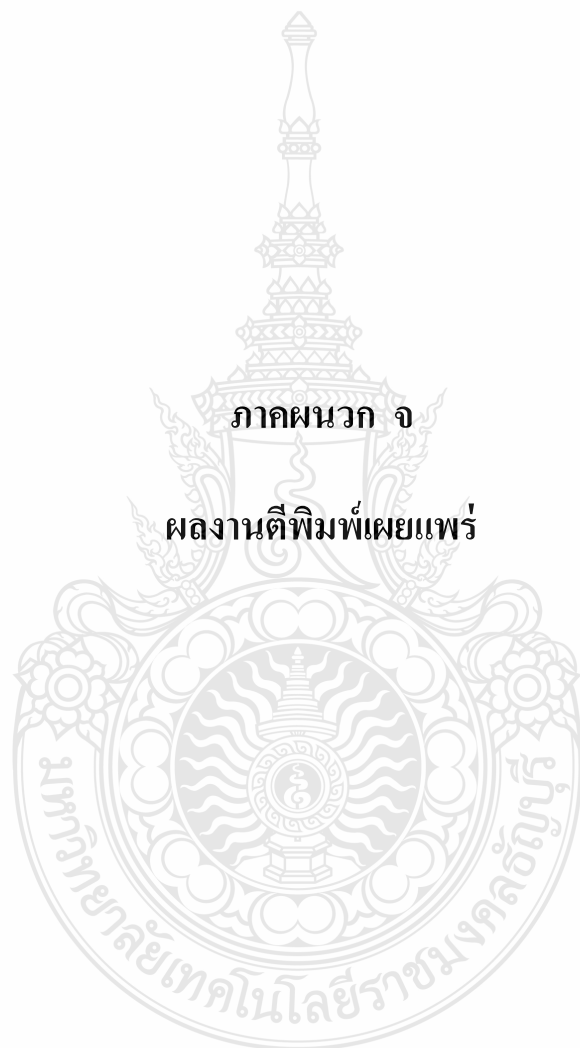
รูปที่ 6 Silicon Inset



รูปที่ 7 Center Hol



รูปที่ 8 Support Rod Cylinder M/C



ภาคผนวก จ

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

RSU



RSU

Proceedings of RSU
National Research Conference 2016

ISBN 978-616-7687-92-6

Proceedings of RSU National Research Conference 2016

เอกสารประกอบ
การประชุมวิชาการระดับชาติ
มหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2559

29 เมษายน 2559

สาขากลุ่มวิชา
แพทยศาสตร์ วิทยาศาสตร์กายภาพ และวิทยาศาสตร์สุขภาพ
วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
สถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบ
มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์
วิจัยพัฒนาการเรียนการสอน
วิเทศสัมพันธ์



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาวิทยานิพนธ์ต้นฉบับ

1. อาจารย์ พิเศษ วิริงคบุตร	Raffles International College
2. พันตำรวจโท ดร. พงษ์ธร รัญญูลีวี	กระทรวงยุติธรรม
3. ศาสตราจารย์ กิตติคุณ ดร. สุเทพ เชาวลิศ	ข้าราชการบำนาญ
4. รองศาสตราจารย์ ดร. จุฬา เทียนไทย	ข้าราชการบำนาญ
5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คณพล จันทร์หอม	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6. นาย กรวิทย์ กุ้งาม	ตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย
7. รองศาสตราจารย์ ดร. สาโรจน์ สิริคันสนียกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนาวัฒน์ สิริวัฒน์ธนกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประมุข กระจุกสุขสถิตย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยะ กิตติภาคกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนิสร ปทุมมานนท์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกร สงคราม	มหาวิทยาลัยเจ้าคุณลาดกระบัง
13. ดร. ปณาย ไชยรัตนานนท์	มหาวิทยาลัยเจ้าคุณลาดกระบัง
14. ดร. จิระศักดิ์ สาระรัตน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
15. ดร. สุธี วังเดือย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
16. ดร. อรุณ คุณเขต	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชลธิศา สุขเกษม	มหาวิทยาลัยทักษิณ
18. รองศาสตราจารย์ ดร. ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
19. ดร. วิชพร เทียบจตุรัส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
20. รองศาสตราจารย์ ลาวดี สมภักดี	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
21. รองศาสตราจารย์ สมชาติ แครดูลาการ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
22. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาดา ทรสสุวานิช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
23. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุทินัน บุญภาพ คอมม่อน	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
24. ดร. กรภิรมย์ โกมลารชุน	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
25. รองศาสตราจารย์ ดร. นิรัช สุขสังข์	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
26. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิญา วงศ์พิริยโยธา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
27. ศาสตราจารย์ รังสรรค์ ตั้งตรงจิตร	มหาวิทยาลัยมหิดล
28. รองศาสตราจารย์ ทนตแพทย์ ดร. ชลชชา ทำนิวัติชัย	มหาวิทยาลัยมหิดล
29. รองศาสตราจารย์ ดร. นพวรรณ กุ่มมาลา มอราเลส	มหาวิทยาลัยมหิดล
30. รองศาสตราจารย์ ดร. สุฉิย์ กัลละจิตร	มหาวิทยาลัยมหิดล

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่พิจารณาให้ทุนสนับสนุน (ต่อ)

31. รองศาสตราจารย์ ทนตแพทย์หญิง นาอุยา วงษ์ปาน	มหาวิทยาลัยมหิดล
32. รองศาสตราจารย์ เบญจลักษณ์ ผลวัฒน์	มหาวิทยาลัยมหิดล
33. รองศาสตราจารย์ ปราณี ภิญญูชีลา	มหาวิทยาลัยมหิดล
34. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญยศ ปัสสัมปิติวิริยะเวช	มหาวิทยาลัยมหิดล
35. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงษ์ เลิศสิทธิชัย	มหาวิทยาลัยมหิดล
36. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อริศรา เล็กสรระเวริญญ์	มหาวิทยาลัยมหิดล
37. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อทธร สรรพพานิช	มหาวิทยาลัยมหิดล
38. อาจารย์ ทนตแพทย์หญิง จิตรีวีร์ จิระัญญาณี	มหาวิทยาลัยมหิดล
39. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ สารสิทธิ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
40. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรเทพ มุสิกะปาน	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
41. ดร. อรอุมา เจริญสุข	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
42. ดร. อธิสิทธิ์ สุวทันทรกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
43. รองศาสตราจารย์ ดร. สุกนธ์ กุ้งามดี	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
44. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สิบพงษ์ เผ่าไทย	มหาวิทยาลัยศิลปากร
45. รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยสิทธิ์ คำนภิกคิกุล	มหาวิทยาลัยศิลปากร
46. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นันทน์ ไส้ศรีกุล	มหาวิทยาลัยศิลปากร
47. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกนถน บางท่าไม้	มหาวิทยาลัยศิลปากร
48. อาจารย์ สืบสกุล ศรีวัฒณี	มหาวิทยาลัยศิลปากร
49. ดร.อภาศิริ สุวรรณานนท์	มหาวิทยาลัยสวนดุสิต
50. รองศาสตราจารย์ ดร. ทวีศักดิ์ จินตานุรักษ์	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมศาสตร์
51. รองศาสตราจารย์ ดร. สัตตา วัฒนะสาริกกุล	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมศาสตร์
52. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรวิชัย วิจารณ์ผล	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมศาสตร์
53. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิตา เยี่ยมจันทร์วาร	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมศาสตร์
54. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทนต้าวจไพ ดร. กฤษณพงศ์ พุฒระกุล	โรงเรียนนายร้อยตำรวจ
55. นาง สุวลักษณ์ อมะวัลย์	ศูนย์วิจัยพืชไร่ระยอง
56. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปริญญ์ สงวนสิทธิ์	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
57. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ สือนาม	สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
58. ศาสตราจารย์ เกษกรหญิง ดร. เทียมศรี ทองนพเนื่อ	มหาวิทยาลัยรังสิต
59. ศาสตราจารย์ ทนตแพทย์หญิง ละอองทอง วัชราลัย	มหาวิทยาลัยรังสิต
60. รองศาสตราจารย์ ดร. กาญจนา จันทร์ประเสริฐ	มหาวิทยาลัยรังสิต

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาวิทยานิพนธ์ต้นฉบับ (ต่อ)

61. รองศาสตราจารย์ ดร. กาญจนา สุวิยะพรหม	มหาวิทยาลัยรังสิต
62. รองศาสตราจารย์ ดร. ชาติชาย กระจ่างรังสิ	มหาวิทยาลัยรังสิต
63. รองศาสตราจารย์ ดร. ดวงพร สุวรรณกุล	มหาวิทยาลัยรังสิต
64. รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์จันทร์ อยู่แพทย์	มหาวิทยาลัยรังสิต
65. รองศาสตราจารย์ ดร. ทิณิจ งามสม	มหาวิทยาลัยรังสิต
66. รองศาสตราจารย์ ดร. โทบูลย์ กวินเลิศวัฒนา	มหาวิทยาลัยรังสิต
67. รองศาสตราจารย์ ดร. วลัยพร นันทคุกวินันท์	มหาวิทยาลัยรังสิต
68. รองศาสตราจารย์ ดร. วิมล ขอบชื่นชม	มหาวิทยาลัยรังสิต
69. รองศาสตราจารย์ ดร. โอภาส จุฑาทาท	มหาวิทยาลัยรังสิต
70. รองศาสตราจารย์ อุกกนิษฐ์ ทุ่งวังระกุล	มหาวิทยาลัยรังสิต
71. รองศาสตราจารย์ วิทยากร เขียวกุล	มหาวิทยาลัยรังสิต
72. รองศาสตราจารย์ สมาน เสนงาม	มหาวิทยาลัยรังสิต
73. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกวียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์	มหาวิทยาลัยรังสิต
74. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชำรงศักดิ์ เทชรเลิศอนันต์	มหาวิทยาลัยรังสิต
75. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉลองรัฐ เมธมาลัยชลมารค	มหาวิทยาลัยรังสิต
76. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉายชัย จิตรเหล้าอาหาร	มหาวิทยาลัยรังสิต
77. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนิติ วิทยวระณะ	มหาวิทยาลัยรังสิต
78. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนวรรณ อัครโอบูลย์	มหาวิทยาลัยรังสิต
79. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภาพนธ์ ไซยอศ	มหาวิทยาลัยรังสิต
80. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญวิทย์ สุขเจริญ	มหาวิทยาลัยรังสิต
81. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปณิพัทธ์ สุขปลั่ง	มหาวิทยาลัยรังสิต
82. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. หนิศา สามพรานโอบูลย์	มหาวิทยาลัยรังสิต
83. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มงคล เกื้อนประเทืองชัย	มหาวิทยาลัยรังสิต
84. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ริชชื้อ แสงอุดม	มหาวิทยาลัยรังสิต
85. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วัคพงษ์ สอนสุภาพ	มหาวิทยาลัยรังสิต
86. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รุจภา เพ่งเกษร	มหาวิทยาลัยรังสิต
87. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราพร ลักษณ์ลม้าย	มหาวิทยาลัยรังสิต
88. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วลัยภรณ์ นาคพันธุ์	มหาวิทยาลัยรังสิต
89. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วุฒิพงษ์ ชินศิริ	มหาวิทยาลัยรังสิต
90. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย เล็กเจริญ	มหาวิทยาลัยรังสิต

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาวิทยานิพนธ์ต้นฉบับ (ต่อ)

91. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริพร สุภราทิตย์	มหาวิทยาลัยรังสิต
92. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อวิรุทธิ์ เจริญทรัพย์	มหาวิทยาลัยรังสิต
93. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุบล สรรพชัยพงษ์	มหาวิทยาลัยรังสิต
94. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กนกพร อนันต์ชื่นสุข	มหาวิทยาลัยรังสิต
95. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิตติสาร วาณิชยานนท์	มหาวิทยาลัยรังสิต
96. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชรรมศักดิ์ เอื้อรักสกุล	มหาวิทยาลัยรังสิต
97. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัยพร หานิชรุทวิวงศ์	มหาวิทยาลัยรังสิต
98. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประไพศรี ชรรมวิริยะวงศ์	มหาวิทยาลัยรังสิต
99. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มานะ เงินศรีสุข	มหาวิทยาลัยรังสิต
100. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มุกดา โควิทกุล	มหาวิทยาลัยรังสิต
101. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริวรรณ วาสุกวี	มหาวิทยาลัยรังสิต
102. ดร. กฤษณิกร เจริญกุล	มหาวิทยาลัยรังสิต
103. ดร. กำจร แซ่เจียง	มหาวิทยาลัยรังสิต
104. ดร. จิรัชญา วิเชียรปัญญา	มหาวิทยาลัยรังสิต
105. ดร. เฉลิมพร เอ็นย์เอก	มหาวิทยาลัยรังสิต
106. ดร. ธนาวรรณ อัครวราพันธ์	มหาวิทยาลัยรังสิต
107. ดร. นริศรา คาควี	มหาวิทยาลัยรังสิต
108. ดร. นิภาพร เฉลิมนิรันดร	มหาวิทยาลัยรังสิต
109. ดร. พรหมรัตน์ จวงเสวต์ศักดิ์ เดช	มหาวิทยาลัยรังสิต
110. ดร. พัชรทิพย์ จารุทวีผลนกุล	มหาวิทยาลัยรังสิต
111. ดร. พันธุ์ศักดิ์ ไทยสิทธิ์	มหาวิทยาลัยรังสิต
112. ดร. พิพัฒน์พงศ์ วัฒนวันยู	มหาวิทยาลัยรังสิต
113. ดร. ปิยะ มนต์ปิติ	มหาวิทยาลัยรังสิต
114. ดร. ไพศาล จมจรรยาภรณ์	มหาวิทยาลัยรังสิต
115. ดร. วัลลภา เฉลิมวงศ์ทวช	มหาวิทยาลัยรังสิต
116. ดร. ศรีสมร พุ่มสะอาด	มหาวิทยาลัยรังสิต
117. ดร. สิริพร ศรีทิบูลย์	มหาวิทยาลัยรังสิต
118. ดร. สมบูรณ์ อเนกฤทธิ์มงคล	มหาวิทยาลัยรังสิต
119. ดร. สุธารทิพย์ เรืองประภาวุฒิ	มหาวิทยาลัยรังสิต
120. ดร. สุพหล ศรีวิทยา	มหาวิทยาลัยรังสิต

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่พิจารณาตีพิมพ์ต้นฉบับ (ต่อ)

- | | |
|---|-------------------|
| 121. พันศแพทย์หญิง ดร. สุปราณี เบ็ญจสุพัฒน์นันท | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 122. อาจารย์ จิรพร รัชชาพล | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 123. อาจารย์ รพีทิมล ไชยเสนาะ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 124. อาจารย์ วาจิมล เศษเกตุ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 125. อาจารย์ สุเมธ ค่องพรรคแดง | มหาวิทยาลัยรังสิต |



สารบัญบทความ (ต่อ)

	หน้า	
กลุ่ม 2	กลุ่มวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี	
G2-01	การพัฒนาระบบวิเคราะห์เว็บไซต์เพื่อคาดการณ์แนวโน้มผู้เข้าชม โดยวิธีการปรับเรียบ เอกซ์โพเนนเชียลซ้ำสองครั้ง Development of the Web Analytics System for Forecasting the Trend of Unique Visitors : ชีรวัฒน์ สิริทิพัฒน์ โสภณ* และ ดวงอาทิตย์ ศรีมุล	187
G2-02	บริการข้อความสั้นอัจฉริยะ สำหรับ ระบบเครือข่ายจำหน่ายกระแสไฟฟ้า Intelligent Short Message System (iSMS) for Electricity Distribution Network System : นกมล รัตนวราหะ* และ สานนท์ นิยมณี	198
G2-03	อิทธิพลตัวของแปรการผลึกที่ส่งผลต่อสมบัติการใช้งานปุ่มกด Effect of Manufacturing Factors on Working Properties of Silicone Keypads : ถัดกัญญา ประดา	208
G2-04	การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์ตัดเจาะเหล็กซิลิกอน The Study of Variable that Can Affect the Quality of Mold Parts for Cutting Silicon Steel : เคลือวัลย์ มั่นระวีง* และ ศิริชัย ผอัสกุล	218
G2-05	ผลกระทบของขนาดพื้นที่จัดเก็บและกฎการจ่ายงานในสายการผลิตแบบตาม งานสโตคาสติกพลวัต ด้วยเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรขึ้นกับลำดับงานก่อนหน้าโดยใช้วิธีการ จำลองสถานการณ์ The Impact of the Buffer Size Areas and Dispatching Rules in a Stochastic Dynamic Job Shop with Sequence Dependent Setup Time Using Simulation Approach : จาตุรันต์ แซ่มลุ่ม* และ รณชัย ศิริโรจนกุล	228
G2-06	ต้นแบบแขนหุ่นแบบสามค้ำองเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม Prototype of Delta Robot for Industrial Application : ชานูฉรงค์ ชูสุข* และ ปรัชญา เปรมปราวณีวิรัช	237
G2-07	การประเมินค่าอายุการใช้งานของสายพานลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ในกระบวนการทำความสะอาด ชิ้นงานกล่องบรรจุสารคัดกรองภายใต้ภาระที่มากกระทำแบบวัฏจักรทางความร้อน การสั่นสะเทือน และคลื่นอัลตราโซนิคส์ Fatigue Life Estimation of Stainless Steel Wire Conveyor on Cleaning Process of Hard Disk Case under Cyclic Load of Heat and Vibration and Ultrasonic Wave : ฉรงค์ศักดิ์ เกศรัตนาวาสวัสดิ์* และ ทิระพงษ์ ดวัญเจริญ	247



Certificate of Honour and Appreciation

Presented to

Kuawan Manrawang

Presenter

The Study of Variable that Can Effect to the Quality of Mold Parts for Cutting Silicon Steel

The RSU National Research Conference 2016
Rangsit University, Pathum Thani, Thailand
29-30 April 2016

Dr. Arhit Gursrat
President of Rangsit University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาว เคลือวัลย์ มั่นระวัง
วัน เดือน ปีเกิด	2 เมษายน 2532
ที่อยู่	87/3 หมู่ 1 ต.ป่าแฝก อ.กงไกรลาศ จ. สุโขทัย 64170
การศึกษา	ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสุโขทัยวิทยาคม ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวร ระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม การผลิต มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
ประสบการณ์การทำงาน	บริษัทพีซีซีอิเล็กทรอนิกส์เมนูเฟคเจอร์ริง จำกัด
โทรศัพท์	087-5178035
อีเมล	homeddd@hotmail.com

