ปัจจัยที่เหมาะสมในการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานสำเร็จ

โดย

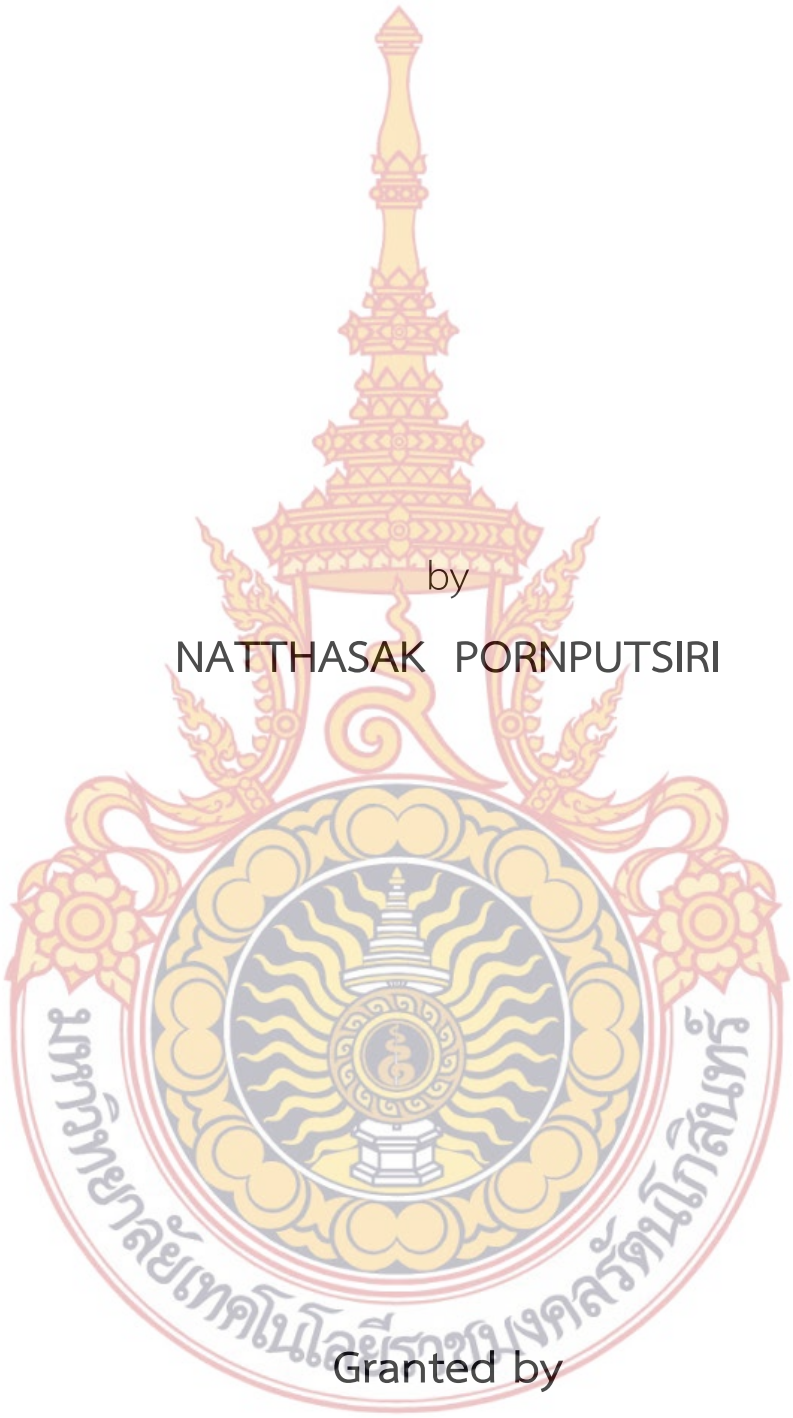
ณัฐศักดิ์ พรพุฒิศิริ

สนับสนุนงบประมาณโดย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ประจำปีงบประมาณ 2557

Appropriate factors of a stainless steel wire drawing with a quality product



by

NATTHASAK PORNPUTSIRI

Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2013

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง “ปัจจัยที่เหมาะสมในการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานสำเร็จ” นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความร่วมมือ และคำแนะนำต่าง ๆ ในการดำเนินงานเป็นอย่างดีจากอาจารย์หลายท่านโดยเฉพาะ ท่านอาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต รวมทั้งนักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต ที่ให้ความช่วยเหลือในขั้นการทดลอง เพื่อดำเนินการวิจัยตามขั้นตอน และวัตถุประสงค์ที่กำหนด ในการดำเนินโครงการวิจัยนี้

ขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องทุกคนที่ช่วยเหลือในการจัดหาข้อมูล ข้อเสนอแนะ ความคิด และขอบคุณผู้บริหารวิทยาเขตที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการดำเนินโครงการวิจัย จนทำให้โครงการวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นายณัฐศักดิ์ พรพุฒิศิริ
หัวหน้าโครงการวิจัย
พฤศจิกายน 2558

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : **เลขที่สัญญารับทุน..... /ปี พ.ศ. 2557**
ชื่อโครงการ : ปัจจัยที่เหมาะสมในการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานสำเร็จ
ชื่อนักวิจัย : ผศ.ณัฐศักดิ์ พรพุฒิศิริ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 หน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดก่อนการดึง 2.00 มิลลิเมตร โดยศึกษาผลกระทบจากชนิดของสารหล่อลื่น ความเร็วในการดึงลวด และมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ ที่มีต่อคุณภาพเส้นลวด คุณสมบัติทางกลและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของเส้นลวดที่ได้ กำหนดสารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดแตกต่างกัน 3 ชนิด อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดคือ 10% มุมไหลเข้าของแม่พิมพ์มี 3 ขนาดคือ 10° 15° และ 20° กำหนดความเร็วที่ใช้ในการดึง 4 ระดับ คือ 30, 60 , 90 และ 120 เมตรต่อนาทีตามลำดับ ทำการทดสอบการดึงลวด เพื่อตรวจสอบสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ และวิเคราะห์ผลจากแรงดึงขึ้นรูป ค่าความแข็งแรงดึงหลังการขึ้นรูป ค่าความเรียบผิว และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเส้นลวดภายหลังการดึง จากการทดลองพบว่าที่มุมไหลเข้า 15° และที่ความเร็วในการดึงสูงที่ 120 เมตร/นาที ให้แรงที่ใช้ในการดึงลวดน้อยและทำให้ผิวลวดหลังการดึงมีแนวโน้มเรียบที่สุด ส่วนที่มุมไหลเข้า 10° และความเร็วในการดึงต่ำที่ 30 และ 60 เมตร/นาที ไม่สามารถดึงขึ้นรูปเส้นลวดได้สำเร็จ เกิดการขาดของเส้นลวดระหว่างการดึง และที่มุมไหลเข้าต่ำพบว่าผิวลวดหลังการดึงหยาบกว่าการดึงผ่านดายที่มีมุมไหลเข้าสูง แต่มีคุณสมบัติหลังการดึงที่ดีกว่า

คำหลัก ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม, การดึงลวด, สารหล่อลื่น, อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด, มุมไหลเข้าแม่พิมพ์

E-mail Address : natthasak_idt@rmutr.ac.th
ระยะเวลาโครงการ : ตุลาคม พ.ศ. 2556 – กันยายน พ.ศ. 2557

Abstract

Code of project : **Number contracts funded..... / early 2013.**

Project name : Appropriate factors of a stainless steel wire drawing with a quality product.

Researcher name : Asst.Prof. Natthasak Pornputsiri

This research study of the appropriate factors on Wire drawing process of stainless steel SUS 304, circular cross-sectional diameter of wire before pulling = 2.00 mm. The Studies on ratio of reduced cross-sectional area. Speed of Wire drawing process and die angle effecting to the mechanical properties of wire stainless steel SUS 304, Lubricant oil is used for forming (Forming Oil) reduction drawing ratio of cross-sectional are 10% Die angle are two sizes: 10 ° and 15 °, determine the speed are used to draw 4 levels are 30, 60, 90 and 120 m/s respectively. Testing to determine the assumptions of that set to determine by the drawing force and the roughness on wire surface, the results showed that in die angle 15° and on high speeds to draw at 120 m/min, the force to Wire drawing process to less and affecting to most likely the skin is smooth after drawing. Sections of die angle at 10° and low of speed to draw at 30 and 60 m / min can be achieved wire drawing. The failure of wires between the draw, and found that lower of die angle, to high of surface roughness on skin wire after drawing, but after drawing to better mechanical property.

Keywords: Stainless Steel wire / Wire drawing / Lubricant / Reduction of area / Die angle.

E-mail Address : natthasak_idt@rmutr.ac.th

Period of project : September 2013 – October 2014

สารบัญ

		หน้า
กิตติกรรมประกาศ		ก
บทคัดย่อภาษาไทย		ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ค
สารบัญ		ง
สารบัญภาพ		ช
สัญลักษณ์และคำย่อ		ซ
บทที่ 1	**บทนำ**	**1**
	1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	2. วัตถุประสงค์การวิจัย	2
	3. ขอบเขตของการวิจัย	2
	4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2	**ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**	**3**
	1. ทฤษฎีการดึงลวด	3
	2. เครื่องดึงลวด	3
	3. กระบวนการดึงลวด (Wire Drawing Process)	5
	4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเสียดทานในกระบวนการดึงลวด	7
	5. ทฤษฎีที่เกี่ยวกับไตรบอโลยี	11
	6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3	**การดำเนินงานวิจัย**	**34**
	1. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	34
	2. ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการทดลอง	35
	3. น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง	36
	4. ฟิล์มแข็งเคลือบผิวแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง	36
	5. การทดสอบคุณสมบัติสารหล่อลื่น	36
	6. ออกแบบการทดลอง	37
	7. ขั้นตอนการทดลองและเก็บผลการทดลอง	37
	8. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	38

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

9. การดำเนินงานวิจัย 41
10. การวิเคราะห์ข้อมูล 42

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล 44
1. อิทธิพลของสารหล่อลื่น 44
2. อิทธิพลของมุมไหลเข้าแม่พิมพ์ 46
3. อิทธิพลของความเร็วในการดึงขึ้นรูป 47
4. โครงสร้างระดับจุลภาคในแต่ละมุมดาย 48
5. การวิเคราะห์ผลการทดลอง 49

บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ 51
1. สรุปผลการวิจัย 51
2. ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัย 51

บรรณานุกรม 52

ภาคผนวก ก คุณสมบัติวัสดุชิ้นงานและแม่พิมพ์ 56
ภาคผนวก ข มาตรฐานและการคำนวณที่เกี่ยวข้อง 58
ภาคผนวก ค แบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง 62

ประวัติผู้วิจัย 66

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ก.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก SUS 304	570
ก.2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304	57
ก.3 คุณสมบัติทางกลของทังสเตนคาร์ไบด์	57
ข.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในงานดึงขึ้นรูปและงานอัดขึ้นรูปชิ้นงาน	60
ค.1 ขนาดมาตรฐาน JIS B4111 ของแม่พิมพ์ดึงลวดกลม	63
ค.2 คุณสมบัติของคาร์ไบด์เกรดที่ใช้ทำแม่พิมพ์ในการทดสอบ	64

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เครื่องดึงลวดแบบดรอเบ็นซ์ (Draw Bench)	3
2	ส่วนประกอบของเครื่องดรอเบ็นซ์ (Draw Bench)	4
3	เครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียว	4
4	เครื่องดึงลวดแบบหลายขั้น	5
5	การดึงลวดผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด	5
6	ภาพตัดรูปร่างของแม่พิมพ์ดึงลวดกลม	7
7	มุมไหลเข้าที่เหมาะสมของแม่พิมพ์ดึงลวดเหล็ก	8
8	บริเวณการเปลี่ยนรูปถาวรกระบวนการดึงขึ้นรูป	9
9	ลักษณะของการบิดเบี้ยวจากแรงเฉือนรีดันแดนท์	11
10	สารรับแรงกด EP ทำหน้าที่เป็นชั้นฟิล์มรับแรง	15
11	สภาวะไร้สารหล่อลื่น	16
12	สภาวะการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี่	17
13	การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์	17
14	การหล่อลื่นแบบสมบูรณ์	18
15	การสึกหรอที่แม่พิมพ์ดึงลวด	20
16	กระบวนการเคลือบผิวด้วยไอเคมี (CVD) โดยใช้พลังงานไฟฟ้า	22
17	กระบวนการเคลือบผิวด้วยไอกายภาพ (PVD) โดยใช้พลังงานไฟฟ้า	23
18	กระบวนการการเคลือบผิวด้วยฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC)	24
19	ผลการทดลองการไหลตัวของสารหล่อลื่นสำหรับกรณีที่เงื่อนไขในการทดลองแตกต่างกัน	28
20	โมเดลค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในงานขึ้นรูปโลหะแผ่น	28
21	กลไกการสึกหรอจากการแทรกตัวของเหล็กและโคบอลท์ในทังสเตนคาร์ไบด์	29
22	ผลการสึกหรอโดยวิธี Washer-on-disc กับค่าความแข็งของฟิล์มแข็งเคลือบผิว	30
23	ผลการสึกหรอของฟิล์มแข็งเคลือบผิวโดยวิธีการหมุนขัดถู	31
24	การเกิดรอยและความแข็งของฟิล์มแข็งเคลือบผิวในการทดลอง	32
25	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและภาพถ่ายทางกายภาพของฟิล์มแข็งเคลือบผิว	32
26	เครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียวที่ใช้ในงานวิจัย	34
27	แม่พิมพ์ดึงลวดตามมาตรฐาน W 103 มุมไหลเข้า 10°	35
28	แม่พิมพ์ดึงลวดตามมาตรฐาน W 103 มุมไหลเข้า 15°	35
29	ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 Ø 2.00 มิลลิเมตร	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
30	ชุดกล้องจุลทรรศน์	38
31	เครื่องชั่งน้ำหนัก	39
32	เครื่องวัดความเรียบผิว	39
33	เครื่องทดสอบแรงดึง	40
34	ไมโครมิเตอร์แบบดิจิตอล	40
35	ชุดรองรับแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลวด (ภาคผนวก ก)	41
36	ชุดช่วยดึงแม่พิมพ์ (ภาคผนวก ก)	41
37	กล้องจุลทรรศน์ OLYMPUS รุ่น BX 60 M	42
38	เครื่องขัดโครงสร้าง Struers Dap-7	42
39	อิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อแรงในการดึงขึ้นรูปลวด	45
40	อิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความหยาบผิวลวดหลังการดึงขึ้นรูปลวด	45
41	อิทธิพลของมุมไหลเข้าแม่พิมพ์ที่มีผลต่อแรงในการดึงขึ้นรูปลวด	46
42	อิทธิพลของมุมไหลเข้าแม่พิมพ์ที่มีผลต่อความหยาบผิวลวดหลังการดึงขึ้นรูปลวด	47
43	อิทธิพลของความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่มีผลต่อแรงในการดึงขึ้นรูปลวด	47
44	อิทธิพลของความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่มีผลต่อความหยาบผิวลวดหลังการดึงขึ้นรูป	48
45	โครงสร้างระดับจุลภาคของลวดเหล็กกล้าไร้สนิม มุมไหลเข้าแม่พิมพ์ 10°	48
46	โครงสร้างระดับจุลภาคของลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่มุมไหลเข้าแม่พิมพ์ 15°	49
47	โครงสร้างระดับจุลภาคของลวดเหล็กกล้าไร้สนิม มุมไหลเข้าแม่พิมพ์ 20°	49
ค.1	ขนาดของแม่พิมพ์ดึงลวดกลม ตามมาตรฐาน JIS B4111	63
ค.2	ภาพตัดแม่พิมพ์ดึงลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00 มิลิเมตร	65

สัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	
d	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	หน่วย mm.
H	ค่าความแข็งแรงแม่พิมพ์	หน่วย kN/mm^2
k_S	ความต้านทานแรงเฉือนของวัสดุ	หน่วย N/mm^2
L	ระยะการกดลึกของพันช์	หน่วย mm.
l_S	ความยาวรอยตัด	หน่วย mm.
P	แรงกดตัดชิ้นงาน	หน่วย KN.
t	ความหนาของวัสดุ	หน่วย mm.
V	ปริมาตรการสึกหรอ	หน่วย mm^3
W	แรงตั้งฉากกับแนวแกน	หน่วย kN.
θ	มุมของการสัมผัสของพันช์	หน่วย องศา
LVDT	Linear Variable Differential Transformer	
SEM	Scanning Electron Microscope	
Abrasive wear	การขีดข่วน	
Adhesive wear	การเกาะติด	
Burr	ครีบโลหะ	
Clearance	ระยะช่องว่างระหว่างคมตัด	
Corrosion wear	การสึกหรอจากการกัดกร่อน	
Cutting Force	แรงตัดเฉือน	
Cyclic Load	การกระแทกซ้ำๆ	
Direct Equilibrium Method	วิธีสมดุลโดยตรง	
Displacement Function	ฟังก์ชันการกระจัด	
Edge Radius	ขอบโค้งมน	
Edge wear	การเกาะติดที่คมตัด	
Elastic Limits	จุดค่าความยืดหยุ่น	
Excessive Cutting Clearance	ระยะช่องว่างคมตัดมากเกินไป	
Fatique wear	การสึกหรอจากความล้า	
Fracture Surface	ลักษณะของรอยแตกหรือการฉีกขาด	
Cutting Clearance	ระยะช่องว่างคมตัด	
Optical Stereoscope	กล้องจุลทรรศน์	

สัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
Optimum Cutting Clearance	ระยะช่องว่างคมตัดเหมาะสม
Penetration	ระยะการกดลึก
Plastic Deformation	การเปลี่ยนรูปอย่างถาวร
Side Wear	การสึกหรอจะเกิดบริเวณด้านข้างของคมตัด
Strain hardening	การทำให้แข็งด้วยความเครียด
Stainless steel	เหล็กกล้าไร้สนิม
Stripper Plate	แผ่นกดชิ้นงาน
Ultimate Strength	จุดความแข็งแรงสูงสุด
Wear	การสึกหรอ
Work or Energy Method	วิธีงานหรือพลังงาน
Yield point	จุดครากของวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

บทที่ 1
บทนำ

1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว เพราะลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุที่มีความสวยงาม ทนการกัดกร่อนได้สูงและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ด้วยเหตุผลดังกล่าวในอุตสาหกรรมต่างๆ เส้นลวดโลหะจึงมีความต้องการในอุตสาหกรรมหลายประเภท เพื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่อเนื่อง เช่น อุปกรณ์ทางการแพทย์ ชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์ รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในครัวเรือนเป็นต้น จากการศึกษางานวิจัยด้านกระบวนการผลิตลวด และการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับโรงงานอุตสาหกรรมดึงลวดโลหะ ทำให้ได้ข้อสรุปที่ตรงกันในการการพัฒนากระบวนการผลิตและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อผลกำไรและการพัฒนาลวดเหล็กกล้าไร้สนิมของไทยให้มีความเที่ยงตรงสูงเป็นที่ต้องการของนานาประเทศ ในการผลิตลวดที่มีความเที่ยงตรงสูงจำเป็นต้องใช้แม่พิมพ์ดึงลวดที่มีการสึกหรอที่ต่ำ โดยการเลือกใช้วัสดุในการทำแม่พิมพ์ และกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ที่เหมาะสม ซึ่งจะส่งผลต่อความเที่ยงตรงของขนาดชิ้นงานที่ได้ นอกจากนั้นแล้ว กระบวนการในการออกแบบแม่พิมพ์ ก็มีความสำคัญและส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงานสำเร็จอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งการกำหนดปัจจัยในกระบวนการผลิต เช่น การกำหนดความเร็วในการดึงขึ้นรูป อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัด และการเลือกใช้สารหล่อลื่น ก็มีความสำคัญและส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพชิ้นงานที่ได้

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ให้เกิดผลประโยชน์กับอุตสาหกรรมการดึงลวดโลหะมากที่สุด โดยมุ่งทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรด้านกระบวนการดึงลวดโลหะ เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS 304 ที่ขั้นตอนการดึงขั้นสุดท้าย (Skin Pass) กำหนดให้ใช้ชนิดสารหล่อลื่นประเภทน้ำมัน เปรียบเทียบอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมี อัตราการไหลเข้าของแม่พิมพ์และความเร็วที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป เพื่อจะรวบรวมและเก็บข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลทั้งสามส่วน ที่ส่งผลต่อ ความเรียบผิว (Surface Roughness) แรงในการดึงลวด (Drawing Force) ความถูกต้องแม่นยำของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังการดึง (Diameter of Finished Wire) และคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานสำเร็จ เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้การหล่อลื่นที่เหมาะสมกับความต้องการด้านต่างๆ ในการผลิตลวดเหล็กกล้าไร้สนิมในอุตสาหกรรมต่อไป

2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อเพิ่มคุณภาพชิ้นงานสำเร็จ ของกระบวนการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดที่ผ่านการดึงมีคุณภาพผิวที่ดี โดยทำการ ปรับปรุงสภาวะกระบวนการด้วยการศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์ และความเร็วในการดึงขึ้นรูป

3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

3.1 ศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.2 ศึกษาการออกแบบและทำการสร้างแม่พิมพ์ตัด

3.3 ทำการทดลอง และ เก็บผลการทดลอง โดยการเปรียบเทียบแรงตัด ศึกษาลักษณะและขนาดของชิ้นงาน โดยมีการกำหนดปัจจัยดังนี้

3.3.1 ทำการทดลองดึงลวดลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 หน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดก่อนการดึง 2.00 มิลลิเมตร ลดลงเหลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังการดึง 1.80 มิลลิเมตร ทำการดึงลวดขั้นสุดท้าย (Skin Pass) มีอัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด (Reduction Ratio of Cross Sectional Area) %R = 10 %

3.3.2 สร้างแม่พิมพ์ดึงลวดหน้าตัดกลมแบบดายอินเสิร์ท รูปร่างตามมาตรฐาน W 103 (JIS B4111) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูในของแม่พิมพ์ 1.80 มิลลิเมตร มีมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ (Approach Angle, 2α) = 10°, 15° และ 20° ครึ่งมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ (Semi Angle, α) = 5°, 7.5° และ 10°) กำหนดขนาด Die Bearing = 2 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแม่พิมพ์ส่วนนอก (Die Case) 30 x 15 มิลลิเมตรและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดายอินเสิร์ท (Die Insert) 12 x 8 มิลลิเมตร ทำจากโลหะผสมคาร์ไบด์ เกรด K20 (ISO Code)

3.3.3 ทำการทดสอบการดึงโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงแบบอเนกประสงค์ โดยการกำหนดความเร็วในการดึง ไว้ที่ 3 ระดับ คือ 30, 90 และ 120 เมตรต่อนาที ตามลำดับ

3.3.4 ออกแบบการทดลองและทำการทดลองดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม บันทึกผลแรงที่ใช้ในการดึงลวด ขนาดความโตของลวด และคุณสมบัติทางกลของเส้นลวดหลังการดึง ทำการสรุปผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.4 ทำการทดลองและบันทึกผลการทดลองในส่วนที่ต้องการศึกษา

3.5 ทำการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

3.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง

3.7 สรุปผลงานวิจัย

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ทฤษฎีการดึงลวด

กระบวนการขึ้นรูปโลหะเมื่อแบ่งกลุ่มตามการวิเคราะห์การทำงานแล้วจะมีอยู่ 2 กลุ่มคือ

1. กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบเสถียร (Steady State Process)
2. กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบไม่เสถียร (Non Steady State Process)

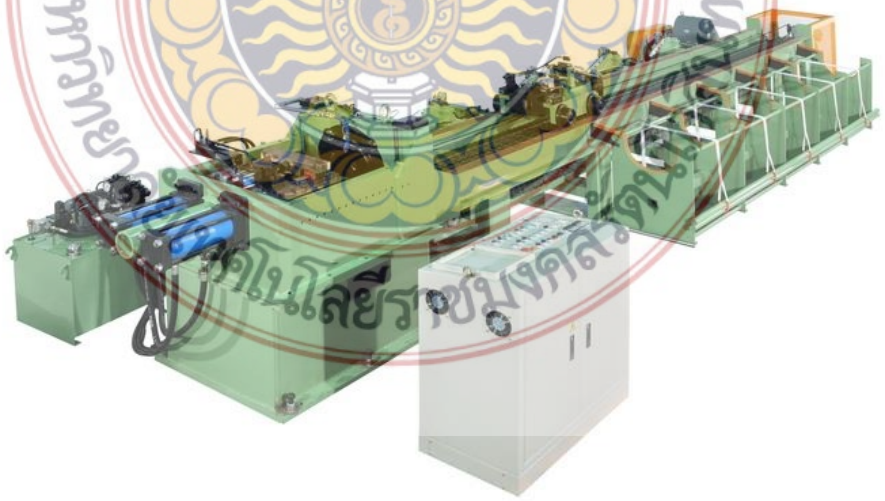
กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบเสถียร ได้แก่ กระบวนการดึงลวด กระบวนการรีด (Rolling) และกระบวนการอัดขึ้นรูป (Extrusion) ที่ขึ้นรูปยาวส่วนงานในกลุ่มกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบไม่เสถียรเป็นกระบวนการขึ้นรูปแบบไม่ต่อเนื่อง เช่น กระบวนการตัด (Blanking) กระบวนการตีขึ้นรูป (Forging) กระบวนการลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) กระบวนการดึงลวดเป็นงานในกลุ่มกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบเสถียรที่มีการขึ้นรูปชิ้นงานที่ยาวและต่อเนื่องมากที่สุด

2. เครื่องดึงลวด

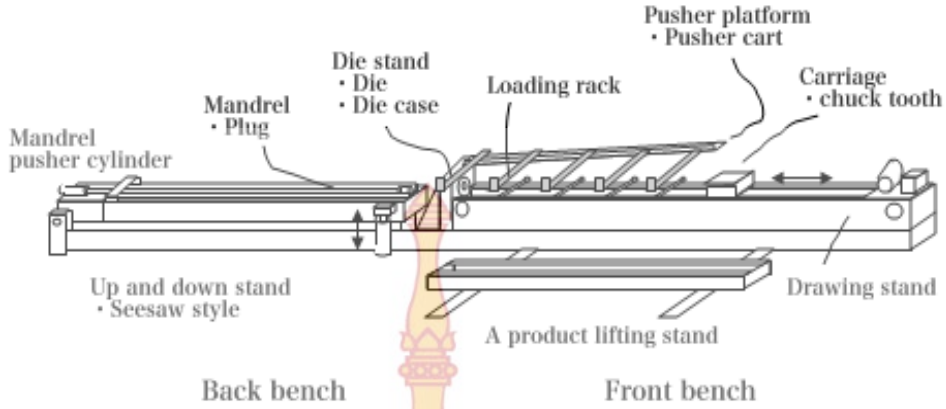
ประเภทของเครื่องดึงลวดจะแบ่งตามระบบต้นกำลังการดึงของเครื่องและระดับการลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางลวด ซึ่งประเภทของเครื่องดึงลวดสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. เครื่องดึงลวดแบบเครื่องดรอเบ็นช์ (Draw Bench)

ระบบต้นกำลังของเครื่องดรอเบ็นช์จะใช้ระบบไฮดรอลิกส์ สามารถดึงได้ทั้งการดึงลวดและการดึงท่อ ความสามารถของเครื่องจะให้อัตราส่วนการลดหน้าตัดได้สูงและเหมาะกับการดึงลวดที่มีขนาดเล็กและต้องการความเที่ยงตรงสูงดังรูป



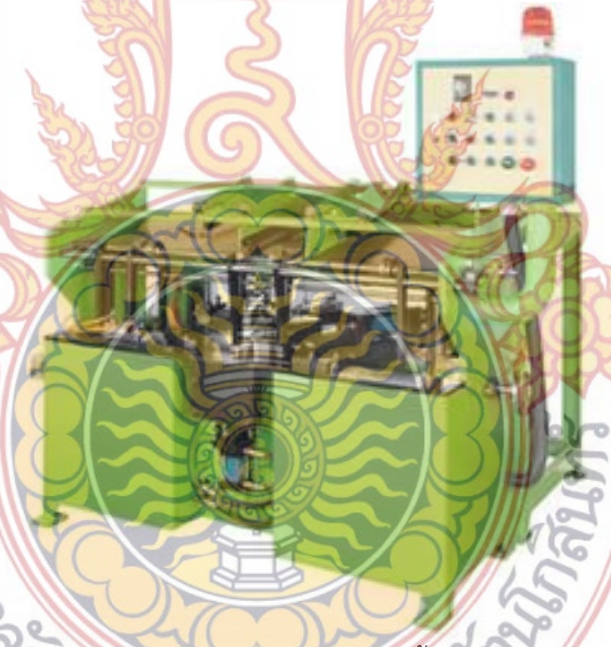
รูปที่ 1 เครื่องดึงลวดแบบดรอเบ็นช์ (Draw Bench)



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของเครื่องดรอเบ็นซ์ (Draw Bench)

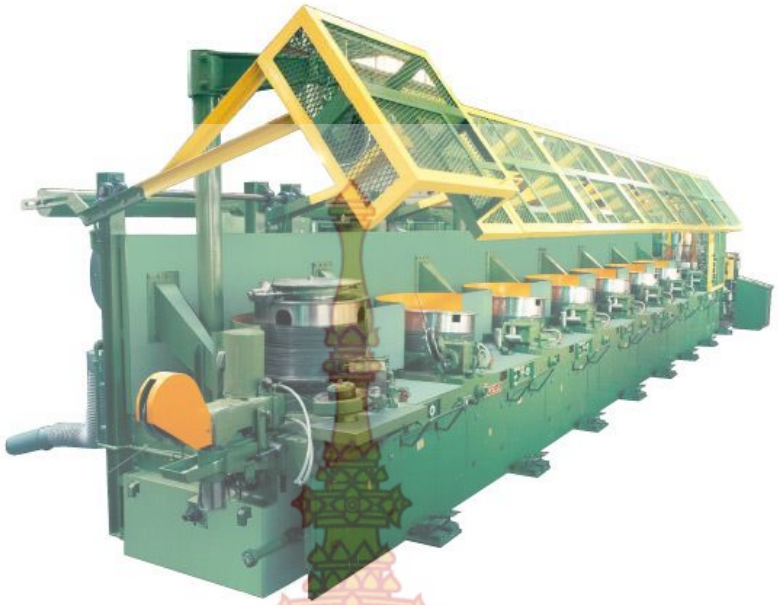
2. แบบใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลังในการดึง

ก. เครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียว (Single Stepped Wire Drawing) เครื่องดึงลวดแบบขั้นตอนเดียวดังรูป ส่วนมากจะทำการดึงลวดผ่านแม่พิมพ์ดึงลวดเพียงตัวเดียว และจะใช้อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดที่ต่ำ โดยล้อม้วนดึงเก็บจะมีมอเตอร์เป็นต้นกำลังเพียงตัวเดียว



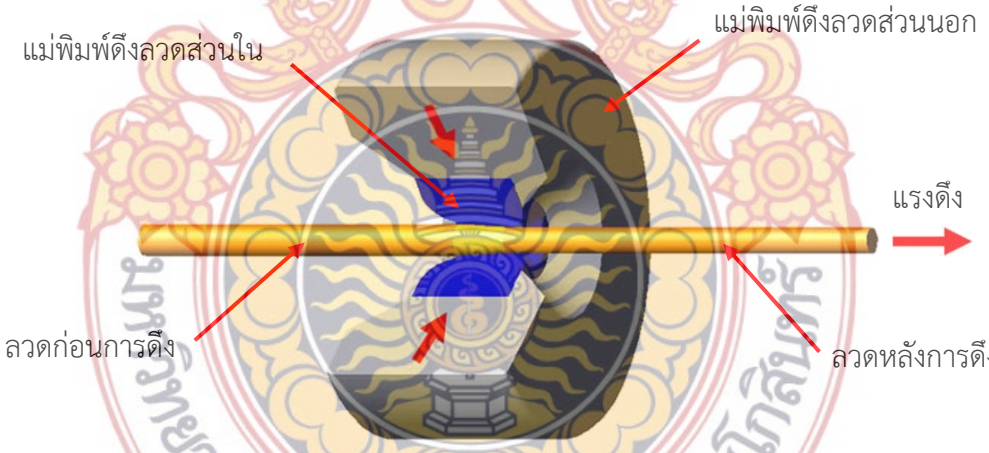
รูปที่ 3 เครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียว

ข. เครื่องดึงลวดแบบหลายขั้น (Multiple Pass Wire Drawing) การดึงลวดหลายขั้นตอนดังรูป จะมีแม่พิมพ์ดึงลวดลดขนาดหลายตัว ใช้ในกรณีที่ต้องการอัตราส่วนการลดหน้าตัดที่สูง การใช้มอเตอร์ต้นกำลังตัวเดียวจะทำให้อัตราความเร็วในการดึงคงที่เท่ากันทุกตัว หรือในกรณีที่มีมอเตอร์ต้นกำลังหลายตัวจะมีการควบคุมความเร็วในการดึงให้เท่ากันทุกตัว ในการดึงลดอัตราการพื้นที่หน้าตัดที่สูงจะเกิดความร้อนสะสมขึ้นในลวดและแม่พิมพ์ดึงลวดจึงต้องมีระบบการหล่อเย็นและสารหล่อลื่นที่ดี เพื่อป้องกันผลกระทบจากความร้อนจนอาจทำให้เกิดการสึกหรอขึ้นที่ผิวแม่พิมพ์ดึงลวดได้



รูปที่ 4 เครื่องดึงลวดแบบหลายขั้น

3. กระบวนการดึงลวด (Wire Drawing Process)



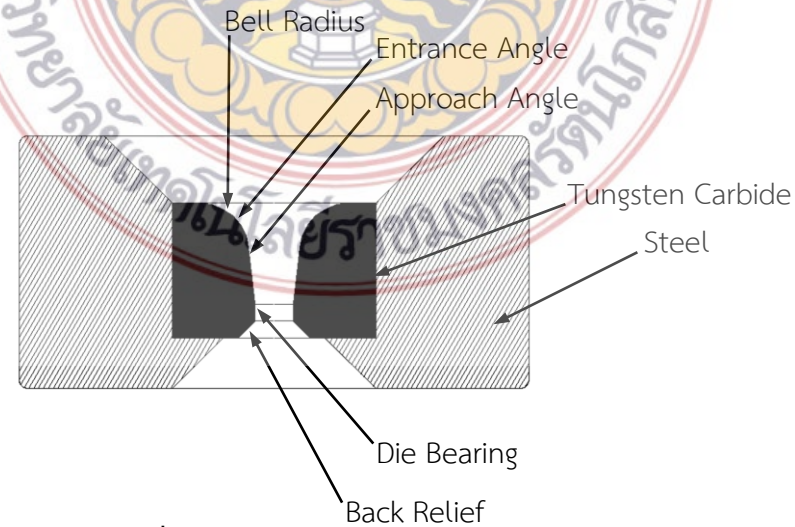
รูปที่ 5 การดึงลวดผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด

หลักการทั่วไปของการดึงลวดและดึงท่อจะมีพื้นฐานคล้ายกัน แต่จะต่างกันออกไปตรงขนาดและรูปร่างหลังการดึง กระบวนการดึงลวดเริ่มจากการนำวัสดุที่เป็นท่อนหรือลวดหลังจากผ่านการขึ้นรูปร้อนดึงลดขนาดโดยการดึงผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด ดังรูปที่ 5 ผลิตภัณฑ์จากการดึงลวดจะมีรูปร่างหลากหลายขึ้นอยู่กับรูปทรงรูในของแม่พิมพ์ดึงลวด ได้แก่ รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงกลม รูปทรงหกเหลี่ยม และรูปทรงอื่นๆที่ซับซ้อนขึ้น แต่ขีดจำกัดของรูปทรงที่สามารถขึ้นรูปได้จริงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด กรรมวิธีการดึงลวดเริ่มจากการนำลวดมาทำความสะอาดเพื่อขจัดผิวที่เกิดออกไซด์ก่อน ซึ่งหากผิวที่เกิดออกไซด์

หลุดออกจะทำให้เกิดการเสียดสีกับผิวแม่พิมพ์ดึงลวดและส่งผลให้เกิดการสึกหรอ การดึงเริ่มต้นโดยให้แรงดึงที่ปลายด้านหนึ่งของลวดด้วยชุดต้นกำลัง รูปร่างของลวดจะถูกกำหนดด้วยขนาดรูในของแม่พิมพ์ เป็นการทำงานในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุ (Plastic Deformation) ระดับของการดึงลวดเมื่อแบ่งตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด [3] จะมีตั้งแต่การดึงลวดลวดขนาดใหญ่ D_o = 4.2 ถึง 16 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดกลาง D_o = 1.6 ถึง 4.2 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดเล็ก D_o = 0.7 ถึง 1.6 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดเล็กมาก (Fine Wire) D_o น้อยกว่า 0.7 มิลลิเมตรการดึงลวดขนาดเล็กมาก (Fine Wire) สามารถดึงได้เล็กสุด 0.03 มิลลิเมตร แต่ก็ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุ (Elongation) การหล่อลื่นในกระบวนการดึงจะมีทั้งของเหลว และของแข็ง ของเหลวได้แก่ น้ำมันหล่อลื่นต่างๆ ส่วนการใช้สารหล่อลื่นแบบของแข็ง ได้แก่ กราไฟท์ (Graphite) ระบบการหล่อลื่นจะมีทั้งการหยด การพ่น แม่พิมพ์อยู่ในสารหล่อลื่น และลวดวิ่งผ่านสารหล่อลื่น การดึงลวดแบบอุ่น (Warm Drawing) [4] เป็นกรรมวิธีหนึ่งที่ช่วยในการดึงขึ้นรูปลวดที่มีความแข็งมากและดึงขึ้นรูปยาก เป็นกระบวนการดึงลวดโดยเพิ่มความร้อนให้กับวัสดุหรือแม่พิมพ์ดึงลวดจนลวดเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอยู่ที่ประมาณ 200-500 องศาเซลเซียสแต่ต่ำกว่าจุดการเกิดผลึกใหม่ของวัสดุ ทำให้ผิวภายนอกของลวดมีความแข็งลดลงแต่ภายในลวดความแข็งยังคงเดิมอยู่ ลวดที่ผ่านการดึงมาจะเกิดความเครียดแข็ง (Strain Hardening) มากขึ้นและมีความแข็งแรงล้าของวัสดุ (Fatigue Strength) สูงขึ้น งานที่ทำการการขึ้นรูปอุ่นได้แก่ ลวดสปริง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์เครื่องมือแพทย์ หรือลวดที่ต้องการเพิ่มคุณสมบัติทางกลให้สูงขึ้น ส่วนกระบวนการดึงลวดขั้นสุดท้าย (Skin Pass Wire Drawing) จะเป็นการดึงลดขนาดในช่วงสุดท้ายเพื่อได้ผลิตภัณฑ์สำเร็จที่มีความเรียบผิวดี การดึงลักษณะนี้จะมีอัตราการลดหน้าตัดของลวดต่ำกว่าหรือเท่ากับ 10%

3.1 ลักษณะแม่พิมพ์ดึงลวด

ลักษณะแม่พิมพ์ดึงลวดกลมตามมาตรฐาน JIS B4111 [5] จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ดายอินเสิร์ท (Die Insert) และแม่พิมพ์ส่วนนอก (Steel Case) ดังรูปที่ 6 จะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 6 ภาพตัดรูปร่างของแม่พิมพ์ดึงลวดกลม [3]

1. ดายอินเสิร์ท คือแม่พิมพ์ส่วนในที่ถูกอัดเข้าไปในแม่พิมพ์ส่วนนอก โดยทั่วไปจะทำมาจากโลหะผสมคาร์ไบด์หรือทำจากเพชร (Diamond Die) ในกรณีการดึงลวดที่มีความละเอียดมาก ซึ่งดายอินเสิร์ทจะมีส่วนประกอบต่างๆดังนี้

ก. รัศมีโค้งที่ปากดาย (Bell Radius) เป็นส่วนที่ลวดเริ่มเข้าสู่แม่พิมพ์มีลักษณะคล้ายระฆัง ช่วยให้ลวดลื่นไถลเข้าสู่การลดหน้าตัดได้ดีขึ้น ลักษณะรัศมีโค้งที่ปากดายยังช่วยให้เกิดแรงอัดจากของเหลว (Hydrostatic Pressure) ส่งผลช่วยให้สารหล่อลื่นไหลเข้าสู่แม่พิมพ์เพื่อการหล่อลื่นได้ดีขึ้น

ข. มุมปากทางเข้า (Entrance Angle) เป็นส่วนทางเข้าที่ลวดถูกควบคุมโดยผนังด้านข้างลื่นไถลเข้าสู่การลดหน้าตัดพร้อมกับมีสารหล่อลื่นเป็นฟิล์มเคลือบที่ผิวของลวด

ค. ครึ่งมุมไหลเข้า α (Approach Angle) เป็นส่วนแรกที่ดายเริ่มทำการลดหน้าตัดลง เป็นมุมที่มีอิทธิพลต่อการไหลของเนื้อโลหะ มุมนี้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากในการกำหนดแรงในการดึงลวด

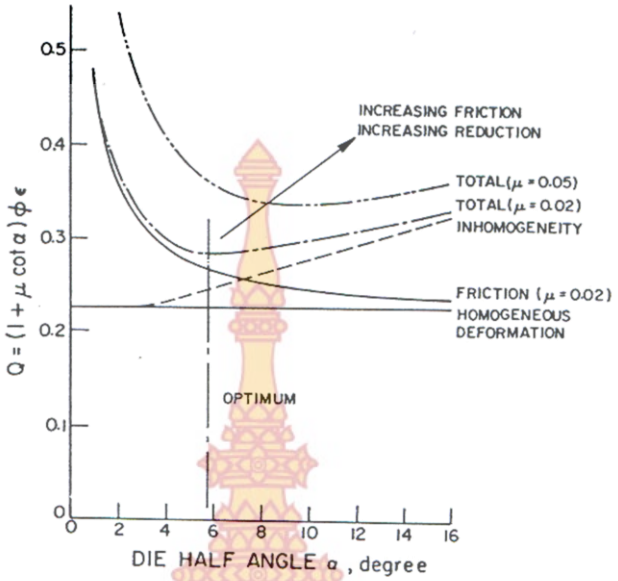
ง. ส่วนลดขนาด (Die Bearing) เป็นส่วนที่ลดขนาดของลวดให้มีขนาดเท่ากับขนาดต้องการของลวดสำเร็จ เป็นส่วนที่มีความเสียดทานมากและการสึกหรอที่ส่วนนี้จะส่งผลต่อรูปทรงและผิวสำเร็จของลวดหลังการดึง

จ. ส่วนทางออก (Back Relief) เป็นส่วนช่วยให้ลวดลื่นไถลออกจากแม่พิมพ์ดึงลวด และจะช่วยทำให้ลวดรักษาความเป็นเส้นตรง

2. แม่พิมพ์ส่วนนอก เป็นส่วนประกอบที่ใหญ่กว่าเพื่อประโยชน์ในการรับแรงที่มาก และง่ายในการซ่อมบำรุงเมื่อเกิดการสึกหรอ

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเสียดทานในกระบวนการดึงลวด

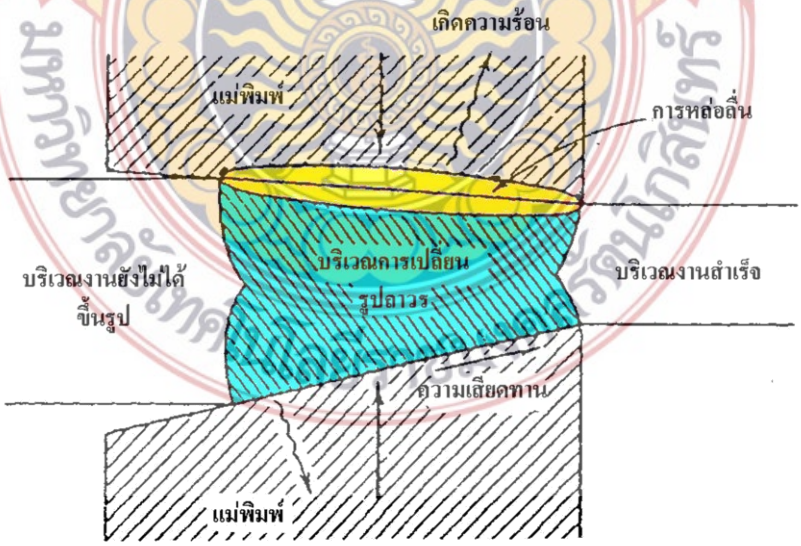
ความเสียดทานในกระบวนการดึงลวดเป็นความเสียดทานแบบลื่นไถล (Sliding Friction) จะเกิดขึ้นบริเวณที่สัมผัสกันระหว่างลวดและแม่พิมพ์ ความเสียดทานในกระบวนการดึงลวดจะขึ้นอยู่กับมุมไหลเข้า (α) เป็นสำคัญ เมื่อมุมไหลเข้ามีขนาดที่เล็กกว่ามุมเหมาะสมก็จะมีพื้นที่สัมผัสมากเป็นผลให้ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสมากตาม ส่งผลให้ใช้แรงในการดึงขึ้นรูปที่สูงขึ้น แต่เมื่อมุมไหลเข้ามีขนาดกว้างกว่ามุมที่เหมาะสมจะทำให้พื้นผิวสัมผัสน้อยความเสียดทานน้อยแต่การไหลตัวเกิดขึ้นได้ยากจนส่งผลให้วัสดุเกิดการติด (Dead Zone) และในกรณีที่มุมไหลเข้ากว้างมากจะเกิดการปอกของผิว (Shaving) ดังนั้นจึงจะมีมุมเหมาะสมที่ทำให้เกิดความเสียดทานน้อยที่สุดระหว่างลวดและแม่พิมพ์ดึงลวด ดังรูปที่ 7 นอกจากนี้ความเสียดทานยังขึ้นอยู่กับความเรียบผิวของแม่พิมพ์ด้วยแม่พิมพ์ที่มีความหยาบมากจะส่งผลให้เกิดความเสียดทานที่สูงเช่นกัน



รูปที่ 7 มุมไหลเข้าที่เหมาะสมของแม่พิมพ์ดึงลวดเหล็ก [6]

4.1 แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด

การวิเคราะห์แรงในการดึงขึ้นรูปลวดโลหะจำเป็นต้องทราบพฤติกรรมต่างๆของเนื้อโลหะและองค์ประกอบอื่นๆในบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation) ได้แก่ ผลกระทบจากความเสียดทานระหว่างผิวลวดกับแม่พิมพ์ดึงลวด การหล่อลื่น อุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อน การกระจายความเค้นและความเครียด ความเร็วของการเปลี่ยนรูป ความซับซ้อนของรูปร่างการดึงลวด และแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 บริเวณการเปลี่ยนรูปถาวรกระบวนการดึงขึ้นรูป [7]

แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปจะต้องเท่ากับหรือสูงกว่าความเค้นคราก (Yield Strength) ของวัสดุแต่ต้องไม่มากจนเกินจุดแตกหักของวัสดุ โดยทั่วไปความสัมพันธ์ของแรงและการเปลี่ยนรูปของโลหะจะซับซ้อนมาก แต่ในการวิเคราะห์จะสมมุติให้บริเวณมีการเปลี่ยนรูปถาวรมีคุณสมบัติทางกลเหมือนกันทุกทิศทุกทาง การคำนวณในกระบวนการดึงลวดมีดังต่อไปนี้

4.2 อัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวด (%R)

$$\%R = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \quad \text{หรือ} \quad \%R = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\ (\%) \qquad (1)$$

เมื่อ A_0 = พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง [mm^2]

A_1 = พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง [mm^2]

4.3 แรงดึงขึ้นรูปลวด ($F_{D,tot}$)

แรงดึงขึ้นรูปลวดจะพิจารณาจากผลรวมของแรงในสามส่วน ซึ่งประกอบด้วยแรงในการขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Ideal Deformation Force) แรงเสียดทาน (Friction Force) และแรงเฉือนหรือแรงเฉือนรีดันแดนท์ (Redundant Shearing) สมการของแรงดึงขึ้นรูปสามารถคำนวณได้ด้วย Siebel's Method [3]

$$F_{D,tot} = F_{id,D} + F_{FR,S} + F_{sh} \qquad (2)$$

เมื่อ

$F_{D,tot}$ = แรงดึงขึ้นรูปของกรรมวิธีดึงลวด

$F_{id,D}$ = แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน

$F_{FR,S}$ = แรงเสียดทานบนช่วงมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ดึงลวด

F_{sh} = แรงเฉือนรีดันแดนท์

1. แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน

$$F_{id,D} = A_1 \cdot \sigma_{f,m} \cdot \varphi_{max} \qquad (3)$$

เมื่อ

$\sigma_{f,m}$ = ความเค้นขึ้นรูปเฉลี่ย (Flow Stress) [N/mm^2]

φ_{max} = ความเครียด (True Strain)

โดยที่ $\sigma_{f,m} = \frac{\sigma_{m,n-1} + \sigma_{m,n}}{2}$ (4)

เมื่อ

$\sigma_{m,n-1}$ = ความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุก่อนการดึง [N/mm^2]

$\sigma_{m,n}$ = ความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังดึง [N/mm^2]

โดยที่ $\varphi_{max} = \ln \frac{A_0}{A_1}$ (5)

2. แรงเสียดทานบนช่วงมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ดึงลวด

$$F_{FR,S} = \frac{2\sigma_{f,m}\varphi_{max}\mu A_1}{\sin 2\alpha} \quad (6)$$

เมื่อ

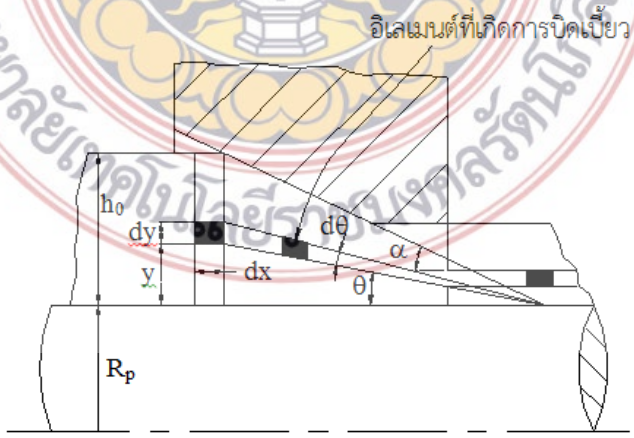
$F_{FR,S}$ = แรงเสียดทานบนช่วงมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ดึงลวด

μ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

α = ครึ่งมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ดึงลวด [องศา]

3. แรงเฉือนรีดันแดนท์

เมื่อทำการวิเคราะห์ที่เอลิเมนต์หนึ่งของลวดโดยกำหนดให้เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ในขณะถูกดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ดึงลวดดังรูปที่ 9 จะเกิดความเค้นเฉือน (Shearing Stress) ที่สูงจากการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดของลวดที่ลดลงจึงทำให้เอลิเมนต์เกิดการบิดเบี้ยว (Distortion) เป็นมุมเฉือน = θ การบิดเบี้ยวของเอลิเมนต์นั้นจะเกิดขึ้นเป็นสัดส่วนกับมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ดึงลวด เอลิเมนต์ที่เกิดการบิดเบี้ยวไปนั้นในการดึงต่อจะต้องมีแรงที่มากขึ้นเพื่อทำให้เอลิเมนต์ที่บิดเบี้ยวถูกดึงผ่านแม่พิมพ์ และจะกลับเป็นรูปทรงเดิมที่บริเวณทางออกบริเวณเอลิเมนต์จึงเกิดความเค้นเฉือนในปริมาณที่สูง เรียกว่าแรงเฉือนรีดันแดนท์ แรงเฉือนรีดันแดนท์ประกอบด้วยแรงสองส่วน คือ แรงแม็คโครเชียริ่ง (Macro-Shearing) ที่อยู่บริเวณทางเข้าของแม่พิมพ์ดึงลวด และแรงอันเชียริ่ง (Unshearing) ซึ่งอยู่บริเวณทางออกของแม่พิมพ์ดึงลวด ปริมาณอันเชียริ่งจะมีค่าเท่ากันกับแม็คโคเชียริ่ง



รูปที่ 9 ลักษณะของการบิดเบี้ยวจากแรงเฉือนรีดันแดนท์ [8]

การเกิดแม็คโครเชียริ่งในปริมาณที่สูงจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดโซนเนื้อวัสดุไม่ไหลตัว (Dead-Metal Zone) เกิดการติดของเนื้อวัสดุซึ่งคล้ายกับกรรมวิธีอื่นๆ เช่น การดึงขึ้นรูปท่อ (Tube Drawing) และการเกิดคลื่นในการลดความหนาผนังบาง (Ironing Wave) เป็นผลจากการเกิดแม็คโครเชียริ่งที่บริเวณทางเข้าของแม่พิมพ์ทำให้เกิดการติดของเนื้อวัสดุจึงใช้แรงเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นตัวแปรที่ส่งผลต่อแรงเฉือนรีดันแดนท์คือขนาดของมุมไหลเข้าและอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด

แรงเฉือนรีดันแดนท์สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F_{sh} = \frac{2}{3} A_0 \sigma_{f,m} . \alpha \qquad (7)$$

เมื่อ

F_{sh} = แรงเฉือนรีดันแดนท์

$\hat{\alpha}$ = $\tan \alpha$

ดังนั้น แรงในการดึงลวดจึงประกอบด้วยแรงในสามส่วน คือ แรงในการขึ้นรูปวัสดุ (2.3) แรงเสียดทาน (2.6) และแรงเฉือนรีดันแดนท์ (2.7) ซึ่งใช้คำนวณโดยสมการ Siebel's Method

$$F_{D,tot} = A_1 \times \sigma_{f,m} \times \left[\left(1 + \frac{2\mu}{\sin 2\alpha} \right) \varphi_{max} + \frac{2}{3} \alpha \right] \qquad (8)$$

4. อุณหภูมิที่เกิดในการดึงลวด

$$\Delta T = \sigma_{fm} \cdot \ln \frac{A_0}{A_1} \left(\frac{1}{cp} \right) \qquad (9)$$

เมื่อ

ΔT = อุณหภูมิที่เกิดในการดึงลวด [องศาเซลเซียส]

$\sigma_{f,m}$ = ความเค้นขึ้นรูปเฉลี่ย [N/mm^2]

c = ค่าการนำความร้อนของวัสดุ [J/kg]

ρ = ความหนาแน่นของวัสดุ [kg/m^3]

5. ทฤษฎีที่เกี่ยวกับไตรบอโลยี

5.1 สารหล่อลื่น [9]

สารหล่อลื่นแบ่งตามสถานะจะแบ่งออกได้เป็นสี่สถานะ คือ ก๊าซ ของเหลว สารกึ่งแข็ง (Semi - Solid) และของแข็ง สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กันมากที่สุดเพราะความสามารถในการหล่อลื่นและการสร้างชั้นฟิล์มเพื่อแยกผิวสัมผัสออกจากกัน ของเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นได้แก่ น้ำ สารละลายกับน้ำ (Aqueous Solution) น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ น้ำมันแร่ (Mineral Oil) และน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Oil) ในการวิเคราะห์ประโยชน์ของน้ำมันนั้นจำเป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติของสารหล่อลื่นและสัดส่วนของสารเพิ่มคุณภาพ

1. คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นมีอยู่หลายประการ ดังนั้นในการเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นจึงจำเป็นที่ต้องรู้ถึงคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นและในการผลิตก็จะต้องมีการควบคุมคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นให้ได้ตามต้องการ สำหรับคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นทั้งทางด้านฟิสิกส์และเคมีที่สำคัญ มีดังต่อไปนี้

- ความหนืด (Viscosity)

เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดฟิล์มของน้ำมันระหว่างผิวสัมผัสและมีผลต่อการลดความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสด้วย ความหนืดน้ำมันเป็นคุณสมบัติของของไหลซึ่งวัดในรูปของความต้านทานการไหล ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะไม่คงที่แต่จะแปรผันตามสภาวะการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะแปรผันกับอุณหภูมิและความดันในการใช้งาน ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากความหนืดจะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของเหลวจะขยายตัวโมเลกุลของน้ำมันจะเคลื่อนออกห่างกันทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลง และเป็นผลให้ความหนืดลดลงด้วย หน่วยวัดความหนืดระบบสากล (เมตริก) มีหน่วยความหนืดเป็นเซนติสโตก (Centistoke; cSt) โดยที่ 1 cSt = 1 mm^2/s ที่อุณหภูมิการวัด 40 และ100 องศาเซลเซียส

- ดัชนีความหนืด (Viscosity Index)

น้ำมันหล่อลื่นต่างชนิดกันจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดเนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จึงมีการกำหนดค่าดัชนีความหนืดขึ้น เพื่อใช้ในการแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง น้ำมันหล่อลื่นที่ความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิมากจะมีดัชนีความหนืดที่ต่ำ แต่น้ำมันที่ความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิน้อยจะมีดัชนีความหนืดที่สูง

- ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (Density and Gravity)

ความหนาแน่น หมายถึง มวลของสสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิมาตรฐานกำหนด ส่วนความถ่วงจำเพาะ(ความหนาแน่นสัมพัทธ์) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของน้ำมันและความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่าความถ่วงจำเพาะนี้จะเป็นตัวช่วยในการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่นโดยเฉพาะน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้แล้ว ซึ่งถ้ามีค่าความถ่วงจำเพาะลดลงก็อาจแสดงว่ามีน้ำมันเชื้อเพลิงเข้ามาผสมกับน้ำมันหล่อลื่น และถ้ามีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นก็แสดงว่ามีสิ่งแปลกปลอม เช่น เขม่าหรือสารที่เกิดจากการรวมตัวกับออกซิเจนผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่น

- จุดวาบไฟและจุดติดไฟ (Flash and Fire Points)

จุดวาบไฟ หมายถึง อุณหภูมิที่น้ำมันระเหยกลายเป็นไอและสามารถลุกไหม้ได้เมื่อโดนเปลวไฟ แต่ที่อุณหภูมินี้การระเหยกลายเป็นไอจะไม่เพียงพอที่จะทำให้การลุกไหม้คงอยู่จึงมีลักษณะเป็นเปลวไฟ และ

ดับลงเองทันทีเรียกว่า จุดวาบไฟ แต่หากมีการให้ความร้อนแก่น้ำมันต่อไปอุณหภูมิจะสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่การระเหยกลายเป็นไอเพียงพอที่จะเกิดลุกไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง อุณหภูมินี้เรียกว่า จุดติดไฟ จุดวาบไฟของน้ำมันหล่อลื่นจะแปรผันกับความหนืด โดยน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดสูงจะมีจุดวาบไฟสูงด้วย

- จุดไหลเท (Pour Point)

จุดไหลเท หมายถึง อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันหล่อลื่นจะเริ่มไหลภายใต้สภาวะที่กำหนด ซึ่งน้ำมันทั่วไปจะมีไขส่วนหนึ่งละลายอยู่ด้วย เมื่อน้ำมันเย็นไขจะตกผลึกและเกาะกันเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง เมื่อผลึกของไขเกิดขึ้นมากน้ำมันก็ไม่สามารถไหลตัวได้ ความสำคัญของจุดไหลเทจะขึ้นอยู่กับสภาวะการใช้งาน

- ตัวเลขความเป็นกลาง (Neutralization Number)

น้ำมันหล่อลื่นทั่วไปจะมีสภาพความเป็นกรดอยู่เล็กน้อย ซึ่งสภาพความเป็นกรดนี้จะวัดเป็นปริมาณของเบสมาตรฐานที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำมันมีสภาพเป็นกลาง สภาพความเป็นกรดนี้อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะได้ จึงนิยมเติมสารเพิ่มคุณภาพที่เป็นด่างเข้าไปเพื่อให้สารที่เป็นกรดมีสภาพเป็นกลาง เมื่อนำน้ำมันหล่อลื่นไปใช้งานการตรวจสอบอัตราการสิ้นเปลืองสารที่เป็นด่างก็จะเป็นตัวชี้ถึงอายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่น

- สี (Color)

สีของน้ำมันหล่อลื่นที่เห็นเมื่อมีแสงผ่านนั้นจะมีสีที่ต่างกัน ความแตกต่างกันของสีของน้ำมันหล่อลื่นเป็นผลมาจากชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นแตกต่างกันทั้งวิธีการกลั่นกรรมวิธีการผลิต และชนิดของสารเพิ่มคุณภาพ ดังนั้นสีของน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จจึงไม่มีความสำคัญนักในด้านการใช้งาน ยกเว้นกรณีที่เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา

2. สารเพิ่มคุณภาพ

โดยทั่วไปน้ำมันสังเคราะห์จะมีคุณสมบัติดีกว่าน้ำมันแร่ แต่สำหรับการใช้งานบางประเภทต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันสังเคราะห์ก่อน โดยการใส่สารเพิ่มคุณภาพเข้าไปในสัดส่วนที่เหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละประเภท

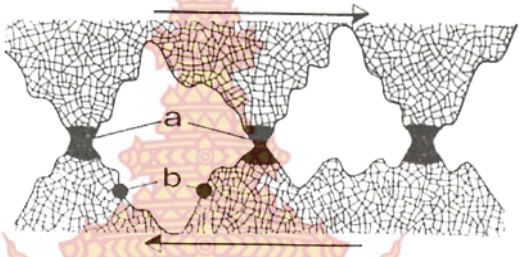
- สารป้องกันการสึกหรอ (Anti Wear Additives)

เป็นสารที่ช่วยลดความเสียดทานและการสึกหรอภายใต้การหล่อลื่นแบบสภาวะ การหล่อลื่นแบบเบาน์ดารี (boundary lubrication) คือสภาวะที่ฟิล์มน้ำมันไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้ และมีผิวสัมผัสบางส่วนเกิดการสัมผัสกันโดยตรง สารป้องกันการสึกหรอจะถูกแบ่งออกเป็นสองประเภท ประเภทแรกเป็นสารที่ใช้ลดความเสียดทานและการสึกหรอสำหรับสภาวะการทำงานที่เบา สารนี้บางครั้งเรียกว่า สารเพิ่มคุณภาพสำหรับการหล่อลื่นแบบเบาน์ดารี ได้แก่ กรดไขมัน (fatty acids) และน้ำมันไขมัน(fatty oils)

ประเภทที่สองเป็นสารลดความเสียดทานและลดการสึกหรอภายใต้สภาวะความดันสูงมาก เรียกว่า สารรับแรงกด

- **สารรับแรงกด (Extreme Pressure (EP) Additive)**

ผิวสัมผัสสองผิวที่มีสารหล่อลื่นอยู่ เมื่อรับแรงกดจะเกิดแรงกดและแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสของสารหล่อลื่น สารรับแรงกดจะเป็นตัวช่วยในการเพิ่มคุณภาพการรับแรงกด โดยจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับผิวโลหะทำให้เกิดชั้นฟิล์มเคลือบที่ผิวโลหะป้องกันการสัมผัสโดยตรง ดังรูปที่ 10 สารรับแรงกดทั่วไปจะเป็นสารประกอบของซัลเฟอร์ คลอรีน หรือฟอสฟอรัส ตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัวรวมกัน



รูปที่ 10 สารรับแรงกด EP ทำหน้าที่เป็นชั้นฟิล์มรับแรง a. สารรับแรงกด (EP) b. เนื้อโลหะ [10]

- **สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (Viscosity Index Improvers)**

สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืดมีหน้าที่ช่วยไม่ให้ความหนืดของน้ำมันเปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อเกิดอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืดจะทำหน้าที่ได้ดีที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโมเลกุลน้ำมันจะยืดออกและทำปฏิกิริยากันระหว่างโมเลกุลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น

- **สารป้องกันการเกิดฟอง (Defoamants)**

สารป้องกันการเกิดฟองทำหน้าที่ป้องกันการเกิดฟองอากาศที่ผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่น เมื่อน้ำมันถูกหมุนเวียนใช้ในระบบ สารนี้จะทำให้โมเลกุลของสารเข้าไปติดกับฟองอากาศ ทำให้ฟองอากาศเล็กๆเกิดการรวมตัวกันเป็นฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้นลอยขึ้นสู่ผิวและแตกออกในที่สุด

- **สารป้องกันออกซิเดชัน (Oxidation Inhibitors)**

เมื่อน้ำมันหล่อลื่นเกิดความร้อนและสัมผัสกับอากาศโดยตรง จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันหล่อลื่นและออกซิเจนที่เรียกว่าออกซิเดชันขึ้น ผลของการเกิดออกซิเดชันนั้นจะทำให้ค่าความหนืดและความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดตะกอน การใส่สารป้องกันออกซิเดชันจึงทำหน้าที่ป้องกันการเกิดออกซิเดชันให้น้อยลง

- **สารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion Inhibitors)**

ในระบบหล่อลื่นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นโดยน้ำมันหล่อลื่นนั้นมีหลายชนิดแต่ที่สำคัญที่สุดมีสองชนิด ก็คือการกัดกร่อนซึ่งเกิดจากกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในตัวของน้ำมันเอง และการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากสารปนเปื้อนที่ถูกนำและพาไปโดยน้ำมัน

- **สารลดจุดไหลเท (Pour Point Depressants)**

เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการยับยั้งการเกิดไขให้เกิดที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นสารนี้จึงช่วยให้จุดไหลเทของน้ำมันหล่อลื่นต่ำลง ทำให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้มากขึ้น น้ำมันหล่อลื่นเมื่อเติมสารลดจุดไหลเทจะทำให้น้ำมันเกิดไขที่อุณหภูมิต่ำลงประมาณ 11 ถึง 17 องศาเซลเซียส

- **สารชะล้างและกระจายสิ่งสกปรก (Detergents and Dispersants)**

ใช้เพื่อชะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวชิ้นงานและกระจายไม่ให้รวมตัวกันเป็นโคลนหรือตะกอน ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้สำหรับเครื่องยนต์เผาไหม้ เพื่อไม่ให้โคลนหรือตะกอนที่เกิดขึ้นจะอุดช่องทางน้ำมันหล่อลื่น

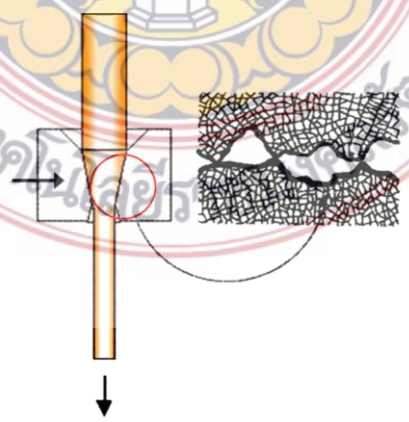
- **สารป้องกันสนิม (Rust Inhibitor)**

โดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบที่มีการยึดติดกับผิวของโลหะได้ดี เกิดเป็นชั้นฟิล์มเกาะติดกับผิวเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำหรือความชื้นทำปฏิกิริยากับผิวโลหะ

3. ขอบเขตของการหล่อลื่น [10]

- **สภาวะไร้สารหล่อลื่น (Non Lubrication)**

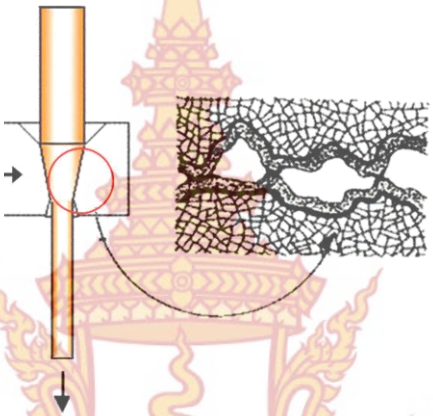
สภาวะไร้สารหล่อลื่นผิวสัมผัสทั้งคู่จะสัมผัสกันโดยตรง และมีผลทำให้เกิดสึกหรออย่างรุนแรงบนผิวหน้าสัมผัส และเกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 สภาวะไร้สารหล่อลื่น [10]

- **สภาวะการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี่ (Boundary Lubrication)**

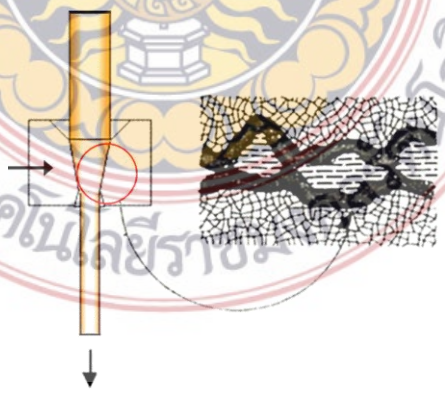
สภาวะการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี่เป็นสภาวะที่ฟิล์มน้ำมันไม่สามารถรักษาสภาพให้คงตัวอยู่ได้และบางส่วนเกิดการสัมผัสกันโดยตรง จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการดูดกลืนอะตอมทำให้เกิดชั้นฟิล์มขึ้นมาปกคลุมพื้นที่โดยส่วนใหญ่ ดังนั้นระหว่างการลื่นไถลผิวเหล่านี้จะถูกขัดถูแทนเนื้อวัสดุ เนื่องจากค่าความต้านทานต่อการเฉือนตัวที่ต่ำกว่าเนื้อวัสดุคู่สัมผัส และจะเกิดผิวชั้นใหม่ขึ้นมาทดแทนผิวหน้าเดิมไปเป็นระยะๆ ดังนั้นผิวหน้าเหล่านี้จึงทำหน้าที่ปกป้องเนื้อวัสดุคู่สัมผัสจากการสึกหรอได้ หรือในกรณีที่สารหล่อลื่นไม่เพียงพอจะเกิดผิวชั้นฟิล์มเหล่านี้ขึ้นมาใหม่ได้ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 สภาวะการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี่ [10]

- **การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์ (Mixed Film Lubrication)**

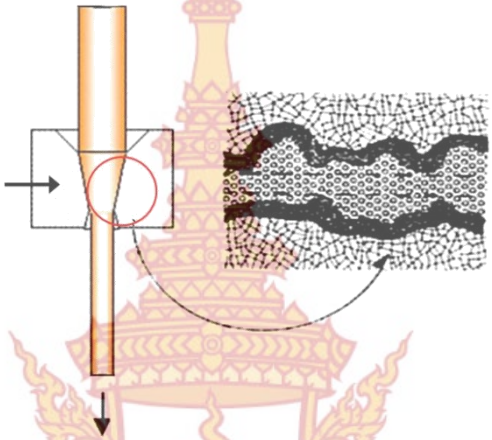
ภายใต้การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์จะมีฟิล์มน้ำมันแยกเนื้อวัสดุออกเพียงบางส่วนและมีบางส่วนที่เนื้อวัสดุจะสัมผัสโดยตรง กระบวนการทางเคมีหรือทางกายภาพจะทำให้เกิดชั้นฟิล์มใหม่ที่ผิวสัมผัสมีความแข็งแรงต่อการเฉือนตัวต่ำ เมื่อมีแรงกระทำในแนวตั้งฉากบางส่วนจะถูกรองรับโดยฟิล์มน้ำมันและบางส่วนโดยผิวเนื้อวัสดุ ซึ่งสภาวะการหล่อลื่นแบบนี้จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการสึกหรอต่ำ



รูปที่ 13 การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์ [10]

- การหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ (Full Fluid Film Lubrication)

เป็นสภาวะการหล่อลื่นที่สารหล่อลื่นเกิดชั้นฟิล์มน้ำมันหนาพอที่แยกผิววัสดุทั้งสองออกจากกันในขณะที่มีการเคลื่อนที่ บางครั้งเรียกว่าการสึกหรอเป็นศูนย์ ภายใต้สภาวะการหล่อลื่นแบบนี้แรงกระทำจะถูกรองรับด้วยสารหล่อลื่นโดยตรงผิวออกจากกันสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นทั้งหมดจึงมีเฉพาะสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่นเท่านั้น การหล่อลื่นแบบสมบูรณ์จะเกิดขึ้นโดยการใช้การปั๊มอัดสารหล่อลื่นเข้าไป



รูปที่ 14 การหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ [10]

5.2 การสึกหรอ

5.2.1 กลไกการสึกหรอ [11]

การสึกหรอเป็นความเสียหายที่เกิดจากการขัดสีของพื้นผิวคู่สัมผัส หรือเนื่องจากผิววัสดุเกิดการหลุดจากการถูกแรงกระทำขณะเคลื่อนที่สัมผัสกับอีกผิวหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการสูญเสียเนื้อบริเวณผิวสัมผัสนั้น พฤติกรรมการสึกหรอมีความซับซ้อนเนื่องจากมีหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้อง การสึกหรอเกิดได้หลายรูปแบบ เช่น การสึกหรอจากการไถลระหว่างผิว การขัดถูของผิวสัมผัส การชนของอนุภาคขนาดเล็ก หรือการชนของของเหลวกับพื้นผิว และนอกจากนั้นการสึกหรอจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางด้านโครงสร้างจุลภาคของผิว ชนิดของวัสดุ ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุ ลักษณะของแรง ปฏิกิริยาทางเคมี และอุณหภูมิ การสึกหรอที่พบมักจะมีความซับซ้อนและมีหลายกลไกเกิดพร้อมกัน ดังนั้นการทำการทดลองหรือวิเคราะห์กลไกการสึกหรอเพื่อหาวิธีป้องกันและแก้ไขจึงต้องเข้าใจรูปแบบกลไกการสึกหรอและตัวแปรที่เกี่ยวข้อง กลไกการสึกหรอแบ่งเป็น 4 กลไก คือ การสึกหรอแบบการเชื่อมติด (Adhesive Wear) การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) การสึกหรอแบบการกัดกร่อน (Erosive Wear) และการสึกหรอแบบความล้าผิว (Surface Fatigue Wear)

- การสึกหรอแบบการยึดติด (Adhesive Wear)

ลักษณะความเสียหายจากการเชื่อมติดจะเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของผิวสัมผัส และมีแรงกระทำที่มากพอจนยอดผิวสัมผัสทั้งสองมีความเค้นสูงมากทำให้วัสดุที่อ่อนกว่าเสียรูปและเกิดการเชื่อมเย็น ในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ต่อไปจุดที่ติดกันจะเกิดการฉีกขาดหลุดออก การสึกหรอแบบนี้จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของคู่วัสดุที่สัมผัสกัน และพื้นที่ที่สัมผัสของโลหะ ในกรณีที่เป็นโลหะต่างชนิดกัน ผิวของโลหะที่อ่อนกว่าจะหลุดไปติดอยู่ที่ผิวแข็งกว่าจนผิวทั้งสองไม่มีความแตกต่างกัน การเชื่อมติดของผิวเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งและมีการยึดติดสะสมเป็นชั้น การหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพสามารถกั้นการสัมผัสของผิวโลหะก็จะเกิดการสึกหรอแบบนี้ได้น้อย

- การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear)

ลักษณะความเสียหายเกี่ยวข้องกับการตัดหรือเฉือนของผิววัสดุ โดยการขูดของอนุภาควัสดุที่แข็งกว่าหรือมีขอบคมจนทำให้วัสดุที่อ่อนกว่าเกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุ หรืออาจเกิดจากชิ้นงานที่หลุดออกผ่านการขัดสีจนอนุภาคแข็งขึ้นจากกลไกของความเครียดแข็ง (Strain Hardening) หรืออนุภาคแข็งที่ติดมากับสารหล่อลื่นที่มีสิ่งเจือปนขูดบนผิวสัมผัส วัสดุที่มีความแข็งสูงจะมีโอกาสเกิดการสึกหรอแบบนี้ได้น้อย

- การสึกหรอแบบการกัดกร่อน (Corrosion Wear)

การสึกหรอแบบการกัดกร่อนส่วนมากจะเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างผิวของแข็งและของไหล (Tribo-Chemical Reaction) ผิวของวัสดุทั้งชิ้นงานและแม่พิมพ์มักจะมีชั้นบางๆของออกไซด์ปกคลุมผิว ซึ่งถ้าความหนาหรือแรงยึดเกาะไม่สูงพอ มีโอกาสที่จะแตกออกหรือถูกเสียดสีทำให้การสึกหรอที่กำลังจะเกิดขึ้นมีความรุนแรง นอกจากนี้ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีแบบไม่มีสารหล่อลื่นจะเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการสร้างฟิล์มออกไซด์บางๆขึ้นอีกบนผิวซึ่งจะแตกออกเมื่อเกิดการเสียดสีขึ้น ดังนั้นการสูญเสียเนื้อวัสดุอาจมีสาเหตุมาจากกระบวนการทางเคมีและทางกลพร้อมกัน

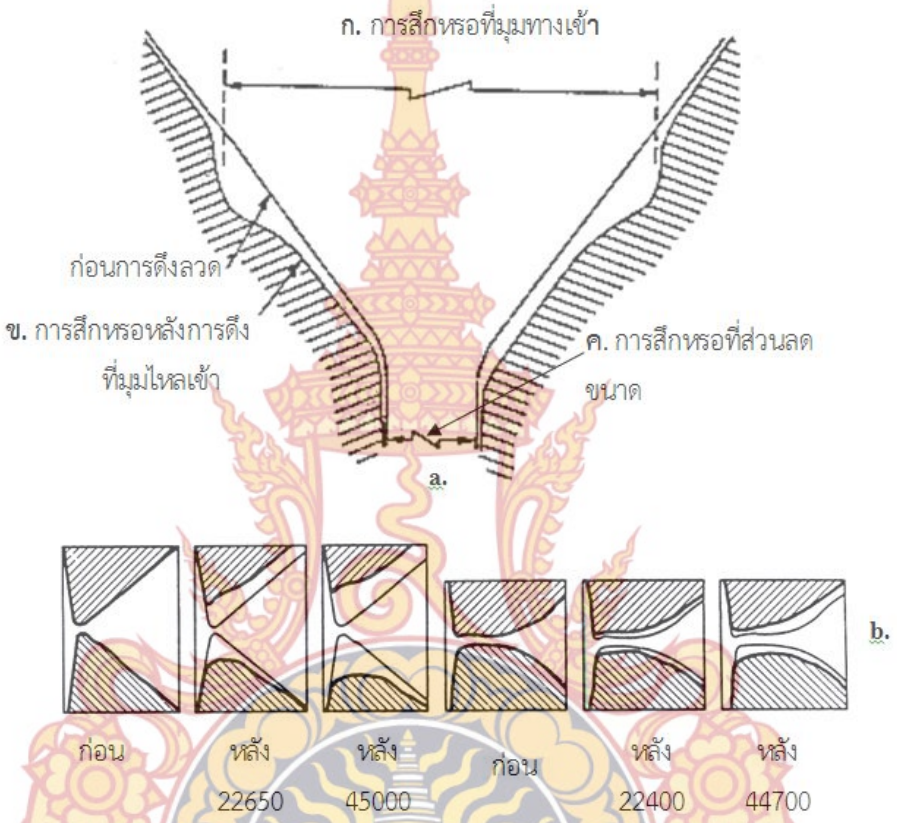
- การสึกหรอแบบความล้าผิว (Fatigue Wear)

กลไกนี้จะเกิดในสภาวะต้องรับภาระซ้ำๆ (Cyclic Stress) ทำให้เกิดรอยแตกของผิวในระดับจุลภาคภายใต้ผิวโลหะ ช่องว่างจะเกิดการขยายตัวภายใต้การรับภาระอย่างต่อเนื่อง จนถึงตำแหน่งวิกฤตที่ช่องว่างขยายไปชนกัน เกิดการแตกออกเป็นเกร็ดหรือชั้นของผิวโลหะ ซึ่งบางทีเรียกว่า การสึกหรอแบบแยกชั้น (Delamination Wear)

5.2.2 การสึกหรอที่เกิดขึ้นในกระบวนการดึงลวด [6]

ลักษณะการสึกหรอที่เกิดในกระบวนการดึงลวดจะเกิดได้ทั้งสภาพที่ผิวสัมผัสมีการหล่อลื่นและไม่มีการหล่อลื่น การสึกหรออาจเกิดร่วมกันได้หลายแบบ การใช้สารหล่อลื่นที่เหมาะสมจะช่วยลดการสึกหรอได้มากเพราะทำให้การสัมผัสโดยตรงระหว่างผิวลดลง แต่ถ้าสารหล่อลื่นเกิดการหนืดตัวหรือระบบที่

ใช้ในการหล่อลื่นไม่ทำงานเท่าที่ควร จะทำให้ผิวโลหะแนบติดกันจนอาจเกิดการเชื่อมติดได้ นอกจากนี้ตัวแปรอื่นที่ส่งผลต่อการสึกหรอได้แก่ ความร้อนจากการเปลี่ยนรูปและแรงเสียดทาน อายุของสารหล่อลื่น แรงไม่ได้ศูนย์กลาง (Out – off Center Loading) นอกจากนี้การปรับค่าความหยาบของผิวชิ้นงานให้เหมาะสมเพื่อการเก็บรักษาสารหล่อลื่นได้ ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถลดการสึกหรอในกระบวนการดึงลวดได้เช่นกัน



รูปที่ 15 การสึกที่แม่พิมพ์ดึงลวด
a. รูปแบบการสึกหรอแม่พิมพ์ดึงลวด [6]
b. การสึกในแม่พิมพ์ดึงลวดกับระยะทางในการดึง [3]

ก. การสึกหรอที่รัศมีโค้งที่ปากดาย (Bell Radius) เกิดขึ้นจากการกระแทกของลวดกับแม่พิมพ์ดึงลวด การสึกหรอที่มากจะส่งผลทำให้วัสดุเกิดการไหลตัวไม่ทันเป็นผลให้ผิวลวดเกิดการปอก

ข. การสึกหรอที่ครึ่งมุมไหลเข้า α เป็นผลให้ครึ่งมุมไหลเข้า α เพิ่มขึ้นกว่ามุมที่เหมาะสมส่งผลทำให้แรงในการดึงลวดมากขึ้น

ค. การสึกหรอที่ส่วนลดขนาด (Die Bearing) การสึกหรอจะเกิดขึ้นมากบริเวณนี้เพราะเป็นส่วนกำหนดขนาดสำเร็จ การสึกหรอที่ส่วนนี้จะส่งผลต่อลวดหลังการดึงมากที่สุดเพราะเป็นส่วนที่กำหนดขนาด รูปทรงลวดหลังการดึง และผิวลวดสำเร็จ

5.2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบผิว

การเคลือบผิวเป็นการเพิ่มคุณสมบัติของผิวบางประการให้กับวัสดุ และเพิ่มความสามารถในการต้านทานการสึกหรอให้กับพื้นผิวที่ง่ายต่อการสึกหรอ การเคลือบผิวเป็นขั้นตอนสำคัญที่สุดขั้นตอนหนึ่งในการผลิตชิ้นส่วนหรือชิ้นงานทางวิศวกรรม ในปัจจุบันเทคโนโลยีการชุบเคลือบผิวมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละกรรมวิธีจะมีข้อดี ข้อเสีย และมีความเหมาะสมที่จะใช้งานแตกต่างกัน ประโยชน์ที่ได้จากการทำการเคลือบผิว ช่วยปรับปรุงสภาวะการทำงานให้มีความสามารถที่ดีขึ้น เนื่องจากการเคลือบผิวเครื่องมือหรือวัสดุชิ้นงานจะช่วยปรับสภาวะการทำงานให้เหมาะสมและเพิ่มขีดจำกัดในการทำงานด้านต่างๆ มากขึ้น เช่น ลดความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส เพิ่มความสามารถการทำงานที่อัตราเร็วสูง และเพิ่มความสามารถการทำงานที่อุณหภูมิที่สูง ช่วยให้อายุการทำงานของเครื่องมือใช้ได้ยาวนานขึ้น โดยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการสึกหรอ และเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเฉพาะบางอย่าง เช่น ความสามารถในการนำไฟฟ้าหรือเป็นฉนวนความสามารถในการนำแม่เหล็กไฟฟ้า และเพื่อความสวยงามของพื้นผิวในงานประดับตกแต่ง

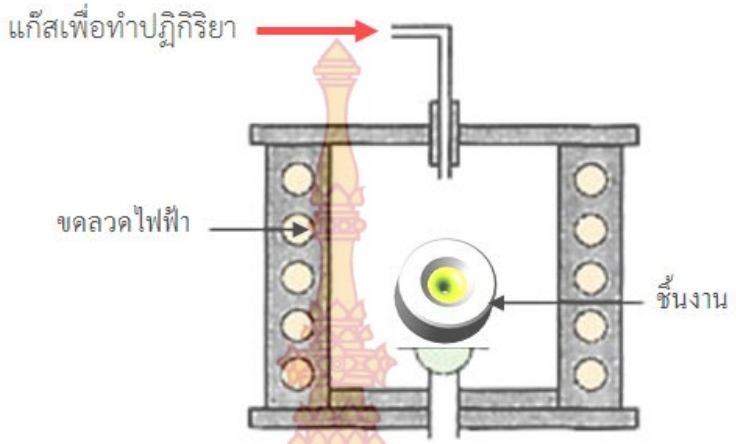
ประเภทของการเคลือบผิว

กรรมวิธีการเคลือบผิวในแม่พิมพ์ดึงลวดยังคงมีข้อจำกัดอยู่มาก เพราะในแม่พิมพ์ดึงลวดพื้นที่ต้องการเคลือบผิวจะเป็นพื้นที่บริเวณรูใน แม่พิมพ์ดึงลวดที่มีขนาดรูในเล็กมากจะประสบปัญหาในการเคลือบผิวมากหรืออาจไม่สามารถเคลือบได้ แต่ในแม่พิมพ์ดึงลวดที่มีขนาดรูในโตก็สามารถเคลือบผิวได้ง่าย กรรมวิธีการชุบเคลือบผิวที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและทำได้จริงในปัจจุบันซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ การเคลือบผิว (Surface Coating) และการชุบแข็งเฉพาะผิว (Surface Hardening)

1. การเคลือบผิว หมายถึง การนำเอาวัสดุอื่นมาเคลือบติดกับผิวชิ้นงานเพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ เช่น การเคลือบผิวด้วยไอเคมี (Chemical Vapour Deposition, CVD) และการเคลือบผิวด้วยไอกายภาพ (Physical Vapour Deposition, PVD) การเคลือบผิวด้วยฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) [13] การพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน (Thermal Spray)

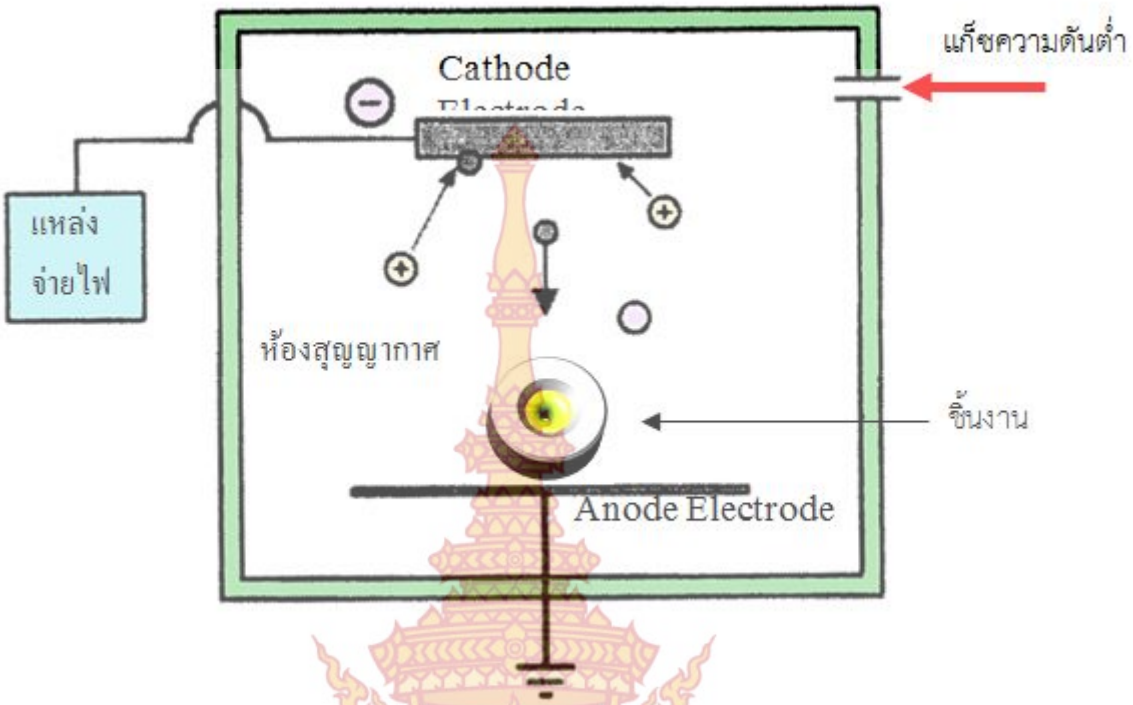
ก. การเคลือบผิวด้วยไอเคมี (Chemical Vapour Deposition, CVD) การเคลือบผิวด้วยไอเคมีเป็นกรรมวิธีการเคลือบผิวโดยใช้ปฏิกิริยาทางเคมีของสารในสถานะที่เป็นไอแก๊ส ปฏิกิริยาของสารในสถานะแก๊สจะแพร่เข้าในเนื้อวัสดุพื้นภายใต้ความร้อนและสร้างชั้นผิวเคลือบบนชิ้นงาน การยึดเกาะของชั้นฟิล์มกับผิววัสดุพื้นจึงมีความแข็งแรง สามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามแหล่งพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เช่น ไฟฟ้า พลาสมา และเลเซอร์ จากรูปที่ 16 เป็นการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ไฟฟ้า ในการใช้วิธีพลาสมาจะช่วยเร่งปฏิกิริยาของสารทำให้การรวมตัวของแก๊สในอัตราที่มากขึ้นจึงได้ชั้นฟิล์มที่หนาขึ้น ลักษณะเด่นของกรรมวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีจะมีความสม่ำเสมอในชั้นฟิล์มดี สามารถควบคุมความหนาของชั้นฟิล์มได้ง่ายและการยึดเกาะของชั้นฟิล์มกับผิววัสดุพื้นดี แต่ผิวฟิล์มที่ได้จากกรรมวิธีนี้จะเป็นฟิล์มบางไม่เกิน 10 μm และการใช้อุณหภูมิของกระบวนการสูงเป็นระยะเวลานานจึง

มักจะเกิดการบิดตัวของชิ้นงานมาก หลังการเคลือบผิวจำเป็นต้องทำการปรับปรุงคุณภาพผิวด้วยความร้อนอีกครั้ง



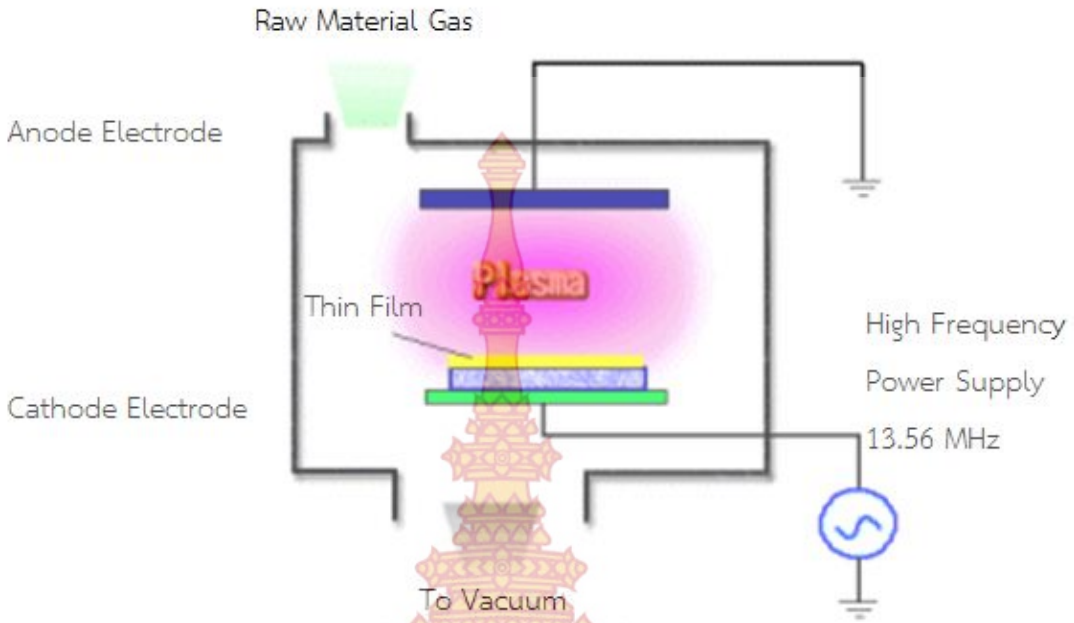
รูปที่ 16 กระบวนการเคลือบผิวด้วยไอเคมี (CVD) โดยใช้พลังงานไฟฟ้า [10]

ข. การเคลือบผิวด้วยไอกายภาพ (Physical Vapour Deposition, PVD) กรรมวิธีนี้เป็นกรรมวิธีที่ทำให้วัสดุผิวเคลือบกลายเป็นไอหรือเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมาก่อน ซึ่งจะกลั่นตัวลงบนผิวหน้าและเข้าไปฝังตัวลงในเนื้อวัสดุ สร้างเป็นชั้นฟิล์มขึ้นมาบนชิ้นงานภายใต้เงื่อนไขสภาวะสุญญากาศ ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม เป็นที่นิยมกันอย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรม นอกจากการเคลือบเพื่อสร้างผิวให้เหมาะกับการทำงานเฉพาะอย่างแล้วยังทำการเคลือบเพื่อให้มีสีสวยงามอีกด้วย การเคลือบผิวแบบไอกายภาพสามารถแบ่งตามวิธีการที่ใช้ในการเปลี่ยนวัสดุผิวเคลือบให้กลายเป็นไอ คือ วิธีทางความร้อน และวิธีที่ไม่ใช้ความร้อน จากรูปที่ 17 เป็นการเคลือบผิวแบบไอกายภาพวิธีที่ไม่ใช้ความร้อนซึ่งเป็นที่นิยมในงานอุตสาหกรรม โดยจ่ายไฟขั้วลบเข้ากับของแข็งวัสดุเคลือบ (Cathode Electrode) และวางชิ้นงานบนฐานอาโนดที่ต่อกับสายดิน ป้อนก๊าซอาร์กอนด้วยความดันต่ำเข้าภายในสภาวะสุญญากาศ ก๊าซอาร์กอนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (+) วิ่งชนของแข็งวัสดุเคลือบที่เป็นขั้วลบด้วยความเร็วสูง ทำให้อะตอมถูกกระแทกและหลุดออกมาวิ่งไปเกาะกับชิ้นงานจนโตขึ้นเรื่อยๆจนกลายเป็นผิวเคลือบ



รูปที่ 17 กระบวนการเคลือบผิวด้วยไอกายภาพ (PVD) โดยใช้พลังงานไฟฟ้า [10]

ค. การเคลือบผิวด้วยฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) การเคลือบผิวแบบ DLC จะใช้วัสดุเชิงประกอบของคาร์บอนในการเคลือบ โดยทั่วไปโครงสร้างของฟิล์ม DLC จะมีส่วนผสมของเพชร (sp^3) แกรไฟต์ (sp^2) และ C-H หรืออยู่ในลักษณะรูปอสัณฐานมีรูปร่างผลึกที่ไม่แน่นอนแน่นอน DLC เป็นฟิล์มที่มีความแข็งสูง และมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่า 0.1 μm มีความต้านทานการสึกหรอได้ดี นอกจากนี้แล้วผิวเคลือบที่ได้จาก DLC สามารถเคลือบลงบนพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ดี และไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับสารต่างๆจึงทำให้มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวาง เช่น การเคลือบผิวบนฮาร์ดดิสก์ หรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลต่างๆ การเตรียมฟิล์ม DLC สามารถเตรียมได้โดยใช้กรรมวิธี CVD และกรรมวิธี PVD แต่กรรมวิธี PVD ซึ่งอาศัยพลาสมานั้นเป็นที่นิยมมากกว่าเนื่องจากฟิล์มจะเกิดภายใต้ความดันต่ำและอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ส่วนสารตั้งต้นที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มนั้นมักนิยมใช้แก๊สไฮโดรคาร์บอนผสมกับแก๊สไฮโดรเจน เมื่อเกิดการแตกตัวของแก๊สไฮโดรคาร์บอนจะทำให้เกิดเป็นฟิล์ม DLC เคลือบบนผิวชิ้นงาน ซึ่งพลังที่ทำให้เกิดการแตกตัวอาจมาจากไฟฟ้ากระแสตรงหรือไมโครเวฟดังรูปที่ 18 การเพิ่มประสิทธิภาพของชั้นฟิล์ม DLC ให้สามารถเกาะยึดติดชิ้นงานได้ดีโดยใช้ฟิล์มเคลือบชนิดอื่นเป็นผิวชั้นกลาง เช่น Si.C แล้วจึงเคลือบผิวด้วย DLC อีกครั้ง



รูปที่ 18 กระบวนการการเคลือบผิวด้วยฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) [13]

ง. การพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน (Thermal Spray) มีความหนาตั้งแต่ 50 μm ขึ้นไป วิธีการเริ่มจากการให้ความร้อนกับวัสดุที่นำมาเคลือบ โดยวัสดุเคลือบจะมีทั้งลักษณะผงและลวด จากนั้นใช้ความร้อนจากแก๊สจนกระทั่งเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวเคลือบยึดติดกับผิวชิ้นงาน

2. การชุบเคลือบแข็งเฉพาะผิว

การชุบเคลือบแข็งเฉพาะผิว หมายถึง การปรับปรุงคุณสมบัติที่ผิวของชิ้นงานให้มีความแข็งมากขึ้นโดยเฉพาะในงานโลหะเพื่อให้ทนทานต่อการสึกหรอ การเสียดสีและเพื่อให้มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ลักษณะของกรรมวิธีจะเป็นการเปลี่ยนชั้นผิวสัมผัสให้เป็นสารอีกชนิดหนึ่ง โดยอาจจะใช้กระบวนการทางความร้อน กระบวนการทางโลหะวิทยา และการใช้ส่วนผสมทางเคมีของผิวชิ้นงานแตกต่างไปจากเดิม ตัวอย่างของเทคโนโลยีกลุ่มนี้ได้แก่ การชุบแข็งคาร์บูไรซิ่ง (Carburizing) การชุบแข็งไนไตรดิ้ง (Nitriding) การชุบผิวแข็งคาร์โบไนตรายดิ้ง (Carbonitriding) กรรมวิธีพลาสมาไนไตรดิ้ง (Plasma Nitriding) เป็นต้น

ก. กรรมวิธีการชุบผิวคาร์บูไรซิ่ง (Carburizing) เป็นกระบวนการสร้างผิวแข็งสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มคาร์บอนที่ชั้นผิวหน้าของวัสดุ ชั้นผิววัสดุจะมีคาร์บอนสูงขึ้นจึงมีความแข็งมากขึ้น เมื่อผ่านกระบวนการนี้ชิ้นงานจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้ แต่อาจเกิดการบิดงอในกรณีงานที่บางและใช้อุณหภูมิสูง การเพิ่มปริมาณคาร์บอนทำได้โดยวิธีการแพ็คคาร์บูไรซิ่งโดยการนำวัสดุที่จะผ่านกระบวนการเข้าอัดร่วมกับวัสดุที่มีคาร์บอนสูงก่อนและให้ความร้อนในเตาร่วมกัน เมื่อผ่านกระบวนการเหล็กกล้าคาร์บอนจะมีคาร์บอนเพิ่มขึ้น 0.6 -1.2 %

ข. กรรมวิธีการชุบผิวแข็งไนไตรดิ้ง (Nitriding) เป็นกรรมวิธีการชุบผิวแข็งเฉพาะที่กรรมวิธีหนึ่ง ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องมือ เฟือง แม่พิมพ์โลหะ และแม่พิมพ์พลาสติก โดยทำให้ไนโตรเจนแพร่กระจายเข้าไปบนผิวหน้าของโลหะพื้น ไนโตรเจนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะพื้นเกิดเป็นสารประกอบเหล็กในตรายด์ซึ่งมีคุณสมบัติทนต่อการสึกหรอ และมีความแข็งที่ผิวสูงขึ้นกว่าเดิม โดยกรรมวิธีนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่องที่จะทำให้ไนโตรเจนเข้าไปแพร่กระจายลงในเนื้อเหล็กมากขึ้นและเกิดปฏิกิริยาแบบสมบูรณ์ ลักษณะเด่นของกรรมวิธีนี้ คือ สามารถชุบผิวแข็งได้เฉพาะที่ ความหนาของชั้นฟิล์มลึกถึง 125 μm สามารถชุบผิวแข็งกับวัสดุเหล็กทุกชนิด และช่วยลดความเสียดทานของพื้นผิวได้เป็นอย่างดี ส่วนข้อจำกัด คือ การใช้อุณหภูมิในช่วง 480-590°C จะทำให้อาจเกิดการบิดตัวของชิ้นงานหลังการชุบได้ และใช้ระยะเวลาในการชุบนานจึงเหมาะกับการทำงานปริมาณมาก

ค. กรรมวิธีการชุบผิวแข็งคาร์โบไนตรายดิ้ง (Carbonitriding) เป็นวิธีผสมระหว่างกรรมวิธีการชุบผิวคาร์บูไรซิ่งและกรรมวิธีการชุบผิวแข็งไนไตรดิ้ง โดยให้ความร้อนชิ้นงาน 800-870 °C ภายใต้บรรยากาศไฮโดรคาร์บอนและแอมโมเนียเป็นเวลาหลายชั่วโมงในสุญญากาศ และทำการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วตามด้วยการอบคืนตัว การบิดเบี้ยวของชิ้นงานน้อยกว่ากรรมวิธีการชุบผิวคาร์บูไรซิ่ง ลักษณะเด่นจากกรรมวิธีนี้ผิวฟิล์มจะมีความแข็งมาก มากกว่า 70 HRC มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอและการกัดกร่อนได้สูง สามารถชุบผิวแข็งเฉพาะที่ได้ ความลึกผิวฟิล์ม 12.5 – 50 μm และมีความสม่ำเสมอดี ข้อจำกัดของกรรมวิธี คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงเนื่องจากผิวที่ได้หยาบ ใช้อุณหภูมิสูงในช่วง 500- 1150 °C อาจจะเกิดการบิดตัวหลังชุบได้มาก และค่าใช้จ่ายในการชุบมากกว่าการชุบผิวแข็งคาร์โบไนตรายดิ้ง

ง. กรรมวิธีพลาสมาไนไตรดิ้ง (Plasma Nitriding) กรรมวิธีพลาสมาไนไตรดิ้งจะทำการแพร่ธาตุไนโตรเจนลงบนพื้นผิวของชิ้นงาน โดยใช้บรรยากาศพลาสมากับกระแสไฟฟ้าที่คลายประจุออกมา โดยนำชิ้นงานที่ทำการชุบผิวแข็งลงในภาชนะที่มีประจุไฟฟ้าด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า 300-1500 โวลต์ และความดันประมาณ 0.1-10 torr แก๊สจะแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและไนโตรเจน ลักษณะเด่นของกระบวนการนี้ คือ การเกิดขึ้นแบบเดียวกันทั้งหมดบนพื้นที่ผิวชิ้นงาน

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการดึงขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่มีผู้ให้ความสนใจในการศึกษาวิจัยและพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง เพราะสามารถผลิตได้รูปทรงที่หลากหลายและเพิ่มระยะทางได้มากขึ้น ในการศึกษากระบวนการดึงขึ้นรูปลวดจึงจำเป็นต้องนำความรู้และงานวิจัยในด้านต่างเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อทำให้กระบวนการดึง

ลวดมีประสิทธิภาพสูงสุด และจะต้องเกิดการสึกหรอที่ต่ำที่สุดด้วย ในการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลองจึงจำเป็นต้องทราบถึง งานวิจัยที่กล่าวถึงการศึกษาหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการดึงลวด การศึกษาไตรโบโลยีในการทำงาน และการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มแข็งเคลือบผิว

6.1 งานวิจัยที่กล่าวถึงการศึกษาหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการดึงลวด

ในปี พ.ศ. 2544 พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์ [14] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความเร็วในกระบวนการดึงลวดโลหะที่มีผลต่อสมรรถภาพของกระบวนการ โดยการทดลองดึงลวดทองแดงและทองเหลืองที่ระดับความเร็วที่ต่างกัน กับแม่พิมพ์โลหะผสมคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide) ศึกษาอิทธิพลของมุมไหลเข้าและอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดที่ต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความเร็วในการดึงลวดมีค่ามากขึ้นจะทำให้คุณภาพผิวลวดมีแนวโน้มที่แย่ลง และส่งผลให้มีแนวโน้มการเกิดความเครียดแข็ง (Strain Hardening) ภายในเส้นลวดสูงขึ้น ส่งผลให้ความเค้นดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) มีค่าสูงขึ้นตาม เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%EL) ของเส้นลวดหลังการดึงลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับลวดก่อนดึง จากผลการทดลองยังทราบถึงอิทธิพลมุมไหลเข้าแม่พิมพ์ที่กว้างมากจะทำให้คุณภาพผิวของลวดมีแนวโน้มแย่ลง และจะเกิดความเครียดแข็งในเส้นลวดมากขึ้น มุมไหลเข้าแม่พิมพ์ที่กว้างมากจะทำให้การเปลี่ยนรูปร่างภายในของเส้นลวดมีแนวโน้มไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าตัด ด้านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดหลังการดึงมีแนวโน้มที่เล็กลงเล็กน้อยประมาณ 5 μm และมีแนวโน้มยืดตัวออกในแนวความยาว ต่อมาในปี 2545 สมชัย นรเศรษฐ์โศภณ และคณะ [15] ได้ศึกษาผลกระทบของครึ่งมุมดายและความดันของสารหล่อลื่นต่อความแข็งของลวดทองแดงเมื่อผ่านกระบวนการดึงขึ้นรูปเย็น ทำการทดลองที่ครึ่งมุมดายต่างกันและให้ความดันสารหล่อลื่นที่ช่วงทางเข้ามีขนาดที่ต่างกัน จากผลการทดลองค่าความเค้นในเส้นลวดจะลดลงต่ำสุดในขณะที่ใช้มุม α = 6 องศา ที่มุม α = 4 องศาจะเกิดความเค้นสูงสุดในการทดลอง และจากการทดลองมุม α มากเกิน 6° ขึ้นไปค่าความเค้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆแสดงให้เห็นว่าที่มุม α = 6° เป็นขนาดของครึ่งมุมดายที่เหมาะสม และผลการทดลองทำให้ทราบถึงค่าความเค้นดึงในเส้นลวดจะลดลงเมื่อใช้ความดันสารหล่อลื่นที่สูง เนื่องจากความดันของสารหล่อลื่นยิ่งสูงความเสียดทานบริเวณผิวงานก็ยิ่งลดลง และความดันสารหล่อลื่นที่สูงยังส่งผลให้สภาพผิวลวดหลังการดึงดีที่สุด ด้านความแข็งของลวดจะเพิ่มขึ้นที่บริเวณผิวด้านนอก เนื่องจากบริเวณผิวด้านนอกเนื้อโลหะเกิดการอัดตัวแน่นขึ้น ส่วนตรงกลางของเส้นลวดจะมีความแข็งใกล้เคียงกับค่าก่อนดึง และในปีเดียวกัน ปี ค.ศ. 2002 Aguilar และ คณะ [16] ได้ศึกษาการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาความเครียดประสิทธิผล (Effective Strain) ที่เกิดจากอิทธิพลของมุม α จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่า Effective Strain จะแตกต่างกันเมื่อใช้มุม α ที่ต่างกัน การใช้มุม α ที่มีความกว้างจะส่งผลให้เกิดค่าความเครียดมากทั้งในกรณี %R สูงและ %R ต่ำ เนื่องจากมีแรงเฉือนรีดันแดนส์เกิดขึ้นสูง และค่า Effective Strain จะสูงมากที่ตำแหน่งด้านนอกของผิวลวดเพราะเกิดจากการไหลตัวไม่สะดวก ส่วนการดึงที่ใช้มุม α ที่น้อยจะให้ค่า Effective Strain ที่ต่ำกว่า

ทั้งในกรณี %R สูง และ %R ต่ำ และจะเกิดสม่ำเสมอในทุกตำแหน่งของลวด ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการใช้มุมไหลเข้าน้อยจะมีค่า Effective Strain น้อยซึ่งจะทำการขึ้นรูปได้ง่ายกว่าการใช้มุมไหลเข้าที่กว้าง

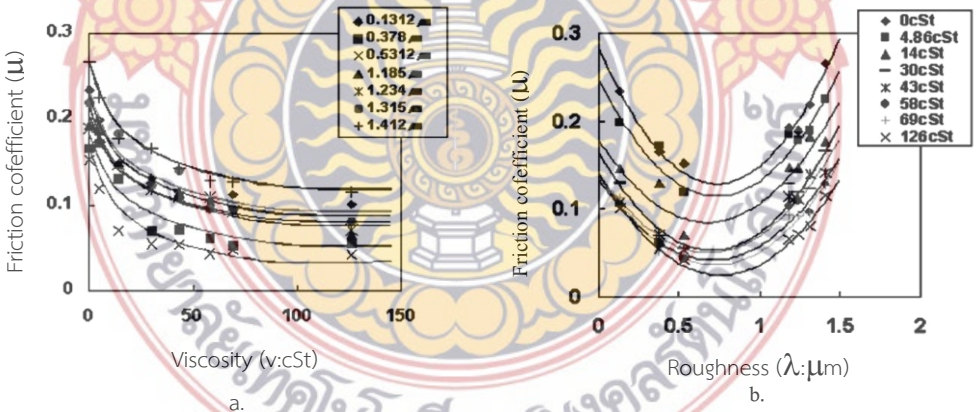
6.2 งานวิจัยที่กล่าวถึงการศึกษาไตรโบโลยีในการขึ้นรูปโลหะ

ในการกล่าวกล่าวถึงงานวิจัยด้านไตรโบโลยีจะเริ่มกล่าวถึงการศึกษาที่เกี่ยวกับสารหล่อลื่น การศึกษาที่เกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และตามด้วยการศึกษาที่เกี่ยวกับการสึกหรอ ในปี ค.ศ. 1999 Bech [17] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวของสารหล่อลื่นที่ตัวแปรต่างๆในขณะทำการดึงขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมผ่านแม่พิมพ์แบบโปร่งแสง โดยจะทำหลุมลึกรูปปิรามิด บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ระยะห่างต่างกัน ในขณะทำการดึงผ่านแม่พิมพ์จะใช้กล้อง CCD บันทึกพฤติกรรมของสารหล่อลื่นในบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในสารหล่อลื่นที่มีความหนืดมาก การใช้ความเร็วในการดึงที่สูง อัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัดสูง ค่า Strain Hard Exponent มาก หรือมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ที่น้อย ค่า Back Tension น้อย ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ต่ำ จะมีผลทำให้สารหล่อลื่นไหลเข้าบริเวณผิวสัมผัสได้ดี แต่ถ้าค่าต่างๆตรงกันข้ามจะทำให้สารหล่อลื่นหนืดตัวอยู่ด้านหน้าไม่เข้าสู่บริเวณผิวสัมผัส จากพฤติกรรมของสารหล่อลื่นบ่งชี้ว่าสารหล่อลื่นที่เกิดการไหลทวนไปทางด้านหลังเป็นสภาวะการหล่อลื่นที่ดี เพราะการไหลทวนไปด้านหลังแสดงว่ามีการยึดติดผิวได้ดีจึงไม่เกิดการกระจาย ทำให้สารหล่อลื่นคงสภาพชั้นฟิล์มเข้าไปปกคลุมอยู่ระหว่างผิวสัมผัสในขณะทำงาน จากผลการทดลองยังทราบว่าตัวแปรที่ส่งผลกต่อพฤติกรรมการไหลตัวของสารหล่อลื่นในการทดลองอย่างมาก คือ ค่าความหนืด ความเร็วในการดึง และค่า Strain Hardening Exponent เพราะเมื่อทำการเปลี่ยนระดับของตัวแปรเหล่านี้ให้มากขึ้นหรือน้อยลงจะส่งผลให้สารหล่อลื่นเปลี่ยนพฤติกรรมการหล่อลื่นและเปลี่ยนทิศทางไปมากดังรูปที่ 19

lubricant viscosity	drawing speed	reduction	die angle	back tension	strain hard. exponent	coefficient of friction
η = 5 cSt A1	0.2mm/sec A2	10 % A3	2° A4	0 A5, **REF**	n = 0.08 A6, **REF**	μ = 0.025 A7, **REF**
η= 126 cSt B1, **REF**	0.5 mm/sec B2, **REF**	15 % B3	3° B4, **REF**	62 N/mm^2 B5	n = 0.16 B6	μ = 0.05 B7
η= 700 cSt C1	5 mm/sec C2	20 % C3, **REF**	5° C4	105 N/mm^2 C5	n = 0.21 C6	μ = 0.28 C7

รูปที่ 19 ผลการทดลองการไหลตัวของสารหล่อลื่นสำหรับกรณีที่เงื่อนไขในการทดลองแตกต่างกัน

ต่อมาปี 2002 Lee [18] ได้ศึกษาอิทธิพลของสารหล่อลื่นและความเรียบผิวของชิ้นงานที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในงานขึ้นรูปโลหะแผ่นเหล็กกาวาไนท์ จากผลการทดสอบพบว่าสารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดต่ำจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่สูงดังรูปที่ 20 a. ส่วนความเรียบผิวที่เรียบหรือหยาบเกินไปจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงเช่นกันดังรูปที่ 20 b. และได้ทำการทดลองต่อโดยการเปรียบเทียบแรงขึ้นรูปกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จากการทดลองไปใช้ผลการทดลองที่ได้จะมีค่าแรงในการขึ้นรูปที่ใกล้เคียงกัน

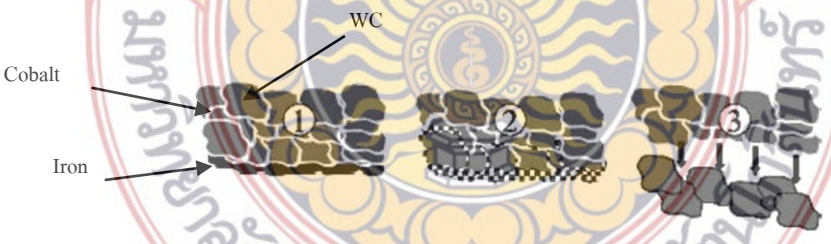


รูปที่ 20 โมเดลค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในงานขึ้นรูปโลหะแผ่น

a. ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของสารหล่อลื่นและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

b. ความสัมพันธ์ระหว่างความเรียบผิวที่ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน [18]

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยบางงานที่กล่าวถึงการศึกษาการสึกหรอในกระบวนการดึงลวด ในปี 1995 Kim [19] ได้ทำการทำนายการสึกหรอในกระบวนการดึงลวดด้วยไฟไนต์เอเลเมนต์ ส่วนแรกจะศึกษาอุณหภูมิที่สูงขึ้นของการดึงลวดเหล็ก และบริเวณที่เกิดอุณหภูมิสูงของแม่พิมพ์ดึงลวด จากผลการทดลองความร้อนจะเพิ่มสูงบริเวณทางเข้าของส่วนลดขนาดมากที่สุด และความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้นมากเมื่อมีอัตราการลดหน้าตัดที่สูง ในส่วนที่สองจะทำนายการสึกหรอของแม่พิมพ์ดึงลวดทำจากเหล็ก SKD12 การหาค่าการสึกหรอจะทำโดยการการดึงลวดจริงใช้สารหล่อลื่นจารบีและเปรียบเทียบด้วยการจำลองกระบวนการดึงลวดโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ นำค่าความร้อนที่เกิดขึ้นที่แม่พิมพ์ดึงลวดไปคำนวณหาค่า Wear Depth จากสูตร $V = \frac{k}{3h}(\sigma_n \nu_s \Delta t)$ ของ Archard Wear Model ซึ่งสูตรนี้จะแปรผันตามค่าความร้อน จากผลการทดลองจะเกิดความร้อนสูงที่บริเวณทางเข้าของส่วนลดขนาดเมื่อคำนวณแล้วจึงเกิด Wear Depth มากที่บริเวณนี้ จากการทดลองจะเกิดความร้อนขึ้นสูงในกระบวนการดึงลวด และเกิดการสึกหรอจากการสัมผัสแบบ Abrasive Wear ในการเปรียบเทียบการสึกหรอจากการทดลองจะสูงกว่าการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นการวัดการสึกหรอโดยใช้การวัดรูปร่างให้ผลได้ดี จึงสรุปได้ว่าในการทดลองนี้สามารถทำนายการสึกหรอของแม่พิมพ์ดึงลวดและขนาดของลวดหลังดึงได้ ต่อมาในปี 2003 Hollinger [20] ทำการศึกษาการสึกหรอของแม่พิมพ์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ใช้ในการดึงลวดเหล็กเพื่อใช้ทำลวดโครงสร้างภายในยางรถยนต์ การทดลองเป็นแบบการดึงหลายขั้นตอนใช้สารหล่อลื่นต่างชนิดกัน นำลวดไปเคลือบทองเหลือง และใช้ลวดเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์โคบอนต่างกัน จากผลการทดลองการสึกหรอจะเกิดจากการขัดถู การแตก และการหลุดของกลุ่มเกรน โดยสารหล่อลื่นที่มีค่า EP จะมีเสถียรภาพของชั้นฟิล์มที่ดีป้องกันการสึกหรอได้ดี ส่วนสาเหตุการสึกหรออีกอย่างคือเมื่ออุณหภูมิสูงจะเกิดการเชื่อมตัวระหว่างอนุภาคเหล็กและโคบอลและแทรกตัวอยู่ในทังสเตนคาร์ไบด์ทำให้โครงสร้างลดความแข็งแรงลงจนหลุดออกในที่สุดดังรูปที่ 21 ดังนั้นการในการทดลองที่มีโคบอนสูงจึงทำให้เกิดการสึกหรอที่สูง



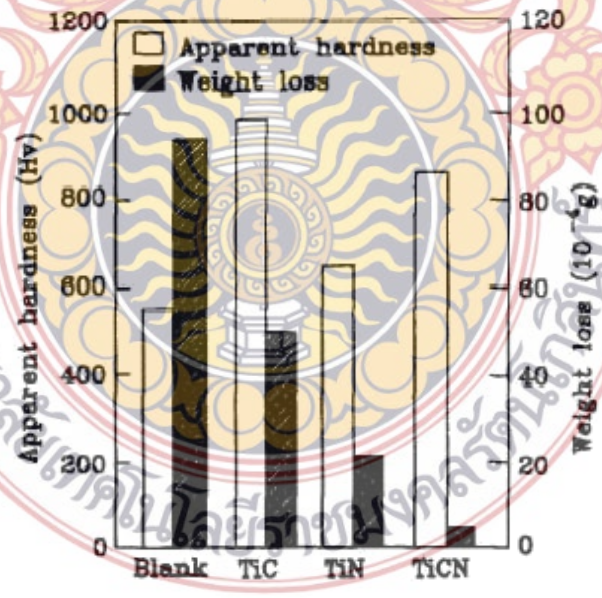
รูปที่ 21 กลไกการสึกหรอจากการแทรกตัวของเหล็กและโคบอลท์ในทังสเตนคาร์ไบด์

ต่อมาปี 2547 วารุณี เปรมานนท์ [11] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมด้านไตรบอโลยีของผิวสัมผัสระหว่างเหล็กทำพิมพ์กับเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อศึกษากลไกของการสึกหรอและหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน โดยทำการทดลองแบบ Ball-on-disk การทดสอบจะใช้สารหล่อลื่นต่างชนิดกันและในสภาวะที่ไม่มีสารหล่อลื่น จากผลการทดสอบพบว่ากรณีไม่ใช้สารหล่อลื่นจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงที่สุดสำหรับทุกวัสดุทำพิมพ์ เนื่องจากจะเกิดการสัมผัสกันโดยตรงและเกิดการยึดติดสูง เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่

สัมพัทธ์ต้องมีแรงที่มากพอในการเอาชนะแรงยึดติดแยกผิวสัมผัสออกจากกัน จึงทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่สูง นอกจากนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องยังส่งผลให้กระบวนการยึดติดเกิดขึ้นได้มากและแข็งแรงยิ่งขึ้น ในส่วนของการทำงานภายใต้การหล่อลื่นด้วยน้ำมันค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าต่ำลงและลดการสึกหรอได้มาก เนื่องจากสารหล่อลื่นเข้าไปเป็นฟิล์มกั้นระหว่างผิวสัมผัส ทำให้ปริมาณการยึดติดน้อยลงและยังช่วยในส่วนการระบายความร้อน ด้านน้ำมันสังเคราะห์ที่มีสารรับแรงกดผสมอยู่จะมีเสถียรภาพของชั้นฟิล์มสูงกว่าน้ำมันที่ได้จากธรรมชาติ และจากการทดสอบยังพบว่าวัสดุทำพิมพ์ที่มีความแข็งสูงจะมีอัตราการสึกหรอลดลงทั้งกรณีที่ใช้สารหล่อลื่นและไม่ใช้สารหล่อลื่น

6.3 งานวิจัยที่กล่าวถึงการศึกษาคุณสมบัติของสารเคลือบผิวและกรรมวิธีการเคลือบผิวต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและเลือกสารเคลือบผิว

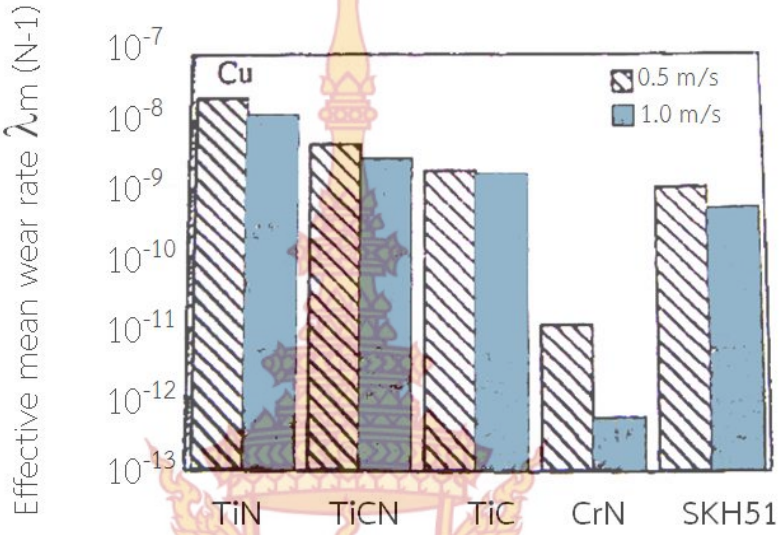
ในปี ค.ศ. 1993 Wang และ คณะ [21] ศึกษาการต้านทานสึกหรอของฟิล์มแข็งเคลือบผิว TiCN, TiC และ TiN บนเหล็กทำเครื่องมือ JIS SKD61 ทดสอบโดยวิธี Washer-on-disc Wear ทำการศึกษาที่อุณหภูมิต่างกันและระยะเวลาต่างกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าฟิล์มแข็งเคลือบผิวช่วยเพิ่มคุณสมบัติต้านทานการสึกหรอจากการขูดมากกว่าผิวที่ไม่ทำการเคลือบผิว และผลการทดลองดังรูปที่ 22 ชี้ว่าฟิล์มแข็ง TiCN จะต้านทานการสึกหรอแบบการขูดได้ดีแม้จะมีค่าความแข็งที่น้อยกว่าฟิล์มแข็ง TiC ก็ตาม เพราะว่าชั้นฟิล์ม TiCN มีความแข็งน้อยกว่าแต่มีค่าความเหนียวมากกว่าจึงไม่เกิดการแตกของชั้นฟิล์มดังฟิล์มแข็ง TiC



รูปที่ 22 ผลการสึกหรอโดยวิธี Washer-on-disc กับค่าความแข็งของฟิล์มแข็งเคลือบผิว [21]

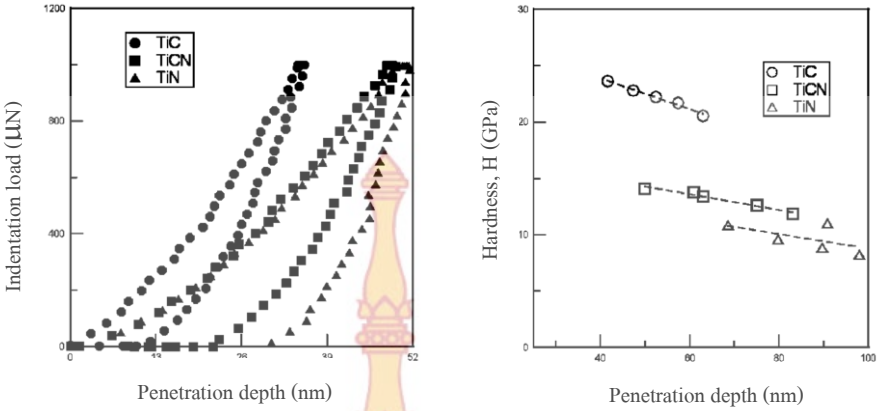
ต่อมาในปี 1998 Sato [22] ทำการศึกษาการสึกหรอของฟิล์มเคลือบผิว TiN, TiC และ TiCN บนวัสดุพื้น SKH 51 โดยทดสอบกับเหล็ก S45C และทองแดงให้หมุนแล้วนำวัสดุที่ทำการเคลือบผิวฟิล์ม

แข็งชนิดต่างๆมาขัดถู จากผลการทดลองพบว่าสาเหตุหลักของการสึกหรอที่มีอัตราที่สูงเกิดจากการสั่นกระทบกันของแท่งทดสอบและยังเกิดจากปฏิกิริยา Oxidation ระหว่างทองแดงกับสารฟิล์มแข็ง Ti ทำให้ฟิล์มหลุดง่าย จากผลฟิล์มแข็งเคลือบผิว TiC ต้านทานการสึกหรอได้ดีที่สุด รองลงมาคือ TiCN และ TiN ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 23

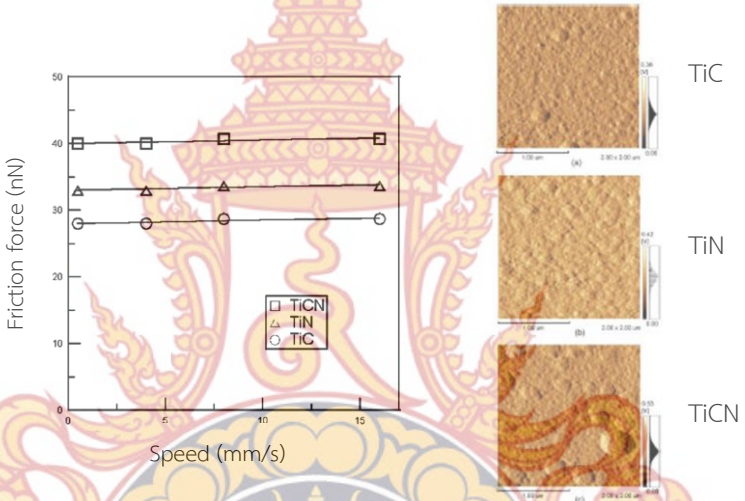


รูปที่ 23 ผลการสึกหรอของฟิล์มแข็งเคลือบผิวโดยวิธีการหมุนขัดถู [22]

ในปี 2002 Chen และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาการต้านทานการสึกหรอของฟิล์มเคลือบผิวระหว่าง TiCN และ TiAlCN แบบ PVD ทำการเคลือบใบมีดกัด (End Mill) ทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีเกรดต่างกัน ทดสอบโดยการหมุนกัดชิ้นงาน AISI 1045 แบบไม่ใช้สารหล่อลื่นที่อัตราป้อนต่างกัน จากผลการทดลองฟิล์มแข็ง TiCN จะต้านทานการสึกหรอแบบการขัดถูได้ดีกว่า TiAlCN ที่อุณหภูมิห้อง และในปีเดียวกัน Fang และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเคลือบผิวในระดับนาโน (Nanoindentation) ของฟิล์มแข็ง TiC, TiN และ TiCN บนวัสดุพื้นซิลิกอน ด้วยกรรมวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยการเพิ่มพลาสมา PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) จากผลการทดลองสรุปได้ว่าฟิล์มแข็ง TiC มีค่าความแข็งสูงที่สุดจะมีร่องรอยจากการทดสอบบนชั้นฟิล์มที่น้อย ส่วนฟิล์มแข็ง TiN จะมีค่าความแข็งต่ำสุดจึงเกิดร่องรอยจากการทดสอบที่ลึกสุดดังรูปที่ 24 นอกจากนี้ผลภาพถ่ายทางกายภาพด้วย SPM ผิวฟิล์มที่มีเกรนเล็กละเอียดจะให้ค่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำและความเรียบผิวของฟิล์ม (R_a) ที่เรียบ ซึ่งผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ฟิล์มเคลือบผิว TiC มีค่าต่ำกว่าฟิล์มเคลือบชนิดอื่น รองลงมาคือ TiN และ TiCN ตามลำดับ สอดคล้องกับความละเอียดของเม็ดเกรนและความเรียบผิวของฟิล์มแต่ละชนิด



รูปที่ 24 การเกิดรอยและความแข็งของฟิล์มแข็งเคลือบผิวในการทดลอง [24]



รูปที่ 25 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและภาพถ่ายทางกายภาพของฟิล์มแข็งเคลือบผิว [24]

จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้กล่าวถึงตัวแปรหลายอย่างที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อการสึกหรอต่อผิวสำเร็จ และต่อแรงในการขึ้นรูป ได้แก่ อิทธิพลของมุม α ที่เหมาะสม อิทธิพลของอัตราการลดหน้าตัด อิทธิพลของการหล่อลื่น งานวิจัยหลายฉบับได้กล่าวถึงอิทธิพลของมุม α ที่เหมาะสมในกระบวนการดึงลวด ซึ่งให้ผลสอดคล้องในทิศทางเดียวกันทั้งในกรณีการทดลองจริงและโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการทดลองต่างๆจากงานวิจัยเหล่านี้จึงเป็นแนวทางในการเลือกมุม α ที่เหมาะสมและนำมาพิจารณาในการคำนวณออกแบบแม่พิมพ์ดึงลวด และงานวิจัยบางชิ้นยังกล่าวถึงตัวแปรที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของสารหล่อลื่นขณะทำงาน และกล่าวถึงอิทธิพลของการหล่อลื่นที่ส่งผลต่อคุณภาพผิว และการสึกหรอ เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกสารหล่อลื่นสำหรับกระบวนการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม โดยเฉพาะการดึงช่วงความเรียบผิวขั้นตอนสุดท้าย ในส่วนงานวิจัยเกี่ยวกับการเคลือบผิวฟิล์มแข็ง ได้กล่าวถึงคุณสมบัติของฟิล์มแข็งในงานที่ต่างชนิดกันออกไป กล่าวถึงคุณสมบัติการต้านทานการสึกหรอ และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของฟิล์มแข็งแต่ละชนิด แต่มิได้กล่าวถึงการเคลือบผิวฟิล์มแข็งบนแม่พิมพ์ดึงลวด โดยเฉพาะแม่พิมพ์ดึงลวด

ที่จะนำไปทำการดึงลวดช่วงความเรียบผิวสุดท้ายที่ต้องการความเรียบผิวที่มาก แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่กล่าวมาก็เป็นแนวทางในการเลือกฟิล์มแข็งเคลือบผิวที่เหมาะสมประกอบกับการพิจารณาการเคลือบผิวได้จริงบนแม่พิมพ์ดึงลวดด้วย เมื่อได้ทราบอิทธิพลของตัวแปรต่างๆซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการดึงลวด ผู้วิจัยจึงเลือกทำการศึกษาอิทธิพลสารหล่อลื่นและอิทธิพลของฟิล์มแข็งเคลือบผิว โดยออกแบบแม่พิมพ์ดึงลวดตามมาตรฐานและที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมดึงลวดจริง ประกอบกับความรู้แนวทางที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แล้วทำการเปรียบเทียบผลที่ได้เพื่อหาสารหล่อลื่นที่เพิ่มประสิทธิภาพจริงในกระบวนการดึงเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS304)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

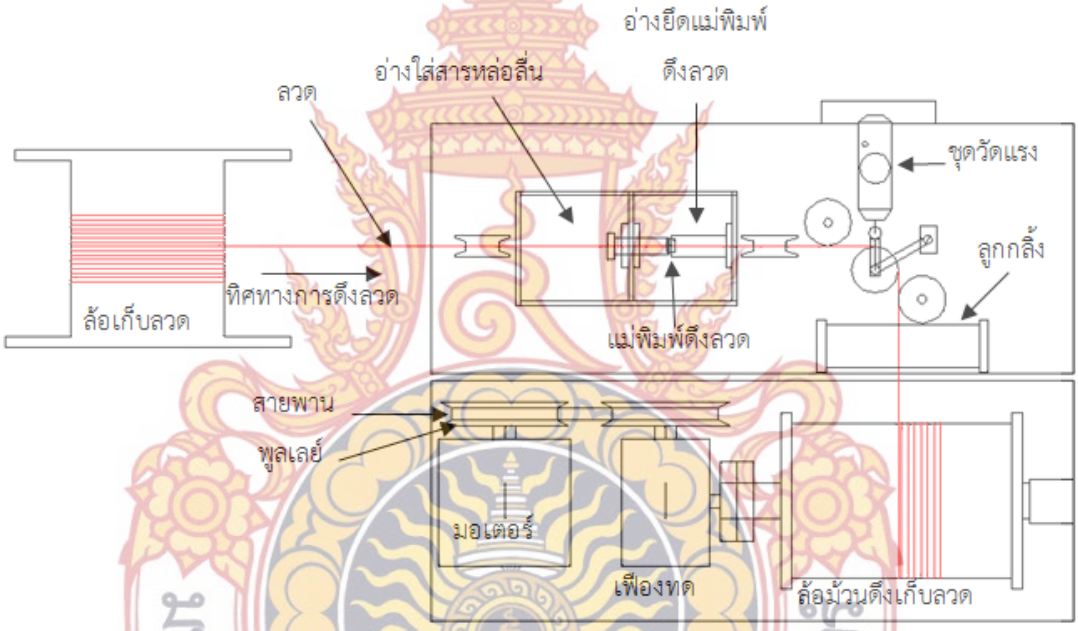
บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 โดยการศึกษาการหล่อลื่น ใช้กระบวนการดึงลวดแบบขั้นเดียวศึกษาที่ขั้นตอนการดึงขั้นสุดท้าย ซึ่งจะประกอบไปด้วย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.1 สร้างเครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียว (Single Stepped Wire Drawing)

การออกแบบเครื่องจะออกแบบตามแบบที่ใกล้เคียงกับที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม



รูปที่ 26 เครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียวที่ใช้ในงานวิจัย

การเลือกวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์จะคำนึงถึงประสิทธิภาพและการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดรูปร่างตามมาตรฐาน W103 ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมดึงลวดทั่วไป แม่พิมพ์จะประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือ ดายอินเสริท (Die Insert) ส่วนสองคือแม่พิมพ์ส่วนนอก (Die Case) ดายอินเสริทจะเป็นส่วนที่อัดเข้าไปในแม่พิมพ์ส่วนนอกทำมาจากทังสเตนคาร์ไบด์เกรด K20 (ISO Code) แม่พิมพ์ส่วนนอกเป็นส่วนประกอบในการรับแรงอยู่ด้านนอกทำจากวัสดุ JIS SKD11 (ภาคผนวก ง)

รูปที่ 27 แม่พิมพ์ดึงลวดตามมาตรฐาน W 103 มุมไหลเข้า 10°

รูปที่ 28 แม่พิมพ์ดึงลวดตามมาตรฐาน W 103 มุมไหลเข้า 15°และ 20°

2. ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการทดลอง

ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก(Austenitic Stainless Steel) เกรด SUS 304 (สมบัติของวัสดุแสดงในภาคผนวก ก) ขนาดลวดก่อนการดึงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดหลังการดึง 1.80 มิลลิเมตร อัตราการลดหน้าตัดของลวด = 10.0 %

รูปที่ 29 ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 Ø 2.00 มิลลิเมตร

3. น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง

การเลือกสารหล่อลื่นจำพวกน้ำมันล้วน จะเลือกน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิห้อง และเลือกใช้ในขั้นตอนการดึงช่วงสุดท้าย เพื่อให้ลวดที่ผ่านการดึงมีคุณภาพของผิวที่เรียบและให้ได้ขนาดหลังการดึงที่เที่ยงตรง พร้อมพิจารณาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสารหล่อลื่นน้ำมัน [11,17,18] เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ดังกล่าวแล้วงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาสารหล่อลื่นชนิด

- สารหล่อลื่นน้ำมัน RENOFORM ยี่ห้อ FUCHS ความหนืดที่ 40℃ = 141.15 mm^2/s

4. ฟิล์มแข็งเคลือบผิวแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง

การเลือกฟิล์มแข็งที่ใช้ในการเคลือบผิวแม่พิมพ์จะคำนึงถึงความเหมาะสมในงานดึงลวดคือมีความสามารถในการรับแรงที่เกิดในระหว่างดึงลวดโดยไม่ทำให้เนื้อฟิล์มเกิดความเสียหายและยังมีคุณสมบัติทางด้านลดแรงเสียดทานทำให้เกิดการลื่นไถลได้ดีในระหว่างการดึงลวด และคำนึงถึงความสามารถในการเคลือบผิวได้ดีที่บริเวณรูในแม่พิมพ์ และการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เมื่อทำการศึกษากรรมวิธีที่เกี่ยวกับการเคลือบผิวและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีการทดสอบมาแล้ว [21,22,23,24] จึงสามารถเลือกชนิดฟิล์มแข็งที่ใช้ในการเคลือบผิวแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง โดยการเคลือบผิวฟิล์มแข็ง TiCN ด้วยกรรมวิธี CVD Coating

5. การทดสอบคุณสมบัติสารหล่อลื่น

ก. การทดสอบหาค่าความหนืดและสารเพิ่มคุณภาพของสารหล่อลื่น

การหาค่าความหนืดของสารหล่อลื่นตามมาตรฐาน ASTM D445 [25] โดยการจับเวลาจากการไหลตัวโดยน้ำหนักของสารหล่อลื่นเองเป็นวินาที ที่อุณหภูมิ 40 และ 100 องศาเซลเซียล ค่าความหนืดที่ได้มีหน่วยเป็นเซนติสโตก โดยใส่น้ำมันในถ้วยแก้วตวงวัดแล้วเทน้ำมันใส่ในหลอดแก้วให้น้ำมันไหลผ่านระดับเกจวัดด้านบน และด้านล่าง ซึ่งทำเครื่องหมายไว้ที่แท่งหลอดแก้ว แล้วใช้อุปกรณ์สำหรับดูดน้ำมัน 1 ชุดทำการดูดน้ำมันขึ้นมาเหนือระดับเกจวัดด้านบน ซึ่งในน้ำมันต้องไม่มีฟองอากาศแล้วใช้นาฬิกาจับเวลาหน่วยเป็นวินาที เมื่อน้ำมันไหลมาถึงระดับเกจวัดด้านบน ให้จับเวลาจนน้ำมันไหลถึงระดับเกจวัดด้านล่าง แล้วนำค่าเวลาที่ได้ไปคูณกับค่าแฟกเตอร์ของหลอดแก้วก็จะได้ค่าความหนืดของน้ำมัน (ภาคผนวก จ) ส่วนการทดสอบหาสารเพิ่มคุณภาพในน้ำมัน (Additives) เพื่อจะทราบถึงสัดส่วนของสารเพิ่มคุณภาพ กำมะถัน (S) ฟอสฟอรัส (P) สังกะสี (Zn) แม็กนิเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) สารเพิ่มคุณภาพเหล่านี้จะทำหน้าที่ต่างกันในขณะหล่อลื่น และมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4951 [26] ส่วนการทดสอบหาสารกำมะถันจะต้องใช้มาตรฐาน ASTM D4294 [27]

ข. การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่นและฟิล์มเคลือบผิว

การทดสอบเลือกใช้วิธีบอลบนจานหมุน (Ball-on-Disk) ตามมาตรฐาน ASTM G133-95 [28] เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างบอลโลหะผสมคาร์ไบด์กับจานหมุนเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304

กับน้ำมันหล่อลื่น ส่วนการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของฟิล์มแข็งเคลือบผิวเลือกใช้วิธีหมุดบนจานหมุน (Pin-on-Disk) ตามมาตรฐาน ASTM G99-95a [29] เนื่องจากความสามารถในการเคลือบผิวบนแท่งทดสอบให้ผลได้ดี ทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานฟิล์มแข็งเคลือบผิว 3 ชนิด ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จากเครื่องทดสอบจะเป็นกราฟแสดงผล ซึ่งจะต้องนำกราฟผลการทดสอบนี้ไปวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมที่แสดงถึงความเสียดทานที่เกิดขึ้นเนื่องจากผิวสัมผัสทั้งสองนั้นจริงๆ

6. ออกแบบการทดลอง

การทดลองอิทธิพลของตัวแปรด้านกระบวนการดึงลวดโลหะ เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS 304 ที่ขั้นตอนการดึงขั้นสุดท้าย (Skin Pass) กำหนดให้ใช้ชนิดสารหล่อลื่นประเภทน้ำมัน เปรียบเทียบอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมี อัตราการไหลเข้าของแม่พิมพ์และความเร็วที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป เพื่อจะรวบรวมและเก็บข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลทั้งสามส่วน ที่ส่งผลต่อ ความเรียบผิว (Surface Roughness) แรงในการดึงลวด (Drawing Force) ความถูกต้องแม่นยาของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังการดึง (Diameter of Finished Wire) และคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานสาเร็จ เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์แบบปัจจัยเดียว จำนวนตัวอย่างในการทดลองซ้ำแต่ละกลุ่มเท่ากับ 3 ตัวอย่าง รายละเอียดการหาจำนวนตัวอย่างในการทดลองแสดงในภาคผนวก ช

7. ขั้นตอนการทดลองและเก็บผลการทดลอง

ก. การบันทึกผลก่อนการทดลองดึงลวด

1. วัดความเรียบของลวดก่อนการดึง
2. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูในของแม่พิมพ์ดึงลวด
3. ตรวจวัดน้ำหนักของแม่พิมพ์ดึงลวด
4. วัดคุณสมบัติเบื้องต้นของสารหล่อลื่นที่นำมาทดลอง
5. วัดค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของลวดก่อนการดึง

ข. ขั้นตอนการทดลอง

ทำการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้สารหล่อลื่นที่คุณสมบัติต่างกัน และฟิล์มแข็งเคลือบผิวต่าง ชนิดกัน เริ่มต้นโดยลดขนาดปลายลวดเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยการเจียระไน แล้วทำการดึงเริ่มต้นผ่านแม่พิมพ์ลดขนาด 1.8 มิลลิเมตร เพื่อได้ความยาว 1 เมตร แล้วจึงนำลวดที่ลดขนาดแล้วประกอบเข้ากับเครื่องดึงลวด ดึงผ่านแม่พิมพ์ที่มีขนาดรูใน 1.8 มิลลิเมตรด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 2 ตันทำการดึงลวดแล้วหยุดบันทึกค่าต่างๆ ทุกชิ้น ในทุกการทดลอง

ค. การบันทึกข้อมูล

1. ทำการบันทึกผลการทดลอง ทุกๆ ชิ้นทดลอง
2. แรงที่ใช้ในการดึงลวด หน่วยการวัดเป็น นิวตัน (N) ตรวจสอบโดยใช้เกจวัดแรงดึง - แรงอัด (Push Pull Gage) 500 นิวตัน

3. ตรวจวัดค่าความเรียบผิว R_a และ R_t ของผิวลวดหลังการดึง หน่วยการวัดเป็น ไมโครเมตร (μm) โดยใช้เครื่องวัดความเรียบผิว (Surface Roughness Measuring Devise) โดยใช้เครื่องวัดความเรียบผิว
4. ตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดหลังการดึงเสร็จ หน่วยการวัดเป็นมิลลิเมตร ตรวจสอบโดยใช้ไมโครมิเตอร์ความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร
5. บันทึกภาพถ่ายลักษณะทางกายภาพของผิวลวดและแม่พิมพ์ดึงลวด ตรวจวัดโดยใช้กล้องกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope)
6. วัดค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของลวดหลังการดึง (ภาคผนวก ก)
7. หาค่าแรงดันที่ตำแหน่งสัมผัสในกระบวนการดึงลวดโดยใช้การจำลองกระบวนการจากโปรแกรม DEFORM- 2D V7.10

8. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

8.1 กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope)

ชุดกล้องจุลทรรศน์ใช้ในการถ่ายภาพลักษณะการสึกหรอของแม่พิมพ์ดึงลวด ประกอบด้วย กล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ ZEISS และชุดคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้โปรแกรม Imaging – Pro

รูปที่ 30 ชุดกล้องจุลทรรศน์

8.2 เครื่องชั่งน้ำหนัก (Analytical Plus Electronic Balances GX-400)

ใช้หาการสึกหรอของแม่พิมพ์ดึงลวด โดยตรวจวัดเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแม่พิมพ์ดึงลวดก่อนและหลังการดึงลวด ยี่ห้อ A and D ความเที่ยงตรง 0.001 กรัม และสามารถชั่งชิ้นงานที่มีน้ำหนักมากสุดเท่ากับ 400 กรัม

รูปที่ 31 เครื่องชั่งน้ำหนัก

8.3 เครื่องวัดความเรียบผิว (Surface Roughness Measuring Devise)

เครื่องวัดความเรียบผิว ยี่ห้อ Tayler Hobson precision โปรแกรม Ultra Surface Finished

รูปที่ 32 เครื่องวัดความเรียบผิว

8.4 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Testing Machine)

เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LR 50K

รูปที่ 33 เครื่องทดสอบแรงดึง

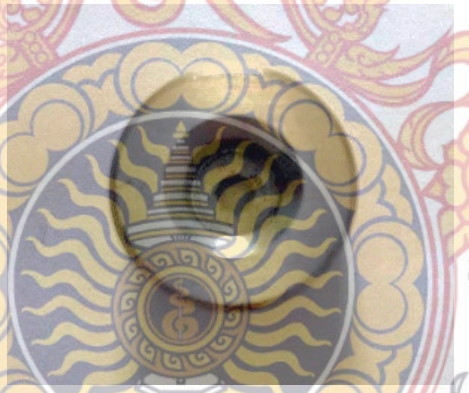
8.5 ดิจิตอลไมโครมิเตอร์

ไมโครมิเตอร์แบบดิจิตอล ยี่ห้อ Mitutoyo ความละเอียด 0.001 มม. ใช้วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดหลังการดึง

รูปที่ 34 ไมโครมิเตอร์แบบดิจิตอล

8.6 ชุดรองรับแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลวด

ชุดรองรับแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลวดทำจากเหล็ก S50C (JIS) เป็นเหล็กคาร์บอนปานกลาง ชุบแข็งได้ง่าย ทนทาน การเสียดสีได้ดี มีความแข็งแรงสูง เหมาะสำหรับ ทำชิ้นส่วนพื้นฐาน หรือโครงสร้างของแม่พิมพ์ และงานทั่วไป ทำขึ้นเพื่อสำหรับรองแม่พิมพ์ที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวดในงานวิจัยนี้



รูปที่ 35 ชุดรองรับแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลวด

8.7 ชุดช่วยดึงแม่พิมพ์

ชุดช่วยดึงแม่พิมพ์ทำจากเหล็ก S50C (JIS) เป็นเหล็กคาร์บอนปานกลาง ทำขึ้นเพื่อช่วยในการดึงแม่พิมพ์ โดยจะติดชุดช่วยดึงแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึงเพื่อเป็นการประคองชุดรองรับแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลวดในการดึงขึ้นรูป

รูปที่ 36 ชุดช่วยดึงแม่พิมพ์

8.8 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสง (light microscope) ประกอบด้วย เลนส์นูนเพียงอันเดียว วัตถุประสงค์เพื่อขยายวัตถุที่จะดูให้ใหญ่ขึ้น ภาพที่ได้เป็นภาพเสมือนและ ข้อสำคัญ วัตถุต้องอยู่ห่างจากเลนส์น้อยกว่าทางยาวโฟกัส เป็นกล้องที่ใช้แสงและมีระบบเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพ 2 ชุด ขยายภาพ 2 ครั้ง ส่วนประกอบสำคัญของกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้ ประกอบไปด้วย ลำกล้อง แขน แท่นที่ใช้วางแผ่นสไลด์ ที่หนีบสไลด์ ฐาน กระจกเงา เลนส์รวมแสง ไดอะแฟรม ปุ่มปรับภาพหยาบ ปุ่มปรับภาพละเอียด และส่วนของเลนส์

รูปที่ 37 กล้องจุลทรรศน์ OLYMPUS รุ่น BX 60 M

8.9 เครื่องขัดเตรียมชิ้นทดสอบ (Grinding and Polishing)

ใช้เตรียมตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบด้วยกล้องไมโครสโคป ในการ เตรียมชิ้นงานเชิงกลนี้ จะต้องมีผงขัดทำหน้าที่ขัดถูเอาผิวชิ้นงานออกไปจนได้ คุณภาพของผิวงานที่เรา ต้องการ ผงขัดที่มีขนาดละเอียดมากๆจะยิ่งทำให้ผิวชิ้นงานเรียบยิ่งขึ้น

รูปที่ 38 เครื่องขัดโครงสร้าง Struers Dap-7

9. การดำเนินงานวิจัย

9.1 สร้างแม่พิมพ์ดึงลวดหน้าตัดกลมแบบดายอินเสิร์ท รูปร่างมาตรฐาน W 103 (JIS B4111) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูในของแม่พิมพ์ 1.9 มิลลิเมตร มีมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ (Approach Angle, 2α) 2 ระดับ คือ 10° และ 15° ตามลำดับ (ครึ่งมุมทางไหลเข้าของแม่พิมพ์ (Semi Angle, α) = 5° และ 7.5°) ระยะกำหนดขนาด (Die Bearing) 2 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแม่พิมพ์ส่วนนอก(Die Insert) 12 x 8 มิลลิเมตร ทำจากโลหะผสมคาร์ไบด์ เกรด K20 (ISO Code)

9.2 ทำการทดลองดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง หน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดก่อนการดึง 2.0 มิลลิเมตร ลดลงเหลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังการดึง 1.8 มิลลิเมตร ทำการดึงลวดขั้นสุดท้าย (Skin Pass) มีอัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด (Reduction Ratio of Cross Sectional Area)%R = 10 % โดยใช้สารหล่อลื่น และมุมดายที่ต่างกันในชิ้นงานการทดลอง

9.3 ทำการดึงลวดโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 2 ตัน ด้วยความเร็วในการดึง 3 ระดับ คือ 0.10 เมตร/นาที , 0.25 เมตร/นาที , 0.40 เมตร/นาที

9.4. หล่อเรซิ่นชิ้นงานที่มุมไหลแม่พิมพ์สามระดับ โดยไม่ใช้สารหล่อลื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำการขัดผิวและนำไปส่องโครงสร้าง เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการไหลตัวของโครงสร้างระดับจุลภาคในแต่ละมุมดาย

9.5 บันทึกผลตรวจวัดค่าความเรียบผิวลวดหลังการดึงและแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป

9.6 เก็บภาพโครงสร้างระดับจุลภาคการไหลตัวของเกรนที่กำลังขยาย 50X

9.7 สรุปผลการวิจัย

10. การวิเคราะห์ข้อมูล

คณะผู้วิจัยได้รวบรวมผลการทดลองจากการวิจัยครั้งนี้ ข้อมูลทั้งหมดในตัวแปรที่กำหนดไว้ นำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบผล เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์

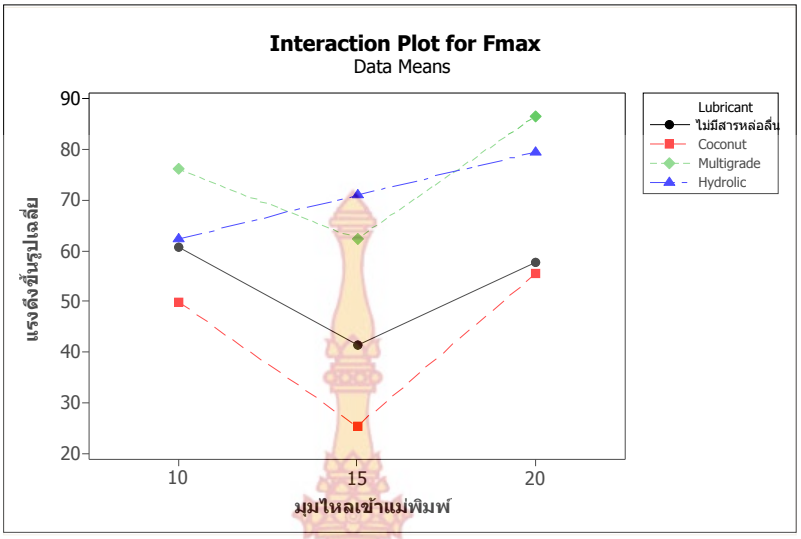
บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

โครงงานชิ้นนี้เป็นการศึกษาวิจัยและทดลอง (Experiments Research) มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อ แรงในการดึงขึ้นรูปลวด คุณสมบัติทางกล ค่าความเรียบพื้นผิว และค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุหลังการขึ้นรูป โดยทำการทดสอบการดึงขึ้นลวดสแตนเลสเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร ทำการดึงผ่านดายหน้าตัดกลมเพื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้เหลือ 1.8 มิลลิเมตร ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ความเร็วในการดึงขึ้นรูป มุมทางเข้าแม่พิมพ์และสารหล่อลื่น เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ เครื่องทดสอบแรงดึง เครื่องวัดความหยาบผิว ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองจากข้อมูลต่างๆ เช่น ค่าความเรียบผิว แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวดค่าความแข็งแรงดึงและ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค โดยเปรียบเทียบจากข้อมูลที่ได้ก่อนและหลังการทดลอง ทดสอบการดึงลวดสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร จำนวน 39 ชิ้น ในการศึกษาปัจจัยที่มีส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานและค่าความแข็งแรงของวัสดุก่อนและหลังการขึ้นรูป คณะผู้วิจัยได้ใช้ Factorial Design วิเคราะห์ผลการทดลอง (ภาคผนวก ค) ข้อมูลคือ ANOVA และค่าระดับความเชื่อมั่น 95% หรือที่ระดับนัยสำคัญ 5% (Q = .05) โดยการเปรียบเทียบแนวโน้มการทดลองในแต่ละตัวแปรที่ต่างกัน ทั้งนี้ยังได้ศึกษาโครงสร้างในระดับจุลภาคหลังการขึ้นรูปในแต่ละมุมดายของลวดเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) เกรด SUS 304 มีความแตกต่างกันอย่างไร โดยตอบตามวัตถุประสงค์การวิจัยดังนี้

1. อิทธิพลของสารหล่อลื่น

1.1 อิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อแรงในการดึงขึ้นรูปลวด

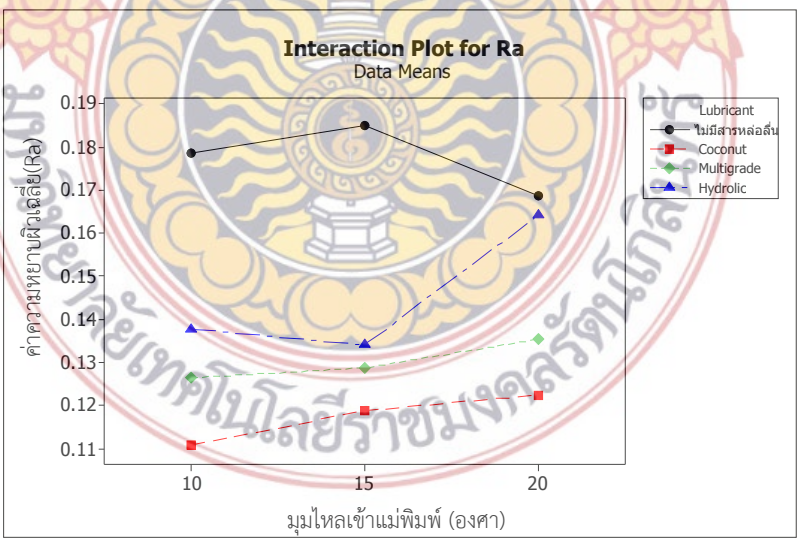
จากผลการวัดแรงที่ใช้ในการดึงลวด อัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 10% พบว่าสารหล่อลื่น Coconut Oil ทำให้แรงที่ใช้ในการดึงลวดน้อยกว่าสารหล่อลื่นชนิดอื่นเนื่องจากแรงต้านทานการไหลตัวของวัสดุต่ำ ในมุมดายที่ต่างกันจะเห็นได้ว่าดายที่มีทางมุมไหลเข้าแม่พิมพ์ (Approach Angle, 2α) 15° มีแนวโน้มการใช้แรงดึงต่ำสุดไปในแนวทางเดียวกันดังรูปที่ 39 ทั้งนี้จากการสังเกตจากกราฟอิทธิพลของสารหล่อลื่นส่งผลต่อแรงในการดึงขึ้นรูปลวดโดยที่สารหล่อลื่น Coconut Oil มีค่าความหนืดต่ำสุดที่ 50.3 cSt. ส่งผลให้แรงในการดึงขึ้นรูปลวดต่ำกว่าสารหล่อลื่นชนิดอื่นซึ่งสัมพันธ์กับมุมไหลเข้าแม่พิมพ์ที่ (Approach Angle, 2α) 15° ใช้แรงในการดึงต่ำกว่ามุมไหลเข้าแม่พิมพ์อื่นๆ



รูปที่ 39 อิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อแรงในการดึงขึ้นรูปลวด

1.2 อิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความหยาบผิวลวดหลังการดึงขึ้นรูปลวด

จากผลการวัดความหยาบผิวตามแนวแกนของลวดอัตราการลดพื้นที่หน้าตัด 5% แสดงดังในรูปที่ 40 พบว่าสารหล่อลื่น Coconut Oil ทำให้ผิวลวดหลังการดึงขึ้นรูปมีความเรียบผิวที่ดีกว่าสารหล่อลื่นชนิดอื่น ในมุมทางไหลเข้าแม่พิมพ์ (Approach Angle, 2α) 10° มีแนวโน้มความเรียบผิวที่ดีเนื่องจากมุมทางไหลเข้าแม่พิมพ์แคบส่งผลให้การรวบผิววัสดุมีมากกว่ามุมทางไหลเข้าแม่พิมพ์กว้าง ทั้งนี้จากการสังเกตจากกราฟแสดงให้เห็นว่าสารหล่อลื่น Coconut Oil มีการสร้างชั้นฟิล์มเคลือบผิวที่ดีกว่าสารหล่อลื่นชนิดอื่นส่งผลให้ค่าความหยาบผิวของวัสดุมีคุณภาพที่ดี

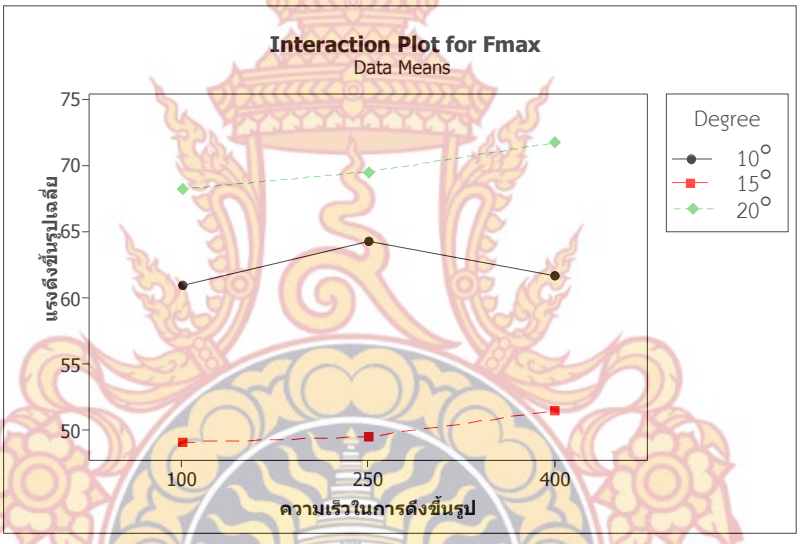


รูปที่ 40 อิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความหยาบผิวลวดหลังการดึงขึ้นรูปลวด

2. อิทธิพลของมุมไหลเข้าแม่พิมพ์

2.1 อิทธิพลของมุมไหลเข้าแม่พิมพ์ที่มีผลต่อแรงในการดึงขึ้นรูปลวด

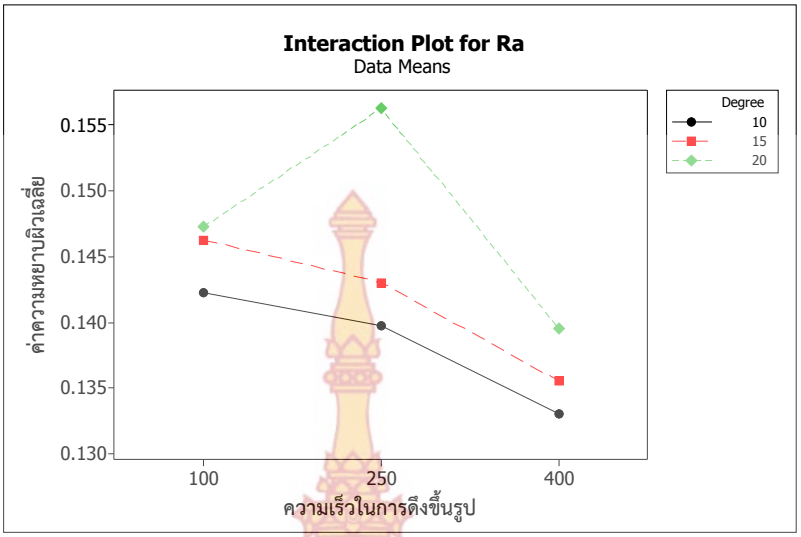
จากผลการศึกษาอิทธิพลของมุมไหลเข้าแม่พิมพ์ที่มีผลต่อแรงในการดึงขึ้นรูปลวดดังแสดงในรูปที่ 41 พบว่าเมื่อมุมไหลเข้าแม่พิมพ์มีมากขึ้นจะทำให้แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวดมากขึ้น ถึงแม้ว่าการที่มุมไหลเข้าที่มีมากจะทำให้พื้นที่เกิดการสัมผัสกันระหว่างผิวลวดกับแม่พิมพ์น้อย ซึ่งน่าจะส่งผลให้แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวดน้อยลง แต่ผลทดลองกลับเป็นไปในทิศทางตรงกันข้าม ทั้งนี้จากการที่แรงดึงลวดประกอบด้วย 3 ส่วนคือแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุ แรงเสียดทานและแรงเฉือนรีดันแดนท์ ทำให้แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองที่มีขนาดมุมกว้างทำให้แรงเฉือนรีดันแดนท์มีผลมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลของเนื้อวัสดุที่แม่พิมพ์ทำมุมมากขึ้นจึงเกิดแรงเฉือนมากขึ้นส่งผลให้แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวดเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 41



รูปที่ 41 อิทธิพลของมุมไหลเข้าแม่พิมพ์ที่มีผลต่อแรงในการดึงขึ้นรูปลวด

2.2 อิทธิพลของมุมไหลเข้าแม่พิมพ์ที่มีผลต่อความหยาบผิวลวดหลังการดึงขึ้นรูปลวด

จากผลการศึกษาอิทธิพลมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ที่มีผลต่อความหยาบผิวลวดหลังการดึงขึ้นรูปลวดพบว่ามุมทางไหลเข้าของแม่พิมพ์ที่แคบนั้นจะมีค่าความเรียบผิวที่ดีกว่ามุมทางไหลเข้าแม่พิมพ์ที่กว้าง ทั้งนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าความเร็วดึงที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อคุณภาพผิวของลวดอีกด้วย

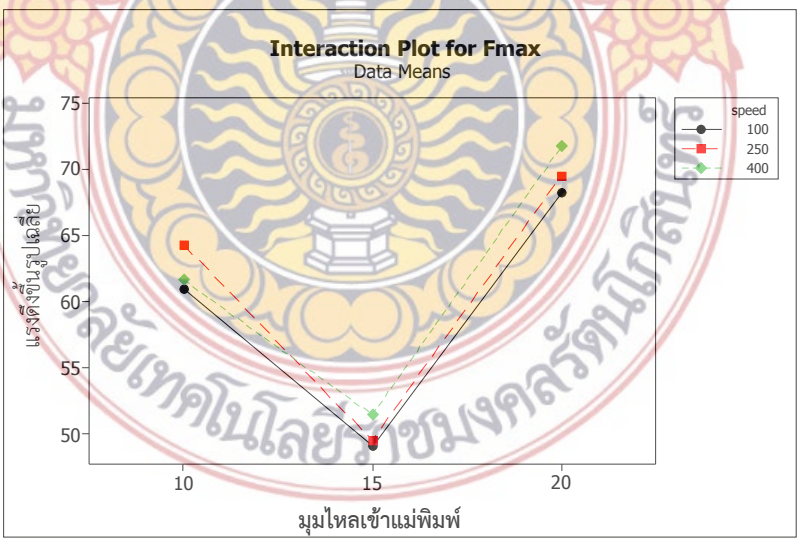


รูปที่ 42 อิทธิพลของมุมไหลเข้าแม่พิมพ์ที่มีผลต่อความหยาบผิวลวดหลังการดึงขึ้นรูปลวด

3. อิทธิพลของความเร็วในการดึงขึ้นรูป

3.1 อิทธิพลของความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่มีผลต่อแรงดึงขึ้นรูปลวด

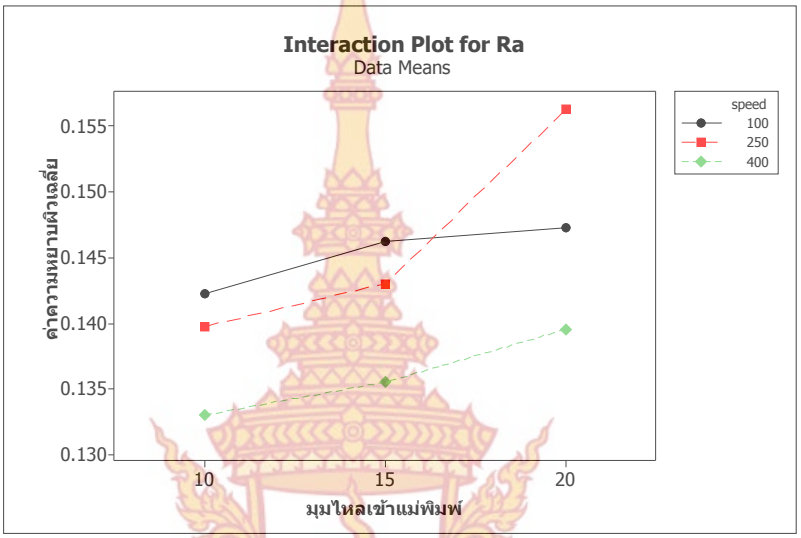
จากการทดลองความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่มีผลต่อแรงในการดึงขึ้นรูปลวด พบว่าทุกความเร็วในการดึงขึ้นรูปใช้แรงในการดึงขึ้นรูปลวดที่ใกล้เคียงกันในทุกมุมไหลเข้าแม่พิมพ์ ซึ่งยังสังเกตได้อีกว่าในมุมไหลเข้าแม่พิมพ์ (Approach Angle, 2α) 15° ใช้แรงในการดึงขึ้นรูปลวดต่ำสุดในทุกความเร็วดึงแสดงให้เห็นว่ามุมไหลเข้าแม่พิมพ์ (Approach Angle, 2α) 15° เหมาะสมในการดึงขึ้นรูปในการทดลองนี้



รูปที่ 43 อิทธิพลของความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่มีผลต่อแรงในการดึงขึ้นรูปลวด

3.2 อิทธิพลของความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่มีผลต่อความหยาบผิวลวดหลังการดึงขึ้นรูป

จากการทดลองความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่มีผลต่อความหยาบผิวลวดหลังการดึงขึ้นรูป พบว่าความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่สูงขึ้นทำให้ความหยาบผิวมีคุณภาพที่ดีขึ้นตรงตามผลการศึกษาในเชิงทฤษฎี อีกทั้งมุมทางไหลเข้าของแม่พิมพ์แคบยังส่งผลต่อค่าความหยาบผิวอีกด้วย

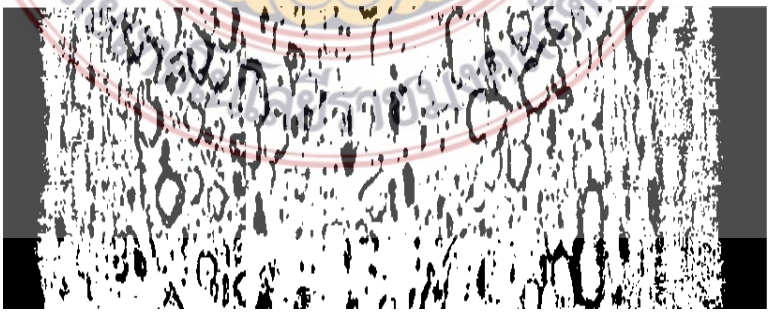


รูปที่ 44 อิทธิพลของความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่มีผลต่อความหยาบผิวลวดหลังการดึงขึ้นรูป

4. โครงสร้างระดับจุลภาคในแต่ละมุมดาย

4.1 มุมไหลเข้าแม่พิมพ์ (Approach Angle, 2α) 10°

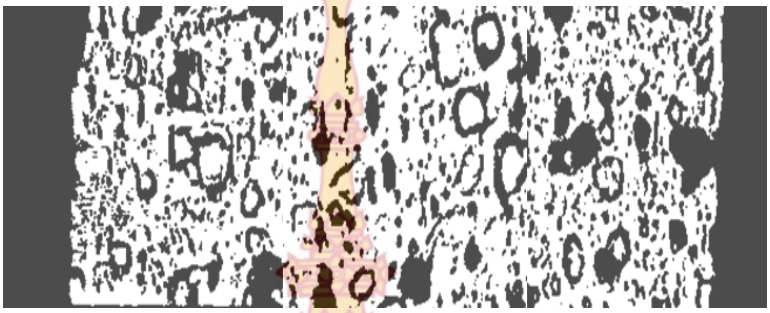
ลักษณะการไหลตัวของโครงสร้างในระดับจุลภาคภายในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปผ่านมุมไหลเข้าแม่พิมพ์ 10° เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ด้านข้างอย่างสังเกตได้ชัด ผิวของลวดด้านข้างเกิดการบีบตัวของโครงสร้างภายในสังเกตได้จากเกรนที่มีการจับกลุ่มกันเป็นก้อนเนื่องจากถูกแรงบีบจากแม่พิมพ์ที่กระทำต่อผิวของลวดเหล็กกล้าไร้สนิมในขณะเดียวกันแกนกลางของลวดที่ไม่ได้สัมผัสกับแม่พิมพ์โดยตรงมีการกระจายตัวของเกรนไปทั่วภายในโครงสร้างของลวดเหล็กกล้าไร้สนิมดังรูปที่ 45



รูปที่ 45 โครงสร้างระดับจุลภาคของลวดเหล็กกล้าไร้สนิม มุมไหลเข้าแม่พิมพ์ 10° ที่กำลังขยาย 50X

4.2 มุมไหลเข้าแม่พิมพ์ (Approach Angle, 2α) 15°

ลักษณะการไหลตัวของโครงสร้างในระดับจุลภาคภายในลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปผ่านดายที่มุมไหลเข้าแม่พิมพ์ 15° เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ด้านข้างเพียงเล็กน้อย เกรนกระจายตัวไปทั่วเนื้อวัสดุบริเวณผิวลวดมีการถูกบีบอัดเพียงเล็กน้อยจากผลกระทบของมุมไหลเข้าแม่พิมพ์ดังรูปที่ 46



รูปที่ 46 โครงสร้างระดับจุลภาคของลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่มุมไหลเข้าแม่พิมพ์ 15° ที่กำลังขยาย 50X

4.3 มุมไหลเข้าแม่พิมพ์ (Approach Angle, 2α) 20°

ลักษณะการไหลตัวของโครงสร้างในระดับจุลภาคภายในวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปผ่านดายที่มุมไหลเข้าแม่พิมพ์ 20° การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยสังเกตได้ยากเป็นผลมาจากมุมทางไหลเข้าแม่พิมพ์ที่มีความกว้าง บริเวณผิวลวดจึงถูกบีบอัดน้อยลงดังรูปที่ 47

รูปที่ 47 โครงสร้างระดับจุลภาคของลวดเหล็กกล้าไร้สนิม มุมไหลเข้าแม่พิมพ์ 20° ที่กำลังขยาย 50X

5. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 อิทธิพลของสารหล่อลื่นที่ส่งผลต่อแรงดึงและค่าความหยาบผิว

จากการทดลองนี้สารหล่อลื่นที่ส่งผลให้แรงดึงต่ำสุดและค่าความหยาบผิวดีที่สุดคือ Coconut oil ซึ่งมีความหนืดต่ำ สันนิษฐานได้ว่าการต้านทานการไหลตัวของวัสดุต่ำและการสร้างชั้นฟิล์มในการเคลือบผิวดีกว่าสารหล่อลื่นชนิดอื่นจึงทำให้ใช้แรงดึงในการขึ้นรูปต่ำสุด ค่าความหยาบผิวยังมีคุณภาพที่ดีกว่าอีกด้วย

5.2 อิทธิพลของมุมไหลเข้าแม่พิมพ์ที่ส่งผลต่อแรงดึงและค่าความเรียบพื้นผิว

จากการทดลองพบว่ามุมไหลเข้าแม่พิมพ์ (Approach Angle, 2α) 15° มีแนวโน้มความหยาบผิวดีที่สุดจากที่ได้ศึกษาทฤษฎีการดึงขึ้นรูปมุมไหลเข้าแม่พิมพ์แคบทำให้มีการรวบตัวของวัสดุสูงจึงส่งผลให้ค่าความหยาบผิวมีคุณภาพที่ดีผลการทดลองนี้จึงเป็นไปตามกรณีศึกษา แต่มุมไหลเข้าแม่พิมพ์ (Approach Angle, 2α) 10° ใช้แรงดึงขึ้นรูปต่ำสุดจึงสรุปได้ว่ามุมไหลเข้าแม่พิมพ์ 15° เป็นมุมที่เหมาะสมในการทดลองนี้

5.3 อิทธิพลของความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ส่งผลต่อแรงดึงและค่าความเรียบพื้นผิว

จากการทดลองความเร็วในการขึ้นรูปที่ 30 เมตร/นาที พบว่าใช้แรงในการดึงขึ้นรูปต่ำสุดเป็นไปได้ว่าการรวบตัวของวัสดุเกิดขึ้นอย่างช้าๆและอยู่ในมุมไหลเข้าแม่พิมพ์ที่เหมาะสมจึงทำให้ใช้แรงในการขึ้นรูปต่ำสุด ในขณะที่ความเร็ว 120 เมตร/นาที ส่งผลให้ค่าความเรียบผิวดีที่สุดทั้งนี้ขึ้นอยู่กับมุมไหลเข้าแม่พิมพ์และสารหล่อลื่นที่เหมาะสมอีกด้วย

5.4 อิทธิพลของขนาดมุมดายที่ส่งผลต่อ โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ

จากการทดลองขัดส่องโครงสร้างในระดับจุลภาคเพื่อดูการไหลตัวของเกรนแล้วพบว่าในมุมไหลเข้าแม่พิมพ์แคบเกรนมีลักษณะเรียวยาวไปตามแนวดึงขึ้นรูปที่ผิวลวดในขณะที่แกนกลางของลวดเหล็กกล้าไร้สนิมกระจายตัวไม่ถูกบีบอัดจับกลุ่มเป็นก้อนเหมือนบริเวณผิวลวดซึ่งแนวโน้มการไหลตัวของเกรนเป็นไปตามสันนิษฐานว่ามุมไหลเข้าที่กว้างขึ้นทำให้การถูกบีบอัดของเกรนน้อยลง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผล

1.1 ในการทดลองแรงดึงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวดนั้นพบว่ามุมทางไหลเข้าแม่พิมพ์ที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองนี้คือ (Approach Angle 2α) 15° สัมพันธ์กับสารหล่อลื่นที่ใช้แรงดึงในการขึ้นรูปต่ำสุดและให้คุณภาพผิวดีที่สุด ซึ่งความเร็วที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปแนวโน้มของแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปนั้นไม่แตกต่างกันมากนัก (ภาคผนวก ง รูปที่ ง-1)

1.2 ในการทดลองความหยาบผิวลวดหลังการดึงขึ้นรูปพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของลวดเหล็กกล้าไร้สนิม คือ มุมทางไหลเข้าของแม่พิมพ์แคบซึ่งส่งผลให้คุณภาพผิวดีที่สุด เปรียบเทียบถ้าหากเพิ่มอัตราเร็วแต่ดึงด้วยแม่พิมพ์มุมทางไหลเข้าแคบในการดึงลวดคุณภาพผิวดีกว่าเส้นลวดที่ถูกดึงด้วยความเร็วที่เท่ากันที่ถูกดึงด้วยแม่พิมพ์มุมทางไหลเข้าแม่พิมพ์กว้าง ทั้งนี้สารหล่อลื่นยังมีส่วนช่วยให้คุณภาพผิวลวดหลังการดึงดีขึ้นอีกด้วย (ภาคผนวก ง รูปที่ ง-2)

1.3 จากการสังเกตการไหลตัวของโครงสร้างในระดับจุลภาคในมุมไหลเข้าแม่พิมพ์แคบการรวบตัวของวัสดุจึงมีมากทำให้เกรนด้านข้างเกาะกลุ่มกันและมีลักษณะเรียวยาว ในขณะที่มุมไหลเข้าแม่พิมพ์กว้างขึ้นการรวบตัวของวัสดุก็น้อยลงตามลำดับ

2. ข้อเสนอแนะ

2.1 ในการทดลองครั้งต่อไป สามารถนำโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการจำลองพฤติกรรมการขึ้นรูปกับวัสดุชนิดอื่นๆ เพื่อดูแนวโน้มความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปและนำไปทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2 ในขั้นต่อไปสามารถนำการทดลองนี้ไปทดลองกับสารหล่อลื่นชนิดอื่นๆ หรือ วัสดุชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน และสรุปผลเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างวัสดุสองชนิดได้

บรรณานุกรม

[1] Avitzur**,** B.Z.L., 1968, **Metal Forming**, McGraw-Hill, New York, pp. 219-246.

[2] Rer. nat. F. Endres, 1990, **Wire Drawing Machines**, [Online] Available : http://www.imet.tu-clausthal.de/en/techdienst/wu1.shtml, [2005, June 30].

[3] Lange, K.,1985, **Handbook of Metal forming**, McGrawHill, New York, pp. (13.14) – (14.14).

[4] Skolyszewski, A., Packo, M., Luksza, J. and Ruminski, M., 2002, "Warm Forming of Acid Resistant Steel Wires Used for Manufacturing of Springs", **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 125-126, pp. 326-333.

[5] United Tungsten & Diamond Company Limited, 2546, **มาตรฐานแม่พิมพ์ดึงลวดกลม JIS B4111** (เอกสารแนะนำสินค้า), หน้า 8.

[6] Schey, J.A.,1984, **Tribology in Metal Working**, American Society for Metals, pp. 343-391.

[7] Dieter, G.E.,1988, **Mechanical Metallurgy**, McGraw-Hill, New York, pp. 503-505.

[8] Blazynski, T.Z., 1976, **In Metal Forming Tool Profiles and Flow**, Unwin Brothers Ltd., London, pp. 222-238.

[9] วีระศักดิ์ กรัยวิเชียร, 2544, **น้ำมันหล่อลื่น**, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 1-7.

[10] ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์, John T.H. Pearce, ผกามาศ แซ่หว่อง, วารุณี เปรมานนท์, สุรพล ราษฎร์นุ้ย และ สิทธิชัย วิโรจนุปถัมภ์, 2545, **การสึกหรอ**, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, หน้า 129-132.

[11] วารุณี เปรมานนท์, 2547, “Tribological Behavior of Tool Materials Against Stainless Steel Workpiece Material in a Ball-on-disk Model Wear Device”, **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18**, 18-20 ตุลาคม, pp. 521-242.

[12] ปัญญา ศรีจันทร์ และ ทิพบรรณ สุดประเสริฐ, 2545, **โลหะ วัสดุและการกัดกร่อน**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ, หน้า 35-45.

[13] Sumitomo, 2000, **Diamond-like Carbon**, [Online] Available : http://www.sei.co.jp/RandD/ itami/e-tool/wadaien.html, [2005, June 30].

[14] พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์, 2544, “A Study on the Effect of Drawing Speed on the Performances of Wire Drawing Process”, **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15**, 15-17 ตุลาคม, pp. 151-155.

[15] สมชัย นรเศรษฐ์โศภณ และ ธนิต แต่งศรี, 2545, “Effect of Half Die Angle and Lubricant Pressure on Drawn Copper Wire Hardness by Experiment”, **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16**, 14-16 ตุลาคม, pp. 521-242.

[16] Aguilar, M.T.P., Correa, E.C.S., Silva, R.F. and Cetiin, P.R., 2002, “The Evaluation of Redundant Deformation Factors in Axi-symmetric Bar Drawing Austenitic Stainless Steel”, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 125-126, pp. 323-325.

[17] Bech, J., Bay N. and Eriksen, M., 1999, “Entrapment and Escape of Liquid Lubricant in Metal Forming”, **Journal of Wear**, Vol. 232, pp. 134-139.

[18] Lee, B.H., Keum, Y.T. and Wagoner, R.H., 2002, “Modeling of the Friction Caused by Lubrication and Surface Roughness in Sheet Metal Froming”, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 130-131, pp. 60-63.

[19] Kim, T.H., Kim, B.M. and Choi, J.C., 1997, “Prediction of Die Wear in the Wire Drawing Process”, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 65, pp. 11-17.

[20] Sebastian Hollinger, Eric Depraetere and Olivier Giroux, 2003, "Wear Mechanism of Tungsten Carbide Dies During Wet Drawing of Steel Type Cords", **Journal of Wear**, Vol. 225, pp. 1291-1299.

[21] Wang, H.L., He, J.L., and Hom, M.H., 1993, "Sliding Wear Resistance of TiCN Coatings on Tool Steel Made by Plasma-enhanced Chemical Vapour Deposition", **Journal of Wear**, Vol. 169, pp. 195-200

[22] Teisuke Sato and Tatsuo Besshi, 1998, "Evaluation of Wear and Tribological Properties of Coating Rubbing Against Copper", **Journal of Wear**, Vol. 220, pp. 154-160

[23] Tsao Chung Chen and Hocheng Hong, 2002, "Comparison of the tool life of tungsten carbides coated by multi layer TiCN and TiAlCN for end mills using the Taguchi method"**, Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 123, pp. 1-4

[24] Te-Hua Fang and Sheng-rui Jian, 2004, "Nanomechanical properties of TiC, TiN and TiCN thin films using scanning probe microscopy and Nanoindentation", **Journal of Applied Surface Science,** Vol. 228, pp. 365-372.

[25] Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (the Calculation of Dynamic Viscosity) , ASTM D445, pp. 168-173.

[26] Standard Test Method for Determination Additive Elements in Lubricating oils by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry, ASTM D4951.

[27] Standard Test Method for Sulfur in Petroleum Products by Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence Spectroscopy, ASTM D4294.

[28] Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear, ASTM G113-95, 1997, pp. 523-536.

[29] Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus[1], ASTM G99-95a, 1997.

[30] Dougls, C. Montgomery, 1996, **Design and Analysis of Experiments**, John Wiley & Son, New York, pp. 63-644.

[31] Manam Stainless Wire Company Limited, 2547, **ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน JIS G4309** (เอกสารแนะนำสินค้า), หน้า 2-4.

[32] Donald P. and Bernstein I. M., **Handbook of Stainless Steels**, [Online], Available : http://www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=Q304A[2005, June

[33] Serope Kalpakjian, 1991, **Manufacturing Processes for Engineering Material**, Addision-Wesley Publising Company, Illinois Institute of Technology, pp. 49-85, pp. 38.

[34] William D. Callister, Jr., 2001, **Fundamentals of Materials Science and Engineering**, John Wiley& Sons, New York, pp. 445-448.

[35] Bharat Bhushan, 2001, **Modern Tribology Handbook**, Boca Raton London, New York, pp. 49-85, pp. 122-123.

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติวัสดุชิ้นงานและแม่พิมพ์

ก.1 คุณสมบัติต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304

ตารางที่ ก.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก SUS 304 อ้างอิงจากบริษัท ผู้ผลิตลวดเหล็กกล้าไร้สนิม บริษัท Manam Stainless Wire Company Limited [31]

ส่วนผสมทางเคมี								
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	Other
0.08	1.0	2.0	0.045	0.03	8.0-10.5	18.0-20.0	-	0.1

ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 [32], [33]

คุณสมบัติทางกล	ค่า
Hardness, Vickers	129
strain hardening exponent	0.45
strength coefficient	1275
Modulus of Elasticity	193-200 GPa
Poisson's Ratio	0.29

ตารางที่ ก.3 คุณสมบัติทางกลของทังสเตนคาร์ไบด์ [34]

คุณสมบัติทางกล	ค่า
Modulus of Elasticity	400 GPa
Poisson's Ratio	0.28

ภาคผนวก ข

มาตรฐานและการคำนวณที่เกี่ยวข้อง

ข.1 การคำนวณแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด

การคำนวณแรงในการดึงขึ้นรูปนี้เพื่อจะทราบแรงในทางทฤษฎี และใช้อ้างอิงกับแรงที่ได้จากการทดลองว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งจากผลการทดลองจะมีค่าแรงที่ใกล้เคียงกันยกเว้นกรณีที่เกิดการเชื่อมเย็นจะใช้แรงดึงที่สูงมาก ในการทดลองจะใช้ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ค่า Ultimate Tensile Strength = 419.7 N/mm^2 มีมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ (Approach Angle) (2α) = 15°, Semi Angle (α) = 7.5°

1. อัตราการลดขนาดหน้าตัดของลวด [1]

$$\%R = \frac{A_0 - A_1}{A_1} \times 100$$

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง [mm^2]

A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง [mm^2]

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดก่อนการดึง 2 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดหลังการดึง 1.8 มิลลิเมตร

พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง

$$A_1 = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A_0 = \frac{\pi 2.40^2}{4}$$

$A_0 = 4.5216$ mm^2

พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง

$$A_1 = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A_1 = \frac{\pi 2.30^2}{4}$$

$A_1 = 4.1526$ mm^2

อัตราการลดขนาดหน้าตัดของลวด

$$\%R = \frac{A_0 - A_1}{A_1} \times 100$$

$$\%R = \frac{4.5216 - 4.1526}{4.1526} \times 100$$

%R = 8.89

2. ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ตารางที่ ข.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในงานดึงขึ้นรูปและงานอัดขึ้นรูปชิ้นงาน [3]

Process	Solid Forward Extrusion	Hollow Forward Extrusion	Drawing of Bar and Tubes	Ironing	Drawing of Hollow Bodies
สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ)	0.04-0.08	0.1-0.125	0.02-0.05	0.02-0.07	0.02-0.08

3. การคำนวณหาแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด

แรงที่ใช้ในการดึงลวด ใช้การคำนวณโดย Siebel's Method [2]

(ข.1)

$$F_{D,tot} = A_1 \times \sigma_{f,m} \times \left[\left(1+\frac{2\mu}{\sin 2\alpha}\right)\varphi_{max} + \frac{2}{3}\hat{\alpha}\right] \quad \text{(ข.2)}$$

เมื่อ

A_0 = พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง [mm^2]

A_1 = พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง [mm^2]

$\sigma_{f,m}$ = ความเค้นในแนวแกน ความเค้นของการไหลเฉลี่ย [N/mm^2]

μ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน Coulomb's coefficient of friction ($\mu \approx 0.035$)

α = ครึ่งมุมไหลเข้าแม่พิมพ์

$\hat{\alpha}$ = $\tan \alpha$

เมื่อ $\hat{\alpha}$ = 0.1051

เมื่อ φ_{max} = ความเครียด

$$\varphi_{max} = \ln \frac{4.5216}{4.1145}$$

$$\varphi_{max} = 0.09436$$

เมื่อ $\sigma_{f,m}$ = ความเค้นของการไหลเฉลี่ย ความเค้นในแนวแกน [N/mm^2]

$$\sigma_{f,m} = \frac{1}{2}(\sigma_{f,0} + \sigma_{f,1})$$

$$\sigma_{f,m} = \frac{1}{2}(344 + 365)$$

$$\sigma_{f,m} = 354.5 \text{ N/m}^2$$

แรงดึงในการขึ้นรูป

$$F_{D,tot} = A_1 \times \sigma_{f,m} \times \left[\left(1 + \frac{2\mu}{\sin 2\alpha}\right)\varphi_{max} + \frac{2}{3}\hat{\alpha}\right]$$

$$F_{D,tot} = 4.1526 \times 354.5 \times \left[\left(1 + \frac{(2)0.08}{0.208}\right)0.0944 + \frac{2}{3}0.1051\right]$$

$$F_{D,tot} = 4.1526 \times 354.5 \times \left[\left(1 + \frac{0.16}{0.208}\right)0.0944 + \frac{2}{3}0.1051\right]$$

$$F_{D,tot} = 4.1526 \times 354.5 \times \left[(1.76)0.0944 + 0.07\right]$$

$$F_{D,tot} = 4.1526 \times 354.5 \times \left[0.166 + 0.07\right]$$

$$F_{D,tot} = 4.1526 \times 354.5 \times 0.236$$

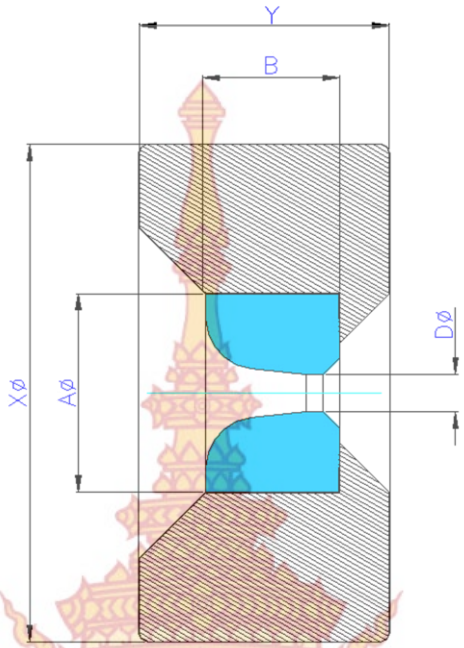
$$F_{D,tot} = 346.92 \text{ N}$$

∴ แรงในการดึงขึ้นรูป 346.92 นิวตัน

ภาคผนวก ค

มาตรฐานแม่พิมพ์ดึงลวดและการออกแบบ

ค.1 มาตรฐานแม่พิมพ์ดึงลวดและการออกแบบ



รูปที่ ค.1 ขนาดของแม่พิมพ์ดึงลวดกลม ตามมาตรฐาน JIS B4111 [5]

ตารางที่ ค.1 ขนาดมาตรฐาน JIS B4111 ของแม่พิมพ์ดึงลวดกลม [5]

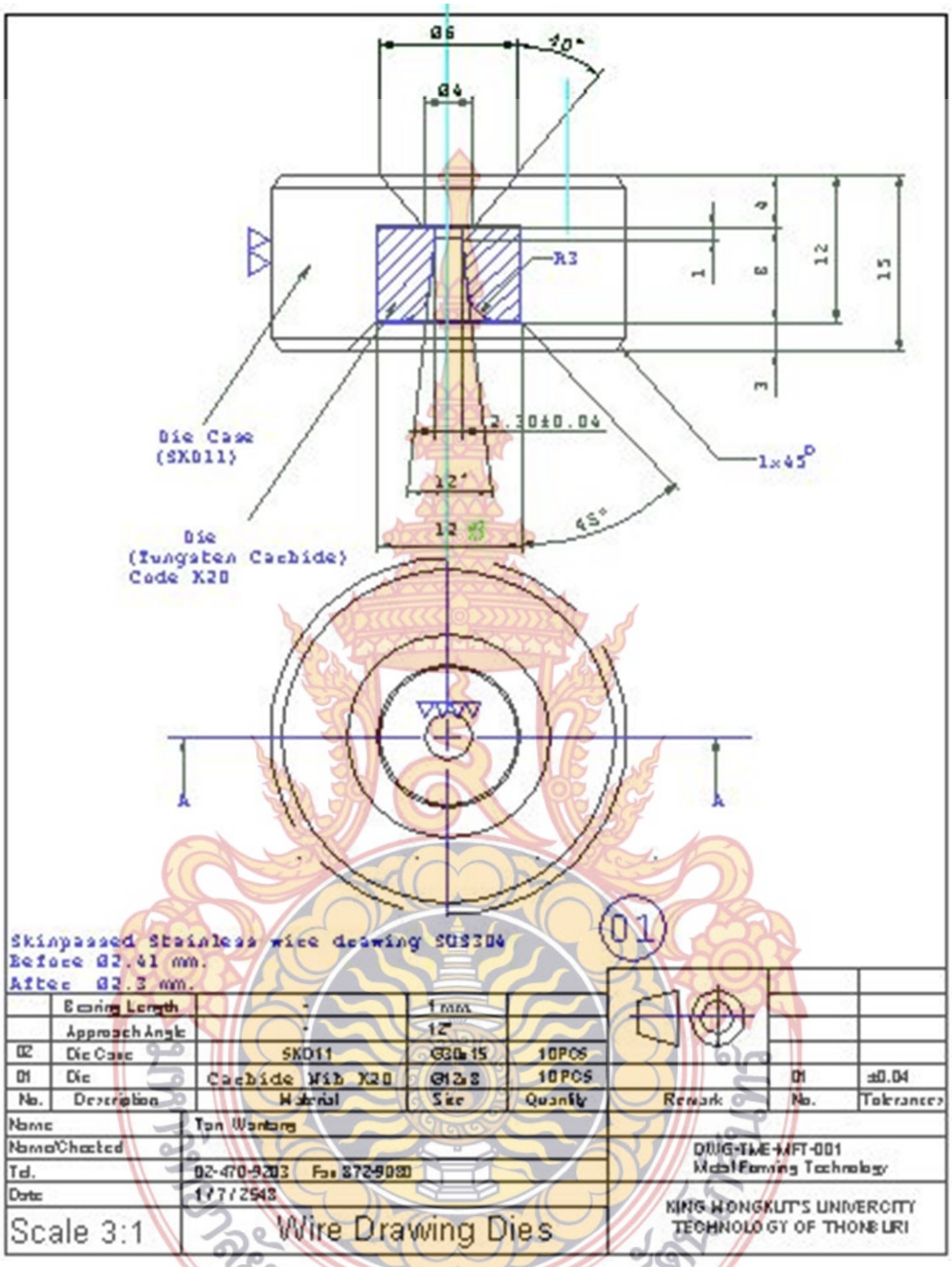
ชนิด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูใน D มม.	Steel Case		Carbide Nib	
		X มม.	Y มม.	A มม.	B มม.
W 102	0.7-1.5	24	12	9	6
W 103	1.5-2.5	30	15	12	8
W 104	2.5-4	42	20	15	10
W 105	4-6	55	24	20	14
W 106	6-8	60	28	25	18
W 107	8-10	70	35	30	22
W 108	10-13	85	40	35	25
W 109	11-16	100	45	40	27
W 110	16-20	125	50	50	30
W 111	20-26	145	60	60	35

ตารางที่ ค.1 ขนาดมาตรฐาน JIS B4111 ของแม่พิมพ์ดึงลวดกลม [5] (ต่อ)

ชนิด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูใน D มม.	Steel Case		Carbide Nib	
		X	Y	A	B
		มม.	มม.	มม.	มม.
W 112	26-32	175	70	70	40
W 113	32-36	195	80	80	45
W 114	38-46	215	96	90	50
W 115	46-54	230	90	100	50
W 116	54-64	240	90	110	50
W 117	64-74	260	100	120	50
W 118	74-84	280	100	130	50
W 119	84-94	300	100	140	50
W 120	94-104	300	100	150	50

ตารางที่ ค.2 คุณสมบัติของคาร์ไบด์เกรดที่ใช้ทำแม่พิมพ์ในการทดสอบ ตามมาตรฐานคาร์ไบด์ เกรด K20 (ISO Code) อ้างอิงตามมาตรฐาน บริษัท ยูไนเต็ด ทังสเตน แอนด์ ไดมอนด์ จำกัด (United Tungsten & Diamon Co.,LTD) ผู้ผลิตแม่พิมพ์ดึงลวด [5]

คุณสมบัติ	**ค่า**
Hardness (HRA)	91.5-92.4
TRA (KPSI)	>240
T.R.S Kg/mm^2	200
Density (g/cc)	14.80-15.10



รูปที่ ค.2 ภาพตัดแม่พิมพ์ดึงลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00 มิลิเมตร

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐศักดิ์ พรพุฒิศิริ

สังกัด คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

วุฒิการศึกษา

- ***ปริญญาโท***
  วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต (วศ.ม.) เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ
  มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2545
- ***ปริญญาตรี***
  ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต(คอ.บ.) วิศวกรรมอุตสาหการ
  สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้(สงขลา) พ.ศ. 2540

ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ระดับ 8

สถานที่ทำงาน สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมการออกแบบแม่พิมพ์
คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
ถนนเพชรเกษม ตำบลหนองแก อำเภอหัวหิน
จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110