

การศึกษาอิทธิพลของสารหล่อลื่นในงานลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบ
มีปีกด้วยเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์

STUDY OF LUBRICANTS EFFECT FOR RECTANGULAR CUP
DEEP DRAWING OF AUTOMOBILE STRUCTURAL STEEL

บัญชา วงศ์ศรีทา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาอิทธิพลของสารหล่อลื่นในงานลากจูงรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมี
ปีกด้วยเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์

บัญชา วงศ์ศรีทา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของสารหล่อลื่นในงานลากขึ้นรูปด้วยสตีลเหล็ย จตุรัสแบบมีปีกด้วยเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์
ชื่อ - นามสกุล	นายบัญชา วงศ์ศรีทา
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์กุลชาติ จุลเพ็ญ, D.Eng.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลสารหล่อลื่น ที่มีผลต่อความหยาบของผิวชิ้นงานในกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยสตีลเหล็ยจตุรัสแบบมีปีกด้วยเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์

สารหล่อลื่นที่นำมาศึกษาเพื่อเปรียบเทียบครั้งนี้มีอยู่ 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมันสังเคราะห์สารหล่อลื่นสังเคราะห์และน้ำมันจากพืช รวมทั้งหมด 5 ชนิด โดยทดลองกับวัสดุเหล็กกล้ารีดร้อนตามมาตรฐาน JIS G 3113 เกรด SAPH440 หนา 1.4 มิลลิเมตร ทำการลากขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึกลงให้ได้ชิ้นงานรูปด้วยสตีลเหล็ยจตุรัสแบบมีปีก ขนาดกันด้วยมีความยาวด้านละ 60 มิลลิเมตร และมีความลึก 30 มิลลิเมตร ความกว้างปีกด้วยด้านละ 4 มิลลิเมตร ที่ขนาดรัศมีบ่าตาย 6 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร

ผลการทดลองพบว่าสารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิด ไม่มีอิทธิพลต่อแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปเนื่องจากแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปมีความแตกต่างกันน้อยมาก และสารหล่อลื่นทุกชนิดสามารถช่วยให้ทำการลากขึ้นรูปได้สำเร็จ สำหรับผลความหยาบผิวชิ้นงานหลังการลากขึ้นรูป สารหล่อลื่นสังเคราะห์ที่มีความหนืดปานกลาง มีสารเพิ่มคุณภาพกัมมะถันและฟอสฟอรัส ส่งผลต่อความหยาบผิวในการลากขึ้นรูปเหล็กกล้ารีดร้อนดีที่สุดคือ ชิ้นงานมีความหยาบผิวน้อยที่สุด และความหนาเปลี่ยนแปลงจากเดิมน้อยที่สุด ด้านผนังด้วยมีความหยาบผิวน้อยกว่าผิวชิ้นงานเริ่มต้น และมีรัศมีบ่าตายเท่ากับ 6 มิลลิเมตร ผนังด้วยมีความหยาบผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อรัศมีบ่าตายน้อยลงทำให้การไหลตัวของแผ่นชิ้นงานผ่านรัศมีบ่าตายเป็นไปได้ยากขึ้น เป็นอุปสรรคต่อการแทรกตัวของสารหล่อลื่น จึงเกิดการเสียดสีกันของโลหะด้านผนังด้วยมากกว่าที่รัศมีบ่าตาย 10 มิลลิเมตร

คำสำคัญ: แรงในการขึ้นรูป, สารหล่อลื่น, ความหยาบผิว, บ่าตาย

Thesis Title	Study of Lubricants Effect for Rectangular Cup Deep Drawing of Automobile structural steel
Name – Surname	Mr.Bancha Wongsritha
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Mr Kunlachat Junlapen, D.Eng.
Academic Year	2012

ABSTRACT

This research was a study go compare the effect of lubricants influencing to surface roughness of square cup by deep drawing process with automobile structural steel material.

The lubricants used in this comparative study included 3 categories of them, namely, synthetic oil, synthetic lubricant, and vegetable oil, total 5 kinds classified whereby the experiment was conducted in application with automobile structural steel according to JIS G 3113 Grade SAPH440, 1.4 mm thickness. The cup formation was made by using deep drawing punch and die into the work piece in flange or winged square cup-shaped, bottom width of the cup is 60 mm and the cup depth in 30 mm, cup edge of 4 mm in each side, radius of the die shoulder in 6 mm and 10 mm

The experimental result, it was found that all 5 kinds of lubricants had no influence to the punch force used in forming the cup because the punch force used in forming the cup was very little different and all kinds of lubricants could help to draw up forming successfully. For the surface roughness effect to the work piece after being drawn up. The synthetic lubricants which he quality enhancing additives by mixing of sulphur and phosphorus have the best effect in the flanged square cup deep drawing die with automobile structural steel material that it yielded the best surface roughness and the thickness changed least from its. The inner wall of the cup is surface roughness, less than resolution than the initial work piece surface. And when the die radius equaled to 6 mm cup wall surface is rougher surface because the decrement of the die radius made the flow of the material through the die radius more difficult that effect to the insertion or lubricate of lubricants, caused more friction of metal at the cup wall than when cup die radius was set at 10 mm

Keywords : punch force, lubricants, surface roughness, die radius

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาดลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

งานวิจัยนี้ได้รับความร่วมมือจาก นายกฤษฎา หนูมา นายศรัณ ลอยวรรณ นายบรรพต ชาติมนตรี นายอนิรุช ปิ่นแก้ว นายอิสสร่า ไหมพรหม นายชิษณุ สุระทักษะ นายสรพงศ์ วงษ์พัฒน์ นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยทำการทดลองและบันทึกผล และขอขอบคุณบริษัท เฮคตันอินเตอร์เนชั่นนอล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารหล่อลื่นที่นำมาใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณ บริษัท พนมไพร ฟริชชั่น จำกัด ที่ได้สนับสนุนเครื่องจักรและอุปกรณ์ในการวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือที่นำมาใช้ในการวิจัย ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ นอกเหนือจากนี้ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ที่ได้ให้ทุนการศึกษา เพื่อใช้เป็นค่าเล่าเรียนในครั้งนี้อย่างต่อเนื่องระยะเวลาในการศึกษาของผู้วิจัย

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

บัญชา วงศ์ศรีทา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎี.....	4
2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	19
2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับไตรบอโลยีในการลากขึ้นรูป.....	21
2.4 สารหล่อลื่น.....	26
2.5 ความหยาบผิวและวิธีการวัดค่า.....	35
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	45
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	45
3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุในการดำเนินการวิจัย.....	47
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	50
3.4 วิธีการดำเนินงาน.....	54
3.5 การคำนวณทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	55
3.6 การประกอบแม่พิมพ์.....	60

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.7 ความหยาบผิวและวิธีการวัดค่า.....	69
3.8 การวัดความหนาของชิ้นงาน	73
3.9 ลำดับขั้นตอนในการทดลอง	74
4 ผลการวิจัย.....	75
4.1 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการถากขึ้นรูป.....	75
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ.....	88
5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	95
5.1 สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล	95
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	96
5.3 ข้อเสนอแนะ	96
รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก.....	99
ภาคผนวก ก ตารางแสดงคุณสมบัติของเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์ SAPH440	99
ภาคผนวก ข สมบัติของสารหล่อลื่น	102
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ผลทดลองทางสถิติ	106
ภาคผนวก ง ตารางและกราฟแสดงค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูป	109
ภาคผนวก จ ค่าความเรียบผิวบริเวณผิวนอกชิ้นงาน	116
ภาคผนวก ฉ ผลงานตีพิมพ์และเผยแพร่	127
ประวัติผู้เขียน.....	144

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่า a_{cr} ของวัสดุชนิดต่าง ๆ	11
2.2 ระยะช่องว่างระหว่างพื้นซ์	14
2.3 สมบัติของสารหล่อลื่น	29
2.4 ราคาของสารหล่อลื่น	29
2.5 สารเพิ่มคุณภาพในสารหล่อลื่น	29
2.6 ระบบหน่วยและอนุกรมที่วัดความหนืดของน้ำมัน	30
2.7 สารเพิ่มคุณภาพ.....	34
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์ SAPH440	49
3.2 สมบัติทางกลของเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์ SAPH440 (JIS)	50
4.1 ผลการทดลองแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปที่รัศมีบาคาย 6 มิลลิเมตร	89
4.2 ตาราง ANOVA สำหรับข้อมูลในตารางที่ 4.1	90
4.3 ผลการทดลองแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปที่รัศมีบาคาย 10 มิลลิเมตร	90
4.4 ตาราง ANOVA สำหรับข้อมูลในตารางที่ 4.3	91
4.5 ผลการทดลองค่าเฉลี่ยความเรียบผิว (R_a) ได้จากการลากขึ้นรูปที่รัศมีบาคาย 6 มิลลิเมตร	92
4.6 ตาราง ANOVA สำหรับข้อมูลในตารางที่ 4.5	93
4.7 ผลการทดลองค่าเฉลี่ยความหยาบผิว (R_a) ได้จากการลากขึ้นรูปที่รัศมีบาคาย 10 มิลลิเมตร	93
4.8 ตาราง ANOVA สำหรับข้อมูลในตารางที่ 4.7	94

สารบัญภาพ

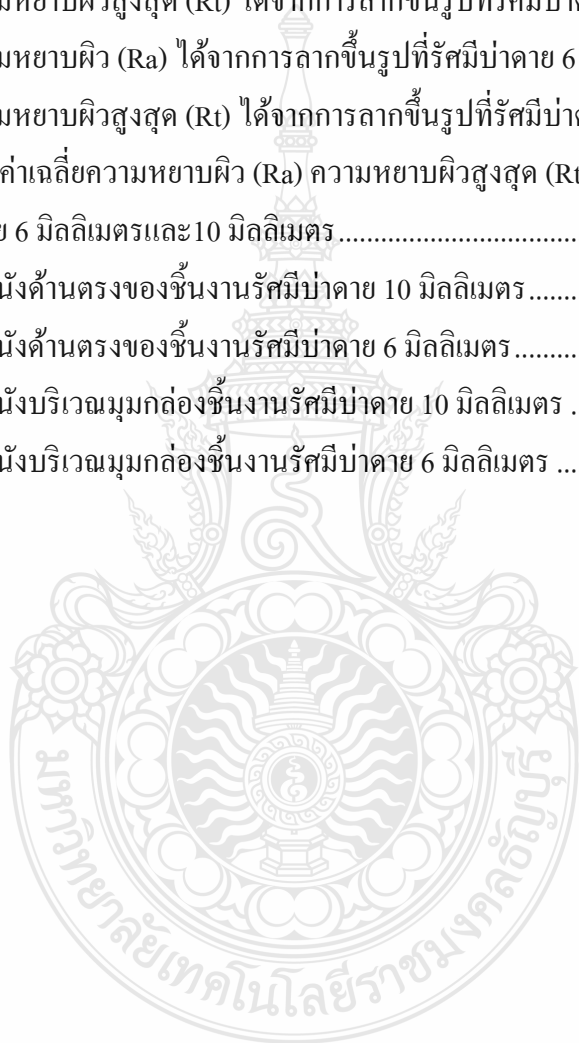
ภาพที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบหลักของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก	4
2.2 พฤติกรรมการไหลตัวของโลหะแผ่นภายใต้กระบวนการลากขึ้นรูปลึก	5
2.3 การแบ่งถ้วยสี่เหลี่ยมออกเป็นส่วนต่างๆ	6
2.4 การวิเคราะห์ที่มุมของถ้วยสี่เหลี่ยม	7
2.5 การไหลของของโลหะที่บริเวณผนังส่วนตรงของการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยม	9
2.6 ลักษณะของรอย่นที่เกิดจากอัตราการไหล	10
2.7 จีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด β_{max} ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลาง ของพืนซ์ $dp/S0$	14
2.8 การลากขึ้นรูปโลหะ	16
2.9 ความเค้นที่เกิดขึ้นในส่วนเล็กๆของโลหะแผ่นในโซน X	17
2.10 ค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงไป	18
2.11 สภาพของสารหล่อลื่นในกระบวนการการลากขึ้นรูปลึก	24
2.12 หลักการของความหนืด	31
2.13 สภาพผิวหน้าที่ยอมรับได้หลายๆ กันแต่ความหยาบผิวต่างกัน	37
2.14 เส้นกราฟของความสูงจากยอดถึงปลายล่างสุด	38
3.1 แผนการไหลแสดงกระบวนการในการทำวิจัย	46
3.2 ขนาดของแผ่นขึ้นงานก่อนการลากขึ้นรูป	47
3.3 ชิ้นงานทดสอบความต้านแรงดึงและความยืด	48
3.4 เครื่องทดสอบแรงดึง	48
3.5 เครื่องปั๊มไฮดรอลิกแรงอัดสูงสุด 80 ตัน	50
3.6 อุปกรณ์เก็บสัญญาณ GRAPHTEC midi LOGGER GL800	51
3.7 เครื่องวัดความหยาบผิวชิ้นงาน	52
3.8 เครื่องมือวัดความหนาของชิ้นงาน	52
3.9 ลักษณะของชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก	53
3.10 ภาพหน้าตัดของรัศมีมุมพืนซ์ (Rp) และรัศมีมุมคาย (Rd)	54
3.11 ลักษณะชิ้นงานที่ต้องการ	58
3.12 แบบเพื่อช่วยประมาณค่าแผ่นขึ้นงาน	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.13 แม่พิมพ์ชุด DIE และ PUNCH.....	60
3.14 การประกอบ Backing Die.....	61
3.15 การประกอบ Die plate.....	61
3.16 การใส่ตัวปลดชิ้นงาน	62
3.17 การประกอบ Die	62
3.18 ชุดแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) ประกอบเสร็จ.....	63
3.19 การประกอบ Punch.....	64
3.20 ประกอบแผ่น punch plate	64
3.21 ประกอบ Bank holder และเสาส่งแรงเหยียบ.....	65
3.22 ชุดแม่พิมพ์ตัวผู้ประกอบเสร็จ.....	65
3.23 การประกอบแม่พิมพ์	66
3.24 การถอดแม่พิมพ์	67
3.25 การตั้ง Limit	67
3.26 การวางแผ่น shim.....	68
3.27 การป้อนแผ่น shim.....	68
3.28 สภาพผิวหน้าที่มองเห็นคล้ายๆกันแต่ความหยาบผิวต่างกัน.....	70
3.29 เส้นกราฟของความสูงจากยอดถึงปลายล่างสุด.....	72
3.30 ตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบ.....	72
3.31 ตำแหน่งในการวัดความหนาของผนังด้วยด้านตรง	73
3.32 ตำแหน่งในการวัดความหนาผนังด้วยบริเวณมุมกลอง	73
4.1 รูปชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปทั้ง 5 ชนิดสารหล่อลื่น	76
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการลากขึ้นรูปลึกลงและแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานกับทางการเคลื่อนที่ของพนักกรณีใช้สารหล่อลื่น TDN81 ขนาดรีศมีบ่าตาย 10 มิลลิเมตร	77
4.3 เปรียบค่าแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสูงสุดและแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานเมื่อทำการลากขึ้นรูปโดยสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ ขนาดรีศมีบ่าตาย 10 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร	78
4.4 เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสูงสุดกับแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานต่อระยะกดลึกลงเมื่อทำการลากขึ้นรูปโดยสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ ขนาดรีศมีบ่าตาย 10 มิลลิเมตร.....	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.5	เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสูงสุดกับแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานต่อระยะกด ลึกลงเมื่อทำการลากขึ้นรูปโดยสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ ขนาดรัศมีปาดาย 6 มิลลิเมตร	80
4.6	ค่าเฉลี่ยความหยาบผิว (Ra) ได้จากการลากขึ้นรูปที่รัศมีปาดาย 10 มิลลิเมตร	81
4.7	ค่าเฉลี่ยความหยาบผิวสูงสุด (Rt) ได้จากการลากขึ้นรูปที่รัศมีปาดาย 10 มิลลิเมตร	81
4.8	ค่าเฉลี่ยความหยาบผิว (Ra) ได้จากการลากขึ้นรูปที่รัศมีปาดาย 6 มิลลิเมตร	82
4.9	ค่าเฉลี่ยความหยาบผิวสูงสุด (Rt) ได้จากการลากขึ้นรูปที่รัศมีปาดาย 6 มิลลิเมตร	83
4.10	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหยาบผิว (Ra) ความหยาบผิวสูงสุด (Rt) ได้จากการลากขึ้นรูป ที่รัศมีปาดาย 6 มิลลิเมตรและ 10 มิลลิเมตร	84
4.11	ความหนาผนังด้านตรงของชิ้นงานรัศมีปาดาย 10 มิลลิเมตร	85
4.12	ความหนาผนังด้านตรงของชิ้นงานรัศมีปาดาย 6 มิลลิเมตร	86
4.13	ความหนาผนังบริเวณมุมกลองชิ้นงานรัศมีปาดาย 10 มิลลิเมตร	87
4.14	ความหนาผนังบริเวณมุมกลองชิ้นงานรัศมีปาดาย 6 มิลลิเมตร	88

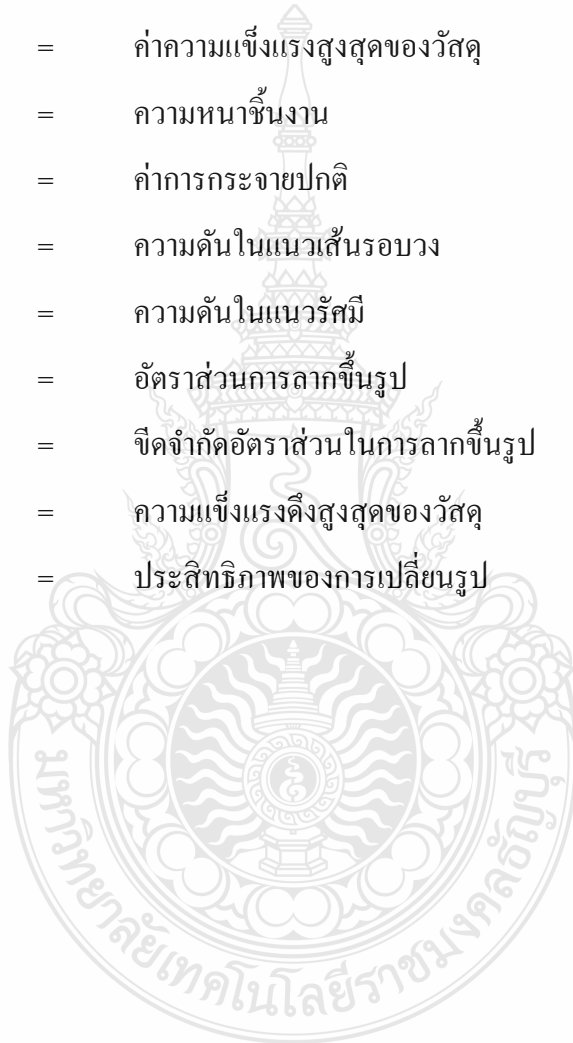


คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A_0	=	พื้นที่หน้าตัดของแผ่นชิ้นงาน
A_1	=	พื้นที่หน้าตัดของพันธ
A_{BH}	=	พื้นที่ที่แผ่นกดชิ้นงานสัมผัสชิ้นงาน
a	=	ความยาวส่วนที่ตรงของกล่องสี่เหลี่ยม
a_{cr}	=	ค่าองค์ประกอบตัวคูณการแตกของวัสดุ
b	=	ความกว้างส่วนที่ตรงของกล่องสี่เหลี่ยม
c	=	ตัวประกอบแรงฉีกขาดมีค่าอยู่ระหว่าง 2 ~ 3
d_0	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงาน
d_1	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพันธ
d_m	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย
F_{BH}	=	แรงในการจับยึดชิ้นงาน
F_{cr}	=	แรงที่ทำให้เกิดการแตก
F_d	=	แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปชิ้นงาน
$F_{d,max}$	=	แรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปชิ้นงาน
h	=	ความสูงของกล่องสี่เหลี่ยมส่วนที่ตรง
h_s	=	ความสูงของผนังด้านข้างของกล่องสี่เหลี่ยม
$h_{s,a}$	=	ความสูงของผนังด้านข้างที่เอาออก
$h_{s,a(Correct)}$	=	ความสูงของผนังด้านข้างที่ถูกต้อง
L_1	=	ความยาวหลังการทดสอบ
L_0	=	ความยาวก่อนการทดสอบ
P_{BH}	=	ความดันบนแผ่นกดชิ้นงาน
r_B	=	รัศมีส่วนก้นของกล่องสี่เหลี่ยม
r_c	=	รัศมีมุมโค้งของกล่องสี่เหลี่ยม

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

r_d	=	รัศมีตาย
r_p	=	รัศมีพื้นซ์
s_0	=	ความหนาแผ่นเปล่า
S_u	=	ค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ
t	=	ความหนาชิ้นงาน
σ_t	=	ค่าการกระจายปกติ
σ_t	=	ความดันในแนวเส้นรอบวง
σ_r	=	ความดันในแนวรัศมี
β	=	อัตราส่วนการลากขึ้นรูป
β_{\max}	=	ขีดจำกัดอัตราส่วนในการลากขึ้นรูป
σ_u	=	ความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุ
η_{def}	=	ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูป



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

กระบวนการลากขึ้นรูปลึก เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งในอุตสาหกรรมต่างๆ ในปัจจุบันนิยมใช้เป็นกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ เช่น อุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในครัวเรือน อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์บรรจุอาหาร และอุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมที่กล่าวมานี้มีอุตสาหกรรมจำนวนมากใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเป็นวัสดุในการผลิต เนื่องจากมีความแข็งแรง คงทน ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก โลหะแผ่นเป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนรูวัสดุอย่างถาวร ซึ่งการลากขึ้นรูปลึกนั้นสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปทรงต่างๆ ได้หลายรูปทรง เช่นรูปทรงกระบอก รูปถ้วย รูปกล่องสี่เหลี่ยมและรูปร่างที่ไม่สมมาตร เป็นต้น โดยทั่วไปในกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกในประเทศไทยที่กล่าวมาข้างต้น ได้นำสารหล่อลื่นมาใช้ขณะที่ทำการขึ้นรูป ซึ่งสารหล่อลื่นที่นำมาใช้นั้นมีความหลากหลายชนิด แต่ขาดการศึกษาวิจัยที่วิเคราะห์ข้อดีข้อเสียของสารหล่อลื่นแต่ละชนิด ที่เหมาะสมกับวัสดุที่ทำการลากขึ้นรูป พันซ์ และคาย มีโอกาสที่ทำให้อายุการใช้งานของ พันซ์ คาย แผ่นจับยึดชิ้นงานสั้นลง ซึ่งทำให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มสูงขึ้นและส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงความยากง่ายในการทำ ความสะอาด สารหล่อลื่นที่ติดอยู่ที่ผิวชิ้นงานหลังจากขึ้นรูปสำเร็จ ชนิดของสารหล่อลื่นเป็นตัวแปรอันหนึ่งในตัวแปรหลายๆ ตัวของกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยสี่เหลี่ยม ซึ่งจะต้องมีการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวกับความเสียดทาน (Friction) [1] มีตัวแปรหลายๆ อย่างที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงเสียดทาน (Friction Force) ระหว่างการขึ้นรูป ตัวแปรเหล่านี้จะทำให้แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปหรือทำให้สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานเปลี่ยนไปซึ่งได้แก่

1. สารหล่อลื่นซึ่งได้ถูกนำไปใช้ที่แผ่นเปล่า หรือผิวหน้าของคายก่อนที่จะลากขึ้นรูป โดยสารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติลื่นตัวได้ดี จะช่วยลดความเสียดทานระหว่างผิวชิ้นงานกับแม่พิมพ์ ส่วนสารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติต้านทานต่อแรงกดสูงจะเป็นการเพิ่มความเสียดทาน

2. แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blank Holder Force) จะกดบนแผ่นเปล่าและผิวหน้าคายในทิศทางตั้งฉาก ทำให้เกิดความเสียดทานที่ผิวแผ่นจับยึดชิ้นงาน ผิวชิ้นงาน และผิวคาย เมื่อต้องการจะให้แผ่นชิ้นงานเคลื่อนที่ลงในคาย จะต้องใช้แรงดึงให้มากขึ้นพอที่จะเอาชนะแรงเสียดทานได้ ถ้าแรงนี้มีมากเกินไปทำให้ในขณะที่ทำการขึ้นรูปชิ้นงานรูปถ้วย ต้องควบคุมแรงที่เกิดจากแผ่นจับยึดชิ้นงานให้มีความเหมาะสม ถ้ามีแรงมากเกินไปจะทำให้ชิ้นงานไม่สามารถไหลได้

3. ความเรียบผิวของแผ่นเปล่า แผ่นเปล่าที่นำมาใช้ขึ้นรูปถ้ามีผิวหยาบจะทำให้เกิดแรงเสียดทานมากขึ้น

4. ความเรียบผิวของพันธ์ คายและแผ่นจับยึดชิ้นงาน มีผลต่อความเสียดทานที่เกิดขึ้นโดยแม่พิมพ์ผิวหยาบทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมากกว่าแม่พิมพ์ที่มีผิวละเอียด

ในปัจจุบันจะพบปัญหาในการลากขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ในอุตสาหกรรมดังกล่าวเหล่านี้ เนื่องจากการลากขึ้นรูปลึกชิ้นงานด้วยสึ่เหลี่ยมใช้ขั้นตอนในการผลิตมากไป ซึ่งก็หมายความว่า เมื่อต้องการลากขึ้นรูปที่จะเพิ่มอัตราส่วนการลากขึ้นรูปให้สูงขึ้น จะต้องทำการลากขึ้นรูปซ้ำหลายครั้งในการผลิตชิ้นงานหนึ่งชิ้น เพราะถ้ามีการลากขึ้นรูปเกินค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปของวัสดุนั้น จะทำให้วัสดุเกิดการฉีกขาด สาเหตุมาจากแรงในการลากขึ้นรูปมีค่ามากกว่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุ เพื่อป้องกันการเกิดรอยแตกของชิ้นงาน จึงได้นำเอาสารหล่อลื่นมาช่วยในขณะทำการลากขึ้นรูป สารหล่อลื่นที่นิยมใช้ คือ น้ำมันสังเคราะห์ ซึ่งเป็นตัวช่วยลดแรงเสียดทานขณะลากขึ้นรูป สารหล่อลื่นแต่ละชนิดจะใช้แรงในการลากขึ้นรูปลึกที่แตกต่างกัน ซึ่งจะได้อัตราส่วนการลากขึ้นรูปลึกที่แตกต่างกันด้วย

สำหรับในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปลึกด้วยสึ่เหลี่ยม ในการทดลองจะใช้เหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์ตามมาตรฐาน JIS G 3113 เกรด SAPH 440 หนา 1.4 มิลลิเมตร ซึ่งชนิดของสารหล่อลื่นที่เหมาะสมต่อการลากขึ้นรูปลึก จะทำให้สามารถลดขั้นตอนการผลิตและสามารถเพิ่มผลผลิตได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของสารหล่อลื่นในการลากขึ้นรูปลึกสึ่เหลี่ยมของเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของชิ้นงานที่ได้จากสารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้วัสดุชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์ตามมาตรฐาน JIS G 3113 เกรด SAPH 440 หนา 1.4 มิลลิเมตร ทำการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึกได้ชิ้นงานด้วยสึ่เหลี่ยม ขนาด $60 \times 60 \times 30$ มิลลิเมตร

1.3.2 พันธุ์ คาย และแผ่นจับยึดชิ้นงาน ทำด้วยวัสดุเหล็ก SKD 11 (JIS) รัศมีพันธ์ คาย 6 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร ช่องว่างระหว่างพันธ์ คาย 1.6 มิลลิเมตร

1.3.3 ชนิดของสารหล่อลื่น

ในการทดลองจะใช้สารหล่อลื่น 5 ชนิดในการลากขึ้นรูปดังนี้

1. น้ำมัน ILOFORM TDN 81 (บริษัท คลาสตรอล จำกัด)
2. น้ำมัน MZA 30 (บริษัท สยามฟูคส์ จำกัด)
3. น้ำมัน DRAW 359H (บริษัท เฮาตัน อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด)
4. น้ำมัน DRAW 756A (บริษัท เฮาตัน อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด)
5. น้ำมันมะพร้าว

1.3.4 เปรียบเทียบอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูป

1. ความสามารถในการขึ้นรูปสำเร็จ
2. แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป

1.3.5 เปรียบเทียบคุณภาพของชิ้นงาน

1. เปรียบเทียบคุณภาพของชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความเรียบผิวแบบลาก
2. เปรียบเทียบความหนาของชิ้นงานด้วยไมโครมิเตอร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเลือกใช้สารหล่อลื่นที่เหมาะสมในการลากขึ้นรูปลึกลงด้วยสึ่เหลี่ยมของเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์

1.4.2 สามารถนำไปเป็นข้อมูลเบื้องต้น ในการตัดสินใจที่จะนำสารหล่อลื่นมาใช้ในการอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึกลงด้วยสึ่เหลี่ยมเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับ โครงสร้างยานยนต์

1.4.3 ได้ทราบข้อดีและข้อเสียสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นกระบวนการลากขึ้นรูปลึกลงด้วยสึ่เหลี่ยมเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับ โครงสร้างยานยนต์

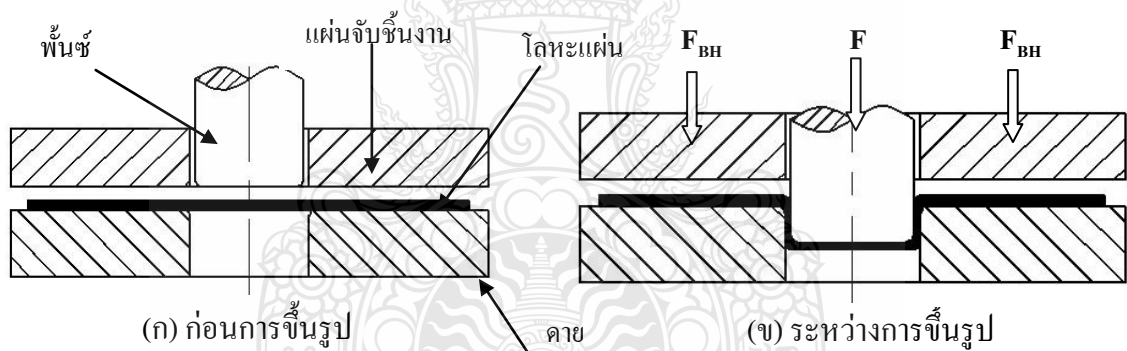
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

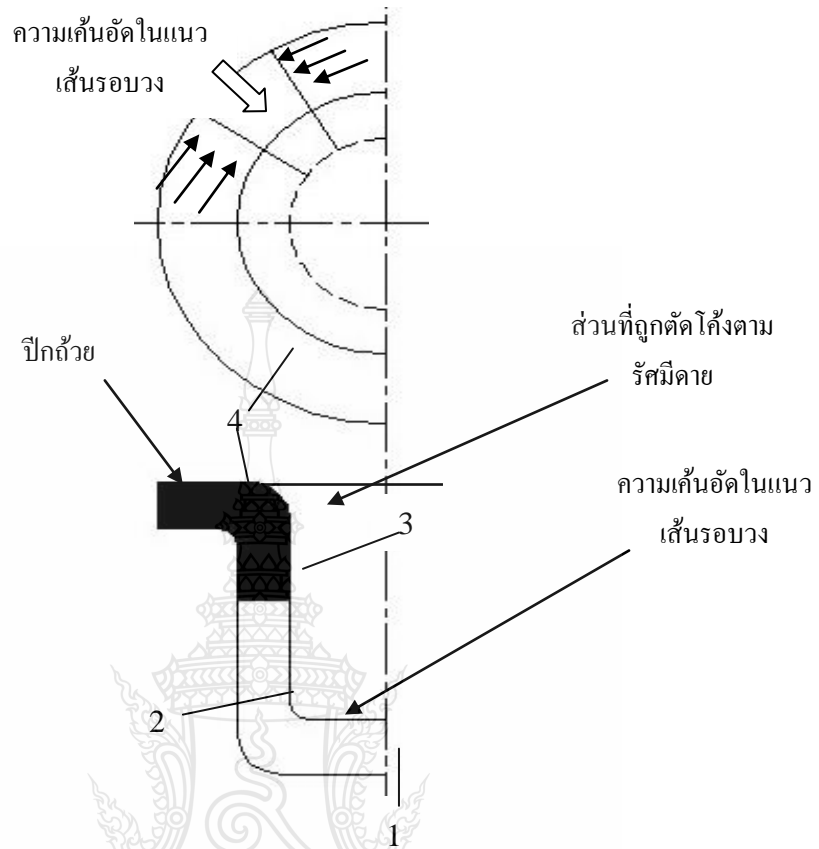
2.1.1 การลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing)[2]

การลากขึ้นรูปลึกเป็นกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมแบบหนึ่ง ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานอย่างถาวร โดยที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมวลและพันธะภายในเนื้อวัสดุ และขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก ซึ่งประกอบด้วย พUNCH ดาย (Die) และแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Bank Holder) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ส่วนที่สัมผัสโลหะแผ่นเปล่า (Bank) แรงกดจากเครื่องปั๊ม (F) จะส่งผ่านพUNCH เพื่อให้โลหะไหลตัวเข้าไปในช่องตาย ขณะเดียวกันก็มีแรงกดอยู่บนแผ่นจับยึดชิ้นงาน (F_{BH}) เพื่อควบคุมการไหลตัวของโลหะแผ่นเปล่าไม่ให้เกิดรอยย่น



ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบหลักของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก

พฤติกรรมและทิศทางการไหลตัวของแผ่นโลหะแสดงดังภาพที่ 2.2 แรงกดจากพUNCH จะส่งผ่านไปที่บริเวณก้นถ้วย (บริเวณที่ 1) ส่งผลให้เกิดการดัดโค้งของแผ่นโลหะ 2 บริเวณ คือส่วนโค้งตามรัศมีพUNCH (บริเวณที่ 2) และส่วนโค้งตามรัศมีตาย (บริเวณที่ 3) เมื่อพUNCH เคลื่อนที่ลึกลง ส่วนของแผ่นโลหะที่เป็นผนังถ้วยในแนวตั้งจะทำหน้าที่ในการส่งผ่านแรงที่กระทำที่ก้นถ้วยไปยังบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (ส่วนของปีกถ้วย และส่วนโค้งตามรัศมีตายที่แรงในภาพที่ 2.2)



ภาพที่ 2.2 พฤติกรรมการไหลตัวของโลหะแผ่นภายใต้กระบวนการลากขึ้นรูปลึก [2]

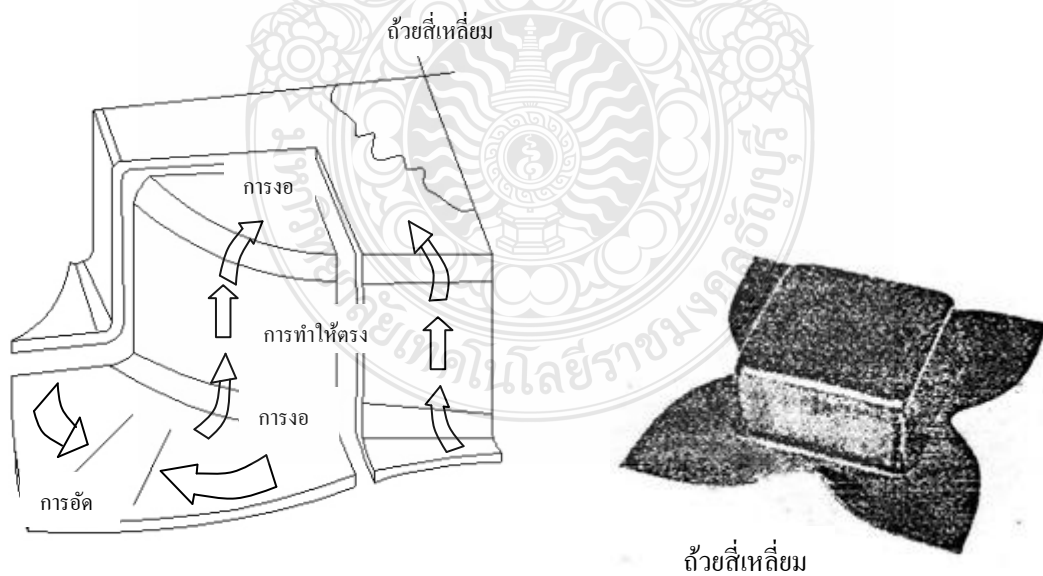
บริเวณที่ 1 ส่วนของกันถ้วยแทบไม่มีการเปลี่ยนรูปเกิดขึ้น พื้นจะพาเนื้อโลหะส่วนนี้เคลื่อนที่เข้าไปในช่องคาย และเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นโลหะบริเวณนี้น้อยมาก บริเวณที่ 2 ส่วนของแผ่นโลหะที่ถูกตัดโค้งตามรัศมีพื้นและผนังถ้วยในแนวตั้งนี้ผ่านการเปลี่ยนภาพที่สมบูรณ์มาแล้ว แต่เนื่องจากเป็นส่วนที่ต้องส่งผ่านแรงจากกันถ้วย ทำให้เกิดความเค้นดึงในแนวแกน ส่งผลให้บริเวณนี้มีโอกาสเกิดการยืดตัวและเกิดการบางลงของแผ่นโลหะ บางกรณีก็เกิดการขาดขึ้นที่บริเวณนี้ บริเวณที่ 3 เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรในส่วนที่ถูกตัดโค้งตามรัศมีตายและบริเวณที่ 4 ส่วนของปีกถ้วย เป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรมากที่สุดเนื้อโลหะบริเวณนี้จะเกิดความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงที่เกิดจากปริมาตรของเนื้อโลหะที่มีมากที่ขอบด้านนอกของแผ่นเปล่าพยายามเบียดเพื่อไหลเข้าไปในช่องว่างคายตามแรงดึงจากพื้น และเกิดความเค้นดึงในแนวรัศมีที่เกิดจากการดึงของพื้น การขยายตัวของวัสดุเนื่องจากการเบียดหรือการอัดตัวในแนวเส้นขอบจะทำให้เกิดการขยายตัวในแนวรัศมีและเกิดแรงต้านการไหลตัว มักจะพบว่าแผ่นโลหะที่บริเวณนี้มีความหนาเพิ่มขึ้นมาก หรือเกิดการย่น เนื่องจากการอัดตัวในแนวเส้นขอบ ทำให้เกิดการขยายออกใน 2

แนวแกน คือ ขยายออกตามแนวรัศมี และขยายออกตามการแนวความหนาของแผ่นโลหะ ในบางกรณีโลหะแผ่นบาง เมื่อค่าความเค้นอัดในแนวเส้นขอบสูงขึ้น จะเกิดการโก่งตัวแทนที่จะหนาขึ้น และจะพบการยุบบนปีกด้วยร่วมด้วย

2.1.2 การลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยม [3]

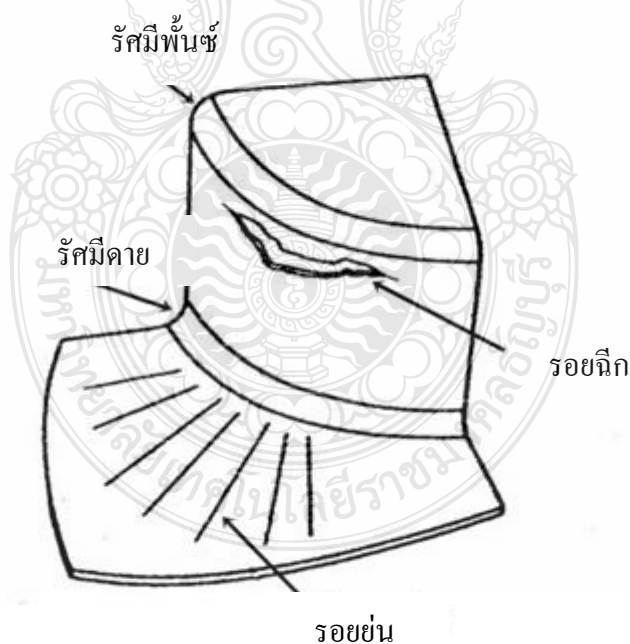
การลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมนั้น การไหลตัวของโลหะจะไม่เท่ากันทุกจุดทุกด้านเหมือนการลากขึ้นรูปทรงกระบอก ดังนั้น แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปแต่ละส่วนก็จะไม่เท่ากันตามไปด้วย โดยการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจะเกิดการไหลตัวของโลหะได้ 2 ส่วน คือ ส่วนตรงมุมของถ้วยซึ่งเกิดการลากขึ้นรูป (Drawing) อย่างแท้จริง และส่วนของผนังถ้วยจะเป็นการลากขึ้นรูปในลักษณะเดียวกับการพับ (Bending)

การวิเคราะห์การไหลตัวของโลหะตรงมุมถ้วย ซึ่งการศึกษาการไหลตัวของโลหะระหว่าง การลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมนั้น เดียวนี้ทำได้โดยใช้กระแสไฟฟ้ากัด (Etching) ที่ผิวของแผ่นขึ้นงานแบนให้เป็นวงกลมเล็กๆ ลักษณะของการไหลของโลหะจะถูกแสดงให้เห็นถึงครั้งแรก เมื่อวงกลมเล็กๆ นั้นถูกเปลี่ยนเป็นรูปวงรี การศึกษาการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมนั้นจะต้องแบ่งด้วยสี่เหลี่ยมออกเป็นส่วนต่างๆ แล้วนำมาศึกษาดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การแบ่งถ้วยสี่เหลี่ยมออกเป็นส่วนต่างๆ [3]

เนื่องจากมุมของถ้วยที่จะนำมาวิเคราะห์นั้น จะใช้มุมถ้วยสี่เหลี่ยมเพียงแถมเดียว ลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้น เมื่อลากขึ้นรูปถ้วยก็ยังคงเกิดขึ้นที่มุมของถ้วยมุมอื่นๆเหมือนกัน ลูกศรอันใหญ่ที่ได้แสดงในภาพที่ 2.3 ได้แสดงให้เห็นว่าโลหะจะมีการอัดตัวตรงมุมของแผ่นขึ้นงานก่อนจะบินยอมไหลไปเหนือรัศมีของคาน ซึ่งที่ส่วนนี้ยังคงมีโลหะเหลืออยู่มากเกินไป อาจเกิดรอยย่นขึ้นได้ง่าย ขณะที่มีการลากขึ้นรูปจะต้องใช้แรงของแผ่นกดยึดขึ้นงานเพื่อป้องกันการเกิดรอยย่นที่ตรงมุมของถ้วยนี้ สารประกอบที่ใช้ในการลากขึ้นรูป หรือสารหล่อลื่นที่ดีได้ถูกนำมาใช้ที่ตรงมุมของถ้วย เพื่อให้โลหะไหลตัวภายใต้แผ่นกดยึดขึ้นงานได้ง่ายขึ้น โดยจะเป็นตัวลดความเสียดทาน การใช้รัศมีของคานที่ใหญ่ตรงมุมของถ้วยจะช่วยลดแรงที่เกิดจากการงอ และการทำให้ตรงซึ่งมันจะช่วยให้การลากขึ้นรูปทำได้ง่ายขึ้น มันเป็นเรื่องจริงเช่นเดียวกับการลากขึ้นรูปถ้วย คือ รอยย่นที่เกิดขึ้นที่มุมของแผ่นขึ้นงานจะเบียดกันเพื่อแย่งการไหลตรงมายังมุมของถ้วย การเกิดรอยย่นเช่นนี้จะมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า สำหรับรอยย่นที่เกิดขึ้นจากการลากขึ้นรูปภาพที่บริเวณมุมของถ้วยได้แสดงให้เห็นไว้ในภาพที่ 2.4 เมื่อมีแรงดึงเกิดขึ้นมากเกินไปผนังซึ่งเป็นบริเวณมุมของถ้วย อาจส่งผลทำให้มีการฉีกขาดเกิดขึ้นที่บริเวณนั้น การฉีกขาดที่ตรงมุมของถ้วยนี้อาจจะมากขึ้นจนลามไปถึงผนังส่วนที่แบน การฉีกขาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดมันจะเริ่มต้นเกิดขึ้นที่มุมของถ้วยระหว่างการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมเสมอ



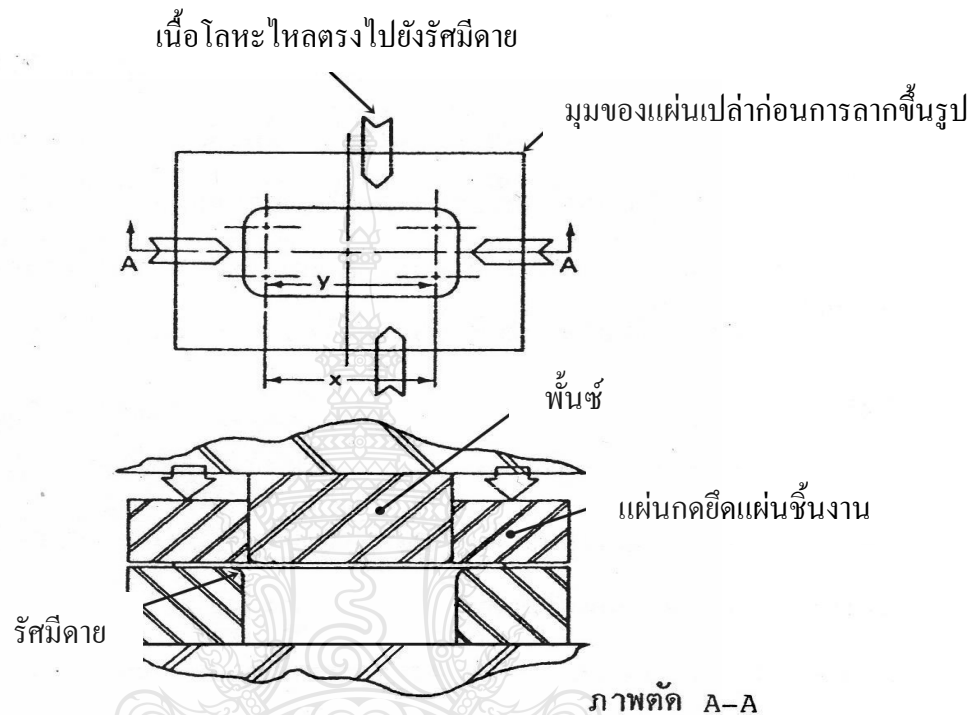
ภาพที่ 2.4 การวิเคราะห์ที่มุมของถ้วยสี่เหลี่ยม [3]

การวิเคราะห์การไหลตัวของโลหะตรงส่วนของผนังถ้วย จะใช้กระแสไฟฟ้ากัดให้เป็นวงกลมเพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงของโลหะที่ได้จากการลากขึ้นรูป ลากการขึ้นรูปบริเวณมุมถ้วยนั้น โลหะจะเกิดการอัดตัวตรงมุมของแผ่นชิ้นงานก่อน จึงจะยินยอมให้โลหะไหลตัวลงไปเหนือรัศมีคาย แต่สำหรับการทำผนังส่วนที่แบนของถ้วยนั้นไม่มีการอัดตัวของโลหะเพื่อยอมให้โลหะไหลไปยังรัศมีของคาย การศึกษาถึงเงื่อนไขนี้ จะถูกแสดงดังภาพที่ 2.5 ความยาวของแผ่นชิ้นงานเพื่อที่จะป้อนเข้าไปเป็นผนังส่วนที่แบนของถ้วยได้ถูกแสดงโดยใช้สัญลักษณ์ x ความยาวของปากคายที่จะทำให้โลหะไหลผ่านลงไปเป็นผนังส่วนที่แบนได้ถูกแสดงโดยการใช้ความยาว y เพราะความยาว x เท่ากับความยาว y การอัดตัวของโลหะจึงไม่เป็นสิ่งที่จำเป็น ถ้าไม่มีการอัดตัวของโลหะเกิดขึ้น ขบวนการนั้นไม่สามารถจะเรียกได้ว่าการลากขึ้นรูป

ในการบรรยายการไหลของโลหะที่ผนังส่วนที่แบนของถ้วยสี่เหลี่ยมจะได้โดยการแสดงถึงขั้นตอนดังนี้ เริ่มแรกแผ่นชิ้นงานจะเลื่อนตรงไปยังรัศมีของคายโดยไม่มีการแข็งตัวระหว่างถูกแปรรูปหรือไม่มีการเปลี่ยนขนาด ต่อมาเมื่อโลหะถูกป้อนอยู่เหนือรัศมีของคาย โลหะจะถูกทำให้งอ ถ้าดับสุดท้าย โลหะได้ทำให้ตรงเพื่อสร้างผนังส่วนที่แบนของถ้วยสี่เหลี่ยมขึ้นมา ขั้นตอนของการที่เกิดเหตุการณ์เหล่านี้ได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 2.5 ด้วยเหมือนกัน ขบวนการของการเปลี่ยนแปลงของโลหะนี้ได้ถูกเรียกว่า การงอ และการทำให้ตรง (Bend and Straighten) การลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมก็จะเป็นขบวนการที่ผสมผสานระหว่างขบวนการลากขึ้นรูปกับขบวนการงอ และการทำให้ตรงดังที่กล่าวมาแล้ว เมื่อไหร่ก็ตามที่มีการลากขึ้นรูปเพียงบางส่วนของชิ้นงานโดยการใช้การลากขึ้นรูป ในกรณีปฏิบัติภายในโรงงานจะเรียกการผลิตชิ้นงานในลักษณะเช่นนั้น รวมทั้งกันว่าเป็นการใช้กระบวนการลากขึ้นรูป

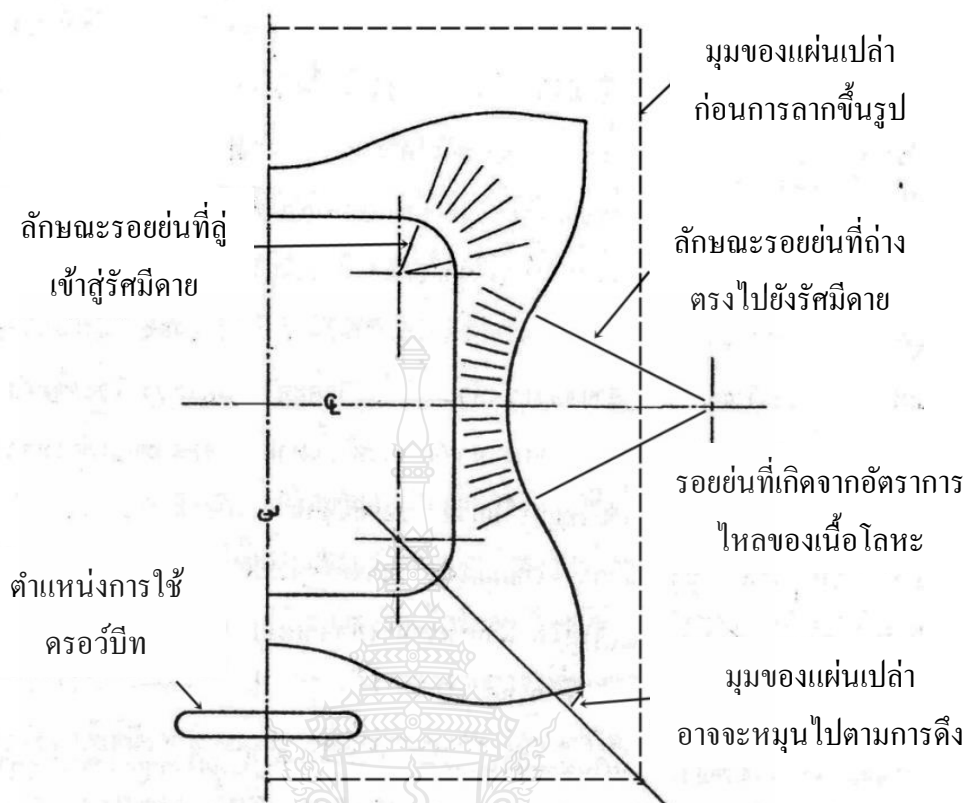
รอยยับที่เกิดจากอัตราการไหล (Flow -Rate Wrinkle) ผนังส่วนที่เป็นมุมและส่วนที่แบนของถ้วยสี่เหลี่ยมนี้สามารถที่จะมองเหมือนกับว่าแยกส่วนออกจากกันโดยไม่มี ความยุ่งยาก แต่บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของโลหะจากส่วนหนึ่ง ไปยังอีกส่วนหนึ่งของผนังส่วนที่เป็นมุมกับส่วนที่แบนนั้น โลหะซึ่งถูกลากขึ้นรูปที่มุมของถ้วยจะไหลตรงไปยังรัศมีของคายค่อนข้างจะช้าเนื่องจากมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการอัดตัวของโลหะ แผ่นชิ้นงานส่วนที่เป็นมุมนี้สามารถเคลื่อนที่ตรงไปยังรัศมีของคายได้เร็วเท่ากับการเคลื่อนที่ของแท่งพื้นที่ลากผ่านชิ้นงาน แต่ในส่วนของผนังส่วนที่แบน แผ่นชิ้นงานจะเคลื่อนที่ตรงไปยังรัศมีของคายด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของแท่งพื้นที่ระหว่างที่แท่งพื้นที่ลากโลหะผ่านขั้นตอนของการทำให้งอและการทำให้ตรงของผนังส่วนที่แบนนั้นจะทำให้มีการยึดตัวของโลหะเกิดขึ้นบ้าง ปัญหาที่สำคัญในการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมก็คือ การแปรผันในอัตราของ

การไหลหรืออัตราของการไหลที่เร็วกว่าของผนังส่วนที่แบนนี้ ผลก็คือจะเกิดการรัดตัว (Pull-In) ของขอบแผ่นชิ้นงานอย่างรุนแรง



ภาพที่ 2.5 การไหลของโลหะที่บริเวณผนังส่วนตรงของการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยม [3]

ปัญหาของการผลิตหลายอย่าง อาจมาจากอัตราการไหลที่แปรเปลี่ยน ซึ่งจะมองเห็นรอย่นที่เกิดขึ้นได้ที่ปีกขอบของผนังส่วนที่ตรง รอย่นที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะถ่างออกตรงไปยังรัศมีตาย และจะเรียกมันว่า รอย่นที่เกิดจากอัตราการไหล ดังแสดงในภาพที่ 2.6 การเกิดรอย่นที่ปีกของผนังส่วนที่ตรงจะไม่เหมือนกับรอย่นที่ปีกของผนังส่วนที่เป็นมุมซึ่งการเกิดรอย่นที่ปีกของผนังส่วนที่เป็นมุมจะมีลักษณะลู่เข้า จะต้องมีการใช้แผ่นยึดกดชิ้นงานเพื่อป้องกันหรือกำจัดการเกิดรอย่นเหล่านั้นที่บริเวณรอบๆเส้นรอบรูปของถ้วยสี่เหลี่ยม การลากขึ้นรูปด้วยก็มีการเกิดรอย่นทั้งสองแบบนี้เช่นเดียวกัน ลูกศรใหญ่และเล็กที่ได้แสดงเอาไว้ในผนังส่วนที่ตรงในภาพที่ 2.3 จะแสดงให้เห็นถึงการลดลงของอัตราการไหลใกล้กับมุมของถ้วย



ภาพที่ 2.6 ลักษณะของรอยย่นที่เกิดจากอัตราการไหล [3]

2.1.3 แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป (Punch Force) [3]

แรงสูงสุดที่ต้องใช้ในการลากขึ้นรูป จะแปรผันไปตามระยะชักของพิ้นซ์ สามารถคำนวณหาได้โดยใช้สมการที่ได้จากประสบการณ์จากการทดลอง ซึ่งในทางปฏิบัติส่วนใหญ่การออกแบบแม่พิมพ์จะต้องทราบค่าแรงสูงสุดในการลากขึ้นรูป การประมาณหาค่าแรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดที่ดีจะแสดงดังสมการที่ 2.1

$$F_{\max} = \pi \times d_m \times s_o \times \left[1.1 \frac{1.3 \times s_u}{\eta_{\text{det}}} \left[l_n \frac{d_o}{d_1} - 0.25 \right] \right] \quad (2.1)$$

โดยที่ F_{\max}	=	แรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูป (kN)
d_m	=	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของถ้วย (mm.)
s_o	=	ความหนาของแผ่นโลหะ (mm.)
s_u	=	ค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ (N/mm.^2)

$$\begin{aligned}
 d_o &= \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแผ่น โลหะเปล่า (mm.)} \\
 d_1 &= \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของพื้นซ์ (mm.)} \\
 \eta_{det} &= \text{ค่าประสิทธิภาพในการลากขึ้นรูป กำหนดให้มีค่าระหว่าง} \\
 & \quad 0.5-0.7
 \end{aligned}$$

2.1.4 แรงที่ทำให้เกิดการแตก [3]

แรงที่สามารถส่งผ่านวัสดุในบริเวณรัศมีพื้นซ์หรือบริเวณรอยต่อระหว่างผนังรูปถ้วยกับก้นถ้วยจะเป็นเงื่อนไขจำกัดแรงการลากขึ้นรูปสูงสุดที่ยอมได้แรงนี้เรียกว่าแรงฉีกขาด (Cracking Load) แรงนี้ต้องมีค่ามากกว่าแรงดึงสูงสุด มิฉะนั้นจะไม่สามารถลากขึ้นรูปถ้วยได้เพราะถ้วยจะเกิดการฉีกขาดก่อนจะสำเร็จแรงฉีกขาดโดยประมาณ สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.2 ดังนี้

$$F_{cr} = \pi \times d_m \times s_o \times s_u \times a_{cr} \quad (2.2)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 F_{cr} &= \text{แรงที่ทำให้เกิดการแตก (N)} \\
 d_m &= \text{เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของถ้วย (mm.)} \\
 s_o &= \text{ความหนาของแผ่น โลหะ (mm.)} \\
 s_u &= \text{ค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ (N/mm.}^2\text{)} \\
 a_{cr} &= \text{ค่าองค์ประกอบตัวคูณการแตกของวัสดุชนิดต่างๆ} \\
 & \quad \text{แสดงดังตารางที่ 2.1}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 2.1 ค่า a_{cr} ของวัสดุชนิดต่างๆ

วัสดุ	ค่า a_{cr}
แผ่นเหล็กทั่วไป (SAE 1600)	1.05-1.55
แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304)	0.95-1.30
แผ่นทองเหลือง (UNS C27000)	0.92-1.27
แผ่นอะลูมิเนียม (AA 1050-O)	0.99-1.22

2.1.5 แรงกดของแผ่นยึดชิ้นงาน (Blank Holder Force)

ขนาดของแรงกดของแผ่นยึดชิ้นงาน (Blank holder Force) ซึ่งเป็นแรงที่ใช้เพื่อป้องกันการเกิดรอยย่นและการโก่งของปีกชิ้นงานซึ่งเกิดจากความเค้นอัดในแนวสัมผัส (แนวเส้นรอบวง) โดยที่ขนาดของแรงกดแผ่นยึดชิ้นงานที่พอเพียงสำหรับป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่นได้นั้นหาได้จากการทดลองเป็นสำคัญ หรือสามารถประมาณค่าได้ดังสมการต่อไปนี้

$$F_{BH} = \frac{\text{Drawing Force}}{3} \quad (2.3)$$

ถ้าขนาดของแรงกดไม่พอ จะทำให้เกิดการย่นของโลหะขึ้นซึ่งรอยย่นเหล่านี้จะทำให้โลหะไม่สามารถที่จะไหลตัวได้ และบริเวณกันของกล่องสี่เหลี่ยมของชิ้นงานก็จะถูกพันธันจนฉีกขาด ในขณะเดียวกันถ้าแรงกดของแผ่นยึดชิ้นงานมากเกินไป โลหะก็จะไม่สามารถที่จะไหลตัวได้เช่นกัน ชิ้นงานก็จะถูกดันจากพันธันฉีกขาดอีกเหมือนกัน สำหรับการขึ้นรูปทรงกระบอกโลหะจะมีการไหลอย่างสม่ำเสมอและเท่าๆกันทุกจุด แรงกดยึดแผ่นจับชิ้นงานก็จะใช้เท่ากันทุกจุดด้วย แต่สำหรับการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมหรือทรงอื่นๆ ก็จะมีอัตราการไหลตัวของโลหะแต่ละจุดที่ไม่เท่ากัน ก็จะทำให้ใช้แรงกดยึดแผ่นจับยึดชิ้นงานไม่เท่ากันด้วย การมีการใช้ Drawbead เข้ามาใช้ตรงบริเวณที่ต้องการแรงกดมากเพื่อมาช่วยทำให้การไหลตัวของโลหะช้าลง

2.1.6 ขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูป (Limiting Drawing Ratio : LDR)

การกำหนดค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปที่เรียกว่า β_{\max} มันเป็นค่าของการดึงขึ้นรูปที่เหมาะสมของวัสดุ และขึ้นกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแผ่นชิ้นงาน d_o และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของพันธัน d_1 ดังสมการที่ 2.3

$$\beta_{\max} = \frac{d_o}{d_1} \quad (2.4)$$

แต่ในกรณีที่เป็นการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม ให้เราทำการเทียบ Equivalent โดยทำการเทียบพื้นที่หน้าตัดของพันธันให้เท่ากับ d_1 และเทียบพื้นที่หน้าตัดของแผ่นชิ้นงานให้เท่ากับ d_o โดยสามารถทำได้ดังนี้

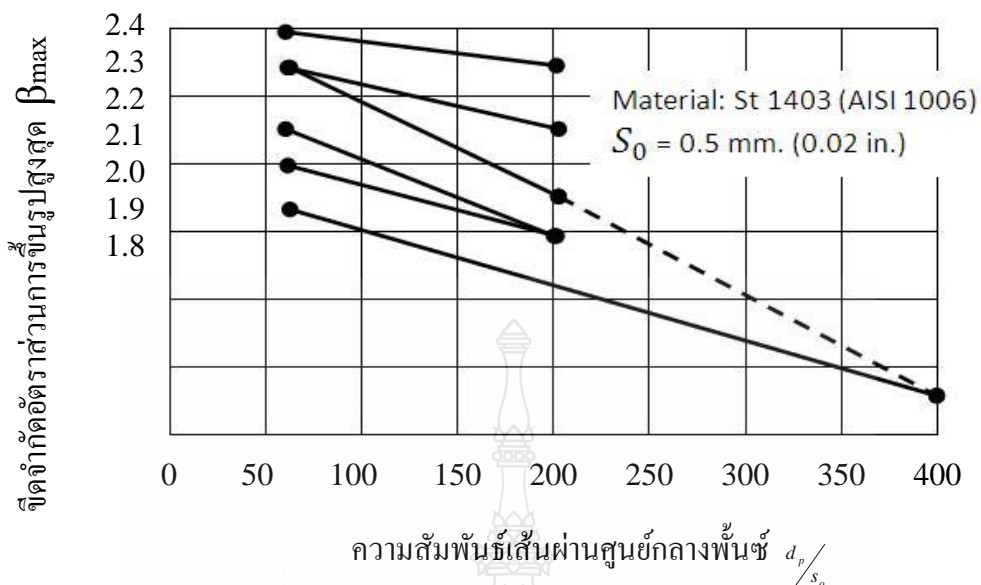
$$A_o = \frac{\pi d_o^2}{4}, A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่} \quad A_o &= \text{พื้นที่หน้าตัดของแผ่นชิ้นงาน} \\ A_1 &= \text{พื้นที่หน้าตัดของพินซ์} \end{aligned}$$

$$d_o = 2\sqrt{\frac{A_o}{\pi}} \quad (2.6)$$

$$d_1 = 2\sqrt{\frac{A_1}{\pi}} \quad (2.7)$$

ค่า β_{\max} เป็นค่าที่มีผลกระทบตามค่าตัวแปรหลายตัว สิ่งหนึ่งที่เป็นตัวแปรสำคัญที่สุดคือ อัตราส่วนความหนา กับ เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงานที่มีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางพินซ์ d_o/s_o โดยปกติค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด β_{\max} จะสูงขึ้นถ้ามีความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางพินซ์ d_o/s_o มีค่าต่ำลง ดังนั้น การปฏิบัติงานในระบบของการหล่อขึ้นรูปในการดึงขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด β_{\max} ด้วย ดังนั้น ค่าความเสียหายที่ตายและแผ่นจับยึดชิ้นงานจะมีค่าน้อยลง แต่สัมพันธ์กับความเสียหายที่พินซ์มีค่ามากขึ้น จึงสามารถใช้ค่าจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปที่มีค่ามากได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.7 ขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด β_{\max} ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของพunch d_p/s_0 [3]

2.1.7 ช่องว่างระหว่างพunch (Punch) และคายน (Die)

เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงต้านทานที่ผิวของแม่พิมพ์ ดังนั้นช่องว่างระหว่างพunch และคายนจะต้องมากกว่าความหนาของโลหะซึ่งจะมากกว่าประมาณ 1.07 ถึง 1.2 เท่าของความหนาแผ่นขึ้นงาน และจำนวนครั้งของการลากขึ้นรูป ซึ่งแสดงให้ตารางที่ 2.1 เป็นค่าช่องว่างระหว่างพunch และคายนซึ่งใช้ได้ทั้งในการลากขึ้นรูปทรงกระบอกและการลากขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยม เพียงแต่ตรงส่วนมุมทั้ง 4 ด้านของถ้วยสี่เหลี่ยมอาจจะต้องมีค่าช่องว่างพunch และคายนมากกว่าด้านผนังถ้วยสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 2.2 ระยะช่องว่างระหว่างพunch (Punch) และคายน (Die) [3]

ความหนาของแผ่นขึ้นงาน (มิลลิเมตร)	ช่องว่างระหว่างพunch และคายน	
	ลากขึ้นรูปครั้งที่ 1	ลากขึ้นรูปครั้งที่ 2
หนาถึง 0.38	1.07 – 1.09 t	1.08 – 1.10 t
0.41 – 1.27	1.08 – 1.10 t	1.09 – 1.12 t
1.29 – 3.18	1.10 – 1.12 t	1.12 – 1.14 t
3.2 ขึ้นไป	1.12 – 1.14 t	1.15 – 1.20 t

จะเห็นว่าเมื่อความหนาของแผ่นชิ้นงานเพิ่มขึ้นค่าช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคายก็จะเพิ่มขึ้นด้วย และสำหรับการขึ้นรูปครั้งต่อไป ค่าช่องว่างนี้ก็เพิ่มขึ้นอีก เช่น ช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคายในการลากขึ้นรูปครั้งแรกเท่ากับ 1.1 เท่าของความหนา และในการลากขึ้นรูปครั้งที่ 2 ต้องเพิ่มขึ้นเป็น 1.12 เท่า หรือ 1.14 เท่าของความหนาแผ่นเปล่า

2.1.8 รัศมีพื้นซ์และคาย

ขนาดของรัศมีพื้นซ์และคาย จะขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาของชิ้นงาน ในกรณีที่กำหนดแรงในการลากขึ้นรูปให้มีค่าน้อยทำได้โดยการเพิ่มอัตราส่วนการลากขึ้นรูปและรัศมีคาย โดยรัศมีคายที่มีขนาดใหญ่จะเป็นการลดพื้นที่สัมผัสระหว่างแผ่นชิ้นงานกับแผ่นกดยึดชิ้นงาน แต่ก็จะทำให้เกิดแนวโน้มที่จะเกิดการยุบที่ปีกของชิ้นงานในบริเวณรัศมีของคาย ในทางกลับกันความเป็นไปได้ในการลดการยุบลงได้ถ้าให้ขนาดรัศมีคายมีขนาดเล็กลง ดังนั้นการหาขนาดรัศมีคายจึงมีความสำคัญ นายโอห์เลอร์และไกเซอร์ (Oehler and Kaiser) ได้พัฒนาสมการดังนี้

$$r_D = 0.035[50 + (d_o - d_1)]s_o \quad (2.8)$$

และนายเซลลิน (Sellin) ก็ได้เสนอการหาขนาดรัศมีโดยมีความสัมพันธ์กับความหนาของแผ่นชิ้นงานดังสมการ

$$r_D = (5-10 \text{ เท่า}) \times \text{ความหนาของแผ่นชิ้นงาน} \quad (2.9)$$

และรัศมีพื้นซ์ก็มีความสัมพันธ์กับรัศมีคายดังสมการ

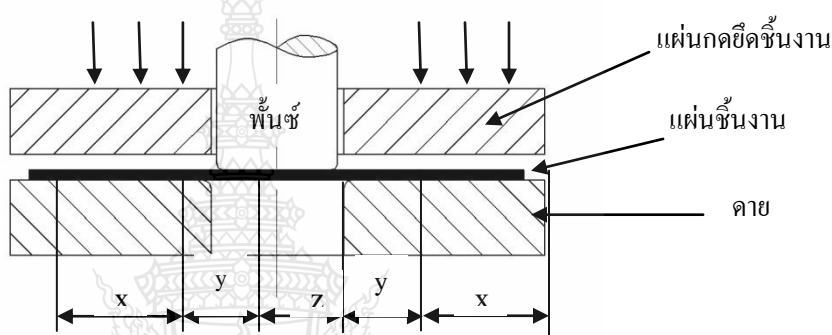
$$r_p = (3-5 \text{ เท่า}) \times \text{รัศมีคาย} \quad (2.10)$$

2.1.9 การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังถ้วย

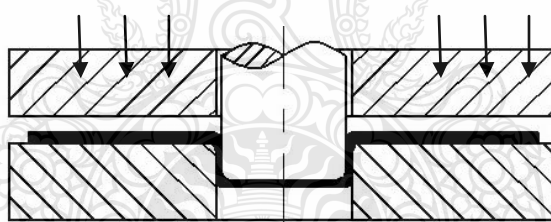
ในกระบวนการลากขึ้นรูปโดยที่แผ่นโลหะเคลื่อนที่ผ่านแม่พิมพ์นั้นจะเกิดการยึดตัวอันเนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นโลหะกับแม่พิมพ์ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกดแผ่นโลหะ (Blank holder force) ความเค้นดึงและอัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นโลหะในการขึ้นรูป ซึ่งสาเหตุต่างๆเหล่านี้จะทำให้เกิดการบางลงของผนังถ้วยของชิ้นงาน นอกจากนี้ความหนาของผนังถ้วยที่ลดลงนี้จะมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตาม

องค์ประกอบต่างๆ ในกระบวนการลากขึ้นรูป ตัวอย่างเช่น แรงกดแผ่นยึดชิ้นงาน (Blank Holder Force) ความเร็วในการลากขึ้นรูป สารหล่อลื่น รูปร่างของชิ้นงาน เป็นต้น

เมื่อเราพิจารณาในกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะในรายละเอียดที่ลึกลงไปอีกโดยจะพิจารณาประกอบกับภาพที่ 2.4 เราจะแบ่งโลหะแผ่นที่จะนำมาขึ้นรูปออกเป็น 3 โซน ได้แก่ โซน X, Y และ Z ซึ่งโซน X วัสดุชิ้นงานโลหะแผ่นจะสัมผัสกับแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) และส่วนที่ใช้กดชิ้นงานโลหะแผ่น (Blank Holder) โซน Y จะไม่สัมผัสกับแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) หรือ แม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) และโซน Z จะสัมผัสกับส่วนหัวของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Head)



(a) ก่อนการลากขึ้นรูป

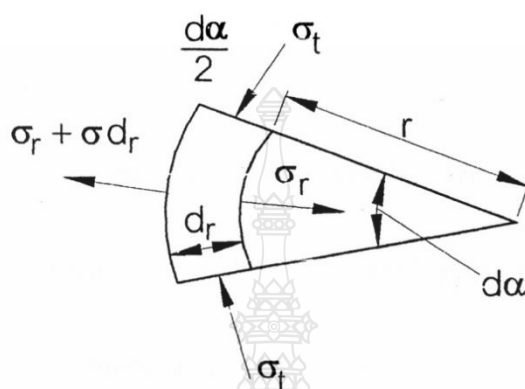


(b) หลังการลากขึ้นรูป

ภาพที่ 2.8 การลากขึ้นรูปโลหะ [3]

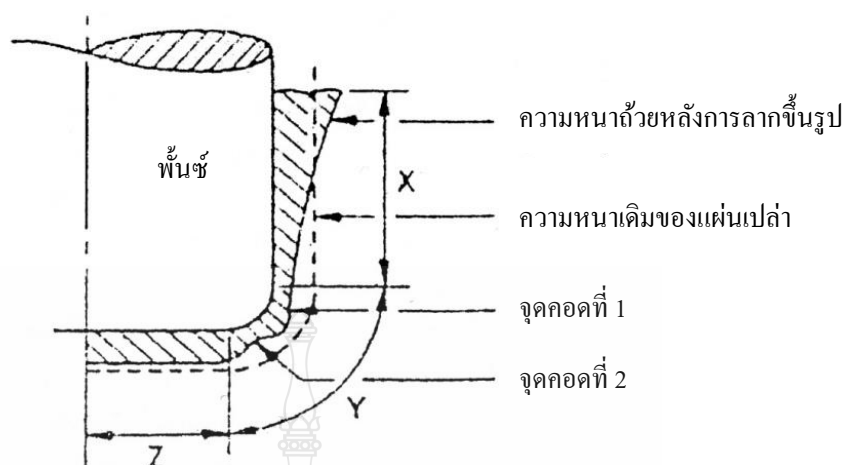
เนื่องจากกระบวนการลากขึ้นรูปทรงสูงดังแสดงในรูป 2.9 (b) เนื้อชิ้นงานในโซน X จะถูกลากขึ้นรูปไปตามรูปร่างของแม่พิมพ์ ภายใต้อิทธิพลของความเค้นในแนวรัศมี (Radial Tensile Stress, σ_r) และผลของการลดลงของรัศมีในโซนนี้จะนำไปสู่การเกิดความเค้นในแนวเส้นรอบวง (Compressive Circumferential Stress, σ_c) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ภาพที่ 2.10 ประกอบ ถ้าไม่มีความดันมาออกแรงแผ่นกดยึดชิ้นงาน (Blank holder) ความเค้นในแนวเส้นรอบวง (σ_c) จะทำให้เกิดรอยย่น (Wrinkle) เมื่อเนื้อชิ้นงานในโซน X ไหลผ่านตามรูปร่างของแม่พิมพ์

ตัวเมีย (Die Profile) มันจะถูกทำให้บางลงภายใต้ Tensile Stress ซึ่งแผ่นโลหะจะถูกดึงให้ยืดออกจนกลายเป็นผนังของถ้วยระหว่างแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) สุดท้ายส่วนทางด้านของโซน X จะถูกทำให้บางมากกว่าปกติ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงที่เกิดขึ้นระหว่าง แม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) ส่วนด้านนอกของโซน X ก็จะมีขนาดหนาเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.9 ความเค้นที่เกิดขึ้นในส่วนเล็กๆ ของโลหะแผ่นในโซน X [3]

พิจารณาในโซน Y เนื้อชิ้นงานในส่วนนี้จะถูกทำให้งอ (Bending) และเกิดการเลื่อนตัว (Sliding) ซึ่งเกิดขึ้นตามรูปร่างของแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die Profile) ส่วนที่เกิดการยืดตัว (Stretching) โดยแรงดึงจะเกิดระหว่างแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) และส่วนหัวของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Profile) ส่วนที่เกิดการงอและการเลื่อนตัว จะเกิดขึ้นตามรูปร่างของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Head) ส่วนโซน Z จะเกิดการยืดตัว (Stretching) และการเลื่อนตัว (Sliding) ขึ้นที่ส่วนหัวของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Head) ขนาดของความเครียด (Strain) จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Head) และความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส จากข้างต้นเราสามารถทราบความเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังถ้วยรูปทรงกระบอกที่เกิดจากกระบวนการลากขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงไป [3]

2.1.10 ข้อบกพร่องและสาเหตุที่เกิดขึ้นในระหว่างการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยม [3]

1. เกิดการแตกขาดบริเวณผนังด้านข้างของถั่วมีสาเหตุมาจาก
 - แผ่นขึ้นงานก่อนลากขึ้นรูปไม่เหมาะสม
 - ค่าช่องว่างระหว่างพินช์และคายน้อยเกินไป
 - แรงกดยึดแผ่นขึ้นงานมากเกินไป
 - รัศมีพินช์และคายน้อยเกินไป
 - สารหล่อลื่นไม่เพียงพอในการหล่อลื่น
2. เกิดการแตกหักขาดบริเวณก้นถั่วสี่เหลี่ยมมีสาเหตุมาจาก
 - ผนังผิวของพินช์และคายนวมถึงแผ่นกดยึดขึ้นงานไม่เรียบ เอียง ไม่ขนานชิด
 - ติดกันระหว่างการลากขึ้นรูป
 - ใช้สารหล่อลื่นไม่เพียงพอในการไหลตัวของโลหะ
 - อัตราในการลากขึ้นรูปสูงเกินไป
 - ตำแหน่งของพินช์ คาย และแผ่นกดยึดขึ้นงานเอียงไม่ได้ศูนย์
3. เกิดรอยย่นที่ปีกของขึ้นงานด้วยสี่เหลี่ยมมีสาเหตุมาจาก
 - ใช้แรงกดแผ่นยึดขึ้นงานน้อยเกินไป
 - รัศมีพินช์และคายน้อยเกินไป
 - แผ่นกดยึดขึ้นงานเอียงทำให้แรงกดไม่สม่ำเสมอ
 - ผนังผิวระหว่างคายนและแผ่นกดยึดขึ้นงานไม่เรียบเสมอกันทุกจุด

4. เกิดรอยย่นที่ขอบปากขอด้วยสี่เหลี่ยม
 - ใช้แรงกดแผ่นยึดชิ้นงานน้อยเกินไป
 - รัศมีคายนมากเกินไป
 - แผ่นกดยึดชิ้นงานเอียงทำให้แรงกดไม่สม่ำเสมอ
 - ระยะช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคายนมากเกินไป
5. ขอบหรือปีกของชิ้นงานด้วยสี่เหลี่ยมมีขนาดไม่สม่ำเสมอ
 - แผ่นชิ้นงานขนาดไม่สม่ำเสมอ หรือวางไม่ได้ศูนย์
 - แผ่นกดยึดชิ้นงานเอียงทำให้แรงกดไม่สม่ำเสมอ
 - พื้นซ์และคายนไม่ตรงศูนย์กลาง

2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA)

ความแปรปรวน (Variance) เป็นมาตรการวัดการกระจายของข้อมูลซึ่งมีความสัมพันธ์กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เนื่องจาก ความแปรปรวนสามารถคำนวณได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานยกกำลังสอง ความแปรปรวนจึงเป็นการวัดการกระจายของข้อมูลในรูปของพื้นที่ สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) หรือเรียกอย่างย่อว่า ANOVA เป็นวิธีหนึ่งในการทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มขึ้นไปพร้อม ๆ กันซึ่งยังคงใช้หลักการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มประชากรกลุ่มเดียวหรือ 2 กลุ่มในการใช้ z หรือ t ทดสอบ มีขั้นตอนของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตามเนื่องจากปัจจัยเดียว ตัวแบบอิทธิพลคงที่ สามารถสรุปได้ดังนี้

สมมติฐานที่จะทดสอบคือ

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0; \text{ อย่างน้อย 1 ค่าของ } i$$

ในการทดสอบสมมติฐานจะอาศัยการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยการหาค่าความผันแปรโดยรวม แล้วแตกออกเป็นความแปรผันเนื่องจากทรีตเมนต์ และความแปรผันเนื่องจากความคลาดเคลื่อนหรือรีพีทเทเบิลิตี และในกรณีนี้จะมีตัวแปรจำนวนมากจึงนิยมใช้สัญลักษณ์แบบจุด (Dot Notation) มาช่วยในการอธิบาย กล่าวคือเมื่อมีการรวม (Summation) ภายใต้อักษรนี้ตัวห้อย (Subscript) ใด ให้แทนตำแหน่งของดัชนีตัวห้อยดังกล่าวด้วยจุด คือ

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n Y_{ij} = Y_{...} \text{ และ } \frac{Y_{...}}{an} = \bar{Y}_{...}$$

$$\sum_{i=1}^a Y_{ij} = Y_{.j} \text{ และ } \frac{Y_{.j}}{a} = \bar{Y}_{.j}$$

$$\sum_{i=1}^a Y_{ij} = Y_{.i} \text{ และ } \frac{Y_{.i}}{n} = \bar{Y}_{.i}$$

ดังนั้น

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 \quad (2.11)$$

อย่างไรก็ตาม การคำนวณค่าผลรวมกำลังสองโดยตรงตามสมการที่ (2.10) จะค่อนข้างยาก จึงได้มีการแนะนำให้จัดรูปแบบการคำนวณใหม่ คือ

$$SS_T = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^5 Y_{ij}^2 - \left(\frac{Y_{..}^2}{an} \right) \quad (2.12)$$

คำนวณผลบวกกำลังสองเนื่องจากปัจจัย

$$SS_{tr} = \sum_{i=1}^4 \frac{Y_{i.}^2}{n} - \left(\frac{Y_{..}^2}{an} \right) \quad (2.13)$$

คำนวณผลบวกกำลังสองเนื่องจากความผิดพลาดแบบสุ่ม

$$SS_E = SS_T - SS_{tr} \quad (2.14)$$

คำนวณค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง

$$MS_{tr} = \frac{SS_{tr}}{a-1} \quad (2.15)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{a(n-1)} \quad (2.16)$$

คำนวณค่าสถิติสำหรับทดสอบ

$$F_O = \frac{MS_{tr}}{MS_E} \quad (2.17)$$

เปรียบเทียบค่าสถิติสำหรับทดสอบ F_O กับ $F_{\alpha;a-1,a(n-1)}$

ถ้า $F_O \geq F_{\alpha;a-1,a(n-1)}$ ปฏิเสธ H_0

ถ้า $F_O < F_{\alpha;a-1,a(n-1)}$ ยอมรับ H_0

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับไทรบอโลยีในการลากขึ้นรูป (Tribology in deep drawing process)

2.3.1 ความเสียดทาน [4]

การลากขึ้นรูปลึกด้วยกลมก้นเรียบนั้น จะเกิดความเสียดทานขึ้นในกระบวนการ ดังนี้

1. บริเวณก้นถ้วยและรัศมีถ้วยที่เกิดจากรัศมีพื้นที่กับชิ้นงาน จะเกิดแรงเสียดทานขึ้น เนื่องมาจากการคัดเหนือรัศมีพื้นที่และดัดกลับบริเวณรัศมีคาย ซึ่งหากรัศมีพื้นที่มีค่ามากยิ่งจะทำให้แรงเสียดทานที่บริเวณนี้มีค่ามากเนื่องจากพื้นที่สัมผัสกับชิ้นงานจะยิ่งมากขึ้น ความเสียดทานที่รัศมีพื้นที่จะมีประโยชน์ในด้านช่วยรับแรงกระทำจากผนังถ้วยกลม

2. บริเวณผนังถ้วยกับพื้นที่จะเกิดแรงเสียดทานที่มากขึ้น อันเนื่องมาจากแรงดึงและการเคลื่อนที่สัมผัสที่ลดลงของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นงาน ซึ่งแรงนี้ก็จะช่วยให้ความเค้นที่อาจทำให้เกิดการฉีกขาดบนผนังชิ้นงานถูกส่งไปที่พื้นที่แทน

3. ความเสียดทานเกิดจากแผ่นชิ้นงานกับแผ่นจับยึดชิ้นงานและผิวคาย โดยบริเวณนี้แผ่นชิ้นงานจะถูกแรงกดอัดในแนวเส้นรอบวงขึ้นพร้อมกับแรงดึงในแนวรัศมี ความเสียดทานนี้จะส่งผลให้แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปเพิ่มมากขึ้นอีกจุดหนึ่ง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาหาทางลดความเสียดทานนี้แต่จะต้องคำนึงถึงการเกิดการยุบที่บริเวณปีกถ้วยไปพร้อมกันด้วย

4. ความเสียดทานอันเนื่องมาจากการกดอัดในแนวเส้นรอบวง เมื่อแผ่นงานเคลื่อนที่ลงในคาย ทำให้เส้นรอบวงแผ่นงานลดลง ที่บริเวณใกล้รัศมีคายจะถูกบีบน้อยมากและปริมาณการบีบจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเข้าใกล้ขอบนอกแผ่นงานทำให้ขอบนอกแผ่นงานหนาขึ้น ขณะที่ช่องว่างระหว่างพื้นที่กับคายมีขนาดเท่ากับความหนาแผ่นงานที่ผนังถ้วยจะถูกรีด ความเสียดทานที่เกิดขึ้นในกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกนี้ จะเป็นตัวต้านการเคลื่อนที่ของผิวสัมผัสของวัสดุกับผิวของชุดแม่พิมพ์ โดยลักษณะการเคลื่อนที่ที่เป็นแบบสไลด์ (Sliding) ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน ใช้แรงในการทำงาน

มากขึ้น เนื่องจากไม่มีพื้นผิวใดที่เรียบจริงเมื่อมองผ่านกล้องที่มีกำลังขยายสูง จะพบว่ามีลักษณะเป็นคลื่นขรุขระอยู่ แบบจำลองความเสียดทานจึงขึ้นอยู่กับพื้นที่สัมผัสจริง (Real area of contact)

2.3.2 การทดสอบเพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน [4]

ในการวัดค่าความเสียดทานนั้น ข้อมูลค่าที่วัดได้ออกมาจะเป็นข้อมูลเชิงปริมาณเปรียบเทียบ ดังนั้นในการทำการทดสอบวัดค่าความเสียดทานนั้นจะต้องทำการวัดค่าจากการจำลองการทำงานจริง ตามสภาวะมาตรฐานที่เงื่อนไขเดียวกัน เพื่อที่จะสามารถออกแบบจำลองการทดสอบที่มีประสิทธิภาพจึงจะสามารถเปรียบเทียบค่าข้อมูลกันได้ ในการออกแบบการทดสอบหรือการเลือกใช้เครื่องมือชนิดใดนั้นจะต้องทราบถึงกลไกการเกิดความเสียดทานที่เกิดขึ้นในสภาวะต่างๆ เพื่อที่จะออกแบบจำลองการทดสอบที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งเมื่อต้องการวัดค่าความเสียดทานที่เกิดในกระบวนการลากขึ้นรูปลึงในงานวิจัยนี้นั้น จะต้องพิจารณาการเคลื่อนที่สัมผัสทั้งหมดที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวจุดสัมผัสว่าเกิดขณะใดบ้าง จากทฤษฎีการลากขึ้นรูปลึงจะเกิดการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างผิวของแผ่นเปล่า ผิวคายและผิวแผ่นจับยึดชิ้นงาน เมื่อแผ่นเปล่าถูกพื้นซ้กดผ่านปากคายลง ไป แรงที่ทำให้เกิดความเสียดทานเป็นแรงกดในทิศทางตั้งฉากกับจุดสัมผัส ดังนั้นวิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะใช้วิธีกดขึ้นรูปวงแหวน (Ring test) โดยหลักการ คือ ชิ้นงานทดสอบเป็นรูปวงแหวนใช้แรงกดซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน ทำให้เกิดการไหลตัวในทิศทางขนานกับผิวชิ้นงานกับแม่พิมพ์ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในชิ้นงานจะลดลงหรือเพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับความเสียดทานซึ่งมี 2 ลักษณะ คือ ในกรณีที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าน้อย ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น และในกรณีที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่ามาก ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในชิ้นงานมีขนาดลดลง ซึ่งจะได้จากการหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในก่อนกดหลังกด และการหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความสูงชิ้นงานก่อนกดหลังกด แล้วนำค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไปเปรียบเทียบ อ่านค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานได้จากกราฟคาลิเบรชัน (Calibration curves) ของ Male และ Cockcroft

2.3.3 กลไกของการหล่อลื่นโดยทั่วไป [5]

1. สภาวะไร้สารหล่อลื่น (Non Lubricant) ในสภาวะการหล่อลื่นแบบนี้ผิวสัมผัสของคู่วัสดุจะสัมผัสกันโดยตรงและมีผลทำให้เกิดการเสียหาย หรือสึกหรออย่างรุนแรงบนผิวหน้าของคู่สัมผัสความเรียบผิวจะมีอิทธิพลมากในการหล่อลื่น ซึ่งผิวคู่สัมผัสจะเป็นตัวหล่อลื่นเอง และมีการสูญเสียเนื้อวัสดุบริเวณผิวหน้าในกรณีนี้เป็นปริมาณสูงมาก

2. การหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ (Full Film Lubricant) เป็นขอบเขตที่มีการใช้สารหล่อลื่นที่ทำให้เกิดฟิล์มน้ำมันหนาพอที่จะแยกผิวคู่วัสดุ ที่มีการเคลื่อนที่ให้แยกออกจากกันได้โดยสิ้นเชิง สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นในกรณีนี้ จะขึ้นอยู่กับค่าของสัมประสิทธิ์การเสียดทานของชั้นสารหล่อลื่นซึ่งขึ้นกับค่าความหนืดของสารหล่อลื่นนั้นเพียงอย่างเดียว ไม่ขึ้นอยู่กับความเรียบของผิวแม่พิมพ์และความเรียบของผิวชิ้นงานภายใต้สภาวะการหล่อลื่นในแบบสมบูรณ์นั้นแรงกระทำในแนวตั้งถูกรองรับโดยสารหล่อลื่นโดยตรง ผิวคู่สัมผัสที่มีการเคลื่อนที่จะถูกแยกออกจากกันโดยสิ้นเชิงด้วยตัวของสารหล่อลื่น ดังนั้นจึงไม่มีการเกิดการสัมผัสกันโดยตรงของผิววัสดุเลยสัมประสิทธิ์การเสียดทานที่เกิดขึ้นทั้งหมดจึงมีเฉพาะสัมประสิทธิ์การเสียดทานในสารหล่อลื่นเท่านั้น

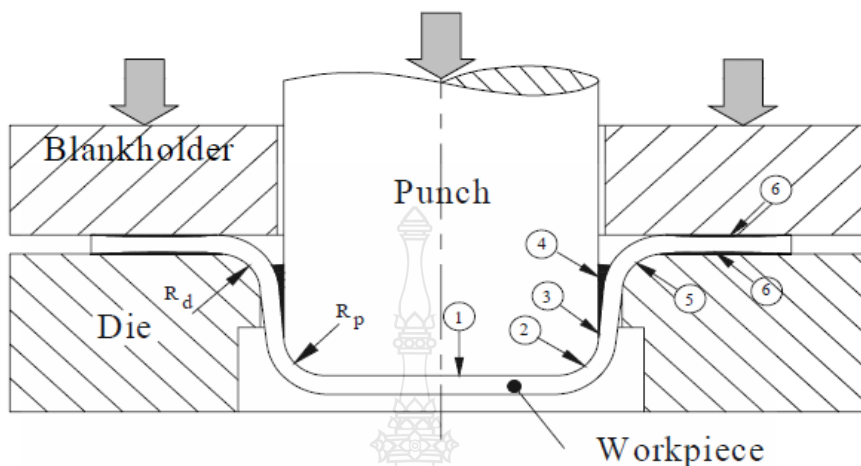
3. การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์ (Mixed Film Lubricant) ภายใต้การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์นี้ ผิวสัมผัสที่ลื่นไถลไปจะมีฟิล์มน้ำมันแยกเนื้อวัสดุออกได้เพียงบางส่วนและมีบางส่วนที่ยอดผิวของเนื้อวัสดุ (Asperities) จะสัมผัสกันโดยตรง ผลที่เกิดขึ้นคือแรงกระทำในแนวตั้งบางส่วนจะถูกรองรับไว้โดยแรงดันของฟิล์มน้ำมัน แต่ก็ยังมีแรงกระทำหรือภาระที่เกิดขึ้นอีกบางส่วนที่รองรับโดยผิวเนื้อวัสดุ

4. การหล่อลื่นแบบขานคาร์รี่ (Boundary Lubricant) ในลักษณะนี้ผิวคู่สัมผัสโดยส่วนใหญ่จะถูกปกคลุมด้วยชั้นผิวหน้าของวัสดุที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี หรือการดูดกลืนอะตอม (Atomic Absorption) ดังนั้นในระหว่างการขัดสี (ลื่นไถล) ในการใช้งานชั้นผิวเหล่านี้จะถูกขัดสีแทนเนื้อวัสดุ และด้วยค่าความเสียดทานต่อการเสียดตัวที่ต่ำกว่าเนื้อคู่สัมผัส จึงทำให้ชั้นผิวหน้าเหล่านี้สึกหรอออกไปก่อนและจะตามด้วยผิวชั้นใหม่ที่อาจจะเกิดจากปฏิกิริยา หรือการดูดกลืนอะตอมขึ้นมาทดแทนผิวหน้าเดิมไปเป็นระยะๆ ดังนั้นผิวหน้าเหล่านี้จึงทำหน้าที่ปกป้องเนื้อวัสดุของคู่สัมผัสจากการสึกหรอได้ อีกส่วนหนึ่งก็คือ การใช้สารหล่อลื่นที่ไม่เพียงแต่ช่วยทำให้เกิดผิวชั้นเหล่านี้ขึ้นมาใหม่ แต่ยังสามารถปิดหรืออุดบริเวณที่เป็นร่องหลุมบนผิวด้านในของคู่สัมผัสได้อีกด้วย

2.3.4 สภาวะของสารหล่อลื่นในกระบวนการการลากขึ้นรูปลึก [5]

การหล่อลื่นมีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูปลึกและขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปลึก ความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างการลากขึ้นรูปลึกเป็นความเสียดทานแบบผสม โดยผิวสัมผัสที่ลื่นไถลไปจะมีฟิล์มน้ำมันแยกเนื้อวัสดุออกได้เพียงบางส่วน และมีบางส่วนที่ยอดผิวเนื้อวัสดุ (Asperities) จะสัมผัสกันโดยตรง นอกจากกรณีที่ใช้ฟิล์มหล่อลื่นซึ่งหนาและติดแน่นเพียงพอ โดยไม่ทำให้ผิวโลหะสัมผัสกัน (Metal to Metal Contact) สภาวะในบริเวณความเสียดทานผสม การรับแรงกดของสารหล่อลื่นมักขึ้นอยู่กับความหนืด และส่วนผสมทางเคมีของสารหล่อลื่น ในขณะที่ทำการ

ลากขึ้นรูปในการลากขึ้นรูปลึกจะมีสภาวะของสารหล่อลื่นแสดงในภาพที่ 2.4 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2.11 สภาวะของสารหล่อลื่นในกระบวนการการลากขึ้นรูปลึก [5]

1. บริเวณศูนย์กลางพื้นที่จะไม่มีการลื่นไหลเกิดขึ้น สภาวะที่บริเวณก้นถ้วยที่พื้นที่กด (โซน 1) ในบริเวณนี้จะเกิดแรงเสียดทานเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเนื่องจากวัสดุจะถูกการจำกัดการเคลื่อนที่โดยรัศมีพื้นที่กดบังคับผิวกันด้วย และการบีบอัดของสารหล่อลื่นที่ไม่สามารถกระจายออกไปได้ จะเกิดการเคลื่อนที่สัมผัสในอัตราที่ต่ำ ยกเว้นจุดที่มีความเสียดทานที่รอบรัศมีพื้นที่ (โซน 2) จะไม่มีการเคลื่อนที่สัมผัสเลย บริเวณนี้ความเร็วผิวของชิ้นงานจะใกล้เคียงกับผิวแผ่นงานเริ่มต้น แต่หากในขั้นตอนของกระบวนการเกิดการเยื้องศูนย์กลางของพื้นที่และแผ่นงานเพียงเล็กน้อย จะก่อให้เกิดความเสียดทานมากขึ้น หรือการสัมผัสที่บริเวณรัศมีพื้นที่จะไม่มีความดันของผิวสัมผัส ไม่มีการเคลื่อนที่สัมผัสเนื่องจากวัสดุถูกรัศมีพื้นที่กดไม่ให้เกิดการลื่นไหล ในทางปฏิบัติไม่ควรหล่อลื่นที่ขอบรัศมีพื้นที่

2. บริเวณระหว่างที่ด้านข้างพื้นที่กับผนังถ้วยด้านใน (โซน 3) ขณะที่ถูกดึง สารหล่อลื่นจะอยู่ในสถานะฟิล์มถูกคักจับโดยการกดบีบ (Squeeze Film) เนื่องจากแรงกระทำที่ส่งผ่านจากคายนมาที่ผิวพื้นที่กระทำกับผนังถ้วยด้านในที่จุดเปลี่ยนแปลง (โซน 4) ความดันของสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นจะต่ำจนถึงศูนย์ เมื่อเกิดการคืนรูปแบบพลาสติก (Plastic Springback) หรืออาจเกิดจากช่องว่างระหว่างพื้นที่กับคายน (Clearance) มากเกินไป ทำให้เกิดการขึ้นรูปโดยอิสระ (Free Deformation)

ความเร็วผิวชิ้นงานที่บริเวณนี้จะเปลี่ยนแปลงไปมากหรือน้อยเพียงใด ขึ้นกับสมบัติทางกลในเรื่องการยึดตัวภายในเนื้อวัสดุเอง การใช้สารหล่อลื่นก็จะไม่ส่งผลต่อการทำงานมากนัก

3. บริเวณรอบๆรัศมีดาบ (โซน5) มีความเสียดทานเลื่อนไถล เป็นบริเวณที่เกิดแรงดันที่เพิ่มมากขึ้นความเร็วในการไหลตัวของวัสดุที่ใช้จะเท่ากับความเร็วในการลากขึ้นรูปและพื้นผิวชิ้นงานที่เปลี่ยนรูปถาวรจากการกดตามแนวเส้นรอบวง การตัด และตัดกลับ ผิวชิ้นงานมีผิวหยาบเพิ่มอย่างต่อเนื่อง(Progressively Rougher) และถ้าฟิล์มของสารหล่อลื่นขาดจะเกิดการเกาะติด (Tool Pick Up) กับผิวดาบแล้วจะจุดผิวงานให้มีร่องลึกจนสามารถสังเกตได้ ดังนั้นบนรัศมีดาบต้องมีการหล่อลื่นเป็นอย่างดีในบริเวณนี้

4. บริเวณขอบมีความเสียดทานระหว่างแผ่นเปล่ากับดาบและแผ่นจับยึดชิ้นงาน (โซน6) แผ่นชิ้นงานจะเคลื่อนที่ในแนวขนานกับดาบและแผ่นจับยึดชิ้นงาน และมีความเร็วสัมพันธ์กับดาบและแผ่นจับยึดชิ้นงาน หากความดันที่แผ่นจับยึดชิ้นงานให้แก่วัสดุชิ้นเพียงพอ จะทำให้เกิดการไหลตัวของสารหล่อลื่นติดไปกับพื้นผิวชิ้นงาน โดยมีความเร็วเท่ากับการเคลื่อนที่ของชิ้นงานนั้น ทำให้การหล่อลื่นที่บริเวณนี้มีความต่อเนื่อง ประกอบกับที่บริเวณนี้วัสดุจะมีความหนาที่ขอบเพิ่มมากขึ้น เกิดเป็นพื้นที่ลาดเอียงเข้าสู่ปากแม่พิมพ์ทำให้การกระจายสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวมีทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน ซึ่งก็เป็นเหตุผลที่ช่วยให้กลไกการหล่อลื่นที่บริเวณนี้มีประสิทธิภาพที่ดี เนื่องจากความหนาที่ขอบแผ่นเปล่าเพิ่มขึ้น จึงมีการกดเป็นรูปวงแหวนแคบๆ จะทำให้มีฟิล์มสารหล่อลื่นหนามากขึ้น ดังนั้นความเสียดทานที่เกิดขึ้นจึงใกล้เคียงกับการหล่อลื่นแบบสมบูรณ์เมื่อมีการหล่อลื่นดี ความเสียดทานระหว่างแผ่นจับยึดชิ้นงานกับแผ่นเปล่าและแผ่นเปล่ากับผิวดาบลดลง ดังนั้นความเค้นดึงในแนวแกนที่ชิ้นงานจึงลดลงด้วย ผลก็คือ อัตราส่วนการลากขึ้นรูปลึกลงไป ถ้าต้องการเพิ่มอัตราส่วนการลากขึ้นรูปลึกลงไปเพิ่มมากขึ้นอีก ต้องพยายามเพิ่มความเสียดทานที่รัศมีเพิ่มขึ้นให้มากขึ้น เพราะความเสียดทานสามารถช่วยรับแรงในการลากขึ้นรูปลึกลงไปได้มากขึ้น จึงส่งผลให้อัตราส่วนการลากขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น การใช้สารหล่อลื่นที่เหมาะสมนั้นมีความจำเป็นที่จะออกแบบและทดสอบสารหล่อลื่นนั้น ๆ ในการทำงานจริงแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน โดยอาจจะวัดค่าความเสียดทานหรือวัดทางอ้อมโดยดูจากค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปที่มากที่สุด จัดเป็นสารหล่อลื่นที่เหมาะสมในกระบวนการนี้ได้

2.4 สารหล่อลื่น [6]

2.4.1 ชนิดของสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมาย ซึ่งถ้าแบ่งตามสถานะจะแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด คือ ก๊าซ ของเหลว สารกึ่งแข็ง (Semi - Solid) และของแข็ง สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กันมากที่สุด เพราะมีคุณสมบัติหลากหลายเมื่อนำไปใช้งาน และสามารถรับแรงที่กระทำได้มาก ของเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นมีน้ำ สารละลายกับน้ำ (Aqueous Solution) น้ำมันแร่ (Mineral Oil) น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ และน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Oil)

1. น้ำมันแร่ เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในหอกถัน ได้จากการเอาส่วนที่อยู่ก้นหอกถันภายใต้บรรยากาศผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญที่ถูกควบคุมโดยการกลั่นสุญญากาศก็คือ ความหนืด (Viscosity) จุดวาบไฟ (Flash Point) และ คาร์บอน (Carbon Residual) แยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดใสและชนิดข้นออกมา ที่เหลือเป็นกากก็สามารถนำไปผลิตยางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาถัน น้ำมันแร่ที่ได้จากน้ำมันดิบพวกพาราฟินิก (Paraffinic) มักจะมีไขสูง ต้องผ่านกระบวนการขจัดเอาไขออก น้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นแยกภายใต้สุญญากาศนี้ปกติจะมีคุณภาพที่ไม่ดีพอที่จะนำมาใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่น ต้องผ่านกระบวนการต่างๆเพื่อขจัดเอาสารที่ไม่ต้องการออก เพื่อให้มีความอยู่ตัวเชิงเคมีและเชิงความร้อนดี

2. น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ เนื่องจากน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ที่ได้จากธรรมชาติมักมีความอยู่ตัวทางเคมีต่ำ เกิดเสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะใช้งานจึงต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งราคาก็จะแพงขึ้นมาก จึงหมดความนิยมไป ปัจจุบันมีการใช้น้ำมันพืชหรือสัตว์เป็นน้ำมันพื้นฐานน้อยมากและใช้เฉพาะในงานหล่อลื่นที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางประการเท่านั้น ส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้เป็นตัวเติมเพิ่มคุณภาพให้น้ำมันหล่อลื่นที่ทำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม เช่น เพื่อเพิ่มความลื่นและความสามารถในการเข้ากับน้ำ เป็นต้น

3. น้ำมันสังเคราะห์ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่ที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบนั้นแม้ว่าจะผ่านกระบวนการมากมายที่ใช้กำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป แต่น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้ออกมานั้นยังคงเป็นของผสมของสารประกอบหลายตัว ซึ่งไม่มีทางที่จะเลือกเอาเฉพาะสารที่มีสมบัติที่ดีที่สุดได้ หรือถ้ามีก็จะได้ผลผลิตต่ำ เป็นผลให้น้ำมันแร่มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน ดังนั้นได้มีการพัฒนาน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันสังเคราะห์ขึ้นมา น้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันพื้นฐานที่ได้จากกระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งเป็นการรวมตัวของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ให้ได้น้ำมันที่มีความหนืดเพียงพอที่จะใช้

เป็นสารหล่อลื่น ข้อดีของน้ำมันสังเคราะห์เมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ คือสามารถนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าน้ำมันแร่ คือ ใช้ได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำและสูงกว่าน้ำมันแร่ นอกจากนี้ น้ำมันสังเคราะห์บางประเภทยังให้สมบัติเฉพาะ เช่น ผสมเข้ากับน้ำได้ และไม่ติดไฟ มีการระเหยต่ำ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม น้ำมันสังเคราะห์จะมีข้อได้เปรียบกว่าน้ำมันแร่ เมื่อนำไปใช้งานบางประเภท น้ำมันสังเคราะห์ยังไม่มีสมบัติที่เหมาะสมทุกด้าน จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันสังเคราะห์โดยการใส่สารเพิ่มคุณภาพซึ่งจะช่วยเพิ่มสมบัติทางด้านเคมีและด้านกายภาพ

4. สารหล่อลื่นของแข็ง เป็นสารหล่อลื่นที่มีความสามารถในการรับแรงกดแนวตั้งได้ดี และในขณะเดียวกันก็มีความสามารถในการเลื่อนไหลไปได้อย่างง่ายในชั้นผิว เมื่อมีแรงกระทำในแนวราบหรือเมื่อเกิดแรงเฉือน สารหล่อลื่นของแข็งจะอยู่ระหว่างคู่ผิวโลหะที่เคลื่อนที่ และจะช่วยปกป้องการเสียดสีระหว่างผิวโลหะ ทำให้ช่วยลดการสึกหรอและการเสียดสี รวมถึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำลงด้วย สารหล่อลื่นของแข็งที่ใช้กันโดยทั่วไปในปัจจุบันคือ กราไฟต์ โมลิบดินัมได-ซัลไฟด์ และแผ่นพลาสติก

2.4.2 สมบัติของสารหล่อลื่น [6]

1. สารหล่อลื่น ILOFORM TDN 81 เป็นพวก EP (Extreme pressure oil) เป็นน้ำมันผสมไขมัน วิธีการใช้จะไม่ผสมกับน้ำ โดยทาลงบนชิ้นงานที่มีผิวสะอาด ใช้สำหรับเหล็กกล้าโรสนิมและโลหะผสมนิกเกิลสูง สำหรับเหล็กกล้าที่ทำการลากขึ้นรูปลึกได้ยาก เช่น โลหะผสมนิกเกิลโครเมียมสูง ไนโมนิค และไตตานิยม และจะเหมาะสมกับอลูมิเนียมผสมด้วย เมื่อใช้ในงานลากขึ้นรูปลึก จะไม่มีรอยขีดข่วน ง่ายต่อการใช้งานง่ายต่อการทำความสะอาด ทำให้ผิวชิ้นงานหลังขึ้นรูปดีขึ้น

ข้อมูลจำเพาะ ลักษณะน้ำมันจะมีสีใสสีเหลืองอ่อน

ความหนาแน่น ณ 15.5 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1.190 กรัม/ลูกบาศก์ลิตร

ความหนืด ณ 20 องศาเซลเซียส เท่ากับ 812 ม.ม.2/วินาที

ณ 50 องศาเซลเซียส เท่ากับ 83 ม.ม.2/วินาที

จุดวาบไฟ มากกว่า 177

2. สารหล่อลื่น RENOFORM MZA 30 เป็นสารหล่อลื่นที่ใช้ในงานกดอัด งานดึงท่อ และงานขึ้นรูปโลหะ การใช้งาน ไม่ผสมกับน้ำสามารถทำความสะอาดได้ง่าย

ข้อมูลจำเพาะ สีเหลืองใส

ความหนาแน่น ที่ 15 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1.105 กรัม/ลูกบาศก์ลิตร

ความหนืด ที่ 20 องศาเซลเซียส เท่ากับ 680 ม.ม.2/วินาที

ที่ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 142 ม.ม.2/วินาที

ที่ 50 องศาเซลเซียส เท่ากับ 76 ม.ม.2/วินาที
 จุดวาบไฟ เท่ากับ 230

หมายเหตุ

เหมาะกับการลากขึ้นภาพที่ง่ายและยาก ส่วนมากใช้กับเหล็กกล้าไร้สนิม และยังใช้ในงานสปินนิ่งงานดึงลวด งานดึงขึ้นภาพที่ใช้เหล็กกล้าพิเศษ เช่น ดึงท่อกลวง ดึงท่อตัน ยังใช้ในงานกดอัดงานที่ผ่านการอบอ่อนมาแล้ว การทาสารหล่อลื่นต้องระมัดระวังโดยทาลงบนผิวงานโดยตลอด และยังสามารถประยุกต์ใช้โดยการฉีดพ่น ลูกกลิ้ง แปรง

3. สารหล่อลื่น HOUGHTO-DRAW 359H ใช้ในงานลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้า ง่ายในการทำความสะดวกหลังจากใช้งาน การนำไปใช้งานจะใช้เฉพาะสารหล่อลื่นโดยตรงหรือผสมกับน้ำมันแร่ก็ได้ โดยใช้ฟองน้ำแปรง ลูกกลิ้งฉีดพ่น ใช้ในงานลากขึ้นภาพที่ยากสำหรับวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าและเหล็กกล้าไร้สนิมคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์

ข้อมูลจำเพาะ ความหนืด ที่ 100 องศาฟาเรนไฮต์หรือ 38 องศาเซลเซียส
 เท่ากับ 1100 มิลลิเมตร /วินาที

เป็นสีดำ สีน้ำตาลเหลือง สีอำพัน

ความถ่วงจำเพาะ 1.28

4. สารหล่อลื่น HOUGHTO-DRAW 756-A เป็นสารสังเคราะห์ (ไม่ใช่ น้ำมันปิโตรเลียม) เจือจางด้วยน้ำสำหรับงานลากขึ้นรูปเป็นลักษณะคล้ายครีมแป้งเปียก เมื่อผสมแล้วจะนำไปทาบริเวณระหว่างชิ้นงานกับคานซึ่งจะเป็นชั้นบางๆ ในงานลากขึ้นรูปลึกสำหรับเหล็กกล้าและเหล็กกล้าไร้สนิม รวมถึงจะใช้ได้ดีในวัสดุอะลูมิเนียม ทองแดงทองเหลือง จะไม่ทำให้เปรอะเปื้อนในขณะที่ทำงานและลดรอยขีดข่วน ใช้ในงานลากขึ้นรูปลึก หล่อเย็นในงานตีขึ้นรูป ทำให้เจือจางด้วยน้ำและผสมง่าย โดยใช้ น้ำมัน 25 เปอร์เซ็นต์ น้ำ 75 เปอร์เซ็นต์โดยใช้แปรง ฟองน้ำ ลูกกลิ้ง การฉีดพ่น

คุณลักษณะจำเพาะ เป็นสารสังเคราะห์ ใช้ได้กับวัสดุที่เป็นอโลหะและโลหะ

การทำความสะอาดจะยากเมื่อสารหล่อลื่นแห้งตัว

คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์

ลักษณะสีขาว สีครีมแป้งเปียก

ความถ่วงจำเพาะ 1.10

5. น้ำมันมะพร้าวเป็นน้ำมันพืช มีสีเหลือง ใช้ในงานลากขึ้นรูปลึกเหล็กกล้าและเหล็กกล้าไร้สนิม การนำไปใช้งานจะใช้สารหล่อลื่นโดยตรง ไม่ผสมกับน้ำ เป็นน้ำมันที่มีราคาถูกลง

ความหนืด ที่ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 40 ม.ม.2/วินาที
 ที่ 100 องศาเซลเซียส เท่ากับ 8 ม.ม.2/วินาที

ตารางที่ 2.3 สมบัติของสารหล่อลื่น

	DRAW 359H	TDN 81	MZA 30	COCONUT OIL	DRAW 756A
ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส (cSt)	598.64	164.35	141.15	40.61	-
ความหนืดที่ 100 องศาเซลเซียส (cSt)	30.62	10.80	12.63	8.200	-
ดัชนีความหนืด	74	6	76	182	-
จุดวาบไฟ (องศาฟาเรนไฮต์)	204	-	240	-	-
สี	ดำน้ำตาล	เหลือง	เหลือง	เหลือง	ขาว
ตัวเลขความเป็นกลาง	5.2865	0.1699	0.1373	10.1172	-

ตารางที่ 2.4 ราคาของสารหล่อลื่น

ราคาสารหล่อลื่น	ราคาน้ำมัน(บาท/ลิตร)
1. น้ำมัน TDN 81	122.45
2. น้ำมัน DRAW 359H	170
3. น้ำมัน MZA 30	165
4. น้ำมัน DRAW 756A	132.5
5. น้ำมันมะพร้าว	29.03

ตารางที่ 2.5 สารเพิ่มคุณภาพในสารหล่อลื่น (หน่วย พีพีเอ็ม)

	Phosphorus (P) ppm.	Zinc (Zn) ppm.	Magnesium (Mg) ppm.	Calcium (Ca) ppm.	Sulphur (S) ppm.
TDN81	N.D	2.9	6.31	18.4	0.419
MZA30	186.9	8.23	9.11	924.9	0.479
DRAW359H	N.D	69.84	9.22	1634	1.159
DRAW756A	N.D	N.D	N.D	N.D	0.027
COCONUT OIL	N.D	2.95	8.28	24.42	0.008

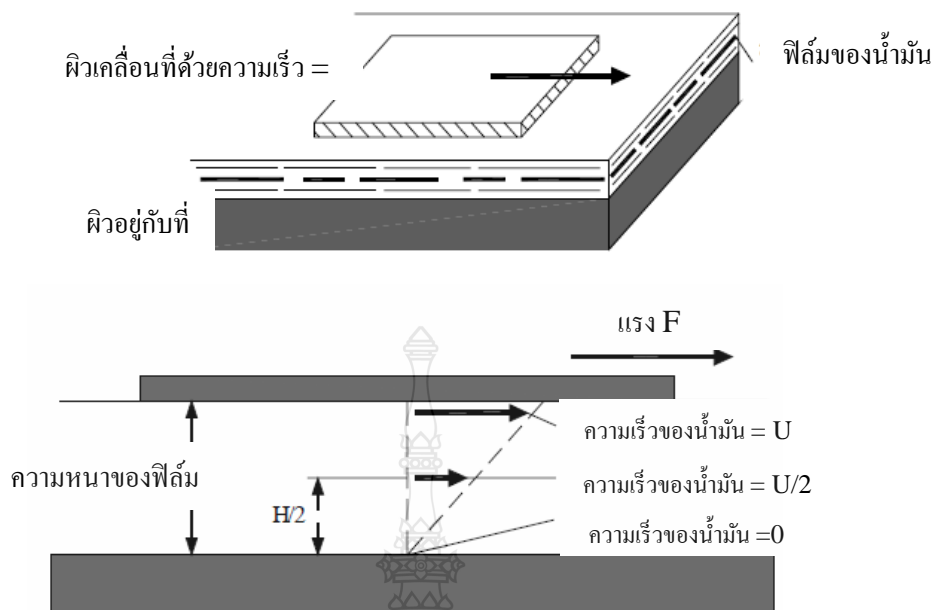
หมายเหตุ: N.D. ไม่มีส่วนผสมนี้ในตัวอย่างน้ำมันที่ทดสอบ

น้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดจะมีสมบัติแตกต่างกันดังนั้นในการเลือกใช้ จึงจำเป็นต้องรู้สมบัติของสารหล่อลื่น และในการผลิตก็จะต้องมีการควบคุมสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นให้ได้ตามต้องการ สำหรับคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่สำคัญทั้งสมบัติทางด้านฟิสิกส์และเคมี มีดังต่อไปนี้

6. ความหนืด (Viscosity) เป็นสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัส ความหนืด คือ ความข้นของน้ำมันโดยวัดที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง น้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะไหลง่าย แต่ฟิล์มหล่อลื่นก็บางมากด้วย สำหรับน้ำมันที่มีความข้นสูงย่อมไหลยาก แต่จะมีฟิล์มหล่อลื่นหนากว่าหรือแข็งกว่าน้ำมันที่มีความข้นต่ำ หน่วยวัดความหนืดมีหลายระบบและอุณหภูมิที่วัดก็ต่าง ๆ กัน ซึ่งอาจสรุปได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ระบบ หน่วย และอุณหภูมิที่วัดความหนืดของน้ำมัน [7]

ประเภทหรือระบบ	หน่วยความหนืด	อุณหภูมิที่ใช้วัด
1. ระบบสากล(เมตริก)	เซนติสโตก(Centistoke; cSt)	40 และ 100 องศาเซลเซียส
2. ระบบสหรัฐอเมริกา	วินาทีเซโบลต์ (Saybolt Universal Seconds ; SUS)	100 และ 210 องศาฟาเรนไฮต์
3. ระบบสหราชอาณาจักร	เรดวูด No.1 (Redwood Second ; RW1)	70,100,140,200 องศาฟาเรนไฮต์
4. ระบบเยอรมันและประเทศในยุโรป	อิงเลอร์ (Engler Degree ; E)	20,50,100 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2.12 หลักการของความหนืด [7]

หลักการวัดค่าของความหนืดตามที่แสดงในภาพที่ 2.5 ประกอบด้วยแผ่นวัตถุถูกดึงไปบนฟิล์มของน้ำมันด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ฟิล์มของน้ำมันติดอยู่ที่ผิววัตถุที่เคลื่อนที่และที่อยู่กับที่ ซึ่งเมื่อพิจารณาให้น้ำมันประกอบขึ้นด้วยชั้นหลายๆชั้น ชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่เคลื่อนที่ก็เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเดียวกับผิวที่เคลื่อนที่ (U) ส่วนชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่อยู่กับที่ก็จะมีความเร็วเป็นศูนย์ ชั้นน้ำมันที่อยู่ระหว่างชั้นบนสุดและล่างสุด ก็จะถูกดึงไปด้วยน้ำมันที่อยู่ด้านบนถัดไปให้มีความเร็วส่วนหนึ่งของความเร็ว U ซึ่งความเร็วของแต่ละชั้นของน้ำมันดังกล่าวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากผิววัตถุที่อยู่กับที่ แรงที่ใช้ในการดึงให้ผิววัตถุอันบนเคลื่อนที่ไปนี้คือ แรงที่ต้องเอาชนะความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นน้ำมันนั่นเอง ละเนื่องจากแรงนี้เป็นผลมาจากความหนืดโดยแรงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนืด ดังนั้นความหนืดก็สามารถหาได้จากการวัดแรงที่ต้องใช้เพื่อเอาชนะความเสียดทานของน้ำมัน ความหนืดที่หาได้ในที่นี้เรียกว่า ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Viscosity) หรือความหนืดเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Viscosity)

หน่วยความหนืดเชิงพลศาสตร์ที่นิยมใช้กันคือ หน่วยเป็นพอยส์ (Poise : P) ซึ่งเป็นหน่วยในระบบ CGS (Centimetre Gram Second)

$$1 \text{ Poise} = 1 \text{ Dyne s} / \text{cm}^2 = 1 \text{ g} / \text{cm.s}$$

$$1 \text{ Centipoise (cP)} = 1 \times 10^{-2} \text{ Poise (P)}$$

โดยทั่วไปเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความหนืด จะไม่สามารถวัดค่าความหนืดเชิงพลศาสตร์ได้ โดยตรงดังนั้น จึงได้กำหนดค่าความหนืดที่เรียกว่า ความหนืดเชิงจลศาสตร์ (Kinematic Viscosity) โดยให้ความหนืดเชิงจลศาสตร์ เท่ากับความหนืดเชิงพลศาสตร์หารด้วยความหนาแน่นของน้ำมันหรือของไหลนั้น ๆ ดังสมการ

$$\nu = \eta / \rho \quad (2.18)$$

เมื่อ ν = ความหนืดเชิงจลศาสตร์ (สโตก)

η = ความหนืดเชิงพลศาสตร์ (พอยส์)

ρ = ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

หน่วยความหนืดเชิงจลศาสตร์ที่นิยมใช้กันก็คือหน่วย Stoke (St) ซึ่งเป็นหนึ่งในระบบ CGS เช่นเดียวกัน โดย

$$1 \text{ Stoke (St)} = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$1 \text{ Centistoke (cSt)} = 1 \times 10^{-2} \text{ Stoke (St)}$$

ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะไม่คงที่ แต่จะแปรผันตามสภาวะการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะแปรผันกับอุณหภูมิและความดันในการใช้งาน ในด้านของคุณสมบัติความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมัน ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของเหลวจะขยาย ตัวโมเลกุลของน้ำมันจะเคลื่อนออกห่างกัน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลง และเป็นผลให้ความหนืดลดลงด้วย

7. ความต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน ดังที่ได้ทราบแล้วว่า น้ำมันเป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เมื่อสารไฮโดรคาร์บอนสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศก็จะเกิดการทำปฏิกิริยากัน ทำให้เกิดสิ่งไม่พึงประสงค์หลายชนิด เช่น กรด ความเหนียว นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิสูงอัตราการรวมตัวก็ยิ่งเกิดเร็วขึ้นอีก สำหรับน้ำมันที่ดีย่อมรวมตัวกับออกซิเจนได้ยาก

8. จุดวาบไฟ คืออุณหภูมิของน้ำมันที่ได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอ แล้วลุกวาบเมื่อโดนเปลวไฟ จุดวาบไฟมีความสำคัญเกี่ยวกับความปลอดภัย

9. จุดไหลเท คืออุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันจะไหลได้โดยไม่มีอะไรรบกวนสำหรับในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ จำเป็นที่จะต้องเลือกใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำ

10. ดัชนีความหนืด ความหนืดของน้ำมันจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่น้ำมันจะขึ้นน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจะขึ้นมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง จึงมีการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงนี้ออกมาเป็นค่าดัชนีความหนืด (Viscosity Index) หรือ ที่เรียกว่า ค่า VI ถ้าน้ำมันที่มีความหนืดเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมาก แสดงว่าน้ำมันหล่อลื่นมีค่า VI สูง ถ้าค่าความหนืดของน้ำมันเปลี่ยนแปลงมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงน้อยก็แสดงว่าน้ำมันมีค่า VI ต่ำ สมการที่ใช้ในการหาค่าดัชนีความหนืดของน้ำมัน หรือค่า VI คือ

$$VI = \left[\frac{(L-U)}{(L-H)} \right] \times 100 \quad (2.19)$$

เมื่อ U คือ ความหนืดที่ 100 องศาฟาเรนไฮต์ ของน้ำมันที่ต้องการหาค่า VI

L คือ ความหนืดที่ 100 องศาฟาเรนไฮต์ ของน้ำมันมาตรฐานที่มีค่า VI เท่ากับ ศูนย์ และจะมีค่าความหนืดที่ 210 องศาฟาเรนไฮต์ เหมือนกับน้ำมันที่นำมาหาค่า VI ที่ 210 องศาฟาเรนไฮต์

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

11. สี ของน้ำมันหล่อลื่นที่เห็นเมื่อมีแสงผ่านนั้นจะมีสีต่างๆ กัน ตั้งแต่ใสมากจนถึงดำ ซึ่งอาจมีสีเหลืองสีของน้ำมันหล่อลื่นเป็นผลมาจากชนิดน้ำมันดิบที่นำมาผลิต วิธีการกลั่น จำนวน และสารเพิ่มคุณภาพ

12. สภาพความเป็นกรด ต่าง น้ำมันหล่อลื่น โดยทั่วไปจะมีสภาพความเป็นกรดอยู่เล็กน้อย สภาพความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่น โดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการใช้งานของมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจน ซึ่งทำให้เกิดกรดอินทรีย์ขึ้น สภาพความเป็นกรดจะกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะได้ สภาพความเป็นกรดจะมีตัวเลขต่ำ

13. สารเพิ่มคุณภาพ (Additives) สารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน โดยทั่วไปเป็นสารประกอบทางเคมี สารเพิ่มคุณภาพแต่ละตัวจะปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเฉพาะอย่าง ซึ่งมีผลทำให้น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีสมบัติแยก

ออกเป็น 3 ประเภท คือ ประเภทที่ 1 จะเป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ให้สมบัติใหม่ที่เป็นประโยชน์ต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ประเภทที่ 2 เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ปรับปรุงสมบัติที่มีอยู่แล้วให้ดีขึ้น และประเภทที่ 3 สุดท้ายเป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ทำหน้าที่ในการลดการเปลี่ยนแปลง ที่ไม่ต้องการซึ่งเกิดในช่วงการทำงานลง ดังนั้นในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชนิดใดชนิดหนึ่งขึ้นมาจะต้องมีการศึกษาค้นคว้า และวิจัยถึงหน้าที่ที่น้ำมันหล่อลื่นประเภทนั้นจะต้องทำงานอยู่ในสภาวะต่าง ๆ เช่น ขณะหล่อลื่นเครื่องจักรกลและเครื่องยนต์ จากนั้นจึงจะสามารถกำหนดสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ต้องการใช้งานได้ แล้วจึงเลือกน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่จะนำมาผลิต และเลือกสารเพิ่มคุณภาพที่จะเติมในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อผลิตน้ำมันหล่อลื่นให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพดีและเหมาะสมกับงานที่ต้องการ จากนั้นจึงมีการทดสอบกับงานจริง และประเมินผลเพื่อให้แน่ใจว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ผลิตได้ดังกล่าวมีคุณภาพดีจริง ๆ ตรงตามความต้องการ ทำให้น้ำมันหล่อลื่นที่มีจำหน่ายในท้องตลาดแต่ละชนิดใช้น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ชนิด และปริมาณของสารเพิ่มคุณภาพที่ไม่เหมือนกัน และราคาก็แตกต่างกัน น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่อเติมสารเพิ่มคุณภาพเข้าไปแล้วก็จะเรียกว่า น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปซึ่งบริษัทผู้ผลิตแต่ละรายมักจะตั้งชื่อเฉพาะของแต่ละผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมา ดังนั้นการเลือกใช้จึงต้องเลือกให้ถูกชนิดด้วย สำหรับสารเพิ่มคุณภาพที่นิยมใช้เติมในน้ำมันหล่อลื่นนั้น จะสามารถทำการหล่อลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถแสดงได้ในตารางที่ 2.7 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.7 สารเพิ่มคุณภาพ [8]

ประเภทของสารเพิ่มคุณภาพ	ชนิดของสารเคมี	ประโยชน์
1. สารด้านคุณภาพด้านเคมี 1.1 สารด้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น(Anti-oxidants)	- ซิงค์ไดอัลคิลไดโรโอฟอสเฟต (Zincdialky - dithiophosphate) (ZDDP) - บิสฟีนอล (Bis-Phenols) - อะโรแมติกเอมีน (Aromatic Amines)	- ใช้กับน้ำมันหล่อลื่นในงานที่มีอุณหภูมิสูงและน้ำมันต้องสัมผัสกับอากาศ - ใช้ลดการเกิดขงเหนียวและตะกอนจากน้ำมัน ยืดอายุการใช้งานของน้ำมัน
1.2 สารป้องกันสนิม (Anti-rust additives)	- สารประกอบประเภทเมทัลลิกโซฟ แบบมีขั้ว เช่น เอส-เทอร์ อีเทอร์ (Polarcompounds such as metallicsoaps ,esters ,ethers) - กรดอินทรีย์ (Organic acid) - เอมีน (Amines)	
1.3 สารรับแรงกดสูง (Extreme pressureadditives)	- สารประกอบอินทรีย์ของกำมะถัน ฟอสฟอรัสหรือคลอรีน(Organics compounds of sulfur,phosphorus or chlorine) - ลีดแนฟทีเนต ลีดโซฟ (Lead naphthenate,lead soap) - ไทหรือน้ำมันประเภทมีขั้ว	

ตารางที่ 2.7 สารเพิ่มคุณภาพ (ต่อ) [8]

ประเภทของสารเพิ่มคุณภาพ	ชนิดของสารเคมี	ประโยชน์
2. สารเพิ่มคุณภาพด้านกายภาพ 2.1 สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (Viscosity-index improver)	- โพลีไอโซบิวทิลีน (Polyisobutylene) - เมทาครีเลต (Methacrylate) - อะครีเลตโคโพลิเมอร์ (Acrylatecopolymers)	
2.2 สารลดจุดไหลเท (Pour point depressants)	เมทาครีเลตโพลิเมอร์ (Methacrylate polymer) - แกกซ์อัลคิลเลตฟีนอล และ โพลิเมอร์ของแกกซ์ อัลคิลเลตฟีนอล (Waxalkylated phenol & its polymers)	
2.3 สารเพิ่มความลื่นและความ แข็งแรงของฟิล์มน้ำมัน (Oiliness & film strength)	- น้ำมันหมู - กรดโอเลอิก (Oleic) - แทลโลว์ (Tallow) - สเปิร์มออยล์ (Sperm oil) - บลาวน์เรพซีดออยล์ (Blown rapeseed oil) เอสเทอร์สังเคราะห์จากกรดไขมัน	
2.4 สารช่วยให้น้ำมันผสมเข้ากับ น้ำ (Emulsifiers)	- เซอร์แฟกแทนต์ (Surfactant) - สบู่ที่ได้จากไขมันและกรดไขมัน (Soap of fats and fatty acid) - โซเดียมซัลโฟเนต (Sodiumsulfonates) - สารประกอบประเภทที่มีขั้ว (Polarcompounds)	
2.5 สารหล่อลื่นที่เป็นของแข็ง (Solid lubricants)	- แกรไฟต์ (Graphite) - โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (Molybdenum disulfide)	

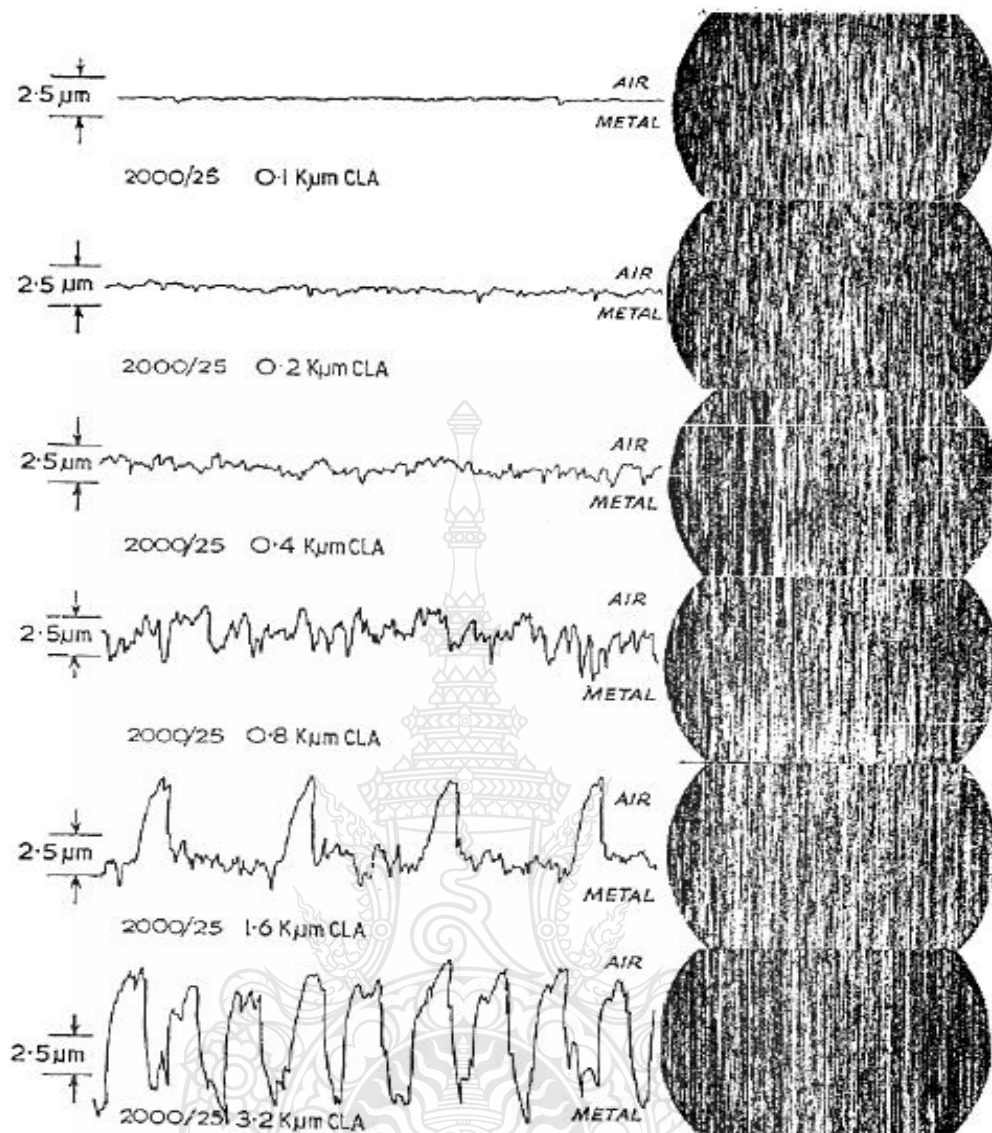
2.5 ความหยาบผิวและวิธีการวัดค่า [6]

ก่อนที่จะสามารถวัดค่าออกมาได้จำเป็นที่จะต้องให้คำจำกัดความของส่วนที่จะถูกวัดเสียก่อน ในกรณีของความหยาบ ความละเอียดของผิวแล้ว คำจำกัดความต่างๆมักจะแสดงให้เห็นถึงความไม่ถูกต้องที่เกิดเนื่องจากแหล่งที่ต่างกัน เนื่องจากสภาพรูปร่างพื้นผิวจริงจะรวมเอาค่าความเป็นคลื่น(Waviness)ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนของรูปร่างอันเนื่องมาจากความไม่ถูกต้องทางเรขาคณิตของวิธีการผลิตผิวหน้ากับความหยาบ (Roughness) ซึ่งเป็นความไม่สม่ำเสมอหรือความไม่ถูกต้องที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ของกรรมวิธีการผลิตผิวหน้าไว้ด้วยกันถ้ากระทำบนเครื่องจักรที่สมบูรณ์ทุกประการ หนึ่งในปัญหาหลายอย่างของการวัดความหยาบของผิวหน้าก็คือ การแยกความเป็นคลื่น

นอกจากความหยาบ ถ้าจำกัดการตรวจสอบของผิวหน้าที่ถูกตกแต่งมาเป็นช่วงความยาวหนึ่ง ซึ่งไม่นับความยาวคลื่นที่ยาว ดังนั้นจะมีเฉพาะความหยาบเท่านั้นที่ถูกรวมเข้ามา ความยาวคลื่นสูงสุดที่ถูกพิจารณาเราเรียกว่าความยาวคลื่นตัดออก (Cut-off wavelength) ซึ่งกำหนดเป็นมาตรฐานในสหราชอาณาจักรโดย B.S 1134 ให้เท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร 0.8 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร การเลือกใช้ค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าที่จะทำการตรวจสอบ สำหรับผิวหน้าที่ฝ่ายการเจียรนัย ความยาวคลื่นตัดออกที่ใช้จะเป็น 0.8 มิลลิเมตร ถ้าสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดสั้นๆ ก็จะใช้ขนาด 0.25 มิลลิเมตร จึงจะเหมาะสม กฎทั่วไปสำหรับการทำผิวหน้า คือ ความยาวคลื่นตัดออกควรเพิ่มขึ้นตามอัตราเร็วของการตัด

2.5.1 วิธีการของการวัดความหยาบผิว

วิธีที่สามารถใช้ได้ผลสำหรับการวัดความหยาบของผิวชิ้นงานที่ผ่านการตกแต่งมา อาจจะใช้วิธีการเปรียบเทียบหรือใช้วิธีการวัดโดยตรง วิธีการวัดเปรียบเทียบนี้เป็นวิธีการที่จะตรวจสอบความหยาบละเอียดของผิวโดยการสังเกตหรือใช้ความรู้สึกบนผิวหน้าที่จะทำการตรวจสอบนั้น การเปรียบเทียบนี้ก็อาจจะทำให้เกิดการอ่านผิดขึ้นได้ ถ้าการเปรียบเทียบไม่ได้ใช้ชิ้นงานที่ทำหรือผลิตด้วยเทคนิคเดียวกัน รอยที่ปรากฏขึ้นบนผิวหน้าจะขึ้นอยู่กับแบบของเครื่องมือที่ใช้ในทิศทางของการขีดข่วนหรือตกแต่งผิวหน้าและขึ้นกับความลึกของรอยที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งรอยที่ปรากฏเหล่านี้สามารถที่จะตรวจสอบได้โดยการใช้อุปกรณ์ขยายดู ดังแสดงในภาพที่ 2.13 ซึ่งแสดงภาพขยายที่เห็นจากกล้องขยายของผิวหน้าที่แตกต่างกัน 6 ผิวหน้า และผิวหน้าที่เป็นด้านข้าง (Profile) ของผิวหน้าเหล่านั้นการแตะสัมผัสเป็นวิธีการที่ให้ผลดีในการกำหนดความหยาบละเอียดของผิวมากกว่าการสังเกตด้วยตาซึ่งอาจทำให้อ่านค่าผิดพลาดได้และการเปรียบเทียบควรจะใช้กับผิวหน้าที่มีการผลิตเหมือนกันเท่านั้นซึ่งก็ได้มีหลายบริษัทที่ได้สร้างชิ้นส่วนมาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบความหยาบของผิวแต่ละวิธีการผลิตซึ่งเราสามารถที่จะเลือกใช้ทำการตรวจสอบได้อย่างสะดวก ส่วนวิธีการตรวจสอบโดยตรงนั้นได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างมากเพื่อให้สามารถอ่านค่าออกมาได้ เมื่อวางลงบนผิวหน้าที่จะตรวจความหยาบของผิวซึ่งส่วนมากจะใช้เครื่องวัดแบบใช้หัวลาก แม้ว่าวิธีการแบบการแทรกสอดจะเหมาะสมสำหรับผิวหน้าที่สะท้อนแสง



ภาพที่ 2.13 สภาพผิวหน้าที่มองเห็นคล้าย ๆ กันแต่ความหยาบผิวต่างกัน

2.5.2 เครื่องมือวัดความหยาบผิว (Stylus Probe Instruments)

ในทุก ๆ กรณีของเครื่องมือวัดชนิดนี้ สามารถที่จะกล่าวได้ว่ามีวิธีการทำงานดังต่อไปนี้

1. ก้านลื่นไถล (Skid) เคลื่อนตัวอย่างช้า เหมือนผิวหน้าที่จะทำการวัดและตามความสูงต่ำของผิวหน้า
2. เข็มลาก (Stylus) ซึ่งเคลื่อนที่เหนือผิวหน้านั้นกับก้านลื่นไถลจะสัมผัสทางแนวตั้งกับก้านลื่นไถลอันเนื่องมาจากความหยาบของผิวหน้านั้น
3. เครื่องขยายสัญญาณจะขยายสัญญาณจากการเคลื่อนที่ของเข็มลาก

4. เครื่องจذبบันทึกจะทำการให้ผลโดยการลาดเส้นหรือบันทึกรูปด้านข้าง (Profile) ของผิวหน้านั้น

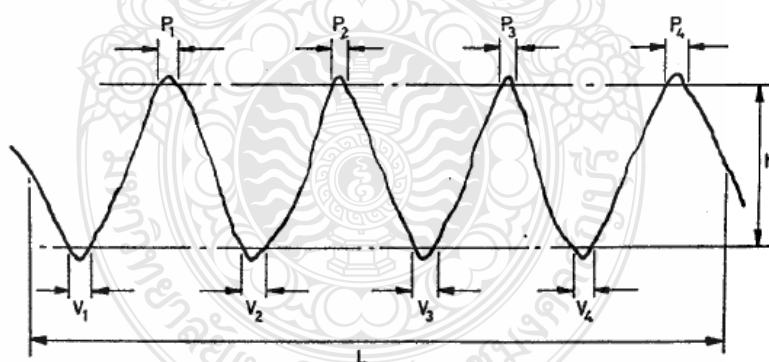
5. ตัวกลาง (Means) ของการวิเคราะห์รูปด้านข้างที่ได้ก็จะถูกอ่านค่าออกมา

2.5.3 การวิเคราะห์รอยลากของผิวหน้า

รอยลากผิวหน้าที่อ่านได้ จากเครื่องมือวัดจะต้องนำมาวิเคราะห์เป็นค่าพารามิเตอร์เพื่อที่จะนำค่านี้ไปแสดงค่าประมาณการให้เห็นถึงสภาพผิวโดยรวมทั้งหมด ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์ความเรียบผิวมีดังนี้

2.5.4 ความสูงจากยอดถึงปลายล่างสุด (R_t)

ความสูงจากยอดถึงปลายล่างสุดหรือความสูง P – V หรือ R_t จะเป็นวิธีการของการวิเคราะห์นี้ แต่ถ้าแปลความหมายอย่างกว้างๆ แล้วความสูง P – V ที่ใช้นี้จะผิดธรรมดาไปมาก และค่าที่ได้ออกมาจะไม่ใช่ว่าสิ่งที่ปรากฏออกมาจริงๆ ของผิวหน้าที่ตรวจสอบ ความสูง P – V นี้จะหมายถึงระยะทางระหว่างเส้นตรงคู่หนึ่งๆ ที่ลากขนานกับการจัดคลื่น (Lay) ทัวไปของตำแหน่งการลากผ่าน ดังนั้นความยาวที่วางในขอบเขตของยอดสูงสุด (Peak) ที่ส่วนบนจะเป็น 5% ของความยาวการลากผ่านและในขอบเขตของส่วนล่างสุด (Valleys) ที่ส่วนล่างจะเป็น 10% ของความยาวการลากผ่าน ซึ่งจะแสดงในเส้นกราฟดังแสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 เส้นกราฟของความสูงจากยอดถึงปลายล่างสุด

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูป ลึกจะสามารถแบ่งงานวิจัยที่ใกล้เคียงที่สุดเป็นสองส่วนคือ งานวิจัยเชิงสำรวจข้อมูลของสารหล่อลื่น และงานวิจัยที่กล่าวถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปลึก

2.6.1 งานวิจัยเชิงสำรวจข้อมูลของสารหล่อลื่น

Swindell และ Wainwright [7] ได้ทำการสำรวจการใช้สารหล่อลื่นในงานขึ้นรูปโลหะในประเทศอังกฤษ ซึ่งสารหล่อลื่นที่ใช้ในงานขึ้นรูปโลหะมีวัตถุประสงค์หลักของการใช้งานเพื่อแยกผิวสัมผัสระหว่างแม่พิมพ์และชิ้นงานออกจากกัน และควบคุมความเสียหายระหว่างแม่พิมพ์กับชิ้นงานนอกจากนี้ Swindell และ Wainwright ได้ทำการจัดกลุ่มของสารหล่อลื่นไว้ 3 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มสารกึ่งแข็ง (Semi-solid) สารหล่อลื่นกลุ่มนี้ ได้แก่ ไขมัน (Fatty oil) กรดไขมัน (Fatty acid) สบู่ (Soaps) แวกซ์ (Waxes) โดยฟิล์มของสารหล่อลื่นจะช่วยลดการสัมผัสบริเวณเนื้อวัสดุ (Metal Aperities) ในขณะที่ทำการขึ้นรูปโลหะ โดยปกติแล้วสารหล่อลื่นกลุ่มนี้จะใช้งานได้ไม่ดีเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 150 องศาเซลเซียส

2. กลุ่มสารสังเคราะห์ (Synthetic) เป็นกลุ่มสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลว (Fluid) แต่มีการเติมสารเพิ่มประสิทธิภาพเข้าไปซึ่ง ได้แก่ กำมะถัน (Sulfur) ครอรีน (Chlorine) ฟอสฟอรัส (Phosphorus) และเรียกสารเหล่านี้ว่า เป็นสารหล่อลื่นที่ทนต่อแรงกด (Extreme Pressure : EP) ซึ่งสารเคมีเหล่านี้ จะทำปฏิกิริยาเคมีทำให้ป้องกันผิวและลดการเชื่อมติด (Adhesion) ของเนื้อวัสดุ ที่ผิวสัมผัสภายใต้แรงกดสูง (High Pressure Contact) ระหว่างตายกับชิ้นงานนอกจากนี้ EP จะมีความสมบัติ คือ มีความแข็งแรงเหนียว ทำให้ฟิล์มที่ผิวสามารถลดความเสียหายได้มาก และยังสามารถใช้งานได้ดีในสภาวะที่อุณหภูมิสูงด้วย

3. กลุ่มของแข็ง (Solid) เป็นกลุ่มที่เป็นแบบผลึก (Layer lattice compound) ซึ่งได้แก่ กราไฟต์ (Graphite) และ โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (Molydenum Disulphide) ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นของแข็ง (Solid Lubricant) มีโครงสร้างฟิล์มเป็นชั้น ๆ มีความแข็งแรงเหนียว (Shear Strength) และลดความเสียหายที่ผิวสัมผัสได้สูงและได้สรุปปัจจัยในการเลือกใช้สารหล่อลื่นที่ต้องคำนึงถึง อายุการใช้งานของเครื่องมือ ลักษณะการใช้งาน ต้นทุน การป้องกันสนิม คราบสกปรก วิธีการทำความสะอาด และอันตรายต่อสุขภาพ

2.6.2 งานวิจัยที่กล่าวถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปลึก

1. อิทธิพลของสารหล่อลื่นต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปลึก ในการลากขึ้นรูปลึก โลหะแผ่นต้องใช้แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงาน จึงทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างแผ่นเปล่ากับแผ่นจับยึดชิ้นงานอย่างมาก ซึ่งมีผลต่อการเกิดรอยขีดข่วนบนชิ้นงาน และ เกิดความเสียหายที่ผิวหน้าสัมผัสของแผ่นเปล่ากับแผ่นจับยึดชิ้นงานและตายด้วยเช่นกัน สารหล่อลื่นจึงมีความจำเป็นในการควบคุมความเสียหายให้ลดลง และป้องกันการสึกหรอระหว่างโลหะกับโลหะที่มีการสัมผัสกัน (Metal - to - Metal Contact) โดย Huang และ Cheng [9] ได้ทำการศึกษาสารหล่อลื่น 2 ชนิด คือ ซิงค์สเตียเรต

(Zinc Stearate) ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นของแข็ง (Solid Lubricant) และ เพรสออย (PressOil) ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นของเหลว (Liquid Lubricant) ในการลากขึ้นรูปเหล็กแผ่นเหล็ก SPCC หนา 1 มิลลิเมตร ช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์เท่ากับ 1.07 มิลลิเมตร ใช้แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blankholder force) 50 กิโลนิวตัน ความเร็วในการขึ้นรูปเท่ากับ 1 มิลลิเมตร/นาที โดยทำการศึกษาขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปเหล็ก และการวัดความหนาของชิ้นงานหลังจากทำการลากขึ้นรูปเหล็ก ซึ่งผลที่ได้คือสารหล่อลื่นซิงค์สเตียเรต สามารถลดแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปเหล็กได้ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และเพรสออย จะลดแรงในการลากขึ้นรูปเหล็กได้เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สารหล่อลื่น และค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปเหล็กของสารหล่อลื่นซิงค์สเตียเรต ที่ได้จากการทดลอง คือ 2.23 ส่วนของสารหล่อลื่นเพรสออย เท่ากับ 2.13 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปเหล็กของสารหล่อลื่นซิงค์สเตียเรต จะสูงกว่า สารหล่อลื่นเพรสออย และจากผลการศึกษากการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปเหล็กปรากฏว่า สารหล่อลื่นซิงค์สเตียเรต จะทำให้ชิ้นงานที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยกว่าสารหล่อลื่นเพรสออย

เชษฐ อุทธิยัง [6] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI304 โดยใช้สารหล่อลื่น 7 ชนิด ได้แก่ น้ำมัน TDN81, MZA30, DRAW756A, DRAW359H, น้ำมันมะพร้าว, แผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีน หนา 0.07 มิลลิเมตร และ 0.1 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้หนา 0.5 มิลลิเมตรตัดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 130 มิลลิเมตร เปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นงานเพิ่มขึ้นทีละ 2 มิลลิเมตร (อัตราส่วนการลากขึ้นรูปทีละ 0.3) ใช้แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 มิลลิเมตร สารหล่อลื่นชนิดแผ่นพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นสารหล่อลื่นของแข็งให้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปเหล็กที่ 2.09 สูงกว่าการใช้น้ำมัน ทำให้ใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อยกว่ากรณีการใช้สารหล่อลื่นชนิดน้ำมันซึ่งเป็นของเหลว แผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนได้ผิวหยาบกว่าด้วยที่ลากขึ้นรูปโดยใช้น้ำมัน

ณัฐ โรจนกิตติชัยและคณะ[10] ได้ทำการศึกษาการพัฒนาสารหล่อลื่นที่เหมาะสมสำหรับผิวคู่สัมผัสระหว่างเหล็ก SKD11และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ได้ทำการจำลองหาค่าความเสียหายโดยใช้เครื่องไตรบอมิเตอร์ด้วยวิธีทดสอบแบบ ball – on – disk เพื่อให้ทราบอิทธิพลความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น สารเพิ่มคุณภาพในน้ำมันหล่อลื่น และ Contract Pressure ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายโดยใช้ชิ้นงานจำลองเป็นจาน disk ทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมและแม่พิมพ์จะถูกจำลองเป็นบอลทำจากวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD11 (JIS) ชุบแข็งที่ 60±2 HRC โดยได้ศึกษาสารหล่อลื่นที่มีสารรับแรงกดChlorine, Active Sulphur, Inactive Sulphur และ Phosphorus ทำการเปลี่ยนแปลงความหนืดสารหล่อลื่นที่100 cSt และ500 cSt ทดสอบในสภาวะที่มี Contract

Pressure 638 MPa, 1377 MPa และ 1734 MPa สารหล่อลื่นที่มีความหนืดสูงจะทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่าสารหล่อลื่นที่มีความหนืดต่ำ ในกรณีไม่มีสารรับแรงกดผสมอยู่ สารรับแรงกดช่วยให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่นลดลงและเมื่อเพิ่ม Contract Pressure พืดมน้ำมันไม่สามารถแยกการสัมผัสระหว่างผิววัสดุทั้งสองได้ดี มีการสัมผัสโดยตรงของเนื้อวัสดุบางส่วนทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้น

ศุภเอก ประมูลมากและวิเชียร เกื่อนเครือวัลย์[11] ได้ทำการศึกษาการใช้น้ำมันจากพืชเป็นสารหล่อลื่นในกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะ วัดผลจะวัดจากค่าความเรียบของผิวงานสำเร็จ หลังจากใช้ผ่านการลากขึ้นรูป น้ำมันที่นำมาศึกษามีอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันมะพร้าว, น้ำมันถั่วเหลือง, และน้ำมันปาล์ม โดยวัสดุที่นำมาขึ้นรูปคือเหล็ก SPEN โดยจากผลการทดลองพบว่า น้ำมันทั้ง 3 ชนิดสามารถนำมาใช้ในการลากขึ้นรูปโลหะได้ โดยน้ำมันมะพร้าวให้ค่าความเรียบผิวแบบ Ra และแบบ Rt มีค่าเฉลี่ยโดยรวมดีที่สุด ได้ค่า Ra = 0.693 ไมครอนเมตร และ Rt = 0.942 ไมครอนเมตรซึ่งสามารถสรุปได้ว่าสามารถที่จะนำเอาน้ำมันมะพร้าวเข้ามาใช้ในการเป็นสารหล่อลื่นเพื่อใช้ในกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะได้เช่นเดียวกับน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันปาล์ม แต่ที่เลือกใช้น้ำมันมะพร้าวเพราะให้ค่าความเรียบผิวที่ดีกว่าน้ำมันทั้งสองชนิด

2. อิทธิพลของตัวแปรอื่น ๆ Frank [12] ได้ศึกษาถึงขนาดช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึกและสารหล่อลื่นที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูปลึกอลูมิเนียมแผ่นความหนา 1.21 มิลลิเมตรและขนาดของแผ่นเปล่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 60 มิลลิเมตร โดยใช้ขนาดช่องว่างที่ +50% + 25% + 10% 0% และ -10% ของขนาดความหนาของแผ่นเปล่า และใช้สารหล่อลื่น 2 ชนิด คือน้ำมันแร่เบอร์ 30 (Mineral oil SAE 30) ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นชนิดของเหลวและแผ่นพลาสติกโพลีเตสทาฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene; PTFE) ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นชนิดของแข็ง หนา 0.05 มิลลิเมตร ความเร็วในการขึ้นรูป 0.25 มิลลิเมตรต่อวินาที แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงาน เท่ากับ 20 กิโลกรัมแรง (kgf) ซึ่งผลที่ได้คือ ที่ขนาดของช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ที่ลดลงจะทำให้เกิดแรงในการลากขึ้นรูปลึกสูงขึ้น และ สารหล่อลื่นแผ่นพลาสติกโพลีเตสทาฟลูออโรเอทิลีน จะสามารถลดแรงในการขึ้นรูปลึกดีกว่าน้ำมันแร่มาก ในกรณีของช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์มีค่าต่ำมาก และจากการทดลองที่ช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ที่ -10% ของความหนาแผ่นชิ้นงาน สารหล่อลื่นแผ่นพลาสติกโพลีเตสทาฟลูออโรเอทิลีน จะสามารถลดแรงในการลากขึ้นรูปได้ประมาณ 34-38% เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สารหล่อลื่น

Ziang และ Chen [13] ได้ศึกษาถึงสารหล่อลื่นที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในงานลากขึ้นรูปลึก โดยใช้สารหล่อลื่น 18 ชนิด ใช้วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 3 วิธี คือ คำนวณจากทฤษฎี ทดลองโดยวิธีการกดชิ้นงานรูปวงแหวน (Ring Compressive Test) และทดลองโดยใช้ชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก ผลจากการทดลองสารหล่อลื่นทั้ง 18 ชนิด จะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแตกต่างกัน สารหล่อลื่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำที่สุดจะได้ขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปลึกสูงสุด

Lanzon , และคณะ [14] ได้ศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นในงานขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยกำหนดการทดลองเป็น 2 วิธี คือ การลากแผ่นงานผ่านคานผิวแบนราบ (Flat -Face Friction) และการลากแผ่นงานผ่านคานที่ติดตัวครอบปิด (Draw Bead) เพื่อควบคุมการไหลแผ่นงานเข้าปากคาน ใช้วัสดุแผ่นเหล็กกล้าชนิดเคลือบสังกะสีซึ่งมีค่าความเรียบผิว 1.35 ไมโครเมตร และแผ่นเหล็กกล้าธรรมดาที่มีค่าความเรียบผิว 1.29 ไมโครเมตร วัสดุหนา 0.8 มิลลิเมตร ที่ผิวคานจะมีการกำหนดค่าความเรียบผิว 2 ค่า คือ เป็นผิวละเอียดและผิวหยาบ โดยค่าความเรียบผิวของคานสำหรับวิธีการลากแผ่นงานผ่านคานผิวแบนราบมีผิวละเอียด 0.4 ไมโครเมตร และมีผิวหยาบเท่ากับ 3.6 ไมโครเมตร สำหรับคานที่ติดตัวครอบปิดมีผิวละเอียด 0.7 ไมโครเมตร และมีผิวหยาบ 4.6 ไมโครเมตร ใช้สารหล่อลื่นมิลออย PL101 และน้ำมันลากขึ้นรูปชนิดผสมน้ำ PS306 ใช้แรงจับยึดแผ่นงาน 1 และ 5 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร พบว่าเมื่อใช้น้ำมัน PS306 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายต่ำกว่าน้ำมัน PL101 ทั้งสองวิธีดังกล่าว เมื่อพิจารณาความดันสัมผัส (Contact Pressure) พบว่าความดันสัมผัสเพิ่มขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายลดลงเมื่อใช้สารหล่อลื่นทั้ง 2 ชนิด คานผิวละเอียดจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายต่ำกว่าคานผิวหยาบทั้งสองวิธี วัสดุแผ่นงานที่เคลือบผิวจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายต่ำกว่าแผ่นงานที่ไม่ได้เคลือบผิว

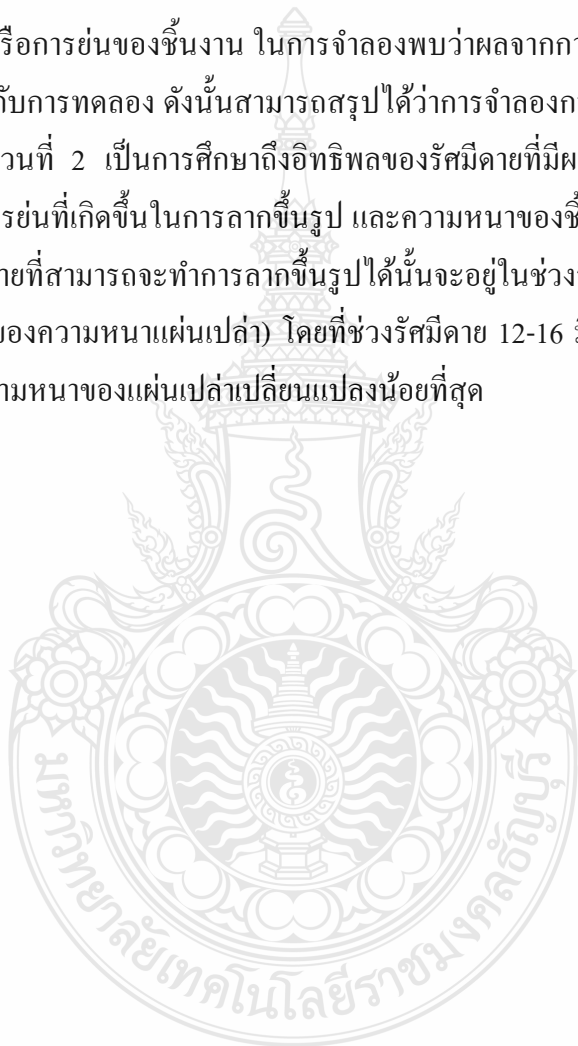
Tung และ Sheng Yang [15] ได้ศึกษาผลกระทบหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ในงานลากขึ้นรูปลึก ใช้วิธีการทดลอง การคำนวณจากทฤษฎี และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจะหาการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มน้ำมันเมื่อใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดแตกต่างกัน พบว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะให้ความหนาฟิล์มน้ำมันหลังพ้นซ์เคลื่อนที่ผ่านรัศมีคานที่ค่าความหนืดของน้ำมันมีค่าเท่ากับ 220 เซนติสโตก (cSt) เท่ากับ 11 ไมโครเมตร ที่ความหนืด 680 เซนติสโตก (cSt) วัดความหนาฟิล์มได้ 15 ไมโครเมตร และที่ความหนืด 1600 เซนติสโตก (cSt) วัดความหนาฟิล์มได้ 27 ไมโครเมตร และเปรียบเทียบผลเมื่อใช้ทั้ง 3 วิธีพบว่าความหนาฟิล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นเมื่อสารหล่อลื่นมีความหนืดเพิ่มขึ้น

Mark Olgan และ John Monaghan [16] ศึกษาองค์ประกอบที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูปลึกโดยวิธีการทดลองและการวิเคราะห์ผล ใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นซ์ 39.4 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคานเท่ากับ 41.7 มิลลิเมตร ช่องว่างระหว่างพื้นซ์กับคาน 1.15 มิลลิเมตร ใช้เหล็กกล้า EN10130 หนา 1 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นงาน 76 มิลลิเมตร ทดลองที่อัตราส่วนการลากขึ้นรูป 1.9 รัศมีพื้นซ์กับคานเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ใช้แรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงาน 18 กิโลนิวตัน ลากขึ้นรูปลึก 20 มิลลิเมตร จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูปลึกโดยเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้แก่ รัศมีคาน ชนิดของสารหล่อลื่น รัศมีพื้นซ์ ตำแหน่งทาสารหล่อลื่น ความเร็วในการลากขึ้นรูป และแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานจากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมาใน

ส่วนของความสามารถในการลากขึ้นรูปลึก ยังไม่มีงานวิจัยชี้ให้เห็นที่ศึกษาถึงสารหล่อลื่นที่ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของการลากขึ้นรูปลึก ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะทำการศึกษาสารหล่อลื่นที่ใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อยสุด หรือสารหล่อลื่นตัวไหนจะได้ขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปสูงสุด เมื่อสารหล่อลื่นที่นำมาศึกษาทำให้ได้ผลที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ก็จะทำให้เพิ่มผลผลิตได้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยข้างต้นมีประโยชน์ต่องานวิจัยฉบับนี้ คือ สามารถนำข้อมูลที่ได้ เช่น งานวิจัยของ Lanzon และคณะ [16] ทำให้ทราบถึงการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อลดแรงในการลากขึ้นรูป กรณีนี้โดยมีผิวละเอียดจะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ช่วยลดแรงในการลากขึ้นรูป และสารหล่อลื่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ จะช่วยให้ได้ขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปสูงขึ้นด้วยตามงานวิจัยของ Ziang และ Chen [15] เป็นต้น

ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเรียง[17] ได้ทำการศึกษาเพื่อการยึดติดบนผิวแม่พิมพ์ขึ้นรูปเหล็กกล้า ความแข็งแรงสูง โดยใช้วิธีการปรับสภาพผิวและการเคลือบผิวแม่พิมพ์ขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ปรับสภาพผิวหรือเคลือบผิวด้วย VC (TD), TiC (CVD), TiCN (CVD), TiCN (PVD), TiAlN (PVD), CrAlN (PVD), VC (TD) + DLC (PVD), TiN (PVD) และ Nitriding + CrN (PVD) ทำการทดสอบหาประสิทธิภาพในการลดการยึดติดของอนุภาคขึ้นงานบนผิวตาย ในกระบวนการปั๊มรูปขึ้นงานด้วยเปรียบเทียบกับกรณีไม่เคลือบผิวตาย และยังใช้การวัดค่าความแข็งแรงแบบนาโน และการทดสอบการขีดข่วนเพื่อหาสมบัติทางกล และความสามารถในการยึดเกาะของฟิล์มดังกล่าวกับวัสดุพื้น การทดสอบไตรบอโลยีแบบบอลบนแผ่นจานถูกใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และอัตราการสึกหรอจำเพาะระหว่างผิวคู่สัมผัสของบอลที่ผ่านการปรับสภาพผิว หรือเคลือบผิวกับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงรีดร้อนเกรด SPFH 590(JIS) และเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพผิว และเคลือบผิวช่วยลดการยึดติดของอนุภาคขึ้นงานบนผิวตายได้ทุกชนิดเมื่อเปรียบเทียบกับตายที่ไม่เคลือบผิว โดยฟิล์ม TiC (CVD) TiCN (PVD) TiCN (CVD) และ Nitriding + CrN (PVD) ให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการยึดติดได้ดีสุดในการขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง นอกจากนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่าฟิล์ม PVD สามารถเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะกับตาย ด้วยการทำเรดิคัลไนไตรต์ก่อนแล้วเคลือบทับด้วยฟิล์มที่ต้องการใช้งานเช่นฟิล์ม Nitriding + CrN(PVD) ถูกทดสอบด้วยการลากขึ้นรูปขึ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษเกรด SPFC 980Y (JIS) ผลการทดลองพบว่าหลังการขึ้นรูป 1,000 ชิ้น ไม่พบการเกิดการยึดติดของอนุภาคบนผิวตาย และฟิล์ม CrN (PVD) ยังยึดเกาะกับผิวตายได้ดีกว่ากรณีตายที่ไม่ได้ทำเรดิคัลไนไตรต์ก่อนการเคลือบ

ชาญศักดิ์ ภัทรานันท์ [3] ได้ทำการศึกษาการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วัสดุที่ใช้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (JIS:SPCEN) ขนาดกว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร ความลึก 53 มิลลิเมตร และความหนา 0.78 มิลลิเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม OPTRIS งานวิจัยจะแบ่งการทำงานเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของโปรแกรม โดยทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการลากขึ้นรูปกับผลการทดลองที่มีผู้ทำมาก่อนแล้ว โดยผลที่นำมาเปรียบเทียบคือแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ความหนาของชิ้นงานและการแตกหรือการย่นของชิ้นงาน ในการจำลองพบว่าผลจากการจำลองที่ได้จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลอง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการจำลองการลากขึ้นรูปมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้ ในส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของรัศมีค้ำที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป การแตกหรือการย่นที่เกิดขึ้นในการลากขึ้นรูป และความหนาของชิ้นงานที่ได้ จากผลงานวิจัยพบว่าขนาดของรัศมีค้ำที่สามารถจะทำการลากขึ้นรูปได้นั้นจะอยู่ในช่วงระหว่าง 5 มิลลิเมตร ถึง 21 มิลลิเมตร (6-26 เท่าของความหนาแผ่นเปล่า) โดยที่ช่วงรัศมีค้ำ 12-16 มิลลิเมตร จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อยและความหนาของแผ่นเปล่าเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด



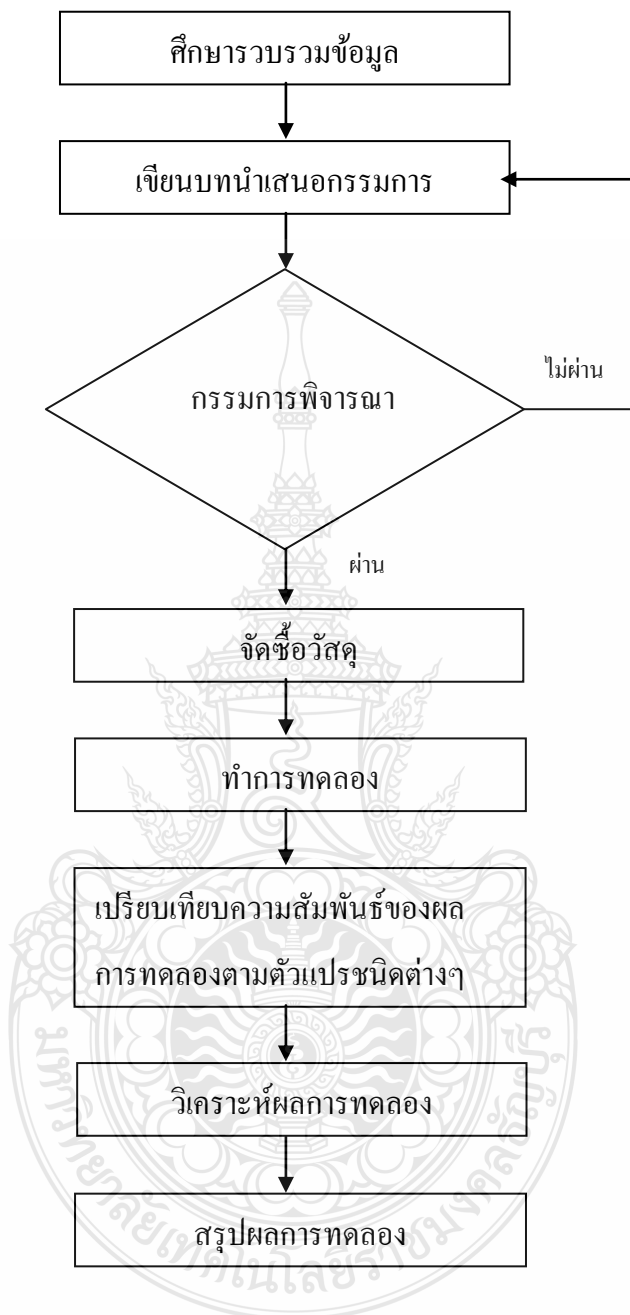
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการดำเนินการวิจัย ซึ่งนับเป็นบทที่สำคัญในการทำวิทยานิพนธ์ หากการทำการวิจัยได้มีการวางแผนและเตรียมการที่ดีแล้ว จะทำให้งานวิจัยนั้นสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาอิทธิพลของสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปลึงของเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์ โดยใช้แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปด้วยสตีลเหล็บบางแบบมีปีก ใช้สารหล่อลื่น 5 ชนิดและปรับเปลี่ยนรัศมีคายที่ 6 มิลลิเมตรและ 10 มิลลิเมตร ซึ่งมีขั้นตอนในการดำเนินงานดังที่จะกล่าวต่อไป

3.1 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยมุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของสารหล่อลื่น ที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปด้วยสตีลเหล็บบางแบบมีปีกเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับงานโครงสร้างยานยนต์ โดยเริ่มจากการศึกษาข้อมูลรายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับการออกแบบชิ้นงานลากขึ้นรูปลึง ชนิดของสารหล่อลื่นที่นำไปใช้งานลากขึ้นรูป แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงาน ด้วยเครื่องปั๊มโลหะของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่มีขนาด 80 ตัน สามารถปรับแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานได้ เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัยนี้ จำเป็นจะต้องทำการศึกษา เก็บข้อมูลในการวิจัย และทำการทดลองเพื่อนำข้อมูลมาสรุปผลงานวิจัย โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ดังภาพที่ 3.1

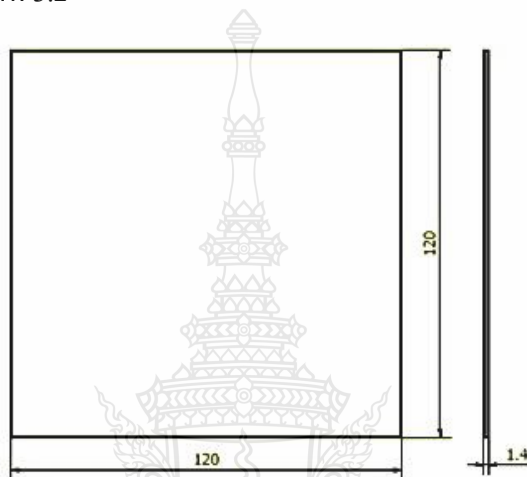


ภาพที่ 3.1 แผนการไหลแสดงกระบวนการในการทำวิจัย

3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุในการดำเนินการวิจัย

3.2.1 วัสดุชิ้นงาน

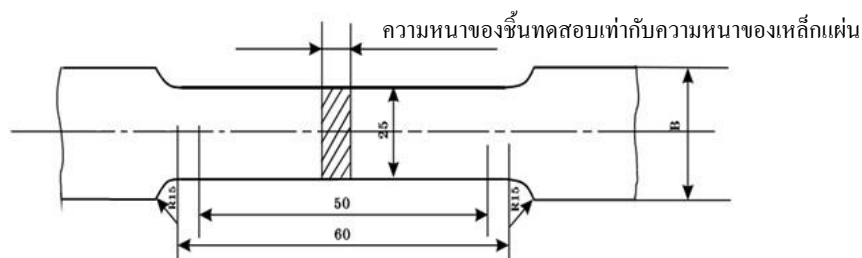
ในการศึกษาจะใช้เหล็กแผ่นสำหรับลากขึ้นรูปลึง จำนวน 1 ชนิด คือเหล็กกล้ารีดร้อน สำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH440 (JIS) โดยเตรียมแผ่นเปล่าเหล็กที่ขนาดความกว้างเท่ากับ 120 มิลลิเมตร ความยาวเท่ากับ 120 มิลลิเมตร และหนาเท่ากับ 1.4 มิลลิเมตร ขนาดของแผ่นเปล่าก่อนการลากขึ้นรูปแสดงในภาพที่ 3.2



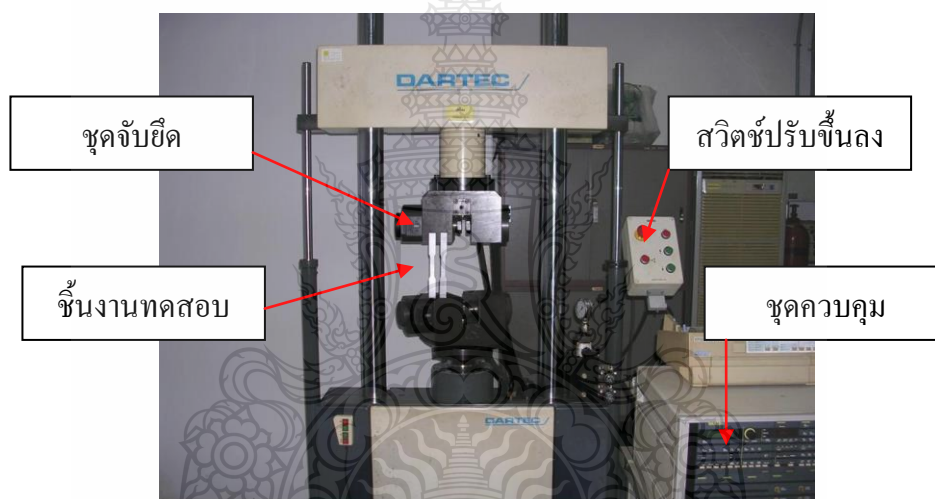
ภาพที่ 3.2 ขนาดของแผ่นชิ้นงานก่อนการลากขึ้นรูป

3.2.2 การทดสอบแรงดึงเพื่อหาคคุณสมบัติทางกลของวัสดุเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับ โครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH440 (JIS)

ในการทดสอบแรงดึงเพื่อหาคคุณสมบัติทางกลนั้นจำเป็นที่จะต้องเตรียมวัสดุ ชิ้นงานให้ตรงตามมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ ในการทดสอบแรงดึงของเหล็กแผ่นที่ระบบ JIS Z 2201 ได้ กำหนดไว้ นั้นจะมีลักษณะชิ้นงานดังภาพที่ 3.2 ชิ้นงานที่จะเตรียมเพื่อ ทดสอบนั้นเป็นเหล็กกล้ารีดร้อน สำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH440 (JIS)ที่มีความหนาอยู่ที่ 1.4 มิลลิเมตร และมีขนาดกว้าง B เท่ากับ 30 มิลลิเมตร โดยได้กำหนดขนาดต่างๆ ที่สำคัญตามภาพที่ 3.3 ซึ่งจะใช้วิธีในการเตรียมงาน โดยการกัด (milling)



ภาพที่ 3.3 ชิ้นงานทดสอบความต้านแรงดึงและความยืด



ภาพที่ 3.4 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile test)

3.2.3 ผลการหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ทดสอบ

เมื่อนำวัสดุที่ได้เตรียมไว้ไปทำการวัดแล้วจัดตำแหน่งไว้โดยเว้นระยะห่างจากจุดศูนย์กลางไปทางซ้ายและขวา ด้านละ 25 มิลลิเมตร แล้วนำไปทดสอบกับเครื่องทดสอบแรงดึง แสดงดังภาพที่

3.4 โดยได้ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากเดิมที่กำหนดไว้ คือ 50 มิลลิเมตรไปเป็น 66.8 มิลลิเมตร แล้วนำค่าความยาวที่ได้หลังจากการทดสอบ มาทำการหาค่าความยืด (Elongation) โดยจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ดังสมการที่ 3.1 และได้ค่าอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

$$\text{ความยืด (Elongation)} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ L_1 = ความยาวหลังการทดสอบ
 L_0 = ความยาวก่อนการทดสอบ

$$\begin{aligned} \text{(แทนค่า) ความยืด (Elongation)} &= \frac{66.8 - 50}{50} \times 100 \\ &= 33.6 \% \end{aligned}$$

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH440 (JIS) ทางบริษัทผู้จำหน่ายเหล็กได้ทำการทดสอบมาแล้วจึงได้ใช้ค่าที่ได้จากทางบริษัทมาทำการคำนวณหาแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปซึ่งค่าที่ได้จากทางบริษัทองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH440 (JIS) แสดงดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับ โครงสร้างยานยนต์ SAPH440

Symbol (JIS)	SAPH440		SAPH440	
	C	0.1260	Cr	0.0210
Si	0.0500	Ni	0.0180	
Mn	1.0250	Mo	0.0120	
P	0.0120	Cu	0.0200	
S	0.0030	Nb	<0.0010	
V	0.0020	Ti	0.0010	
Co	<0.0010	As	0.0020	
Al	0.0210	Sn	0.0080	
B	<0.0010	W	0.0010	

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกลของเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์ SAPH440 (JIS)

Symbol (JIS)	SAPH440
Thickness (mm.)	1.4
Yield Point σ_y (MPa)	357
Ultimate Strength σ_v (MPa)	478
Elongation (%)	33.6

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 เครื่องปั๊มไฮดรอลิก

ในการทดลองใช้เครื่องปั๊มไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน ยี่ห้อ TMC ขนาดหน้าโต๊ะกว้าง 800 มิลลิเมตร ยาว 800 มิลลิเมตร ขนาดช่วงชักสูงสุด 650 มิลลิเมตร สามารถปรับระดับแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานได้ โดยแรงดันที่ใช้ในการกดแผ่นกดยึดชิ้นงาน จะถูกส่งมาจากคายูชั่นที่อยู่ใต้โบลสเตอร์ของเครื่องปั๊มไฮดรอลิก ซึ่งการทำงานของคายูชั่นสามารถควบคุมแรงดันให้คงที่ได้ เครื่องปั๊มไฮดรอลิก แสดงดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 เครื่องปั๊มไฮดรอลิกแรงอัดสูงสุด 80 ตัน

3.3.2 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล

ในการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล ได้กำหนดตัวแปรของการทดลองโดยอิทธิพลของตัวแปรการทดลองได้แก่ รัศมีบาดายขนาด 6 และ 10 มิลลิเมตร และสารหล่อลื่น 5 ชนิด ทำการทดสอบตัวแปรที่ระดับและบันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงต่อระยะความลึกที่ขึ้นรูป วัดแรงและบันทึกผลการทดลองด้วยอุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ (Mini data logger) ซึ่งเป็นอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลพื้นฐานของระบบ (data logger) โดยผ่านอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน (Pressure transducer) ตัววัดระยะทาง (Liners guide) บันทึกข้อมูลผ่านอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล (Flash Drive) เพื่อความสะดวกในการถ่ายโอนข้อมูลจากอุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณมายังคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ แสดงดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 อุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ GRAPHTEC midi LOGGER GL 800

3.3.3 เครื่องวัดความหยาบผิวของชิ้นงาน

เครื่องวัดความหยาบผิวของชิ้นงานแบบหัวลาก โดยใช้เข็มลากเคลื่อนที่เหนือผิวหน้าชิ้นงาน โดยเข็มลากจะยึดกับก้านสั้นไถลอันเนื่องมาจากความหยาบของผิวชิ้นงาน จำเป็นจะต้องศึกษาถึงวิธีการใช้งานของเครื่องให้ถูกต้อง เช่น การตั้งค่าก่อนการวัด เครื่องวัดความหยาบผิวจะเป็นของบริษัท Mitutoyo รุ่น Mitutoyo surfest 301 ดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 เครื่องวัดความหนาของชิ้นงาน

3.3.4 อุปกรณ์วัดความหนาชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 เครื่องมือวัดความหนาของชิ้นงาน

3.3.5 น้ำมันหล่อลื่น

งานวิจัยนี้จะใช้ สารหล่อลื่น ซึ่งประกอบด้วย

1. น้ำมัน TDN 81
2. น้ำมัน DRAW 359 H
3. น้ำมัน DRAW 756 A (อัตราส่วน น้ำมัน 25 เปอร์เซ็นต์: น้ำ 75 เปอร์เซ็นต์)
4. น้ำมัน RENOFORM MZA 30
5. น้ำมันมะพร้าว

3.3.6 ชุดแม่พิมพ์สำหรับลากขึ้นรูป

เป็นแม่พิมพ์สำหรับลากขึ้นรูปด้วยสียเหล็กมจัตุรัสแบบมีปีก ที่มีขนาดความกว้างของก้นด้วยสียเหล็กเท่ากับ 60 มิลลิเมตร ความยาวเท่ากับ 60 มิลลิเมตร และความลึกเท่ากับ 30 มิลลิเมตร สามารถถอดเปลี่ยนคายได้ขณะแม่พิมพ์ติดตั้งอยู่บนเครื่องปั๊มไฮดรอลิก โดยไม่ต้องยกแม่พิมพ์ลงลักษณะของชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปด้วยสียเหล็กมจัตุรัสแบบมีปีก แสดงดังภาพที่ 3.9

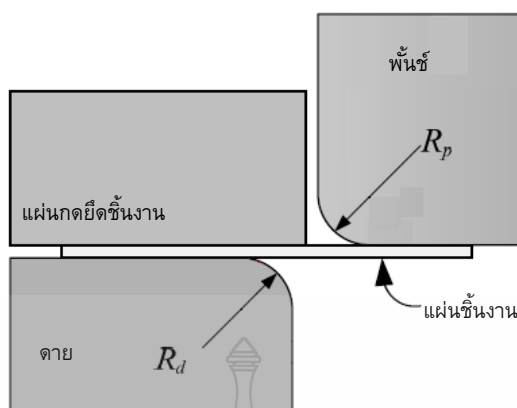


(ก) แสดงลักษณะของพื้นซ์

(ข) แสดงลักษณะของคาย

ภาพที่ 3.9 ลักษณะของชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปด้วยสียเหล็กมจัตุรัสแบบมีปีก

ในการทดลองจะใช้พื้นซ์เพียงตัวเดียวแต่จะเปลี่ยนขนาดของรัศมีบาคาย โดยจะใช้ขนาดของรัศมีมุมคายคงที่ (R_d) เท่ากับ 21.71 มิลลิเมตร แล้วเปลี่ยนขนาดรัศมีบาคายเป็น 6 และ 10 มิลลิเมตร พื้นซ์และคายทำจากเหล็ก SKD11 ชุบแข็งที่ระดับ 60 ± 2 HRC โดยมีรัศมีบาคพื้นซ์ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร รัศมีมุมพื้นซ์ (R_p) เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีระยะช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคาย เท่ากับ 1.71 มิลลิเมตร ลักษณะของรัศมีมุมพื้นซ์และรัศมีมุมคาย แสดงดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 ภาพหน้าตัดของรัศมีมุมพื้นซ์ (R_p) และรัศมีมุมด้าย (R_d)

3.4 วิธีการดำเนินงาน

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ จะเป็นการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก ขนาดความกว้างกันด้วย 60 มิลลิเมตร ความยาวกันด้วย 60 มิลลิเมตร ความลึก 30 มิลลิเมตร (กว้าง × ยาว × สูง) ภายใต้ตัวแปรดังต่อไปนี้

3.4.1 ตัวแปรคงที่

ลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกขนาดความกว้างกันด้วย 60 มิลลิเมตร ความยาวกันด้วย 60 มิลลิเมตร ที่ความลึก 30 มิลลิเมตร

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง เหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์ ขนาดแผ่นเปล่าสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดความกว้าง 120 มิลลิเมตร ความยาว 120 มิลลิเมตร ที่ขนาดความหนาของแผ่นเปล่า 1.4 มิลลิเมตร ใช้รัศมีพื้นซ์เท่ากับ 10 มิลลิเมตร
2. ช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์เท่ากับ 1.71 มิลลิเมตร
3. รัศมีมุมกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส เท่ากับ 20 มิลลิเมตร
4. ความเร็วในการลากขึ้นรูปภาพที่ใช้มีค่าเท่ากับ 1m/5s

3.4.2 ตัวแปรที่แปรเปลี่ยน

1. รัศมีบ่าด้ายที่ใช้ในการทดลอง 2 ระดับคือ 6 และ 10 มิลลิเมตร
2. สารหล่อลื่น 5 ชนิด

3.5 การคำนวณทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การที่จะทำการทดลองได้นั้น จำเป็นที่จะต้องทราบค่าต่างๆในทางทฤษฎีก่อนเพื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณเป็นค่าอ้างอิงเบื้องต้นของการทดลอง ค่าที่มีความจำเป็นที่ต้องทราบก่อนทำการทดลอง ประกอบด้วยอัตราส่วนการลากขึ้นรูป ค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน ค่าแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ใช้ในการลากขึ้นรูปเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์และขนาดของชิ้นงานก่อนการขึ้นรูป ดังรายละเอียดในการคำนวณดังต่อไปนี้

3.5.1 อัตราส่วนการลากขึ้นรูป (Drawing ratio ; β)

อัตราส่วนการลากขึ้นรูป (Drawing ratio ; β) เป็นค่าที่สำคัญในการหาจำนวนครั้งในการขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นอัตราส่วนของผ่านศูนย์กลางชิ้นงานเริ่มต้น (d_o) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูป (d_1) ในกรณีที่เป็นการขึ้นรูปกล่อ่งสี่เหลี่ยมให้เราทำการเทียบ (Equivalent) โดยเทียบพื้นที่หน้าตัดของพื้นที่ให้เท่ากับ d_1 และพื้นที่หน้าตัดของแผ่นชิ้นงานให้เท่ากับ d_o มีสมการดังต่อไปนี้

$$\beta_{\max} = \frac{d_o}{d_1} = \frac{120}{60} = 2 \quad (3.2)$$

3.5.2 การคำนวณหาแรงในการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยม เหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับ โครงสร้างยานยนต์ SAPH 440 หาได้จากสมการนี้

$$F_{\max} = \pi \times d_m \times s_o \times \left[1.1 \frac{1.3 \times s_u}{\eta_{def}} \left[l_n \frac{d_o}{d_1} - 0.25 \right] \right] \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } d_m &= d_1 + t \\ d_m &= 60 + 1.4 = 61.4 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$t = 1.4 \text{ mm}$$

$$\sigma_u = 478 \text{ N/mm}^2$$

$$d_o = 120 \text{ mm}^2$$

$$d_1 = 60 \text{ mm}^2$$

$$\eta_{def} = \text{ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูป ซึ่งมีค่าอยู่ในระหว่าง } 0.5 \sim 0.7$$

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$F_{\max} = \pi \times 61.4 \times 1.4 \left[1.1 \frac{1.3 \times 478}{0.5} \left(\ln \frac{120}{60} - 0.25 \right) \right]$$

$$F_{\max} = 163.55 \text{ kN}$$

ดังนั้นจะได้แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสำหรับเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานต์ (JIS) เท่ากับ 163.55 kN

3.5.3 แรงกดยึดแผ่นขึ้นงานของวัสดุ SAPH 440 หาได้จากสมการนี้

$$F_{BH} = \frac{F_{\max}}{3}$$

$$= \frac{163.55}{3}$$

$$= 54.517 \text{ kN}$$

3.5.4 ขนาดของรัศมีพื้นซ์และคาย

รัศมีของพื้นซ์จะใหญ่กว่ารัศมีของคายโดยมีแฟกเตอร์ 3 ถึง 5 เท่า การกำหนดรัศมีคาย (r_D) ขึ้นอยู่กับขนาดความหนาของแผ่นโลหะ รัศมีคายขนาดใหญ่จะช่วยให้แผ่นโลหะไหลตัวง่ายขึ้น ลดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป การออกแบบรัศมีคาย (r_D) ให้มีขนาดพอเหมาะคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$r_D = (5-10 \text{ เท่า}) \times \text{ความหนาของแผ่นขึ้นงาน}$$

$$r_D = (5-10) \times 1.4$$

$$= (7-14)$$

$$= \text{เลือกใช้รัศมีคาย 10 มิลลิเมตร}$$

เนื่องจากวัสดุขึ้นงานเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมากอาจจะเกิดการไหลตัวของโลหะไม่ได้ ถ้ามีรัศมีน้อยเกินไปจึงได้เลือกใช้รัศมีของคายที่ 10 มิลลิเมตร เพื่อที่จะลดแรงกดของเครื่องปั๊มและลดหน้าสัมผัสของแผ่นกดขึ้นงานและปีกของขึ้นงาน

รัศมีของพื้นที่ควรวใหญ่กว่ารัศมีของคายโดยมีแฟกเตอร์ 3 ถึง 5 เท่า r_p จะไม่เล็กกว่าขนาด r_D ไม่นั้นพื้นที่อาจทำการตัดเจาะ (Pierce) งานได้ ดังนั้นรัศมีของพื้นที่จึงใช้ค่าแฟกเตอร์ $3 - 5 r_D$ เลือกลง $3 r_D$

$$\begin{aligned} r_p &= (3 - 5) \times r_D \\ r_p &= (3 - 5) \times 10 \\ &= (30 - 50) \\ &= \text{เลือกใช้รัศมีพื้นที่ } 10 \text{ มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

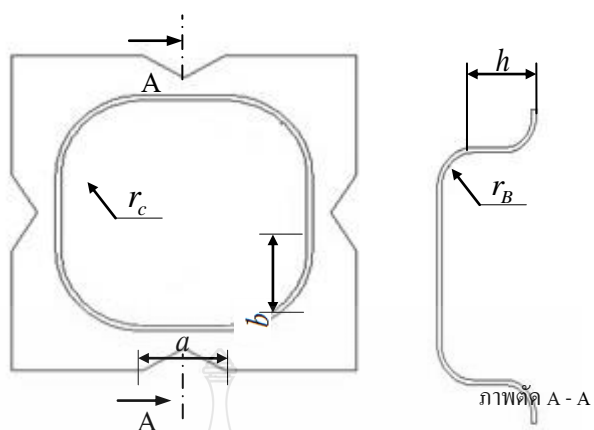
เนื่องจากความสูงของชิ้นงานสำเร็จคือ 30 มิลลิเมตร ถ้าหากใช้รัศมีพื้นที่ 20 มิลลิเมตร หรือ 30 มิลลิเมตร จะทำให้ชิ้นงานที่ได้ไม่มีผนังด้านตรงจึงเลือกใช้รัศมีพื้นที่ 10 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} \text{รัศมีมุม} \quad r_e &= 1.5 \times r_p \\ &= 1.5 \times 10 \\ &= 15 \text{ mm} \end{aligned}$$

ตามที่คำนวณแล้วต้องใช้รัศมีมุมที่ 15 มิลลิเมตร แต่เนื่องจากต้องการให้การขึ้นรูปมีการไหลตัวของเนื้อวัสดุที่บริเวณมุมด้วยที่ดีขึ้นจึงได้เลือกใช้รัศมีมุมที่ 20 มิลลิเมตร

3.5.5 ขนาดของแผ่นวัสดุก่อนการลากขึ้นรูป

การกำหนดขนาดที่เหมาะสมสำหรับแผ่นโลหะเปล่านั้นมีความสำคัญกับความสำเร็จในการขึ้นรูปหลักการเบื้องต้นคือ ขนาดของแผ่นโลหะเปล่านั้นควรมีขนาดเล็กที่สุดที่จะสามารถขึ้นรูปเป็นรูปร่างตามที่ต้องการได้ ด้วยเหตุผล 2 ข้อคือ 1 เป็นเรื่องของการประหยัดวัสดุ 2 แผ่นเปล่านั้นที่ขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนการลากขึ้นรูปสูง โอกาสที่จะเกิดความเสียหายกับชิ้นงานขณะทำการขึ้นรูปก็จะเพิ่มขึ้น การคำนวณหาขนาดแผ่นโลหะเปล่านั้นมีรายละเอียดแสดงดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 ลักษณะชิ้นงานที่ต้องการ

ขนาดชิ้นงานสำเร็จ ความสูง $h = 20 \text{ mm}$

รัศมีก้น $r_B = 10 \text{ mm}$

รัศมีมุม $r_c = 20 \text{ mm}$

ความยาว $a = 20 \text{ mm}$

ความกว้าง $b = 20 \text{ mm}$

ปีกของชิ้นงานด้านละ $= 4 \text{ mm}$

ความหนาของถ้วย $= 1.4 \text{ mm}$

$$\begin{aligned}
 \text{หาค่าความสูงของผนัง } h_s &= (0.57 \times r_B) + h + r_c \\
 &= (0.57 \times 10) + 20 + 20 \\
 &= 45.7 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{รัศมีสร้าง } R &= \sqrt{1.012r_c^2 + 2r_c(h_s + 0.506r_B)} \\
 &= \sqrt{1.012(20)^2 + 2(20)(45.7 + 0.506(10))} \\
 &= 49.35 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{องค์ประกอบแก้ค่า } X &= 0.074 \left[\frac{R}{2r_c} \right]^2 + 0.982 \\
 &= 0.074 \left[\frac{49.38}{2(20)} \right]^2 + 0.982 \\
 &= 1.10 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{องค์ประกอบแก้ค่า } Y &= \frac{\pi(X^2 - 1)}{4} \\
 &= \frac{\pi(1.10^2 - 1)}{4} \\
 &= 0.165 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

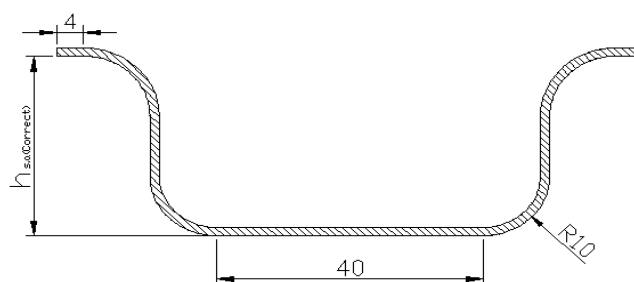
ความสูงของผนังด้านข้างที่เอาออก

$$\begin{aligned}
 h_{s,a} &= \frac{Y \times R^2}{a} \\
 &= \frac{0.165 \times 49.35^2}{40} \\
 &= 10.05 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

ความสูงของผนังด้านข้างที่ถูกต้อง

$$\begin{aligned}
 h_{s,a(\text{Correct})} &= h_{s,a(\text{Correct})} = h_s - h_{s,a} \\
 &= 45.7 - 10.04 \\
 &= 35.66 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

เมื่อรวมผลที่ได้ทั้งหมด ชิ้นงานที่ใช้ก่อนการขึ้นรูปจะได้ความยาวและความกว้างของแผ่นรวมกับค่าปีกของชิ้นงานที่ต้องการคือ 4 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 แบบเพื่อช่วยประมาณค่าแผ่นขึ้นงาน

$$\begin{aligned}
 \text{ความยาวของแผ่นขึ้นงาน} &= 40 + 2h_{s,a(\text{Correct})} + 2(4) \\
 &= 40 + 2(35.66) + 2(4) \\
 &= 119.32 \approx 120 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

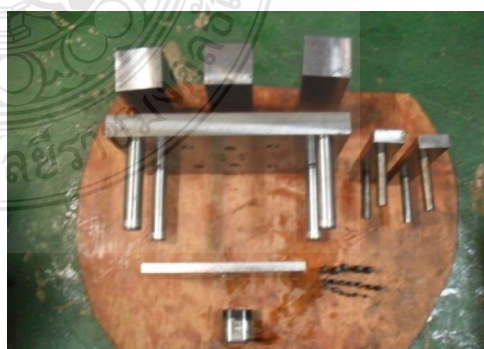
ดังนั้นในการทดลองจะเลือกใช้ขนาดของแผ่นโลหะเปล่าที่ได้จากการคำนวณคือ 120 มิลลิเมตรอย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการคำนวณอาจจะมากหรือน้อยกว่าแผ่นขึ้นงานจริงในการทดลอง จะทำการเตรียมแผ่นเปล่าที่ 120×120 มิลลิเมตร เป็นค่าเริ่มต้นก่อนแล้วทำการทดลองขึ้นรูปขึ้นงาน จากนั้นทำการปรับแต่งให้ได้ขนาดที่เหมาะสม

3.6 การประกอบแม่พิมพ์

3.6.1 ทำความสะอาดชิ้นส่วนแม่พิมพ์ทั้งหมดและแยกชิ้นส่วนเป็นสองฝั่งคือ ฝั่ง Die และ ฝั่ง Punch ดังแสดงในภาพที่ 3.13 ก และ 3.13 ข



ก. แสดงชุดแม่พิมพ์ตัวเมีย Die



ข. แสดงชุดแม่พิมพ์ตัวผู้ Punch

ภาพที่ 3.13 แม่พิมพ์ชุด Die และ Punch

3.6.2 นำแผ่น Die Holder ที่ติดตั้ง Guide Bush แล้ว มาทำการ Try Out กับแผ่น Punch Holder ที่ทำการติดตั้ง Guide Post ทดสอบโดยการสวม Guide Post เข้ากับ Guide Bush แล้วทำการตั้งตำแหน่งให้รูของ Guide Bush ตรงกับแท่ง Guide Post ยกเลี่ยนขึ้นลงดูว่ามีความฝืดหรือมีการเบียดของรู Guide Bush กับแท่ง Guide Post หรือไม่ถ้ามีการเบียดก็ต้องตั้งค่าใหม่

3.6.3 การประกอบชุดแม่พิมพ์ชุดบน (Die) ในการประกอบชุดแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) เป็นการนำเอาชิ้นส่วนในชุดของแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) มาประกอบกัน โดยชิ้นส่วนในแต่ละชิ้นนั้นจะประกอบเข้ากันได้ ก็ต่อเมื่อขนาดและตำแหน่งของรูเจาะตรงกันเพราะฉะนั้นกรรมวิธีการผลิตจึงมีผลต่อการประกอบชิ้นส่วนชุดแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die)

1. นำแผ่น Backing Die ทั้ง 2 แผ่นมาวางประกอบลงบนแผ่น Die Holder แล้วทำการตอกสลักล็อคตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 3.14



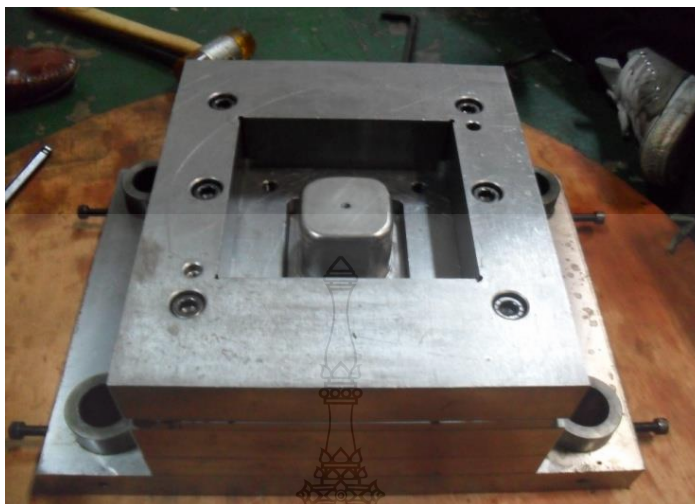
ภาพที่ 3.14 การประกอบ Backing Die

2. นำแผ่น Die Plate มาวางประกอบบนแผ่น Backing Die แล้วทำการตอกสลักและล็อกด้วยสกรู ดังแสดงในภาพที่ 3.15



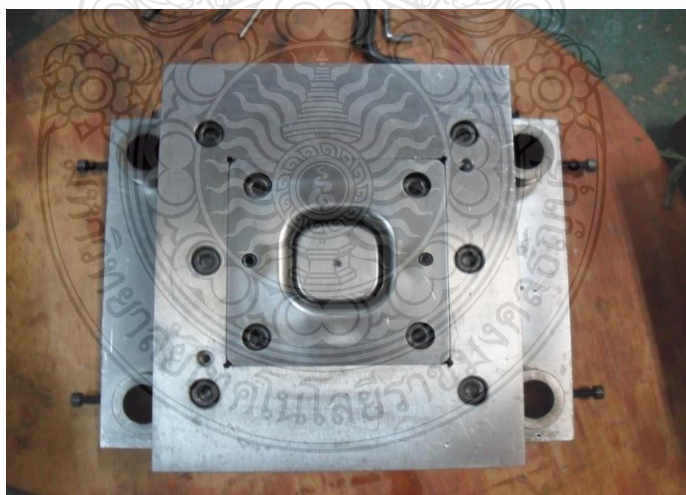
ภาพที่ 3.15 การประกอบ Die plate

3. ใส่ตัวปลดชิ้นงานลงไปแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 3.16



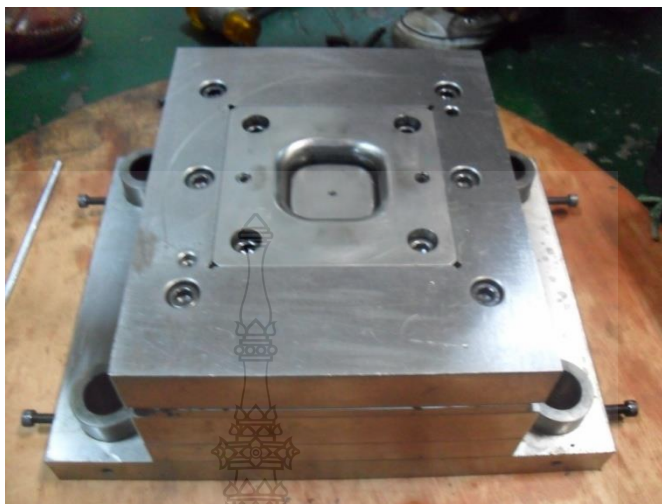
ภาพที่ 3.16 การใส่ตัวปลดชิ้นงาน

4. นำ Die มาใส่ลงในช่องตรงกลางของแผ่น Die Plate แล้วทำการตอกสลักและลึงคสกรู โดยที่ยังไม่ต้องลึงคสกรูให้แน่น ดังแสดงในภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.17 การประกอบ Die

5. ทำการเชื่อมทำความสะอาดหลังประกอบเสร็จ ดังแสดงในภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 ชุดแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) ประกอบเสร็จ

3.6.4 การประกอบชุดแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) ในการประกอบชุดแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) เป็นการนำเอาชิ้นส่วนในชุดของแม่พิมพ์ตัวผู้มาประกอบกัน โดยชิ้นส่วนในแต่ละชิ้นนั้นจะประกอบเข้ากันได้ ก็ต่อเมื่อขนาดและตำแหน่งของรูเจาะตรงกัน เพราะฉะนั้นกรรมวิธีการผลิตจึงมีผลต่อการประกอบชิ้นส่วนชุดแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch)

1. ประกอบตัว Punch เข้ากับแผ่น Punch Holder โดยที่ยังไม่ต้องล็อกสกรูให้แน่นหลังจากนั้นนำแผ่น Punch Plate มาสวมเข้ากับ Punch แล้วล็อกสกรูเพื่อเป็นการล็อกตำแหน่งของ Punch ให้ตรงกับ Die เนื่องจากว่ามีการออกแบบ Punch โดยให้ Punch Plate เป็นตัวล็อกตำแหน่งหลังจากนั้นขันสกรูล็อก Punch ให้แน่นแล้วปลดแผ่น Punch Plate ออก ดังแสดงในภาพที่ 3.19



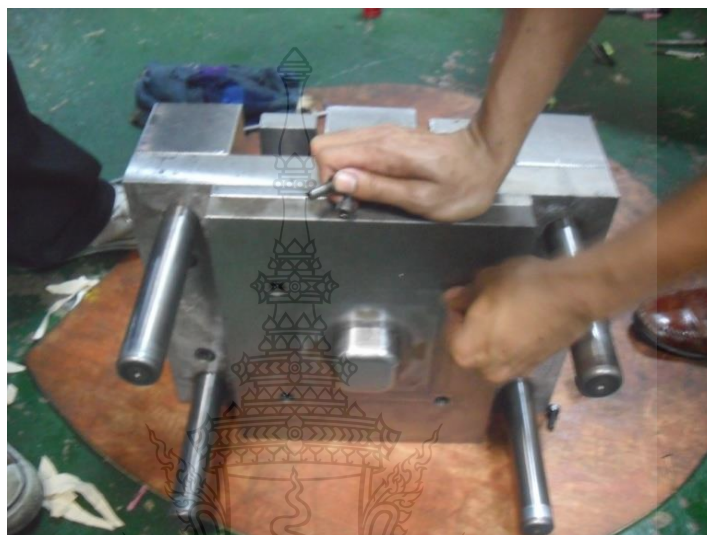
ภาพที่ 3.19 ประกอบ Punch

2. ประกอบหมอนรองเข้ากับชุด Punch Holder แล้วขันสกรูล็อคหมอนรองให้แน่น แล้วนำแผ่น Punch Plate มาสวมกับ Punch โดยจะต้องใส่ให้ถูกด้านแล้วล็อคสกรูให้แน่น ซึ่งแผ่น Punch Plate มีความสำคัญมากถ้าหากประกอบเข้าไปแล้วไม่สามารถขันสกรูหรือขันได้ยากนั้นแสดงว่า Punch ไม่ได้ตำแหน่งต้องทำการตั้ง Punch ใหม่ให้ตรงตำแหน่งโดยที่มีแผ่น Punch Plate เป็นตัวบังคับตำแหน่งดังแสดงในภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 ประกอบแผ่น Punch Plate

3. นำแผ่น Blank Holder มาประกอบโดยต้องใส่ให้ถูกต้องด้านหลัง จากนั้นนำเสาส่งแรงเหยียบและแผ่นรองเสาส่งแรงเหยียบมาประกอบเข้าด้วยกันแล้วนำมาประกอบกับชุดแม่พิมพ์โดยที่ ให้แท่งเสาสวมผ่านรูจากข้างใต้ขึ้นข้างบนสวมเข้าไปจนกระทบกับแผ่น Blank Holder แล้วขันสกรู ล็อคให้แน่น ดังแสดงในภาพที่ 3.21

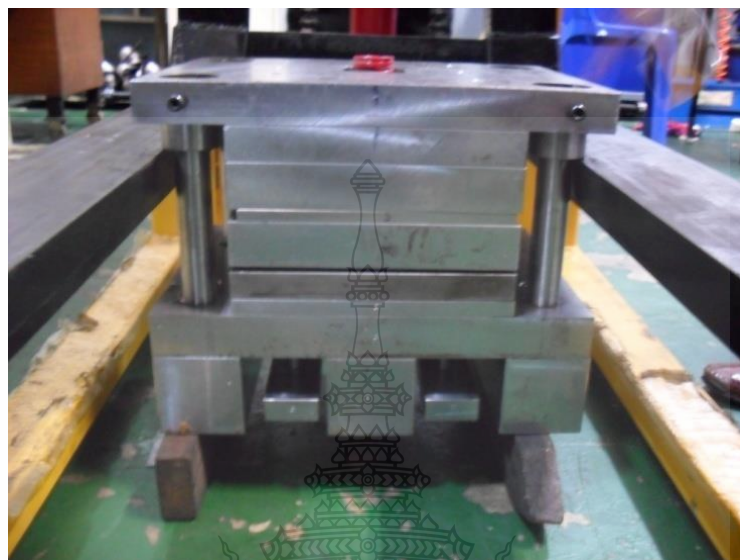


ภาพที่ 3.21 ประกอบ Blank Holder และชุดเสาส่งแรงเหยียบ



ภาพที่ 3.22 ชุดแม่พิมพ์ตัวผู้ประกอบเสร็จ

4. นำแม่ชุดแม่พิมพ์ตัวผู้และตัวเมียมาประกบเข้าด้วยกันแล้วเช็คทำความสะอาดรอบนอกตัวแม่พิมพ์ดังแสดงในภาพที่ 3.23



ภาพที่ 3.23 การประกบแม่พิมพ์

3.6.5 การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องปั๊ม

1. นำแท่ง Cushion ไปใส่ในช่องที่อยู่บนฐานเครื่องแล้วนำแม่พิมพ์ที่ประกบไว้มาติดตั้งบนเครื่อง โดยจัดวางตำแหน่งให้ตรงกับตำแหน่งของแท่ง Cushion แล้วเอา Ram ลงมากดแม่พิมพ์ให้แนบสนิท นำ Clamp มาล็อกแม่พิมพ์ ชุดบนและชุดล่างให้แน่น ดังแสดงในภาพที่ 3.24 เมื่อทำการล็อก Clamp เสร็จแล้วให้ทำการตั้ง Limit ที่อยู่ท้ายเครื่องปั๊มเพื่อปรับระยะยกของแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 3.23



ภาพที่ 3.24 การถอดแม่พิมพ์



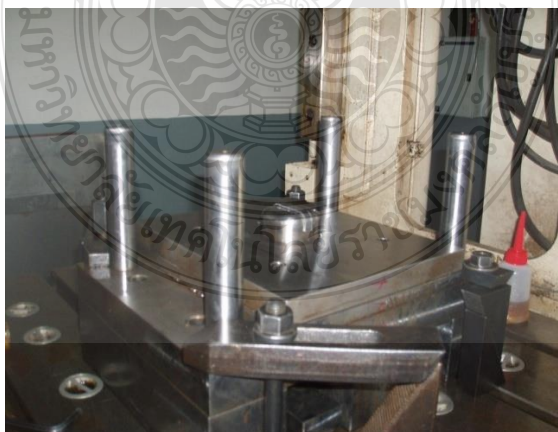
ภาพที่ 3.25 การตั้ง Limit

3.6.6 การใส่แผ่น Shim

การใส่แผ่น Shim เป็นการนำแผ่นเหล็กที่มีขนาดความหนาเท่ากับแผ่นวัสดุที่ใช้ป้อนมาตัดเป็นเส้น 2 เส้น โดยมีความยาว 120 มิลลิเมตร หรือ มากกว่าและมีความกว้าง 20 มิลลิเมตรแล้วนำแผ่น Shim ที่ได้ไปวางบนแผ่น Blank Holder ดังแสดงในภาพที่ 3.24 แล้วทำการป้อน 1 ครั้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะให้ Die ที่ผ่านการประกอบมา เกิดการร่วมศูนย์ระหว่าง Punch และ ช่องของ Die แผ่น Shim แผ่นที่ 2 ก็ทำเช่นเดียวกับแผ่นแรกแต่วางขวางอีกด้านหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 3.26 เพื่อให้เกิดการร่วมศูนย์กันทั้งแกน X และ Y หลังจากนั้นให้ขันสกรูล็อค Die ให้แน่น



ภาพที่ 3.26 การวางแผ่น Shim



ภาพที่ 3.27 การป้อนแผ่น Shim

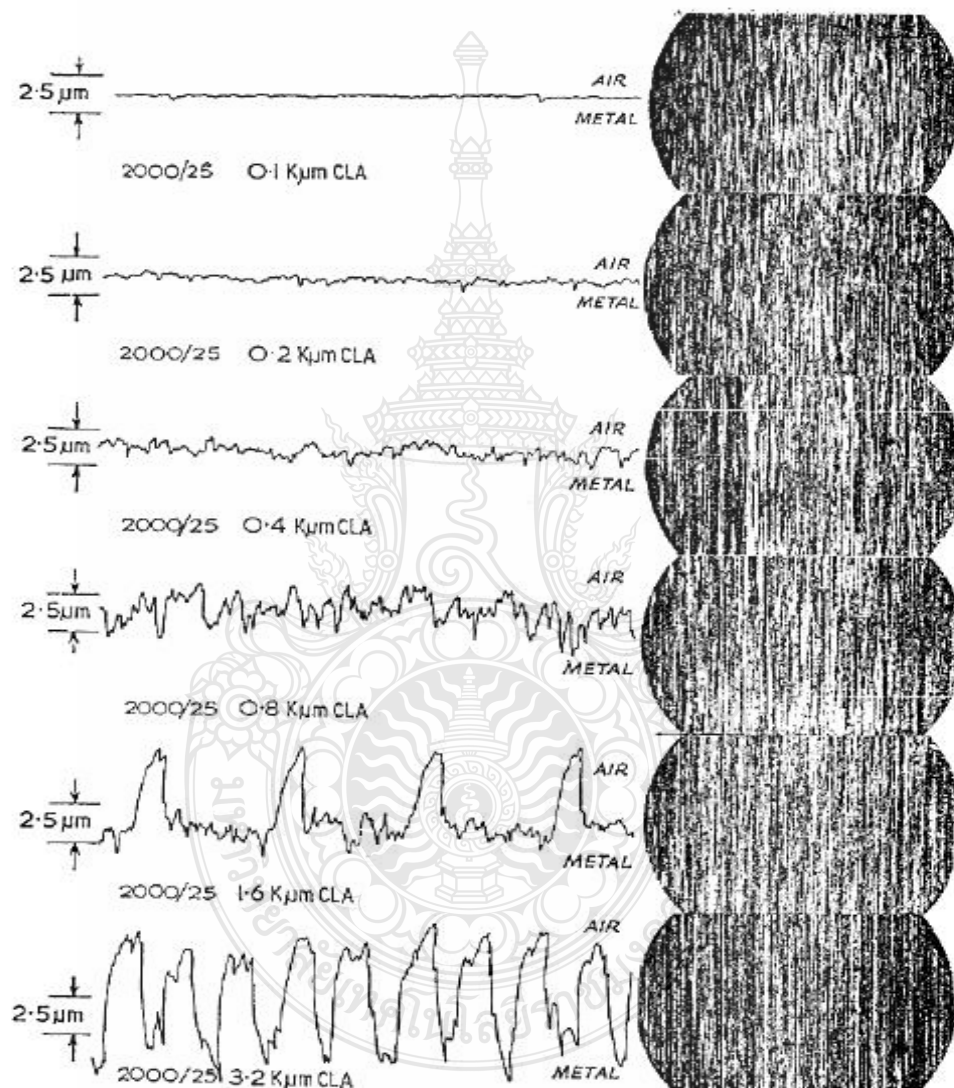
3.7 ความหยาบผิวและวิธีการวัดค่า [16]

ก่อนที่จะสามารถวัดค่าออกมาได้จำเป็นที่จะต้องให้คำจำกัดความของส่วนที่จะถูกวัดเสียก่อน ในกรณีของความหยาบ ความละเอียดของผิวแล้ว คำจำกัดความต่างๆ มักจะแสดงให้เห็นถึงความไม่ถูกต้องที่เกิดเนื่องจากแหล่งที่ต่างกัน เนื่องจากสภาพรูปร่างพื้นผิวจริงจะรวมเอาค่าความเป็นคลื่น (Waviness) ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนของรูปร่างอันเนื่องมาจากความไม่ถูกต้องทางเรขาคณิตของวิธีการผลิตผิวหน้ากับความหยาบ (Roughness) ซึ่งเป็นความไม่สม่ำเสมอหรือความไม่ถูกต้องที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ของกรรมวิธีการผลิตผิวหน้าไว้ด้วยกัน ถ้ากระทำบนเครื่องจักรที่สมบูรณ์ทุกประการ หนึ่งในปัญหาหลายๆ อย่างของการวัดความหยาบของผิวหน้าก็คือ การแยกความเป็นคลื่นออกจากความหยาบ ถ้าจำกัดการตรวจสอบของผิวหน้าที่ถูกตกแต่งมาเป็นช่วงความยาวหนึ่ง ซึ่งไม่นับความยาวคลื่นที่ยาว ดังนั้นจะมีเฉพาะความหยาบเท่านั้นที่ถูกรวมเข้ามา ความยาวคลื่นสูงสุดที่ถูกพิจารณาเราเรียกว่าความยาวคลื่นตัดออก (Cut-off wavelength) ซึ่งกำหนดเป็นมาตรฐานในสหราชอาณาจักรโดย B.S 1134 ให้เท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร 0.8 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร การเลือกใช้ค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าที่จะทำการตรวจสอบ สำหรับผิวหน้าที่ผ่ายการเจียรนัย ความยาวคลื่นตัดออกที่ใช้จะเป็น 0.8 มิลลิเมตร ถ้าสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดสั้นๆ ก็จะใช้ขนาด 0.25 มิลลิเมตร จึงจะเหมาะสม กฎทั่วไปสำหรับการทำผิวหน้า คือความยาวคลื่นตัดออกควรเพิ่มขึ้นตามอัตราเร็วของการตัด

3.7.1 วิธีการของการวัดความหยาบผิว

วิธีที่สามารถใช้ได้ผลสำหรับการวัดความหยาบของผิวชิ้นงานที่ผ่านการตกแต่งมา อาจจะใช้วิธีการเปรียบเทียบหรือใช้วิธีการวัดโดยตรง วิธีการวัดเปรียบเทียบนี้เป็นวิธีการที่จะตรวจสอบความหยาบละเอียดของผิวโดยการสังเกตหรือใช้ความรู้สึกบนผิวหน้าที่จะทำการตรวจสอบนั้น การเปรียบเทียบนี้ก็อาจจะทำให้เกิดการอ่านผิดขึ้นได้ ถ้าการเปรียบเทียบไม่ได้ใช้ชิ้นงานที่ทำหรือผลิตด้วยเทคนิคเดียวกัน รอยที่ปรากฏขึ้นบนผิวหน้าจะขึ้นอยู่กับแบบของเครื่องมือที่ใช้ในทิศทางของการขีดข่วนหรือตกแต่งผิวหน้าและขึ้นกับความลึกของรอยที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งรอยที่ปรากฏเหล่านี้สามารถที่จะตรวจสอบได้โดยการใช้อุปกรณ์ส่องขยายดู ดังแสดงในภาพที่ 3.28 ซึ่งแสดงภาพขยายที่เห็นจากกล้องขยายของผิวหน้าที่แตกต่างกัน 6 ผิวหน้า และผิวหน้าที่เป็นด้านข้าง (Profile) ของผิวหน้าเหล่านั้นการแตะสัมผัสเป็นวิธีการที่ให้ผลดีในการกำหนดความหยาบละเอียดของผิวมากกว่าการสังเกตด้วยตาซึ่งอาจทำให้อ่านค่าผิดพลาดได้และการเปรียบเทียบควรจะใช้กับผิวหน้าที่มีการผลิตเหมือนกันเท่านั้นซึ่งก็ได้มีหลายบริษัทที่ได้สร้างชิ้นส่วนมาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบความหยาบ

ของผิวแต่ละวิธีการผลิตซึ่งเราสามารถที่จะเลือกใช้ทำการตรวจสอบได้อย่างสะดวก ส่วนวิธีการตรวจสอบโดยตรงนั้นได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างมากเพื่อให้สามารถอ่านค่าออกมาได้ เมื่อวางลงบนผิวหน้าที่จะตรวจความหยาบของผิวซึ่งส่วนมากจะใช้เครื่องวัดแบบใช้หัวลาก แม้ว่าวิธีการแบบการแทรกสอดจะเหมาะสำหรับผิวหน้าที่สะท้อนแสง



ภาพที่ 3.28 สภาพผิวหน้าที่มองเห็นคล้าย ๆ กันแต่ความหยาบผิวต่างกัน

3.7.2 เครื่องมือวัดความหยั่งหัวลาก (Stylus Probe Instruments)

ในทุก ๆ กรณีของเครื่องมือวัดชนิดนี้ สามารถที่จะกล่าวได้ว่ามีวิธีการทำงานดังต่อไปนี้

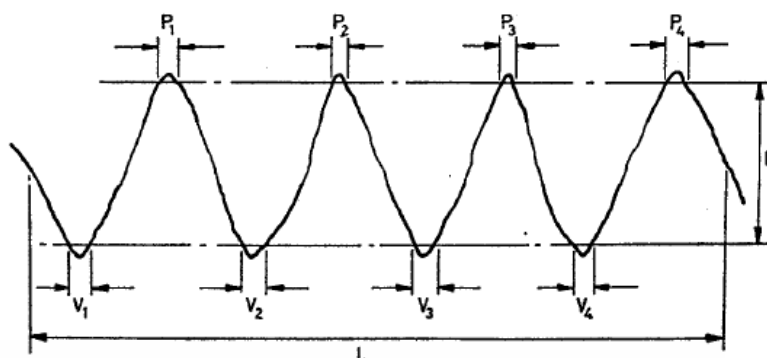
1. ก้านลื่นไถล (Skid) เคลื่อนตัวอย่างช้า เหมือนผิวหนังที่จะทำการวัดและตามความสูงต่ำของผิวหนัง
2. เข็มลาก (Stylus) ซึ่งเคลื่อนที่เหนือผิวหนังนั้นกับก้านลื่นไถลจะสัมผัสทางแนวตั้งกับก้านลื่นไถลอันเนื่องมาจากความหยาบของผิวหนังนั้น
3. เครื่องขยายสัญญาณจะขยายสัญญาณจากการเคลื่อนที่ของเข็มลาก
4. เครื่องจับบันทึกจะทำการให้ผลโดยการลาดเส้นหรือบันทึกรูปด้านข้าง (Profile) ของผิวหนังนั้น
5. ตัวกลาง (Means) ของการวิเคราะห์รูปด้านข้างที่ได้ก็จะถูกอ่านค่าออกมา

3.7.3 การวิเคราะห์ห้อยลากของผิวหนัง

รอยลากผิวหนังที่อ่านได้ จากเครื่องมือวัดจะต้องนำมาวิเคราะห์เป็นค่าพารามิเตอร์เพื่อที่จะนำค่านี้ไปแสดงค่าประมาณการให้เห็นถึงสภาพผิวโดยรวมทั้งหมด ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์ความหยาบผิวมีดังนี้

3.7.4 ความสูงจากยอดถึงปลายต่ำสุด (Rt)

ความสูงจากยอดถึงปลายต่ำสุดหรือความสูง P – V หรือ R_t จะเป็นวิธีการของการวิเคราะห์นี้ แต่ถ้าแปลความหมายอย่างกว้างๆ แล้วความสูง P – V ที่ใช้นี้จะผิดธรรมดาไปมาก และค่าที่ได้ออกมาจะไม่ใช่ว่าสิ่งที่ปรากฏออกมาจริงๆ ของผิวหนังที่ตรวจสอบ ความสูง P – V นี้จะหมายถึงระยะทางระหว่างเส้นตรงคู่หนึ่งที่ลากขนานกับการจัดคลื่น (Lay) ทั่วไปของตำแหน่งการลากผ่าน ดังนั้นความยาวที่วางในขอบเขตของยอดสูงสุด (Peak) ที่ส่วนบนจะเป็น 5% ของความยาวการลากผ่านและในขอบเขตของส่วนต่ำสุด (Valleys) ที่ส่วนล่างจะเป็น 10% ของความยาวการลากผ่าน ซึ่งจะแสดงในเส้นกราฟดังแสดงในภาพที่ 3.29

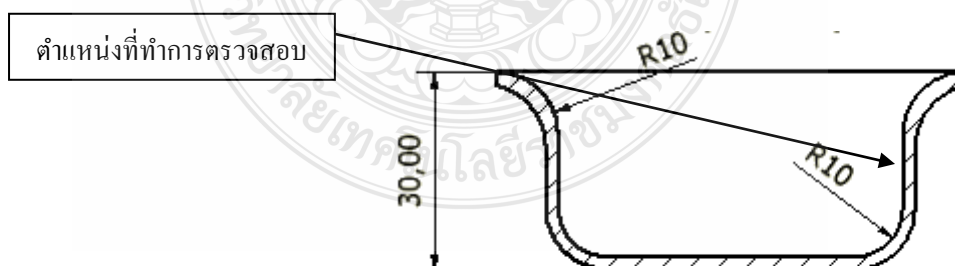


ภาพที่ 3.29 เส้นกราฟของความสูงจากยอดถึงปลายล่างสุด

3.7.5 วิธีการเฉลี่ยเส้นศูนย์กลาง (Center line Average Method, Ra)

วิธีการเฉลี่ยเส้นศูนย์กลาง C.L.A นี้ เป็นวิธีการวัดที่ใช้เป็นมาตรฐานในสหราชอาณาจักร และตั้งแต่ ค.ศ. 1955 ในอเมริกา ค่า C.L.A มีค่าจำกัดความคือเป็นความสูงเฉลี่ยจากเส้นตัวกลางของรอยสูงต่ำทั้งหมดของผิวหน้าโดยไม่คิดเครื่องหมาย ในการวัดค่า C.L.A โดยการเลือกของรอยสูงต่ำจะเป็นวิธีการในห้องปฏิบัติการ และถ้าเกิดช่องว่างในรอยสูงต่ำจะถูกเลือกมาเป็นจุดที่กำหนดเป็นผิวหน้าที่จะวัดสามารถที่จะวัดไปได้ อย่างไรก็ตามถ้าพื้นที่ที่ไม่ถูกต้องถูกแบ่งโดยความยาวของตัวเอง ดังนั้นค่าที่ได้จะเป็นความสูงเฉลี่ยของพื้นที่เหล่านั้น พื้นที่นี้สามารถที่จะวัดได้โดยใช้เครื่องวัดเพลนนิมิเตอร์ (Planimeter)

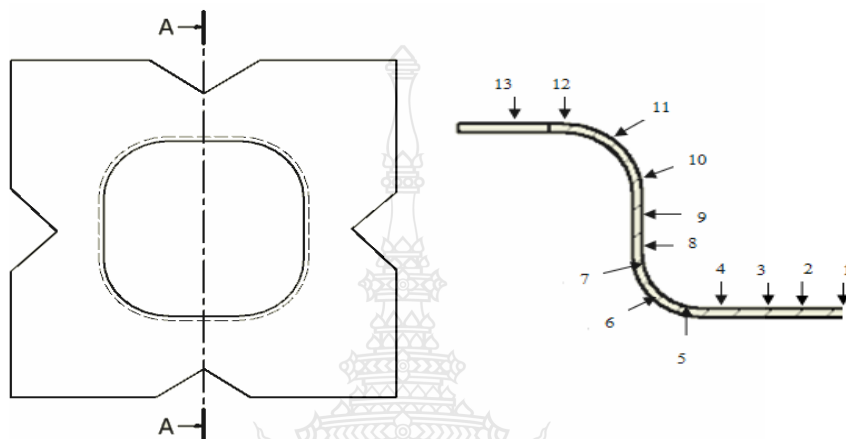
จากการทดลองจะได้ชิ้นงานตามภาพที่ การวัดความหยาบผิวจะวัดในตำแหน่งของส่วนที่ยึดออกของเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับ โครงสร้างยานยนต์และเป็นตำแหน่งที่ผิวของชิ้นงานที่มีความหยาบน้อยที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 3.30



ภาพที่ 3.30 ตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบ

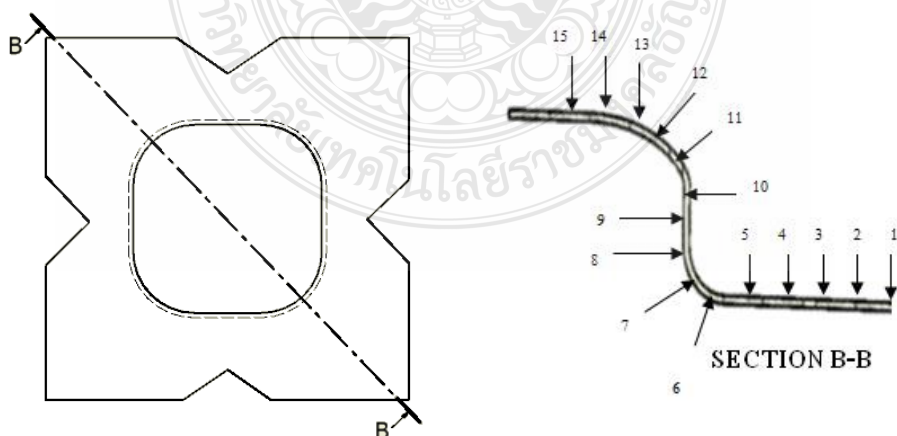
3.8 การวัดความหนาของชิ้นงาน

การวัดความหนาของผนังด้วยด้านตรงจากการทดลองลากชิ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อทำการลากชิ้นรูปขึ้นงานแล้วได้ด้วยสี่เหลี่ยมที่สมบูรณ์ไม่เกิดรอยแตกและรอยย่น จึงนำชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปมาทำการตัดผ่าครึ่ง เพื่อวัดความหนาของผนังชิ้นงานส่วนที่ตรง โดยได้กำหนดตำแหน่งในการวัดความหนาของผนังด้วยด้านตรงไว้ดังแสดงในภาพที่ 3.31



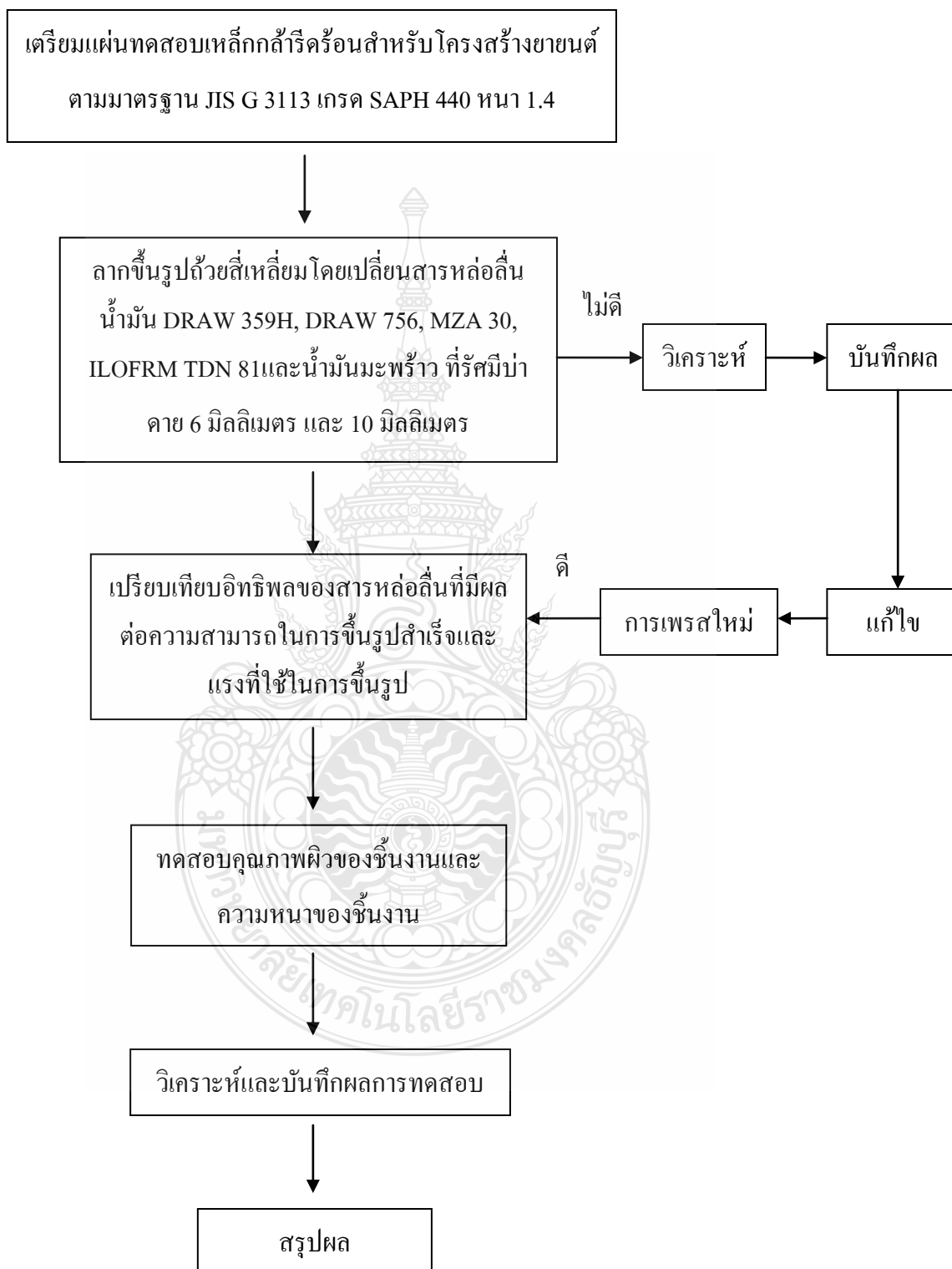
ภาพที่ 3.31 ตำแหน่งในการวัดความหนาของผนังด้วยด้านตรง

การวัดความหนาผนังด้วยบริเวณมุมกลองเนื่องจากการกระบวนการลากชิ้นรูปขึ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส การไหลตัวของชิ้นงานบริเวณด้านตรงกับบริเวณมุมกลองจะมีอัตราการไหลตัวของแผ่นขึ้นงานไม่เท่ากัน จึงได้ทำการตัดผ่าชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์ไม่เกิดรอยแตกและรอยย่น เพื่อวัดความหนาผนังด้วยบริเวณมุมกลอง โดยได้กำหนดตำแหน่งในการวัดความหนาไว้ ดังแสดงในภาพที่ 3.32



ภาพที่ 3.32 ตำแหน่งในการวัดความหนาผนังด้วยบริเวณมุมกลอง

3.9 ลำดับขั้นตอนในการทดลอง



บทที่ 4











ผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ ผู้ศึกษาได้มุ่งเน้นทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของหล่อลื่นในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกลงด้วยสึ่เหล็กมจัตุรัสแบบมีปีกด้วยเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์ สารหล่อลื่นที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบมี 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมันสังเคราะห์ สารหล่อลื่นสังเคราะห์และน้ำมันจากพืช รวมทั้งสิ้น 5 ชนิด โดยทดลองกับวัสดุเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์ ตามมาตรฐาน JIS G 3113 เกรด SAPH440 หนา 1.4 มิลลิเมตร ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของสารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิดที่อยู่ระหว่างแผ่นเปล่าและผิวของคานทำการลากขึ้นรูปลึกลง โดยศึกษาแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปและคุณภาพของผิวงาน ก่อนทำการทดลองผู้ทำการศึกษาได้รวบรวมข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้สำหรับอ้างอิงตามข้อกำหนดที่ตั้งไว้ เพื่อให้การทดลองดำเนินไปอย่างถูกต้อง บรรลุเป้าหมายและวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ในการทดลองนี้ได้ทำการกำหนดครีมีคายไว้ 2 ชนิด คือ R10 และ R6 เพื่อศึกษาความสามารถของสารหล่อลื่นในการขึ้นรูปแตกต่างกันอย่างไร เปรียบเทียบผิวของชิ้นงานที่ได้หลังจากการลากขึ้นรูป พร้อมทั้งศึกษาถึงความหนาของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป จากการใช้สารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิด ซึ่งสามารถสรุปผลในขั้นตอนการทดลองได้ดังนี้

4.1 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการลากขึ้นรูปลึกลง

4.1.1 อิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูป

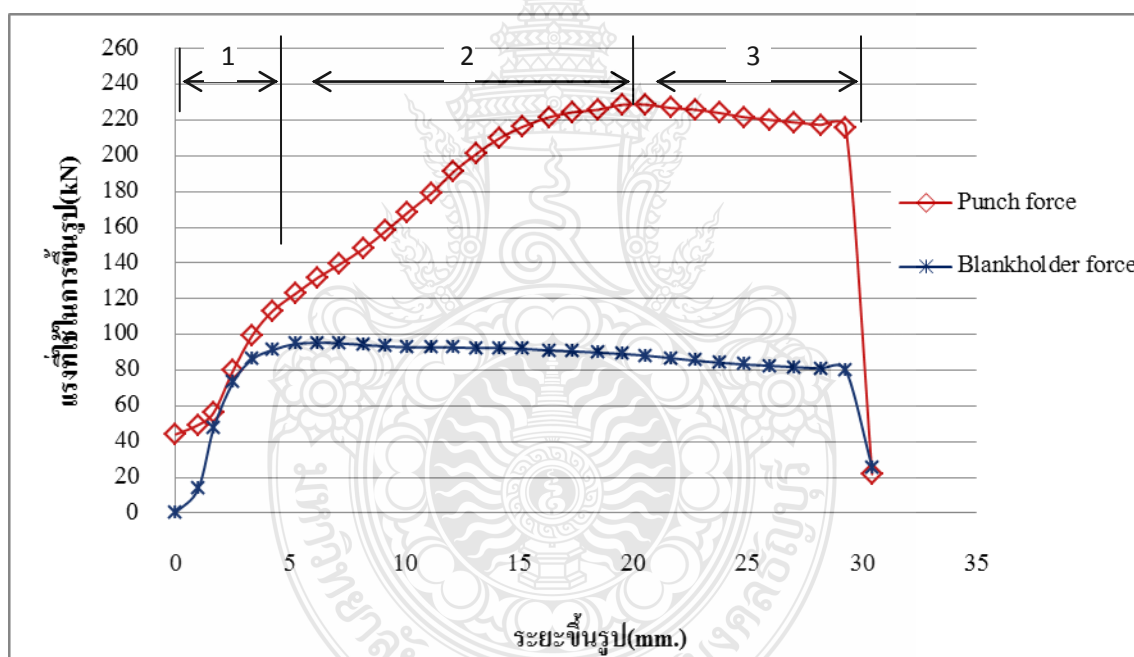
การศึกษาความสามารถในการลากขึ้นรูปด้วยสึ่เหล็กมจัตุรัสแบบมีปีกด้วยเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์ ตามมาตรฐาน JIS G 3113 เกรด SAPH440 กำหนดอัตราส่วนการลากขึ้นรูป (Drawing ratio; β) ไว้ที่ 2.0 ใช้ครีมีคาย 10 มิลลิเมตรและ 6 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.1 จากผลการทดลองพบว่าสารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิด ช่วยให้สามารถทำการลากขึ้นรูปด้วยสึ่เหล็กมจัตุรัสแบบมีปีกด้วยเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์ ได้อย่างสมบูรณ์ไม่พบรอยแตกร้าว ในทั้งสองระดับครีมีคาย

	ที่รัศมีปาดาย 10 มิลลิเมตร	ที่รัศมีปาดาย 6 มิลลิเมตร
DRAW 359H		
TDN 81		
MZA 30		
COCONUT OIL		
DRAW 756A		

ภาพที่ 4.1 รูปชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปทั้ง 5 ชนิดสารหล่อลื่น

4.1.2 อิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีต่อแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป

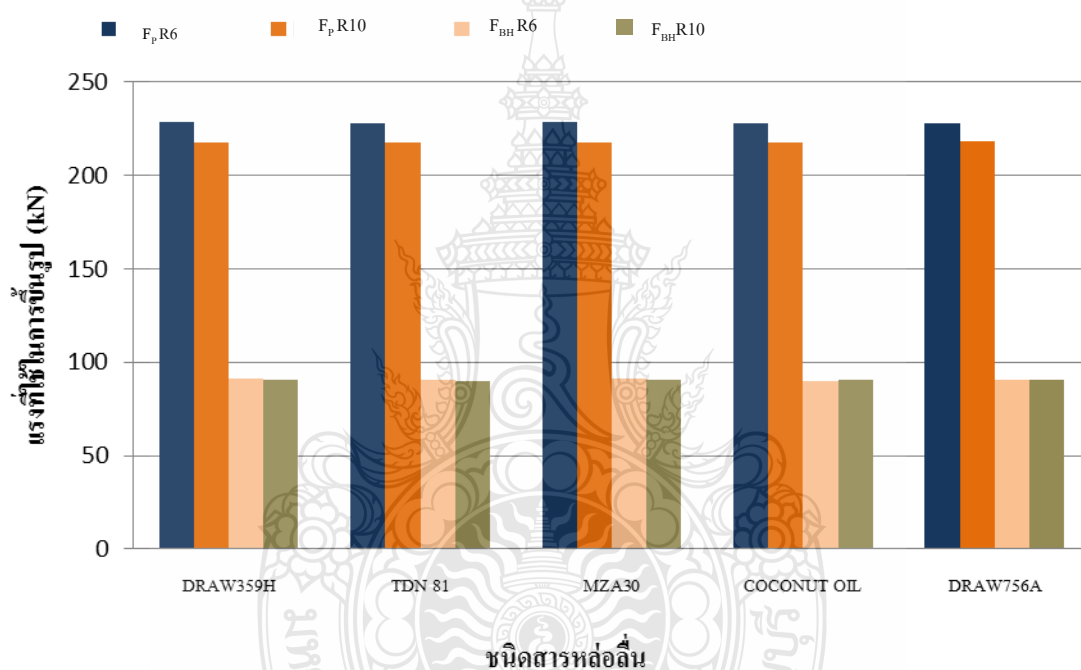
จากผลการทดลองแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป (ตัวอย่างกรณีใช้น้ำมัน TDN81) ที่รัศมีบ่าตาย 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.2 จะเห็นการพิจารณาออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 แรงที่ใช้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากต้องใช้แรงเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างผิวแผ่นขึ้นงานกับผิวแม่พิมพ์ จากนั้นชิ้นงานจะถูกค้ำด้วยรัศมีของ 펀ช์และค้ำองเหนือรัศมีตาย ทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปและถูกลากลงไป ในตายจนกลายเป็นผนังถ้วยสี่เหลี่ยม ส่วนแรงในช่วงที่ 2 เกิดจากเมื่อชิ้นงานเคลื่อนผ่านรัศมีตาย แรงจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะกดลึกของ 펀ช์ยาวขึ้น และแรงในช่วงที่ 3 แรงที่ใช้จะค่อยๆ ลดลง เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปีกถ้วยมีขนาดลดลง ทำให้มีแรงเสียดทานน้อยลง จึงใช้แรงในการเปลี่ยนรูปคงที่ ซึ่งสารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิด มีลักษณะของกราฟแรงที่มีแนวโน้มเหมือนกัน



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการลากขึ้นรูปลึกและแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานกับระยะทางการเคลื่อนที่ของ 펀ช์ กรณีใช้สารหล่อลื่น TDN 81 ขนาดรัศมีบ่าตาย 10 มิลลิเมตร

ค่าแรงสูงสุดในการลากขึ้นภาพที่ขนาดรัศมีบ่าตาย 10 มิลลิเมตร จากการใช้สารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิด ดังแสดงในภาพที่ 4.3 พบว่าแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสูงสุดมีความแตกต่างกันอยู่ระหว่าง 217.948 kN ถึง 217.348 kN ซึ่งมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย สำหรับแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงาน มีค่าเฉลี่ยแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงาน เมื่อทำการลากขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิดเท่ากับ 90.45 kN

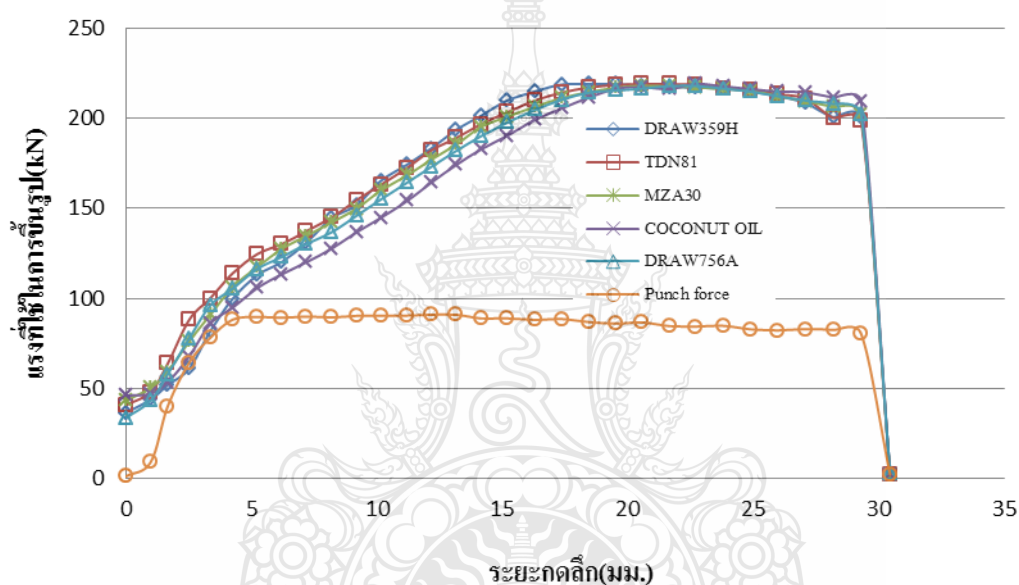
ส่วนค่าแรงสูงสุดในการลากขึ้นภาพที่ขนาดรัศมีบ่าตาย 6 มิลลิเมตร จากการใช้สารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิด ดังแสดงในภาพที่ 4.3 พบว่าขนาดของแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสูงสุดมีแนวโน้มเหมือนกัน แต่มีค่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสูงสุดและแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานเมื่อทำการลากขึ้นรูปโดยสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ ขนาดรัศมีบ่าตาย 10 มิลลิเมตรและ 6 มิลลิเมตร

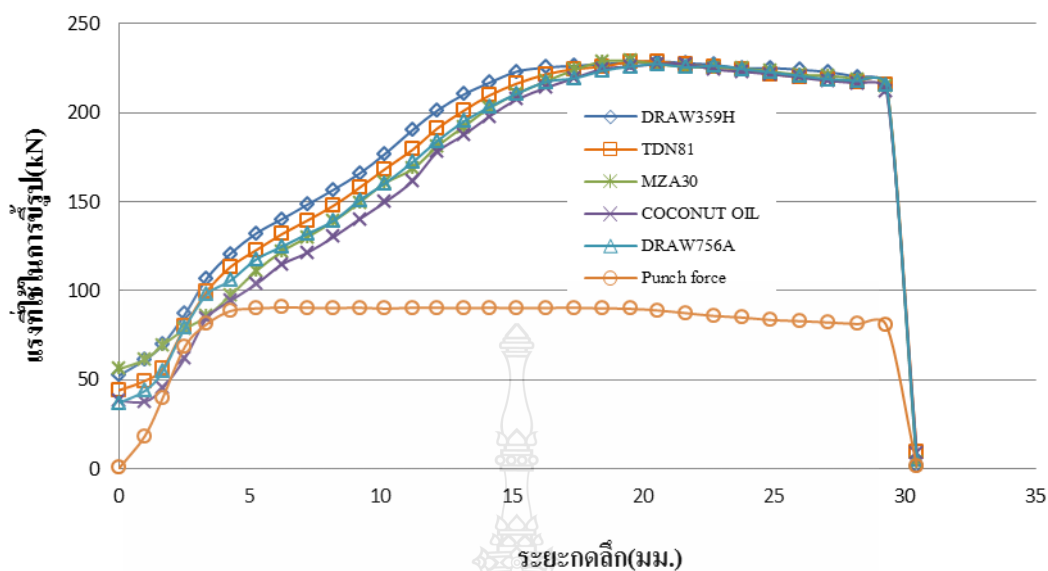
ผลจากการศึกษาอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ด้วยการเปรียบเทียบจากกราฟที่แสดงในภาพที่ 4.3 ไม่พบความแตกต่างของแรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่ค่ารัศมีบ่าตายเดียวกันในทุกชนิดสารหล่อลื่น เนื่องจากเป็นค่าของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปในช่วงที่ 3 ของการกดคลิก จึงจำเป็นต้องศึกษาแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงสุดต่อระยะกดคลิก จากการใช้สารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิด เพื่อให้เห็นความแตกต่างของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป

จากการทดลองใช้แรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานที่เท่ากัน เมื่อพิจารณาแรงที่ใช้ในระยะกดลึก จะมีความแตกต่างกันของแรงที่ใช้ในระยะกดลึกจากการใช้สารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิดที่รัศมีบ่าตาย 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปกับระยะกดลึกของพื้นที่ พบว่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน สารหล่อลื่นที่ใช้แรงในการขึ้นรูปน้อยที่สุดคือ COCONUT OIL เนื่องจากเป็นสารหล่อลื่นที่มีความหนืดน้อยสามารถไหลตัวได้ดี และสารหล่อลื่นที่ใช้แรงในการขึ้นรูปสูงสุดคือ DRAW359H เพราะเป็นสารหล่อลื่นที่มีความหนืดสูง ส่วนสารหล่อลื่นชนิดอื่นๆใช้แรงในการขึ้นรูปใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสูงสุดกับแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานต่อระยะ ความลึกเมื่อทำการลากขึ้นรูปโดยสารหล่อลื่นชนิดต่างๆขนาดรัศมีบ่าตาย 10 มิลลิเมตร

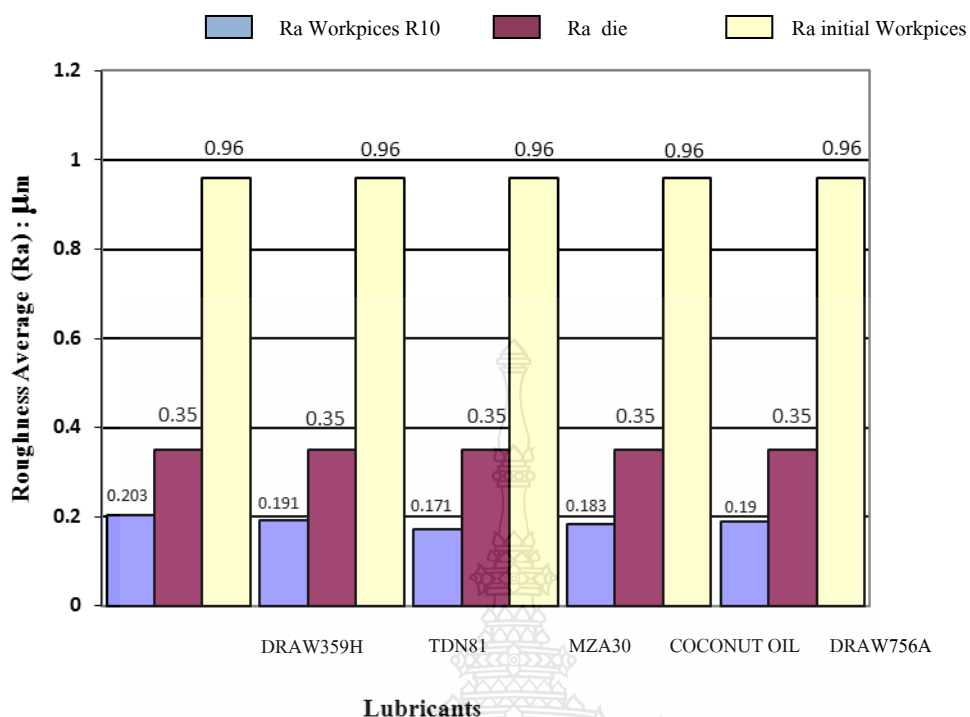
ส่วนค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปกับระยะการกดลึกของพื้นที่ ที่ขนาดรัศมีบ่าตาย 6 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับที่ขนาดรัศมีบ่าตาย 10 มิลลิเมตร จากการใช้สารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิด ดังแสดงในภาพที่ 4.5 พบว่าขนาดของแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสูงสุดมีแนวโน้มเหมือนกัน แต่มีค่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น



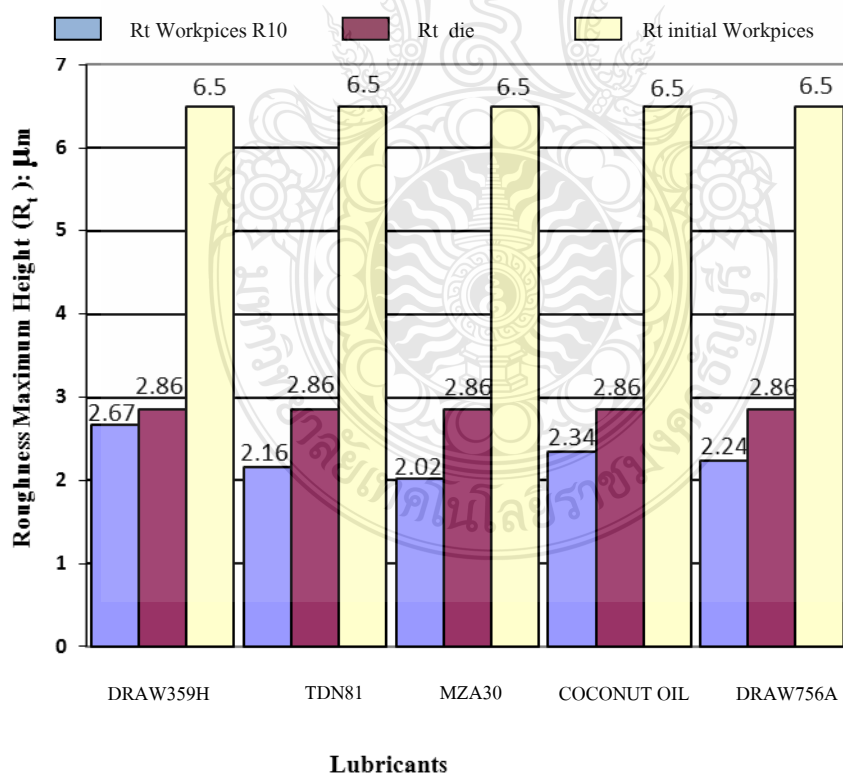
ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสูงสุดกับแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานต่อระยะกดลึกเมื่อทำการลากขึ้นรูปโดยสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ ขนาดรัศมีบ่าตาย 6 มิลลิเมตร

4.1.3 อิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความหยาบผิวชิ้นงาน

ผลการทดลองวัดค่าเฉลี่ยความหยาบผิว (R_a) และค่าความหยาบผิวสูงสุด (R_t) ที่ได้จากการตรวจสอบผิวชิ้นงานจากการใช้สารหล่อลื่นจำนวน 5 ชนิด ในการลากขึ้นรูปชิ้นงานที่ขนาดรัศมีบ่าตาย 10 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร หลังทำการลากขึ้นรูปเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์โดยใช้สารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิด ที่รัศมีบ่าตาย 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.6 และ 4.7 เมื่อพิจารณาค่า R_a และ R_t ของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป พบว่าสารหล่อลื่น MZA 30 ให้ค่า R_a และ R_t ดีที่สุด เนื่องจากเป็นสารหล่อลื่นที่มีความหนืดปานกลาง มีสารเพิ่มคุณภาพกำมะถันและฟอสฟอรัส จะสามารถรับแรงกดได้สูง ต้านทานการสึกหรอ ซึ่งจะช่วยให้ป้องกันการสัมผัสของผิวคู่วาล์วได้น้ำมันหล่อลื่นชนิดอื่น

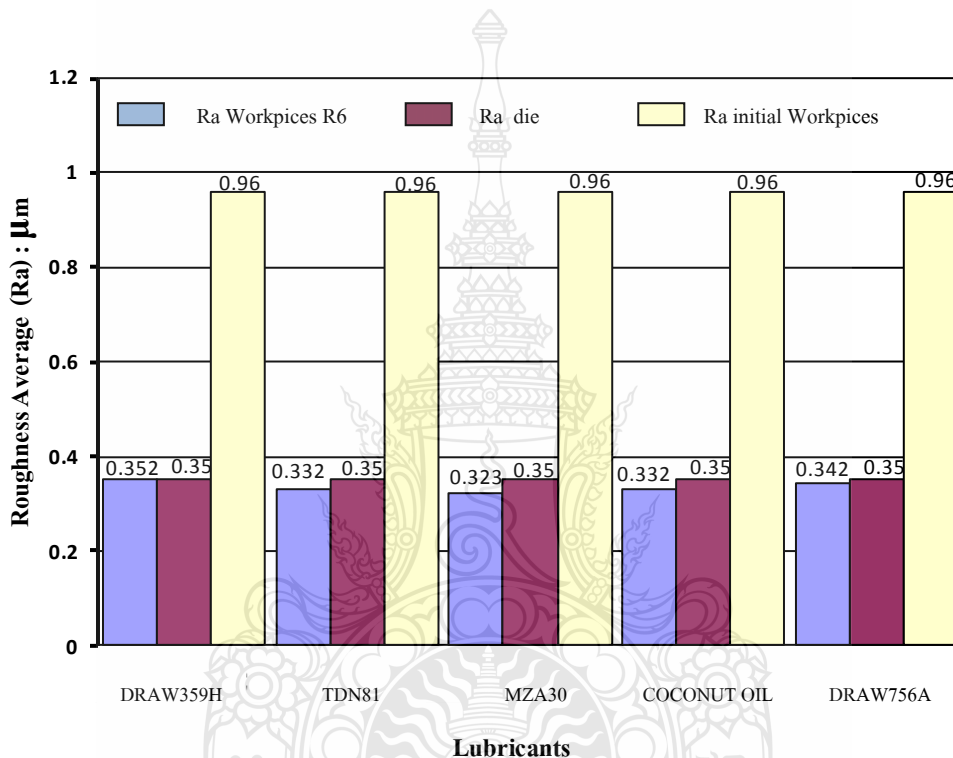


ภาพที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยความหยาบผิว (Ra) ได้จากการลากขึ้นภาพที่รัศมีปาดาย 10 มิลลิเมตร

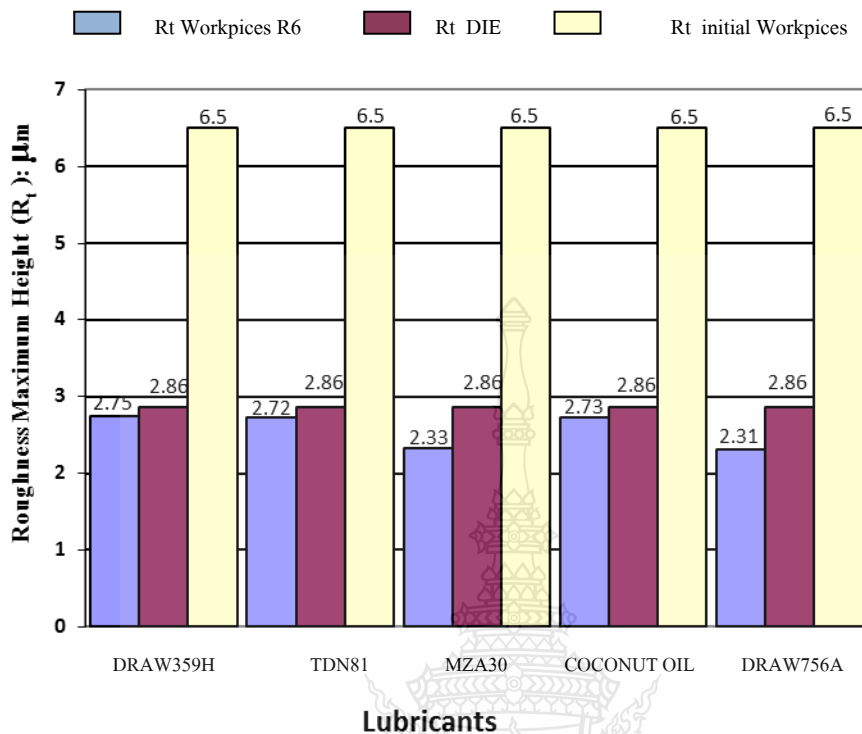


ภาพที่ 4.7 ค่าความหยาบผิวสูงสุด (Rt) ได้จากการลากขึ้นภาพที่รัศมีปาดาย 10 มิลลิเมตร

ผลการทดลองวัดค่าเฉลี่ยความหยาบผิว (Ra) และค่าความหยาบผิวสูงสุด (Rt) ที่ได้จากการตรวจสอบผิวชิ้นงานจากการใช้สารหล่อลื่นจำนวน 5 ชนิด ในการลากขึ้นรูปชิ้นงานที่ขนาดรัศมีบ่าตาย 6 มิลลิเมตร หลังทำการลากขึ้นรูปเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์โดยใช้สารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิด ดังแสดงในภาพที่ 4.8 และ 4.9 เมื่อพิจารณาค่า Ra และ Rt ของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับที่ใช้รัศมีบ่าตาย 10 มิลลิเมตร แต่ที่รัศมีบ่าตายได้ค่า Ra และ Rt ที่สูงกว่า

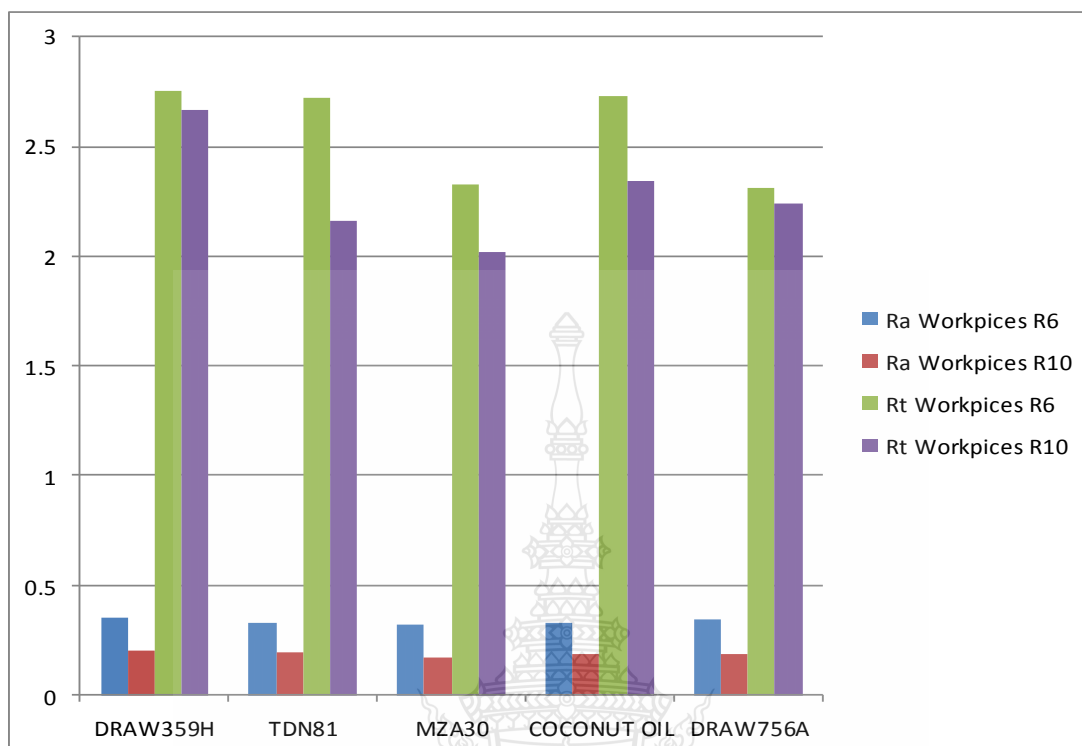


ภาพที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยความหยาบผิว (Ra) ได้จากการลากขึ้นรูปที่รัศมีบ่าตาย 6 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.9 ค่าความหยาบผิวสูงสุด (R_t) ได้จากการลากชิ้นภาพที่รัศมีปาดาย 6 มิลลิเมตร

เมื่อเปรียบเทียบ R_a และ R_t ของชิ้นงานจากขนาดรัศมีปาดายทั้ง 10 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.10 ค่า R_a และ R_t ที่ได้ พบว่าขนาดรัศมีปาดายที่ใหญ่ขึ้นให้ค่า R_a และ R_t ที่ดีกว่า รัศมีปาดายขนาดเล็กในทุกชนิดสารหล่อลื่น เนื่องจากการไหลตัวของเหล็กที่รัศมีปาดายที่ใหญ่ขึ้นจะให้การไหลตัวได้ดีกว่าขนาดรัศมีปาดายขนาดเล็ก ผิวของชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบมีความละเอียดเนื่องจากถูกตัดและตัดกลับ ผิวสัมผัสถูกเคลื่อนที่ภายใต้การถูกตัดงอผ่านรัศมีผิวคาย และถูกยึด

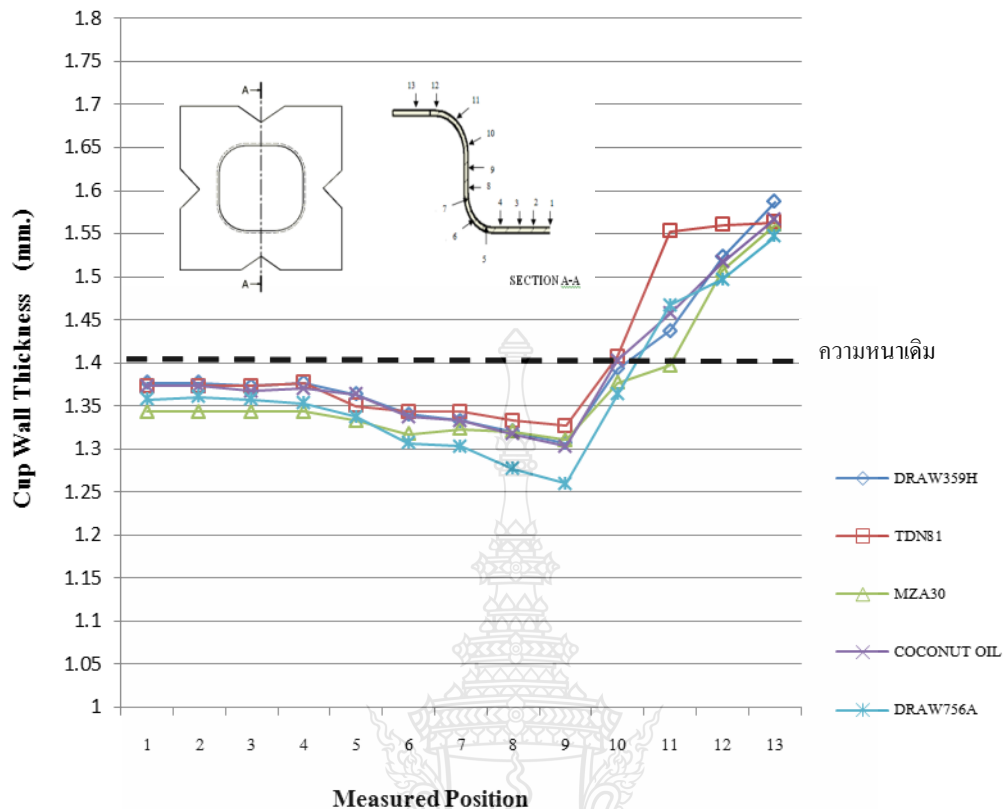


ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหยาบผิว (R_a) ค่าความหยาบผิวสูงสุด (R_t) ได้จากการลาก ขึ้นภาพที่รัศมีบ่าตาย 6 มิลลิเมตรและ 10 มิลลิเมตร

4.1.3 อิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความหนาผนังถ้วยด้านตรงของชิ้นงาน

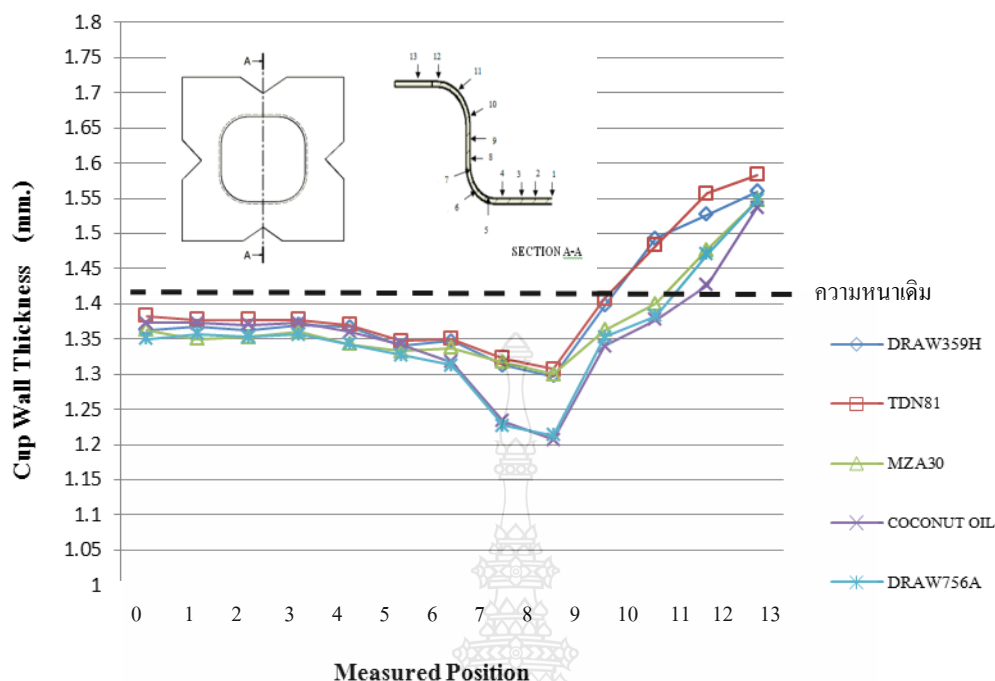
จากผลการวัดความหนาผนังถ้วยด้านตรงของชิ้นงานได้ผลแล้วนำค่าที่ได้มาสร้างเป็นกราฟเส้นเพื่อเปรียบเทียบผลความหนาผนังด้านตรงของชิ้นงานที่รัศมีบ่าตาย 10 มิลลิเมตร ของสารหล่อลื่น ทั้ง 5 ชนิด ได้กราฟเส้นความหนาผนังด้านตรงของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 4.11

ผลความหนาผนังด้านตรงของชิ้นงาน ที่ผ่านกรรมวิธีลากขึ้นรูปลึกโดยใช้สารหล่อลื่นในการขึ้นภาพที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นตัวอย่างสำหรับกรณีของวัสดุเหล็กหล่อร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์ SAPH 440 การวัดความหนาของชิ้นงานจะวัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตั้งแต่กันด้วยไปจนถึงปีกถ้วย จากผลที่ได้ชิ้นงานเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์ พบว่าสารหล่อลื่นชนิด TDN81 ช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาจากความหนาของผนังถ้วยจากเดิมน้อยที่สุด เพราะเป็นสารหล่อลื่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานน้อยกว่าสารหล่อลื่นชนิดอื่น สารหล่อลื่น COCONUT OIL ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังถ้วยจากเดิมมากที่สุด เนื่องจากเป็นสารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดน้อยทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างผิวคู่โลหะได้ ส่วนสารหล่อลื่นชนิดอื่นใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4.11 ความหนาผนังด้านตรงของชิ้นงานรัศมีปาดาย 10 มม.

ส่วนที่รัศมีปาดาย 6 มิลลิเมตรดังแสดงในภาพที่ 4.12 สารหล่อลื่นมีอิทธิพลต่อความหนาของผนังชิ้นงาน มีแนวโน้มไปทิศทางเดียวกัน แต่ผนังถ้วยจะมีความหนาลดลงเล็กน้อย เมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยรัศมีปาดายที่มีขนาดเล็กลง นอกจากนี้จากรูปจะพบว่าตรงบริเวณตำแหน่งที่ 9 จะเป็นตำแหน่งที่มีความหนาของผนังถ้วยน้อยที่สุดเพราะเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นดึงในแนวแกนสูงสุดของการขึ้นรูปส่วนบริเวณปีกถ้วยในตำแหน่งที่ 13 ชิ้นงานจะมีความหนามากที่สุดและจะมีความหนาเพิ่มมากกว่าความหนาเริ่มต้นของชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นอัดในแนวเส้นขอบบริเวณปีกถ้วยในขณะลากขึ้นรูปนั่นเอง



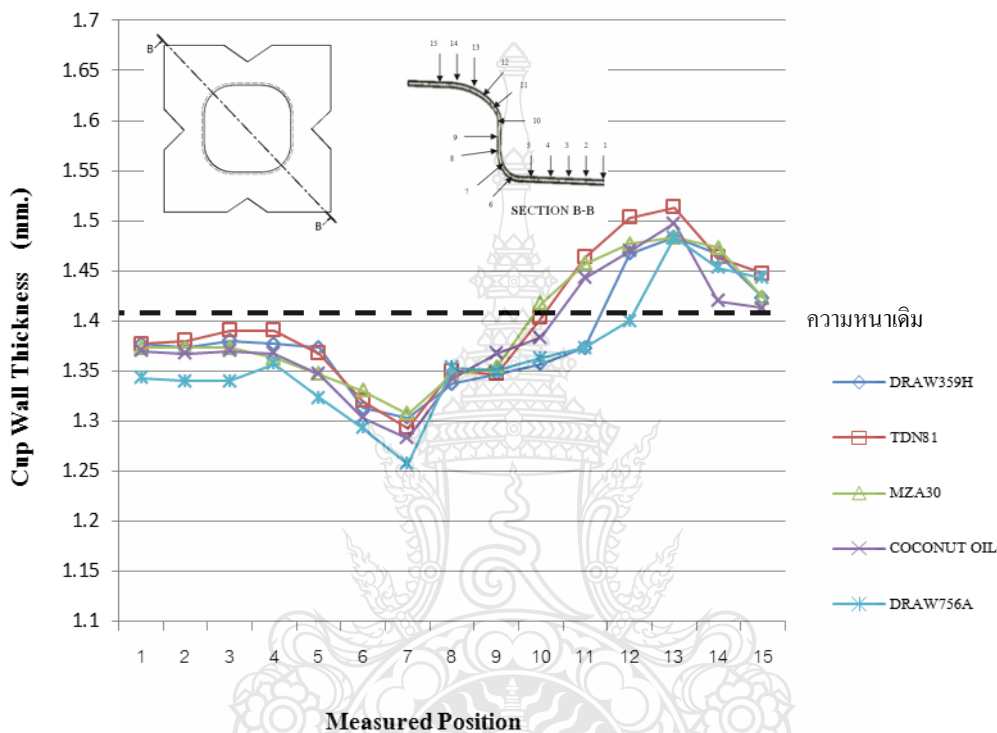
ภาพที่ 4.12 ความหนาผนังด้านตรงของชิ้นงานรัศมีบ่าตาย 6 มิลลิเมตร

สรุปได้ว่าสารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิด จะมีอิทธิพลต่อความหนาของชิ้นงานน้อยสุดที่จุดเดียวกัน คือจุดที่ 9 ตรงบริเวณนี้จะเป็นผนังตรงของถ้วย และจะมีอิทธิพลต่อความหนาของชิ้นงานมากที่สุดที่จุดเดียวกันเช่นกันคือจุดที่ 13 บริเวณนี้จะเป็นขอบปีกของชิ้นงาน ซึ่งตรงตามทฤษฎีของการลากชิ้นรูป ถ้วยสี่เหลี่ยม

4.1.4 อิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความหนาผนังด้วยบริเวณมุมกลองของชิ้นงาน

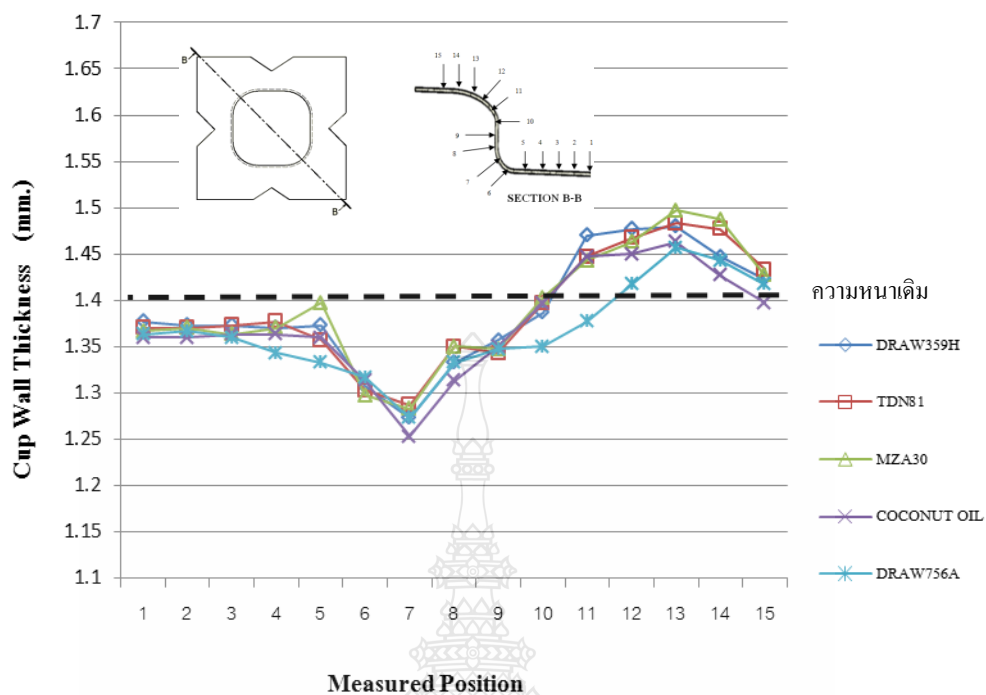
จากผลการวัดความหนาผนังด้วยบริเวณมุมกลองของชิ้นงานได้ผล แล้วนำค่าที่ได้มาสร้างเป็นกราฟเส้นเพื่อเปรียบเทียบผลความหนาผนังด้วยบริเวณมุมกลองของชิ้นงาน ที่รัศมีบ่าตาย 10 มิลลิเมตร ของสารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิด ได้กราฟแสดงความหนาผนังด้วยบริเวณมุมกลองของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 4.13 โดยชิ้นงานที่นำมาวัดค่าความหนาใช้แรงกดแผ่นยึดชิ้นงานเท่ากันในการลากชิ้นรูป พบว่าความหนาของวัสดุ SAPH 440 บริเวณจุดที่ 1-4 ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก จะมีค่าความหนาที่ใกล้เคียงกัน ค่าความหนาที่วัดได้จะน้อยกว่าความหนาเดิมของชิ้นงานประมาณ 0.05 มิลลิเมตร และจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยลงเริ่มที่จุดที่ 6 และ 7 โดยจุดที่ 7 จะมีความหนาต่ำที่สุด เนื่องจากเป็นจุดที่รับแรงดึงสูงสุดจากการตัดโค้งตามรัศมีบ่าพื้นซ์ แรงดึงจากการตัดโค้งตามรัศมี

มุมพื้นซ์ ทำให้ผนังถ้วยบริเวณนี้มีความหนาที่น้อยที่สุดในจุดที่ 8 และความหนาจะเริ่มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ 13 โดยที่จุดที่ 13 จะมีความหนาสูงสุด เนื่องจากการขยายตัวของแผ่นชิ้นงานที่มาจากกาเบียดหรือการอัดตัวในแนวเส้นขอบของปีกถ้วย จากนั้นความหนาของชิ้นงานจะค่อย ๆ ลดลงจนเท่ากับความหนาเดิมของแผ่นเปล่าในจุดที่ 14 และจุดที่ 15 ความหนาจะใกล้เคียงกับความหนาเดิมของวัสดุ



ภาพที่ 4.13 ความหนาผนังถ้วยบริเวณมุมกลองชิ้นงานรัศมีบาคาย 10 มิลลิเมตร

ส่วนจากผลการวัดความหนาผนังถ้วยบริเวณมุมกลองของชิ้นงานได้ผล ที่รัศมีบาคาย 6 มิลลิเมตร ของสารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิด ได้กราฟแสดงความหนาผนังถ้วยบริเวณมุมกลองของชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 4.14 พบค่าความหนาบริเวณมุมกลองมีแนวโน้มเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน แต่ค่าความหนาบริเวณมุมกลองที่วัดได้น้อยกว่าในทุกชนิดสารหล่อลื่น



ภาพที่ 4.14 ความหนาผนังถ้วยบริเวณมุมกลองชิ้นงานรัศมีบ่าตาย 6 มิลลิเมตร

สรุปได้ว่าสารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิดที่นำมาทดลองนั้น จะมีอิทธิพลต่อความหนาของชิ้นงานน้อยที่สุดที่จุดเดียวกันคือคือจุดที่ 7 ซึ่งเป็นบริเวณมุมด้านล่างของถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัส และจะมีความหนาค่อยๆเพิ่มมากขึ้นที่จุดจนหนามากที่สุดที่จุดเดียวกันคือจุดที่ 13 ซึ่งเป็นบริเวณขอบปีกของถ้วยสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยม

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

สำหรับการศึกษาถึงอิทธิพลของสารหล่อลื่น ที่มีผลต่อแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัส สำหรับเหล็ก SAPH 440 จะใช้กระบวนการทางสถิติวิเคราะห์ผลข้อมูลจากการทดลอง ด้วยระดับความมีนัยสำคัญ 0.05 ด้วยสารหล่อลื่น 5 ชนิด ที่ขนาดรัศมีบ่าตาย 6 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร ทำการทดลองจากขนาดตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่าง ต่อสารหล่อลื่น 1 ชนิด ในแต่ละระดับ ได้ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปที่รัศมีป่าตาย 6 มิลลิเมตร

สารหล่อลื่น	แรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูป (kN)					รวม	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	Y_i	\bar{Y}_i
DRAW-359H	228.71	229.10	227.88	228.35	228.84	1142.88	228.576
TDN81	229.09	228.75	226.86	227.58	227.64	1139.92	227.984
MZA30	229.12	228.56	228.47	228.51	227.32	1141.98	228.396
Coconut oil	227.39	228.62	226.84	227.98	229.78	1140.61	228.122
DRAW-756A	229.43	227.43	226.65	228.02	228.74	1140.27	228.054
						ผลรวม	912.736
						5705.66	228.054

ค่าความแปรผันโดยรวม

$$\begin{aligned}
 SS_T &= \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^5 Y_{ij}^2 - \left(\frac{Y_{..}^2}{an} \right) \\
 &= 228.72^2 + 229.10^2 + \dots + 228.02^2 + 228.74^2 - \frac{(228.71 + 229.10 + \dots + 228.02 + 228.74)^2}{5 \times 5} \\
 &= 1,302,199.395 - \frac{(5705.66)^2}{25} \\
 &= 17.1536
 \end{aligned}$$

ค่าความแปรผันเนื่องจากปัจจัย

$$\begin{aligned}
 SS_{tr} &= \sum_{i=1}^4 \frac{Y_i^2}{n} - \left(\frac{Y_{..}^2}{an} \right) \\
 &= \frac{1142.88^2 + 1139.92^2 + 1141.98^2 + 1140.61^2 + 1140.27^2}{5} - \frac{(1142.88 + 1139.92 + 1141.98 + 1140.61 + 1140.27)^2}{5 \times 5} \\
 &= \frac{6,510,917.466}{5} - \frac{(5705.66)^2}{25} \\
 &= 1.2518
 \end{aligned}$$

ค่าความแปรผันเนื่องจากความคลาดเคลื่อน

$$\begin{aligned}
 SS_E &= 17.1536 - 1.2518 \\
 &= 15.9018
 \end{aligned}$$

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสรุปได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตาราง ANOVA สำหรับข้อมูลในตารางที่ 4.1

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F _o
Factor A	1.2518	4	0.31295	0.3936
Error	15.9018	20	0.79509	
Total	17.1536	24		

จะได้ว่า $F_{0.05;4,20} = 2.8661 > F_o$ จึงสามารถสรุปได้ว่า สารหล่อลื่นไม่มีผลต่อแรงสูงสุดที่ใช้การลากขึ้นรูปด้วยสีเหลี่ยมจัตุรัสของเหล็ก SAPH 440 ที่ได้จากการลากขึ้นรูปที่รัศมีป่าคาย 6 มิลลิเมตร ที่ระดับความมีนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปที่รัศมีป่าคาย 10 มิลลิเมตร

สารหล่อลื่น	แรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูป (kN)					รวม	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
DRAW-359H	219.04	216.96	217.16	218.18	217.39	1088.73	217.746
TDN81	218.32	216.80	217.22	219.07	217.72	1089.13	217.826
MZA30	218.17	217.29	218.13	217.54	217.19	1088.32	217.664
Coconut oil	217.27	216.85	216.42	219.02	217.18	1086.74	217.348
DRAW-756A	218.30	216.77	217.55	219.14	217.98	1089.74	217.948
						ผลรวม	1088.532

ค่าความแปรผันโดยรวม

$$\begin{aligned}
 SS_T &= \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^5 Y_{ij}^2 - \left(\frac{Y_{..}^2}{an} \right) \\
 &= 219.04^2 + 216.96^2 + \dots + 219.14^2 + 217.98^2 - \frac{(219.04 + 216.96 + \dots + 219.14 + 217.98)^2}{5 \times 5} \\
 &= 1,184,916.995 - \frac{(5442.66)^2}{25} \\
 &= 15.07998
 \end{aligned}$$

ค่าความแปรผันเนื่องจากปัจจัย

$$\begin{aligned}
 SS_{ir} &= \sum_{i=1}^4 \frac{Y_{i.}^2}{n} - \left(\frac{Y_{..}^2}{an} \right) \\
 &= \frac{1088.73^2 + 1089.13^2 + 1088.32^2 + 1086.74^2 + 1089.74^2}{5} - \frac{(1088.73 + 1089.13 + 1088.32 + 1086.74 + 1089.74)^2}{5 \times 5} \\
 &= \frac{5,924,514.687}{5} - \frac{(5442.66)^2}{25} \\
 &= 1.02246
 \end{aligned}$$

ค่าความแปรผันเนื่องจากความคลาดเคลื่อน

$$\begin{aligned}
 SS_E &= 15.07998 - 1.02246 \\
 &= 14.05752
 \end{aligned}$$

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสรุปได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตาราง ANOVA สำหรับข้อมูลในตารางที่ 4.3

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F _o
Factor A	1.02246	4	0.255615	0.3637
Error	14.05752	20	0.702876	
Total	15.07998	24		

จะได้ว่า $F_{0.05;4,20} = 2.8661 > F_o$ จึงสามารถสรุปได้ว่า สารหล่อลื่น ไม่มีผลต่อแรงสูงสุดที่ใช้การลากขึ้นรูปด้วยสึ่เหลี่ยมจัตุรัสของเหล็ก SAPH 440 ที่ได้จากการลากขึ้นภาพที่รัศมีป่าดาย 10 มิลลิเมตร ที่ระดับความมีนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองค่าเฉลี่ยความหยาบผิว (Ra) ได้จากการลากชิ้นภาพที่รัศมีปากคาย
6 มิลลิเมตร

สารหล่อลื่น	ค่าเฉลี่ยความเรียบผิว (μm)					รวม Y_i	เฉลี่ย \bar{Y}_i
	1	2	3	4	5		
DRAW-359H	0.360	0.348	0.350	0.353	0.348	1.759	0.352
TDN81	0.333	0.330	0.330	0.333	0.335	1.661	0.332
MZA30	0.320	0.320	0.325	0.320	0.323	1.608	0.323
Coconut oil	0.330	0.330	0.335	0.330	0.333	1.658	0.332
DRAW-756A	0.340	0.343	0.343	0.345	0.338	1.709	0.342
					ผลรวม	8.395	1.681

ค่าความแปรผันโดยรวม

$$\begin{aligned}
 SS_T &= \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{ij}^2 - \left(\frac{Y_{..}^2}{an} \right) \\
 &= 0.360^2 + 0.348^2 + \dots + 0.345^2 + 0.338^2 - \frac{(0.360 + 0.348 + \dots + 0.345 + 0.338)^2}{5 \times 5} \\
 &= 2.8219 - \frac{(8.395)^2}{25} \\
 &= 0.002859
 \end{aligned}$$

ค่าความแปรผันเนื่องจากปัจจัย

$$\begin{aligned}
 SS_{ir} &= \sum_{i=1}^4 \frac{Y_i^2}{n} - \left(\frac{Y_{..}^2}{an} \right) \\
 &= \frac{1.759^2 + 1.661^2 + 1.608^2 + 1.658^2 + 1.709^2}{5} - \frac{(1.759 + 1.661 + 1.608 + 1.658 + 1.709)^2}{5 \times 5} \\
 &= \frac{14.1083}{5} - \frac{(8.395)^2}{25} \\
 &= 0.002619
 \end{aligned}$$

ค่าความแปรผันเนื่องจากความคลาดเคลื่อน

$$SS_E = SS_T - SS_{ir}$$

$$SS_E = 0.002859 - 0.002619$$

$$= 0.00024$$

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสรุปได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตาราง ANOVA สำหรับข้อมูลในตารางที่ 4.5

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F _o
Factor A	0.002619	4	0.00065475	54.563
Error	0.00024	20	0.000012	
Total	0.002859	24		

จะได้ว่า $F_{0.05;4,20} = 2.8661 < F_o$ จึงสามารถสรุปได้ว่า สารหล่อลื่นมีผลต่อความเรียบผิวของถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสของเหล็ก SAPH 440 ที่ได้จากการลากขึ้นภาพที่รัศมีป่าคาย 6 มิลลิเมตร ที่ระดับความมีนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองค่าเฉลี่ยความหยาบผิว (Ra) ได้จากการลากขึ้นภาพที่รัศมีป่าคาย 10 มิลลิเมตร

สารหล่อลื่น	ค่าเฉลี่ยความเรียบผิว (μm)					รวม	เฉลี่ย	
	1	2	3	4	5			Y _i
DRAW-359H	0.203	0.203	0.198	0.205	0.203	1.012	0.203	
TDN81	0.190	0.190	0.198	0.193	0.185	0.956	0.191	
MZA30	0.175	0.170	0.168	0.170	0.173	0.856	0.171	
Coconut oil	0.183	0.180	0.180	0.185	0.188	0.916	0.183	
DRAW-756A	0.183	0.195	0.193	0.193	0.188	0.952	0.190	
						ผลรวม	4.692	0.938

ค่าความแปรผันโดยรวม

$$\begin{aligned}
 SS_T &= \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{ij}^2 - \left(\frac{Y_{..}^2}{an} \right) \\
 &= 0.203^2 + 0.203^2 + \dots + 0.193^2 + 0.188^2 - \frac{(0.203 + 0.203 + \dots + 0.193 + 0.188)^2}{5 \times 5} \\
 &= 0.8835 - \frac{(4.692)^2}{25} \\
 &= 0.002905
 \end{aligned}$$

ค่าความแปรผันเนื่องจากปัจจัย

$$\begin{aligned}
 SS_{tr} &= \sum_{i=1}^4 \frac{Y_i^2}{n} - \left(\frac{Y_{..}^2}{an} \right) \\
 &= \frac{1.012^2 + 0.956^2 + 0.856^2 + 0.916^2 + 0.952^2}{5} - \frac{(1.012 + 0.956 + 0.856 + 0.916 + 0.952)^2}{5 \times 5} \\
 &= \frac{44.162}{5} - \frac{(4.692)^2}{25} \\
 &= 0.002645
 \end{aligned}$$

ค่าความแปรผันเนื่องจากความคลาดเคลื่อน

$$\begin{aligned}
 SS_E &= SS_T - SS_{tr} \\
 SS_E &= 0.002905 - 0.002645 \\
 &= 0.000260
 \end{aligned}$$

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสรุปได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ตาราง ANOVA สำหรับข้อมูลในตารางที่ 4.7

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F ₀
Factor A	0.002645	4	0.0006613	50.869
Error	0.00026	20	0.000013	
Total	0.002905	24		

จะได้ว่า $F_{0.05;4,20} = 2.8661 < F_0$ จึงสามารถสรุปได้ว่า สารหล่อลื่นมีผลต่อความเรียบผิวของถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสของเหล็ก SAPH 440 ที่ได้จากการลากขึ้นภาพที่รัศมีบ่าคาย 10 มิลลิเมตร ที่ระดับความมีนัยสำคัญ 0.05

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้สารหล่อลื่น เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีต่อ แรงในการลากขึ้นรูปลึกและคุณภาพผิวชิ้นงานสำเร็จ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ชนิดของสารหล่อลื่นที่ใช้ จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปและอภิปรายผล

ผลที่ได้จากการดำเนินงานสร้างแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป เป็นไปตามจุดประสงค์ของปริญญานิพนธ์ที่วางไว้ตามแนวทางดังนี้

1. เปรียบเทียบอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูป ความสามารถในการขึ้นรูปสำเร็จ ที่แรงกดยึดแผ่นชิ้นงานของวัสดุคงที่ ที่ 100 kN ชิ้นงานที่ได้จากการทดลองใช้สารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิด ชนิดละ 5 ชิ้น ที่รัศมีบาคาย 10 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร ความสามารถในการขึ้นรูปสำเร็จของชิ้นงานที่ 100%

2. แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปชิ้นงานด้วยรัศมีบาคายขนาดใหญ่จะช่วยลดแรงในการลากขึ้นรูปชิ้นงาน จากการไหลตัวของแผ่นชิ้นงานเข้าไปยังปากคายที่เป็นไปได้สะดวกกว่ารัศมีบาคายขนาดเล็ก และผิวหน้าสัมผัสของแผ่นชิ้นงานกับแผ่นยึดชิ้นงานที่น้อยลงที่ระดับแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานเท่ากันนั้น จะใช้แรงสูงสุดในการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสน้อยกว่า รัศมีบาคายขนาดเล็ก ในทางกลับกันรัศมีบาคายขนาดเล็กจะใช้แรงในการลากขึ้นรูปชิ้นงานสูง

3. สารหล่อลื่นในงานลากขึ้นรูปลึก ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างเหล็กกล้ารีดร้อนกับเหล็กเครื่องมืองานเย็น โดยสารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดสูงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่าสารหล่อลื่นที่มีความหนืดต่ำ

4. สารหล่อลื่นที่มีสารเพิ่มคุณภาพกำมะถันและฟอสฟอรัส ช่วยลดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและสามารถรับแรงกดได้สูง ซึ่งทำให้ป้องกันการสัมผัสระหว่างผิวคูโโลหะได้ดีกว่าน้ำมันหล่อลื่น

ชนิดอื่น ทำให้ผิวชิ้นงานสำเร็จมีความละเอียดเมื่อเทียบวัสดุงานเริ่มต้น เนื่องจากวัสดุชิ้นงานถูกตัดและตัดกลับ ผิวสัมผัสถูกเคลื่อนที่ภายใต้การถูกตัดผ่านรัศมีคาย เมื่อเปรียบเทียบระหว่างรัศมีคายผิวชิ้นงานสำเร็จที่รัศมีคาย 10 มิลลิเมตรจะมีความละเอียดกว่าที่รัศมีคาย 6 มิลลิเมตร

5. สารหล่อลื่นที่มีอิทธิพลในการลากขึ้นรูปเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์ ให้ค่าความหยาบผิวดีที่สุดและความหนาผนังด้วยเกิดการเปลี่ยนแปลงจากเดิมน้อยที่สุด คือ MZA30

6. จากการวัดความหนาของผนังด้วยชิ้นงานทั้งบริเวณผนังด้านตรงและบริเวณมุมกลอง เพื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีการลากขึ้นรูปกลองสี่เหลี่ยมปรากฏว่าชิ้นงานที่ได้จะมีความหนาตรงตามทฤษฎี

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

สามารถนำผลสรุปจากงานวิจัยเพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้สารหล่อลื่นขณะทำการลากขึ้นรูปดัดด้วยสี่เหลี่ยมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ตามมาตรฐาน JIS G 3113 เกรด SAPH 440

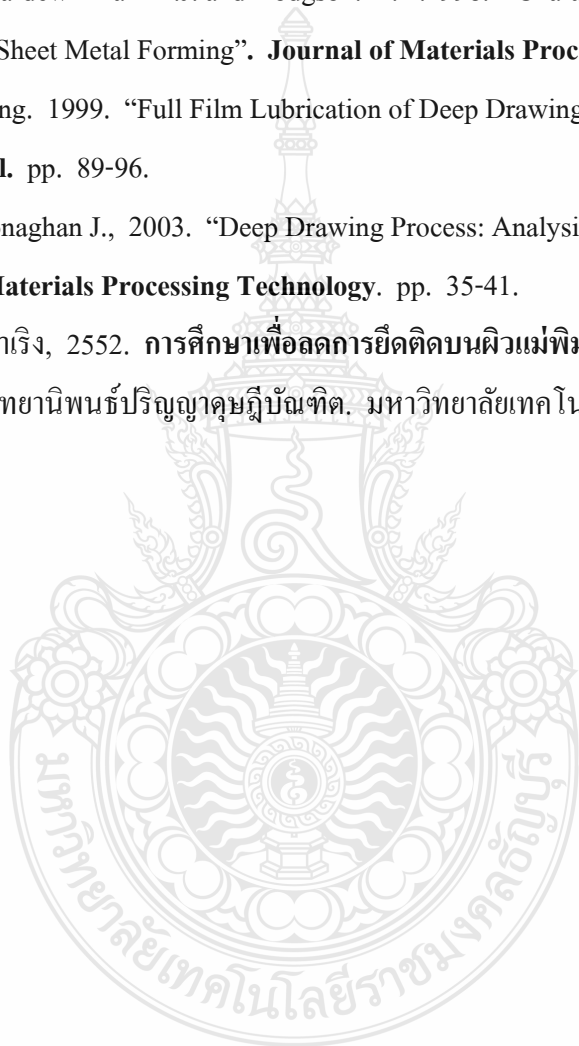
5.3 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องด้วยการทดลองการลากขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิดแล้ว แต่ยังไม่มีการทดลองการลากขึ้นรูปโดยไม่ใช้สารหล่อลื่น ควรจะมีการทดลองทั้งใช้สารหล่อลื่นและไม่ใช้สารหล่อลื่น เพื่อเปรียบเทียบค่าว่าแตกต่างกันอย่างไร
2. ควรที่จะทำการวิจัยที่เกี่ยวกับไดร โบลอยีในการลากขึ้นรูปดัด เพื่อศึกษาว่าสารเพิ่มประสิทธิภาพต่างๆ มีอิทธิพลอย่างไร
3. ควรที่จะทำการวิจัยเกี่ยวกับการใช้แผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีน ในการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

รายการอ้างอิง

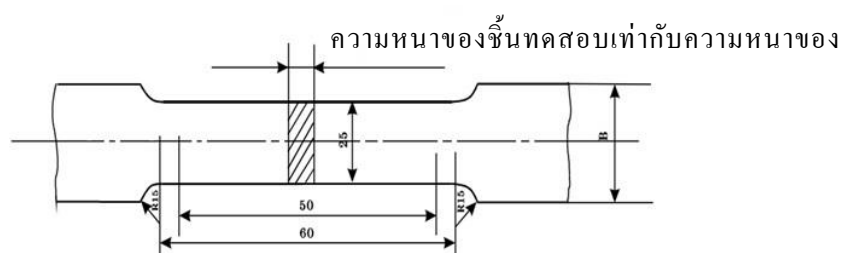
- [1] Eary, D.F., 1974. **Techniques of Press Working Sheet Metal**. Prentice Hall. New Jersey. pp. 101-111.
- [2] ไพฑูรย์ โกวิทยะวงศ์, 2544. การศึกษาอิทธิพลของรัศมีตายในการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 1-207.
- [3] ชาญศักดิ์ ภัทราพรนันท์, 2545. การศึกษาการลากขึ้นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 1 – 60.
- [4] Kurt, L., 1985. **Handbook of Metal forming**. McGraw-Hill. New York. pp. 20.1-20.56.
- [5] Dieter, G.E., 1988. **Mechanical Metallurgy**. SI Metric ed.. McGrawHill. Singapore. pp. 666 - 675.
- [6] เชษฐ อุทธิยัง. 2546. การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการลากขึ้นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้สารหล่อลื่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [7] Swindell, K.C.. and Wainwright, P., 1981. “**Lubrication In Meta-Forming Processes**”. **Sheet Metal Industrial**. pp, 290-295.
- [8] ประเสริฐ เทียนนิมิต,ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์,ปานเพชร ชินินทร, 2541, เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น, 228-245.
- [9] Huang. Y.M., and Cheng. J.W., 1997. “Influence of Lubricant on Limitation of Formability of Cylindrical Cup – Drawing”. **Journal of Materials Processing Technology**. pp. 77 - 82.
- [10] ณัฐ โรจน์กิตติชัย, 2550. การพัฒนาสารหล่อลื่นที่เหมาะสมสำหรับผิวคู่สัมผัสระหว่าง SKD11 และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [11] ศุภเอก ประมูลมาก, 2553. การศึกษาการใช้น้ำมันจากพืชเป็นสารหล่อลื่นในกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

- [12] Frank. R., June 1979. "The Influence of Punch-Die Clearance and Lubrication on The Deep Drawing of PTFE-Coated Aluminium". **Sheet Metal Industrail**. pp. 502-511.
- [13] Ziang. Z.L., and Chen. L.. 1997. "Study of The Friction Characteristics of Lubricants and Their Affecting Factors During Drawing". **Journal of Materials Processing Technology** pp. 144-147.
- [14] Lanzon. J.M., Cardew - Hall M.J. and Hodgson. P.D.1998. "Characterising Frictional BehaviourIn Sheet Metal Forming". **Journal of Materials Processing Technology**. pp.
- [15] Tung - Sheng Yang. 1999. "Full Film Lubrication of Deep Drawing". **Journal of Tribology International**. pp. 89-96.
- [16] Mark O, and Monaghan J., 2003. "Deep Drawing Process: Analysis and Experiment". **Journal of Materials Processing Technology**. pp. 35-41.
- [17] ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเร็จ, 2552. การศึกษาเพื่อลดการยึดติดบนผิวแม่พิมพ์ขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาคุษฎีบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.



ภาคผนวก ก
ตารางแสดงคุณสมบัติของ
เหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์





ภาพที่ ก.1 ชั้นทดสอบความดันแรงดึงและความยืดหมายเลข 5

หมายเหตุ เหล็กแผ่นที่หนามากกว่า 3 มิลลิเมตร ส่วนโค้งจะมีรัศมีเท่ากับ 20 ถึง 30 มิลลิเมตร และมีขนาด B เท่ากับ 30 มิลลิเมตรขึ้นไป

ตารางที่ ก.1 ความดันแรงดึงและความยืดเหล็ก

ชั้นคุณภาพ	ความดันแรงดึงต่ำสุด MPa	ความดันแรงดึงที่จุดครากต่ำสุด			ความยืดต่ำสุด ร้อยละ						
		MPa			ชั้นทดสอบหมายเลข 5						ชั้นทดสอบหมายเลข 1A
		ความหนา	ความหนา	ความหนา	ความหนา	ความหนา	ความหนา	ความหนา	ความหนา	ความหนา	
		น้อยกว่า 6 มม.	ตั้งแต่ 6 มม. ถึงน้อยกว่า 8 มม.	ตั้งแต่ 8 มม. ถึง 14 มม.	น้อยกว่า 2.0 มม.	ตั้งแต่ 2.0 มม. ถึงน้อยกว่า 2.5 มม.	ตั้งแต่ 2.5 มม. ถึงน้อยกว่า 3.15 มม.	ตั้งแต่ 3.15 มม. ถึงน้อยกว่า 4.0 มม.	ตั้งแต่ 4.0 มม. ถึงน้อยกว่า 6.3 มม.	ตั้งแต่ 6.3 มม. ขึ้นไป	
SAPH 310	310	185*	185*	175*	33	34	36	38	40	26	
SAPH 370	370	225	225	215	32	33	35	36	37	25	
SAPH 400	400	255	235	235	31	32	34	35	36	24	
SAPH 440	440	305	295	275	29	30	32	33	34	22	

หมายเหตุ

1. เป็นข้อกำหนดเฉพาะ 3 ชั้นคุณภาพเท่านั้น
2. เตรียมชั้นทดสอบหมายเลข 5

ตารางที่ ก.2 ความต้านแรงดึงเป็นพิเศษเหล็ก SAPH

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงดึงต่ำสุด MPa	ความต้านแรงดึงที่จุดคราก MPa.							
		ความหนา น้อยกว่า 1.60 มม.	ความหนา ตั้งแต่ 1.60 มม. ถึงน้อย กว่า 2.00 มม.	ความหนา ตั้งแต่ 2.00 มม. ถึงน้อย กว่า 2.50 มม.	ความหนา ตั้งแต่ 2.50 มม. ถึงน้อย กว่า 3.20 มม.	ความหนา ตั้งแต่ 3.20 มม. ถึงน้อย กว่า 4.00 มม.	ความหนา ตั้งแต่ 4.00 มม. ถึงน้อย กว่า 6.30 มม.	ความหนา ตั้งแต่ 6.30 มม. ถึงน้อย กว่า 8.00 มม.	ความหนา ตั้งแต่ 8.00 มม. ถึง 14.00 มม.
SAPH 370	370	235 ถึง 355	225 ถึง 345	215 ถึง 335	215 ถึง 335	205 ถึง 325	205 ถึง 325	195 ถึง 315	195 ถึง 315
SAPH 400	400	255 ถึง 375	245 ถึง 365	235 ถึง 355	235 ถึง 355	225 ถึง 345	225 ถึง 345	215 ถึง 335	215 ถึง 335
SAPH 440	440	295 ถึง 410	285 ถึง 400	275 ถึง 390	275 ถึง 390	265 ถึง 380	265 ถึง 380	225 ถึง 370	225 ถึง 370

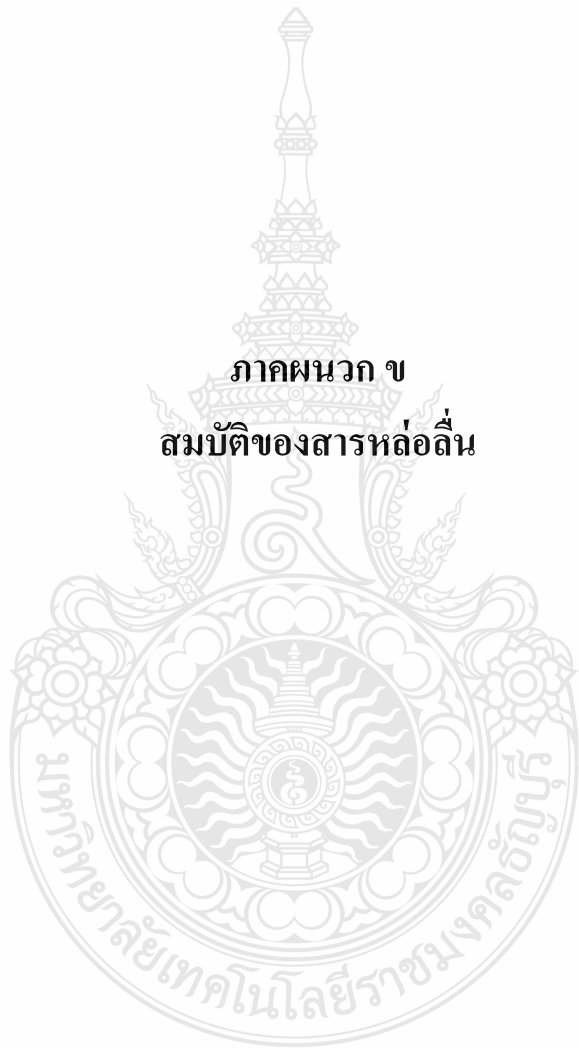
- หมายเหตุ
1. เป็นข้อกำหนดเฉพาะ 3 ชั้นคุณภาพเท่านั้น
 2. เตรียมชิ้นทดสอบหมายเลข 5

ตารางที่ ก.3 ความยึดเป็นพิเศษเหล็ก SAPH

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงดึงต่ำสุด MPa	ความยึดร้อยละ							
		ความหนา น้อยกว่า 1.60 มม.	ความหนา ตั้งแต่ 1.60 มม. ถึงน้อย กว่า 2.00 มม.	ความหนา ตั้งแต่ 2.00 มม. ถึงน้อย กว่า 2.50 มม.	ความหนา ตั้งแต่ 2.50 มม. ถึงน้อย กว่า 3.20 มม.	ความหนา ตั้งแต่ 3.20 มม. ถึงน้อย กว่า 4.00 มม.	ความหนา ตั้งแต่ 4.00 มม. ถึงน้อย กว่า 6.30 มม.	ความหนา ตั้งแต่ 6.30 มม. ถึงน้อยกว่า 8.00 มม.	ความหนา ตั้งแต่ 8.00 มม. ถึง 14.00 มม.
SAPH 370	370	33 ถึง 46	34 ถึง 47	35 ถึง 48	35 ถึง 48	36 ถึง 49	37 ถึง 50	ไม่น้อยกว่า 40	ไม่น้อยกว่า 40
SAPH 400	400	31 ถึง 44	32 ถึง 45	33 ถึง 46	34 ถึง 47	35 ถึง 48	36 ถึง 49	ไม่น้อยกว่า 38	ไม่น้อยกว่า 38
SAPH 440	440	28 ถึง 41	29 ถึง 42	30 ถึง 43	32 ถึง 45	33 ถึง 46	34 ถึง 47	ไม่น้อยกว่า 35	ไม่น้อยกว่า 35

- หมายเหตุ
1. เป็นข้อกำหนดเฉพาะ 3 ชั้นคุณภาพเท่านั้น
 2. เตรียมชิ้นทดสอบหมายเลข 5

ภาคผนวก ข
สมบัติของสารหล่อลื่น



สมบัติของสารหล่อลื่น

1. สารหล่อลื่น ILOFORM TDN 81

เป็นพวก EP (Extreme pressure oil) เป็นน้ำมันผสมไขมัน วิธีการใช้จะไม่ผสมกับน้ำ โดยทาลงบนชิ้นงานที่มีผิวสะอาด ใช้สำหรับเหล็กกล้าโรสนิมและโลหะผสมนิกเกิลสูง สำหรับเหล็กกล้าที่ทำการลากขึ้นรูปลึกได้ยาก เช่น โลหะผสมนิกเกิลโครเมียมสูง ไนโมนิค และไตทานเนียม และจะเหมาะสมกับอุณหภูมิผสมด้วย เมื่อใช้ในงานลากขึ้นรูปลึก จะไม่มีรอยขีดข่วน ง่ายต่อการใช้งานง่ายต่อการทำความสะอาด ทำให้ผิวชิ้นงานหลังขึ้นรูปดีขึ้น

ข้อมูลจำเพาะ ลักษณะน้ำมันจะมีสีใสเหลืองอ่อน

ความหนาแน่น ณ 15.5 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1.190 กรัม/ลูกบาศก์ลิตร

ความหนืด ณ 20 องศาเซลเซียส เท่ากับ 812 มม.²/วินาที

ณ 50 องศาเซลเซียส เท่ากับ 83 มม.²/วินาที

จุดวาบไฟ มากกว่า 177

2. สารหล่อลื่น RENOFORM MZA 30

เป็นสารหล่อลื่นที่ใช้ในงานกดอัด งานดึงท่อ และงานขึ้นรูปโลหะ การใช้งาน ไม่ผสมกับน้ำ สามารถทำความสะอาดได้ง่าย

ข้อมูลจำเพาะ สีเหลืองใส

ความหนาแน่น ที่ 15 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1.105 กรัม/ลูกบาศก์ลิตร

ความหนืด ที่ 20 องศาเซลเซียส เท่ากับ 680 มม.²/วินาที

ที่ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 142 มม.²/วินาที

ที่ 50 องศาเซลเซียส เท่ากับ 76 มม.²/วินาที

จุดวาบไฟ เท่ากับ 230

หมายเหตุ

เหมาะกับงานลากขึ้นรูปที่ง่ายและยาก ส่วนมากใช้กับเหล็กกล้าโรสนิม และยังใช้ในงานสปินนิ่งงานดึงลวด งานดึงขึ้นรูปที่ใช้เหล็กกล้าพิเศษ เช่น ดึงท่อกลวง ดึงท่อตัน ยังใช้ในงานกดอัดงานที่ผ่านการอบอ่อนมาแล้ว การทาสารหล่อลื่นต้องระมัดระวัง โดยทาลงบนผิวงานโดยตลอด และยังสามารถประยุกต์ใช้โดยการฉีดพ่น ลูกกลิ้ง แปรง

3. สารหล่อลื่น HOUGHTO-DRAW 359H

ใช้ในงานลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้า ง่ายในการทำความสะอาดหลังจากใช้งาน การนำไปใช้งานจะใช้เฉพาะสารหล่อลื่นโดยตรงหรือผสมกับน้ำมันแร่ก็ได้ โดยใช้ฟองน้ำแปรง ลูกกลิ้งฉีดพ่น ใช้ในงานลากขึ้นรูปที่ยากสำหรับวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าและเหล็กกล้าไร้สนิม

คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์

ความหนืด ที่ 100 องศาฟาเรนไฮต์หรือ 38 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1100 /วินาที
เป็นสีดำ สีน้ำตาลเหลือง สีอำพัน

ความถ่วงจำเพาะ 1.28

4. สารหล่อลื่น HOUGHTO-DRAW 756-A

เป็นสารสังเคราะห์ (ไม่ใช่ น้ำมันปิโตรเลียม) เจือจางด้วยน้ำสำหรับงานลากขึ้นรูปเป็นลักษณะคล้ายครีมแป้งเปียก เมื่อผสมแล้วจะนำไปทาบริเวณระหว่างชิ้นงานกับคานซึ่งจะเป็นชั้นบางๆ ในงานลากขึ้นรูปสำหรับเหล็กกล้าและเหล็กกล้าไร้สนิม รวมถึงจะใช้ได้ดีในวัสดุอลูมิเนียม ทองแดงทองเหลือง จะไม่ทำให้เปรอะเปื้อนในขณะทำงานและลดรอยขีดข่วน ใช้ในงานลากขึ้นรูปหล่อเย็นในงานตีขึ้นรูป ทำให้เจือจางด้วยน้ำและผสมง่าย โดยใช้น้ำมัน 25 เปอร์เซ็นต์ น้ำ 75 เปอร์เซ็นต์โดยใช้แปรง ฟองน้ำ ลูกกลิ้ง การฉีดพ่น

คุณลักษณะจำเพาะ เป็นสารสังเคราะห์ ใช้ได้กับวัสดุที่เป็นโลหะและโลหะ
การทำความสะอาดจะยากเมื่อสารหล่อลื่นแห้งตัว

คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ ลักษณะสีขาว สีครีมแป้งเปียก
ความถ่วงจำเพาะ 1.10

5. น้ำมันมะพร้าว

เป็นน้ำมันพืช มีสีเหลือง ใช้ในงานลากขึ้นรูปเหล็กกล้าและเหล็กกล้าไร้สนิม การนำไปใช้งานจะใช้สารหล่อลื่นโดยตรง ไม่ผสมกับน้ำ เป็นน้ำมันที่มีราคาถูกมาก

ความหนืด ที่ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 40 มม.²/วินาที
ที่ 100 องศาเซลเซียส เท่ากับ 8 มม.²/วินาที

ตารางที่ ข 1 สมบัติของสารหล่อลื่น

	DRAW 359H	TDN 81	MZA 30	COCONUT OIL	DRAW 756A
ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส (cSt)	598.64	164.35	141.15	40.61	-
ความหนืดที่ 100 องศาเซลเซียส (cSt)	30.62	10.80	12.63	8.200	-
ดัชนีความหนืด	74	6	76	182	-
จุดวาบไฟ (องศาฟาเรนไฮต์)	204	-	240	-	-
สี	ดำน้ำตาล	เหลือง	เหลือง	เหลือง	ขาว
ตัวเลขความเป็นกลาง	5.2865	0.1699	0.1373	10.1172	-

ตารางที่ ข 2 ราคาของสารหล่อลื่น

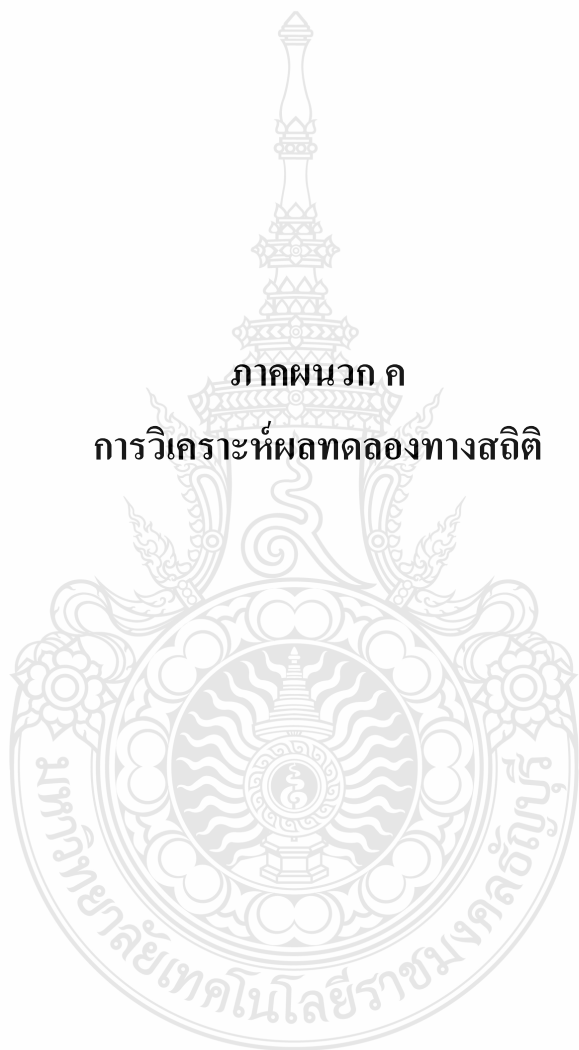
ราคาสารหล่อลื่น	ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)
1. น้ำมัน TDN 81	122.45
2. น้ำมัน DRAW 359H	170
3. น้ำมัน MZA 30	165
4. น้ำมัน DRAW 756A	132.5
5. น้ำมันมะพร้าว	29.03

ตารางที่ ข 3. สารเพิ่มคุณภาพในสารหล่อลื่น (หน่วย พีพีเอ็ม)

	Phosphorus (P) ppm.	Zinc (Zn) ppm.	Magnesium (Mg) ppm.	Calcium (Ca) ppm.	Sulphur (S) ppm.
TDN81	N.D	2.9	6.31	18.4	0.419
MZA30	186.9	8.23	9.11	924.9	0.479
DRAW359H	N.D	69.84	9.22	1634	1.159
DRAW756A	N.D	N.D	N.D	N.D	0.027
COCONUT OIL	N.D	2.95	8.28	24.42	0.008

หมายเหตุ: N.D. ไม่มีส่วนผสมนี้ในตัวอย่างน้ำมันที่ทดสอบ

ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์ผลทดลองทางสถิติ



การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลอง

ในการทดสอบสมมติฐานของข้อมูลจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยใช้ตารางอะโนวา (ANOVA) ในการเปรียบเทียบความแปรปรวนของผลการทดลอง ใช้วิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรในการลากขึ้นรูปที่ศึกษาคือ ชนิดสารหล่อลื่นซึ่งจะให้ข้อดีคือลดระดับความมีนัยสำคัญในการปฏิเสธสมมติฐาน ซึ่งจะส่งผลดีต่อการตัดสินใจ การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาอิทธิพลของตัวแปรหลักและตัวแปรร่วม ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ค.1 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลอง

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F_o
Factor A	SS_A	$(a-1)$	$MS_A = SS_A / (a-1)$	$F_o = MS_A / MS_E$
Error	SS_E	$a(n-1)$	$MS_E = SS_E / a(n-1)$	
Total	SS_T	$an - 1$		

กำหนดให้

$$SS_A = 1/n \sum Y_i^2 - Y^2 \text{ (เฉลี่ย)}/N \quad (\text{ค.1})$$

$$SS_T = \sum \sum Y^2 - Y^2 \text{ (เฉลี่ย)}/N \quad (\text{ค.2})$$

$$SS_E = SS_T - SS_A \quad (\text{ค.3})$$

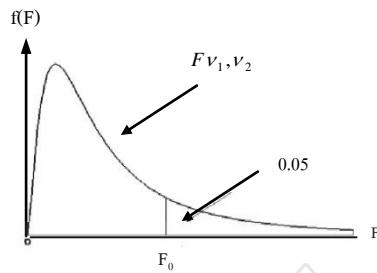
จากสมการข้างต้นนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลได้ดังนี้คือ

ถ้า $F_o > F_{\alpha, (a-1), a(n-1)}$ จะแสดงว่าปัจจัยที่พิจารณามีผลอย่างมีนัยสำคัญ

ถ้า $F_o < F_{\alpha, (a-1), a(n-1)}$ จะแสดงว่าปัจจัยที่พิจารณาไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ

โดยที่ค่า $F_{\alpha, (a-1), a(n-1)}$ จะสามารถหาค่าได้จากตารางค่าของ F ภายใต้ค่าความน่าจะเป็น 0.05 จากตาราง ค.1

ตารางที่ ค.2 ตารางค่าวิกฤตการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบ F ที่ $\alpha = 0.05$



V1 \ V2	DF ของตัวตั้ง: V ₁																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	243.91	245.95	248.01	249.05	250.10	251.14	252.20	253.25	254.31
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.37
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

ภาคผนวก ง
ตารางและกราฟแสดงค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูป

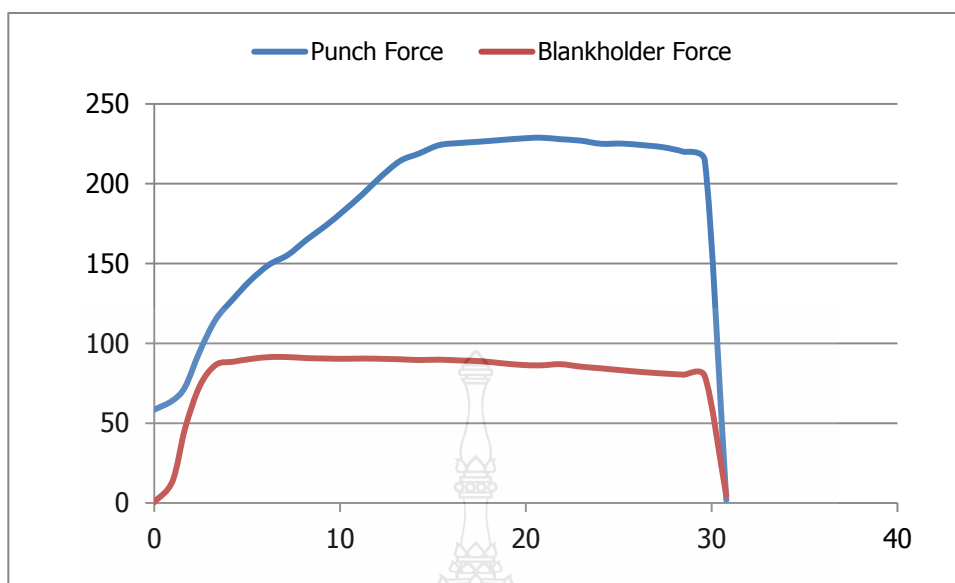


ตารางที่ ง.1 แรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูปลึก ขนาด R 6

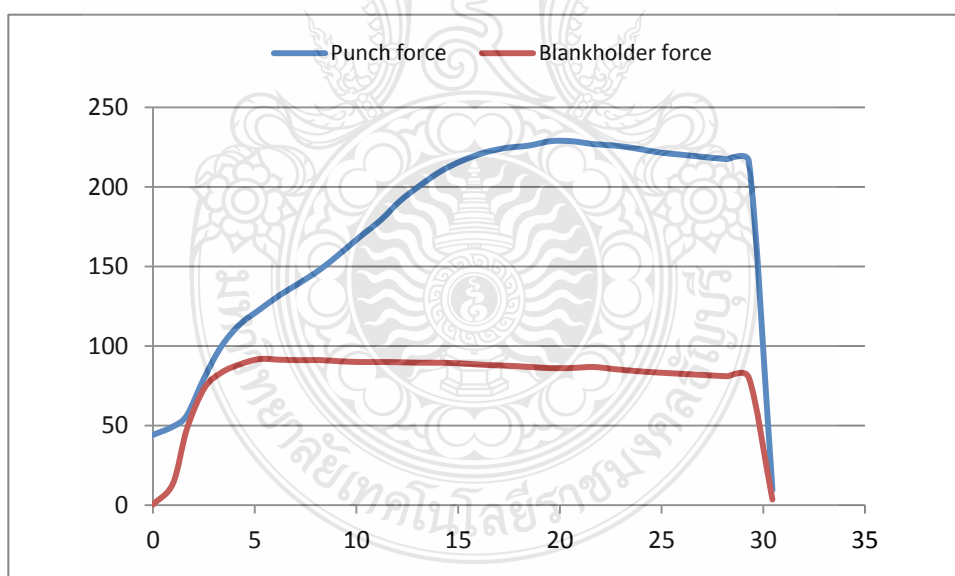
สารหล่อลื่น	แรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูปลึก					
	1	2	3	4	5	Y (เฉลี่ย)
DRAW359H	228.71	229.10	227.88	228.35	228.84	228.576
TDN81	229.09	228.75	226.86	227.58	227.64	227.984
MZA30	229.12	228.56	228.47	228.51	227.32	228.396
COCONUT OIL	227.39	228.62	226.84	227.98	229.78	228.122
DRAW756A	229.43	227.43	226.65	228.02	228.74	228.054

ตารางที่ ง. 2 แรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูปลึก ขนาด R 10

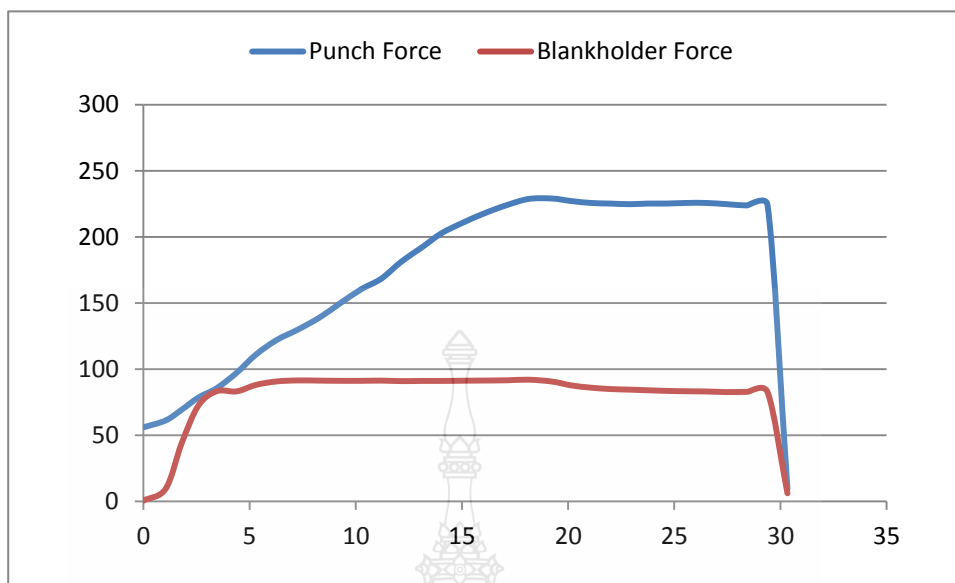
สารหล่อลื่น	แรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูปลึก					
	1	2	3	4	5	Y (เฉลี่ย)
DRAW359H	219.04	216.96	217.16	218.18	217.39	217.746
TDN81	218.32	216.80	217.22	219.07	217.72	217.826
MZA30	218.17	217.29	218.13	217.54	217.19	217.664
COCONUT OIL	217.27	216.85	216.42	219.02	217.18	217.348
DRAW756A	218.30	216.77	217.55	219.14	217.98	217.948



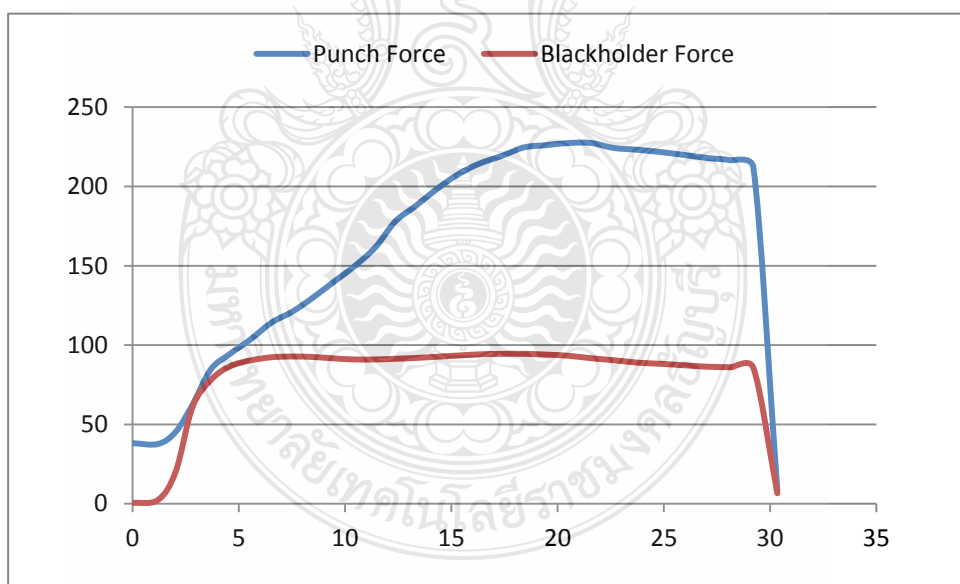
ภาพที่ ง. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการลากขึ้นรูปลึงก์และแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานกับระยะทางการเคลื่อนที่ของพunch กรณีใช้สารหล่อลื่น DRAW359H ขนาดรัศมีบ่าตาย 6 มม.



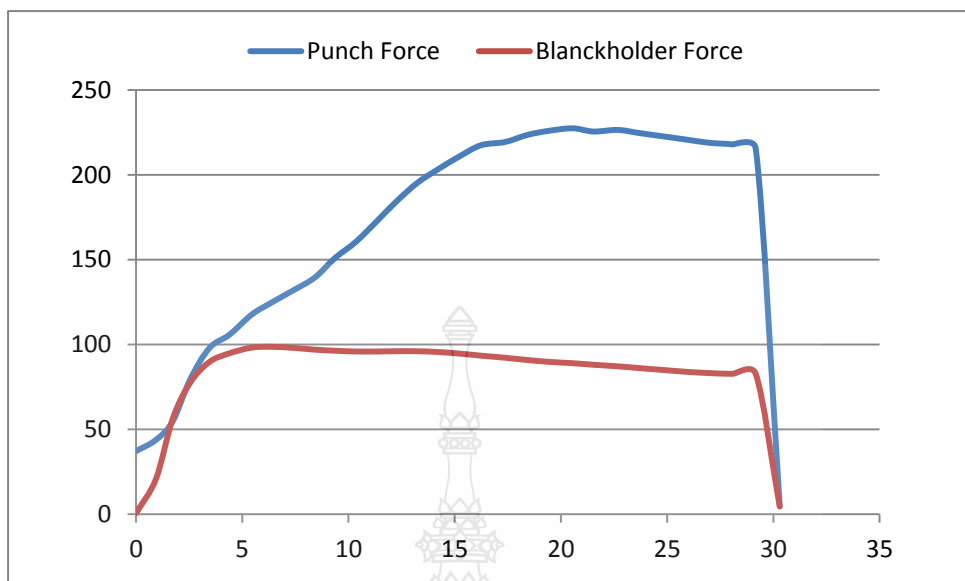
ภาพที่ ง. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการลากขึ้นรูปลึงก์และแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานกับระยะทางการเคลื่อนที่ของพunch กรณีใช้สารหล่อลื่น TDN 81 ขนาดรัศมีบ่าตาย 6 มม.



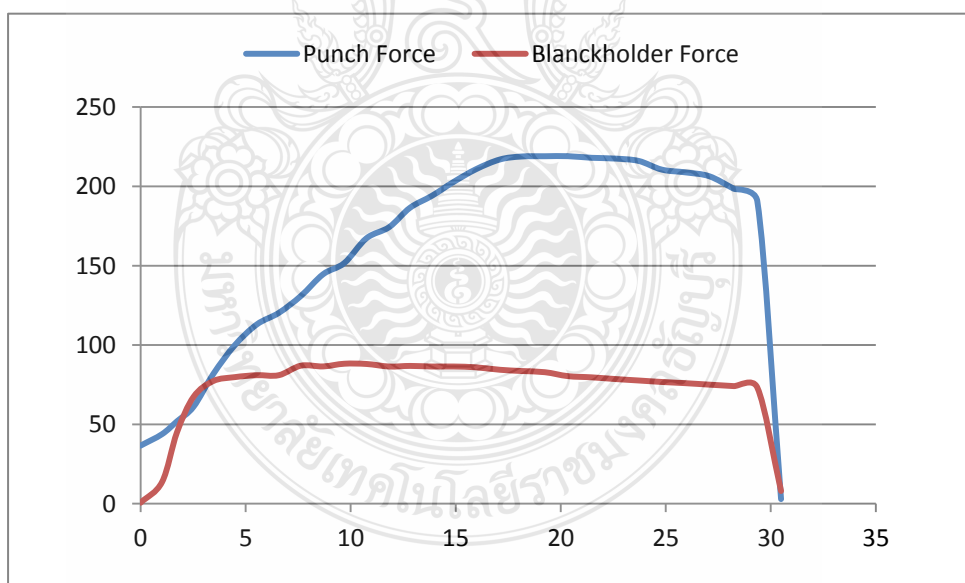
ภาพที่ ง. 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการลากขึ้นรูปลึกและแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานกับระยะทางการเคลื่อนที่ของ 펀ช์ กรณีใช้สารหล่อลื่น MZA 30 ขนาดรัศมีบ่าตาย 6 มม.



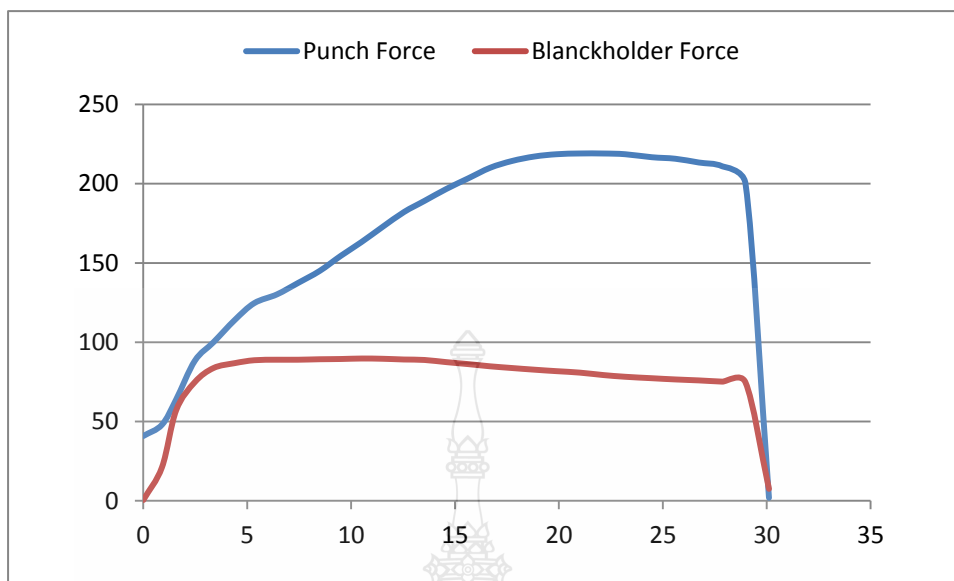
ภาพที่ ง. 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการลากขึ้นรูปลึกและแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานกับระยะทางการเคลื่อนที่ของ 펀ช์ กรณีใช้สารหล่อลื่น น้ำมันมะพร้าว ขนาดรัศมีบ่าตาย 6 มม.



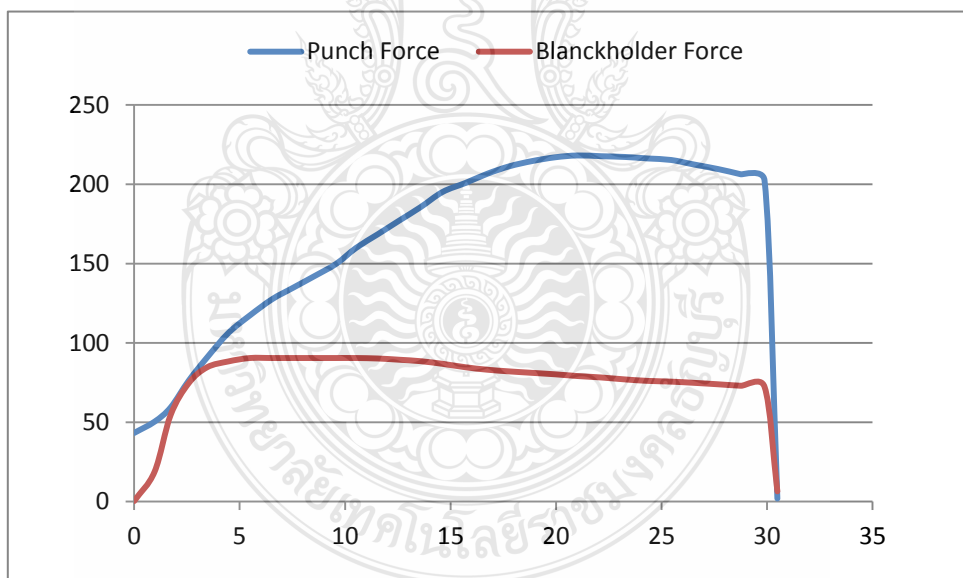
ภาพที่ ๕.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการลากขึ้นรูปลึงและแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานกับระยะทางการเคลื่อนที่ของพunch กรณีใช้สารหล่อลื่น DRAW756A ขนาดรัศมีปาดาย 6 มม.



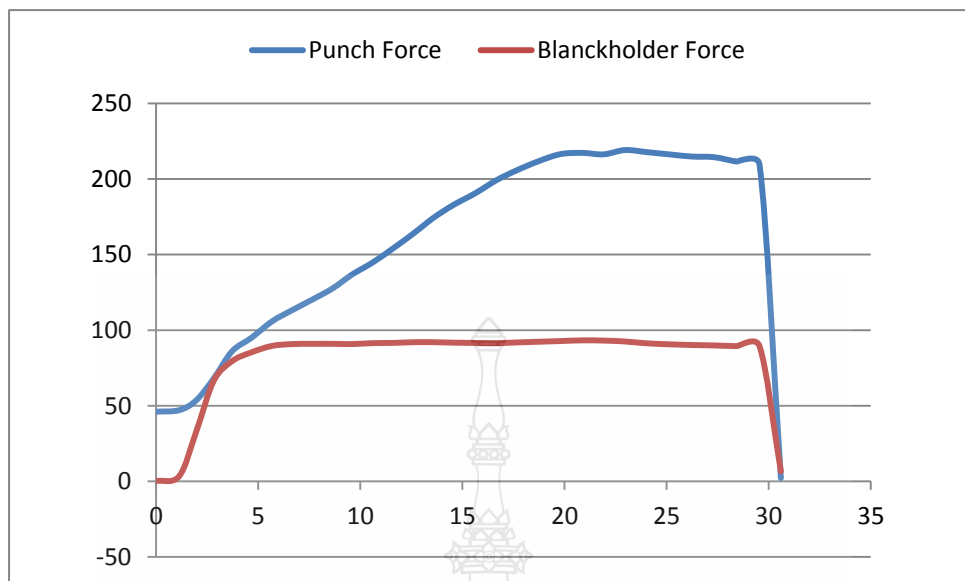
ภาพที่ ๕.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการลากขึ้นรูปลึงและแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานกับระยะทางการเคลื่อนที่ของพunch กรณีใช้สารหล่อลื่น DRAW359H ขนาดรัศมีปาดาย 10 มม.



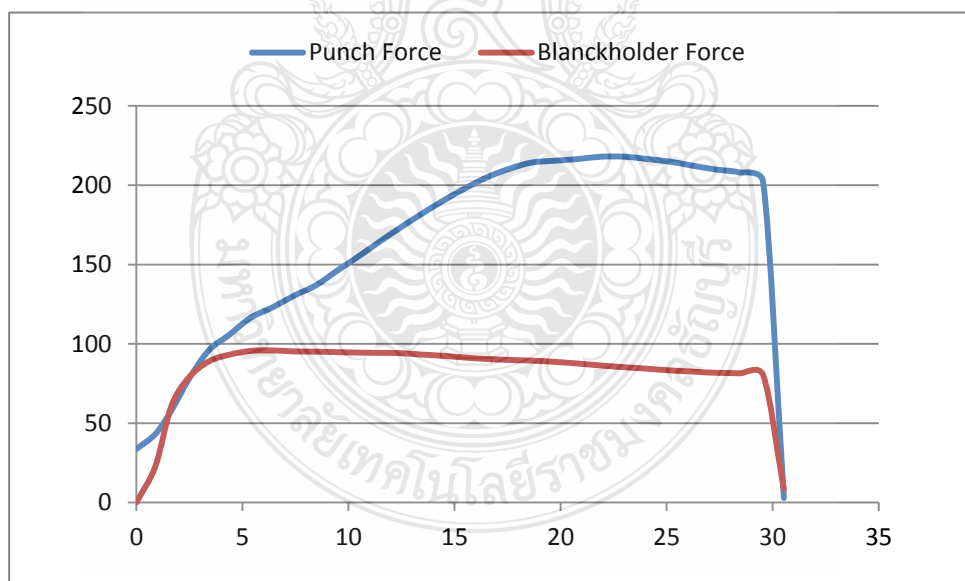
ภาพที่ ง.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการลากขึ้นรูปลิกและแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานกับระยะทางการเคลื่อนที่ของพunch กรณีใช้สารหล่อลื่น TDN81 ขนาดรัศมีบ่าคาย 10 มม.



ภาพที่ ง.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการลากขึ้นรูปลิกและแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานกับระยะทางการเคลื่อนที่ของพunch กรณีใช้สารหล่อลื่น MZA30 ขนาดรัศมีบ่าคาย 10 มม.



ภาพที่ ๙.๙ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการลากขึ้นรูปดัดและแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานกับระยะทางการเคลื่อนที่ของ 펀ช์ กรณีใช้สารหล่อลื่น น้ำมันมะพร้าว ขนาดครีมีป่าคาย 10 มม.



ภาพที่ ๙.๑๐ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการลากขึ้นรูปดัดและแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานกับระยะทางการเคลื่อนที่ของ 펀ช์ กรณีใช้สารหล่อลื่น DRAW756A ขนาดครีมีป่าคาย 10 มม.

ภาคผนวก จ
ค่าความหยابผิวบริเวณผิวนอกชิ้นงาน



รัศมีป่าด้าย 6 มิลลิเมตร

ตารางที่ จ.1 ค่าความเรียบผิว (Ra : μm) ของผิวถ้วยด้านนอกโดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมัน DRAW-359H

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	0.41	0.32	0.33	0.38	0.360
2	0.39	0.32	0.31	0.37	0.348
3	0.39	0.33	0.31	0.37	0.350
4	0.40	0.30	0.32	0.39	0.353
5	0.38	0.31	0.32	0.38	0.348
				ค่าเฉลี่ยรวม	0.352

ตารางที่ จ.2 ค่าความเรียบผิว (Ra : μm) ของผิวถ้วยด้านนอกโดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมัน TDN81

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	0.35	0.31	0.33	0.34	0.333
2	0.36	0.33	0.30	0.33	0.330
3	0.33	0.31	0.32	0.36	0.330
4	0.35	0.29	0.33	0.36	0.333
5	0.34	0.31	0.32	0.37	0.335
				ค่าเฉลี่ยรวม	0.332

ตารางที่ จ.3 ค่าความเรียบผิว ($R_a : \mu\text{m}$) ของผิวถ้วยด้านนอกโดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมัน MZA30

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	0.34	0.29	0.31	0.34	0.320
2	0.35	0.31	0.28	0.34	0.320
3	0.36	0.30	0.29	0.35	0.325
4	0.35	0.31	0.29	0.33	0.320
5	0.34	0.31	0.30	0.34	0.323
ค่าเฉลี่ยรวม					0.323

ตารางที่ จ.4 ค่าความเรียบผิว ($R_a : \mu\text{m}$) ของผิวถ้วยด้านนอกโดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	0.35	0.30	0.31	0.36	0.330
2	0.37	0.28	0.33	0.34	0.330
3	0.35	0.32	0.32	0.35	0.335
4	0.36	0.30	0.30	0.36	0.330
5	0.36	0.31	0.30	0.36	0.333
ค่าเฉลี่ยรวม					0.332

ตารางที่ จ.5 ค่าความเรียบผิว ($R_a : \mu\text{m}$) ของผิวถ้วยด้านนอกโดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมัน DRAW-756A

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	0.36	0.32	0.33	0.35	0.340
2	0.35	0.33	0.32	0.37	0.343
3	0.35	0.32	0.34	0.36	0.343
4	0.37	0.33	0.33	0.35	0.345
5	0.36	0.32	0.31	0.36	0.338
				ค่าเฉลี่ยรวม	0.342

ตารางที่ จ.6 ค่าความเรียบผิวที่ช่วงจุดยอดผิวสูงสุดกับจุดท้องคลื่น ($R_t : \mu\text{m}$) ของผิวถ้วยด้านนอกโดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมัน DRAW-359H

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	3.1	2.6	2.5	2.8	2.75
2	3.0	2.8	2.5	2.6	2.73
3	2.9	2.9	2.2	2.9	2.73
4	3.1	2.8	2.6	2.7	2.80
5	3.0	2.9	2.3	2.7	2.75
				ค่าเฉลี่ยรวม	2.75

ตารางที่ จ.7 ค่าความเรียบผิวที่ช่วงจุดยอดผิวสูงสุดกับจุดท้องคลื่น ($R_t : \mu\text{m}$) ของผิวถ้วยด้านนอก โดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมัน TDN81

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	3.0	2.5	2.5	2.9	2.73
2	3.0	2.7	2.2	3.0	2.73
3	2.9	2.6	2.5	2.8	2.70
4	2.9	2.4	2.6	2.9	2.70
5	3.4	2.3	2.3	2.9	2.73
				ค่าเฉลี่ยรวม	2.72

ตารางที่ จ.8 ค่าความเรียบผิวที่ช่วงจุดยอดผิวสูงสุดกับจุดท้องคลื่น ($R_t : \mu\text{m}$) ของผิวถ้วยด้านนอก โดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมัน MZA30

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	2.4	2.1	2.2	2.5	2.30
2	2.4	2.0	2.1	2.7	2.30
3	2.6	2.0	2.2	2.6	2.35
4	2.3	2.2	2.1	2.9	2.38
5	2.5	2.2	2.1	2.5	2.33
				ค่าเฉลี่ยรวม	2.33

ตารางที่ จ.9 ค่าความเรียบผิวที่ช่วงจุดยอดผิวสูงสุดกับจุดท้องคลื่น ($R_t : \mu\text{m}$) ของผิวถ้วยด้านนอก โดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	3.0	2.4	2.5	2.9	2.70
2	3.3	2.6	2.3	2.9	2.78
3	3.1	2.5	2.2	3.0	2.70
4	3.2	2.2	2.4	3.1	2.73
5	3.2	2.3	2.4	3.0	2.73
ค่าเฉลี่ยรวม					2.73

ตารางที่ จ.10 ค่าความเรียบผิวที่ช่วงจุดยอดผิวสูงสุดกับจุดท้องคลื่น ($R_t : \mu\text{m}$) ของผิวถ้วยด้านนอก โดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมัน DRAW-756A

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	2.4	2.1	2.3	2.4	2.30
2	2.6	2.2	2.0	2.5	2.33
3	2.4	1.9	2.3	2.4	2.25
4	2.4	2.1	2.1	2.8	2.35
5	2.7	2.1	2.0	2.4	2.30
ค่าเฉลี่ยรวม					2.31

รัศมีปาดาย 10 มิลลิเมตร

ตารางที่ จ.11 ค่าความเรียบผิว ($R_a : \mu\text{m}$) ของผิวถ้วยด้านนอกโดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมัน

DRAW-359H

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	0.23	0.19	0.18	0.21	0.203
2	0.26	0.20	0.17	0.19	0.205
3	0.22	0.17	0.19	0.21	0.198
4	0.26	0.18	0.19	0.19	0.205
5	0.24	0.18	0.19	0.20	0.203
ค่าเฉลี่ยรวม					0.203

ตารางที่ จ.12 ค่าความเรียบผิว ($R_a : \mu\text{m}$) ของผิวถ้วยด้านนอกโดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมัน TDN81

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	0.20	0.16	0.21	0.19	0.190
2	0.17	0.19	0.20	0.20	0.190
3	0.22	0.23	0.16	0.18	0.198
4	0.18	0.19	0.18	0.22	0.193
5	0.20	0.17	0.19	0.18	0.185
ค่าเฉลี่ยรวม					0.191

ตารางที่ จ.13 ค่าความเรียบผิว ($R_a : \mu\text{m}$) ของผิวถ้วยด้านนอกโดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมัน MZA30

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	0.22	0.17	0.16	0.18	0.183
2	0.17	0.16	0.19	0.20	0.180
3	0.23	0.15	0.16	0.18	0.180
4	0.24	0.17	0.14	0.19	0.185
5	0.25	0.16	0.17	0.17	0.188
ค่าเฉลี่ยรวม					0.183

ตารางที่ จ.14 ค่าความเรียบผิว ($R_a : \mu\text{m}$) ของผิวถ้วยด้านนอกโดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	0.18	0.16	0.18	0.18	0.175
2	0.18	0.16	0.17	0.17	0.170
3	0.18	0.15	0.18	0.16	0.168
4	0.18	0.16	0.17	0.17	0.170
5	0.18	0.16	0.17	0.18	0.173
ค่าเฉลี่ยรวม					0.171

ตารางที่ จ.15 ค่าความเรียบผิว ($R_a : \mu\text{m}$) ของผิวถ้วยด้านนอกโดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมัน

DRAW-756A

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	0.20	0.16	0.15	0.22	0.183
2	0.22	0.17	0.16	0.23	0.195
3	0.23	0.17	0.19	0.18	0.193
4	0.22	0.18	0.17	0.20	0.193
5	0.20	0.20	0.17	0.18	0.188
ค่าเฉลี่ยรวม					0.190

ตารางที่ จ.16 ค่าความเรียบผิวที่ช่วงจุดยอดผิวสูงสุดกับจุดท้องคลื่น ($R_t : \mu\text{m}$) ของผิวถ้วยด้านนอกโดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมัน DRAW-359H

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	3.2	2.2	2.4	2.7	2.63
2	3.2	2.1	2.4	2.6	2.57
3	3.1	2.3	2.5	2.9	2.70
4	3.3	2.1	2.4	3.0	2.70
5	3.2	2.3	2.5	2.7	2.68
ค่าเฉลี่ยรวม					2.67

ตารางที่ จ.17 ค่าความเรียบผิวที่ช่วงจุดยอดผิวสูงสุดกับจุดท้องคลื่น ($R_t : \mu\text{m}$) ของผิวถ้วยด้านนอก โดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมัน TDN81

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	2.3	2.0	2.1	2.2	2.15
2	2.2	1.9	2.1	2.3	2.13
3	2.2	2.0	2.2	2.3	2.18
4	2.3	1.9	2.1	2.3	2.15
5	2.2	2.0	2.3	2.3	2.20
ค่าเฉลี่ยรวม					2.16

ตารางที่ จ.18 ค่าความเรียบผิวที่ช่วงจุดยอดผิวสูงสุดกับจุดท้องคลื่น ($R_t : \mu\text{m}$) ของผิวถ้วยด้านนอก โดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมัน MZA30

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	2.3	1.9	2.0	2.1	2.08
2	1.8	1.9	2.1	1.9	1.93
3	2.2	2.1	1.9	2.0	2.05
4	2.0	1.9	2.0	2.3	2.05
5	1.9	2.1	2.0	1.9	1.98
ค่าเฉลี่ยรวม					2.02

ตารางที่ จ.19 ค่าความเรียบผิวที่ช่วงจุดยอดผิวสูงสุดกับจุดท้องคลื่น ($R_t : \mu\text{m}$) ของผิวด้วยด้านนอก โดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	1.9	1.6	3.4	2.4	2.33
2	2.1	1.7	3.1	2.3	2.30
3	2.1	1.8	3.1	2.3	2.33
4	2.3	1.7	3.1	2.4	2.38
5	1.9	1.8	3.3	2.5	2.38
ค่าเฉลี่ยรวม					2.34

ตารางที่ จ.20 ค่าความเรียบผิวที่ช่วงจุดยอดผิวสูงสุดกับจุดท้องคลื่น ($R_t : \mu\text{m}$) ของผิวด้วยด้านนอก โดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมัน DRAW-756A

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 (μm)	ตำแหน่งที่ 2 (μm)	ตำแหน่งที่ 3 (μm)	ตำแหน่งที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	2.2	2.5	2.0	2.3	2.25
2	2.3	2.5	1.9	2.2	2.23
3	2.6	2.3	1.9	2.4	2.30
4	2.0	2.3	2.1	2.3	2.18
5	2.3	2.6	1.9	2.2	2.25
ค่าเฉลี่ยรวม					2.24

ภาคผนวก ฉ
ผลงานตีพิมพ์และเผยแพร่





สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศรีปทุม
 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
 ขอเรียนเชิญเข้าร่วมการสัมมนา

IE Network Conference 2012

การประชุมวิชาการสายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2555
 17 - 19 ตุลาคม 2555 ณ โรงแรมเมธาวลัย ชะอำ อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี

สาขาวิชาในการประชุม

1. Operations Research
2. Production and Operation Management
3. Work Study, Plant Layout, Safety Engineering and Ergonomics
4. Quality Management and Statistical Applications
5. Energy and Environmental Management
6. Materials, Production, and Manufacturing Engineering
7. Logistics and Supply Chain Management
8. Innovation Management and Industrial Technology Transfer
9. Maintenance Management
10. Engineering Economy and Cost Management
11. Others that Related to Industrial Engineering
12. Special Topic: ASEAN Economic Community

กำหนดการสำคัญ

เปิดรับบทคัดย่อ	14 ก.พ. - 30 เม.ย. 55
ประกาศผลพิจารณาบทคัดย่อ	14 พ.ค. 55
วันสุดท้ายของการส่งบทความฉบับสมบูรณ์	30 มิ.ย. 55
ประกาศผลพิจารณาบทความฉบับสมบูรณ์	31 ก.ค. 55
วันสุดท้ายของการส่งบทความฉบับแก้ไข	31 ส.ค. 55
การลงทะเบียนล่วงหน้า	1 ก.ค. - 31 ส.ค. 55
ประชุมวิชาการ	17-19 ต.ค. 55



คณะกรรมการอำนวยการ

ศ.ดร. สุวัฒน์ งามราชวงศ์, ศ.ดร.ลัดดา มณีศรี

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศรีปทุม

โทรศัพท์: 0-2579-1111x1316 และ x2177 โทรสาร: 0-2579-1111x2147

เว็บไซต์: <http://ienetwork2012.spu.ac.th> อีเมล: ienetwork2012@spu.ac.th



การประชุมวิชาการย้ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555

17-19 ตุลาคม 2555 ชะอำ เพชรบุรี

หลักการและเหตุผล

ย้ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม เป็นองค์กรที่จัดตั้งขึ้นเมื่อเดือนตุลาคม 2525 เพื่อสร้างความร่วมมือด้านวิชาการ การแสดงผลงานความก้าวหน้าและแลกเปลี่ยนความรู้ทางวิศวกรรมอุตสาหกรรมและสาขา อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องของ คณาจารย์และบุคลากรจากสถาบันการศึกษาและหน่วยงานองค์กร ต่างๆ เป็นประจำทุกปี โดยในปี พ.ศ.2555 ซึ่งครบรอบ 12 ปี แห่งการก่อตั้งสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม สาขาฯ ได้รับเกียรติเป็นประธานจัดงานประชุมวิชาการย้ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม (IE Network Conference 2012) ร่วมกับ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ภายใต้หัวข้อ “Industrial Challenges in the ASEAN Economic Community” เพื่อเป็นการรองรับการเข้าสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน 2558 (ASEAN Economic Community 2015) และตอบสนองต่อแผนระยะยาวของมหาวิทยาลัยศรีปทุมในการเป็นส่วนหนึ่งของการเตรียมความพร้อมด้านการศึกษามีต่อ AEC ระหว่างวันที่ 17-19 ตุลาคม 2555





กลุ่มที่ 6 Materials, Production, and Manufacturing Engineering (ต่อ)

MPM051	การพัฒนาเครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 50,000 นิวตัน เสชา สุขมา* เอกสิทธิ์ ชินทรภูมิ ประภวศ หงษาชาติ สมบัติ มุกดา	1447
MPM052	การวิเคราะห์ความแข็งแรงของเครื่องทดสอบแรงดึงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เสชา สุขมา* สมบัติ มุกดา เอกสิทธิ์ ชินทรภูมิ ศิวพงษ์ สัมพทาภิวัฒน์	1453
MPM053	ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของสารยับยั้งการกัดกร่อน โพตัสเซียม โนนาโนเอต บนเหล็กกล้าคาร์บอน นศรินทร์ ศรีสุวรรณ* ณรงค์ มีงวิวัฒน์ ฤทธิพงษ์ เกียรติเสถียรกุล	1460
MPM054	การศึกษาประสิทธิภาพของสารหล่อลื่นในงานลากชิ้นรูปด้วยดีเซลิมจัตุรัสแบบมีปีก สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง บัญญัติ วงศ์ศรีทา* บุญเรือง เบ็ญศิริ ไพศาล เลี่ยมมี ชวิชัย แก้วศรีใส ชวลา วรณเดธี กุศลชาติ จุฑาเพ็ญ	1469
MPM055	การลดของเสียในกระบวนการเชื่อมภายในแผนก Welding กรณีศึกษา : โรงงานผลิตคอมเพรสเซอร์ อุษาวดี อินทร์คล้าย	1475
MPM056	การศึกษาลักษณะความเครียดบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ในการลากชิ้นรูป ด้วยกระบวนการไฮดรอลิคนามิก สุริยา น้าแก้ว* ศวิชัย ค้อสกุล	1481
MPM057	การระบุชนิดของเหล็กกล้าโดยการทดสอบประกายไฟด้วยภาพถ่ายเคลื่อนไหว ประเสริฐ เจริญประคับ* สมนึก วิวัฒน์ศรีกุล ประมุข เจนภักดิ์ยงค์	1488
MPM058	การปรับปรุงกระบวนการผลิตข้าวแค้นด้วยเครื่องโรยนา ชัยวัฒน์ กิตติเสชา* อภิชาติ ชัยกลาง	1494
MPM059	การเพิ่มค่าความหนาของพลาสติกโพลีเอทีเอ็น เทอร์สเฟสเทส โดยใช้วิธีโพลีเมอไรเซชันแบบเฟสของแข็ง ชวิชัยวิมาน ทวานดี* พิชัยกมล แววจเจริญ สมกฤษ เล็กสกุล ปราชธนา รุ่งโรจน์ สุริยา ศุ่ยวง	1500
MPM060	การออกแบบและสร้างเครื่องเชื่อมเสียบทาน กฤษณ ทองศรี* ศวิชัย ค้อสกุล สุมาเอก ประมุขมามาก	1508



การประชุมวิชาการข่างานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2555
17-19 ตุลาคม 2555 ธานี เพชรบุรี

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ การประชุมวิชาการข่างานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2555

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูตีมา

รองศาสตราจารย์จิรพัฒน์ เมาประเสริฐวงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศาริษา สุธีวงศ์.

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนกีสรวงศ์ โอสถศิลป์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ เรียวเคชะ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมภรณ์ไพศาล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตเจริณ

อาจารย์สุพงษ์ ศิริกุลวัฒนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล สุธีจาร์วัฒน์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริง ปริธานนท์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประเสริฐ อัครประดมพงศ์

อาจารย์ ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย

อาจารย์ ดร.ไพโรจน์ ตตาวิจิตรกุล

อาจารย์ภูมิ เทสิตจามิกร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อาจารย์ ดร.ปุตต์เมธี ศัจจกมล

อาจารย์ ดร.พัชรี โคนแก้ว ทองรัตน์

อาจารย์ ดร.รมิตายุ อยู่สุข

อาจารย์ ดร.ศุภาวิณี วงศ์วิระเกียรติ

อาจารย์ ดร.สุวิมลภรณ์ วิชกุล

อาจารย์ ดร.ไอลดา ศรีวิศิตไทรกุล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

อาจารย์ฉลน ชัยมณี

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

อาจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง

อาจารย์ ดร.ณัฐวิภา จันทศรี

อาจารย์ ดร.เพ็ญสุตา พันฤทธิ์คำ

อาจารย์นันทวัฒน์ ศรีอริยวัฒน์

อาจารย์ ดร.ศิริทัศน์ หนึ่งเวฒินชกุล

อาจารย์ ดร.สิริรงค์ ก้อนคำสอน

อาจารย์อัครินทร์ ก้อนแก้ว

อาจารย์ประภาพรณ เกษราพงศ์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ สายแก้ว

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพัฒน์ เศรษฐินบุรณ์

อาจารย์ ดร.จุมพล วรรณวัฒน์

รองศาสตราจารย์ ดร.คณัพงษ์ เชษฐโชติศักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวรินทร์ สุขโต

อาจารย์ ดร.ธนา ราษฎร์ภักดิ์



การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555
17-19 ตุลาคม 2555 ชั้น 4 เพชรบูรณ์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนนาค กฤตวรกาญจน์
รองศาสตราจารย์ ดร.นิเวศ เจริญใจ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งฉัตร ชมภูจินไหว
อาจารย์ ดร.รพจน์ เสรีรัฐ

รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภานคง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมกฤต เล็กสกุล
อาจารย์ ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์วรางค์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.เต๋อใจ สมบูรณ์วิวัฒน์
รองศาสตราจารย์ ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญชัย โชมพิศราภรณ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยา คำคำ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พจมาน เต๋อวันนรัฐศักดิ์
อาจารย์ ดร.ช่อแก้ว จตุรานนท์
อาจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข
อาจารย์ ดร.พีระชัย ศรีโยธา
อาจารย์มงคล สีนะพันธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.อาษา ประทีปเสน
รองศาสตราจารย์วชิระ มีทอง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทัศน์ พรหมบุญพงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์นา อุดมศักดิ์กุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจริญ สุนทรวานิชย์
อาจารย์ ดร.ไพฑูริย์ ช่างทอง
อาจารย์ ดร.ศุภกฤษ บุญเพชร
อาจารย์ ดร.อุษณีย์ คำพูด
อาจารย์เจษฎา จันทวงษ์โส
อาจารย์สุจินต์ ธงดาวสุวรรณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถกร เก่งพุด
รองศาสตราจารย์วันชัย แผลมหลักสกุล
อาจารย์ ดร.กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์
อาจารย์ ดร.กฤษดา อัครรุ่งแสงกุล
อาจารย์ ดร.กุศล ทิมพาน์ศรี
อาจารย์ ดร.ชบชัย เผือกสามัญ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มีระเดช วุฒิพรพันธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วินชาติ แสงชัย
อาจารย์ ดร.ธนากร อินทรกำราชัย
อาจารย์ ดร.นันทกฤษณ์ ยอศพิจิก
อาจารย์ ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์
อาจารย์ตงกรานต์ บางศรีธเนย์พิทย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

อาจารย์ ดร.วิจิตรสวัสดิ์ สุขสวัสดิ์ ณ ฉยุธยา
อาจารย์ธนา คุนารักษ์
อาจารย์พัฒนพงษ์ แสงศักดิ์วัฒนา

อาจารย์วันจันทร์ เกียรติบุญ
อาจารย์อรนิตา ฉนุชชวาญชัย
อาจารย์พรเทพ แก้วเชื้อ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทรัมย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชาญ ชัยพันธ์



การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555
17-19 ตุลาคม 2555 ธานี เพชรบูรณ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนา คุปตะเชียร

อาจารย์ ดร.ชัยยะ ปาภานีพิพลกรัง

อาจารย์ศุภเอก ประมุขมาก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย คังลกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ ศรีชวนพงษ์

อาจารย์ ดร.ระพี กาญจนะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พายัพ เชียงใหม่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณีกา อารีพันธ์

อาจารย์ ดร.แรก อิงศรีวงศ์

อาจารย์ ดร.บรรเจิด แสงจันทร์พิลา

อาจารย์ ดร.ภาศกัญมิ จารุกุมิ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พายัพ เชียงใหม่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณีกา อารีพันธ์

อาจารย์ ดร.แรก อิงศรีวงศ์

อาจารย์ ดร.บรรเจิด แสงจันทร์พิลา

อาจารย์ ดร.ภาศกัญมิ จารุกุมิ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์เดช เหมเงินขาว

อาจารย์ ดร.มหาดมละสุโสมิ มะแซ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

อาจารย์ตีญญา ศ่างริง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ชัย จิตตงมัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกมล

อาจารย์ ดร.ปวีร์ ศิริวัณษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บงกช ตรีมธุธีอนุวัฒน์

อาจารย์ ดร.ปภากร ทิพย์ชวาล

อาจารย์ ดร.วีระชัย มโนพิเชฐวัฒนา

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รองศาสตราจารย์ ดร.จิรวัฒน์ อีระวราพฤกษ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีทศ เหล่าศิริพงษ์ทอง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสมอจิตร ทอมรสสุคนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.จิรศิริพงษ์ เจริญภัณฑารักษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุขตามระ



การประชุมวิชาการสำนักงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2556

17-19 ตุลาคม 2556 ธานี เพชรบุรี

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญญา พิทักษ์กุล
อาจารย์ ดร.ณัฐพัชร อารีรัชกุลกานต์
อาจารย์ ดร.ศักดิ์ รัฐวิบูลย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภรัชชัย วรรณดี
อาจารย์ ดร.สมหญิง งามพรประเสริฐ

มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

รองศาสตราจารย์ ดร.ภริณ สนธิเพิ่มพูน
อาจารย์ ดร.ขวัญณิณี คำเมือง
อาจารย์วิสารย์ แจ่มกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุทพงษ์ พงษ์เจริญ
อาจารย์ ดร.ภาณุ บรมแจตุกร
อาจารย์ศรีลัจจา วิทยศักดิ์

มหาวิทยาลัยบูรพา

รองศาสตราจารย์เกษม พิพัฒน์ปัญญาคุณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทร์พาศ นาควรจรตระกูล
อาจารย์ ดร.จักรวาล คุณะติลล
อาจารย์ ดร.อุภูวัฒน์ จันทระธา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรพลาญ ดิตา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรวัฒน์ สมสิริกาญจนคุณ
อาจารย์ ดร.กฤษดา ประสพชัยชนะ

มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

รองศาสตราจารย์อุศนีย์ อาจฤทธิ

มหาวิทยาลัยรังสิต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนาวัฒน์ จีศวใหญ่กุลย์
อาจารย์ ดร.พิษณุ มนต์ปิติ
อาจารย์พรศพงษ์ แก่นณรงค์
อาจารย์สมพร พรหมคง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เที่ยงจันทร์ จริงจิตร
อาจารย์ศอศักดิ์ อุทัยใจฟ้า
อาจารย์ศิลปชัย วัฒนเสถ
อาจารย์สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา พิศลยบุตร
อาจารย์ ดร.ดิศเสธา ธาเนชัยพันธ์
อาจารย์นุกูล อุบลมาน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิณี กุวพัฒนะพันธุ์
อาจารย์นันทวรรณ ฉ่ำเยี่ยม
อาจารย์มาริสา แก้วสุวรรณ



การประชุมวิชาการสำนักงานวิศวกกรมอุตสาหกรรม กระทรวงพาณิชย์ พ.ศ. 2555
17-19 ตุลาคม 2555 ๒๒๕๕ เพชรบูรณ์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รองศาสตราจารย์ธนวัฒน์ แก้ววัฒนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์

อาจารย์ ดร.พิศดา หวังพาณิชย์

อาจารย์พงษ์เพ็ญ จันทนะ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์มิตรมาณี ศรีวัฒนาวงศ์

อาจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ

อาจารย์สิริเศษ ชาตินิยม

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รองศาสตราจารย์ ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล

รองศาสตราจารย์สมชาย ชูโฉม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตน์วิไล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิัญชณา สันธวาลัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจริญ แจตวิจิตร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิเศษ ทรายการชัยศิริ

รองศาสตราจารย์วันตา รัตน์เมธี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กลางเดือน โพชนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนกิศพร มีมงคล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพพรรณ ไชยประพัทธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุจน์ ตั้งพงษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ยอศดวง พันธุ์นา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดวงน คังโพธิธรรม

มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร อมรสวัสดิ์วัฒนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา กาญจนสุนทร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชเม เยี่ยงกมลสิงห์

อาจารย์ ดร.วันชัย พฤกานนท์

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

อาจารย์จิตตดา ชัมเจริญ

อาจารย์นิศากร สมสุข

อาจารย์วรลักษณ์ เสถียรรังษฤกษ์

อาจารย์อรอุมา กงสถาน

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศนิศร ภูนิคม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชสรา เกรัมย์กรกฎ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิศาตะโต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขอังคณา สี่

อาจารย์ ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์

อาจารย์ ดร.ธรรุชดา พันธุ์โกศล

อาจารย์ไท แสงเทียน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นลิน เพ็ชรทอง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริษา เกรัมย์กรกฎ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ สันตุเชาวน์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุริยา ไชยสวัสดิ์

อาจารย์ ดร.ดิ้นท์ โฉหาพิริยกุล

อาจารย์ตะวันฉาย โพธิ์หอม

อาจารย์สุรเจษฎ์ ก้อนจันทร์



การประชุมวิชาการสำนักงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2555
17-19 ตุลาคม 2555 ธานี เพชรบูรณ์

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสนา พงศ์วารเรือง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภาภรณ์ สุวรรณรังษี

โรงเรียนนายเรืออากาศ

รองศาสตราจารย์ ศรีบูรพา

อาจารย์อมฤต ศรีบูรพา

อาจารย์อวยชัย วัชรเจื้อ

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์รัชต์ฤกษ์ อภาเวท

อาจารย์เฉษฐา วงษ์อ่อน

อาจารย์สุนทร มุทธา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประยูร สุรินทร์

อาจารย์พิทักษ์ พนาวัน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.ภรณ์ชัย กัลยาศิริ

รองศาสตราจารย์ ดร.สกนธ์ ศัลยบุญจิต

อาจารย์ ดร.วิภู ศรีสืบสาน

รองศาสตราจารย์ ดร.ฤดี มาสุจันทร์

อาจารย์ ดร.ชุมพล ยวงโย

อาจารย์ ดร.อุคม จันทร์สวัสดิสุข

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กัดอมจิตร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทรีเพ็ญ อเนศวินานนท์

อาจารย์ ดร.สิทธิชัย แซ่เหลียม

อาจารย์ ดร.ดเมต พลอยคน้อย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปฏิพัทธ์ พงษ์สุวรรณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ตีลาธวีวงศ์

อาจารย์ ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒนา

อาจารย์กวีรินทร์ สัยงวิญ

มหาวิทยาลัยมหิดล

รองศาสตราจารย์สุภชัย นาทะพันธ์

อาจารย์ ดร.มงคล เพ็ญวิบูลย์

อาจารย์ ดร.รณชัย ศิโรเวธภูมุต

อาจารย์สุภชัย ราชภูริศิริ

อาจารย์สิทธิพันธุ์ ตันพรวิรุฬห์

อาจารย์ ดร.กนกวรรณ กิ่งพวง

อาจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย

อาจารย์ทองยศ สุภักดิ์

อาจารย์ธนา ศาตรา



การประชุมวิชาการข้ามงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555
17-19 ตุลาคม 2555 ธานี เพชรบุรี

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

รองศาสตราจารย์ ดร.กัณฑ์ ชยะกุลศิริ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรีณี มณีศรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมตะ ทักนั๊กดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์อานักร พรหมวัฒน์นั๊กดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทศวีร์ ศรีโหมศ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิรัช เครีฉลุข

อาจารย์ ดร.เทพฤทธิ์ ทองรูป

อาจารย์ ดร.วิธธา เลิศไพฑูริย์พันธ์

อาจารย์จักรพันธ์ กันหา

อาจารย์ธัญญา เรืองคง

อาจารย์อัศวิน วงศ์วิวัฒน์

อาจารย์ศระ ตัญไพศาล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชดชิต เอี่ยมวรภูมิกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทัตตะ เกษราพงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ถาวร ฉมตภักดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัฒนพงศ์ อริยสิทธิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชวลิต มณีศรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ

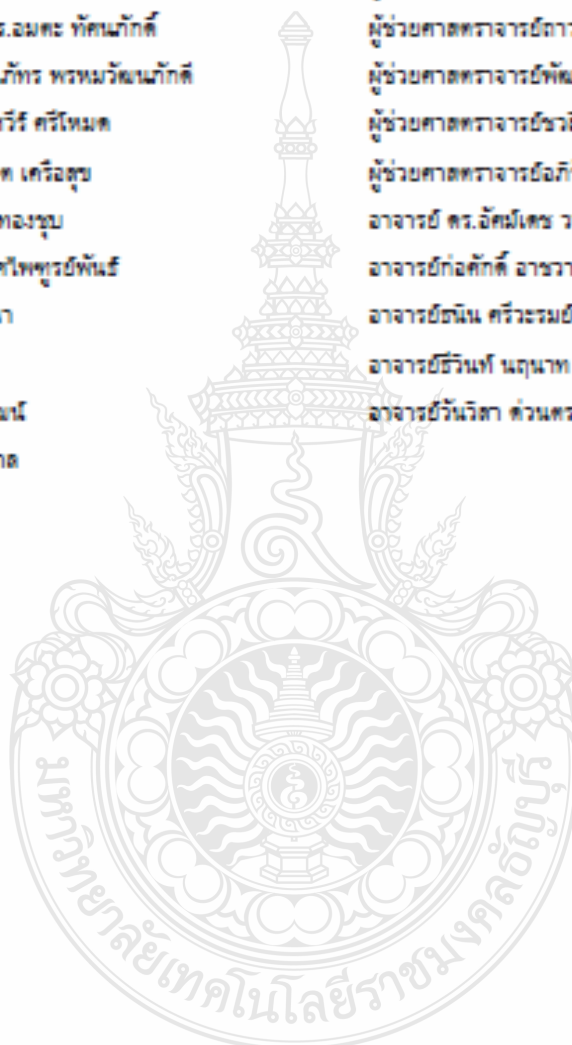
อาจารย์ ดร.อัคมเดช วานิชชัย

อาจารย์กัณฑ์กัณฑ์ อักษรวกร

อาจารย์ธนิศ ศรีระมย์

อาจารย์ธีรินทร์ นฤนาท

อาจารย์วันวิสา ส่วนพระกุลศิลป์





การประชุมวิชาการข้ามงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555

17-19 ตุลาคม 2555 สาขา วิศวกรรม

การศึกษาประสิทธิภาพของสารหล่อลื่นในงานลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

Study of Lubricants Efficiency for Flanged Square Cup Deep Drawing for High Strength Steel

บัญชา วงศ์ศรีทา^{1*} บุญเรือง เบ็นศิริ² ไพศาล เอี่ยมมี³ ธวัชชัย แก้วศรีโต⁴ ชวตา วรรณสิทธิ์⁵ กุศลชาติ จุฑเพ็ญ⁶
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110
E-mail: bancha16@hotmail.co.th

Bancha wongsritha^{1*} kunlachart junlapen² Boonruang yensin³ Paisarn aemmi⁴ Thawatchai kaewrisai⁵
Chawala wannasit⁶

^{1,2}Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Thanyaburi, Pathumthani 12110
E-mail: bancha16@hotmail.co.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารหล่อลื่น ที่มีอิทธิพลต่อความเรียบของผิวชิ้นงานในกระบวนการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกด้วยเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง สารหล่อลื่นที่นำมาศึกษาเพื่อเปรียบเทียบครั้งนี้มีอยู่ 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมันสังเคราะห์ สารหล่อลื่นสังเคราะห์และน้ำมันจากพืช รวมทั้งหมด 5 ชนิด โดยทดสอบกับวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ตามมาตรฐาน JIS G 3113 เกรด SAPH440 หนา 1.4 มิลลิเมตร ทำการลากขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปดัดให้ได้ชิ้นงานรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก ขนาดกันด้วยมีความยาวด้านละ 60 มิลลิเมตร และมีความลึก 30 มิลลิเมตร ที่ขนาดรัศมีปากถ้วย 6 มิลลิเมตรและ 10 มิลลิเมตรจากผลการทดลองพบว่าสารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิด ไม่มีอิทธิพลต่อแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปเนื่องจากแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปมีความแตกต่างกันน้อยมาก และสารหล่อลื่นทุกชนิดสามารถช่วยให้ทำการลากขึ้นรูปได้สำเร็จ สำหรับผลความเรียบผิวชิ้นงานหลังจากการลากขึ้นรูป สารหล่อลื่นสังเคราะห์ที่มีสารเติมคุณภาพของธาตุฟอสฟอรัสและกำมะถัน มีประสิทธิภาพในการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่สุด คือ ชิ้นงานมีความเรียบผิวดีที่สุด และความหนาเปลี่ยนแปลงจากเต็มน้อยที่สุด ด้านหนึ่งด้วยความเรียบผิวจะเอียงกว่าผิวชิ้นงานเริ่มต้น และที่รัศมีปากถ้วยเท่ากับ 6 มิลลิเมตร พบว่ามีความเรียบผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เมื่อรัศมีปากถ้วยน้อยลงทำให้การไหลตัวของแผ่นชิ้นงานผ่านรัศมีปากเป็นไปได้อย่างขึ้น เป็นอุปสรรคต่อการแทรกตัวของสารหล่อลื่น จึงเกิดการเสียดสีกันของโลหะด้านหนึ่งด้วยมากกว่าที่รัศมีปากถ้วย 10 มิลลิเมตร

คำหลัก แรงในการขึ้นรูป สารหล่อลื่น ความเรียบผิว ปากถ้วย

Abstract

In this study, the researchers group had conducted the research to compare the efficiencies of lubricants influencing to surface smoothness in the flanged square cup deep drawing mold with high-strength steel material. The lubricants used in this comparative study included 3 categories of them, namely, synthetic oil, synthetic lubricant, and vegetable oil, total 5 kinds classified whereby the experiment was conducted in



application with high strength steel according to JIS G 3113 Grade SAPH440 , 1.4 mm thick . The cup formation was made by using deep drawing mold and die to get the work piece in flanged or winged square cup-shaped, bottom width of the cup is 60 mm. and the cup depth is 30 mm. radius of the die shoulder is 6 mm. and 10 mm. From the experimental result, It was found that all 5 kinds of lubricants had no influence to the punch force used in shaping the cup because the punch force used in shaping the cup was very little different and all kinds of lubricants could help to draw up shaping successfully. For the surface smooth effect to the work piece after being drawn up. The synthetic lubricants which had quality enhancing additives by mixing of phosphorus and sulfur had the best efficiency in the flanged square cup deep drawing mold with high-strength steel material that it yielded the best surface smoothness and the thickness changed least from its original , the inner wall of the cup is smoother , more resolution than the initial work piece surface. And when the shoulder radius equaled to 6 mm. cup wall surface is rougher surface because the decrement of the die shoulder radius made the flow of the material through the die radius more difficult that effect to the insertion or seepage of lubricant., it therefore, caused more friction of metal at the cup wall than when cup die shoulder radius was set at 10 mm.

Key words: punch force, lubricants, surface roughness, die radius

1. บทนำ

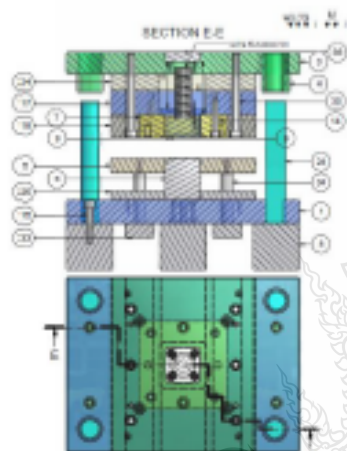
ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เริ่มนิยมใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงมาเป็นวัสดุในการผลิต เพื่อเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างรถ โดยยังคงขนาดความหนาเดิมแต่วัสดุจะมีความแข็งแรงสูงขึ้น เช่น ชิ้นส่วนคานกันชนหน้าของรถยนต์ คานประตูด้านข้าง เป็นต้น ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อลดน้ำหนักให้กับตัวรถ โดยเริ่มมีการนำเหล็กกล้านี้เข้ามาเป็นวัสดุหลักในการผลิตตั้งแต่ปี 2543 ซึ่งปัญหาที่ผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์พบ คือ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเป็นวัสดุที่มีความแข็ง ซึ่งรูปยากมีการติดตัวกับสูงและที่สำคัญคือมีการมีติดกับผิวแม่พิมพ์ (Adhesion) ได้ง่าย[1] โดยทั่วไปกระบวนการผลิตดังกล่าวข้างต้นได้นำสารหล่อลื่นมาใช้ขณะทำการขึ้นรูป สารหล่อลื่นที่นำมาใช้นั้นมีมากมายหลายชนิด จำเป็นจะต้องมีการศึกษาวิจัยถึงคุณสมบัติข้อดีข้อเสียของสารหล่อลื่นแต่ละชนิดให้เหมาะสมกับวัสดุที่จะนำมาขึ้นรูป สารหล่อลื่นที่เหมาะสมจะสามารถช่วยลดการเสียดสี เพิ่มอายุการใช้งานของเครื่องมืออุปกรณ์ผลิตขึ้นตอนในการขึ้นรูป ลดต้นทุนในการผลิตและส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน[2-7] โดยเฉพาะการนำวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงมาทำการขึ้นรูป

นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาตามความยากง่ายในการทำความสะอาดหล่อลื่นหลังการผลิตอีกด้วย สำหรับในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความเรียบผิวชิ้นงานในกระบวนการดากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกด้วยเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง โดยเลือกใช้สารหล่อลื่นที่มีจำหน่ายทั่วไปในประเทศไทยมาทำการศึกษเปรียบเทียบ

2. ขั้นตอนการดำเนินการ

วัสดุที่นำมาทดลองเป็นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงตามมาตรฐาน JIS G 3113 เกรด SAPH440 ความหนา 1.4 มิลลิเมตร โดยมีองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกล ดังตารางที่ 1 และ 2 เตรียมแผ่นขึ้นงานเริ่มต้นก่อนทำการขึ้นรูปขนาด 120×120 มิลลิเมตร ทำการดากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก ได้ขนาดกันถ้วยที่มีความกว้าง 60 มิลลิเมตร ความยาว 30 มิลลิเมตร และความสูง 30 มิลลิเมตร กำหนดรัศมีปากพื้นซึ่งเท่ากับ 10 มิลลิเมตร รัศมีที่มุมคายเท่ากับ 20 มิลลิเมตร และกำหนดให้รัศมีปากคาย 2 ชนิด คือ 6 และ 10 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสารหล่อลื่น ดังแสดงในรูปที่ 1 จากนั้นทำการติดตั้งแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องปั๊มโลหะขนาด 80 ตัน ทดลองปั๊ม

ดากขึ้นรูปขึ้นงาน โดยใช้วัสดุตั้งที่กล่าวข้างต้นและสารหล่อลื่นที่จะนำมาใช้ในการทดลองนี้แบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมันตั้งเคราะห์ สารหล่อลื่นตั้งเคราะห์ และน้ำมันจากพืช รวมทั้งหมด 5 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 3 มาทำการทดลองดากขึ้นรูปและเก็บตัวอย่างละ 20 โดยก่อนเปลี่ยนสารหล่อลื่นทุกครั้งมีการขัดทำความสะอาดพื้นผิวและคายและตรวจสอบความเรียบผิวแม่พิมพ์ใหม่เสมอ



รูปที่ 1 แสดงแบบของแม่พิมพ์

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีเหล็ก SAPH440[1]

SAPH440			
ธาตุ	ส่วนผสม	ธาตุ	ส่วนผสม
C	0.1260	Nb	<0.0010
Si	0.0500	V	0.0020
Mn	1.0250	Co	<0.0010
P	0.0120	Al	0.0210
S	0.0030	B	<0.0010
Cr	0.0210	Ti	0.0010
Ni	0.0180	As	0.0020
Mo	0.0120	Sn	0.0090
Cu	0.0200	W	0.0010

ตารางที่ 2 แสดงสมบัติทางกลเหล็ก SAPH440[1]

Symbol (JIS)	SAPH440
Thickness (mm.)	1.4
Yield Point σ_y (MPa)	357
Ultimate Strength σ_u (MPa)	478
Elongation (%)	33.6

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบสมบัติของสารหล่อลื่น[2]

สมบัติของสารหล่อลื่น	TON	MZA	DRAW 359H	DRAW 756A	COOO NUT OIL
ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส (cSt)	164	140	598	1	40
ความหนืดที่ 100 องศาเซลเซียส (cSt)	11	13	30	1	8
ดัชนีความหนืด (mm ² /s)	6	75	74	-	182
จุดเยือกแข็ง (°C)	117	240	204	-	-
สี	เหลือง	เหลืองอำพัน	ดำน้ำตาล	ขาว	เหลือง
ความหนาแน่นที่ 20 องศา	0.17	0.14	5.29	-	10.12

3 ผลการทดลอง

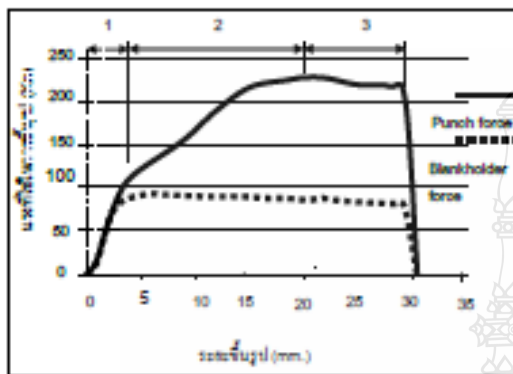
ในการทดลองขึ้นรูปด้วยดีเกลือมีจุดเริ่มต้นแบบมีปีกของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SAPH440 สำหรับแรกต้องทำการหาแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงสุดและแรงกดแผ่นเจ็บบีคขึ้นงานที่เหมาะสมในการขึ้นรูปของแต่ละวัสดุภายใต้ที่ขนาดรัศมีเท่ากับ 6 และ 10 มิลลิเมตร จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบคุณภาพผิวของขึ้นงานพร้อมทั้งศึกษาถึงความหนาของผิวขึ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปของสารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิด

3.1 อิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีต่อแรงดากขึ้นรูป

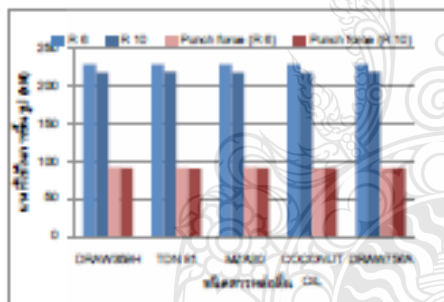
สำหรับแรงที่ใช้ในการดากขึ้นรูป (ตัวอย่างกรณีใช้น้ำมัน TON_{oil}) ที่รัศมีบาคาย 10 มม. ดังแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นการพิจารณาแบ่งเป็น 3 ช่วง กล่าวคือ ช่วงที่ 2 แแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากต้องใช้แรงเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างแผ่นขึ้นงานกับผิวแม่พิมพ์ จากนั้นขึ้นงานจะถูกดึงออกจากตัวรัศมีของพันธ์และดึงลงเหนือรัศมีคายทำให้ขึ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปและถูกดากลงไปในคายอีกจนกลายเป็นผนังด้วยดีเกลือ ส่วนแรงในช่วงที่ 2 เกิดจากเมื่อขึ้นงานเคลื่อนผ่านรัศมีคาย แรงจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะกดลึกของพันธ์ยาวขึ้น และใน ช่วงที่ 3 แแรงที่ใช้จะค่อยๆลดลง เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปีกด้วยดากลงทำให้มีแรงเสียดทานน้อยลง จึงใช้แรงใน



การเปลี่ยนรูปคงที่ ซึ่งสารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิดมีลักษณะกราฟแรงแนวโน้มเหมือนกัน



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการลากขึ้นรูปลึกและแรงกดแผ่นพับยึดชิ้นงานกับระยะทางการเคลื่อนที่ของพunch กรณีใช้สารหล่อลื่น TDN81 ขนาดรัศมีบาคาย 10 มม.



รูปที่ 3 เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสูงสุดและแรงกดแผ่นพับยึดชิ้นงานเมื่อทำการลากขึ้นรูปโดยสารหล่อลื่นชนิด

ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าแรงสูงสุดในการลากขึ้นรูปที่รัศมีบาคาย 6 และ 10 มิลลิเมตร สารหล่อลื่นไม่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงสุด และใช้แรงกดแผ่นพับยึดชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกันเฉลี่ยเท่ากับ 90.58 kN และที่ขนาดรัศมีบาคาย 10 มิลลิเมตร ช่วยลดแรงในการขึ้นรูปสูงสุดประมาณ 10 kN ดังแสดงในรูปที่ 3 สามารถอธิบายได้ว่าสารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิดมีผลต่อแรงเสียดทานระหว่างผิวสายกับปิ๊กด้วยกับแผ่นพับยึดชิ้นงานเพียงเล็กน้อย ทำให้แรงรวมในการลากขึ้นรูปที่ขนาดรัศมีเดียวกันมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยและเมื่อเลือกใช้รัศมีบาคายที่ใหญ่ขึ้นจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปลดลง

เนื่องจากชิ้นงานเกิดการไหลตัวลงไปในสายได้ดีขึ้น ซึ่งสารหล่อลื่นอาจมีส่วนช่วยให้มีการไหลตัวได้ดีขึ้น จากรัศมีบาคายทั้ง 2 ระดับสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์ไม่พบรอยแตกและรอยยับ

3.2 อิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความเรียบผิวชิ้นงาน

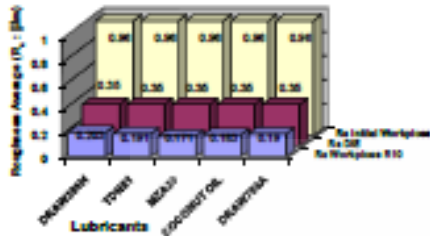
จากการทดลองขึ้นรูปด้วยดีเซลีียมจึงนำชิ้นงานด้วยดีเซลีียมที่ได้มาทำการวัดค่าความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra) เพื่อหาค่าความเรียบผิวชิ้นงานโดยรวมทั้งหมด และค่าความเรียบผิวสูงสุด (Rt) ของผานึงด้วยเพื่อดูรอยขีดที่เกิดจากการเสียดสีที่ได้จากการทดลองโดยใช้สารหล่อลื่น 5 ชนิด โดยแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นมีความความเรียบผิว Ra = 0.96 และ Rt = 6.5 หลังทำการลากขึ้นรูปได้ผลความเรียบผิวที่รัศมีบาคายเท่ากับ 6 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4 และที่รัศมีบาคาย 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7



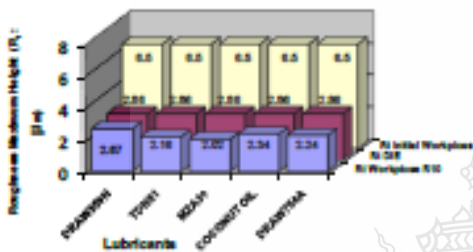
รูปที่ 4 ค่าเฉลี่ยความเรียบผิว (Ra) ได้จากการลากขึ้นรูปที่รัศมีบาคาย 6 มม.



รูปที่ 5 ค่าความเรียบผิวสูงสุด (Rt) ได้จากการลากขึ้นรูปที่รัศมีบาคาย 6 มม.

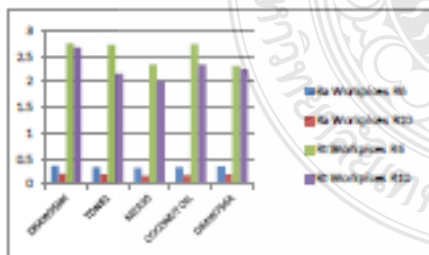


รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ยความเรียบผิว (R_a) ได้จากการชักขึ้นรูปที่รัศมีนำพาย 10 มม.



รูปที่ 7 ค่าความเรียบผิวสูงสุด (R_z) ได้จากการชักขึ้นรูปที่รัศมีนำพาย 10 มม.

เมื่อพิจารณาค่าความเรียบผิวชิ้นงานผิวที่ได้จากการชักขึ้นรูปพบว่า สารหล่อลื่น MZ-30 ให้ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยที่ดีที่สุด เนื่องจากเป็นสารหล่อลื่นที่มีความหนืดปานกลางและมีสารเพิ่มคุณภาพที่มั่งคั่งจะสามารถรับแรงกดได้สูง ตำแหน่งการสึกหรอ ซึ่งจะทำให้ป้องกันการสัมผัสของตัวคู่โคจรให้ดีกว่าน้ำมันหล่อลื่นชนิดอื่น



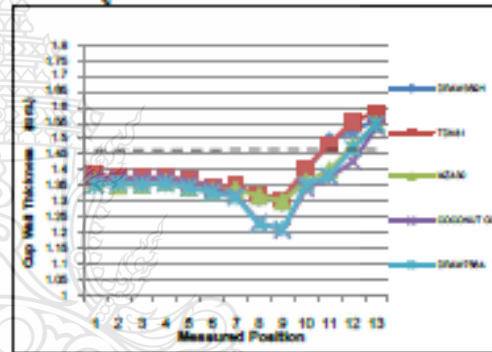
รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเรียบผิว (R_a) ค่าความเรียบผิวสูงสุด (R_z) ได้จากการชักขึ้นรูปที่รัศมีนำพาย 6 มม. และ 10 มม.

เมื่อเปรียบเทียบจากรัศมีนำพาย 6 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยความเรียบผิวที่ได้จากรัศมีนำพาย 10 มิลลิเมตร ให้ค่าความ

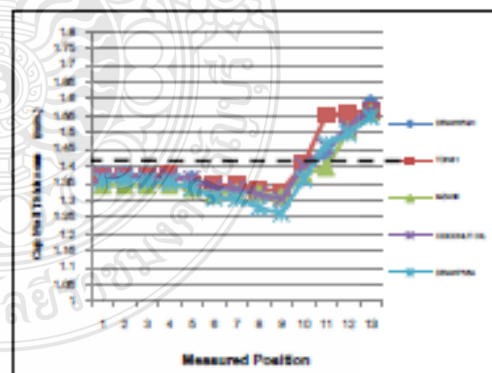
เรียบผิวที่ดีกว่า รัศมีนำพาย 6 มิลลิเมตร ในทุกชนิดสารหล่อลื่น ดังแสดงในรูปที่ 8 เนื่องจากการไหลตัวของเหล็กที่รัศมีนำพาย 10 มิลลิเมตร จะให้การไหลตัวได้ดีกว่า ผิวของชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบมีความละเอียดเนื่องจากถูกกัดและตัดกลับ ผิวสัมผัสถูกเคลื่อนที่ภายใต้การกัดจึงจะนำผิวพาและถูกยึด

3.3 อิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความหนาผนังถ้วยด้านตรงของชิ้นงาน

ผลการวัดความหนาความเปลี่ยนแปลงของผนังด้านตรงของชิ้นงาน ที่ผ่านการชักขึ้นรูปลึกโดยใช้รัศมีนำพายและสารหล่อลื่นในการชักขึ้นรูปที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 9



ก) รัศมีนำพาย 6 มิลลิเมตร



ข) รัศมีนำพาย 10 มิลลิเมตร

รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเปลี่ยนแปลงความหนาถ้วยได้จากการชักขึ้นรูปที่รัศมีนำพาย 6 มม. และ 10 มม.

จากรูปที่ 9 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาผนังชิ้นงาน มีแนวโน้มเหมือนกันคือ สารหล่อลื่นทั้ง 5 ชนิดจะมีความหนาแน่นของจุดที่จุดเดียวกัน คือจุดที่ 9 ตรง

บริเวณนี้จะเป็นรัศมีที่กว้าง ซึ่งเกิดความเค้นดึงในแนวแกนสูงสุดของการขึ้นรูปและจะมีความหนามากที่สุดที่จุดเดียวกับเช่นกันคือจุดที่ 13 บริเวณนี้จะเป็นขอบปีกของชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงบริเวณปีกด้วยในขณะลากขึ้นรูป และน้ำมัน DRAW_{50A} มีผลทำให้ชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงของความหนามากที่สุด เนื่องจากเป็นการหล่อขึ้นด้วยเครื่องที่ผสมกับน้ำ มีค่าความหนืดต่ำทำให้มีประสิทธิภาพในการหล่อขึ้นโดย ส่งผลให้ชิ้นงานมีความการยึดตัวสูงขึ้น

4. สรุปผลการวิจัย

4.1 ชนิดของสารหล่อขึ้นไม่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปชิ้นงานด้วยดีเยี่ยมด้วยเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง แต่รัศมีปากตายที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปลดลง

4.2 สารหล่อขึ้นสังเคราะห์ที่มีสารเพิ่มคุณภาพของธาตุฟอสฟอรัสและกำมะถัน มีประสิทธิภาพในการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงดีที่สุด คือชิ้นงานมีความเรียบผิวดีที่สุด และความหนาเปลี่ยนแปลงจากคือน้อยที่สุด

4.3 สารหล่อขึ้นที่มีความหนืดต่ำ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาชิ้นงาน และทุกชนิดสารหล่อขึ้นมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความหนาชิ้นงานเหมือนกัน คือชิ้นงานมีความหนาแน่นที่สุดที่บริเวณรัศมีที่กว้าง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความร่วมมือจาก นายกฤษฏา หนูมา นายศรินทร์ ลอยวรรณ นายบรรพต ชาติมนตรี นายอนิรุท ปิ่นแก้ว นายอิสตรา ไหมพรหม นายชัชฎ์ สุระทัตตะ นายทรงยศ วงษ์พันธ์ นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยทำการทดลองและบันทึกผล และขอขอบคุณบริษัท เฮาตัน อินเทอร์เน็ต เซ็นเซอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์การหล่อขึ้นที่นำมาใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณ บริษัท พนมไพร์ พรวิชัย จำกัด ที่ได้สนับสนุนเครื่องจักรและอุปกรณ์ในการวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรม

อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมีที่นำมาใช้ในการวิจัย ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] ไพศาล เอี่ยมมีและคณะ. 2554. อิทธิพลของรัศมีปากตายในการลากขึ้นรูปด้วยดีเยี่ยมจัดรีดแบบมีปีก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [2] อองอาจ อิทธิศิริศักดิ์. 2548. การวิเคราะห์สารหล่อขึ้นโดยกรรมวิธีการรีดขึ้นรูป (Ironing) ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [3] จุตศิริ ศรีงามม่อง. 2537. วิศวกรรมงานแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่นเบื้องต้น. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [4] เวชชี อุทัยยิ่ง. 2546. การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้สารหล่อขึ้น. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [5] Kurt, L., 1985, *Handbook of Metal forming*, McGraw-Hill, New York, pp.20.1-20.56.
- [6] Huang, Y.M., and Cheng, J.W., 1997, "Influence of Lubricant on Limitation of Formability of Cylindrical Cup – Drawing", *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 77-82.
- [7] Frank, R., June 1979, "The Influence of Punch-Die Clearance and Lubrication on The Deep Drawing of PTFE-Coated Aluminium", *Sheet Metal Industriall*, pp. 502-511.
- [8] Ziang, Z.L., and Chen, L., 1997, "Study of The Friction Characteristics of Lubricants and Their Affecting Factors During Drawing", *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 144-147.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายบัญชา วงศ์ศรีทา
วัน เดือน ปีเกิด	16 กันยายน 2517
ที่อยู่	231 หมู่ 5 ต.มุกดาหาร อ.เมือง จ.มุกดาหาร
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนนวมินทราชูทิศอีสาน ต.มุกดาหาร อ.เมือง จ.มุกดาหาร ปีพ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคนครพนม ปีพ.ศ. 2536 สำเร็จการศึกษาศรศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ปี พ.ศ. 2547
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2540 - 2548	ครูประจำแผนกวิชาเครื่องมือกลและซ่อมบำรุง สาขางานเครื่องมือกล วิทยาลัยเทคนิคนครพนม
พ.ศ. 2548 – ปัจจุบัน	ครูประจำแผนกวิชาเครื่องมือกลและซ่อมบำรุง สาขางานเครื่องมือกล วิทยาลัยการอาชีพนวมินทราชินีมุกดาหาร

