

อิทธิพลของรัศมีปากตายที่มีผลต่องานลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก  
ด้วยเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์

INFLUENCES OF DIE RADIUS ON RECTANGULAR CUP DEEP  
DRAWING OF AUTOMOBILE STRUCTURAL STEEL

ไพศาล เอี่ยมมิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อิทธิพลของรัศมีป่าดงที่มีผลต่องานตากขึ้นรูปด้วยสีเหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก  
ด้วยเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์

ไพศาล เอี่ยมมิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของรัศมีป่าชายที่มีผลต่องานลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกด้วยเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์
ชื่อ – นามสกุล	นายไพศาล เอี่ยมมิ
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์กุลชาติ จุลเพ็ญ, D.Eng.
ปีการศึกษา	2555

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคการผลิตแบบดัดในการปรับปรุงระบบการผลิตของสายการผลิตซาลาเปา ซึ่งปัญหาที่พบปัจจุบันคือมีปริมาณสินค้าคงคลังที่สูงซึ่งมีมูลค่าเฉลี่ยต่อเดือนเท่ากับ 5,148,286 บาท เมื่อเทียบกับยอดการใช้จริงแค่ 2,562,458 บาท จากการตั้งชื่อเฉลี่ยต่อเดือนมากถึง 7,710,744 บาท ผลลัพธ์สำเร็จรูปไม่เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า รวมไปถึงสายการผลิตไม่สมดุลส่งผลให้ประสิทธิภาพของสายการผลิตต่ำเพียงร้อยละ 61.88 จากเป้าหมายร้อยละ 90 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะนำเทคนิคการผลิตแบบดัดเข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อลดความสูญเสียในกระบวนการผลิตและสร้างมูลค่าให้องค์กร

ขั้นตอนในการดำเนินงานเริ่มต้นจากการใช้แผนผังสายธารแห่งคุณค่ารวบรวมข้อมูลและระบุตำแหน่งของปัญหา ซึ่งพบปัญหาที่ฝ่ายคลังสินค้าและฝ่ายผลิต จากนั้นทำวิเคราะห์ปัญหาโดยแผนภูมิสาเหตุและปัญหา และนำเทคนิคการผลิตแบบดัดประกอบด้วยหลักการ ECRS การจัดการสินค้าคงคลัง การผลิตแบบดึง การศึกษาเวลาและการจัดสมดุลการผลิตมาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาและลดความสูญเสียทั้ง 7 ประการ

ผลการวิจัยพบว่าฝ่ายคลังสินค้าสามารถประหยัดยอดตั้งชื่อจากเดิมลงร้อยละ 52.18 ทำให้ระดับสินค้าคงคลังลดลงร้อยละ 82.57 ระยะเวลาการดำเนินการขอซื้อต่อครั้งของเจ้าหน้าที่ลดลงร้อยละ 80.66 ระยะเวลาเนาของวัตถุดิบลดลงร้อยละ 77.14 และที่ฝ่ายผลิตพบว่าสมดุลการผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 96.64 ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 43.20 ชั่วโมงในการผลิตลดลงร้อยละ 48.41 และทำให้ประหยัดค่าแรงทางตรง 54,000 บาท จากยอดผลิตทุก 120,000 ลูก

**คำสำคัญ:** ระบบการผลิตแบบดัด แผนผังสายธารแห่งคุณค่า สินค้าคงคลัง สมดุลการผลิต อุตสาหกรรมอาหาร

<b>Thesis Title</b>	Influences of Die Radius on Rectangular Cup Deep Drawing of Automobile structural steel
<b>Name - Surname</b>	Mr.Paisarn Aemmi
<b>Program</b>	Manufacturing Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Mr. Kunlachart Junlapen, D.Eng
<b>Academic Year</b>	2012

## ABSTRACT

The purpose of this research was to study the deep drawing of hot rolled carbon steel for automobile structure (SAPH 440; JIS) that affects to the dies design. It had been performed by designing the dies used for deep drawing of carbon steel and then changed the material was into the automobile structure steel which the specification of 6, 8, 10 and 12 mm die radius on rectangular cup deep drawing with the cup dimension of 60 mm in width, 60 mm in length, 30 mm in depth and cup edge of 10 mm in each side, in particularly the influences of die radius on maximum drawing force, quality of rectangular cup, after drawing including the suitable die radius for drawing.

The both material was determined blank size of 120 mm in width, 120 mm in length. 1.4 mm in thickness was used in the experiment and then the results of the experiment were compared.

It was found by the experiment that higher deep drawing force was needed when SAPH 440 was used since the material had higher strength force and thus was required to use more punch force to hold the work piece in order to reduce the winkle of the cup edge. Both kinds of steel required less force drawing when greater die radius were used and that all die radius in experiment were able to completely draw work pieces. The work pieces smoothly flew without causing any winkle to both kinds of materials when 37 kN and 56 kN Pressure force was launched to the SPCC steel sheet and the SAPH 440 steel sheet, respectively. For the result of thickness, it was found that, at the bottom of the cup, it was thinner than SPCC Steel since SAPH 440 Steel has less extensibility. For the surface roughness of the workpieces, SAPH 440 Steel was more likely to adhesion to the die surface causing more obvious scratches on work pieces than using the SPCC Steel.

**Keywords:** die radius, deep drawing, rectangular cup, automobile structural steel

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร.กฤษชาติ จุลเพ็ญประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาดลจดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณนายรัชชัย แก้วสีใส นายบัญญัติ วงศ์ศรีทา นายบุญเรือง เข็นศิริ และนายชวลิต วรรณสิทธิ์ ที่ช่วยในการสนับสนุนเงินทุนในการวิจัย ขอขอบคุณนายกฤษฎา หนูมา นายศรัณลอยวรรณ นายบรรพต ชาติมนตรี นายอนิรุช ปิ่นแก้ว นายอิสรา ไหมพรหม นายชิษณุ สุระทักษะ นายสรพงศ์ วงษ์พัฒน์ นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยทำการทดลองและบันทึกผลจนได้ความสมบูรณ์ของงาน ขอขอบคุณอาจารย์สุริยา ประสมทอง ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิวิทยาเขตสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องทดลองทางโลหวิทยา ขอขอบคุณบุคลากร บัณฑิตวิทยาลัยทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ นอกเหนือจากนี้ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ที่ได้ให้ทุนการศึกษา เพื่อใช้เป็นค่าเล่าเรียนในครั้งนี้อย่างต่อเนื่องระยะเวลาในการศึกษาของผู้วิจัย

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ไพศาล เอี่ยมมิ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง.....	4
2.2 ทฤษฎีการขึ้นรูปโลหะ.....	5
2.3 กระบวนการลากขึ้นรูปโลหะ.....	6
2.4 สารหล่อลื่น.....	19
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	27
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	27
3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุในการดำเนินการวิจัย.....	28
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.4 วิธีการดำเนินงาน.....	36
3.5 การคำนวณทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	36
3.6 ปัจจัยของการทดลอง.....	42
3.7 การติดตั้งแม่พิมพ์.....	43
3.8 การทดสอบแม่พิมพ์.....	47

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3.9 การเชื่อมต่ออุปกรณ์บันทึกข้อมูล .....	49
3.10 วิธีการเก็บข้อมูลในการทดลอง.....	50
3.11 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	52
4 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	53
4.1 อิทธิพลของรัศมีบ่าคายที่มีผลต่อแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากจูงรูป .....	53
4.2 อิทธิพลของรัศมีบ่าคายที่มีผลต่อคุณภาพของถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัส .....	59
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ5.....	65
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	67
รายการอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก ตารางแสดงคุณสมบัติของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SAPH.....	73
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ผลทดลองทางสถิติ.....	77
ภาคผนวก ค ตารางแสดงผลการทดลอง .....	84
ภาคผนวก ง ตารางแสดงผลการทดลอง .....	104
ภาคผนวก จ ผลงานตีพิมพ์และเผยแพร่ .....	108
ประวัติผู้เขียน.....	119

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การหาขนาดชิ้นงานเริ่มต้นด้วยทรงกลมกรณีมีปีกและไม่มีปีกชิ้นงาน .....	9
2.2	ขีดจำกัดการขึ้นรูปสูงสุดของวัสดุแต่ละชนิด.....	10
2.3	ค่า $a_{cr}$ ของวัสดุชนิดต่างๆ .....	14
2.4	ระยะช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคาย.....	14
3.1	องค์ประกอบทางเคมีของเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440.....	31
3.2	สมบัติทางกลของเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 .....	31
3.3	ตัวอย่างใบบันทึกผลการทดลองแรงสูงสุดที่ใช้ลากขึ้นรูปด้วยสลิ่เหล็กมจัตุรัสแบบมีปีก.	50
3.4	ตัวอย่างใบบันทึกผลการทดลองการวัดค่าความหยาบผิว.....	51
3.5	ตัวอย่างใบบันทึกผลการทดลองการวัดค่าความหนาของชิ้นงาน .....	52





## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1	ชิ้นส่วนรถยนต์ที่ผลิตด้วยกระบวนการพับขึ้นรูปตัวยู และกระบวนการลากขึ้นรูป..... 1
2.1	ประเภทของเหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ แบ่งตามความสัมพันธ์ของความแข็งแรง ..... 5
2.2	กระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น ..... 6
2.3	ลักษณะของแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการลากขึ้นรูป ..... 7
2.4	ก่อนและหลังการลากขึ้นรูปโลหะ ..... 8
2.5	ความเค้นที่เกิดขึ้นของโลหะแผ่นและค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงไป ..... 9
2.6	ขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด $\beta_{max}$ ..... 11
2.7	ค่าแรงดันของแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ต้องการในการลากขึ้นรูปครั้งแรก ..... 12
2.8	การแบ่งกล่องสี่เหลี่ยมออกเป็นส่วนต่างๆ ..... 16
2.9	การวิเคราะห์ที่มุมของกล่องสี่เหลี่ยม ..... 17
2.10	การไหลของของโลหะที่บริเวณผนังส่วนตรงของการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม ..... 18
2.11	ลักษณะของรอยย่นที่เกิดจากอัตราการไหล ..... 19
2.12	แรงลากขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการจำลองวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ..... 19
2.13	แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมเทียบกับรัศมีคายต่างๆ ..... 23
2.14	ความหนาบริเวณมุมกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสในตำแหน่งต่างๆ ..... 23
2.15	ความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กเกรด SAPH 440 หลังการพับขึ้นรูปตัวยู ..... 25
2.16	ความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กเกรด SPFH 590 หลังการพับขึ้นรูปตัวยู ..... 25
3.1	แผนภาพการไหลแสดงกระบวนการในการทำวิจัย ..... 28
3.2	ขนาดของแผ่นชิ้นงานก่อนการลากขึ้นรูป ..... 29
3.3	ชิ้นงานทดสอบความต้านแรงดึงและความยืด ..... 29
3.4	เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ..... 30
3.5	เครื่องปั๊มไฮดรอลิกแรงอัดสูงสุด 80 ตัน ..... 32
3.6	อุปกรณ์เครื่องวัดความเรียบผิวของชิ้นงาน ..... 33
3.7	เครื่องวัดความเรียบผิวของชิ้นงาน ..... 33
3.8	เครื่องมือวัดความหนาของชิ้นงาน ..... 34
3.9	ลักษณะของชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก ..... 35

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.10 ภาพหน้าตัดของรัศมีมุมพื้นซ์ ( $r_p$ ) และรัศมีมุมคาย ( $r_d$ ).....	35
3.11 ลักษณะชิ้นงานที่ต้องการ.....	40
3.12 เพื่อช่วยประมาณค่าแผ่นชิ้นงาน .....	42
3.13 การนำแม่พิมพ์ขึ้นเครื่องปั๊มไฮดรอลิก.....	44
3.14 การกดแม่พิมพ์ด้วยเครื่องปั๊มไฮดรอลิก.....	44
3.15 การยึดแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องปั๊มไฮดรอลิก.....	45
3.16 การตั้งระยะคูชิ้น.....	45
3.17 การตั้งลิมิตสวิทช์ (Limit Switch) .....	46
3.18 แม่พิมพ์พร้อมใช้งาน .....	46
3.19 ชิ้นงานจากการทดสอบแม่พิมพ์ครั้งที่ 1.....	47
3.20 ชิ้นงานจากการทดสอบแม่พิมพ์ครั้งที่ 2.....	48
3.21 ชิ้นงานจากการทดสอบแม่พิมพ์ครั้งที่ 3.....	48
3.22 การเชื่อมต่ออุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ .....	49
3.23 ตำแหน่งในการวัดค่าความหนาผิว.....	50
3.24 ตำแหน่งในการวัดความหนาของผนังด้วย.....	51
4.1 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงานเกลียวเหล็ก SPCC ที่รัศมีบ่าคายแต่ละระดับ .....	54
4.2 ตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปเหล็ก SPCC ที่รัศมีบ่าคายแต่ละระดับ.....	54
4.3 แรงลากขึ้นรูปและแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเกลียวต่อระยะกดดัดเหล็ก SPCC .....	55
4.4 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงานเกลียวเหล็ก SAPH 440 ที่รัศมีบ่าคายแต่ละระดับ.....	56
4.5 ตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปเหล็ก SAPH 440 ที่รัศมีบ่าคายแต่ละระดับ.....	57
4.6 แรงกดขึ้นรูปและแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานต่อระยะกดดัดเหล็ก SAPH 440.....	57
4.7 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงานเกลียวเหล็ก SPCC กับเหล็ก SAPH 440 ที่รัศมีบ่าคายแต่ละระดับ..	58
4.8 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงานจากการทดลองและการคำนวณ ที่รัศมีบ่าคายแต่ละระดับ.....	59
4.9 ความกว้างของชิ้นงานรวมปีกเกลียวเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 ที่รัศมีบ่าคายแต่ละระดับ.....	60
4.10 ความหนาผนังด้านตรงของชิ้นงานเกลียวเหล็ก SPCC ที่รัศมีบ่าคายแต่ละระดับ .....	61
4.11 ความหนาผนังด้านตรงของชิ้นงานเกลียวเหล็ก SAPH 440 ที่รัศมีบ่าคายแต่ละระดับ .....	61

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.12 ความหนาผนังบริเวณมุมด้วยเจดีย์เหล็ก SPCC ที่รัศมีบาคายแต่ละระดับ .....	62
4.13 ความหนาผนังบริเวณมุมด้วยเจดีย์เหล็ก SAPH 440 ที่รัศมีบาคายแต่ละระดับ.....	63



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$A_{BH}$	พื้นที่ที่แผ่นกดชิ้นงานสัมผัสชิ้นงาน
$A_1$	พื้นที่หน้าตัดของพินซ์
$A_0$	พื้นที่หน้าตัดของแผ่นชิ้นงาน
$a$	ความยาวส่วนที่ตรงของกล่องสี่เหลี่ยม
$b$	ความกว้างส่วนที่ตรงของกล่องสี่เหลี่ยม
$c$	ตัวประกอบแรงเฉือนภาคมีค่าอยู่ระหว่าง 2 ~ 3
$d_1$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพินซ์
$d_0$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงาน
$d_m$	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย
$F_d$	แรงที่ใช้ในการลากชิ้นรูปชิ้นงาน
$F_{d,max}$	แรงสูงสุดที่ใช้ในการลากชิ้นรูปชิ้นงาน
$F_{BH}$	แรงในการจับยึดชิ้นงาน
$F_{cr}$	แรงที่ทำให้เกิดการแตก
$h$	ความสูงของกล่องสี่เหลี่ยมส่วนที่ตรง
$h_s$	ความสูงของผนังด้านข้างของกล่องสี่เหลี่ยม
$h_{s,a}$	ความสูงของผนังด้านข้างที่เอาออก
$h_{s,a(Correct)}$	ความสูงของผนังด้านข้างที่ถูกต้อง
$L_1$	ความยาวหลังการทดสอบ
$L_0$	ความยาวก่อนการทดสอบ
$MS_E$	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองเนื่องจากความผิดพลาดแบบสุ่ม
$MS_{Tr}$	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของปัจจัย
$P_{BH}$	ความดันบนแผ่นกดชิ้นงาน
$r_B$	รัศมีส่วนก้นของกล่องสี่เหลี่ยม
$r_c$	รัศมีมุม โคนของกล่องสี่เหลี่ยม
$r_d$	รัศมีคายน
$r_p$	รัศมีพินซ์

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

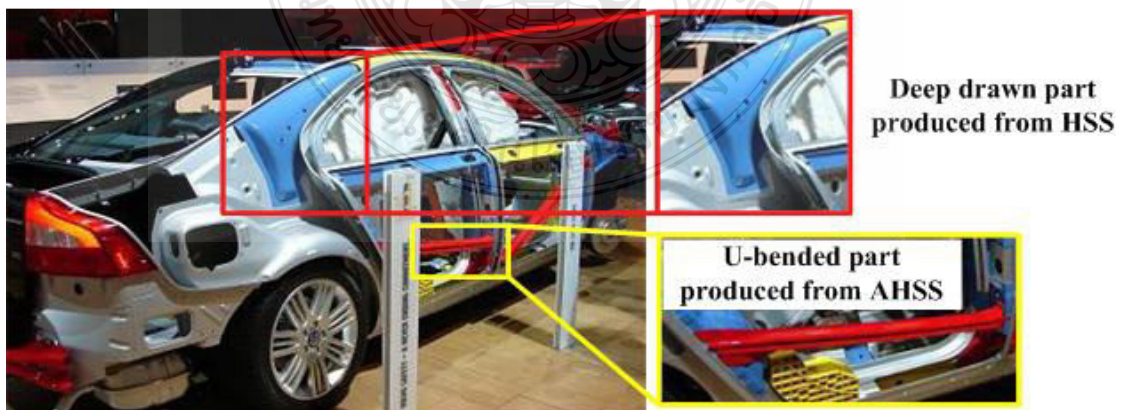
$SS_E$	ผลบวกกำลังสองเนื่องจากความผิดพลาดแบบสุ่ม
$SS_T$	ผลบวกกำลังสองทั้งหมด
$SS_{Tr}$	ผลบวกกำลังสองเนื่องจากปัจจัย
$s_0$	ความหนาแน่นเปล่า
$S_u$	ค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ
$t$	ความหนาชิ้นงาน
$v_E$	ดีกรีของความอิสระ
$v_{Tr}$	ดีกรีของความอิสระของปัจจัย
$a_{cr}$	ค่าองค์ประกอบตัวคูณการแตกของวัสดุ
$\beta$	อัตราส่วนการลากขึ้นรูป
$\beta_{max}$	ขีดจำกัดอัตราส่วนในการลากขึ้นรูป
$\eta_{def}$	ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูป
$\sigma_t$	ค่าการกระจายปกติ
$\sigma_t$	ความดันในแนวเส้นรอบวง
$\sigma_r$	ความดันในแนวรัศมี
$\sigma_u$	ความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุ

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันทั่วโลกมีแนวโน้มใช้พลังงานเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นทุกวัน แต่แหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่นำมาใช้กลับมีปริมาณลดน้อยลง ทำให้เชื้อเพลิงมีราคาสูงขึ้นตามลำดับ ทำให้บริษัทผู้ผลิตรถยนต์ชื่อดังต่างๆ ทั่วโลก ต่างสนใจที่จะออกแบบรถยนต์ของตนเองให้ประหยัดการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงมากขึ้น เช่น ออกแบบระบบการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง หรือออกแบบระบบเครื่องยนต์ที่เรียกว่า ไฮบริด (Hybrid) ซึ่งเป็นการผสมผสานการทำงานระหว่างเครื่องยนต์กับมอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนรถยนต์เพื่อช่วยประหยัดการใช้น้ำมัน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง เช่น จำนวนผู้โดยสาร ปริมาณสัมภาระ และน้ำหนักของตัวรถ ทำให้บริษัทผู้ผลิตรถยนต์ต่างๆ พยายามลดน้ำหนักของตัวรถให้น้อยลงด้วยการนำเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง High Tensile Steel (HSS) [1] มาใช้เสริมในโครงสร้างตัวถัง เพื่อลดน้ำหนักของตัวรถลงโดยยังคงความแข็งแรงของวัสดุ รวมทั้งเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างตัวถังรถ ช่วยลดการยุบตัวจากแรงกระแทกที่เกิดจากการชน และช่วยประหยัดอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงได้อีกด้วย สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่นำมาเสริมในโครงสร้างรถ ส่วนใหญ่จะเป็นชิ้นส่วนที่เป็นคานกันชนหรือคานกันกระแทก และชิ้นส่วนรับแรงต่างๆ ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการพับขึ้นรูปตัวยู (U – Channel Bending Process) และกระบวนการลากขึ้นรูปลึก (Deep – Drawing Process) แสดงดังภาพที่ 1.1 เนื่องจากกระบวนการทั้งสองเป็นกระบวนการหลักที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ [2]



ภาพที่ 1.1 ชิ้นส่วนรถยนต์ที่ผลิตด้วยกระบวนการพับขึ้นรูปตัวยู และกระบวนการลากขึ้นรูป [2]

กระบวนการลากขึ้นรูปลึก (Deep – Drawing Process) เป็นกระบวนการที่สลับซับซ้อน เนื่องจากการลากขึ้นรูปลึกจะเกี่ยวข้องกับตัวแปรหลายชนิด เช่น รูปร่างของแผ่นเปล่า รัศมีของพื้นซ์ และคาย ระยะช่องว่างพื้นซ์และคาย แรงกดของแผ่นคยัคขึ้นงาน และสารหล่อลื่นที่ใช้ การลากขึ้นรูปที่ไม่สมมาตร เช่น การลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมซึ่งถือว่าเป็นพื้นฐานมากที่สุดในการลากขึ้นรูป การไหลตัวของวัสดุเหล็กผ่านช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคาย จะควบคุมการไหลตัวได้ยาก [3] จึงจำเป็นต้องพิสูจน์ให้เห็นถึงตัวแปรเหล่านั้นว่ามีผลต่อการลากขึ้นรูปอย่างไร นอกจากนี้การนำเหล็กแผ่นมาใช้ในกระบวนการขึ้นรูปลึกยังต้องคำนึงถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานสำเร็จ เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดกับชิ้นงานในกระบวนการลากขึ้นรูป [4 – 5] จากการศึกษา งานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่พบงานวิจัยที่ทำการศึกษาดังอิทธิพลของรัศมีป่าคาย(Die Radius) ในการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง เนื่องจากในอุตสาหกรรมอาจจะต้องมีการทดลองโดยใช้แม่พิมพ์ชุดเดิมที่ออกแบบสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน แล้วจึงทำการปรับแก้ให้เหมาะสมต่อไป ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรัศมีของแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die Radius) ในการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับ โครงสร้างยานยนต์ (Automobile Structural Steel) เกรด SAPH 440 (JIS) และเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC (JIS) เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง หาความสัมพันธ์ของตัวแปรในการลากขึ้นรูป สามารถนำอิทธิพลของตัวแปรในการลากขึ้นรูปไปใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่ ชิ้นงานรูปด้วยทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกโดยการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการลากขึ้นรูป เช่น รัศมีป่าคาย (Die Radius) แรงกดของแผ่นคยัคขึ้นงาน ความหนา และคุณภาพของชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูป

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาอิทธิพลของรัศมีป่าคายที่มีผลต่องานลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับ โครงสร้างยานยนต์

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกขนาดกันด้วยกว้าง 60 มม. ยาว 60 มม. ลึก 30 มม.

1.3.2 วัสดุเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC (JIS) และเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์ เกรด SAPH 440 (JIS) ขนาดความกว้าง 120 มม. ยาว 120 มม. หนา 1.4 มม.

1.3.3 ทำการศึกษาการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกที่รัศมีบ่าคาย 4 ระดับ คือ 6, 8, 10 และ 12 มม. รัศมีของบ่าพื้นซ์คงที่ 10 มม. รัศมีมุมพื้นซ์คงที่ 20 มม.

1.3.4 ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของรัศมีบ่าคายกับแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ความหนา ความหยาบผิว และคุณภาพของด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก

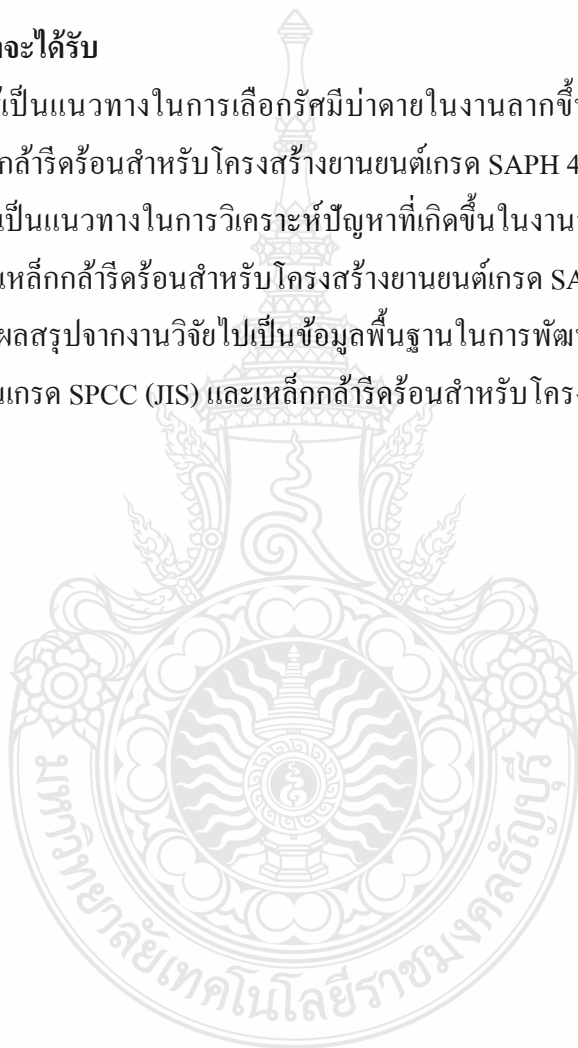
1.3.5 ศึกษาการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกโดยใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกรัศมีบ่าคายในงานลากขึ้นรูปเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC (JIS) และเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS)

1.4.2 สามารถใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในงานลากขึ้นรูปเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC (JIS) และเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS)

1.4.3 สามารถนำผลสรุปจากงานวิจัยไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาออกแบบในงานการลากขึ้นรูปเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC (JIS) และเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS)





## บทที่ 2

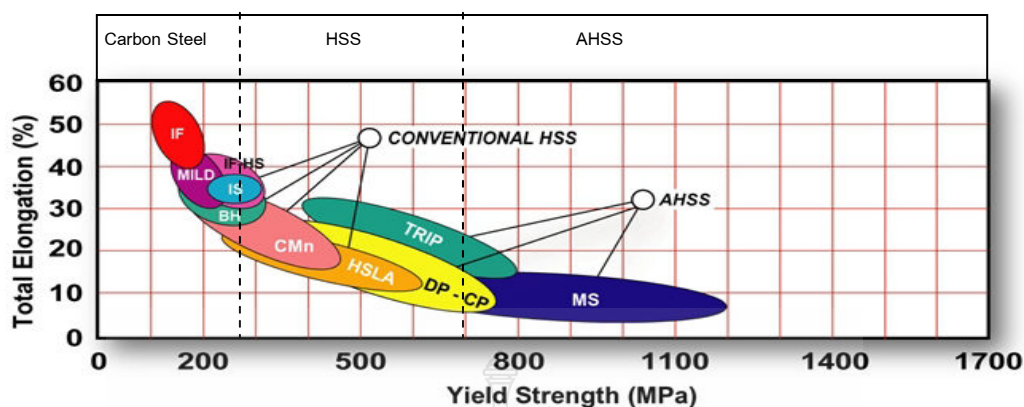
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองจำเป็นต้องนำความรู้จากหลายๆ ส่วนที่เกี่ยวข้องมาใช้ในกระบวนการวิจัย ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นช่วยในการออกแบบการทดลอง และช่วยตัดสินใจในการสรุปผลการทดลองในบทต่อไป

#### 2.1 วัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

Takita และคณะ [1] ได้กล่าวถึงการนำ HSS เป็นวัสดุในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในประเทศญี่ปุ่นเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งก็ทำให้น้ำหนักของรถยนต์รุ่นใหม่ที่ถูกผลิตออกมามีน้ำหนักลดลงด้วยการใช้งานของเหล็กกลุ่มดังกล่าว จะพิจารณาถึงลักษณะการใช้งานของชิ้นส่วนยานยนต์นั้น เช่น ชิ้นส่วนเสริมแรงของประตูรถ กันชนรถ และในอีกหลายชิ้นส่วน จะใช้เหล็กที่มีค่าความแข็งแรงไม่เกิน 590 MPa ส่วนกรณีเหล็กที่มีค่าความแข็งแรงเกินนี้จะใช้สำหรับผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างง่าย ไม่ซับซ้อน เพื่อป้องกันการบิดตัวกลับของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปอ่อนเนื่องมาจากค่าความแข็งแรงที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากปัญหาการบิดตัวกลับ และความสามารถในการขึ้นรูปที่ลดต่ำลงแล้ว ค่าความแข็งแรงที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ต้องเปลี่ยนวิธีการขึ้นรูป และต้องปรับปรุงและพัฒนาเครื่องมือเพื่อใช้ในการขึ้นรูปให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

International Iron & Steel Institute ได้จัดการประชุมร่วมกันระหว่างบริษัทผู้ผลิตเหล็กจากทั่วโลก เพื่อกำหนดประเภทเหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยพิจารณาจากสมบัติทางด้านโลหะวิทยา และสมบัติทางกลของวัสดุ จากการประชุมดังกล่าวสามารถแบ่งประเภทเหล็กเป็นประเภทใหญ่ได้ 3 ประเภท แสดงดังภาพที่ 2.1 คือเหล็กกล้าคาร์บอน (Mild Steel or Low Strength Steel) เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (HSS) และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเป็นพิเศษ (AHSS) โดยเหล็กที่มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) น้อยกว่า 270 MPa จะจัดอยู่ในประเภทเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กที่มีค่าความแข็งแรงดึงระหว่าง 270 ถึง 700 MPa จะเป็นเหล็ก HSS และถ้าค่าความแข็งแรงดังกล่าวมีค่ามากกว่า 700 MPa ก็จะจัดอยู่ในกลุ่มเหล็ก AHSS ซึ่งโดยปกติเหล็ก HSS จะมีโครงสร้างแบบเฟสเดียว (Single Phase) ที่เป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ส่วนเหล็ก AHSS จะมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นแบบหลายเฟส (Multi Phase) ซึ่งอาจประกอบด้วย เฟอร์ไรต์ มาร์เทนไซต์ (Martensite) เบไนท์ (Bainite) และ/หรือ มีส่วนผสมของออสเทนไนท์ (Austenite) รวมอยู่ด้วย [2]



ภาพที่ 2.1 ประเภทของเหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ แบ่งตามความสัมพันธ์ของความแข็งแรง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว [2]

จากภาพที่ 2.1 จะพบว่าเมื่อค่าความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation %) ของวัสดุจะลดลง และเมื่อค่าความแข็งแรงของวัสดุสูงตามทฤษฎีค่าความแข็งแรงก็จะแปรผันตามด้วย

## 2.2 ทฤษฎีการขึ้นรูปโลหะ

ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น จะมีแรงมากระทำต่อชิ้นงานโลหะแผ่น (Sheet Metal Blank) จึงเป็นสาเหตุให้มีการเปลี่ยนรูปร่างขึ้นงานอย่างถาวร ความเค้นที่เกิดจากการขึ้นรูปที่โลหะขึ้นงานจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของโลหะขึ้นงานมิฉะนั้นชิ้นงานจะฉีกขาดนำไปใช้งานไม่ได้ ความเค้นที่เกิดจากการขึ้นรูปจะเกิดบนพื้นที่บางส่วนของพื้นที่ขึ้นงาน และมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดแล้วมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งความเค้นมีค่าเป็นศูนย์ตรงบริเวณพื้นที่ที่ห่างจากบริเวณพื้นที่ที่มีการขึ้นรูป การเปลี่ยนรูปร่างของโลหะขึ้นงานอย่างถาวรนั้นเกิดจากมีค่าความเค้นที่เกิดจากการขึ้นรูปมีค่ามากกว่าจุดคราก (Yield Point) ของโลหะขึ้นงาน [6] ดังนั้นกระบวนการขึ้นรูปโลหะสามารถแบ่งตามลักษณะความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุขึ้นงานได้ 5 กลุ่ม [4] คือ

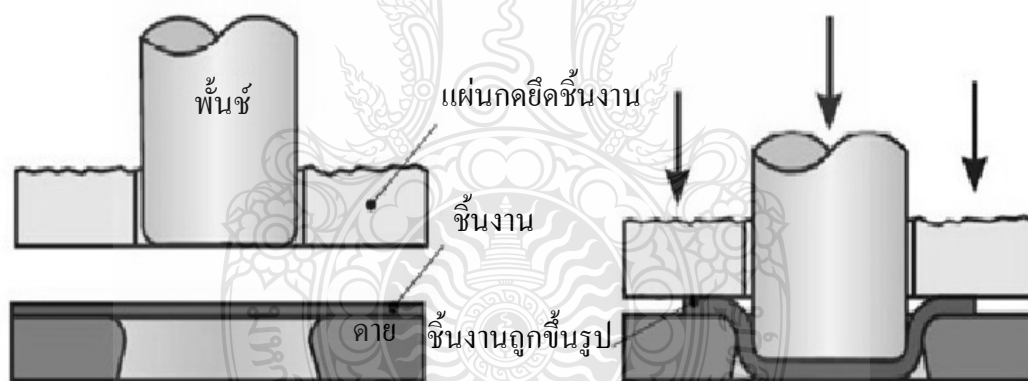
- 2.2.1 การขึ้นรูปภายใต้สภาวะความเค้นอัด (Compressive Forming) เช่น การรีด (Rolling)
- 2.2.2 การขึ้นรูปภายใต้สภาวะความเค้นดึง และสภาวะความเค้นอัด (Combined Tensile and Compressive Forming) เช่น การลากขึ้นรูป (Deep Drawing)
- 2.2.3 การขึ้นรูปภายใต้สภาวะความเค้นดึง (Tensile Forming) เช่น การยืด (Stretching)

2.2.4 การขึ้นรูปภายใต้สภาวะความเค้นดัด (Forming by Bending) เช่น การดัด (Bending)

2.2.5 การขึ้นรูปภายใต้สภาวะความเค้นเฉือน (Forming by Shearing) เช่นการตัดเฉือน (Shearing) เป็นต้น

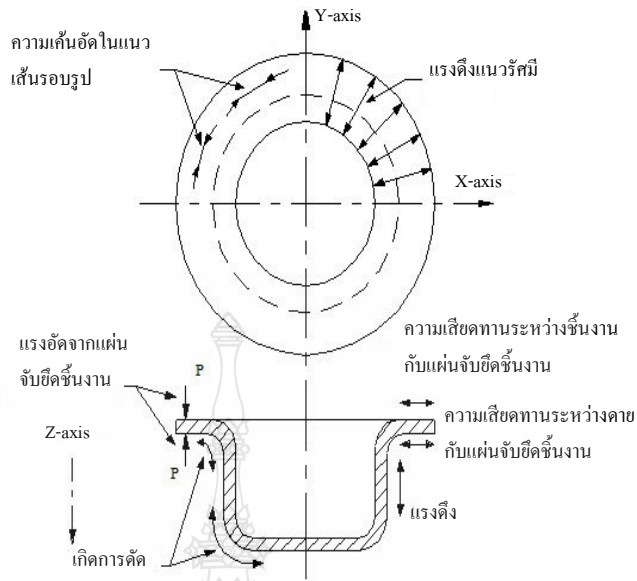
### 2.3 กระบวนการลากขึ้นรูปโลหะ

เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น [4 – 5] ภายใต้สภาวะความเค้นอัด และสภาวะความเค้นดึง กระบวนการนี้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมขึ้นรูปโลหะแผ่นเช่นเดียวกับกระบวนการดัดขึ้นงาน การลากขึ้นรูปสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ การลากขึ้นรูปขึ้นงานโดยไม่ใช้แผ่นจับยึดขึ้นงาน (Deep Drawing without a Blank Holder) และการลากขึ้นรูปโดยใช้แผ่นจับยึดขึ้นงาน (Deep Drawing with a Blank Holder) ในการสร้างแรงกดขึ้นงานขณะขึ้นรูปซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมมากที่สุด โดยโลหะแผ่นจะถูกขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่ประกอบด้วย พันช์ (Punch) ดाय (Die) และแผ่นจับยึดขึ้นงาน (Blank Holder) แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 กระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น [5]

กระบวนการนี้โลหะแผ่นจะถูกลากผ่านรัศมีดาบเข้าสู่ดาบ โดยมีแผ่นกดยึดขึ้นงานควบคุมการไหลเพื่อไม่ให้บริเวณปีกขึ้นงานเกิดรอยย่นการควบคุมการไหลของวัสดุขึ้นงานสามารถกระทำได้โดยควบคุมแรงกดที่แผ่นกดยึดขึ้นงาน กระบวนการนี้ความหนาของโลหะขึ้นงานจะไม่เปลี่ยนแปลง แผ่นขึ้นงานที่ตำแหน่งต่างๆจะเกิดทั้งการดัด (Bending) การดัดกลับ (Re – Bending) และถูกยืดให้ตรง (Straightening Out) ซึ่งจะเกิดสภาวะแรงต่างๆ ณ ช่วงการลากขึ้นรูปดังแสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ลักษณะของแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการลากขึ้นรูป [7]

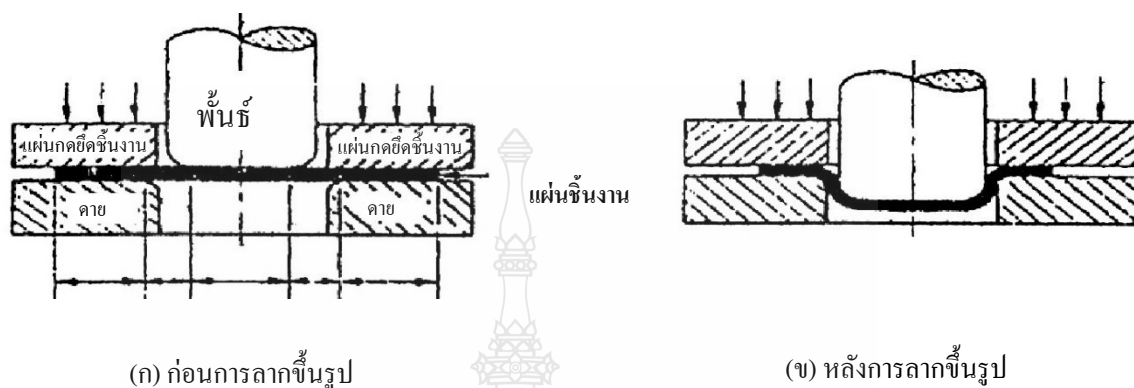
จากภาพที่ 2.3 เมื่อพิจารณาสถานะของความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุแผ่นงาน ที่บริเวณก้นถ้วยที่พื้นซ์เคลื่อนที่ลงมากดนั้นจะเกิดความเค้นดึงในสองแนวแกน (Biaxial Tension) เนื่องจากการตัดที่บริเวณบ่าของพื้นซ์ และบริเวณผนังถ้วยจะมีสถานะที่ถูกดึงเกิดความเค้นดึง เนื่องจากวัสดุแผ่นงานในบริเวณนี้ผ่านขั้นตอนคือ การคด การคดกลับ และการทำให้ตรง ซึ่งจะเคลื่อนที่สัมผัสไปกับพื้นซ์ที่เป็นตัวบังคับซึ่งไม่ทำให้เกิดการหดตัวในแนวรัศมี ที่บริเวณปีกถ้วยนั้นจะเกิดความเค้นดึงในแนวรัศมี (Radial Tension) และความเค้นอัดในแนวเส้นรอบรูป (Circumferential Compression)

### 2.3.1 การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังถ้วย

ในกระบวนการลากขึ้นรูปโดยที่แผ่นโลหะเคลื่อนที่ผ่านแม่พิมพ์นั้นจะเกิดการยึดตัวอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นโลหะกับแม่พิมพ์ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกดแผ่นโลหะ (Blank Holder Force) ความเค้นดึงและอัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการลดขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นโลหะในการขึ้นรูป ซึ่งสาเหตุต่างๆเหล่านี้จะทำให้เกิดการบางลงของผนังถ้วยของชิ้นงาน นอกจากนี้ความหนาของผนังถ้วยที่ลดลงนี้จะมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบต่างๆ ในกระบวนการลากขึ้นรูป ตัวอย่างเช่น แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงาน (Blank Holder Force) ความเร็วในการลากขึ้นรูป สารหล่อลื่น รูปร่างของชิ้นงาน เป็นต้น

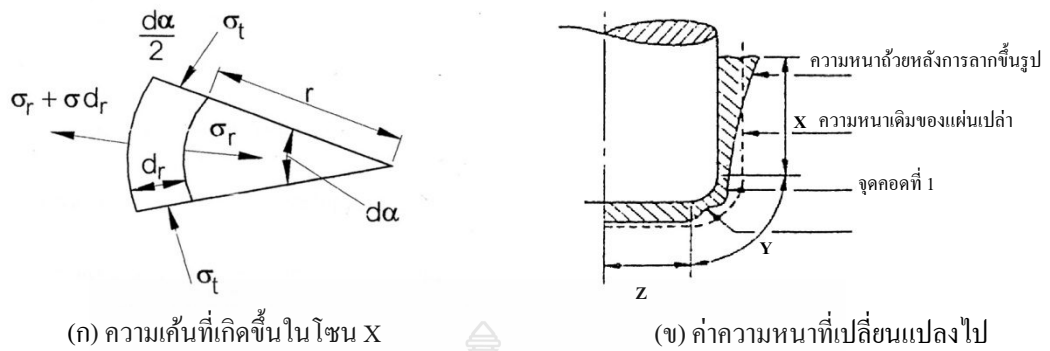
เมื่อเรามาพิจารณาในกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะในรายละเอียดที่ลึกลงไปอีกโดยจะพิจารณาประกอบกับภาพที่ 2.4 (ก) เราจะแบ่งโลหะแผ่นที่จะนำมาขึ้นรูปออกเป็น 3 โซน ได้แก่ โซน

X, Y และ Z ซึ่งโซน X วัสดุชิ้นงานโลหะแผ่นจะสัมผัสกับแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) และส่วนที่ใช้กดชิ้นงานโลหะแผ่น (Blank Holder) โซน Y จะไม่สัมผัสกับแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) หรือ แม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) และ โซน Z จะสัมผัสกับส่วนหัวของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Head)



ภาพที่ 2.4 ก่อนและหลังการลากชิ้นรูปโลหะ [3]

เนื่องจากกระบวนการลากชิ้นรูปทรงสูงแสดงดังภาพที่ 2.4 เนื้อชิ้นงานในโซน X จะถูกลากชิ้นรูปไปตามรูปร่างของแม่พิมพ์ ภายใต้อิทธิพลของความเค้นในแนวรัศมี (Radial Tensile Stress,  $\sigma_r$ ) และผลของการลดลงของรัศมีในโซนนี้จะนำไปสู่การเกิดความเค้นในแนวเส้นรอบวง (Compressive Circumferential Stress,  $\sigma_c$ ) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้นแสดงดังภาพที่ 2.5 (ก) ถ้าไม่มีความดันมาออกแรงแผ่นกดยึดชิ้นงาน (Blank Holder) ความเค้นในแนวเส้นรอบวง ( $\sigma_c$ ) จะทำให้เกิดรอยย่น (Wrinkle) เมื่อเนื้อชิ้นงานในโซน X ไหลผ่านตามรูปร่างของแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die profile) มันจะถูกทำให้บางลงภายใต้ความเค้นดึง (Tensile Stress) ซึ่งแผ่นโลหะจะถูกดึงให้ยืดออกจนกลายเป็นผนังของถ้วยระหว่างแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) สุดท้ายยส่วนทางด้านของโซน X จะถูกทำให้บางมากกว่าปกติ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงที่เกิดขึ้นระหว่างแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) ส่วนด้านนอกของโซน X ก็จะมี ความหนาเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.5 ความเค้นที่เกิดขึ้นของโลหะแผ่นและค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงไป [3]

จากภาพที่ 2.5 (ข) 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 จากข้างต้นเราสามารถทราบความเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังด้วยรูปทรงกระบอกที่เกิดจากกระบวนการลากขึ้นรูป

2.3.2 การคำนวณหาขนาดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้น

การคำนวณหาขนาดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นอันดับแรก นอกเหนือจากรูปร่างชิ้นงานสุดท้ายที่ต้องการแสดงดังตารางที่ 2.1 สมการการหาขนาดชิ้นงานเริ่มต้น (Blank Diameter, D) ของชิ้นงานที่มีรูปร่างที่ไม่ซับซ้อน ในตารางดังกล่าวเป็นสมการการหาขนาดของชิ้นงานด้วยทรงกลมที่กั้นด้วยมีค้ำรัศมีน้อยกว่า 10 มม. กรณีที่มีปีกและไม่มีปีกชิ้นงาน

ตารางที่ 2.1 การหาขนาดชิ้นงานเริ่มต้นด้วยทรงกลมกรณีมีปีกและไม่มีปีกชิ้นงาน [5]

ภาพตัดขวางชิ้นงานรูปทรงด้วยสมมาตร	ขนาดชิ้นงานเริ่มต้น (D)
	$D = \sqrt{d^2 + 4dh}$
	$D = \sqrt{d_2^2 + 4d_1h}$

สำหรับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนสมการการคำนวณจะไม่ตายตัวจำเป็นต้องทดลองโดยการทดลองผิดทดลองถูก (Trial and Error) ซึ่งต้องอาศัยประสบการณ์ช่วยในการหาขนาดของแผ่นชิ้นงานเริ่มต้น ซึ่งขนาดของชิ้นงานเริ่มต้นนี้จะเป็นตัวกำหนดขั้นตอนการลากขึ้นรูปด้วย แต่ในปัจจุบันมีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณและออกแบบการขึ้นรูปโลหะ ซึ่งทำให้ง่ายและสะดวกในการหาค่าดังกล่าว

### 2.3.3 อัตราส่วนการลากขึ้นรูป

อัตราส่วนการลากขึ้นรูป (Drawing Ratio;  $\beta$ ) เป็นค่าที่สำคัญในการหาจำนวนครั้งในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วย ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานเริ่มต้น ( $d_0$ ) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูป ( $d_1$ ) ของการลากขึ้นรูปด้วยที่เหมาะสมของวัสดุซึ่งจะต้องไม่เกินขีดจำกัดการขึ้นรูป (Limiting Drawing Ratio; LDR) หรือ  $\beta_{\max}$  จึงจะทำให้ไม่เกิดการฉีกขาดของชิ้นงานในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยโดยปกติแล้วการขึ้นรูปโลหะแผ่นจะกำหนดค่า  $\beta_{\max}$  ไม่เกิน 2.1 หรือ ประมาณอัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานเริ่มต้นต่อขนาดความหนาชิ้นงานเริ่มต้น ( $d_0/s_0$ ) เท่ากับ 50 หรือดังแสดงดังตารางที่ 2.2 แต่ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นอีก เช่น ค่าความเสียดทานระหว่าง ผิวคู่สัมผัสชิ้นงานกับแม่พิมพ์ รัศมีของคายเป็นต้น [4]

ตารางที่ 2.2 ขีดจำกัดการขึ้นรูปสูงสุดของวัสดุแต่ละชนิด [4]

Material	$\beta_{\max}$
Steel sheet, depending on quality	1.8 – 2.2
Aluminum, Copper, Al Cu Mg sheet	2.1
Brass sheet, Depending on Pre strain	1.7 – 2.2

การกำหนดค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปที่เรียกว่า  $\beta_{\max}$  เป็นค่าของการดึงขึ้นรูปที่เหมาะสมของวัสดุ และขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นชิ้นงาน ( $d_0$ ) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ ( $d_1$ ) ดังสมการที่ 2.1

$$\beta_{\max} = \frac{d_0}{d_1} \quad (2.1)$$

แต่ในกรณีที่เป็นการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม ให้เราทำการเทียบ (Equivalent) โดยทำการเทียบพื้นที่หน้าตัดของพื้นที่ให้เท่ากับ ( $d_1$ ) และเทียบพื้นที่หน้าตัดของแผ่นชิ้นงานให้เท่ากับ ( $d_0$ ) โดยสามารถทำได้ดังนี้

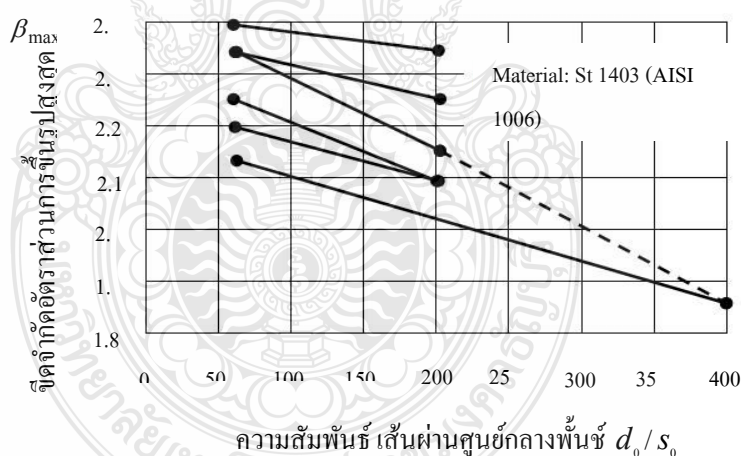
$$A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}, \quad A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$$

เมื่อ  $A_0 =$  พื้นที่หน้าตัดของแผ่นชิ้นงาน  
 $A_1 =$  พื้นที่หน้าตัดของพินซ์

$$d_0 = 2\sqrt{\frac{A_0}{\pi}} \quad (2.2)$$

$$d_1 = 2\sqrt{\frac{A_1}{\pi}} \quad (2.3)$$

ค่า  $\beta_{\max}$  เป็นค่าที่มีผลกระทบตามค่าตัวแปรหลายตัว สิ่งหนึ่งที่เป็นตัวแปรสำคัญที่สุด คือ อัตราส่วนความหนาของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงานที่มีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางพินซ์ ( $d_0/s_0$ ) โดยปกติค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด  $\beta_{\max}$  จะสูงขึ้นถ้ามีความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางพินซ์ ( $d_0/s_0$ ) มีค่าต่ำลง ดังนั้น การปฏิบัติงานในระบบของการหล่อลิ้นในการดึงขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด  $\beta_{\max}$  ด้วย ดังนั้น ค่าความเค้นดัดที่คายและแผ่นกดยึดชิ้นงานจะมีค่าน้อยลง แต่สัมพันธ์กับความเค้นดัดที่พินซ์มีค่ามากขึ้น จึงสามารถใช้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปที่มีค่ามากได้ ดังแสดงดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด  $\beta_{\max}$  [8]

### 2.3.4 แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป

ในการลากขึ้นรูปชิ้นงานจำเป็นต้องรู้ขนาดของแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปชิ้นงานด้วย (Deep Drawing Force;  $F_d$ ) แรงที่ใช้ในการควบคุมการไหลตัวของวัสดุชิ้นงานด้วยแผ่นกดยึดชิ้นงาน



(Blank Holder Force;  $F_{BH}$ ) เพื่อใช้ในการเลือกขนาดของเครื่องจักรที่ต้องการแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปชิ้นงานหาได้จากแรงลากขึ้นรูปสูงสุด ( $F_{d,max}$ ) ดังสมการที่ 2.4

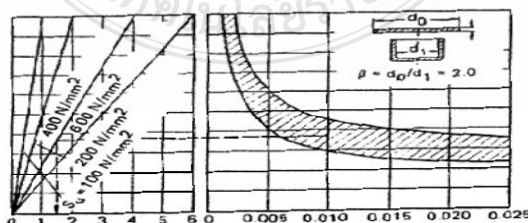
$$F_{d,max} = \pi d_m t \left[ 1.1 \frac{1.3 \sigma_u}{\eta_{def}} \left( \ln \frac{d_0}{d_1} - 0.25 \right) \right] \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\sigma_u$  = ความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุ (N/mm<sup>2</sup>)  
 $\eta_{def}$  = ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูป ซึ่งมีค่าอยู่ในระหว่าง 0.5 – 0.7  
 $t$  = ความหนาชิ้นงาน (mm)  
 $d_m$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย  
 (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นรับความหนาชิ้นงาน) (mm)

ในการลากขึ้นรูปชิ้นงานการใช้แผ่นกดยึดชิ้นงานควบคุมการไหลตัวของวัสดุเพื่อไม่ให้บริเวณปีกชิ้นงานเกิดรอยย่น (Wrinkle) สามารถกระทำได้ด้วยการสร้างแรงดันผ่านแผ่นกดยึดชิ้นงานเพื่อควบคุมการไหลตัวของวัสดุชิ้นงานขณะขึ้นรูป หาได้จากสมการที่ 2.5 แรงกดที่ใช้ในการหลีกเลี่ยงรอยย่นนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุของแผ่นชิ้นงาน โดยจะสัมพันธ์กับความหนาและอัตราส่วนการขึ้นรูปของวัสดุ แรงกดของแผ่นกดยึดชิ้นงานสามารถประมาณค่าได้โดยใช้สมการที่ 2.6 ในที่นี้ตัวประกอบค่า C มีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 3 เป็นการคำนวณหาค่าแรงกด โดยใช้อัตราส่วนการขึ้นรูป  $\beta = 2.0$  และใช้วัสดุที่มีค่าแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) เท่ากับ 100, 200, 400 และ 600 N/mm<sup>2</sup> ถูกพล็อตขึ้นมาเป็นกราฟแสดงดังภาพที่ 2.7 โดยสัมพันธ์กันกับค่าความหนาของวัสดุ [9]

$$P_{BH} = 10^3 c \left[ (\beta - 1)^2 + \frac{0.005 d_0}{s_0} \right] S_u \quad (2.5)$$

เมื่อ  $P_{BH}$  = ความดันบนแผ่นกดชิ้นงาน (N/mm<sup>2</sup>)  
 $c$  = ตัวประกอบแรงลักษณะมีค่าอยู่ระหว่าง 2 ~ 3  
 $\beta$  = อัตราส่วนการลากขึ้นรูป



ก. ความดันของตัวเหยียบ ( $P_{BH}$ ) N/mm<sup>2</sup>

ข. ความหนาแผ่นสัมพันธ์  $S_u/d_0$

ภาพที่ 2.7 ค่าแรงดันของแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ต้องการในการลากขึ้นรูปครั้งแรก [10]

ดังนั้นแรงในการควบคุมการไหลตัวของชิ้นงานเพื่อป้องกันการเกิดรอย่นบริเวณปีก  
ชิ้นงานสามารถหาได้จากสมการที่ 2.6

$$F_{BH} = A_{BH} \times P_{BH} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $A_{BH}$  = พื้นที่ที่แผ่นกดชิ้นงานสัมผัสชิ้นงาน ( $\text{mm}^2$ )

ขนาดของแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงาน (Blank Holder Force) ซึ่งเป็นแรงที่ใช้เพื่อป้องกันการ  
เกิดรอย่นและการโค้งงอของปีกชิ้นงานซึ่งเกิดจากความเค้นอัดในแนวสัมผัส (แนวเส้นรอบวง) โดยที่  
ขนาดของแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานที่พอเพียงสำหรับป้องกันไม่ให้เกิดรอย่นได้นั้นหาได้จากการทดลอง  
เป็นสำคัญ หรือสามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 2.7 [11]

$$F_{BH} = \frac{F_{d,max}}{3} \quad (2.7)$$

ถ้าขนาดของแรงกดไม่พอจะทำให้เกิดการ่นของโลหะขึ้นซึ่งรอย่นเหล่านี้จะทำให้โลหะ  
ไม่สามารถไหลตัวได้ และบริเวณกันของกล่องสี่เหลี่ยมของชิ้นงานก็จะถูกพันซ์คั้นจนฉีกขาด ใน  
ขณะเดียวกันถ้าแรงกดของแผ่นกดยึดชิ้นงานมากเกินไป โลหะก็จะไม่สามารถที่จะไหลตัวได้เช่นกัน  
ชิ้นงานก็จะถูกคั้นจากพันซ์ฉีกขาดอีกเหมือนกัน สำหรับการขึ้นรูปแบบทรงกระบอกโลหะจะมีการ  
การไหลอย่างสม่ำเสมอและเท่ากันทุกจุดนั้น แรงกดของแผ่นกดยึดชิ้นงานก็จะใช้เท่ากันทุกจุดด้วย แต่  
ถ้าสำหรับการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมหรือทรงอื่นๆ ก็จะมีอัตราการไหลตัวของโลหะแต่ละจุดที่ไม่  
เท่ากัน ก็จะทำให้ใช้แรงกดของแผ่นกดยึดชิ้นงานไม่เท่ากันด้วย จึงมีการใช้ครอว์บิด (Draw Bead) เข้า  
มาใช้ตรงบริเวณที่ต้องการแรงกดมากเพื่อเพื่อมาช่วยทำให้การไหลตัวของโลหะช้าลง

### 2.3.5 แรงที่ทำให้เกิดการแตก [12]

แรงที่สามารถส่งผ่านวัสดุในบริเวณรัศมีพื้นซ์หรือบริเวณรอยต่อระหว่างผนังรูปถ้วยกับก้น  
ถ้วยจะเป็นเงื่อนไขจำกัดแรงการลากขึ้นรูปสูงสุดที่ยอมได้ แรงนี้เรียกว่าแรงฉีกขาด (Cracking Force)  
แรงนี้ต้องมีค่ามากกว่าแรงดึงสูงสุด มิฉะนั้นจะไม่สามารถลากขึ้นรูปถ้วยได้เพราะถ้วยจะเกิดการฉีก  
ขาดก่อนจะสำเร็จแรงฉีกขาดโดยประมาณ สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.8

$$F_{cr} = \pi \times d_m \times s_0 \times S_u \times a_{cr} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $F_{cr}$  = แรงที่ทำให้เกิดการแตก (N)

$d_m$  = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของถ้วย (mm)

$s_0$  = ความหนาของแผ่นโลหะ (mm)

$S_u$  = ค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ ( $\text{N/mm}^2$ )

$a_{cr}$  = ค่าองค์ประกอบตัวคูณการแตกของวัสดุชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2.3 ค่า  $a_{cr}$  ของวัสดุชนิดต่างๆ [12]

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

### 2.3.6 ระยะเพื่อช่องว่างของแม่พิมพ์

เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงต้านทานที่ผิวของแม่พิมพ์ ดังนั้นช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคาย (Die Clearance) จะต้องมากกว่าความหนาของโลหะ ซึ่งจะมากกว่าประมาณ 1.07 ถึง 1.2 เท่าของความหนาแผ่นชิ้นงาน และจำนวนครั้งของการลากขึ้นรูปซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.4 เป็นค่าช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคายซึ่งใช้ได้ทั้งในการลากขึ้นรูปทรงกระบอกและการลากขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมเพียงแต่ตรงส่วนมุมทั้ง 4 ด้านของกล่องสี่เหลี่ยมอาจจะต้องมีค่าช่องว่างพื้นซ์และคายมากกว่าส่วนทางด้านผนังกล่องสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 2.4 ระยะช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคาย [13]

ความหนาของแผ่นชิ้นงาน (มม.)	ช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคาย	
	ลากขึ้นรูปครั้งแรก	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 ค่าช่องว่างนี้ก็จะเพิ่มขึ้นอีก เช่น ช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคายในการลากขึ้นรูปครั้งแรกเท่ากับ 1.1 เท่าของความหนา และในการลากขึ้นรูปครั้งที่ 2 ต้องเพิ่มขึ้นเป็น 1.12 เท่า หรือ 1.14 เท่าของความหนาแผ่นเปล่า

### 2.3.7 ขนาดของรัศมีพื้นซ์และคาย

รัศมีพื้นซ์และรัศมีคายเป็นตัวแปรที่เกี่ยวกับการงอและการทำให้ตรงโดยที่รัศมีของพื้นซ์ที่ใช้ในการลากขึ้นรูปจะเป็นตัวกำหนดรัศมีของชิ้นงานที่ต้องการทำขึ้นมา ถ้ารัศมีที่เล็กจะทำให้ต้องใช้

แรงในการงอสูงกว่ารัศมีที่มีขนาดใหญ่ รัศมีของคายจะมีผลที่เกิดขึ้นในลักษณะคล้ายกับรัศมีของพื้นซ์ รัศมีของคายจะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งการงอครั้งแรกของชิ้นงาน ถ้าใช้รัศมีของคายเล็กไปจะทำให้เกิดแรงดึงที่ผนังชิ้นงานมากดังนั้นในการกำหนดรัศมีพื้นซ์และคาย จะขึ้นกับขนาดและความหนาของชิ้นงานถ้ารัศมีคายมีขนาดใหญ่จะก่อให้เกิดแนวโน้มในการทำให้เกิดรอยย่นมากกว่าในการหารรัศมีคายที่เหมาะสม โอห์เลอร์และไกเซอร์ (Oehler and Kaiser) [14] ได้พัฒนาดังสมการที่ 2.9

$$r_d = 0.035[50 + (d_0 - d_1)]\sqrt{t_0} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $r_d$  = รัศมีคาย (mm)

$t_0$  = ความหนาแผ่นเปล่า (mm)

$d_0$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเปล่า (mm)

$d_1$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นซ์ (mm)

เซลลิน (Sellin) [14] ได้ทำการเสนอการหารรัศมีคายโดยให้ความสัมพันธ์กับความหนาไว้ดังสมการที่ 2.10 และรัศมีพื้นซ์ จะมีความสัมพันธ์กับรัศมีคายดังสมการที่ 2.11

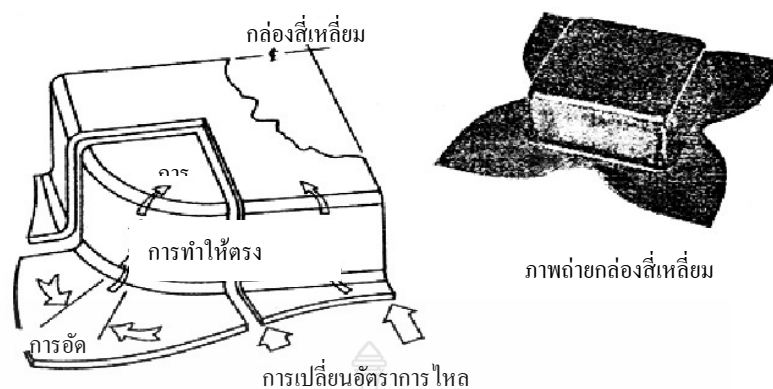
$$r_d = (5 - 10 \text{ เท่า}) \times \text{ความหนาของแผ่นชิ้นงาน} \quad (2.10)$$

$$r_p = (3 - 5 \text{ เท่า}) \times \text{รัศมีคาย} \quad (2.11)$$

### 2.3.8 การลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม [15]

การลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมนั้นการไหลตัวของโลหะจะไม่เท่ากันทุกจุดทุกด้านเหมือนการลากขึ้นรูปทรงกระบอก ดังนั้นแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปแต่ละส่วนก็จะไม่เท่ากันตามไปด้วย โดยการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจะแบ่งการเกิดการไหลตัวของโลหะได้ 2 ส่วน คือ ส่วนตรงมุมของกล่องซึ่งเกิดการลากขึ้นรูป (Drawing) อย่างแท้จริง และส่วนของผนังกล่องจะเป็นการลากขึ้นรูปในลักษณะเดียวกับการพับ (Bending)

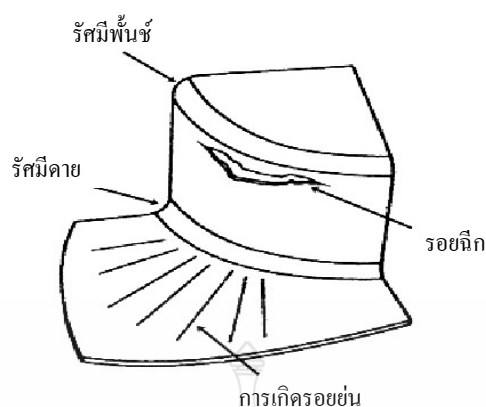
การวิเคราะห์การไหลตัวของโลหะตรงมุมกล่อง ซึ่งการศึกษาการไหลตัวของโลหะระหว่างการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมนี้ทำได้โดยการใช้กระแสไฟฟ้ากัด (Etching) ที่ผิวของแผ่นชิ้นงานแบนให้เป็นวงกลมเล็กๆ ลักษณะของการไหลของโลหะจะถูกแสดงให้เห็นถึงครั้งแรก เมื่อวงกลมเล็กๆนั้นถูกเปลี่ยนเป็นรูปวงรี การศึกษาการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมนี้จะต้องแบ่งกล่องสี่เหลี่ยมออกเป็นส่วนต่างๆแล้วนำมาศึกษา ดังแสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การแบ่งกล่องสี่เหลี่ยมออกเป็นส่วนต่างๆ [15]

เนื่องจากมุมของกล่องที่จะนำมาวิเคราะห์นั้น จะใช้มุมกล่องสี่เหลี่ยมเพียงแค่มุมเดียว ลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อลากขึ้นรูปกล่องก็ยังคงเกิดขึ้นที่มุมของกล่องมุมอื่นๆ เหมือนกัน ลูกศรอันใหญ่ที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.8 ได้แสดงให้เห็นว่าโลหะจะมีการอัดตัวตรงมุมของแผ่นขึ้นงานก่อนจะยินยอมไหลไปเหนือรัศมีของคาน ซึ่งที่ส่วนนี้ยังคงมีโลหะเหลืออยู่มากเกินไป อาจจะทำให้รอยย่นขึ้นได้ง่าย ขณะที่มีการลากขึ้นรูปจะต้องใช้แรงของแผ่นกดยึดขึ้นงานเพื่อป้องกันการเกิดรอยย่นที่ตรงมุมของกล่องนี้ สารประกอบที่ใช้ในการลากขึ้นรูป หรือสารหล่อลื่นที่ดีได้ถูกนำมาใช้ที่ตรงมุมของกล่อง เพื่อให้โลหะไหลตัวภายใต้แผ่นกดยึดขึ้นงานได้ง่ายขึ้น โดยจะเป็นตัวลดความเสียหาย การใช้รัศมี

ของคานที่ใหญ่ตรงมุมของกล่องจะช่วยลดแรงที่เกิดจากการงอ และการทำให้ตรงซึ่งมันจะช่วยให้การลากขึ้นรูปทำได้ง่ายขึ้น มันเป็นเรื่องจริงเช่นเดียวกับการลากขึ้นรูปกล่อง คือว่า รอยย่นที่เกิดขึ้นที่มุมของแผ่นขึ้นงานจะเบียดกันเพื่อแย่งการไหลตรงมายังมุมของกล่อง การเกิดรอยย่นเช่นนี้จะมองเห็นได้โดยตา สำหรับรอยย่น และการนิกขาดที่เกิดขึ้นจากการลากขึ้นรูปที่บริเวณมุมของกล่อง แสดงดังภาพที่ 2.9 เมื่อมีแรงดึงเกิดขึ้นอย่างรุนแรงที่ผนังซึ่งเป็นบริเวณมุมของกล่อง จะทำให้มีการนิกขาดเกิดขึ้นที่บริเวณนั้น การนิกขาดที่ตรงมุมของกล่องนี้อาจจะมากขึ้นจนลามไปถึงผนังส่วนที่แบน การนิกขาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดมันจะเริ่มต้นเกิดขึ้นที่มุมของกล่องระหว่างการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมเสมอ



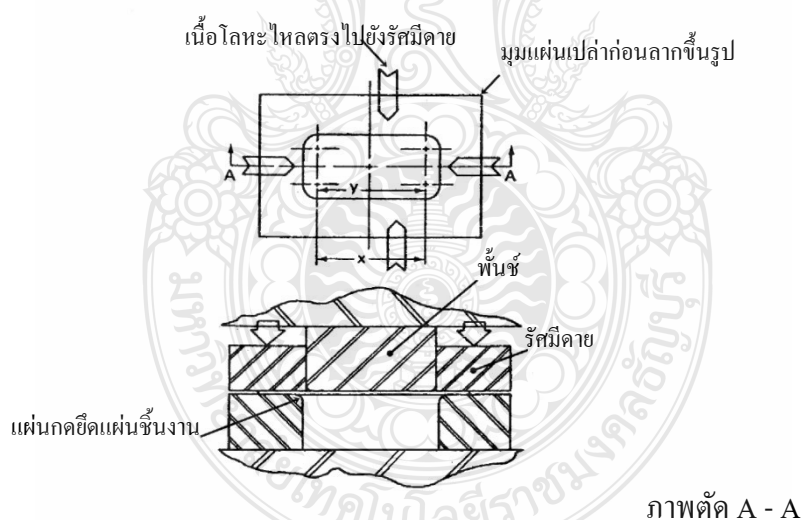
ภาพที่ 2.9 การวิเคราะห์ที่มุมของกล่องสี่เหลี่ยม [15]

การวิเคราะห์การไหลตัวของโลหะตรงส่วนของผนังกล่อง จะใช้กระแสไฟฟ้ากัดให้เป็นวงกลมเพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงของโลหะที่ได้ถูกการลากขึ้นรูป ลากการขึ้นรูปบริเวณมุมกล่องนั้น โลหะจะเกิดการอัดตัวตรงมุมของแผ่นขึ้นงานก่อน จึงจะยินยอมให้โลหะไหลตัวลงไปเหนือรัศมีคาย แต่สำหรับการทำผนังส่วนที่แบนของกล่องนั้นไม่มีการอัดตัวของโลหะเพื่อยอมให้โลหะไหลไปยังรัศมีของคายการศึกษาถึงเงื่อนไขนี้ จะถูกพบในภาพที่ 2.10 ความยาวของแผ่นขึ้นงานเพื่อที่จะป้อนเข้าไปเป็นผนังส่วนที่แบนของกล่องได้ถูกแทนโดยใช้สัญลักษณ์ X ความยาวของปากคายที่จะทำให้โลหะไหลผ่านลงไปเป็นผนังส่วนที่แบนได้ถูกแสดงโดยการใช้ความยาว Y เพราะความยาว X เท่ากับความยาว Y การอัดตัวของโลหะจึงไม่เป็นที่จำเป็น ถ้าไม่มีการอัดตัวของโลหะเกิดขบวนการนั้นไม่มารจะเรียกได้ว่าการลากขึ้นรูป

ในการบรรยายการไหลของโลหะที่ผนังส่วนที่แบนของกล่องสี่เหลี่ยมจะได้อธิบายการแสดงถึงขั้นตอนดังนี้ เริ่มแรกแผ่นขึ้นงานจะเลื่อนตรงไปยังรัศมีของคายโดยไม่มีการแข็งตัวระหว่างถูกแปรรูปหรือไม่มีการเปลี่ยนขนาด ต่อมาเมื่อโลหะถูกป้อนอยู่เหนือรัศมีของคาย โลหะจะถูกทำให้โค้ง ลำดับสุดท้าย โลหะได้ทำให้ตรงเพื่อสร้างผนังส่วนที่แบนของกล่องสี่เหลี่ยมขึ้นมา ขั้นตอนของการที่เกิดเหตุการณ์เหล่านี้ได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 2.8 ด้วยเหมือนกัน ขบวนการของการเปลี่ยนแปลงของโลหะนี้ได้ถูกเรียกว่า การงอ และการทำให้ตรง (Bend and Straighten) การลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมก็จะเป็นขบวนการที่ผสมผสานระหว่างขบวนการลากขึ้นรูปกับขบวนการงอ และการทำให้ตรงดังที่กล่าวมาแล้ว เมื่อไหร่ก็ตามที่มีการลากขึ้นรูปเพียงบางส่วนของขึ้นงานโดยการใช้การลากขึ้นรูป ในการ

ปฏิบัติภายในโรงงานจะเรียนการผลิตชิ้นงานในลักษณะเช่นนั้น รวมๆกันว่าเป็นการใช้กระบวนการการลากขึ้นรูป

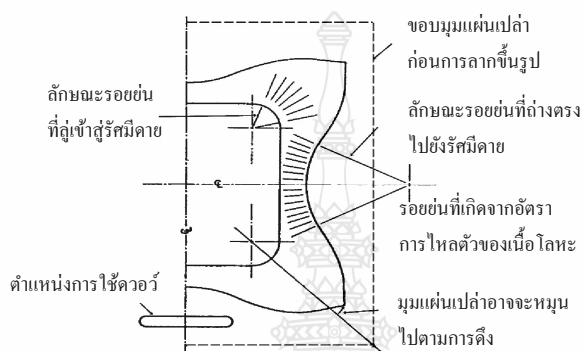
รอย่นที่เกิดจากอัตราการไหล (Flow – Rate Wrinkle) ผนังส่วนที่เป็นมุมและส่วนที่แบนของกล่องสี่เหลี่ยมนี้สามารถที่จะมองเหมือนกับว่าแยกส่วนออกจากกัน โดยไม่มีความยุ่งยาก แต่บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของโลหะจากส่วนหนึ่ง ไปยังอีกส่วนหนึ่ง ของผนังส่วนที่เป็นมุมกับส่วนที่แบนนั้น โลหะซึ่งถูกลากขึ้นรูปที่มุมของกล่องจะไหลตรงไปยังรัศมีของคายก่อนข้างจะเข้าเนื่องจากมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการอัดตัวของโลหะ แผ่นชิ้นงานส่วนที่เป็นมุมนี้สามารถเคลื่อนที่ตรงไปยังรัศมีของคายได้เร็วเท่ากับการเคลื่อนที่ของแท่งพื้นซ์ ที่ลากผ่านชิ้นงาน แต่ในส่วนของผนังส่วนที่แบน แผ่นชิ้นงานจะเคลื่อนที่ตรงไปยังรัศมีของคายด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วยของแท่งพื้นซ์ ระหว่างที่แท่งพื้นซ์ ลากโลหะผ่านขั้นตอนของการทำให้งอและการทำให้ตรงของผนังส่วนที่แบนนั้นจะทำให้มีการยึดตัวของโลหะเกิดขึ้นบ้าง ปัญหาที่สำคัญในการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมก็คือ การแปรผันในอัตราของการไหลหรืออัตราของการไหลที่เร็วกว่าของผนังส่วนที่แบนนี้ ผลก็คือจะเกิดการรัศตัว (Pull – In) ของขอบแผ่นชิ้นงานอย่างรุนแรง



ภาพที่ 2.10 การไหลของของโลหะที่บริเวณผนังส่วนตรงของการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม [15]

ปัญหาของการผลิตหลายๆ อย่างอาจจะมาจากอัตราการไหลที่แปรเปลี่ยน ซึ่งจะมองเห็นรอย่นที่เกิดขึ้นได้ที่ปีกขอบของผนังส่วนที่ตรง รอย่นที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะถ่างออกตรงไปยังรัศมีคาย และจะเรียกมันว่ารอย่นที่เกิดจากอัตราการไหล ดังแสดงดังภาพที่ 2.11 การเกิดรอย่นที่ปีกของผนัง

ส่วนที่ตรงจะไม่เหมือนกับรอยย่นที่ปีกของผนังส่วนที่เป็นมุมซึ่งการเกิดรอยย่นที่ปีกของผนังส่วนที่เป็นมุมจะมีลักษณะลู่เข้า จะต้องมีการใช้แผ่นกดยึดชิ้นงานเพื่อป้องกันหรือกำจัดการเกิดรอยย่นเหล่านั้นที่บริเวณรอบๆ เส้นรอบรูปของกล่องสี่เหลี่ยม การลากขึ้นรูปกล่องก็มีการเกิดรอยย่นทั้งสองแบบนี้เช่นเดียวกัน ลูกศรใหญ่และเล็กที่ได้แสดงเอาไว้ในผนังส่วนที่ตรงดังภาพที่ 2.8 จะแสดงให้เห็นถึงการลดลงของอัตราการใช้โลหะไปกับการลดลงของมุมของกล่อง



ภาพที่ 2.11 ลักษณะของรอยย่นที่เกิดจากอัตราการใช้โลหะ [15]

### 2.3.9 ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในระหว่างการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม

- 1) เกิดการแตกขาดบริเวณผนังด้านข้างของกล่อง
- 2) เกิดการแตกลึกขาดบริเวณก้นกล่องสี่เหลี่ยม
- 3) เกิดรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยม
- 4) เกิดรอยย่นที่ขอบปากของกล่องสี่เหลี่ยม
- 5) ขอบหรือปีกของชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยมมีขนาดไม่สม่ำเสมอ

## 2.4 สารหล่อลื่น [16]

สารหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมาย ซึ่งถ้าแบ่งตามสถานะจะแบ่งออกได้เป็นสี่ชนิด คือ ก๊าซ ของเหลว สารกึ่งแข็ง (Semi – Solid) และ ของแข็ง สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กันมากที่สุดเพราะมีคุณสมบัติหลากหลายเมื่อนำไปใช้งาน และสามารถรับแรงที่กระทำได้มาก ของเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นมีน้ำ สารละลายกับน้ำ (Aqueous Solution) น้ำมันแร่ (Mineral Oil) น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์และน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Oil)



2.4.1 น้ำมันแร่ เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในหอกกลั่น ได้จากการเอา ส่วนที่อยู่ก้นหอกกลั่นภายใต้บรรยากาศผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญที่ถูกควบคุมโดยการกลั่นสุญญากาศก็คือ ความหนืด (Viscosity) จุดวาบไฟ (Flash Point) และ กากคาร์บอน (Carbon Residual) แยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดไฮโดรและชนิดชั้นออกมา ที่เหลือเป็นกากก็ สามารถนำไปผลิตยางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ขึ้นอยู่กับชนิดของ น้ำมันดิบที่นำมากลั่น น้ำมันแร่ที่ได้จากน้ำมันดิบ พาราฟฟินิก (Paraffinic) มักจะมีไขสูง ต้อง ผ่านกระบวนการขจัดเอาไขออก น้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นแยกภายใต้สุญญากาศนี้ปกติจะมีคุณภาพที่ไม่ดีพอที่จะนำมาใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่น ต้องผ่านกระบวนการต่างๆเพื่อขจัดเอาสารที่ไม่ต้องการออก เพื่อให้มีความอยู่ตัวเชิงเคมีและเชิงความร้อน

2.4.2 น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ เนื่องจากน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ที่ได้จากธรรมชาติมักมีความอยู่ ตัวทางเคมีต่ำ เกิดเสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะใช้งานจึงต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งราคาก็จะแพงขึ้นมาก จึงหมดความนิยมไป ปัจจุบันมีการใช้น้ำมันพืชหรือสัตว์เป็นน้ำมันพื้นฐานน้อยมาก และใช้เฉพาะในงานหล่อลื่นที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางประการเท่านั้น ส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้เป็น ตัวเติมเพิ่มคุณภาพให้น้ำมันหล่อลื่นที่ทำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม เช่น เพื่อเพิ่มความลื่นและความสามารถในการเข้ากับน้ำ เป็นต้น

2.4.3 น้ำมันสังเคราะห์ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่ที่ได้จากกระบวนการกลั่น น้ำมันดิบนั้น แม้ว่าจะผ่านกระบวนการมากมายที่ใช้กำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป แต่น้ำมันหล่อลื่น พื้นฐานที่ได้ออกมานั้นยังคงเป็นของผสมของสารประกอบหลายตัว ซึ่งไม่มีทางที่จะเลือกเอาเฉพาะ สารที่มีสมบัติดีที่สุดได้ หรือถ้ามีก็จะได้ผลผลิตต่ำ เป็นผลให้น้ำมันแร่มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน ดังนั้นได้มีการพัฒนาน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันสังเคราะห์ขึ้นมา น้ำมันสังเคราะห์เป็น น้ำมันพื้นฐานที่ได้จากกระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่ง เป็นการรวมตัวของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำให้น้ำมันที่มีความหนืดเพียงพอที่จะใช้เป็น สารหล่อลื่น ข้อดีของน้ำมันสังเคราะห์เมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ สามารถนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิ ที่กว้างกว่าน้ำมันแร่ คือ ใช้ได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำและสูงกว่าน้ำมันแร่ นอกจากนี้ น้ำมันสังเคราะห์บาง ประเภทยังให้สมบัติเฉพาะ เช่น ผสมเข้ากับน้ำได้ และไม่ติดไฟ มีการระเหยต่ำ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม น้ำมันสังเคราะห์จะมีข้อได้เปรียบกว่าน้ำมันแร่ เมื่อนำไปใช้งานบางประเภท น้ำมันสังเคราะห์ยังไม่มี สมบัติที่เหมาะสมทุกด้าน จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันสังเคราะห์โดยการใส่สาร เพิ่มคุณภาพซึ่งจะช่วยเพิ่มสมบัติทางด้านเคมีและด้านกายภาพ

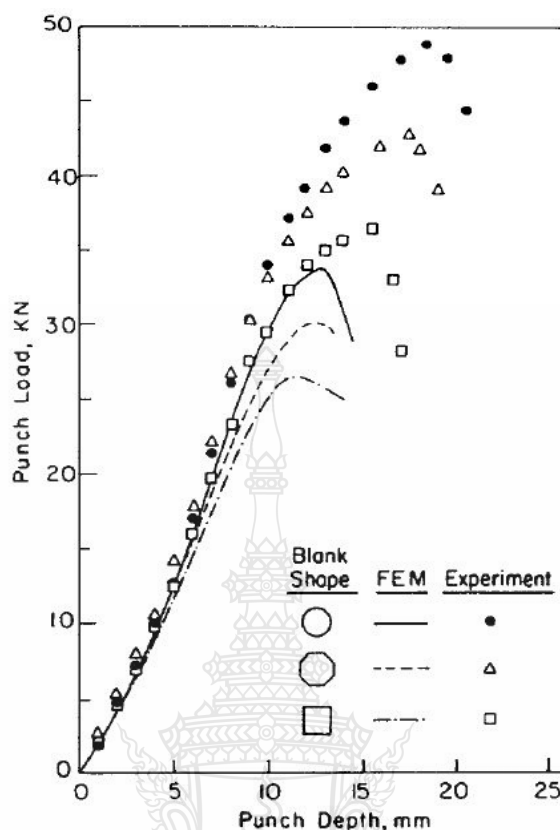
2.4.4 สารหล่อลื่นของแข็ง เป็นสารหล่อลื่นที่มีความสามารถในการรับแรงกดแนวตั้งได้ดี และในขณะเดียวกันต้องมีความสามารถในการเลื่อนไหลไปได้อย่างง่าย ในชั้นผิวเมื่อมีแรงกระทำในแนวราบหรือเมื่อเกิดแรงเฉือน สารหล่อลื่นของแข็งจะอยู่ระหว่างคู่ผิวโลหะที่เคลื่อนที่และจะช่วยปกป้องการเสียดสีระหว่างผิวโลหะทำให้ช่วยลดการสึกหรอและการเสียดสี รวมถึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำด้วย สารหล่อลื่นของแข็งที่ใช้กันโดยทั่วไปในปัจจุบันคือ กราไฟต์ โมลิบดีนัมได-ซัลไฟด์ และแผ่นพลาสติก

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.5.1 อิทธิพลของของรูปร่างของแผ่นเปล่า

Chandorkan [17] ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของแผ่นชิ้นงาน และแรงกดยึดของแผ่นเปล่า และได้มีการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สร้างแบบจำลองการลากขึ้นรูปเพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองที่เกิดขึ้น โดยการทดลองใช้อะลูมิเนียม (2008 – T4) หนา 1.016 มม. ลากขึ้นรูปกล่องขนาด  $305 \times 380 \times 50$  มม. ใช้สารหล่อลื่น (DB – 4251) มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.08 มีลักษณะของแผ่นเปล่า คือ แผ่นสี่เหลี่ยม แผ่นตัดมุม แผ่นโค้งมน จากการทดลองพบว่าผลการทดลองที่เกิดขึ้น แผ่นเปล่าสี่เหลี่ยมสามารถขึ้นรูปได้ลึกที่สุด รองลงมาเป็นแผ่นเปล่าตัดมุม และแผ่นเปล่าโค้งมน

Toh และ Kobayashi [18] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรูปร่างแผ่นเปล่าในการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมโดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ทำการทดลองการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นเปล่า มีรูปร่างอยู่ 3 แบบ คือ แบบสี่เหลี่ยม แบบสี่เหลี่ยมตัดมุม แบบวงกลม โดยใช้วัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) มีค่าเฉลี่ยความเครียดเปลี่ยนรูปถาวร (Average Anisotropy) เท่ากับ 1.025 และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็น 0.04 ความหนาเท่ากับ 0.76 มม. ความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียด เท่ากับ  $\sigma = 1514 \varepsilon^{0.430}$  MPa

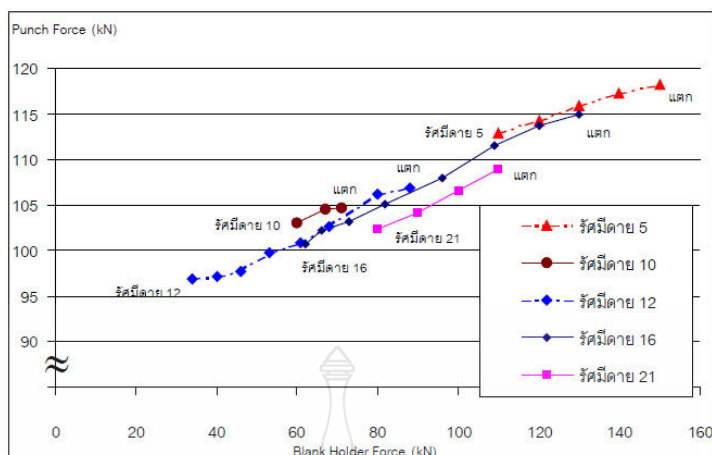


ภาพที่ 2.12 แรงลากขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการจำลองวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

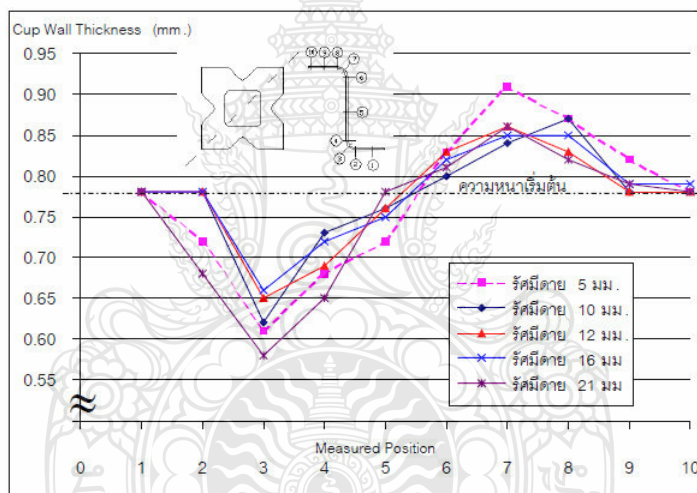
จากภาพที่ 2.12 ผลการทดลองพบว่า รูปร่างของแผ่นเปลามีอิทธิพลต่อแรงลากขึ้นรูป โดยผลการทดลองที่ได้จะมีผลที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และแรงที่เกิดขึ้นในพันธมีค่าสูงสุดในแผ่นเปลารูปวงกลม โดยที่แรงในการลากขึ้นรูปในแผ่นสี่เหลี่ยมตัดมุมและแผ่นสี่เหลี่ยม น้อยลงตามลำดับ

#### 2.5.2 อิทธิพลของรัศมีพื้นและคาย

ชาญศักดิ์ ภัทรพรนนท์ [19] ได้ศึกษาการลากขึ้นรูปลึกลงสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยวัสดุที่ใช้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (JIS:SPCEN) ขนาด  $100 \times 100 \times 53$  มม. และความหนา 0.78 มม. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม OPTRIS จากผลงานวิจัยพบว่าขนาดของรัศมีคายที่สามารถจะทำการลากขึ้นรูปได้นั้นจะอยู่ในช่วงระหว่าง 5 มม. ถึง 21 มม. (6 – 26 เท่าของความหนาแผ่นเปล่า) โดยที่ช่วงรัศมีคาย 12-16 มม. จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อยและความหนาของแผ่นเปล่าเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด แสดงดังภาพที่ 2.13 และ 2.14



ภาพที่ 2.13 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมเทียบกับรัศมีคายนต่างๆ



ภาพที่ 2.14 ความหนาบริเวณมุมกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสในตำแหน่งต่างๆ

El – Wakil, Kamal และ Darwish [20] ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมของแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปกับรัศมีของคายน จากผลการทดลองเมื่อรัศมีคายนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2 มม. เป็น 7 มม. พบว่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปที่รัศมีคายน 7 มม. ลดลงประมาณ 20 % เมื่อเทียบกับรัศมีคายน 2 มม. แต่เมื่อรัศมีคายนเพิ่มขึ้นจาก 7 มม.เป็น 10 มม. พบว่าแรงในการลากขึ้นรูปสูงขึ้น แต่แรงที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปที่รัศมีคายน 2 มม.

Fratini,Casto และ Micari [21] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรัศมีพั้นซ์และคายนในการลากขึ้นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองสถานการณ์ แล้วทำการทดลองเป็นการพิสูจน์โดย

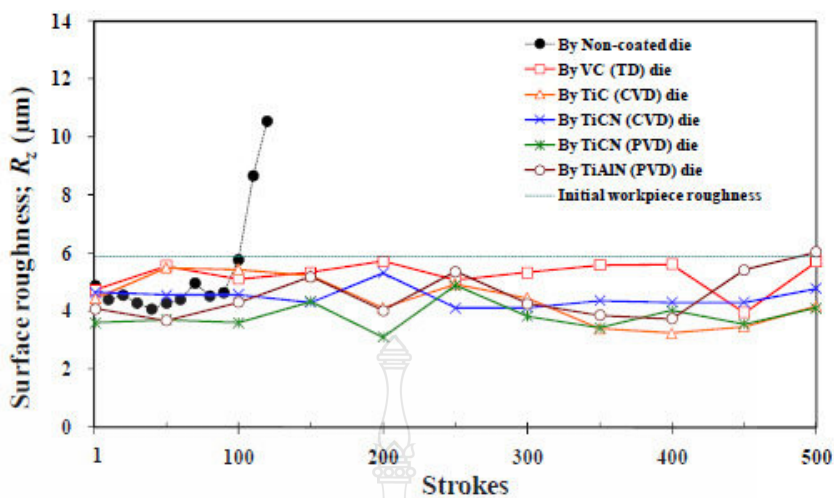
ใช้แม่พิมพ์แบบอินเวิร์ทตาย (Invert Die) ที่มีรัศมีตายและพื้นซ์เท่ากันประกอบกันเป็นคู่ 3 ระดับรัศมี คือ 3, 6, 9 มม. จากการทดลองใช้รัศมีตายและพื้นซ์ ขนาด 9 มม. จะเกิดรอยย่นตรงบริเวณปีกขอบด้วย เมื่อใช้รัศมีตายและพื้นซ์ ขนาด 6 มม. จะไม่พบทั้งรอยย่นและรอยฉีกขาดบนด้วย สี่เหลี่ยมจัตุรัสและเมื่อใช้รัศมีตายและพื้นซ์ ขนาด 3 มม. จะทำให้ผนังของถ้วยบางมากจนเกิดรอยฉีกขาดบนด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัส และเมื่อใช้วิธีไฟในอิเล็กเมนต์จำลอง ได้ผลสอดคล้องกันกับการทำทดลอง

### 2.5.3 อิทธิพลของแรงกดยึดแผ่นกดยึดชิ้นงาน

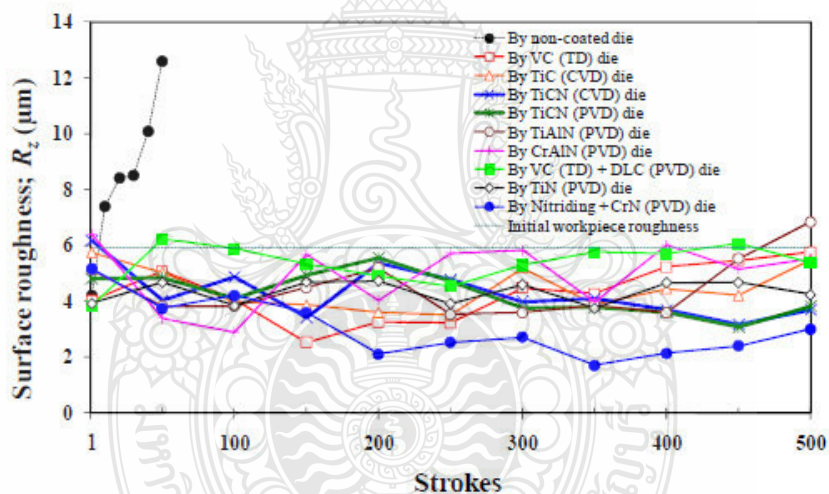
นฤทธิ์ คชฤทธิ์ [22] ได้ทำการศึกษาถึงแรงกดยึดชิ้นงานที่ใช้ในการลากขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแล้ว โดยเปรียบเทียบกับสัดส่วนกับแรงที่เกิดขึ้นในพื้นที่ ในการทำการทดลองนั้น ได้ใช้เครื่องเพชรหนึ่งจังหวะ มาทำการลากขึ้นรูป โดยให้แรงกดยึดแผ่นชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากความเสียดทานของยางยูรีเทนที่สวมอยู่กับแกนในชุดพื้นซ์และชุดกดยึดแผ่นชิ้นงาน วงแหวนยางยูรีเทนขยายตัว เมื่อได้รับแรงกดขณะขึ้นรูปทำให้เกิดความเสียดทานเพื่อต้านการเคลื่อนที่ของชุดกดยึดแผ่นชิ้นงาน ทำให้เกิดแรงกดยึดแผ่นชิ้นงานขึ้นอย่างอัตโนมัติ เมื่อใช้หลักการดังกล่าวกับการลากขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแผ่นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ที่มีอัตราส่วนการลากขึ้นรูปเท่ากับ 1.92 ต้องใช้แรงกดยึดแผ่นชิ้นงานประมาณ 29% ของแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสูงสุด จึงเพียงพอในการยับยั้งการเกิดรอยย่นในระหว่างการขึ้นรูปได้

### 2.5.4 ด้านงานขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเร้ง [2] ได้ศึกษาถึงการปรับสภาพผิวและการเคลือบผิวแม่พิมพ์ เพื่อหาประสิทธิภาพในการลดการยึดติดของอนุภาคชิ้นงานบนผิวตายในกระบวนการปั๊มขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวัสดุเหล็ก SAPH 440 และ SPFH 590 เปรียบเทียบกับกรณีไม่เคลือบผิวตาย โดยเลือกการปรับสภาพผิวหรือเคลือบผิวด้วย VC (TD), TiC (CVD), TiCN (CVD), TiCN (PVD), TiAlN (PVD), CrAlN (PVD), VC (TD) + DLC (PVD), TiN (PVD) และ Nitriding + CrN (PVD)



ภาพที่ 2.15 ความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กเกรด SAPH 440 หลังการปั๊มขึ้นรูปด้วย



ภาพที่ 2.16 ความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กเกรด SPFH 590 หลังการปั๊มขึ้นรูปด้วย

จากภาพที่ 2.15 และ 2.16 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพผิว และเคลือบผิว ช่วยลดการยึดติดของอนุภาคชิ้นงานบนผิวตายได้ทุกชนิดเมื่อเปรียบเทียบกับตายที่ไม่เคลือบผิว โดยฟิล์ม TiC (CVD), TiCN (PVD), TiCN (CVD) และ Nitriding + CrN (PVD) ให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการยึดติดได้ดีสุดในการขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง นอกจากนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่าฟิล์ม PVD สามารถเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะกับตายด้วยการทำเรดิคัลไนไตรด์ ก่อนแล้วเคลือบทับด้วยฟิล์มที่ต้องการใช้งานเช่นฟิล์ม Nitriding + CrN (PVD) ถูกทดสอบด้วยการลากขึ้นรูปชิ้นงาน

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษเกรด SPFC 980Y (JIS) ผลการทดลองพบว่าหลังการขึ้นรูป 1,000 ชั้น ไม่พบการเกิดการยึดติดของอนุภาคบนผิวตาย และฟิล์ม CrN (PVD) ยังยึดเกาะกับผิวตายได้ดีกว่ากรณีตายที่ไม่ได้ทำเรดิคัลไนไตรต์ก่อนการเคลือบ

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่มุ่งแก้ปัญหาการขึ้นรูปเหล็กกลุ่ม HSS และ AHSS ดังมีงานวิจัยที่ดำเนินงานด้านการติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป การเกิดการติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปเกิดจากหลายปัจจัยเช่น ชนิดของวัสดุ ความหนาของวัสดุ และมุมของการตัด เป็นต้น Yoshida และคณะ [23] ศึกษาถึงกลไกการเกิดการติดตัวกลับและใช้เทคนิคการควบคุมรูปร่างของชิ้นงานที่ทำจาก HSS ด้วยการทำให้ Reverse Bending ในช่องว่างแม่พิมพ์ หรือระยะเคลียร์เรนซ์ (Clearance) การเพิ่มแรงดึงที่ผนังข้างของชิ้นงานขณะทำการขึ้นรูปด้วยการให้แรงจากแผ่นค้ำชิ้นงาน (Blank Holder) และสร้างรอยนูนสำหรับไหลผ่าน (Draw Bead) นอกจากนี้ Yoshida และคณะ [24] ศึกษาการลดการติดตัวกลับของชิ้นงาน HSS ด้วยการขึ้นรูปด้วยการกระแทก (Crash Forming) ชิ้นงานรูปตัวยู (U – Channel) Yanagimoto และคณะ [25] แสดงให้เห็นว่าชิ้นงาน HSS หลังการขึ้นรูปมีรูปร่างเป็นไปตามที่ต้องการ ไม่เกิดการติดตัวกลับเมื่อขึ้นรูปด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 477°C แต่ต่ำกว่างานขึ้นรูปร้อน (Hot Working) Mori และคณะ [26] ใช้เครื่องเซอร์โวเพรส (Servo Press) ในการควบคุมการเกิดการติดตัวกลับของชิ้นงานด้วยการลดความหนาของชิ้นงานในการพับขึ้นรูปตัววี (V – Bending)

สรุปจากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง มีแนวทางการทำวิจัยโดยการเปรียบเทียบผลการทดลองลากขึ้นรูปเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) โดยใช้แม่พิมพ์ชุดเดิมที่ออกแบบสำหรับวัสดุเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC (JIS) แล้วทำการศึกษาอิทธิพลของรัศมีปาดายของแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die Radius) เพื่อเปรียบเทียบว่าเมื่อเปลี่ยนชนิดของวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงมากขึ้นผลการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างไร โดยเปรียบเทียบผลการทดลอง หาความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการลากขึ้นรูป คือ รัศมีปาดาย (Die Radius) แรงกดของแผ่นค้ำชิ้นงาน ความหนา ความหยาบผิว และคุณภาพของชิ้นงานภายหลังการลากขึ้นรูป

## บทที่ 3

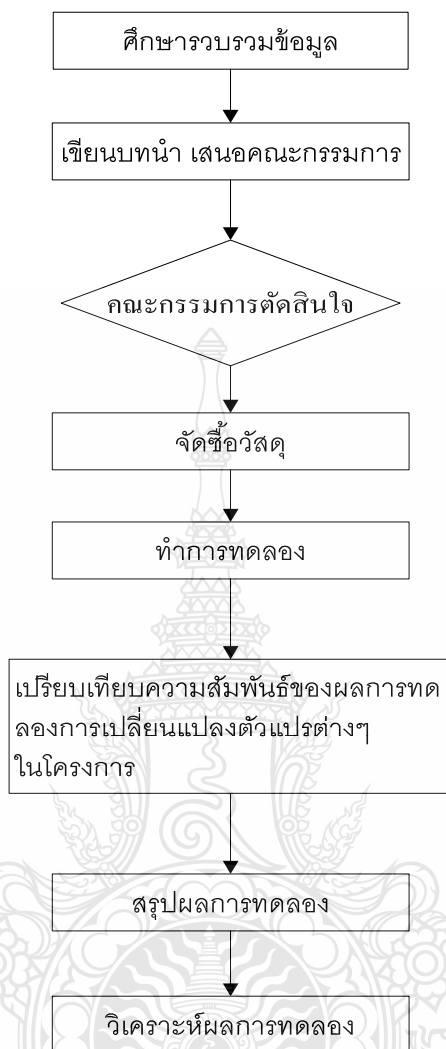
### วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการดำเนินโครงการ ซึ่งนับว่าเป็นบทที่สำคัญในการจัดทำวิทยานิพนธ์ หากโครงการได้มีการวางแผนและเตรียมการที่ดีแล้ว ก็จะทำให้โครงการนั้นสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาอิทธิพลของรัศมีป่าชายที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป และความสมบูรณ์ของถั่วลิ้มจัตุรัสแบบมีปีก โดยใช้แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปถั่วลิ้มจัตุรัสแบบมีปีก และปรับเปลี่ยนขนาดของรัศมีป่าชายที่แตกต่างกันซึ่งมีขั้นตอนในการดำเนินงานดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

#### 3.1 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยมุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของรัศมีป่าชาย ที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูปถั่วลิ้มจัตุรัสแบบมีปีกหลักกล้าความแข็งแรงสูง โดยเริ่มจากการศึกษาข้อมูลรายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับการออกแบบแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึกแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป แรงกดแผ่นกดยัดขึ้นงาน ด้วยเครื่องปั๊มไฮดรอลิกของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่มีขนาด 80 ตัน สามารถปรับแรงกดแผ่นกดยัดขึ้นงานได้ เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัยนี้จำเป็นต้องทำการศึกษาเก็บข้อมูลในการวิจัย และทำการทดลองเพื่อนำข้อมูลมาสรุปผลงานวิจัยโดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยแสดงดังภาพที่ 3.1



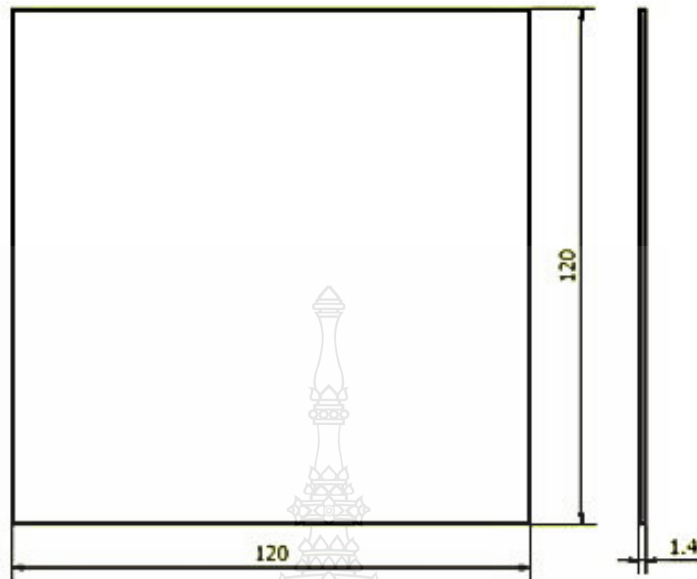


ภาพที่ 3.1 แผนภาพการไหลแสดงกระบวนการในการทำวิจัย

### 3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุในการดำเนินการวิจัย

#### 3.2.1 วัสดุชิ้นงาน

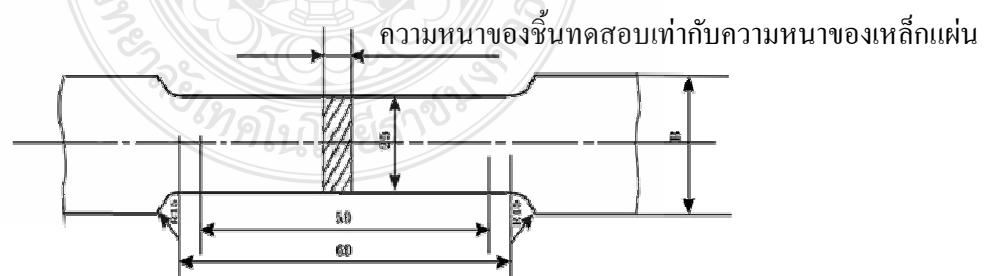
ในการศึกษาจะใช้เหล็กแผ่นสำหรับลากขึ้นรูปลึก จำนวน 2 ชนิด คือเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC (JIS) และเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับ โครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) โดยเตรียมแผ่นเปล่าเหล็กทั้งสองชนิดที่ขนาดความกว้างเท่ากับ 120 มม. ความยาวเท่ากับ 120 มม. และหนาเท่ากับ 1.4 มม. ขนาดของแผ่นเปล่าก่อนการลากขึ้นรูปแสดงดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ขนาดของแผ่นชิ้นงานก่อนการลากขึ้นรูป

### 3.2.2 การทดสอบแรงดึงเพื่อหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุเหล็ก SAPH 440

ในการทดสอบแรงดึงเพื่อหาคุณสมบัติทางกลนั้นจำเป็นต้องเตรียมวัสดุ ชิ้นงานให้ตรงตามมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ ในการทดสอบแรงดึงของเหล็กแผ่นที่ระบบ JIS Z 2201 ได้ กำหนดไว้ นั้นจะมีลักษณะชิ้นงานแสดงดังภาพที่ 3.2 ชิ้นงานที่จะเตรียมเพื่อทดสอบนั้นเป็นเหล็ก SAPH 440 ที่มีความหนาอยู่ที่ 1.4 มม. และมีขนาดกว้าง B เท่ากับ 30 มม. โดยได้กำหนดขนาดต่างๆ ที่สำคัญตามภาพที่ 3.3 ซึ่งจะใช้วิธีในการเตรียมงานโดยการกัด (Milling)



ภาพที่ 3.3 ชิ้นงานทดสอบความต้านแรงดึงและความยืด



ภาพที่ 3.4 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

### 3.2.3 ผลการหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ทดสอบ

เมื่อนำวัสดุที่ได้เตรียมไว้ไปทำการวัดแล้วขีดตำแหน่งไว้โดยเว้นระยะห่างจากจุดศูนย์กลางไปทางซ้ายและขวา ด้านละ 25 มม. แล้วนำไปทดสอบกับเครื่องทดสอบแรงดึง แสดงดังภาพที่ 3.4 กความยาวที่ได้หลังจากการทดสอบ มาทำการหาค่าความยืด (Elongation) โดยจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ดังสมการที่ 3.1 และได้ค่าอื่นๆ ดังแสดงดังตารางที่ 3.3

$$\begin{aligned} \text{ความยืด (Elongation)} &= \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100 & (3.1) \\ \text{เมื่อ } L_1 &= \text{ความยาวหลังการทดสอบ} \\ L_0 &= \text{ความยาวก่อนการทดสอบ} \\ (\text{แทนค่า}) \quad \text{ความยืด (Elongation)} &= \frac{66.8 - 50}{50} \times 100 \\ &= 33.6\% \end{aligned}$$

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเหล็ก SPCC ทางบริษัทผู้จำหน่ายเหล็กได้ทำการทดสอบมาแล้วจึงได้ใช้ค่าที่ได้จากทางบริษัทมาทำการคำนวณหาแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปซึ่งค่าที่ได้จากทางบริษัทองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกลของเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 แสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440

Symbol (JIS)	SPCC		SAPH440	
	Chemical composition (%)	C	0.0267	C
S		0.0135	Si	0.0500
Mn		0.1545	Mn	1.0250
P		0.0236	P	0.0120
Cr		0.0123	S	0.0030
Ni		0.0112	Cr	0.0210
Mo		0.0047	Ni	0.0180
Cu		0.0170	Mo	0.0120
V		0.0029	Cu	0.0200
Co		0.0021	Nb	<0.0010
Al		0.0290	V	0.0020
Ti		0.0016	Co	<0.0010
Sn		0.0035	Al	0.0210
W		0.1255	B	<0.0010
-		-	Ti	0.0010
-		-	As	0.0020
-		-	Sn	0.0080
-	-	W	0.0010	

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกลของเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440

Symbol (JIS)	SPCC	SAPH 440
Thickness (mm)	1.4	1.4
Yield Strength $\sigma_y$ (MPa)	226	357
Ultimate Strength $\sigma_v$ (MPa)	321	478
Elongation (%)	46.0	33.6

### 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.3.1 เครื่องปั๊มไฮดรอลิก

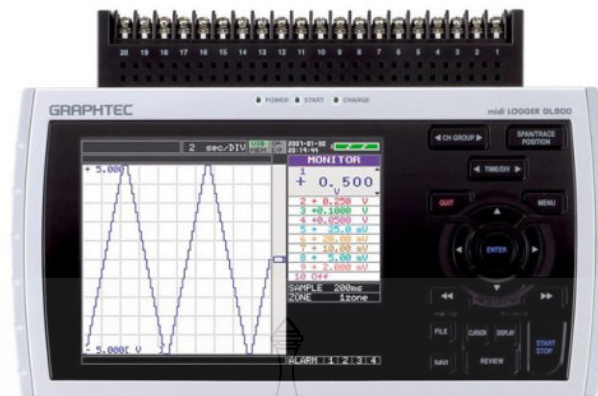
ในการทดลองใช้เครื่องปั๊มไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน ยี่ห้อ TMC ขนาดหน้าโต๊ะกว้าง 800 มม. ยาว 800 มม. ขนาดช่วงชักสูงสุด 650 มม. สามารถปรับระดับแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานได้ โดยแรงดันที่ใช้ในการกดแผ่นกดยึดชิ้นงาน จะถูกส่งมาจากคายกชั้นที่อยู่ใต้โบลสเตอร์ของเครื่องปั๊มไฮดรอลิก ซึ่งการทำงานของคายกชั้นสามารถควบคุมแรงดันให้คงที่ได้เครื่องปั๊มไฮดรอลิก แสดงดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 เครื่องปั๊มไฮดรอลิกแรงอัดสูงสุด 80 ตัน

#### 3.3.2 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล

ในการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล ได้กำหนดตัวแปรของการทดลองโดยอิทธิพลของตัวแปรการทดลอง ได้แก่ รัศมีป่าตาย 4 ระดับ คือ 6, 8, 10 และ 12 มม. ทำการทดสอบตัวแปรที่ละระดับและบันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงต่อระยะความลึกที่ขึ้นรูป วัดแรงและบันทึกผลการทดลองด้วยอุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ (Mini Data Logger) ซึ่งเป็นอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลพื้นฐานของระบบ (Data Logger) โดยผ่านอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน (Pressure Transducer) ตัววัดระยะทาง (Liners Guide) บันทึกข้อมูลผ่านอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล (Flash Drive) เพื่อความสะดวกในการถ่ายโอนข้อมูลจากอุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณมายังคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ แสดงดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 อุปกรณ์เครื่องวัดความเรียบผิวของชิ้นงาน

### 3.3.3 เครื่องวัดความเรียบผิวของชิ้นงาน

เครื่องวัดความเรียบผิวของชิ้นงานแบบหัวลาก โดยใช้เข็มลากเคลื่อนที่เหนือผิวหน้าชิ้นงาน โดยเข็มลากจะยึดกับก้านคลื่นไดอลอนเนื่องจากความหยาบของผิวชิ้นงาน จำเป็นจะต้องศึกษาถึงวิธีการใช้งานของเครื่องให้ถูกต้อง เช่น การตั้งค่าก่อนการวัด เครื่องวัดความเรียบผิวจะเป็นของบริษัท Mitutoyo รุ่น Mitutoyo Surftest 301 แสดงดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 เครื่องวัดความเรียบผิวของชิ้นงาน

### 3.3.4 อุปกรณ์วัดความหนาชิ้นงาน

วัดความหนาของชิ้นงานด้วยไมโครมิเตอร์ดิจิตอล Mitutoyo แสดงดังภาพที่ 3.8 โดยกำหนดตำแหน่งในการวัดไว้ 2 ตำแหน่งคือ ที่บริเวณผนังถ้วยด้านตรง และผนังบริเวณมุมถ้วย โดยทำการตัดผ่าครึ่งเพื่อวัดความหนาของผนังชิ้นงานในตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้



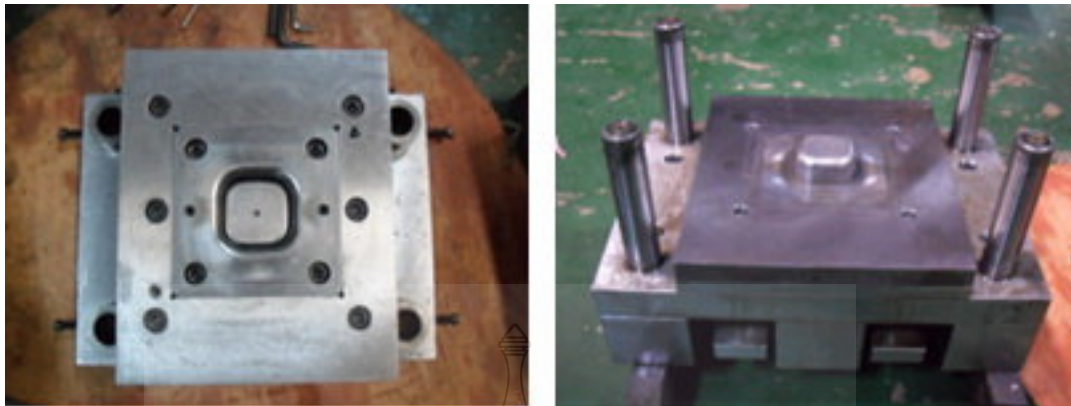
ภาพที่ 3.8 เครื่องมือวัดความหนาของชิ้นงาน

### 3.3.5 น้ำมันหล่อลื่น

ในการลากขึ้นรูปด้วยสียเหล็กมัจตุรัสแบบมีปีกที่รัศมีบาคาย 4 ระดับ คือ 6, 8, 10 และ 12 มม. เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของรัศมีบาคายที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปด้วยสียเหล็กมัจตุรัสแบบมีปีกของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) และเหล็กกล้าไร้ครีออนสำหรับ โครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH440 (JIS) เพื่อให้ผลการทดลองเป็นไปอย่างถูกต้องโดยไม่มีอิทธิพลของสารหล่อลื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงเลือกใช้สารหล่อลื่นเพียงชนิดเดียวในการลากขึ้นรูป สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำมันมะพร้าว ซึ่งเป็นน้ำมันพืชที่มีลักษณะสีเหลือง มีราคาถูกนิยมใช้กันโดยทั่วไปใช้ในงานลากขึ้นรูปเล็กได้ทั้งเหล็กกล้าและเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถใช้หล่อลื่นได้โดยตรงไม่ต้องผสมกับน้ำ

### 3.3.6 ชุดแม่พิมพ์สำหรับลากขึ้นรูปด้วยสียเหล็กมัจตุรัสแบบมีปีก

เป็นแม่พิมพ์สำหรับลากขึ้นรูปด้วยสียเหล็กมัจตุรัสแบบมีปีก ที่มีขนาดความกว้างของก้นถ้วยสียเหล็กเท่ากับ 60 มม. ความยาวเท่ากับ 60 มม. และความลึกเท่ากับ 30 มม. สามารถถอดเปลี่ยนคายได้ขณะแม่พิมพ์ติดตั้งอยู่บนเครื่องปั๊มไฮดรอลิก โดยไม่ต้องยกแม่พิมพ์ลง ลักษณะของชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปด้วยสียเหล็กมัจตุรัสแบบมีปีก แสดงดังภาพที่ 3.9

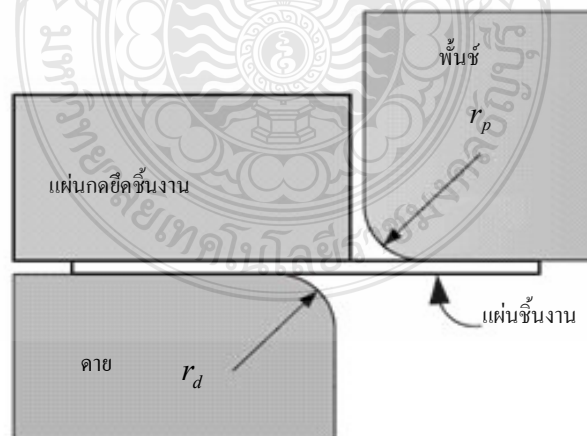


(ก) ชุดแม่พิมพ์บน

(ข) ชุดแม่พิมพ์ล่าง

ภาพที่ 3.9 ลักษณะของชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปด้วยสตีลเหล็ยมีจตุรัสแบบมีปีก

ในการทดลองจะใช้พื้นที่เพียงตัวเดียวแต่จะเปลี่ยนขนาดของรัศมีปาดาย โดยจะใช้ขนาดของรัศมีมุมคายคงที่ ( $R_d$ ) เท่ากับ 21.71 มม. แล้วเปลี่ยนขนาดรัศมีปาดาย 4 ระดับ คือ 6, 8, 10 และ 12 มม. พื้นที่และคายทำจากเหล็ก SKD11 ชุบแข็งที่ระดับ  $60 \pm 2$  HRC โดยมีรัศมีปาดายพื้นที่เท่ากับ 10 มม. รัศมีมุมพื้นที่ ( $R_p$ ) เท่ากับ 20 มม. มีระยะช่องว่างระหว่างพื้นที่และคาย เท่ากับ 1.71 มม. ลักษณะของรัศมีมุมพื้นที่และรัศมีมุมคาย แสดงดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 ภาพหน้าตัดของรัศมีมุมพื้นที่ ( $r_p$ ) และรัศมีมุมคาย ( $r_d$ )



### 3.4 วิธีการดำเนินงาน

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นการลากขึ้นรูปด้วยสื่เหล็กมจัตุรัสแบบมีปีก ขนาดความกว้างกันด้วย 60 มม. ความยาวกันด้วย 60 มม. ความลึก 30 มม. (กว้าง × ยาว × สูง) ภายใต้วแปรดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 ตัวแปรคงที่

- 1) ลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกขนาดความกว้างกันด้วย 60 มม. ความยาวกันด้วย 60 มม. ที่ความลึก 30 มม.
- 2) ขนาดแผ่นเปล้าสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดความกว้าง 120 มม. ความยาว 120 มม. ที่ขนาดความหนาของแผ่นเปล้า 1.4 มม.
- 3) ใช้รัศมีพ้นซ์เท่ากับ 10 มม.
- 4) ช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์เท่ากับ 1.71 มม.
- 5) รัศมีมุมด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัส เท่ากับ 20 มม.
- 6) ใช้น้ำมันมะพร้าว เป็นสารหล่อลื่นในการทดลอง
- 7) ความเร็วในการลากขึ้นรูปที่ใช้มีค่าเท่ากับ 1m/5s
- 8) แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานที่ 54.52 kN สำหรับเหล็ก SAPH 440 และที่ 36.61 kN สำหรับเหล็ก SPCC

#### 3.4.2 ตัวแปรที่แปรเลี่ยน

- 1) รัศมีป่าคยที่ใช้ในการทดลอง 4 ระดับคือ 6, 8, 10 และ 12 มม.
- 2) วัสดุที่ใช้ทดลองคือ เหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC (JIS) และเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS)

### 3.5 การคำนวณทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การที่จะดำเนินการทดลองได้นั้น จำเป็นที่จะต้องทราบค่าต่าง ๆ ในทางทฤษฎีก่อนเพื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณ ไปใช้เป็นค่าในการอ้างอิงเบื้องต้น ของการทดลอง สำหรับค่าที่มีความจำเป็นที่ต้องทราบก่อนการทำการทดลอง ก็ประกอบไปด้วยค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปชิ้นงาน ค่าของแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานที่ใช้ในการลากขึ้นรูปของวัสดุที่นำมาทำการทดลองทั้งสองชนิดคือ เหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC (JIS) และเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับ โครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) ค่าของขนาดแผ่นเปล้าชิ้นงานก่อนการลากขึ้นรูปสำหรับรายละเอียดในการคำนวณค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการทดลองมีดังนี้

### 3.5.1 อัตราส่วนการลากขึ้นรูป (Drawing Ratio; $\beta$ )

อัตราส่วนการลากขึ้นรูป (Drawing Ratio;  $\beta$ ) เป็นค่าที่สำคัญในการหาจำนวนครั้งในการขึ้นรูปขึ้นงานด้วย ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางขึ้นงานเริ่มต้น ( $d_0$ ) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของขึ้นงานที่ต้องการขึ้นรูป ( $d_1$ ) ในกรณีที่เป็นการลากขึ้นรูปกล่อ่งสี่เหลี่ยม ให้เราทำการเทียบ (Equivalent) โดยทำการเทียบพื้นที่หน้าตัดของพื้นที่ให้เท่ากับ ( $d_1$ ) และเทียบพื้นที่หน้าตัดของแผ่นขึ้นงานให้เท่ากับ ( $d_0$ ) โดยสามารถทำได้ดังนี้

$$\beta_{\max} = \frac{d_0}{d_1} = \frac{120}{60} = 2$$

### 3.5.1 แรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสำหรับเหล็ก SAPH 440

ในการทดลองนั้นจำเป็นต้องทราบค่าแรงในการขึ้นรูปที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีก่อน เพื่อจะได้นำไปเปรียบเทียบกับความสามารถของเครื่องปั๊มไฮดรอลิก คว้าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปที่ได้จากการคำนวณนั้นมามีค่ามากกว่าแรงสูงสุดของเครื่องปั๊มไฮดรอลิก หรือไม่ อย่างไรก็ตามแรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่คำนวณได้นั้น เป็นเพียงการประมาณค่าที่ใกล้เคียง ในการทดลองนั้นแรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูปนั้นอาจจะมีค่าสูงหรือต่ำกว่าได้ เป็นผลมาจากอิทธิพลจากปัจจัยต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการลากขึ้นรูปขึ้นงาน ซึ่งอิทธิพลเหล่านี้อาจจะอยู่นอกเหนือการควบคุม ซึ่งเหล็ก SAPH 440 จะมีความเค้นแรงดึงสูงสุดอยู่ที่  $478 \text{ N/mm}^2$  แรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$F_{d,\max} = \pi d_m t \left[ 1.1 \frac{1.3 \sigma_u}{\eta_{\text{def}}} \left( \ln \frac{d_0}{d_1} - 0.25 \right) \right]$$

$$\text{เมื่อ } d_m = d_1 + t$$

$$d_m = 60 + 1.4 = 61.4 \text{ mm}$$

$$t = 14 \text{ mm}$$

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

$$d_0 = 120 \text{ mm}^2$$

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

$\eta_{\text{def}} =$  ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูปมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ~ 0.7 แทนค่าลงในสมการจะได้

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

$$= 163.55 \text{ kN}$$

ดังนั้น จะได้แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปเหล็ก SAPH 440 เท่ากับ 163.55 kN

### 3.5.2 แรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูปสำหรับเหล็ก SPCC

เนื่องจากวัสดุเหล็ก SPCC จะมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดอยู่ที่  $321 \text{ N/mm}^2$  ซึ่งน้อยกว่าเหล็ก SAPH 440 ดังนั้นจึงต้องคำนวณแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปของวัสดุแต่ละชนิดเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในการทดลอง แรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปของเหล็ก SPCC สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F_{d,\max} = \pi d_m t \left[ 1.1 \frac{1.3\sigma_u}{\eta_{def}} \left( In \frac{d_0}{d_1} - 0.25 \right) \right]$$

$$\text{เมื่อ } d_m = d_1 + t$$

$$d_m = 60 + 1.4 = 61.4 \text{ mm}$$

$$t = 14 \text{ mm}$$

$$\sigma_u = 321 \text{ N/mm}^2$$

$$d_0 = 120 \text{ mm}^2$$

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

$\eta_{def}$  = ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูปมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ~ 0.7 แทนค่าลงในสมการจะได้

$$\begin{aligned} F_{d,\max} &= \pi \times 61.4 \times 1.4 \left[ 1.1 \frac{1.3 \times 321}{0.5} \left( In \frac{120}{60} - 0.25 \right) \right] \\ &= 109.83 \text{ kN} \end{aligned}$$

ดังนั้น จะได้แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสำหรับเหล็ก SPCC เท่ากับ 109.83 kN

### 3.5.3 แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานสำหรับการลากขึ้นรูปเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440

ขนาดแรงกดของแผ่นกดยึดชิ้นงาน (Blank Holder Force) เป็นแรงที่ใช้เพื่อป้องกันการเกิดรอยยับและการโก่งของปีกชิ้นงานที่เกิดจากความเค้นอัดในแนวสัมผัส (แนวเส้นรอบวง) โดยที่ขนาดของแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานที่พอเพียงสามารถป้องกันไม่ให้ชิ้นงานเกิดรอยยับได้ ในการกำหนดแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงาน จะหาได้จากการทดลองเป็นสำคัญ ปริมาณความต้องการของแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานจะต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสมกับวัสดุชนิดนั้นๆ แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานนั้นมีความสำคัญต่อกระบวนการลากขึ้นรูปเป็นอย่างมาก หากเลือกใช้แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานที่ไม่เหมาะสมก็จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานได้ ถ้าขนาดของแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานไม่เพียงพอ ก็จะทำให้เกิดการยับของโลหะขึ้น ในขณะที่หากันถ้าแรงกดของแผ่นกดยึดชิ้นงานมากเกินไป โลหะก็จะไม่สามารถไหลตัวได้เช่นกัน ชิ้นงานก็จะถูกดันจนฉีกขาด แรงกดชิ้นงานในการลากขึ้นรูปส่วนใหญ่จะพิจารณาโดยการ

ทดลองดูความผิดพลาดจากแรงน้อยที่สุด ไปจนถึงแรงกดมากที่สุดส่วนมากในกระบวนการลากขึ้นรูป จะใช้ขนาดของแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานประมาณ 1/3 ของแรงที่ใช้ขึ้นรูปสามารถคำนวณได้ดังนี้

แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานสำหรับการขึ้นรูปด้วยเหล็ก SAPH 440

$$\begin{aligned} F_{BH} &= \frac{F_{d,max}}{3} \\ &= \frac{163.55}{3} \\ &= 54.52 \text{ kN} \end{aligned}$$

แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานสำหรับการขึ้นรูปด้วยเหล็ก SPCC

$$\begin{aligned} F_{BH} &= \frac{F_{d,max}}{3} \\ &= \frac{109.83}{3} \\ &= 36.61 \text{ kN} \end{aligned}$$

### 3.5.4 ขนาดของรัศมีพื้นซ์และคาย

รัศมีของพื้นซ์จะใหญ่กว่ารัศมีของคาย โดยมีแฟกเตอร์ 3 ถึง 5 เท่า การกำหนดรัศมีคาย ( $r_D$ ) ขึ้นอยู่กับขนาดความหนาของแผ่นโลหะ รัศมีคายขนาดใหญ่จะช่วยให้แผ่นโลหะไหลตัวง่ายขึ้น ลดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป การออกแบบรัศมีคาย ( $r_D$ ) ให้มีขนาดพอเหมาะคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$\begin{aligned} r_D &= (5 - 10 \text{ เท่า}) \times \text{ความหนาของแผ่นขึ้นงาน} \\ r_D &= (5 - 10) \times 1.4 \\ &= (7 - 14) \\ &= \text{เลือกใช้รัศมีคาย 10 มม.} \end{aligned}$$

เนื่องจากวัสดุขึ้นงานเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมากอาจจะเกิดการไหลตัวของโลหะไม่ได้ ถ้ามีรัศมีน้อยเกินไปจึงได้เลือกใช้รัศมีของคายที่ 10 มม. เพื่อที่จะลดแรงกดของเครื่องปั๊มและลดหน้าสัมผัสของแผ่นกดยึดชิ้นงานและปีกของขึ้นงาน

รัศมีของพื้นซ์ควรใหญ่กว่ารัศมีของคาย โดยมีแฟกเตอร์ 3 ถึง 5 เท่า  $r_p$  จะไม่เล็กกว่าขนาด  $r_D$  ไม่เช่นนั้นพื้นซ์อาจทำการตัดเจาะ (Pierce) งานได้ ดังนั้นรัศมีของพื้นซ์จึงใช้ค่าแฟกเตอร์ 3 - 5  $r_D$  เลือก 3  $r_D$

$$\begin{aligned} r_p &= (3 - 5) \times r_D \\ r_p &= (3 - 5) \times 10 \end{aligned}$$

$$= (30 - 50)$$

$$= \text{เลือกใช้รัศมีพื้นซ์ 10 มม.}$$

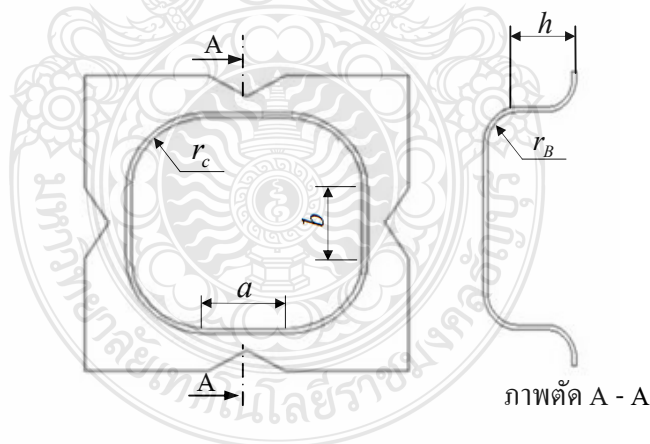
เนื่องจากความสูงของชิ้นงานสำเร็จคือ 30 มิลลิเมตร ถ้าหากใช้รัศมีพื้นซ์ที่ 20 มม. หรือ 30 มม. จะทำให้ชิ้นงานที่ได้ไม่มีผนังด้านตรงจึงเลือกใช้รัศมีพื้นซ์ที่ 10 มม.

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

ตามที่คำนวณแล้วต้องใช้รัศมีมุมที่ 15 มม. แต่เนื่องจากต้องการให้การขึ้นรูปมีการไหลตัวของเนื้อวัสดุที่บริเวณมุมด้วยที่ดีขึ้นจึงได้เลือกใช้รัศมีมุมที่ 20 มม.

### 3.5.5 ขนาดของแผ่นวัสดุก่อนการลากขึ้นรูป

การกำหนดขนาดที่เหมาะสมสำหรับแผ่นโลหะเปล่านั้นมีความสำคัญกับความสำเร็จในการขึ้นรูปหลักการเบื้องต้นคือ ขนาดของแผ่นโลหะเปล่านั้นควรมีขนาดเล็กที่สุดที่จะสามารถขึ้นรูปเป็นรูปร่างตามที่ต้องการได้ ด้วยเหตุผล 2 ข้อคือ 1 เป็นเรื่องของการประหยัดวัสดุ 2 แผ่นเปล่าที่ขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนการลากขึ้นรูปสูง โอกาสที่จะเกิดความเสียหายกับชิ้นงานขณะทำการขึ้นรูปก็จะเพิ่มขึ้น การกำหนดหาขนาดแผ่นโลหะเปล่านั้นมีรายละเอียดแสดงดังภาพที่ 3.11

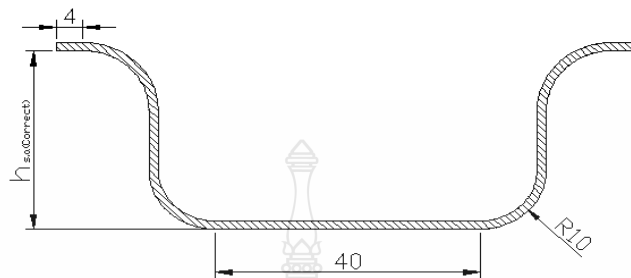


ภาพที่ 3.11 ลักษณะชิ้นงานที่ต้องการ

ขนาดชิ้นงานสำเร็จ	ความสูง $h$	=	20 mm
รัศมีก้น	$r_B$	=	10 mm
รัศมีมุม	$r_c$	=	20 mm

$$\begin{aligned}
\text{ความยาว } a &= 20 \text{ mm} \\
\text{ความกว้าง } b &= 20 \text{ mm} \\
\text{ปีกของชิ้นงานด้านละ} &= 4 \text{ mm} \\
\text{ความหนาของถ้วย} &= 1.4 \text{ mm} \\
\text{หาค่าความสูงของผนัง } h_s &= (0.57 \times r_B) + h + r_c \\
&= (0.57 \times 10) + 20 + 20 \\
&= 45.7 \text{ mm} \\
\text{รัศมีสร้าง } R &= \sqrt{1.012r_c^2 + 2r_c(h_s + 0.506r_B)} \\
&= \sqrt{1.012(20)^2 + 2(20)(45.7 + 0.506(10))} \\
&= 49.35 \text{ mm} \\
\text{องค์ประกอบแก้ค่า } X &= 0.074 \left[ \frac{R}{2r_c} \right]^2 + 0.982 \\
&= 0.074 \left[ \frac{49.38}{2(20)} \right]^2 + 0.982 \\
&= 1.10 \text{ mm} \\
\text{องค์ประกอบแก้ค่า } Y &= \frac{\pi(X^2 - 1)}{4} \\
&= \frac{\pi(1.10^2 - 1)}{4} \\
&= 0.165 \text{ mm} \\
\text{ความสูงของผนังด้านข้างที่เอาออก} & \\
h_{s,a} &= \frac{Y \times R^2}{a} \\
&= \frac{0.165 \times 49.35^2}{40} \\
&= 10.05 \text{ mm} \\
\text{ความสูงของผนังด้านข้างที่ถูกต้อง} & \\
h_{s,a(\text{Correct})} &= h_{s,a(\text{Correct})} = h_s - h_{s,a} \\
&= 45.7 - 10.04 \\
&= 35.66 \text{ mm}
\end{aligned}$$

เมื่อรวมผลที่ได้ทั้งหมด ชิ้นงานที่ใช้ก่อนการขึ้นรูปจะให้ความยาวและความกว้างของแผ่นรวมกับค่าปีกของชิ้นงานที่ต้องการคือ 4 มม. แสดงดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 แบบเพื่อช่วยประมาณค่าแผ่นชิ้นงาน

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

ดังนั้นในการทดลองจะเลือกใช้ขนาดของแผ่นโลหะเปล่าที่ได้จากการคำนวณคือ 120 มม. อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการคำนวณอาจจะมากหรือน้อยกว่าแผ่นชิ้นงานจริงในการทดลองจะทำการเตรียมแผ่นเปล่าที่  $120 \times 120$  มม. เป็นค่าเริ่มต้นก่อนแล้วทำการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจากนั้นทำการปรับแต่งให้ได้ขนาดที่เหมาะสม

### 3.6 ปัจจัยของการทดลอง

ในขั้นตอนของการทดลองถือเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก จำเป็นต้องดำเนินการอย่างละเอียดรอบคอบเพื่อลดความผิดพลาดและความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ได้รับ เพื่อให้การทดลองดำเนินไปในทิศทางเดียวกันอย่างถูกต้อง บรรลุผลตามจุดประสงค์ของการวิจัยผู้ทำการศึกษาจึงได้กำหนดปัจจัยในการทดลองดังนี้

#### 3.6.1 ปัจจัยในการทดลองสำหรับวัสดุเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC (JIS)

##### 1) ปัจจัยควบคุม

1. สารหล่อลื่นใช้น้ำมันมะพร้าว
2. แรงกดแผ่นยึดชิ้นงาน (Blank Holder Force) ประมาณ 36 kN

3.ขนาดของแผ่นเปล่า กว้าง 120 มม. ยาว 120 มม.

4.ระยะกดลึกของพื้นที่ เท่ากับ 30 มม.

5.ความหนาของแผ่นเปล่า เท่ากับ 1.4 มม.

2) ปัจจัยทดสอบ

1.รัศมีบาดาย 6, 8, 10 และ 12 มม.

3.6.2 ปัจจัยในการทดลองสำหรับวัสดุเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับ โครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS)

1) ปัจจัยควบคุม

1.สารหล่อลื่นใช้น้ำมันมะพร้าว

2.แรงกดแผ่นยึดชิ้นงาน (Blank Holder Force) ประมาณ 55 kN

3.ขนาดของแผ่นเปล่า กว้าง 120 มม. ยาว 120 มม.

4.ระยะกดลึกของพื้นที่ เท่ากับ 30 มม.

5.ความหนาของแผ่นเปล่า เท่ากับ 1.4 มม.

2) ปัจจัยทดสอบ

1.รัศมีบาดาย 6, 8, 10 และ 12 มม.

### 3.7 การติดตั้งแม่พิมพ์

การติดตั้งแม่พิมพ์นั้นถือว่าเป็นขั้นตอนสำคัญขั้นตอนหนึ่งในการเตรียมการก่อนการทดลอง จำเป็นต้องมีการดำเนินการติดตั้งอย่างถูกต้องให้แม่พิมพ์มีความมั่นคงแข็งแรง และเพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน โดยมีขั้นตอนในการติดตั้งดังนี้

#### 3.7.1 ยกแม่พิมพ์ขึ้นเครื่องปั๊มไฮดรอลิก

เนื่องจากตัวแม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับการทดลองครั้งนี้ มีน้ำหนักมาก การเคลื่อนย้ายแม่พิมพ์เป็นไปด้วยความยากลำบาก จึงต้องกระทำด้วยความระมัดระวัง ดังนั้นในการนำแม่พิมพ์ขึ้นติดตั้งบนเครื่องเพรส จึงต้องใช้รถยกระบบไฮดรอลิก ช่วยในการเคลื่อนย้าย และยกแม่พิมพ์ขึ้นไปบนตัวเครื่องเครื่องปั๊มไฮดรอลิก เพื่อทำการติดตั้งต่อไป แสดงดังภาพที่ 3.13





ภาพที่ 3.13 การนำแม่พิมพ์ขึ้นเครื่องปั๊มไฮดรอลิก

### 3.7.2 เดินแรมบนเครื่องปั๊มไฮดรอลิกมากดแม่พิมพ์ไว้

เมื่อนำแม่พิมพ์ขึ้นบนเครื่องปั๊มไฮดรอลิกแล้ว ก็จะทำการติดตั้งแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องปั๊มไฮดรอลิกโดยการเลื่อนแรมบนของเครื่องลงมาให้แตะกับแม่พิมพ์ เพื่อให้หน้าสัมผัสแม่พิมพ์ได้แนบกันสนิทกับหน้าโต๊ะของเครื่องปั๊มไฮดรอลิก และเพื่อความสะดวกในการยึดแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องปั๊มไฮดรอลิก แสดงดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 การกดแม่พิมพ์ด้วยเครื่องปั๊มไฮดรอลิก

### 3.7.3 ยึดแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องปั๊มไฮดรอลิก

ในการยึดแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องปั๊มไฮดรอลิก จำเป็นต้องตรวจสอบความเรียบร้อย ความแข็งแรงมั่นคงของแม่พิมพ์ให้เป็นที่แน่ใจก่อนว่าเนื้อทุกตัวได้ขันจนแน่นและมีความแข็งแรงพอที่จะสามารถรับน้ำหนักของแม่พิมพ์ได้ แม่พิมพ์ที่ได้ติดตั้งนั้นมีความมั่นคงเพียงพอ และพร้อมที่จะใช้งานได้หรือไม่ทั้งนี้ควรคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานเป็นสำคัญ แสดงดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 การยึดแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องปั๊มไฮดรอลิก

### 3.7.4 ปรับตั้งระยะยกตัวของคูล์น

ในการขึ้นรูปชิ้นงานจำเป็นจะต้องกำหนดระยะการยกตัวของคูล์นให้เหมาะสมตามลักษณะของแม่พิมพ์ จากภาพที่ 3.16 ลิมิตสวิทช์ตัวบนจะเป็นตัวกำหนดระยะในการยกตัวขึ้นของคูล์น เมื่อเหล็กตัวที่เคลื่อนขึ้นมาแตะกับลิมิตสวิทช์ตัวบนคูล์นก็จะหยุดการเคลื่อนที่ ส่วนลิมิตสวิทช์ตัวล่างทำหน้าที่หยุดการเคลื่อนที่ของคูล์นขณะเคลื่อนที่ลง



ภาพที่ 3.16 การตั้งระยะคูล์น

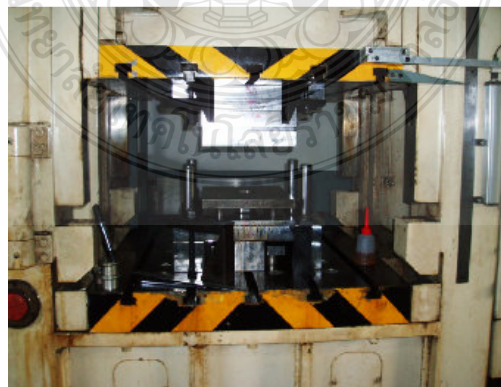
### 3.7.5 ปรับตั้งระยะชักของเครื่องปั๊มไฮดรอลิก

เป็นการกำหนดระยะยกขึ้นสูงสุดและระยะกดลงต่ำสุดของเครื่องปั๊มไฮดรอลิก ในการปรับตั้งระยะ จะต้องให้ความสัมพันธ์กับแม่พิมพ์ และความลึกของชิ้นงานที่ต้องการ จากภาพที่ 3.17 ลิมิตสวิทช์ตัวบนสุดจะทำหน้าที่กำหนดระยะยกสูงสุดของแรมบน เมื่อเดินแรมบนขึ้นไปแตะกับลิมิตสวิทช์ตัวบนสุดแรมบนก็จะหยุดเคลื่อนที่ ลิมิตสวิทช์ตัวที่สองรองลงมาเป็นลิมิตสโตว์เมื่อเดินแรมบนลงมาด้วยความเร็วจนมาแตะที่ลิมิตสวิทช์ตัวที่สอง แรมบนจะเดินเป็นสโตว์ทันที ลิมิตสวิทช์ตัวที่สามเป็นลิมิตตัดหยุดในช่วงล่าง เมื่อแรมผ่านสโตว์จนมาแตะกับสวิทช์ตัวที่สาม จะเป็นการหยุดสโตว์ในการอัดชิ้นงาน ลิมิตสวิทช์ตัวล่างสุดเป็นลิมิตตัดหยุดในระบบออโต้ จะไม่มีผลในระบบแมนนวล



ภาพที่ 3.17 การตั้งลิมิตสวิทช์ (Limit Switch)

### 3.7.6 แม่พิมพ์พร้อมใช้งาน



ภาพที่ 3.18 แม่พิมพ์พร้อมใช้งาน

### 3.8 การทดสอบแม่พิมพ์

เมื่อติดตั้งแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องปั๊มไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน และได้เชื่อมต่ออุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงดำเนินการทดลองแม่พิมพ์หรือไทเอาท์ (Try – Out) เป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบความสามารถในการทำงานของแม่พิมพ์ เพื่อดูว่าแม่พิมพ์สามารถผลิตชิ้นงานได้มีคุณภาพมากน้อยเพียงใด หากชิ้นงานที่ได้มีข้อบกพร่องจะต้องทำการแก้ไขปรับปรุงต่อไป เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพดีตามที่ต้องการ ผลที่ได้จากการทดสอบแม่พิมพ์เป็นดังนี้

#### 3.8.1 การทดสอบแม่พิมพ์ครั้งที่ 1

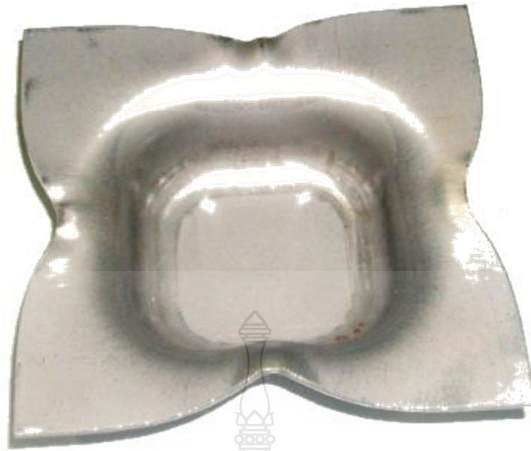
เมื่อได้ทำการติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องปั๊มไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้ทำการศึกษาก็ได้ทดลองลากขึ้นรูปชิ้นงานด้วยสแตนเลสแบบมีปีก โดยใช้แผ่นขึ้นงานเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) ที่ระดับแรงกดแผ่นกดขึ้นงานที่ 36.61 kN ทำการลากขึ้นรูปที่ความลึก 30 มม. ผลปรากฏว่าชิ้นงานที่ได้มีความสมบูรณ์ปราศจากรอยแตกและรอยย่น แสดงดังภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 ชิ้นงานจากการทดสอบแม่พิมพ์ครั้งที่ 1

#### 3.8.2 การทดสอบแม่พิมพ์ครั้งที่ 2

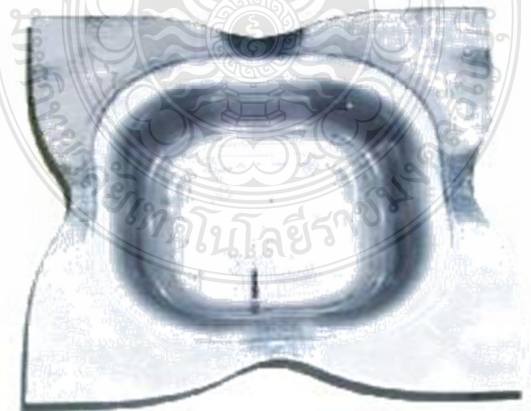
จากการทดสอบแม่พิมพ์สามารถผลิตชิ้นงานจากวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) ได้สมบูรณ์จึงได้เปลี่ยนวัสดุในการทดสอบแม่พิมพ์เป็นเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) ทดลองขึ้นรูปชิ้นงานที่ระดับแรงกดแผ่นกดขึ้นงานเดียวกันกับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC ผลปรากฏว่าชิ้นงานจากวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SAPH 440 (JIS) เกิดรอยย่นขึ้นบริเวณปีกของชิ้นงาน แสดงดังภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 ชิ้นงานจากการทดสอบแม่พิมพ์ครั้งที่ 2

### 3.8.3 การทดสอบแม่พิมพ์ครั้งที่ 3

ในการทดสอบแม่พิมพ์ครั้งที่สองนั้นปรากฏว่าเมื่อเปลี่ยนแผ่นชิ้นงานเป็นเหล็กกล้ารีดร้อน สำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) จะเกิดรอยร่นขึ้นที่บริเวณปีกของชิ้นงาน จึงได้เพิ่มแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเป็น 54.52 kN ตามค่าที่ได้จากการคำนวณ ปรากฏว่าชิ้นงานจากการทดสอบแม่พิมพ์ครั้งที่ 3 นั้นมีความสมบูรณ์ปราศจากรอยร่นบริเวณปีกของชิ้นงาน แสดงดังภาพที่ 3.21

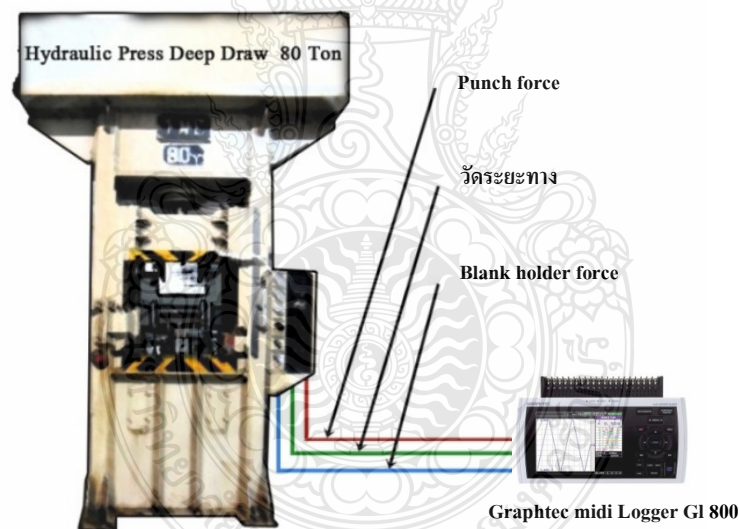


ภาพที่ 3.21 ชิ้นงานจากการทดสอบแม่พิมพ์ครั้งที่ 3

จากการทดสอบแม่พิมพ์ทั้ง 3 ครั้งได้ผลออกมาในระดับที่น่าพอใจ ชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบแม่พิมพ์มีความสมบูรณ์ เมื่อตรวจสอบดูด้วยสายตาก็ไม่พบรอยแตกและรอยย่น เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ จึงสามารถที่จะดำเนินการในขั้นตอนต่อไปได้ คือการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล

### 3.9 การเชื่อมต่ออุปกรณ์บันทึกข้อมูล

การเชื่อมต่ออุปกรณ์บันทึกข้อมูลกับเครื่องปั๊มไฮดรอลิก จะเป็นการเชื่อมต่อเครื่องขยายสัญญาณ (Mini Data Logger) ผ่านตัววัดแรงดันน้ำมัน และตัววัดระยะทางที่ติดตั้งอยู่กับเครื่องปั๊มไฮดรอลิก เพื่อใช้วัดค่าแรงกดของพันทัน แรงกดของแผ่นยึดชิ้นงาน และระยะกดคลีทของชิ้นงาน บันทึกข้อมูลผ่านอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล (Flash Drive) เพื่อความสะดวกในการถ่ายโอนข้อมูลจากอุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณมายังคอมพิวเตอร์ การเชื่อมต่ออุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณเข้ากับเครื่องปั๊มไฮดรอลิก แสดงดังภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 การเชื่อมต่ออุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ

### 3.10 วิธีการเก็บข้อมูลในการทดลอง

เมื่อทำการทดสอบจนเป็นที่มั่นใจว่าความสามารถของแม่พิมพ์นั้นมีคุณภาพเป็นที่น่าพอใจแล้ว จึงดำเนินการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อเก็บข้อมูลที่ต้องการ บันทึกลงในตารางบันทึกผลการทดลอง เพื่อนำไปวิเคราะห์ และสรุปผลการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างใบบันทึกผลการทดลองแรงสูงสุดที่ใช้ลากขึ้นรูปด้วยสียี่ห้อจตุรัสแบบมีปีก

ชั้นที่	แรง (kN)		คุณภาพชิ้นงาน
	F	F <sub>BH</sub>	
1			
2			
3			
4			
5			

หลังจากที่ได้ทำการทดลองปั๊มขึ้นรูปเพื่อบันทึกค่าของแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปแล้ว จะนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการลากขึ้นรูปลึกที่มีความสมบูรณ์ ไม่มีรอยแตกและรอยย่น มาทำการวัดค่าความหยาบผิว โดยกำหนดตำแหน่งในการวัด แสดงดังภาพที่ 3.23

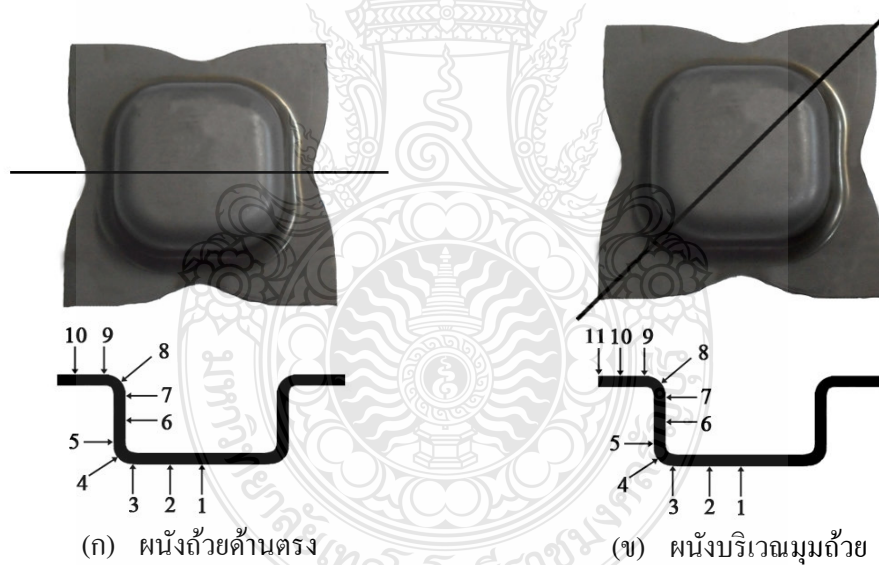


ภาพที่ 3.23 ตำแหน่งในการวัดค่าความหยาบผิว

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างใบบันทึกผลการทดลองการวัดค่าความหยาบผิว

ชั้น	ตำแหน่งที่ 1 ( $\mu\text{m}$ )	ตำแหน่งที่ 2 ( $\mu\text{m}$ )	ตำแหน่งที่ 3 ( $\mu\text{m}$ )	ตำแหน่งที่ 4 ( $\mu\text{m}$ )	ค่าเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
1					
2					
3					
4					
5					

จากนั้นทำการวัดค่าความหนาของชิ้นงานในส่วนผนังด้านตรง 10 จุด และผนังบริเวณมุมถ้วย 11 จุด โดยได้กำหนดจุดสำหรับวัดความหนาผนังชิ้นงานด้านตรงและบริเวณมุม แสดงดังภาพที่ 3.24



ภาพที่ 3.24 ตำแหน่งในการวัดความหนาของผนังถ้วย



ตารางที่ 3.5 ตัวอย่างใบบันทึกผลการทดลองการวัดค่าความหนาของชิ้นงาน

ตำแหน่งที่วัด	ชนิดเหล็ก			ค่าเฉลี่ย
	ค่าความหนาของชิ้นงาน (มม.)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				

### 3.11 การวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากทำการทดลองตั้งแต่ต้นจนเสร็จสิ้นการทดลอง สามารถบันทึกข้อมูลต่างๆ ตั้งแต่เริ่มต้นและช่วงต่างๆ ตามที่กำหนดไว้จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบผล เพื่อให้บรรลุผลตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัยที่กำหนดไว้ ได้ข้อมูลทั้งหมดในลักษณะต่างๆ ดังนี้

- 3.11.1 ค่าของแรงที่ใช้ในการลากชิ้นรูป
- 3.11.2 ค่าของแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานที่ใช้ในการลากชิ้นรูป
- 3.11.3 ค่าความกว้างของชิ้นงานรวมปีก
- 3.11.4 ค่าความหนาผนังด้วยด้านตรงของชิ้นงาน
- 3.11.5 ค่าความหนาผนังบริเวณมุมด้วยของชิ้นงาน
- 3.11.3 ค่าความหยาบผิวที่บริเวณผนังด้วย

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

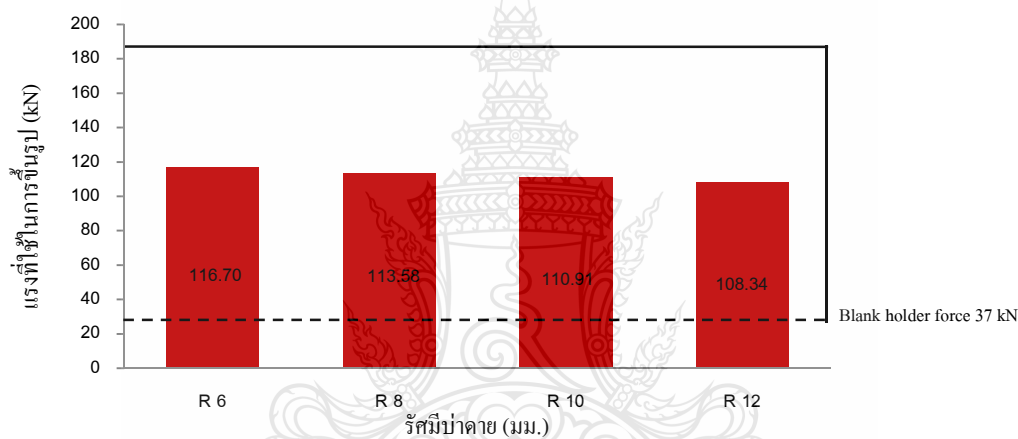
การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการขึ้นรูปเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับ โครงสร้างยานยนต์ที่มีผลต่อการออกแบบแม่พิมพ์ โดยออกแบบแม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับขึ้นรูปเหล็กกล้าทั่วไปจากนั้นจึงทำการเปลี่ยนวัสดุเป็นเหล็กสำหรับขึ้นรูปโครงสร้างยานยนต์ เกรด SAPH 440 (JIS) ทำการกำหนดรัศมีบ่าตาย 4 ระดับ คือ 6 8 10 และ 12 มม. เพื่อเปรียบเทียบถึงความแตกต่างของความสามารถในการลากขึ้นรูปของเหล็กทั้งสองชนิด ทั้งในด้านแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปและคุณภาพของชิ้นงานที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการลากขึ้นรูป ก่อนดำเนินการทดลองผู้ทำการศึกษาได้รวบรวมข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องอย่างละเอียดเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับอ้างอิงก่อนดำเนินการทดลอง ตามข้อกำหนดที่ตั้งไว้ เพื่อให้การทดลองดำเนินไปอย่างถูกต้อง บรรลุตามเป้าหมายและวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ในการทดลองนั้นได้ทำการปรับตั้งค่าแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานที่อ้างอิงมาจากการคำนวณ ซึ่งสามารถสรุปผลในขั้นตอนของการทดลองได้ดังต่อไปนี้

#### 4.1 อิทธิพลของรัศมีบ่าตายที่มีผลต่อแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูป

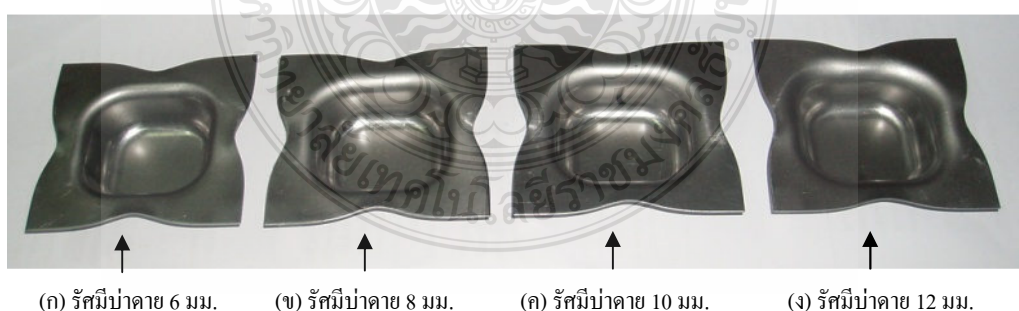
การพิจารณาได้แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 จะเป็นช่วงของแรงที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปชิ้นงาน เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากแผ่นโลหะเริ่มต้นจะถูกงอด้วยรัศมีพื้นซ์และคดงอเหนือรัศมีตายทำให้เกิดการเปลี่ยนรูป แล้วจะถูกทำให้ตรงอีกจนกลายเป็นผนังของถ้วยทรงสี่เหลี่ยม ช่วงที่ 2 เมื่อชิ้นงานเคลื่อนที่ไหลผ่านรัศมีตายแรงจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อระยะกดลึกของพื้นซ์เพิ่มขึ้นแรงกดของพื้นซ์จะพยายามดึงผนังถ้วยและเอาชนะแรงเสียดทานเพื่อที่จะลากขึ้นรูปได้ลึกขึ้น จนกระทั่งแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูป และช่วงที่ 3 แรงที่ใช้จะค่อยๆ ลดลง เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานลดลงสุดท้ายขณะทำการลากขึ้นรูปจนได้ด้วยสำเร็จแรงจะมีค่าลดลงเท่ากับศูนย์

ผลจากการทดลองเนื่องจากวัสดุเหล็ก SPCC มีความสามารถในการยึดตัวได้สูงเหมาะสำหรับการลากขึ้นรูปลึก จึงได้ทำการทดลองลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก โดยใช้ขนาดของแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเท่ากับ  $1/3$  ของแรงที่ใช้ขึ้นรูป จากการทดลองชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้สมบูรณ์ไม่มีรอยแตกและรอยยับ จากนั้นจึงได้ดำเนินการทดลองตามปัจจัยในการทดลองที่ได้กำหนดไว้ สำหรับเหล็ก SPCC ได้ปรับตั้งค่าแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานซึ่งได้จากการคำนวณที่ 36.61 kN ใช้ขนาดตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่าง เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของรัศมีบ่าตายในการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกและนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเหล็ก SAPH 440 จากการทดลองผู้ศึกษาเลือกใช้รัศมี

บ่าคาย 4 ระดับ คือ 6, 8, 10 และ 12 มม. ที่รัศมีบ่าคาย 6 มม. ใช้แรงลากขึ้นรูปชิ้นงานเฉลี่ย 116.70 kN เป็นรัศมีบ่าคายที่ใช้แรงลากขึ้นรูปชิ้นงานสูงที่สุด สูงกว่ารัศมีบ่าคาย 8, 10 และ 12 มม. แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปมีแนวโน้มลดลงตามรัศมีบ่าคายที่ใหญ่ขึ้น ที่รัศมีบ่าคาย 12 มม. ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ ชาญศักดิ์ ภัทรพรนันท์ [19] ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้สมบูรณ์ไม่มีรอยแตกและรอยย่นเช่นเดียวกับรัศมีบ่าคาย 6, 8 และ 10 มม. โดยใช้แรงลากขึ้นรูปเฉลี่ยที่ 108.34 kN ต่ำกว่ารัศมีบ่าคายทั้ง 3 ระดับที่ได้ทำการศึกษาในครั้งนี้ โดยมีค่าเฉลี่ยแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานในการลากขึ้นรูปที่รัศมีบ่าคายทั้ง 4 ระดับเท่ากับ 37 kN นำค่าเฉลี่ยของแรงลากขึ้นรูปชิ้นงานมาสร้างเป็นแผนภูมิแท่งเพื่อเปรียบเทียบแรงลากขึ้นรูปของรัศมีบ่าคายแต่ละระดับ แสดงดังภาพที่ 4.1

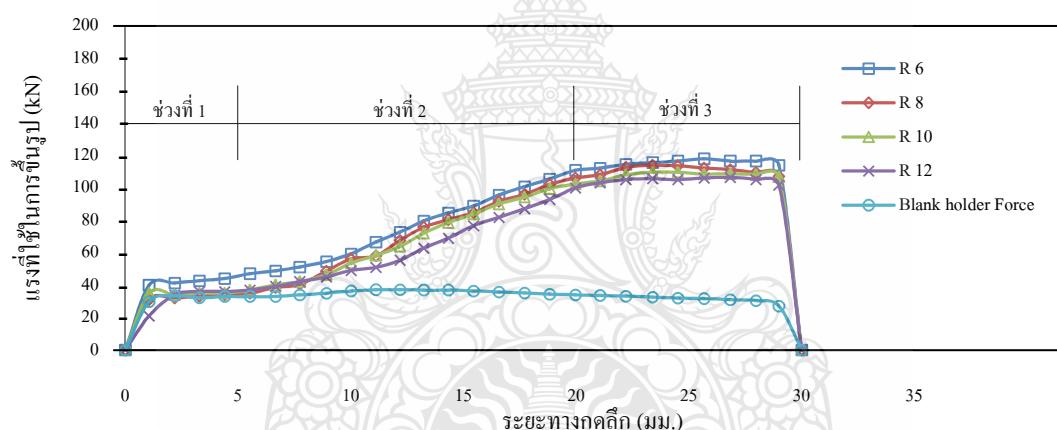


ภาพที่ 4.1 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงานเฉลี่ยเหล็ก SPCC ที่รัศมีบ่าคายแต่ละระดับ



ภาพที่ 4.2 ตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปเหล็ก SPCC ที่รัศมีบ่าคายแต่ละระดับ

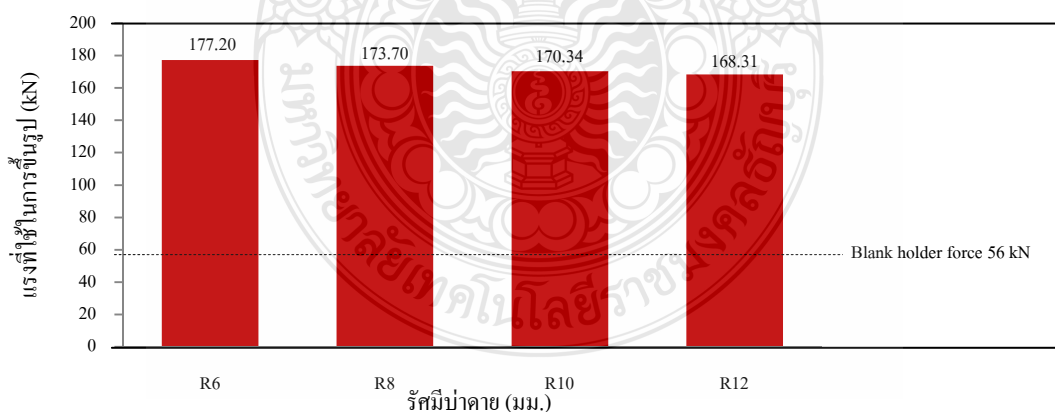
ผลจากการทดลองเมื่อเลือกใช้รัศมีบ่าคายที่ใหญ่ขึ้นแรงที่พื้นจะใช้จะลดลง แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปชิ้นงานเฉลี่ยสูงสุดที่รัศมีบ่าคาย 6 มม. และที่แรงลากขึ้นรูปชิ้นงานเฉลี่ยต่ำสุด ที่รัศมีบ่าคาย 12 มม. ในการทดลองสามารถลากขึ้นรูปชิ้นงาน ได้สมบูรณ์ไม่พบรอยแตกและรอยย่น ได้ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปของรัศมีบ่าคายทั้ง 4 ระดับ ดังภาพที่ 4.2 และจากการทดลอง ที่แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเท่ากัน จะมีความแตกต่างกันของแรงลากขึ้นรูปชิ้นงานตามรัศมีบ่าคายที่เปลี่ยนไป รัศมีบ่าคายใหญ่จะช่วยลดแรงในการลากขึ้นรูปชิ้นงาน จากการไหลตัวของแผ่นชิ้นงานเข้าไปยังปากคายที่เป็นไปได้สะดวก และผิวหน้าสัมผัสของแผ่นชิ้นงานกับแผ่นกดยึดชิ้นงานที่น้อยลงทำให้ที่ระดับแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเท่ากันนั้น รัศมีบ่าคายที่มีขนาดใหญ่จะใช้แรงสูงสุดในการลากขึ้นรูปน้อยกว่ารัศมีบ่าคายขนาดเล็ก เมื่อนำค่าของแรงลากขึ้นรูปมาสร้างเป็นกราฟเส้นเพื่อเปรียบเทียบกับระยะทางกดคลิกของรัศมีบ่าคายทั้ง 4 ระดับจะได้กราฟเส้น แสดงดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 แรงลากขึ้นรูปและแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเฉลี่ยต่อระยะกดคลิกเหล็ก SPCC

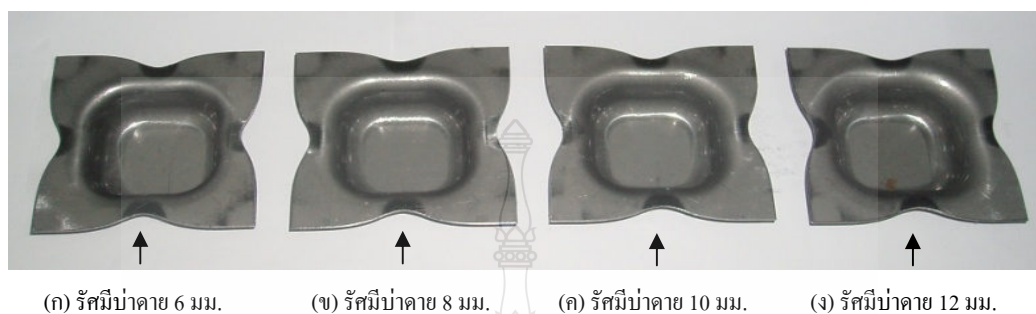
เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4.3 จะเห็นว่าที่ขนาดรัศมีบ่าคาย 6 มม. จะใช้แรงลากขึ้นรูปชิ้นงานสูงสุดในรัศมีบ่าคายทั้ง 4 ระดับที่ทำการศึกษา แรงลากขึ้นรูปจะค่อยๆ ลดลงตามรัศมีบ่าคายที่เพิ่มขึ้น จนถึงที่รัศมีบ่าคาย 12 มม. สังเกตจากกราฟที่รัศมีบ่าคาย 12 มม. จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปชิ้นงานต่ำที่สุด ขณะที่รัศมีบ่าคายเปลี่ยนจาก 6 มม. ไปเป็น 12 มม. แรงที่พื้นจะใช้ลดลง 7.16 เปอร์เซ็นต์ แรงลากขึ้นรูปชิ้นงานจะลดลงเมื่อรัศมีบ่าคายใหญ่ขึ้น ลักษณะของกราฟจากกระบวนการลากขึ้นรูปชิ้นงานที่ได้มีความใกล้เคียง และเป็นไปในลักษณะเดียวกัน แรงกดของพื้นจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอตามระยะทางของการกดคลิกชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าที่ระยะกดคลิกในช่วงเริ่มต้น (ช่วงที่ 1) แรงกดของพื้นจะใกล้เคียงกับแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานหลังจากนั้น แรงกดของพื้นจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (ช่วงที่ 2)

เส้นแรงของกราฟจะคงที่ในช่วงระยะคดโค้งประมาณ 21 มม. ถึง 30 มม. (ช่วงที่ 3) เมื่อถึงความลึกสูงสุด 30 มม. กระบวนการลากขึ้นรูปก็จะเสร็จสมบูรณ์ จุดสูงสุดของกราฟที่ได้ในแต่ละปัจจัยที่เปลี่ยนไปจะทำให้ได้แรงลากขึ้นรูปที่แตกต่างกัน เมื่อทดลองลากขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเหล็ก SPCC แล้วจึงทำการทดลองลากขึ้นรูปขึ้นงานเหล็ก SAPH 440 ต่อไปเนื่องจากเหล็ก SAPH 440 เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงขึ้นรูปได้ยาก ในการลากขึ้นรูปจะต้องใช้แรงกดแผ่นกดยึดขึ้นงานและแรงในการลากขึ้นรูปสูงกว่าเหล็ก SPCC เพื่อป้องกันการเกิดรอยย่นและการติดตัวกลับของขึ้นงาน ดังนั้นในการทดลองได้ปรับตั้งค่าแรงกดแผ่นกดยึดขึ้นงานสูงกว่าเหล็ก SPCC ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณทดลองตามปัจจัยควบคุมและปัจจัยทดสอบตามที่ได้กำหนดไว้ ใช้ขึ้นงานที่ทำการทดสอบตัวแปรในแต่ละรอบของการทดสอบจำนวน 5 ชิ้น เพื่อความถูกต้องของข้อมูล ผลจากการทดลอง ขึ้นงานสามารถขึ้นรูปได้สมบูรณ์ไม่มีรอยแตกและรอยย่นโดยที่รัศมีบ่าคาย ที่รัศมีบ่าคาย 6 มม. ใช้แรงลากขึ้นรูปเฉลี่ยสูงสุดที่ 177.20 kN สูงกว่ารัศมีบ่าคาย 8, 10 และ 12 แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปมีแนวโน้มลดลงตามรัศมีบ่าคายที่ใหญ่ขึ้น โดยที่รัศมีบ่าคาย 12 มม. ใช้แรงลากขึ้นรูปเฉลี่ยต่ำสุดที่ 168.31 kN ขณะที่รัศมีบ่าคายเปลี่ยนแปลงจาก 6 มม. ไปเป็น 12 มม. แรงที่พื้นที่ใช้ลดลง 5.02 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าเฉลี่ยแรงกดแผ่นกดยึดขึ้นงานในการลากขึ้นรูปที่รัศมีบ่าคายทั้ง 4 ระดับเท่ากับ 56 kN แรงลากขึ้นรูปขึ้นงานจะลดลงเมื่อรัศมีบ่าคายใหญ่ขึ้น ผลที่ได้จากการทดลองของเหล็ก SAPH 440 เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับเหล็ก SPCC นำค่าของแรงลากขึ้นรูปขึ้นงานมาสร้างเป็นแผนภูมิแท่งเพื่อเปรียบเทียบแรงลากขึ้นรูปของรัศมีบ่าคายแต่ละระดับ แสดงดังภาพที่ 4.4

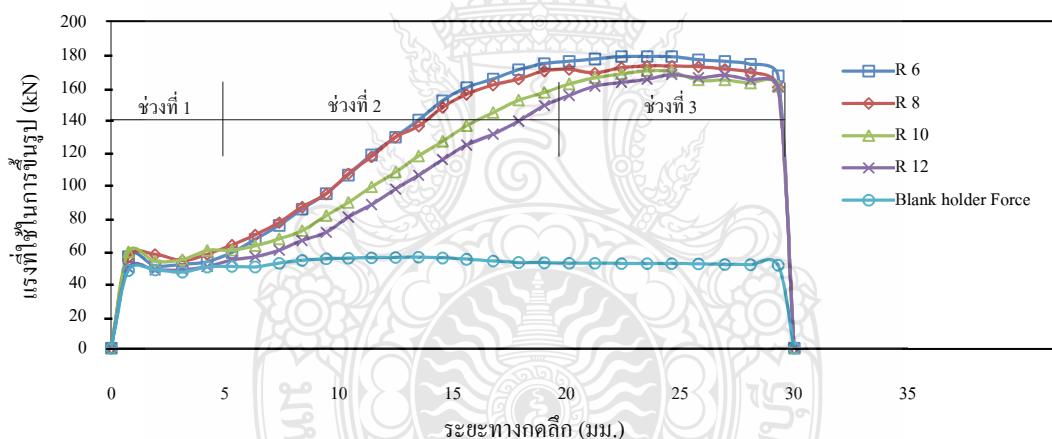


ภาพที่ 4.4 แรงลากขึ้นรูปขึ้นงานเฉลี่ยเหล็ก SAPH 440 ที่รัศมีบ่าคายแต่ละระดับ

จากภาพที่ 4.4 จะสามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงของแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปชิ้นงานของรัศมีบ่าคายนี้อย่างชัดเจนมากขึ้น จะเห็นว่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปชิ้นงานจะมีค่าลดลงเมื่อรัศมีบ่าคายนี้ออกมาใหญ่ขึ้น ได้ชิ้นงานจากการทดลอง แสดงดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปเหล็ก SAPH 440 ที่รัศมีบ่าคายนี้อย่างชัดเจนมากขึ้น

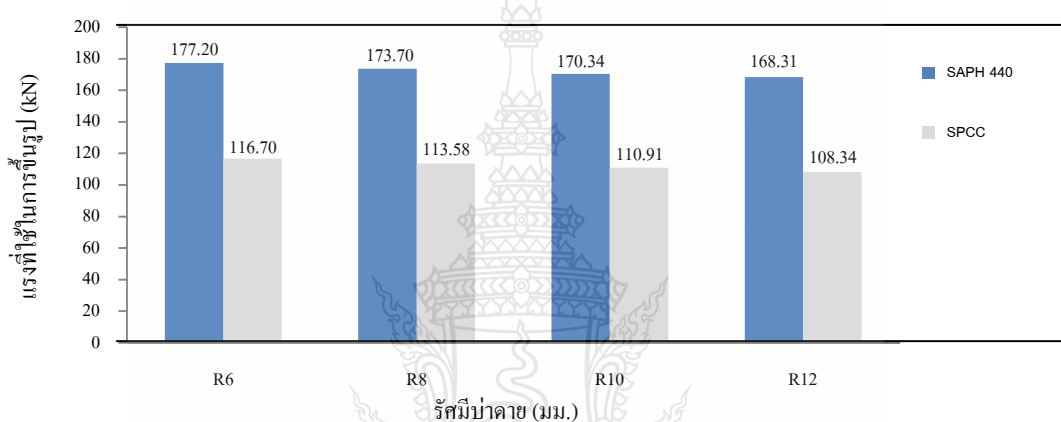


ภาพที่ 4.6 แรงกดขึ้นรูปและแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานต่อระยะคดลึกเหล็ก SAPH 440

จากภาพที่ 4.6 เป็นลักษณะของกราฟที่ได้จากกระบวนการลากขึ้นรูปเหล็กของเหล็ก SAPH 440 กราฟที่ได้จะมีความใกล้เคียงและเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับเหล็ก SPCC ในช่วงเริ่มต้นจนถึงระยะคดลึกประมาณ 5 มม. (ช่วงที่ 1) แรงกดของพื้นที่จะมีความใกล้เคียงกับแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงาน หลังจากระยะ 5 มม. แรงกดของพื้นที่จะมีความชันเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับระยะทางการคดลึก (ช่วงที่ 2) ที่ระยะคดลึก 24 มม. (ช่วงที่ 3) เป็นจุดที่ใช้แรงสูงสุดในการลากขึ้นรูปส่วนหนึ่งเป็นอิทธิพลจากขนาดของรัศมีบ่าคายนี้ออกมาใหญ่ขึ้น

#### 4.1.1 เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปชิ้นงานเหล็ก SPCC กับเหล็ก SAPH 440

จากการทดลองลากขึ้นรูปชิ้นงานด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกด้วยเหล็ก SPCC สามารถลากขึ้นรูปได้สมบูรณ์โดยใช้แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเฉลี่ยที่ 37 kN ชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปด้วยรัศมีบ่าคายทั้ง 4 ระดับ ไม่เกิดรอยแตกและรอยย่นหลังจากนั้นจึงทดลองขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเหล็ก SAPH 440 โดยใช้แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเฉลี่ยที่ 56 kN ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ไม่เกิดรอยแตกและรอยย่นเช่นเดียวกัน จึงนำผลของแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานและแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปของเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 มาทำการเปรียบเทียบ แสดงดังภาพที่ 4.7

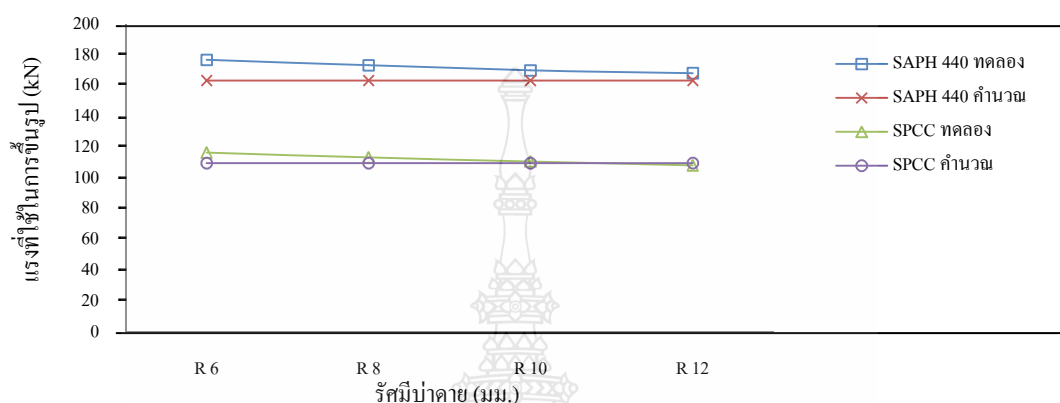


ภาพที่ 4.7 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงานเฉลี่ยเหล็ก SPCC กับเหล็ก SAPH 440 ที่รัศมีบ่าคายแต่ละระดับ

หลังจากที่ได้ทำการทดลองลากขึ้นรูปวัสดุเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 แล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปที่มีความสมบูรณ์ไม่เกิดรอยแตกและรอยย่นในทุกระดับของตัวแปรทดสอบ มาทำการเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงของแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานและแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูประหว่างวัสดุเหล็กทั้งสองชนิด จากภาพที่ 4.7 จะเห็นว่าเหล็ก SAPH 440 จะใช้แรงลากขึ้นรูปสูงกว่าเหล็ก SPCC ในทุกระดับของรัศมีบ่าคายที่เปลี่ยนไปเนื่องจากคุณสมบัติทางกลของเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 ที่ใช้ในการทดลองมีความแตกต่างกัน โดยเหล็ก SAPH 440 เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็ก SPCC จึงใช้แรงกดของพื้นที่ที่จะทำให้แผ่นชิ้นงานเปลี่ยนรูปไหลเข้าไปยังปากคายจนกระทั่งถึงความลึกที่ต้องการคือ 30 มม. มากกว่าเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 ต้องใช้แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานมากกว่าเหล็ก SPCC เพื่อป้องกันการเกิดรอยย่นบริเวณปีกของถ้วย โดยเหล็ก SPCC จะใช้แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานที่เหมาะสมเฉลี่ยที่ 37 kN ส่วนเหล็ก SAPH 440 ใช้แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานที่เหมาะสมเฉลี่ยที่ 56 kN

#### 4.1.2 เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ

จากการทดลองลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกที่รัศมีบ่าตาย 4 ระดับ คือ 6, 8, 10 และ 12 มม. นำค่าของแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองของเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 มาทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ แสดงดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 แรงลากขึ้นรูปขึ้นงานจากการทดลองและการคำนวณ ที่รัศมีบ่าตายแต่ละระดับ

จากภาพที่ 4.8 กราฟเส้นแสดงการเปรียบเทียบแรงในการลากขึ้นรูประหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณ ค่าของแรงลากขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองเหล็ก SAPH 440 จะมีค่าสูงกว่าค่าของแรงที่ได้จากการคำนวณในทุกะดับของรัศมีบ่าตาย ที่รัศมีบ่าตาย 12 มม. แรงที่ใช้ลากขึ้นรูปจะมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณมากที่สุดส่วนเหล็ก SPCC ที่รัศมีบ่าตาย 6, 8 และ 10 มม. ค่าของแรงลากขึ้นรูปจากการทดลองจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ที่รัศมีบ่าตาย 12 มม. ค่าของแรงลากขึ้นรูปจากการทดลองจะมีค่าต่ำกว่าการคำนวณ 1.36 เปอร์เซ็นต์ และที่รัศมีบ่าตาย 10 มม. ค่าของแรงลากขึ้นรูปจากการทดลองจะมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณมากที่สุด

#### 4.2 อิทธิพลของรัศมีบ่าตายที่มีผลต่อคุณภาพของถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัส

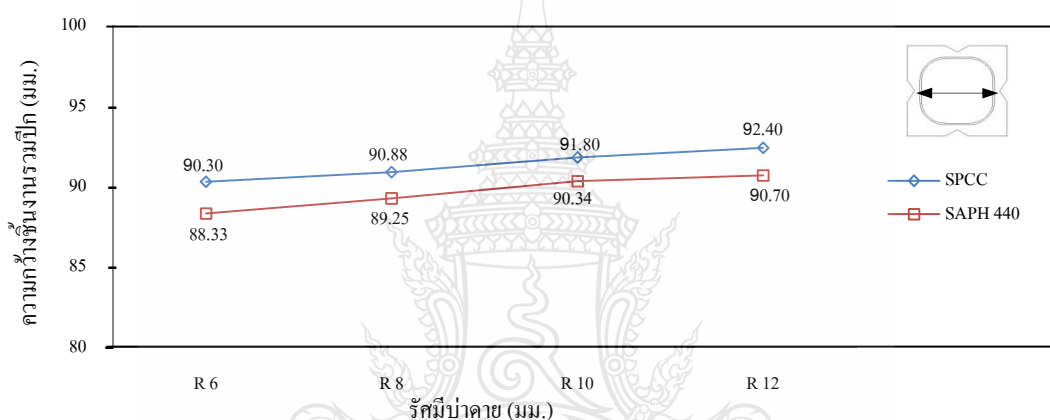
ในกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นจุดประสงค์ของงานลากขึ้นรูป คือ แปรสภาพโลหะจากแผ่นหยาบให้เป็นภาชนะรูปถ้วยโดยที่ให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ มีความสมบูรณ์มากที่สุด แต่ในการลากขึ้นรูปจะเกิดแรงเครียดขึ้นอย่างมากในกระบวนการไหลตัวของโลหะ ซึ่งคุณภาพของชิ้นงานที่ได้นั้นบางอย่างสามารถประเมินได้ด้วยสายตา เช่น รอยแตกและรอยย่น แต่บางอย่างก็ไม่สามารถประเมินได้ด้วยสายตา จะต้องใช้เครื่องมือช่วยในการวัดผล เช่น ความหนาของชิ้นงาน จาก



การทดลองลากขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อเปรียบเทียบถึงความแตกต่างด้าน คุณภาพของชิ้นงานด้วย เหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 สามารถสรุปผลที่ได้จากการทดลองในด้านคุณภาพของถ้วย สี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกได้ดังนี้

#### 4.2.1 อิทธิพลของรัศมีบ่าคายที่มีผลต่อความกว้างของชิ้นงานรวมปีก

นำชิ้นงานที่ได้จากการทดลองทั้งเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 มาวัดความกว้างของ ชิ้นงานรวมปีกโดยกำหนดตำแหน่งของการวัดความกว้างระหว่างปีกทั้งสองด้านในบริเวณปีกที่เว้าเข้าไปลึกที่สุด ซึ่งเป็นจุดที่แคบที่สุดของชิ้นงาน จากการวัดขนาดความกว้างของชิ้นงานรวมปีกได้ผล ของการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.6

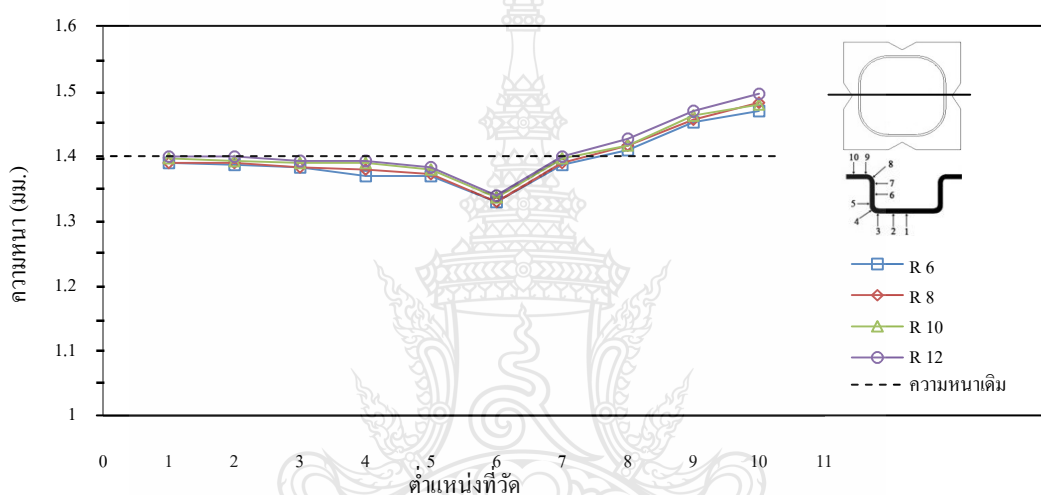


ภาพที่ 4.9 ความกว้างของชิ้นงานรวมปีกเฉลี่ยเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 ที่รัศมีบ่าคายแต่ละระดับ

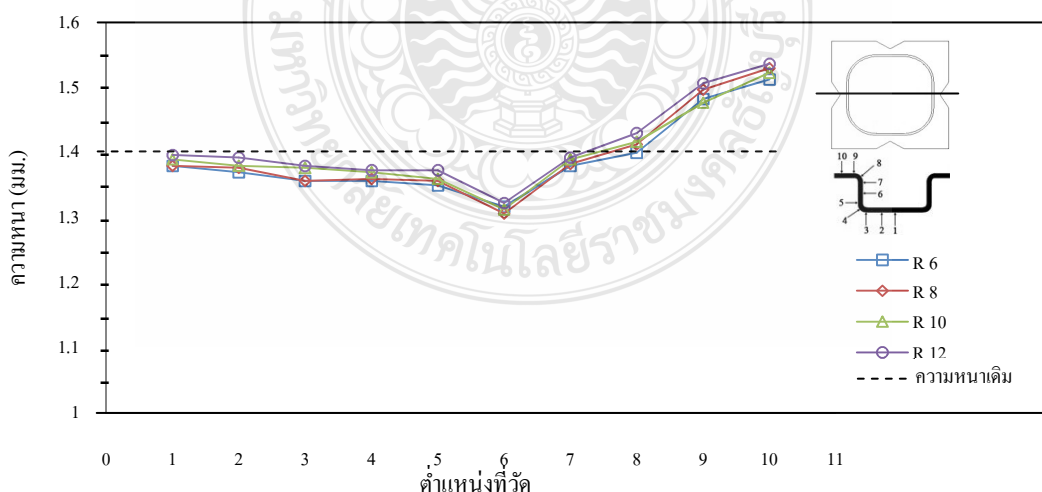
จากภาพที่ 4.9 ผลการวัดความกว้างของชิ้นงานรวมปีกชิ้นงานของเหล็ก SPCC จะมีความกว้างของชิ้นงานรวมปีกมากกว่าเหล็ก SAPH 440 เล็กน้อยจากการยึดตัวของแผ่นชิ้นงานขณะ กระบวนการลากขึ้นรูปเหล็ก SPCC จะมีการยึดตัวมากกว่าเหล็ก SAPH 440 เนื่องจากเหล็ก SPCC เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงต่ำกว่าเหล็ก SAPH 440 และความกว้างของชิ้นงานรวมปีกที่วัดได้นั้น ค่าความกว้างของชิ้นงานจากเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือค่าความกว้างของชิ้นงานจะมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเลือกใช้รัศมีบ่าคายขนาดใหญ่ขึ้น จากการตัดตัวของ ชิ้นงานบริเวณปากถ้วยให้โค้งตามขนาดของรัศมีบ่าคาย เมื่อใช้ขนาดของรัศมีบ่าคายที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ปากถ้วยก็จะกว้างขึ้นทำให้ความกว้างของชิ้นงานรวมปีกกว้างขึ้นตามไปด้วย

#### 4.2.2 อิทธิพลของรัศมีบ่าตายที่มีผลต่อความหนาผนังด้วยด้านตรงของชิ้นงาน

จากการทดลองลากขึ้นรูปด้วยสียเหล็กแบบมีปีก เมื่อทำการลากขึ้นรูปชิ้นงานได้ด้วยสียเหล็กแบบมีปีกที่สมบูรณ์ไม่เกิดรอยแตกและรอยย่น จึงนำชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปมาทำการตัดค่าครึ่งเพื่อวัดความหนาของผนังชิ้นงานส่วนที่ตรง โดยได้กำหนดตำแหน่งในการวัดความหนาของผนังด้วยด้านตรงไว้ แล้วนำค่าที่ได้มาสร้างเป็นกราฟเส้นเพื่อเปรียบเทียบผลความหนาผนังด้วยด้านตรงของชิ้นงานเฉลี่ยที่รัศมีบ่าตายแต่ละระดับของตัวแปรที่ทดสอบ ได้กราฟเส้นแสดงความหนาผนังด้วยด้านตรงของชิ้นงานเฉลี่ย แสดงดังภาพที่ 4.10 และ 4.11



ภาพที่ 4.10 ความหนาผนังด้านตรงของชิ้นงานเฉลี่ยเหล็ก SPCC ที่รัศมีบ่าตายแต่ละระดับ

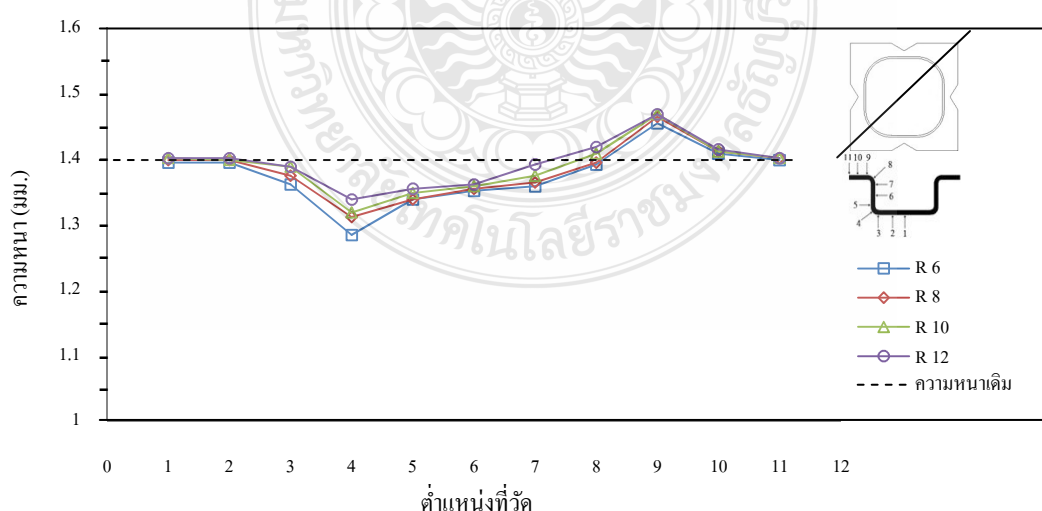


ภาพที่ 4.11 ความหนาผนังด้านตรงของชิ้นงานเฉลี่ยเหล็ก SAPH 440 ที่รัศมีบ่าตายแต่ละระดับ

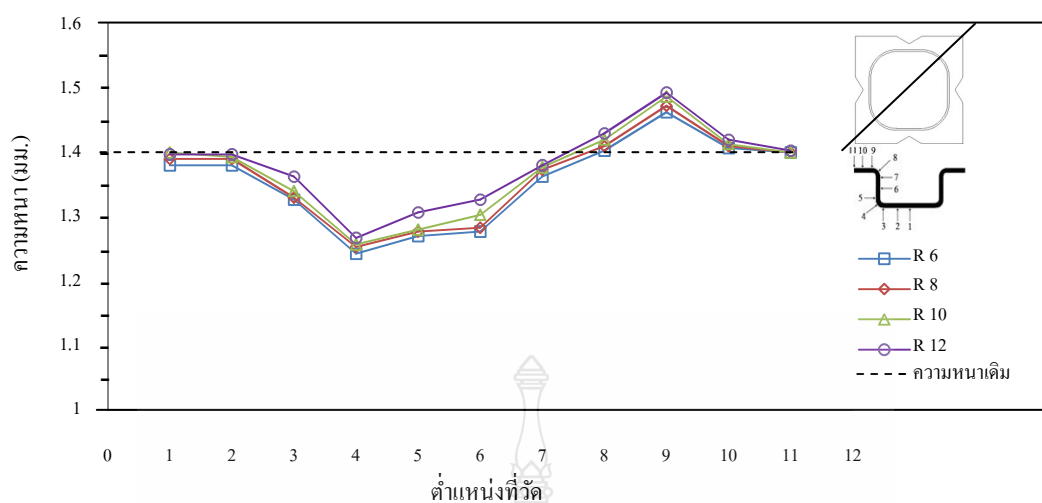
จากภาพที่ 4.10 และ 4.11 ผลความหนาผนังด้านตรงของชิ้นงานเฉลี่ย ที่ผ่านกรรมวิธีลาก ขึ้นรูปลึกโดยใช้รัศมีบ่าคายในการลากขึ้นรูปที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นตัวอย่างสำหรับกรณีของวัสดุ เหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) และวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) การวัดความหนาของชิ้นงานจะวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ตั้งแต่กันด้วยไปจนถึงปีกถ้วย จากผล ที่ได้จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดของรัศมีบ่าคายจะไม่มีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อความหนาผนังด้าน ตรงของชิ้นงาน ทั้งนี้ผลการวัดความหนาผนังชิ้นงานของเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 มี แนวโน้มเช่นเดียวกัน นอกจากนี้จากภาพจะพบว่าตรงบริเวณตำแหน่งที่ 6 จะเป็นตำแหน่งที่มีความ หนาของผนังถ้วยเฉลี่ยน้อยที่สุดเพราะเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นดึงในแนวแกนสูงสุดของการลากขึ้น รูปส่วนบริเวณปีกถ้วยในตำแหน่งที่ 10 ชิ้นงานจะมีความหนาเฉลี่ยมากที่สุดและจะมีความหนาเพิ่ม มากกว่าความหนาเริ่มต้นของชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงบริเวณปีกถ้วย ในขณะที่ลากขึ้นรูปนั่นเอง

#### 4.2.3 อิทธิพลของรัศมีบ่าคายที่มีผลต่อความหนาผนังบริเวณมุมถ้วยของชิ้นงาน

เนื่องจากการกระบวนการลากขึ้นรูปชิ้นงานรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก การไหลตัวของ ชิ้นงานบริเวณด้านตรงกับบริเวณมุมถ้วยจะมีอัตราการไหลตัวของแผ่นชิ้นงานไม่เท่ากัน จึงได้ทำ การตัดผ่าชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์ไม่เกิดรอยแตกและรอยย่นในแต่ละรัศมีบ่าคายเพื่อวัดความหนา ผนังบริเวณมุมถ้วย โดยได้กำหนดตำแหน่งในการวัดความหนาไว้ แล้วนำค่าที่ได้มาสร้างเป็นกราฟ เส้นเพื่อเปรียบเทียบผลความหนาผนังบริเวณมุมถ้วยของชิ้นงานเฉลี่ย ที่รัศมีบ่าคายแต่ละระดับของตัว แปรที่ทดสอบ แสดงดังภาพที่ 4.12 และ 4.13



ภาพที่ 4.12 ความหนาผนังบริเวณมุมถ้วยเฉลี่ยเหล็ก SPCC ที่รัศมีบ่าคายแต่ละระดับ



ภาพที่ 4.13 ความหนาผนังบริเวณมุมด้วยเหล็ก SAPH 440 ที่รัศมีป่าดายแต่ละระดับ

จากภาพที่ 4.12 และ 4.13 ผลจากการวัดค่าความหนาของชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง บริเวณมุมด้วยตามแนวเส้นทแยงมุมของชิ้นงานที่รัศมีป่าดาย 4 ระดับ คือ 6, 8, 10 และ 12 มม. พบว่า ความหนาของชิ้นงานเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังบริเวณมุมด้วยเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือบริเวณกันด้วยในตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 จะมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านความหนาลดลงจากความหนาเดิมของแผ่นเปล่าเพียงเล็กน้อย จากนั้นจะเริ่มลดลงในตำแหน่งที่ 3 และ 4 โดยบริเวณมุมกันด้วยเหนือรัศมีพื้นซ์ หรือตำแหน่งที่ 4 เป็นจุดที่รับแรงดึงสูงสุดจากการตัดโค้งตามรัศมีป่าพื้นซ์และแรงดึงจากการตัดโค้งตามรัศมีมุมพื้นซ์ ทำให้ผนังด้วยบริเวณนี้มีความหนาน้อยที่สุดซึ่งเป็นจุดวิกฤติของชิ้นงาน เนื่องจากเป็นจุดที่ผนังด้วยบางที่สุด ดังนั้นหากมีการฉีกขาดหรือแตกของด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกจากกระบวนการลากขึ้นรูป ชิ้นงานจะเกิดการฉีกขาดหรือแตกจากตำแหน่งนี้ ซึ่งเหมือนกันทั้งเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 จากนั้นความหนาจะเพิ่มขึ้นตามความสูงของผนังด้วยจนหนาที่สุดบริเวณบริเวณปีกด้วย บริเวณนี้ความหนาของชิ้นงานจะเพิ่มมากขึ้นกว่าความหนาเดิมของแผ่นเปล่าจากการขยายตัวของแผ่นชิ้นงาน เนื่องมาจากการเบียดหรือการอัดตัวในแนวเส้นรอบวง จากนั้นความหนาของชิ้นงานจะค่อยๆ ลดลงจนเท่ากับความหนาเดิมของแผ่นเปล่าในตำแหน่งที่ 11

#### 4.2.4 อิทธิพลของรัศมีป่าดายที่มีผลต่อรอยแตกและรอยย่น

ชิ้นงานที่มีการไหลตัวของวัสดุที่ไม่สมมาตร เช่น รูปทรงด้วยสี่เหลี่ยมหรือด้วยวงรี ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นบนชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรนี้คือ เกิดรอยย่นที่ปีกด้วย เกิดรอยฉีกขาดหรือรอยแตกที่บริเวณมุมรัศมีพื้นซ์ หรือรอยฉีกขาดที่เกิดจากการไหลตัวไม่เท่ากันที่บริเวณต่างๆ ของ

ชิ้นงานที่บริเวณปีกของชิ้นงานด้วยสี่เหลี่ยม โดยเฉพาะขอบปีกตรงบริเวณรัศมีมุมโค้งจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการโก่งตัว และเกิดรอยร้าวได้มากที่สุด เพราะเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงมาก และบริเวณรัศมีมุมโค้งก็เกิดความเค้นคดด้วย ทำให้การไหลตัวของแผ่นชิ้นงานช้ากว่าบริเวณขอบเส้นตรงของถ้วย จึงทำให้เนื้อวัสดุเกิดการอัดตัวบริเวณรัศมีมุมโค้งซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการโก่งตัวหรือเกิดรอยร้าว ดังนั้นการลากขึ้นรูปจึงจำเป็นต้องใช้แรงในการลากขึ้นรูปที่สูงขึ้นเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในบางครั้งทำให้งานเกิดการฉีกขาดหรือแตกตรงบริเวณรัศมีมุมโค้งที่ก้นถ้วย จากการทดลองลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกด้วยเหล็ก SPCC ที่แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเฉลี่ยที่ 37 kN และเหล็ก SAPH 440 ที่แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเฉลี่ยที่ 56 kN ที่รัศมีบ่าตาย 4 ระดับคือ 6, 8, 10 และ 12 มม. ชิ้นงานรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกจากวัสดุเหล็กทั้งสองชนิดที่ได้นั้นไม่เกิดรอยแตกและรอยร้าวขึ้นที่บริเวณปีกของชิ้นงาน เนื่องจากรัศมีมุมโค้งของพื้นผิวและคายของชุดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดใหญ่ จึงทำให้แผ่นชิ้นงานสามารถไหลตัวได้ง่ายขึ้นและการเลือกใช้แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานในการทดลองที่ได้มาจากการคำนวณซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในระดับที่มีความเหมาะสม ทำให้ชิ้นงานที่ได้จากการทดลองของเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 ไม่เกิดรอยแตกและรอยร้าว

#### 4.2.5 อิทธิพลของรัศมีบ่าตายที่มีผลต่อความหยาบผิว

จากการทดลองการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกที่รัศมีบ่าตาย 4 ระดับ คือ 6, 8, 10 และ 12 มม. นำชิ้นงานที่ได้จากการทดลองด้วยวัสดุเหล็กทั้งสองชนิด มาทำการวัดความหยาบของผิวชิ้นงาน ( $R_a$ ) โดยกำหนดตำแหน่งที่จะทำการวัดค่าความหยาบผิวทั้งหมดสี่ตำแหน่งที่บริเวณผนังถ้วยด้านตรงของชิ้นงาน ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาลดลงจากความหนาเดิม

ผลของการวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ( $R_a$ ) บริเวณผนังถ้วยด้านตรงของชิ้นงาน โดยวัดในตำแหน่งที่กำหนดไว้ ค่าความหยาบผิวชิ้นงานวัสดุเหล็ก SAPH 440 ที่รัศมีบ่าตาย 10 มม. จะมีค่าความหยาบผิวชิ้นงานน้อยกว่ารัศมีบ่าตาย 6 มม. เนื่องจากที่รัศมีบ่าตาย 10 มม. วัสดุจะไหลตัวผ่านบ่าตายได้ง่ายทำให้เกิดการเสียดสีกับแม่พิมพ์มากกว่ารัศมีบ่าตาย 6 มม. ที่รัศมีบ่าตาย 8 มม. และ 12 มม. ก็ได้แนวโน้มเช่นเดียวกัน ค่าความหยาบผิวชิ้นงานบริเวณผนังถ้วยด้านตรงมีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 คือ ค่าความหยาบผิวชิ้นงานน้อยลงเมื่อรัศมีบ่าตายใหญ่ขึ้น และเหล็ก SAPH 440 จะมีค่าความเรียบผิวที่ละเอียดกว่าเหล็ก SPCC ในทุกระดับรัศมีบ่าตาย เนื่องจากมีค่าความแข็งแรงสูงจึงเสียดสีกับแม่พิมพ์มากกว่า

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้ มุ่งเน้นเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปร คือ ขนาดรัศมีบาคาย ที่มีผลต่อแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก โดยใช้แผ่นเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) และเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC (JIS) ขนาดความหนา 1.4 มม. ขึ้นรูปบนเครื่องปั๊มไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน ด้วยแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่นในการทดลอง ซึ่งผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรนี้ มีความสำคัญอย่างมากในการใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ และปรับปรุงกระบวนการลากขึ้นรูปเหล็ก ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสรุปผลได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 อิทธิพลของรัศมีบาคายที่มีผลต่อแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ในกระบวนการทดลองเลือกใช้ขนาดรัศมีบาคาย 4 ระดับ คือ 6, 8, 10 และ 12 มม. ใช้ค่าแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานจากการคำนวณ คือ 36.61 kN สำหรับเหล็ก SPCC และ 54.52 kN สำหรับเหล็ก SAPH 440 ในการทดลองการปรับตั้งค่าแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานไม่สามารถปรับให้ตรงตามค่าที่คำนวณได้เนื่องจากความแปรผันของเครื่องมือและอุปกรณ์ แต่จะใช้ค่าใกล้เคียงที่สามารถปรับตั้งได้ จากการทดลองสรุปได้ว่าขนาดของรัศมีบาคายมีอิทธิพลโดยตรงกับความสามารถในการไหลตัวของโลหะและพื้นที่สัมผัสของแผ่นชิ้นงานระหว่างดากับแผ่นกดยึดชิ้นงาน ดังนั้นรัศมีบาคายขนาดเล็กจะใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูง เมื่อเลือกใช้ขนาดรัศมีบาคายที่ใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปลดลง ทั้งนี้ผลการทดสอบของแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปของวัสดุเหล็ก SPCC ก็ได้แนวโน้มเช่นเดียวกันกับเหล็ก SAPH 440

##### 5.1.2 อิทธิพลของรัศมีบาคายที่มีผลต่อคุณภาพของด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก

จากการศึกษาการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกที่รัศมีบาคาย 4 ระดับ คือ 6, 8, 10 และ 12 มม. โดยเปรียบเทียบระหว่างเหล็ก SPCC กับเหล็ก SAPH 440 สามารถสรุปผลด้านคุณภาพของชิ้นงานหลังกระบวนการลากขึ้นรูปได้ดังต่อไปนี้

##### 1) อิทธิพลของรัศมีบาคายที่มีผลต่อความกว้างของชิ้นงานรวมปีก

รัศมีบาคายมีผลต่อความกว้างของชิ้นงานรวมปีก ผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 เมื่อใช้รัศมีบาคายขนาดใหญ่ขึ้นความกว้างของชิ้นงาน

รวมปีกก็จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากรัศมีบ่าคายที่ใหญ่ขึ้นทำให้ปากถ้วยกว้างขึ้นเมื่อลากขึ้นรูป ชิ้นงานด้วยรัศมีบ่าคายที่ใหญ่จึงส่งผลให้ความกว้างของชิ้นงานรวมปีกเพิ่มขึ้น

#### 2) อิทธิพลของรัศมีบ่าคายที่มีผลต่อความหนาผนังด้วยด้านตรงของชิ้นงาน

จากผลของการทดลองพบว่าเมื่อมีการปรับเปลี่ยนรัศมีบ่าคายจะไม่ส่งผลอย่างชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังด้วยด้านตรง และความหนาของชิ้นงานบริเวณจุดที่บางที่สุดก็ไม่มีแนวโน้มที่แน่ชัดว่าเมื่อใช้รัศมีบ่าคายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาที่เป็นอิทธิพลมาจากรัศมีบ่าคายที่เปลี่ยนไป ผลของการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 ลากขึ้นรูปที่รัศมีบ่าคาย 4 ระดับ คือ 6, 8, 10 และ 12 มม. โดยใช้แผ่นเปล่าที่มีความหนาเดิมอยู่ที่ 1.4 มม. จะพบว่าความหนาบริเวณจุดที่บางที่สุดของผนังด้านตรงสำหรับเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 อยู่ในตำแหน่งที่ 6 ส่วนบริเวณปีกถ้วยในตำแหน่งที่ 10 ชิ้นงานจะมีความหนาที่สุดและมากกว่าความหนาเริ่มต้นของชิ้นงาน

#### 3) อิทธิพลของรัศมีบ่าคายที่มีผลต่อความหนาผนังด้วยบริเวณมุมของชิ้นงาน

จากผลที่ได้จากการทดลองพบว่า การปรับเปลี่ยนขนาดของรัศมีบ่าคายจะมีอิทธิพลต่อความหนาของผนังด้วยบริเวณมุมของชิ้นงาน ทั้งนี้ผลการวัดความหนาของชิ้นงานทั้งเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 ก็ได้แนวโน้มเช่นเดียวกัน โดยผนังบริเวณเหนือรัศมีของพื้นที่ในตำแหน่งที่ 4 จะเป็นจุดที่มีความหนาน้อยที่สุด โดยที่เหล็ก SAPH 440 จะมีความหนาน้อยกว่าเหล็ก SPCC เนื่องจากเหล็ก SAPH 440 เกิดการยึดติดกับผิวของแม่พิมพ์ได้ง่ายกว่าเหล็ก SPCC ทำให้เกิดความเค้นดึงบริเวณมุมกันด้วยมากกว่าเหล็ก SPCC ความหนาของผนังชิ้นงานบริเวณนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้รัศมีบ่าคายขนาดใหญ่ขึ้นทำให้แผ่นชิ้นงานไหลตัวได้ง่าย จากการลากขึ้นรูปที่รัศมีบ่าคาย 4 ระดับ คือ 6, 8, 10 และ 12 มม. โดยใช้แผ่นเปล่าที่มีความหนาเดิมอยู่ที่ 1.4 มม. จะพบว่าชิ้นงานมีความหนาเฉลี่ยน้อยสุดที่ตำแหน่งของผนังด้วยบริเวณมุมในตำแหน่งที่ 4 สำหรับเหล็ก SPCC เท่ากับ 1.283 มม. 1.310 มม. 1.317 มม. และ 1.337 มม. ตามลำดับ และจะมีความหนาเฉลี่ยน้อยสุดที่ตำแหน่งของผนังด้วยบริเวณมุมสำหรับเหล็ก SAPH 440 เท่ากับ 1.243 มม. 1.253 มม. 1.257 มม. และ 1.267 มม. ตามลำดับ

#### 4) อิทธิพลของรัศมีบ่าคายที่มีผลต่อรอยแตกและรอยย่น

จากการทดลองลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกด้วยวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) และเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) วัสดุเหล็กทั้งสองชนิดสามารถลากขึ้นรูปได้โดยไม่เกิดรอยแตกและรอยย่นที่ระดับแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเฉลี่ยที่ 37 kN สำหรับเหล็ก SPCC และเฉลี่ยที่ 56 kN สำหรับเหล็ก SAPH 440

### 5) อิทธิพลของรัศมีบาคายที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว ( $R_a$ )

จากการผลของการวัดค่าความหยาบผิว ( $R_a$ ) ของชิ้นงานสำเร็จหลังผ่านกระบวนการ ลากขึ้นรูปลึก พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิว ( $R_a$ ) ทั้งวัสดุเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH 440 เป็นไปในลักษณะที่สอดคล้องกัน คือ ค่าความหยาบผิวชิ้นงานน้อยลงเมื่อรัศมีบาคายใหญ่ขึ้น โดยเหล็ก SAPH 440 จะมีค่าความหยาบผิวที่ละเอียดกว่าเหล็ก SPCC ทั้งนี้ด้วยคุณสมบัติของเหล็ก SAPH 440 แผ่นชิ้นงานจะยึดติดกับผิวแม่พิมพ์ได้ง่าย ทำให้ในขณะที่ชิ้นงานเคลื่อนที่ผ่านผิวคายโดยมีแผ่นจับยึดชิ้นงานทำการกดชิ้นงานให้แนบกับผิวคายขณะที่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวทั้งสอง ทำให้เกิดการถ่ายผิวจากคายไปสู่ชิ้นงานดีกว่าเหล็ก SPCC

จากการทดลองลากขึ้นรูปด้วยสแตนเลสที่มีรัศมีบาคาย 4 ระดับ คือ 6, 8, 10 และ 12 มม. พบว่ารัศมีบาคายทั้ง 4 ระดับ สามารถลากขึ้นรูปด้วยสแตนเลสที่มีรัศมีบาคายจากเหล็กกล้า SPCC และเหล็ก SAPH 440 ได้สมบูรณ์ปราศจากรอยแตกและรอยขุ่นที่แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเฉลี่ยที่ 37 kN สำหรับเหล็ก SPCC และที่แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเฉลี่ย 56 kN สำหรับเหล็ก SAPH 440 ชิ้นงานจากเหล็ก SAPH 440 จะเกิดรอยบนชิ้นงานที่เกิดจากการเสียดสีปรากฏชัดเจนกว่าชิ้นงานจากเหล็ก SPCC เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงจะทำให้แผ่นชิ้นงานไหลตัวยาก เนื่องจากแผ่นชิ้นงานจะยึดติดกับผิวของแม่พิมพ์ได้ง่ายกว่าเหล็ก SPCC จึงทำให้แรงเสียดทานในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกเพิ่มขึ้น จากข้อมูลในการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่ารัศมีบาคาย 12 มม. เป็นรัศมีบาคายที่มีความเหมาะสมสำหรับงานลากขึ้นรูปด้วยสแตนเลสที่มีรัศมีบาคายของเหล็ก SAPH 440 โดยที่รัศมีบาคาย 12 มม. จะช่วยให้แผ่นชิ้นงานไหลตัวได้ดีขึ้น ทำให้ช่วยลดแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปลงได้มากที่สุด และชิ้นงานจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาบริเวณมุมกันด้วยน้อยที่สุด ซึ่งตรงกับจุดประสงค์ของงานขึ้นรูปโลหะ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในปัจจุบันเหล็ก SAPH 440 สามารถหาซื้อได้ทั่วไปแต่ถ้าหากต้องการดูแนวโน้มที่ชัดเจนมากขึ้นควรเปลี่ยนวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงมากกว่า เช่น SPFH 590 SPFC 780 ซึ่งปัจจุบันมีใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไม่สามารถหาซื้อได้ทั่วไป

5.2.2 การทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยต้องการศึกษาเพียงคุณภาพของชิ้นงานจากการทดลองลากขึ้นรูปชิ้นงานเพียงไม่กี่ชิ้น ไม่ได้ศึกษาถึงการสึกหรอ แต่ในระยะยาวแม่พิมพ์อาจเกิดการสึกหรอได้หากทดลองกับวัสดุเหล็กที่มีค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น



5.2.3 ใช้เครื่องมือวัดแรง สเตรนเกจ (Strain Gauge) ที่พื้นซ์โดยตรงเพื่อให้สามารถวัดแรงที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น



## รายการอ้างอิง

- [1] Takita, M. and Ohashi, H., **Application of High-Strength Steel Sheets for Automobiles in Japan** (Online), Availabl:<http://www.edpsciences.org/article/metal/pdf/2001/09/takita.pdf> (9 January 2006).
- [2] ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเร็จ, การศึกษาเพื่อลดการยึดติดบนแม่พิมพ์ขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2552
- [3] ไพฑูรย์ โกวิทชะวงศ์, การศึกษาอิทธิพลของรัศมีภายในการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจตุรัส, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544.
- [4] Lange, K., **Handbook of Metal Forming**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1958. pp. 2.1-20.66
- [5] Schuler., **Metal Forming Handbook**. 2<sup>nd</sup> ed. Springe: Heidelberg Berlin pp, 1998. pp156-388.
- [6] ชานนท์ สุขดาอยู่, แม่พิมพ์ปั๊มโลหะแผ่น. กรุงเทพฯ:สมาคมอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย, หน้า 49-69.
- [7] Donald f.early.,Edward a.reed., **“Techniques of Press-working Sheet Metal**. 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey: Prentice- Hall,Inc.,Englewood Cliffs, 1974, p.173-185.
- [8] ชเนศ เมฆฉาย และคณะ, “ทฤษฎีการขึ้นรูปลึก,” ในสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ: กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2539.
- [9] Kurt, L, **Handbook of Metal forming**. 1<sup>st</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1985. pp.20.1-20.56.
- [10] ตรีสนัย ถัดดาวงศ์, การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปโลหะทรงกระบอกและทรงสี่เหลี่ยม. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2551.
- [11] Eary, F.D. and Reed, A.E., **Techniques of Pressworking Sheet Metal**. 2<sup>nd</sup> ed, New Jersey Englewood Cliffs, 1974. pp. 179-185
- [12] วารุณี เปรมานนท์ และคณะ, แม่พิมพ์โลหะแผ่น. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2552. หน้า (2-4)และ(142-179).

- [13] Taylor, B., **Formability Testing of Sheet Metal Handbook.** <sup>9th</sup> ed. Ohio: ASM International, 1988. pp. 580 - 583.
- [14] G. Oehler and F. Kaiser, **Blanking, Punching and Drawing Tools.** <sup>6th</sup> ed. Springer: Berlin/Heidenberg/New York, 1973.
- [15] จุลศิริ ศรีงามผ่อง, **วิศวกรรมงานแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะ แผ่นเบืองตัน.** กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2541. หน้า (9.1-9.16)
- [16] วีระศักดิ์ ทรัพย์วิเชียร, **น้ำมันหล่อลื่น.** กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2544. หน้า 1-7.
- [17] Chandorkar, K., "Deep Drawing of Rectangular Pans from Aluminum Alloy 2008-T4," **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 63, 1997. pp. 27-34.
- [18] Toh and Kobayashi, "Deformation Analysis and Blank Design in Square Cup Drawing," **Journal Mechanic Science**, Vol. 25, No. 1, 1984. pp. 15-32.
- [19] ชาญศักดิ์ ภัทราพรนันท์, **การศึกษาการลากขึ้นรูปลึกกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์,** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2545.
- [20] EI-Wakil, D.S. Kamal, M.N.E.M. and Darwish, A.H., **Mechanics of The Square Box Drawing Operation of Aluminium Blanks.** New York: Mechanical Engineering Department, 1980. pp. 679-759.
- [21] Fratini, L., Casto, S.L. and Micari, F., "Deep Drawing of Square Box: Analysis of The Influence of Geometrical Parameters by Numerical Simulations and Experimental Tests," **In Simulation of Material Processing**, 1995. pp. 705-709
- [22] นฤทธิ์ คชฤทธิ์, **การตีปรอว์เปลือกทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้แรงกดยึดชิ้นงานที่เป็น สัดส่วนกับแรงที่ใช้พันซ์,** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2539. หน้า 1-46.
- [23] Yoshida, T., Katayama, T., Hashimoto, K. and Kuriyama, Y., **Shape Control Techniques for High Strength Steel in Sheet Metal Forming** (Online), 2000 Available: <http://www.nsc.co.jp> (15 January 2006).

- [24] Yoshida, T., Isogai, E., Hashimoto, K., Katayama, T. and Kuriyama, Y., “Reduction of Springback for High-Strength Steel Sheets by Crash Forming,” **Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity**, Vol. 46, No.534, 2005. pp. 656-660.
- [25] Yanagimoto, J. and Oyamada, K., “Springback of High-strength Steel After Hot and Warm Sheet Formings”, **Annals of the CIRP**, Vol.54 (1), 2005. pp. 213-216.
- [26] Mori, K., Akita, K. and Abe, Y., 2007, “Springback Behavior in Bending of Ultra-High-Strength Sheets Using CNC Servo Press,” In **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 47, pp. 321-325.



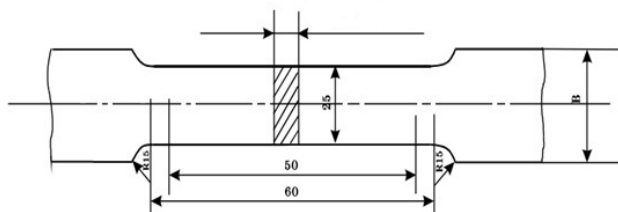


ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงคุณสมบัติของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SAPH





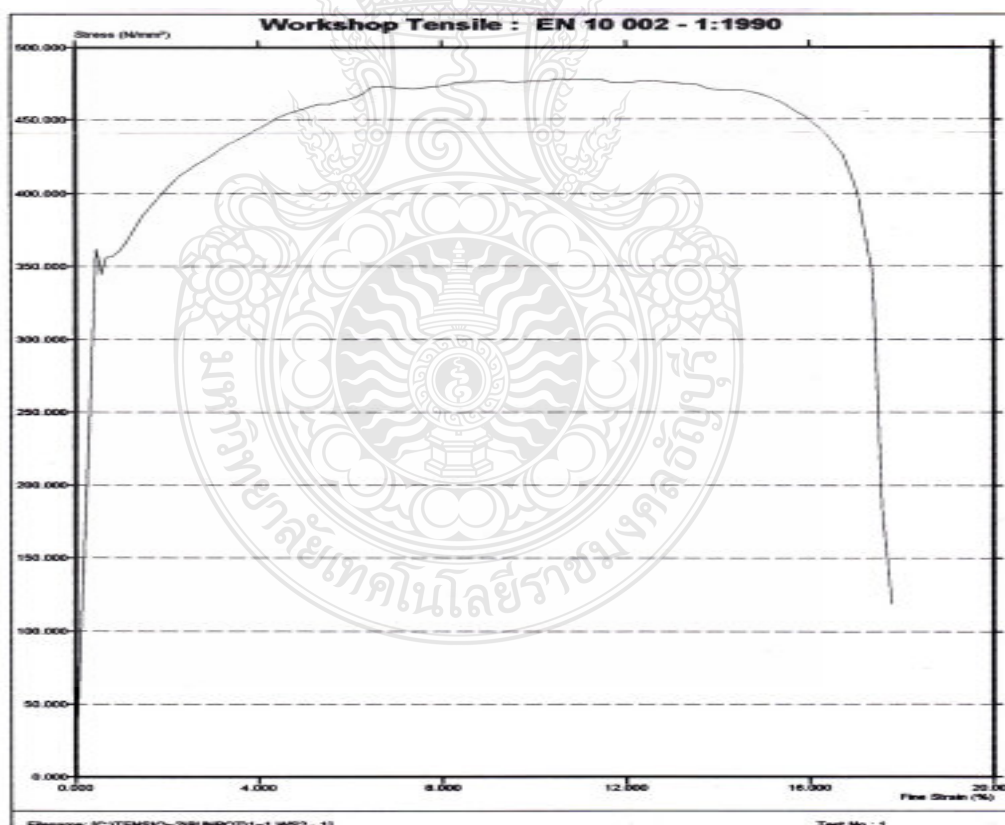
ความหนาของชิ้นทดสอบเท่ากับ  
ความหนาของเหล็กแผ่น

ภาพที่ ก.1 ชิ้นทดสอบความต้านแรงดึงและความยืดหมายเลข 5

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



TENSILE TEST REPORT		DARTEC	
<b>Test Data</b>			<b>Proof 0.2</b>
Result File	C:\TENSIO~2\BUNPOT1~1.40M1.MDB		
Data file	C:\TENSIO~2\BUNPOT1~1.WS2		
Time of Test	04:29:30	Date of Test	1/22/11
Type of Test	Yield Test	Subfile No.	1 Test No. 1
<b>Specimen Data</b>			
Thickness	1.4 mm	Initial GL:	50 mm
Width	12.5 mm	Operator	MC
Area	17.5 mm <sup>2</sup>	Material	FE 1.40 mm.
Parallel Length	50 mm	Spec. Code	SAPH440
		Test No.	1
		Batch No.	0'
<b>Test Results</b>			
Fm	8.37 kN	A50	18 %
Rm	478 N/mm <sup>2</sup>	A5.65	24 %
ReH	349 N/mm <sup>2</sup>	At	18 %
ReL	344 N/mm <sup>2</sup>	Ae	1 %
		Ag	11 %
		Agt	11 %
		FeH	6.115 kN
		FeL	6.027 kN
E	(207) kN/mm <sup>2</sup>		
Stop Reason Test Complete:- Fracture detected			
Comments:			



ภาพที่ ก.2 ผลการทดสอบแรงดึงเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SAPH 440



### ตารางที่ ก.1 ความต้านแรงดึงและความยืดเหล็ก

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงดึงต่ำสุด MPa	ความยืดต่ำสุด ร้อยละ									
		ความต้านแรงดึงที่จุดครากต่ำสุด MPa			ชั้นทดสอบหมายเลข 5						ชั้นทดสอบหมายเลข 1A
		ความหนา น้อยกว่า 6 มม.	ความหนา ตั้งแต่ 6 มม. ถึงน้อยกว่า 8 มม.	ความหนา ตั้งแต่ 8 มม. ถึง 14 มม.	ความหนา น้อยกว่า 2.0 มม.	ความหนา ตั้งแต่ 2.0 มม. ถึงน้อยกว่า 2.5 มม.	ความหนาดั้งแต่ 2.5 มม. ถึงน้อยกว่า 3.15 มม.	ความหนาดั้งแต่ 3.15 มม. ถึงน้อยกว่า 4.0 มม.	ความหนาดั้งแต่ 4.0 มม. ถึงน้อยกว่า 6.3 มม.	ความหนาดั้งแต่ 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	

### ตารางที่ ก.2 ความต้านแรงดึงเป็นพิเศษเหล็ก SAPH

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงดึงต่ำสุด MPa	ความต้านแรงดึงที่จุดคราก MPa.								
		ความหนาน้อยกว่า 1.60 มม.	ความหนาตั้งแต่ 1.60 มม. ถึงน้อยกว่า 2.00 มม.	ความหนาดั้งแต่ 2.00 มม. ถึงน้อยกว่า 2.50 มม.	ความหนาดั้งแต่ 2.50 มม. ถึงน้อยกว่า 3.20 มม.	ความหนาดั้งแต่ 3.20 มม. ถึงน้อยกว่า 4.00 มม.	ความหนาดั้งแต่ 4.00 มม. ถึงน้อยกว่า 6.30 มม.	ความหนาดั้งแต่ 6.30 มม. ถึงน้อยกว่า 8.00 มม.	ความหนาดั้งแต่ 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
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	

### ตารางที่ ก.3 ความยืดเป็นพิเศษเหล็ก SAPH

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงดึงต่ำสุด MPa	ความยืดร้อยละ								
		ความหนาน้อยกว่า 1.60 มม.	ความหนาตั้งแต่ 1.60 มม. ถึงน้อยกว่า 2.00 มม.	ความหนาดั้งแต่ 2.00 มม. ถึงน้อยกว่า 2.50 มม.	ความหนาดั้งแต่ 2.50 มม. ถึงน้อยกว่า 3.20 มม.	ความหนาดั้งแต่ 3.20 มม. ถึงน้อยกว่า 4.00 มม.	ความหนาดั้งแต่ 4.00 มม. ถึงน้อยกว่า 6.30 มม.	ความหนาดั้งแต่ 6.30 มม. ถึงน้อยกว่า 8.00 มม.	ความหนาดั้งแต่ 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
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 2) ชั้นคุณภาพเท่านั้น 3) เตรียมชั้นทดสอบหมายเลข 5



ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ผลทดลองทางสถิติ

### ข.1 การหาขนาดตัวอย่าง

ในการทดลองจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนวณหาขนาดตัวอย่าง (Sample Size;  $n$ ) ที่จะทำการเก็บผลเพื่อให้ได้ผลเป็นที่ยอมรับ และเชื่อถือได้ตามแบบของสถิติวิศวกรรม

การหาขนาดตัวอย่างทดลองกรณีการทดลองเมื่อปัจจัยคงที่

$$\Phi^2 = [(1 + 0.01P)^2 - 1]n$$

โดยที่

$\Phi$  = OC-Curve Parameter

$P$  = เปอร์เซนต์ความเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เพิ่มจนทำให้ปฏิเสธสมมติฐาน

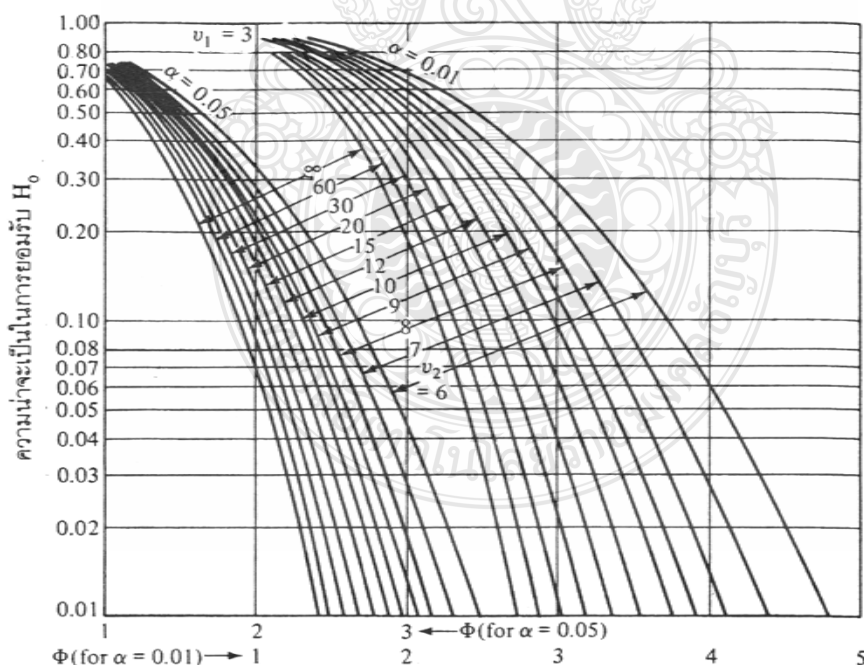
$a$  = จำนวนของปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง

กำหนดให้  $P = 20\%$ ,  $\alpha = 0.05$ ,  $\beta = 0.1$  เมื่อจำนวนของปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง ( $a$ ) = 4

$$v_1 = (a-1) = (4-1) = 3$$

$$v_2 = a(n-1) = (4)(3-1) = 8$$

นำค่าที่ได้ไปเปิดตารางในรูปที่ ข.1 จนกว่าจะได้  $n$  ที่ทำให้ได้ค่า  $\beta$  น้อยกว่า 0.1 ซึ่งถือว่าเป็น  $n$  ที่เหมาะสม



ภาพที่ ข.1 แสดงเส้นโค้งโอซี (O-C Curve) สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบอิทธิพลคงที่ เมื่อ  $v_1 = 3$

**ตารางที่ ข.1** การหาขนาดสิ่งตัวอย่างที่เหมาะสม

n	$\Phi^2$	$\Phi$	$\beta$	$(1-\beta)$	$\nu_1$	$\nu_2$
3	3.36	1.83	0.350	0.650	3	8
4	4.5	2.12	0.130	0.870	3	12
5	5.63	2.37	0.080	0.920	3	16
6	6.75	2.59	0.015	0.985	3	20

จากการหาขนาดตัวอย่างในตารางที่ ข.1 ได้จำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมในการเก็บผลการทดลองคือ 5 ตัวอย่าง ด้วยระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

**ข.2** วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS)

ในการศึกษาถึงอิทธิพลของรัศมีบ่าคาย ว่ามีผลต่อแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกหรือไม่ สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) จะใช้กระบวนการทางสถิติวิเคราะห์ผลข้อมูลจากการทดลอง ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังตารางที่ ข.2

**ตารางที่ ข.2** แรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวน

รัศมีบ่าคาย ( มม.)	แรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ( kN )					รวม $Y_i$	เฉลี่ย $\bar{Y}_i$
	1	2	3	4	5		
6	118.35	116.83	116.42	117.76	114.13	583.49	116.70
8	113.85	114.93	110.05	113.73	115.33	567.89	113.58
10	110.10	112.57	110.59	109.10	112.18	554.54	110.91
12	109.57	107.42	106.51	108.07	110.15	541.72	108.34
					ผลรวม	2,247.64	112.38

การวิเคราะห์อิทธิพลของรัศมีบ่าคายมีผลต่อแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกหรือไม่ จะอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน คือการคำนวณค่าผลรวมกำลังสองทั้งหมดเพื่อแตกออกเป็นผลรวมกำลังสองของระดับปัจจัย และกำลังสองของความคลาดเคลื่อนได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 SS_T &= \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^5 Y_{ij}^2 - \left( \frac{Y_{..}^2}{an} \right) \\
 &= 118.35^2 + 116.83^2 + \dots + 108.07^2 + 110.15^2 - \frac{(118.35 + 116.83 + \dots + 108.07 + 110.15)^2}{4 \times 5} \\
 &= 252,832.41 - \frac{(2,247.64)^2}{20} \\
 &= 238.13
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 SS_{tr} &= \sum_{i=1}^4 \frac{Y_{i.}^2}{n} - \left( \frac{Y_{..}^2}{an} \right) \\
 &= \frac{583.49^2 + 567.89^2 + 554.54^2 + 541.72^2}{5} - \frac{(583.49 + 567.89 + 554.54 + 541.72)^2}{4 \times 5} \\
 &= \frac{1,263,934.80}{5} - \frac{(2,247.64)^2}{20} \\
 &= 192.68
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 SS_E &= SS_T - SS_{tr} \\
 &= 238.13 - 192.68 \\
 &= 45.45
 \end{aligned}$$

ตารางที่ ข.3 ANOVA สำหรับข้อมูลในตารางที่ ข.2

แหล่งความผันแปร	Sum of Square (SS)	Degree of Freedom (DF)	Mean Square (Ms)	$F_0$
รัศมีป่าดาย	$SS_{tr} = 192.68$	$a-1 = 3$	$Ms(tr) = \frac{SS_{tr}}{a-1} = 64.22$	$\frac{Ms(tr)}{Ms(E)}$
Repeatability	$SS_E = 45.45$	$a(n-1) = 16$	$Ms(E) = \frac{SS_E}{a(n-1)} = 2.84$	$= 22.61$
รวม	$SS_T = 238.13$	19		

ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สามารถเปิดตาราง f จากตารางที่ ค.1  $F_{0.05;3;16} = 3.24$  เนื่องจาก ค่า  $F_0$  จากตารางเท่ากับ 22.61 ซึ่งมีค่ามากกว่า  $F_{0.05;3;16} = 3.24$

∴ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ขนาดของรัศมีป่าคายมีผลต่อแรงสูงสุดที่ใช้การลากขึ้นรูปด้วยสื่เหล็กมจัตุรัสของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) จริง

### ข.3 วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SAPH 440 (JIS)

ในการศึกษาถึงอิทธิพลของรัศมีป่าคาย ว่ามีผลต่อแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปด้วยสื่เหล็กมจัตุรัสแบบมีปีกหรือไม่ ใช้หลักการเดียวกันกับการวิเคราะห์อิทธิพลของรัศมีป่าคายต่อแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปด้วยสื่เหล็กมจัตุรัสแบบมีปีกเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) ดังแสดงตามตารางที่ ข.4

ตารางที่ ข.4 แรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SAPH 440 (JIS)

เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวน

รัศมีป่าคาย ( มม.)	แรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ( kN )					รวม	เฉลี่ย	
	1	2	3	4	5	$Y_i$	$\bar{Y}_i$	
6	178.84	177.22	178.17	175.44	176.35	886.02	177.20	
8	172.18	173.22	175.54	174.16	173.41	868.51	173.70	
10	168.61	170.46	170.81	169.54	172.29	851.71	170.34	
12	167.66	166.93	170.84	167.58	168.53	841.54	168.31	
						ผลรวม	3,447.78	172.40

$$\begin{aligned}
 SS_T &= \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^5 Y_{ij}^2 - \left( \frac{Y_{..}^2}{an} \right) \\
 &= 178.84^2 + 177.22^2 + \dots + 167.58^2 + 168.53^2 - \frac{(178.84 + 177.22 + \dots + 167.58 + 168.53)^2}{4 \times 5} \\
 &= 594,618.76 - \frac{(3,447.78)^2}{20} \\
 &= 259.41
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 SS_r &= \sum_{i=1}^4 \frac{Y_i^2}{n} - \left( \frac{Y_{..}^2}{an} \right) \\
 &= \frac{886.02^2 + 868.51^2 + 851.71^2 + 841.54^2}{5} - \frac{(886.02 + 868.51 + 851.71 + 841.54)^2}{4 \times 5} \\
 &= \frac{2,972,940.56}{5} - \frac{(3,447.78)^2}{20} \\
 &= 228.76
 \end{aligned}$$

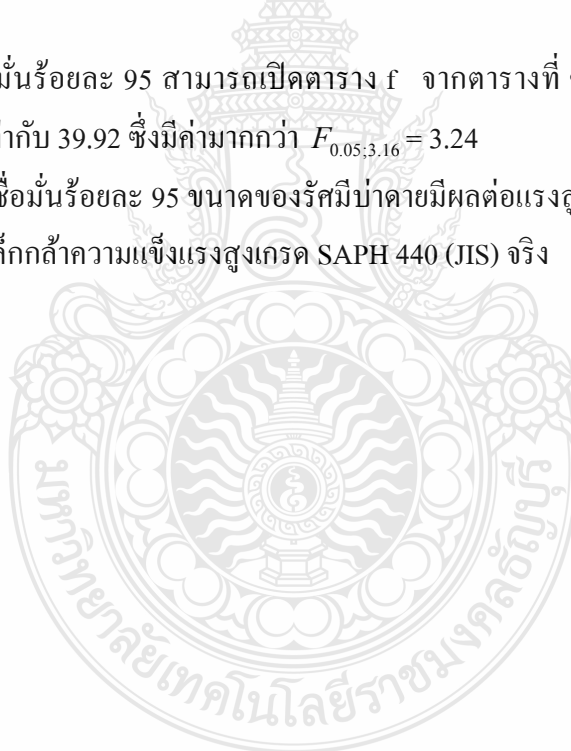
$$\begin{aligned}
 SS_E &= SS_T - SS_{tr} \\
 &= 259.41 - 228.76 \\
 &= 30.65
 \end{aligned}$$

ตารางที่ ข.5 ตาราง ANOVA สำหรับข้อมูลในตารางที่ ข.4

แหล่งความผันแปร	Sum of Square (SS)	Degree of Freedom (DF)	Mean Square (Ms)	$F_0$
รัศมีป่าดาย	$SS_{tr} = 228.76$	$a-1 = 3$	$Ms(tr) = \frac{SS_{tr}}{a-1} = 76.25$	$\frac{Ms(tr)}{Ms(E)}$
Repeatability	$SS_E = 30.65$	$a(n-1) = 16$	$Ms(E) = \frac{SS_E}{a(n-1)} = 1.91$	$= 39.92$
รวม	$SS_T = 259.41$	19		

ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สามารถเปิดตาราง f จากตารางที่ ค.1  $F_{0.05;3;16} = 3.24$   
 เนื่องจาก ค่า  $F_0$  จากตารางเท่ากับ 39.92 ซึ่งมีค่ามากกว่า  $F_{0.05;3;16} = 3.24$

$\therefore$  ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ขนาดของรัศมีป่าดายมีผลต่อแรงสูงสุดที่ใช้การลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SAPH 440 (JIS) จริง









ค.1 ตารางบันทึกผลการทดลองแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป

ตารางที่ ค.1 แรงลากขึ้นรูปเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) ที่รัศมีบ่าตาย 6 มม.

ชั้นที่	แรง (kN)		คุณภาพชิ้นงาน
	F	F <sub>BH</sub>	
1	118.35	37.07	สมบูรณ์
2	116.83	37.84	สมบูรณ์
3	116.42	37.84	สมบูรณ์
4	117.76	37.15	สมบูรณ์
5	114.13	36.69	สมบูรณ์
เฉลี่ย	116.70	37.32	สมบูรณ์

ตารางที่ ค.2 แรงลากขึ้นรูปเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) ที่รัศมีบ่าตาย 8 มม.

ชั้นที่	แรง (kN)		คุณภาพชิ้นงาน
	F	F <sub>BH</sub>	
1	113.85	37.21	สมบูรณ์
2	114.93	36.84	สมบูรณ์
3	110.05	36.77	สมบูรณ์
4	113.73	37.61	สมบูรณ์
5	115.33	37.61	สมบูรณ์
เฉลี่ย	113.58	37.21	สมบูรณ์

ตารางที่ ค.3 แรงลากขึ้นรูปเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) ที่รัศมีบ่าตาย 10 มม.

ชั้นที่	แรง (kN)		คุณภาพชิ้นงาน
	F	F <sub>BH</sub>	
1	110.10	37.10	สมบูรณ์
2	112.57	37.23	สมบูรณ์
3	110.59	36.93	สมบูรณ์
4	109.10	36.23	สมบูรณ์
5	112.18	37.08	สมบูรณ์
เฉลี่ย	110.91	36.91	สมบูรณ์

ตารางที่ ค.4 แรงลากขึ้นรูปเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) ที่รัศมีบ่าตาย 12 มม.

ชั้นที่	แรง ( kN)		คุณภาพชิ้นงาน
	F	F <sub>BH</sub>	
1	109.57	37.41	สมบูรณ์
2	107.42	37.33	สมบูรณ์
3	106.51	36.83	สมบูรณ์
4	108.07	37.24	สมบูรณ์
5	110.15	37.41	สมบูรณ์
เฉลี่ย	108.34	37.24	สมบูรณ์

ตารางที่ ค.5 แรงลากขึ้นรูปเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) ที่รัศมีบ่าตาย 6 มม.

ชั้นที่	แรง ( kN)		คุณภาพชิ้นงาน
	F	F <sub>BH</sub>	
1	178.84	55.75	สมบูรณ์
2	177.22	56.05	สมบูรณ์
3	178.17	55.82	สมบูรณ์
4	175.44	55.43	สมบูรณ์
5	176.35	55.94	สมบูรณ์
เฉลี่ย	177.20	55.79	สมบูรณ์

ตารางที่ ค.6 แรงลากขึ้นรูปเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) ที่รัศมีบ่าตาย 8 มม.

ชั้นที่	แรง ( kN)		คุณภาพชิ้นงาน
	F	F <sub>BH</sub>	
1	172.18	55.65	สมบูรณ์
2	173.22	56.12	สมบูรณ์
3	175.54	55.27	สมบูรณ์
4	174.16	55.84	สมบูรณ์
5	173.41	56.20	สมบูรณ์
เฉลี่ย	173.70	55.81	สมบูรณ์

ตารางที่ ค.7 แรงลากขึ้นรูปเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS)  
ที่รัศมีบ่าคาย 10 มม.

ชั้นที่	แรง ( kN)		คุณภาพชิ้นงาน
	F	F <sub>BH</sub>	
1	168.61	55.38	สมบูรณ์
2	170.46	55.11	สมบูรณ์
3	170.81	56.05	สมบูรณ์
4	169.54	55.42	สมบูรณ์
5	172.29	56.14	สมบูรณ์
เฉลี่ย	170.34	55.62	สมบูรณ์

ตารางที่ ค.8 แรงลากขึ้นรูปเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS)  
ที่รัศมีบ่าคาย 12 มม.

ชั้นที่	แรง ( kN)		คุณภาพชิ้นงาน
	F	F <sub>BH</sub>	
1	167.66	56.21	สมบูรณ์
2	166.93	55.68	สมบูรณ์
3	170.84	55.97	สมบูรณ์
4	167.58	55.24	สมบูรณ์
5	168.53	55.59	สมบูรณ์
เฉลี่ย	168.31	55.74	สมบูรณ์

ตารางที่ ค.9 ความกว้างของชิ้นงานรวมปีกเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS)

ชั้นที่ รัศมีบ่าตาย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
R 6	89.70	89.87	89.82	89.82	89.91	90.30
	90.63	90.69	90.69	91.01	90.84	
R 8	91.81	91.04	90.89	91.48	90.92	90.88
	90.43	90.15	91.06	90.47	90.58	
R 10	92.86	92.92	91.69	92.57	91.22	91.80
	91.53	91.17	91.74	91.19	91.09	
R 12	92.84	92.76	92.05	90.87	91.71	92.40
	92.80	92.77	93.31	93.21	91.67	

ตารางที่ ค.10 ความกว้างของชิ้นงานรวมปีกแรงลากขึ้นรูปเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้าง  
ยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS)

ชั้นที่ รัศมีบ่าตาย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
R 6	88.04	88.22	87.78	88.20	88.15	88.33
	88.37	88.76	88.30	88.85	88.61	
R 8	89.25	89.10	89.61	89.11	89.23	89.25
	90.00	88.92	89.01	89.16	89.12	
R 10	88.94	90.88	89.87	90.96	89.95	90.34
	92.26	90.07	90.28	89.96	90.27	
R 12	91.45	90.94	91.22	90.39	90.56	90.70
	90.55	90.15	90.27	90.89	90.62	

## ค.2 ตารางบันทึกผลการทดลองค่าความเรียบผิวชิ้นงาน ( $R_a$ )

ตารางที่ ค.11 แสดงค่าความเรียบผิวชิ้นงาน ( $R_a$ ) ที่รัศมีบ่าตาย 6 มม.

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 ( $\mu\text{m}$ )	ตำแหน่งที่ 2 ( $\mu\text{m}$ )	ตำแหน่งที่ 3 ( $\mu\text{m}$ )	ตำแหน่งที่ 4 ( $\mu\text{m}$ )	ค่าเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
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 ค.13 แสดงค่าความเรียบผิวชิ้นงาน ( $R_a$ ) ที่รัศมีบ่าตาย 10 มม.

ชั้นที่	ตำแหน่งที่ 1 ( $\mu\text{m}$ )	ตำแหน่งที่ 2 ( $\mu\text{m}$ )	ตำแหน่งที่ 3 ( $\mu\text{m}$ )	ตำแหน่งที่ 4 ( $\mu\text{m}$ )	ค่าเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
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

ค.3 ตารางบันทึกผลการทดลองค่าความหนาผนังด้วยด้านตรงของชิ้นงาน

ตารางที่ ค.15 ความหนาผนังด้วยด้านตรงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) ที่รัศมีบาคาย 6 มม.

ตำแหน่งที่วัด	วัสดุ SPCC			ค่าเฉลี่ย
	ค่าความหนาของชิ้นงาน (mm)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
1	1.39	1.39	1.39	1.39
2	1.38	1.39	1.39	1.387
3	1.38	1.39	1.38	1.383
4	1.37	1.37	1.37	1.37
5	1.38	1.36	1.37	1.37
6	1.34	1.32	1.33	1.33
7	1.39	1.39	1.38	1.387
8	1.40	1.42	1.41	1.41
9	1.44	1.46	1.46	1.453
10	1.47	1.47	1.47	1.47

ตารางที่ ค.16 ความหนาผนังด้วยด้านตรงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) ที่รัศมีบาคาย 8 มม.

ตำแหน่งที่วัด	วัสดุ SPCC			ค่าเฉลี่ย
	ค่าความหนาของชิ้นงาน (mm)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
1	1.39	1.39	1.39	1.39
2	1.39	1.39	1.39	1.39
3	1.39	1.39	1.37	1.383
4	1.37	1.39	1.38	1.38
5	1.38	1.37	1.37	1.373
6	1.33	1.33	1.33	1.33
7	1.39	1.39	1.39	1.39
8	1.41	1.42	1.42	1.417
9	1.45	1.46	1.46	1.457
10	1.49	1.48	1.48	1.483

ตารางที่ ค.17 ความหนาผนังถ่วงด้านตรงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) ที่รัศมีบ่าตาย 10 มม.

ตำแหน่งที่วัด	วัสดุ SPCC			ค่าเฉลี่ย
	ค่าความหนาของชิ้นงาน (mm)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
1	1.40	1.39	1.40	1.397
2	1.40	1.39	1.39	1.393
3	1.39	1.39	1.39	1.39
4	1.40	1.39	1.38	1.39
5	1.38	1.39	1.37	1.38
6	1.33	1.34	1.34	1.337
7	1.39	1.40	1.40	1.397
8	1.42	1.42	1.41	1.417
9	1.47	1.46	1.46	1.463
10	1.48	1.48	1.48	1.48

ตารางที่ ค.18 ความหนาผนังถ่วงด้านตรงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) ที่รัศมีบ่าตาย 12 มม.

ตำแหน่งที่วัด	วัสดุ SPCC			ค่าเฉลี่ย
	ค่าความหนาของชิ้นงาน (mm)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
1	1.40	1.40	1.40	1.40
2	1.40	1.40	1.40	1.40
3	1.39	1.40	1.39	1.393
4	1.39	1.39	1.40	1.393
5	1.38	1.39	1.38	1.383
6	1.34	1.35	1.33	1.34
7	1.40	1.40	1.40	1.40
8	1.42	1.42	1.41	1.417
9	1.48	1.46	1.46	1.47
10	1.50	1.49	1.50	1.497



ตารางที่ ค.19 ความหนาผนังถ้ายด้านตรงเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) ที่รัศมีบ่าคย 6 มม.

ตำแหน่งที่วัด	วัสดุ SAPH 440			ค่าเฉลี่ย
	ค่าความหนาของชิ้นงาน (mm)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
1	1.38	1.38	1.38	1.38
2	1.37	1.37	1.37	1.37
3	1.36	1.36	1.35	1.357
4	1.36	1.35	1.36	1.357
5	1.35	1.35	1.35	1.35
6	1.32	1.31	1.32	1.317
7	1.38	1.37	1.39	1.38
8	1.40	1.40	1.40	1.40
9	1.48	1.48	1.49	1.483
10	1.51	1.51	1.52	1.513



ตารางที่ ค.20 ความหนาผนังถ้ายด้านตรงเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) ที่รัศมีบ่าตาย 8 มม.

ตำแหน่งที่วัด	วัสดุ SAPH 440			ค่าเฉลี่ย
	ค่าความหนาของชิ้นงาน (mm)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
1	1.38	1.38	1.38	1.38
2	1.37	1.38	1.38	1.377
3	1.35	1.36	1.36	1.357
4	1.36	1.36	1.36	1.36
5	1.35	1.36	1.36	1.357
6	1.30	1.31	1.31	1.307
7	1.38	1.39	1.38	1.383
8	1.41	1.42	1.41	1.413
9	1.50	1.50	1.49	1.497
10	1.53	1.52	1.54	1.53



ตารางที่ ค.21 ความหนาผนังถ้ายด้านตรงเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) ที่รีดมีป่าคาย 10 มม.

ตำแหน่งที่วัด	วัสดุ SAPH 440			ค่าเฉลี่ย
	ค่าความหนาของชิ้นงาน (mm)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
1	1.39	1.39	1.39	1.39
2	1.38	1.38	1.38	1.38
3	1.38	1.37	1.38	1.377
4	1.37	1.37	1.37	1.37
5	1.36	1.36	1.36	1.36
6	1.30	1.32	1.32	1.313
7	1.38	1.39	1.40	1.39
8	1.42	1.42	1.41	1.417
9	1.48	1.47	1.48	1.477
10	1.52	1.53	1.52	1.523



ตารางที่ ค.22 ความหนาผนังถ้ายด้านตรงเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) ที่รัศมีบ่าคย 12 มม.

ตำแหน่งที่วัด	วัสดุ SAPH 440			ค่าเฉลี่ย
	ค่าความหนาของชิ้นงาน (mm)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
1	1.40	1.40	1.39	1.397
2	1.40	1.39	1.39	1.393
3	1.38	1.38	1.38	1.38
4	1.38	1.37	1.37	1.373
5	1.38	1.37	1.37	1.373
6	1.33	1.32	1.32	1.323
7	1.40	1.40	1.38	1.393
8	1.43	1.43	1.43	1.43
9	1.50	1.51	1.51	1.507
10	1.54	1.53	1.54	1.537



ค.4 ตารางบันทึกผลการทดลองค่าความหนาผนังด้วยบริเวณมุมกล่องของชิ้นงาน

ตารางที่ ค.23 ความหนาผนังบริเวณมุมด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) ที่รีไซเคิลบ่าตาย 6 มม.

ตำแหน่งที่วัด	วัสดุ SPCC			ค่าเฉลี่ย
	ค่าความหนาของชิ้นงาน (mm)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
1	1.40	1.39	1.39	1.393
2	1.40	1.39	1.39	1.393
3	1.36	1.36	1.36	1.36
4	1.28	1.29	1.28	1.283
5	1.33	1.34	1.34	1.337
6	1.35	1.35	1.35	1.35
7	1.35	1.36	1.36	1.357
8	1.39	1.40	1.38	1.39
9	1.45	1.46	1.45	1.453
10	1.41	1.41	1.40	1.407
11	1.40	1.40	1.39	1.397

ตารางที่ ค.24 ความหนาผนังบริเวณมุมด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) ที่รัศมีบ่าคาย 8 มม.

ตำแหน่งที่วัด	วัสดุ SPCC			ค่าเฉลี่ย
	ค่าความหนาของชิ้นงาน (mm)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
1	1.40	1.40	1.39	1.397
2	1.40	1.40	1.39	1.397
3	1.38	1.37	1.37	1.373
4	1.31	1.31	1.31	1.31
5	1.33	1.34	1.34	1.337
6	1.35	1.35	1.36	1.353
7	1.35	1.36	1.37	1.363
8	1.40	1.39	1.39	1.393
9	1.46	1.46	1.47	1.463
10	1.41	1.41	1.41	1.41
11	1.40	1.40	1.40	1.40



ตารางที่ ค.25 ความหนาผนังบริเวณมุมด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) ที่รัศมีบ่าคาย 10 มม.

ตำแหน่งที่วัด	วัสดุ SPCC			ค่าเฉลี่ย
	ค่าความหนาของชิ้นงาน (mm)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
1	1.40	1.40	1.40	1.40
2	1.40	1.39	1.40	1.397
3	1.38	1.39	1.39	1.387
4	1.31	1.32	1.32	1.317
5	1.35	1.34	1.35	1.347
6	1.36	1.35	1.36	1.357
7	1.37	1.38	1.37	1.373
8	1.40	1.41	1.41	1.407
9	1.46	1.47	1.47	1.467
10	1.41	1.41	1.41	1.41
11	1.40	1.40	1.40	1.40



ตารางที่ ค.26 ความหนาผนังบริเวณมุมด้วย เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) ที่รัศมีปาดาย 12 มม.

ตำแหน่งที่วัด	วัสดุ SPCC			ค่าเฉลี่ย
	ค่าความหนาของชิ้นงาน (mm)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
1	1.40	1.40	1.40	1.40
2	1.40	1.40	1.40	1.40
3	1.39	1.39	1.38	1.387
4	1.33	1.34	1.34	1.337
5	1.35	1.35	1.36	1.353
6	1.35	1.36	1.37	1.36
7	1.39	1.39	1.39	1.39
8	1.41	1.42	1.42	1.417
9	1.47	1.46	1.47	1.467
10	1.42	1.41	1.41	1.413
11	1.40	1.40	1.40	1.40





ตารางที่ ค.27 ความหนาผนังบริเวณมุมด้วยเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) ที่รัศมีบาคาย 6 มม.

ตำแหน่งที่วัด	วัสดุ SAPH 440			ค่าเฉลี่ย
	ค่าความหนาของชิ้นงาน (mm)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
1	1.38	1.38	1.38	1.38
2	1.38	1.38	1.38	1.38
3	1.32	1.33	1.33	1.327
4	1.24	1.25	1.24	1.243
5	1.27	1.28	1.26	1.27
6	1.28	1.28	1.27	1.277
7	1.36	1.36	1.37	1.363
8	1.40	1.41	1.40	1.403
9	1.46	1.46	1.47	1.463
10	1.41	1.40	1.41	1.407
11	1.40	1.40	1.40	1.40

ตารางที่ ค.28 ความหนาผนังบริเวณมุมด้วยเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) ที่รีดมีบ่าคย 8 มม.

ตำแหน่งที่วัด	วัสดุ SAPH 440			ค่าเฉลี่ย
	ค่าความหนาของชิ้นงาน (mm)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
1	1.39	1.39	1.39	1.39
2	1.39	1.39	1.39	1.39
3	1.33	1.34	1.32	1.33
4	1.25	1.26	1.25	1.253
5	1.28	1.28	1.27	1.277
6	1.29	1.28	1.28	1.283
7	1.38	1.37	1.37	1.373
8	1.41	1.41	1.41	1.41
9	1.47	1.48	1.47	1.473
10	1.41	1.41	1.41	1.41
11	1.40	1.40	1.40	1.40

ตารางที่ ค.29 ความหนาผนังบริเวณมุมด้วยเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) ที่รีดมีบ่าคาย 10 มม.

ตำแหน่งที่วัด	วัสดุ SAPH 440			ค่าเฉลี่ย
	ค่าความหนาของชิ้นงาน (mm)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
1	1.40	1.40	1.40	1.40
2	1.40	1.39	1.39	1.393
3	1.34	1.34	1.34	1.34
4	1.26	1.26	1.25	1.257
5	1.28	1.29	1.27	1.28
6	1.30	1.31	1.30	1.303
7	1.38	1.37	1.38	1.377
8	1.42	1.42	1.42	1.42
9	1.49	1.48	1.49	1.487
10	1.41	1.42	1.41	1.413
11	1.40	1.40	1.40	1.40

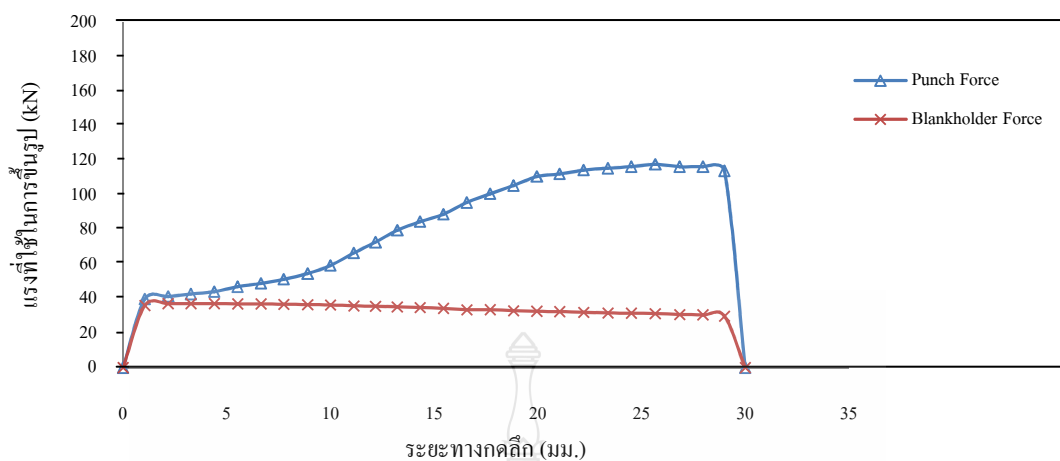
ตารางที่ ค.30 ความหนาผนังบริเวณมุมด้วยเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) ที่รีดมีบ่าคย 12 มม.

ตำแหน่งที่วัด	วัสดุ SAPH 440			ค่าเฉลี่ย
	ค่าความหนาของชิ้นงาน (mm)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
1	1.40	1.40	1.39	1.397
2	1.40	1.40	1.39	1.397
3	1.36	1.37	1.36	1.363
4	1.27	1.26	1.27	1.267
5	1.31	1.30	1.31	1.307
6	1.33	1.33	1.32	1.327
7	1.38	1.38	1.38	1.38
8	1.43	1.43	1.43	1.43
9	1.49	1.50	1.49	1.493
10	1.42	1.42	1.42	1.42
11	1.40	1.41	1.40	1.403

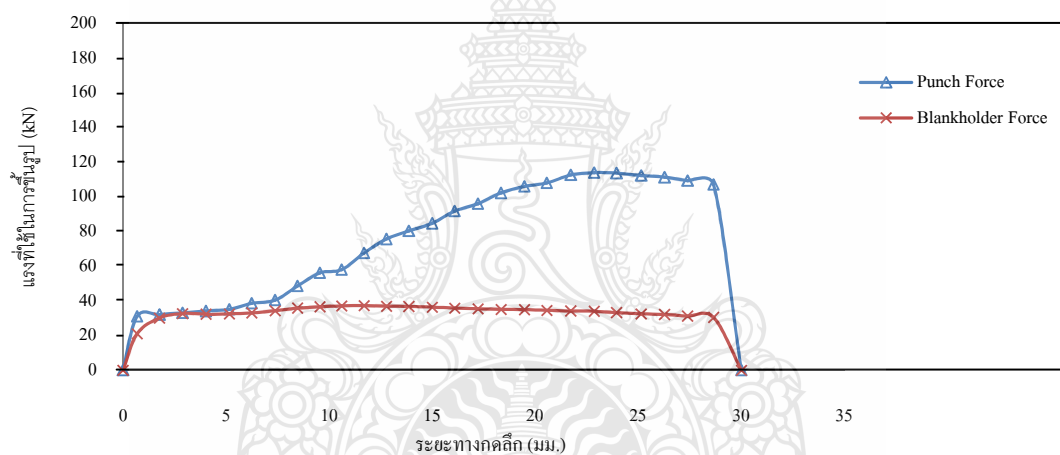
**ภาคผนวก ง**

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะกดคลิก

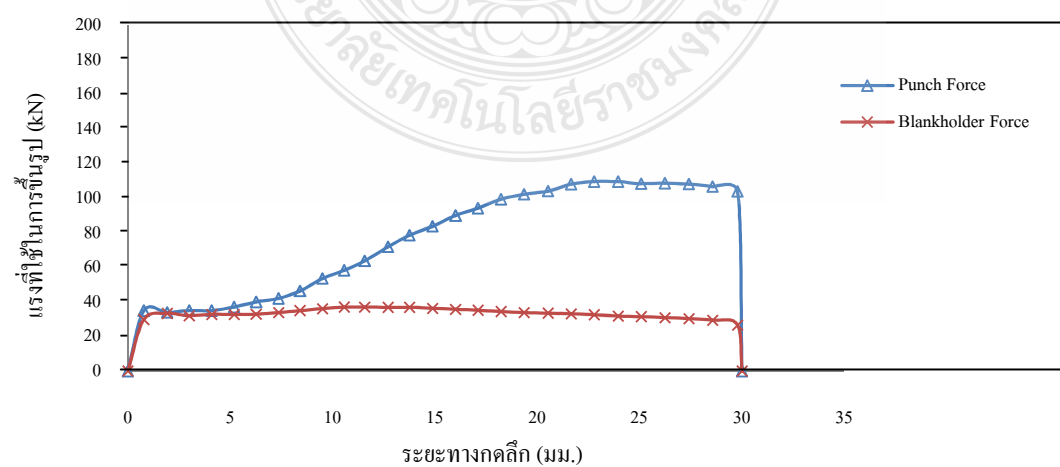




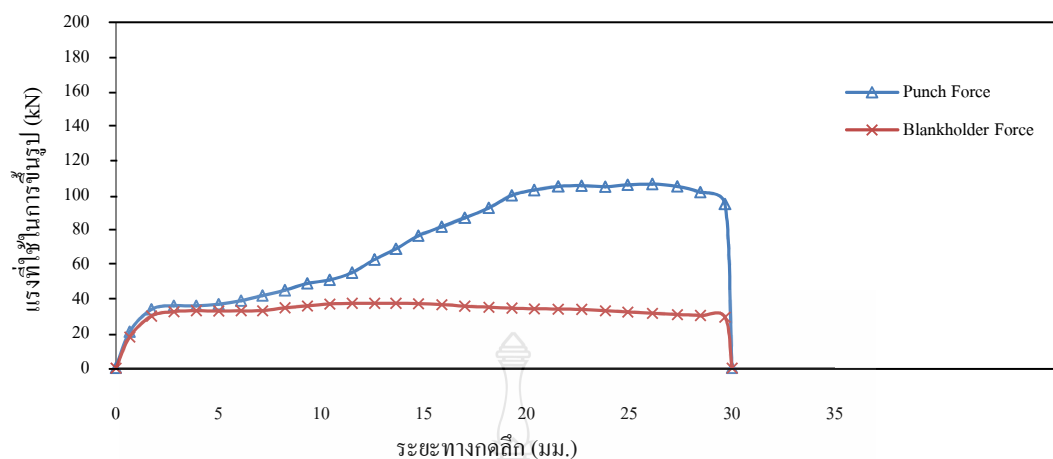
ภาพที่ 3.1 แรงกดขึ้นรูปและแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเหล็ก SPCC รัศมีปาดาย 6 มม.



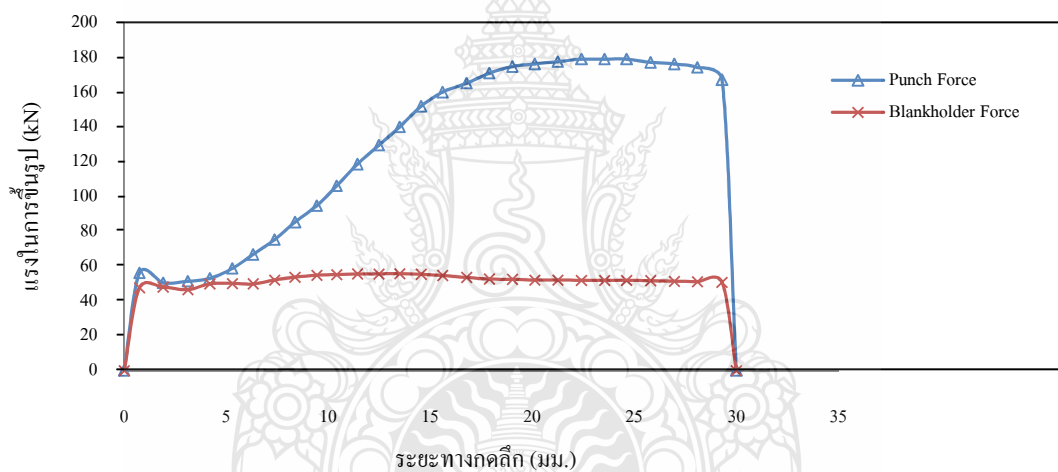
ภาพที่ 3.2 แรงกดขึ้นรูปและแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเหล็ก SPCC รัศมีปาดาย 8 มม.



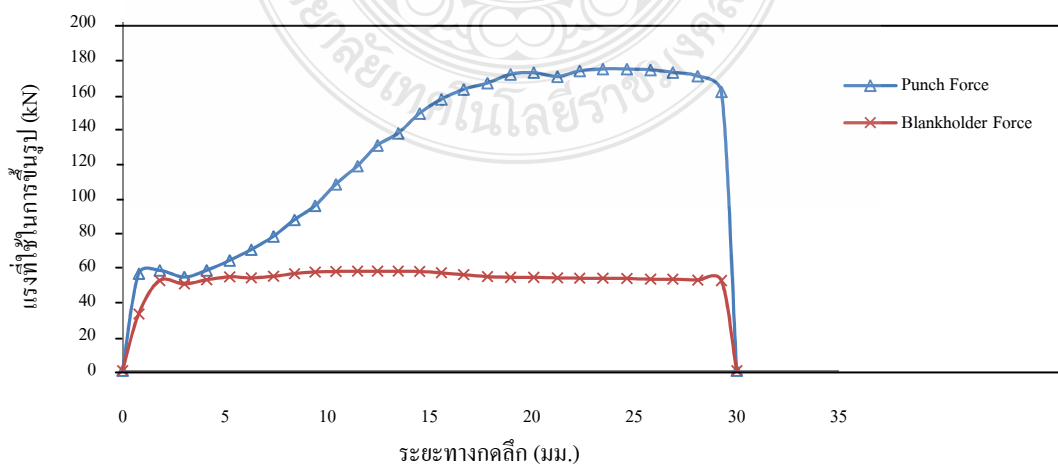
ภาพที่ 3.3 แรงกดขึ้นรูปและแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเหล็ก SPCC รัศมีปาดาย 10 มม.



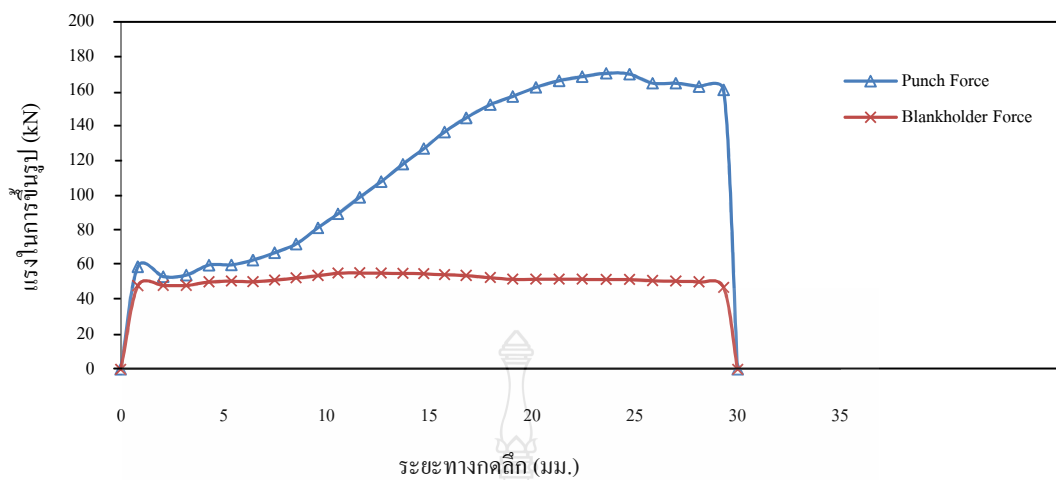
ภาพที่ ๔.๔ แรงกดขึ้นรูปและแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเหล็ก SPCC รัศมีบ่าตาย 12 มม.



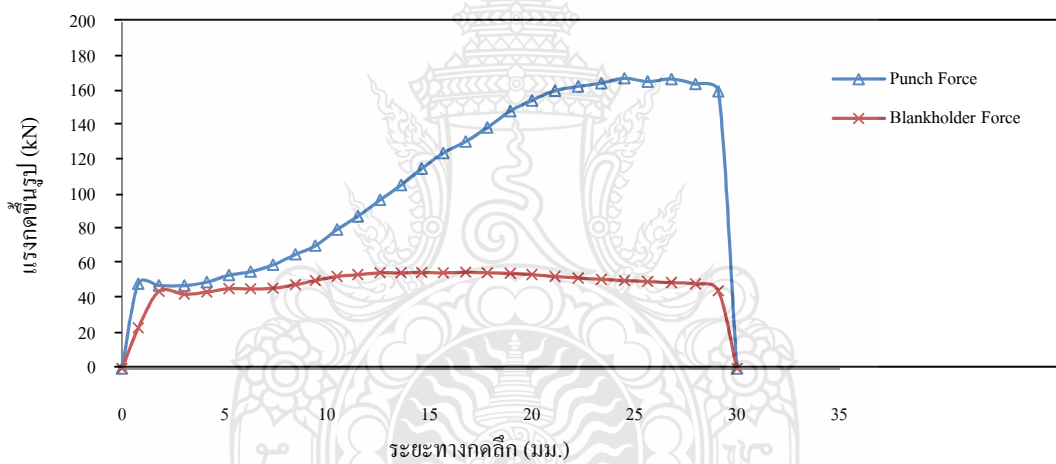
ภาพที่ ๔.๕ แรงกดขึ้นรูปและแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเหล็ก SAPH 440 รัศมีบ่าตาย 6 มม.



ภาพที่ ๔.๖ แรงกดขึ้นรูปและแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเหล็ก SAPH 440 รัศมีบ่าตาย 8 มม.



ภาพที่ ๗.๗ แรงกดขึ้นรูปและแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเหล็ก SAPH 440 รัศมีบ่าตาย 10 มม.



ภาพที่ ๗.๘ แรงกดขึ้นรูปและแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงานเหล็ก SAPH 440 รัศมีบ่าตาย 12 มม.





**ภาคผนวก จ**

**ผลงานตีพิมพ์และเผยแพร่**

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

**NETWORK 2011 @ RMUTB**  
**ie**

**รวมบทความ**  
**การประชุมวิชาการยาวนาน**  
**วิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554**  
**IE NETWORK CONFERENCE 2011**

**20 - 21 ตุลาคม 2554**  
**โรงแรมแอมบาสเตอร์ซิตี จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี**

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ  
การประชุมข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รศ.ดร.จิตรา ฐักิจการพานิช  
ผศ.ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย  
ผศ.ดร.ประมวล สุธีจารุวัฒน์

รศ.ดร.ปารเมศ ชุติมา  
ผศ.ดร.ดาริชา สุธีวงศ์  
ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.ปฏิภาณ จุ้ยเจิม  
ดร.สุदारัตน์ วงศ์กั๊วเกียรติ

ดร.ปณณมี สัจจกมล  
ดร.สุวิษณรณ วิชากุล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง  
ดร.ศิริรัตน์ หมื่นนวนิชกุล  
อ.จันจิรา คงชื่นใจ

ดร.เพ็ญสุตา พันฤทธิคำ  
ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน

มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

ผศ.ชานนท์ มูลวรรณ  
อ.ประภาพรรณ เกษราพงศ์

ดร.ศักดิ์ชาย รักการ  
อ.จักรินทร์ กลั่นเงิน

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รศ.ดร.พรเทพ ขอบข่ายเกียรติ  
ผศ.ดร.ชาญณรงค์ สายแก้ว  
ผศ.ดร.วีรพัฒน์ เศรษฐ์สมบูรณ์  
ดร.ปาพจน์ เจริญอภิบาล

รศ.ดร.ศุภชัย ปทุมนากุล  
ผศ.ดร.दनัยพงศ์ เซษฐุโชติศักดิ์  
ดร.ธนา ราษฎร์ภักดี

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รศ.ดร.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์  
ผศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล  
ผศ.ดร.สรรฐติชัย ชิวสุทธิศิลป์  
ผศ.ดร.อรรถพล สมุทคุปต์  
ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์  
ดร.อนิรุท ไชยจารุวนิช

รศ.ดร.วิมลสิน เหล่าศิริถาวร  
ผศ.ดร.วิสสนัย วรรณจรรย์ยา  
ผศ.ดร.อภิชาติ โสภางค์  
ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์วงศ์  
ดร.วสวัชร นาคเขียว

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**

รศ.คมสัน จิระภัทรศิลป์

รศ.ดร.สิทธิชัย แก้วเกื้อกุล

ผศ.ดร. เจริญชัย โขมพัตราภรณ์

ผศ.พจมาน เตียวัฒน์รัฐติกาล

ดร.วิศิษฐ์ศรี วิยะรัตน์

อ.ปรัชญา เพ็ญสุระ

รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์

รศ.สันติรัฐ นันสะอาจ

ผศ.ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์

ดร.ช่อแก้ว จตุรานนท์

ดร.อิศรทัต พึ่งอัน

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**

รศ.วันชัย แผลมหลักสกุล

ดร.กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

ผศ.ดร. สกนธ์ คล่องบุญจิต

ดร. อุดม จันทร์จรัสสุข

ดร.ชุมพล ยวงโย

รศ.ดร. ฤดี มาสุจินท์

ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล

ดร.พิชญ์วดี กิตติปัญญางาม

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ**

ผศ.พิชัย จันทรมณี

ผศ.วิชาญ ช่วยพันธ์

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล**

ผศ.ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา**

ดร.นเรศ อินตะวงศ์

ดร.ภาคภูมิ จารุภูมิ

ดร.บรรเจิด แสงจันทร์

ผศ.มนวิภา อาวิพันธุ์

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย**

รศ.สุชาติ เย็นวิเศษ

ผศ.สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์

ผศ.เดช เหมือนขาว

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**

ผศ.ดร.พรศิริ จงกล

ดร.ปภากร สุนานนท์

อ.นรา สมัตถภาพงศ์

ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย

ดร.ปวีร์ ศิริรักษ์

**มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์**

รศ.ดร.จิรรัตน์ อีระวราพฤกษ์

ผศ.ดร.วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร

ผศ.ดร.สวัสดี ภาวระราช

รศ.ดร.จิรศิริพงษ์ เจริญภัณฑารักษ์

ผศ.ดร.วรารัตน์ กังสัมฤทธิ์

ผศ.ดร.เสมอจิตร หอมรสสุนทร

**มหาวิทยาลัยนเรศวร**

ผศ.ดร.ภูพงษ์ พงษ์เจริญ

ดร.ขวัญนิธิ คำเมือง

ดร.ภาณุ บูรณจารุกร

อ.ศรีสัจจา วิทยศักดิ์

ผศ.ศิษญา สิมารักษ์

ดร.สมลักษณ์ วรรณฤมล

อ.ธณิกานต์ ธงชัย

**มหาวิทยาลัยปทุมธานี**

ดร. ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเร็จ

**มหาวิทยาลัยมหาสารคาม**

ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป

ผศ.ดร.บพิธ บุผไชติ

ดร.นิดา ชัยมูล

ผศ.ดร.สุดสาคร อินธิเดช

ดร.อรอุมา ลาสุนนท์

**มหาวิทยาลัยมหิดล**

รศ.ดร.ดวงพรรณ ศฤงคารินทร์

ดร.จิรพรรณ เลี้ยงโรคาพาธ

ผศ.ดร.วเรศรา วีระวัฒน์

ผศ.ศุภชัย นาทะพันธ์

**มหาวิทยาลัยรังสิต**

ผศ.ดร.ธนาวรรณ อัครไพบูลย์

ผศ.สินี สุขกรมใส

อ.ศิลปชัย วัฒนเสย

อ.พรศพงษ์ แก่นณรงค์

ผศ.ดร.เพียงจันทร์ จริงจิตร

ดร.พิชญ มนต์ปิติ

อ.ต่อศักดิ์ อุทัยไขฟ้า

อ.สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา

**มหาวิทยาลัยรามคำแหง**

ผศ.ดร. กฤษดา พิศลยบุตร

อ.นุกูล อุบลบาน

ดร.เลิศเลขา ธนะชัยพันธ์

อ.นันทวรรณ อ้าเอี่ยม

**มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**

รศ.ธนรัตน์ แต้ววัฒนา

ผศ.ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์

ดร.สิริเดช ชาตินิยม

ผศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล

ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ

ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ

**มหาวิทยาลัยศรีปทุม**

ผศ.พัฒน์พงศ์ อริยสิทธิ์

อ.จักรพันธ์ กัณหา

อ.ธนน ศรีวระมย์

อ.วรพจน์ พันธุ์คง

ดร.ธรีณี มณีศรี

อ.ชวลิต มณีศรี

อ.พิสุทธิ์ รัตนแสนวงษ์

อ.สุพัฒตรา เกษราพงศ์

**มหาวิทยาลัยศิลปากร**

ผศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร

ผศ.ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ

ผศ.สุขุม ไชยิตชัยมงคล

ดร.กัญจนา ทองสนิท

ดร.สิทธิชัย แซ่แหล่ม

ผศ.จันทร์เพ็ญ อนุรัตน์านนท์

ผศ.วันชัย สีสากวิวงศ์

ผศ.สุวัฒน์ เณรโต

ดร.ณัฐพล ศิริสว่าง

**มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

รศ.ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล

รศ.สมชาย ชูโณม

ผศ.ดร.เจษฎา วรณสินธุ์

ผศ.ดร.นภิสพร มีมงคล

ผศ.ดร.รัฐชนา สีนธวาลัย

ผศ.ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์

ผศ.เจริญ เจตวิจิตร

ผศ.ยอดดวง พันธุ์รา

รศ.วนิดา รัตนมณี

ผศ.ดร.กลางเดือน โพชนา

ผศ.ดร.ธเนศ รัตนวิไล

ผศ.ดร.ประภาส เมืองจันทร์บุรี

ผศ.ดร.สุภาพรณ ไชยประพัทธ์

ผศ.ดร.อรุณ สังข์พงศ์

ผศ.พิเชฐ ตระการชัยศิริ

ผศ.สงวน ตั้งโพธิธรรม

**มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย**

อ.จิตลดา ชิมเจริญ

อ.วรลักษณ์ เสถียรรังษฤษฏี

อ.อรอุมา กอสนาน

อ.นิตากร สมสุข

อ.อัญชลี สุพิทักษ์

**มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**

ผศ.ดร.คณิศร ภูนิคม

ผศ.ดร.นุชสรา เกรียงกรกฎ

ผศ.ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส

ผศ.ดร.สุขอังคณา ลี

ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์

ผศ.ดร.นลิน เพียรทอง

ผศ.ดร.ปรีชา เกรียงกรกฎ

ผศ.ดร.สมบัติ สินธุชาวน์

ดร.ธารชуда พันธุ์นิกุล

ดร.สัณณ์ โอฬาพิริยะกุล

**สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น**

ดร.กรกฎ เหมสถาปัตย์

ดร.ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน

## สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

ผศ.ชัยพฤกษ์ อภาเวท

อ.เจษฎา วงศ์อ่อน

ผศ.ประยูร สุรินทร์

## มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รศ.ดร.ชัยยุทธ ช่างสาร

ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ผศ.ดร.ณฐา คุปต์ชัยเสียร

ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง

ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสอาด

ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ

ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ

ดร.สรพงษ์ ภาสุปรีย์

ผศ.สุรัตน์ ตรียวนพงศ์

รศ.มานพ ต้นตระกูลบัณฑิตย์

ผศ.ดร.จตุรงค์ ลังกาพินธุ์

ผศ.ดร.วารุณี อริยวิริยะนันท์

ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล

ผศ.ชวลิต แสงสวัสดิ์

ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง

ดร.ระพี กาญจนะ

ดร.สุมนมาลย์ เนียมกลาง



## สารบัญ (ต่อ)

MPM89	Paintability of Injection Molded CaCO <sub>3</sub> filled Recycled PET/Recycled PP Blend Supaphorn Thumsorn Kazushi Yamada Hiroyuki Inoya Yew Wei Leong <sup>4</sup> Hiroyuki Hamada	213
MPM90	พฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีของผิวเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็ก AISI 1020 สุพร ฤทธิภักดี	214
MPM91	การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมซ่อมตัวเรือนคอมเพลสเซอร์ เครื่องปรับอากาศ ต่อศักดิ์ อุทัยไขฟ้า สมพร พรหมดวง	215
MPM92	การศึกษาการใช้ตัวอย่างพาราในการหล่อเย็นมิติตัด ศุภเอก ประมูลมาก พันธุ์พงษ์ คงพันธุ์	216
MPM93	การสังเคราะห์สารยับยั้งการกัดกร่อนโพแทสเซียม โนนานีโอตเพื่อการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน นครินทร์ ศรีสุวรรณ ตรีนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ	217
MPM94	อิทธิพลของรัศมีบาดายในการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก ไพศาล เอี่ยมมิ ธวัชชัย แก้วสีเส บัญชา วงศ์ศรีทา บุญเรือง เย็นศิริ <sup>4</sup> ชวลา วรรณสิทธิ์ กุลชาติ จุลเพ็ญ	218
MPM95	การสังเคราะห์สารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดแคโทดิกเพื่อการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน นครินทร์ ศรีสุวรรณ ณัฐพงศ์ เกียรติเสรีกุล ทศพล คงกระพันธ์	219
MPM96	การเปรียบเทียบการกัดกร่อนของรอยต่อเกลระหว่างอลูมิเนียมผสม AA 1100 และเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 ในน้ำทะเล สุรัตน์ ตริยวนพงศ์ ศักดิ์ชัย จันทศรี สมชาย วนไทยสงค์ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์	220
MPM97	อิทธิพลของพารามิเตอร์การพ่นต่อโครงสร้างผิวเคลือบโพลีเอทิลีนบนนิเกิลอะลูมิเนียมต่อเหล็กกล้าไร้สนิม สุนทร มุลทา มนัส ศรีสวัสดิ์	221



อิทธิพลของรัศมีบ่าตายในการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก  
Influences of Die Radius on Rectangular Cup Deep Drawing

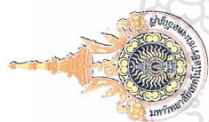
ไพศาล เอี่ยมมี<sup>1\*</sup> ธวัชชัย แก้วสีใส<sup>2</sup> บัญชา วงศ์ศรีทา<sup>3</sup> บุญเรือง เย็นศิริ<sup>4</sup> ชวลา วรรณสิทธิ์<sup>5</sup>  
กุลชาติ จุลเพ็ญ<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12110  
E-mail: paisarnaemmi@yahoo.com\*

**บทคัดย่อ**

บทความนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของรัศมีบ่าตายขนาด 6,8,10 และ 12 มม. ในการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก ขนาดถ้วยกว้าง 60 มม. ยาว 60 มม. ลึก 30 มม. ความกว้างปีกด้านละ 4 มม. เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของรัศมีบ่าตายที่มีผลต่อแรงสูงสุดในการลากขึ้นรูป คุณภาพของถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกหลังการลากขึ้นรูป รวมถึงรัศมีบ่าตายที่เหมาะสมต่อการลากขึ้นรูป โดยในการทดลองนี้จะใช้ เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SAPH440 (JIS) ขนาดแผ่นเปล่า 120 x 120 มม.หนา 1.4 มม. ลากขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก และเปรียบเทียบผลการทดลอง จากการทดลองพบว่าเหล็กทั้งสองชนิด จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปลดลงเมื่อใช้รัศมีบ่าตายขนาดใหญ่ขึ้น และทุกรัศมีบ่าตายที่ทดลองสามารถลากขึ้นรูปชิ้นงานได้สมบูรณ์ ชิ้นงานไหลตัวได้ดี ไม่เกิดรอยยับกับวัสดุทั้งสองชนิดเมื่อใช้แรงกดแผ่นดัดชิ้นงานเท่ากับ 37.17 kN. สำหรับเหล็ก SPCC และ 55.74 kN. สำหรับเหล็ก SAPH440 ตามลำดับ ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงของความหนา เหล็ก SAPH440 บริเวณมุมก้นกล่องจะมีความบางกว่าเหล็ก SPCC เนื่องจาก เหล็ก SAPH440 มีความสามารถในการยืดตัวที่น้อยกว่า ในส่วนลักษณะผิวของชิ้นงาน เหล็ก SAPH440 เกิดการยึดติดกับผิวแม่พิมพ์ได้ง่ายทำให้เกิดรอยเสียดสีบนชิ้นงานที่เห็นได้ชัดเจนกว่าเหล็ก SPCC

**คำหลัก** รัศมีตาย ถ้วยสี่เหลี่ยม ลากขึ้นรูป



ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ขอขอบเกียรติบัตรนี้เพื่อแสดงว่า

**ไพศาล เอี่ยมมี**

ได้เข้าร่วมนำเสนอบทความเรื่อง

อิทธิพลของรัศมีป่าดงในกาการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก

การประชุมวิชาการช่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554 (IE Network Conference 2011)

20-21 ตุลาคม 2554 ณ โรงแรมแอมบาสเตอร์ซิตี จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี

(นายจنگกล สุภารัตน์)

ประธานคณะกรรมการดำเนินการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมหมาย พิวสอาด)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

**IEE NETWORK CONFERENCE 2011**

**รวมภาคีเครือข่าย**  
**การประชุมวิชาการถ่ายภาพงาน**  
**วิศวกรรมอุตสาหกรรม**  
 ประจำปี 2554  
 IEE NETWORK CONFERENCE 2011

20 - 21 ตุลาคม 2554  
 โรงแรมแอมบาสเตอร์ฮิลล์ จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
 โทรศัพท์. 02-549-3440  
 โทรสาร. 02-549-3442

<http://www.en.rmutt.ac.th/iee/>

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายไพศาล เอี่ยมมิ
วัน เดือน ปีเกิด	5 ธันวาคม 2519
ที่อยู่	29/1 หมู่ 12 ตำบลระแหง อำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี 12140
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์ ปี พ.ศ. 2542
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2544 – 2551	ครูพิเศษ แผนกวิชาเครื่องมือกล สาขางานเครื่องมือกลและซ่อม บำรุงวิทยาลัยเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมการต่อเรือ พระนครศรีอยุธยา
พ.ศ. 2552 – ปัจจุบัน	ครูประจำ แผนกวิชาเครื่องมือกล สาขางานเครื่องมือกลและซ่อม บำรุง วิทยาลัยเทคนิคอ่างทอง

