

การศึกษาอิทธิพลความหยาบผิวของครอว์ปิดที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปโลหะ
แผ่นรูปทรงไม่สมมาตรโดยการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

A STUDY OF THE INFLUENCE OF SURFACE ROUGHNESS OF
DRAWBEAD ON NON-SYMMETRY DEEP DRAWING SHEET
METAL PROCESS BY USING FINITE ELEMENT SIMULATION

นายกฤติธรณ์ นามสง่า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาอิทธิพลความหนาแน่นของครอว์ปิดที่มีผลต่อการตกชั้นรูปโลหะ
แผ่นรูปทรงไม่สมมาตรโดยการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

นายกฤติธรณ์ นามสง่า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**A STUDY OF THE INFLUENCE OF SURFACE ROUGHNESS OF
DRAWBEAD ON NON-SYMMETRY DEEP DRAWING SHEET
METAL PROCESS BY USING FINITE ELEMENT SIMULATION**



KITTITORN NAMSANGA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN MANUFACTURING ENGINEERING DEPARTMENT OF INDUSTRIAL
ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI
ACADEMIC YEAR 2016

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาอิทธิพลความหยาบผิวของครอว์บีคที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปโลหะ
แผ่นรูปทรงไม่สมมาตร โดยการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

A Study of the Influence of Surface Roughness of Drawbead on Non-symmetry
Deep Drawing Sheet Metal Process by Using Finite Element Simulation

ชื่อ - นามสกุล

นายกฤติธรณ์ นามสง่า

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.Eng.

ปีการศึกษา

2559

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(อาจารย์กฤตชาติ จุลเพ็ญ, D.Eng.)

กรรมการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเริง, D.Eng.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.Eng.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 22 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลความหนาผิวของครอว์บีดที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นรูปทรงไม่สมมาตร โดยการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์
ชื่อ - นามสกุล	นายกฤติธรณ์ นามสง่า
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.Ing.
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

เป็นที่ทราบกันดีว่ากระบวนการลากขึ้นรูป มีปัจจัยหลายอย่างด้วยกันที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานเช่น สารหล่อลื่น แรงเสียดทาน สมบัติทางกลของวัสดุ เป็นต้น ล้วนแล้วแต่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องบนชิ้นงานได้ โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอและความสมบูรณ์ของการลากขึ้นรูปต้องควบคุมการไหลตัวของวัสดุชิ้นงาน การใช้ครอว์บีดเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ถูกนำมาใช้ในการควบคุมการไหลของชิ้นงานอย่างไรก็ดีการต้านทานการไหลตัวของชิ้นงานไม่ได้เกิดจากรูปทรงของครอว์บีดเพียงอย่างเดียว แต่ยังเกิดจากแรงเสียดทานจากพื้นผิวของครอว์บีดด้วยเช่นกัน โดยครอว์บีดที่มีพื้นผิวต่างกันส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานที่แตกต่างกัน

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการไหลตัวของโลหะแผ่นในกระบวนการลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร โดยการใช้ครอว์บีดที่มีความหนาผิวแตกต่างกัน และทำการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษานี้ใช้ครอว์บีดที่มีรูปร่างครึ่งวงกลม โดยกำหนดความหนาผิว 3 ระดับ คือ 0.152 Ra, 0.963 Ra และ 6.127 Ra วัสดุที่ใช้ในการศึกษาเป็นเหล็กเกรดเย็นเกรดเกรด JIS : SPCC, SPCD และ SPCEทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ของแรงที่ได้จากการคำนวณ

ผลการทดลองพบว่าความหนาผิวของครอว์บีดมีผลต่อการไหลตัวของชิ้นงาน ครอว์บีดที่มีความหนาผิวมากส่งผลให้ชิ้นงานมีโอกาสเกิดการฉีกขาด และ เกิดรอยย่นได้มาก ขณะที่ครอว์บีดที่มีความหนาผิวน้อย เกิดรอยย่นน้อยที่สุด และไม่เกิดการฉีกขาด การจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการทดลองจริง แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่น ที่มีแนวโน้มของผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน ซึ่งการประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายและหาแนวทางแก้ไขการไหลตัวของชิ้นงานในการลากขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ครอว์บีดการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ กระบวนการลากขึ้นรูป

Thesis Title	A Study of the Influence of Surface Roughness of Drawbead on Non-symmetry Deep Drawing Sheet Metal Process by Using Finite Element Simulation
Name – Surname	Mr. Kittitorn Namsanga
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Sirichai Torsakul, D.Ing.
Academic Year	2016

ABSTRACT

It is known that there are many criteria that contribute to the quality of workpiece during deep drawing process such as lubricant, friction, and mechanical property of workpiece. All these are the factors leading to imperfection on workpiece, especially the one that is asymmetrical. In order to make the workpiece perfect, the flow of sheet metal needs to be controlled. Using drawbead is another way to control the flow of sheet metal. However, resistance to the flow does not happen only because of drawbead's shape, but also friction from drawbead's surface. Different drawbeads' surfaces result in different friction.

This research aimed to study the flow of sheet metal in asymmetrical shape deep drawing process. The study used drawbeads with different surface roughness in the experiment and then finite element simulation. The shapes of drawbeads were semicircle with three level of surface roughness -- 0.152 Ra, 0.963 Ra, and 6.127 Ra. The materials used in this study were cold rolled steel with the grade of JIS: SPCC, SPCD, and SPCE. The experiment used blank holder force at 50 percent of force from calculation.

The result showed that surface roughness of drawbeads affected the flow of sheet metal. Drawbeads surface with high roughness resulted in crack and wrinkle on workpiece, while those with low surface roughness resulted in no crack and less wrinkle. The Finite Element Simulation and experiment shows a coherent result in the behavior of sheet metal forming. The adaptation of Finite Element can effectively predict and provide ways to fix the flow of deep drawing process.

Keywords: drawbead, finite element-simulation, sheet metal forming

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่อ
อุตสาหกรรม (พวอ) : ระดับปริญญาโท ประจำปี 2558 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว)
ขอขอบคุณ หจก.นิเวศกาย ทรัพย์ลยส์ แอนด์ เซอร์วิส จำกัด และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการ
ดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.กฤษชาติ จุลเพ็ญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยะ ประณีตพลกรัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเร้ง กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ และผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไข
ข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่าง
สูงไว้ ณ โอกาสนี้

ท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อาจารย์ทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุน และ
แนะนำแนวทางการศึกษา และทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

นายกฤติธรณ์ นามสง่า

สารบัญ

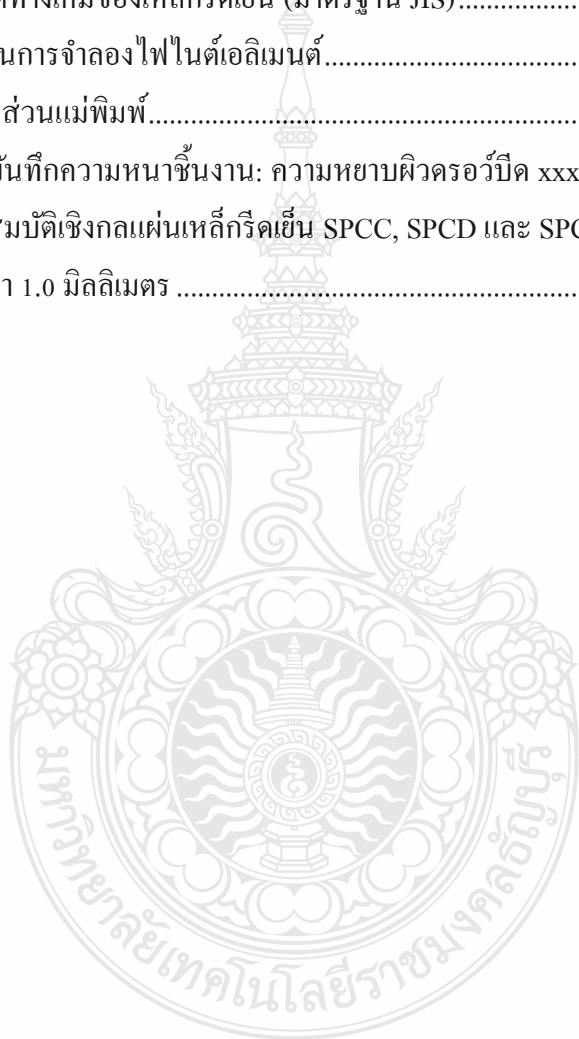
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การดึงขึ้นรูปหรือการครอว์.....	5
2.2 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป.....	5
2.3 การลากขึ้นรูปปลึกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร.....	9
2.4 ครอว์บีด (Draw bead).....	15
2.5 ชนิดของเหล็กแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูป.....	22
2.6 ความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness average: Ra).....	23
2.7 ความเสียดทาน (Friction).....	24
2.8 การทดสอบทางไทรบอโลยี.....	25
2.9 ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	27
2.10 การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกบของโลหะ.....	35
2.11 ทบทวนวรรณกรรม.....	43
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	48
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การทดลอง	49
3.3 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	54
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์	61
4.1 อิทธิพลของความหยาบผิวที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป	61
4.2 อิทธิพลของความหยาบผิวที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนา	68
4.3 การวิเคราะห์ทางกายภาพและแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป	76
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	78
5.1 สรุป	78
5.2 ข้อเสนอแนะ	79
บรรณานุกรม	82
ภาคผนวก	86
ภาคผนวก ก การคำนวณแรง	87
ภาคผนวก ข การวัดความหนาชิ้นงาน	95
ภาคผนวก ค แบบดรอว์บีด	100
ภาคผนวก ง ผลการเปรียบเทียบทางกายภาพ และแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป	104
ภาคผนวก จ ผลการสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	110
ภาคผนวก ฉ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	114
ประวัติผู้เขียน	129

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด.....	9
ตารางที่ 2.2 ขนาดของครอว์บีดและตำแหน่งของระยะห่างในการยึดติด.....	22
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางเคมีของเหล็กกรีดยื่น (มาตรฐาน JIS).....	23
ตารางที่ 2.4 เงื่อนไขในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	46
ตารางที่ 3.1 ตารางขึ้นส่วนแม่พิมพ์.....	50
ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างบันทึกความหนาชิ้นงาน: ความหยาบผิวครอว์บีด xxxx Ra.....	54
ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างสมบัติเชิงกลแผ่นเหล็กกรีดยื่น SPCC, SPCD และ SPCE ความหนา 1.0 มิลลิเมตร	57



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะการเกิด stress σ และ strain ϵ ในการขึ้นรูป.....	5
รูปที่ 2.2 ค่าแรงกดตันของแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ต้องการในการดึงขึ้นรูปครั้งแรก.....	7
รูปที่ 2.3 อัตราส่วนการขึ้นรูป.....	8
รูปที่ 2.4 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบไม่สมมาตร.....	9
รูปที่ 2.5 ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร.....	10
รูปที่ 2.6 สิ่งบกพร่องที่เกิดกับชิ้นงานดึงขึ้นรูป.....	14
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการค้ำของดรอว์บีด.....	16
รูปที่ 2.8 ลักษณะของดรอว์บีดในแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูป.....	18
รูปที่ 2.9 ดรอว์บีดแบบหน้าตัดกลม (Round Drawbead).....	18
รูปที่ 2.10 ดรอว์บีดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Half-Round Drawbead).....	19
รูปที่ 2.11 ดรอว์บีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Drawbead).....	19
รูปที่ 2.12 ดรอว์บีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapeziform Drawbead).....	19
รูปที่ 2.13 ดรอว์บีดแบบหน้าตัดรูปตัววี (V-Shaped Drawbead).....	20
รูปที่ 2.14 ร่องบีดแบบหน้าตัดตามรูปร่างของดรอว์บีด.....	20
รูปที่ 2.15 ร่องบีดหน้าตัดครึ่งวงกลม.....	20
รูปที่ 2.16 ร่องบีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	21
รูปที่ 2.17 ร่องบีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู.....	21
รูปที่ 2.18 ร่องบีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม.....	21
รูปที่ 2.19 ตำแหน่งและระยะของดรอว์บีด.....	22
รูปที่ 2.20 การวัดความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness average: Ra).....	23
รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์แบบการไถลและการกลิ้ง.....	24
รูปที่ 2.22 หลักการทำงานของไทรบอมิเตอร์ ตามมาตรฐาน ASTM G99.....	26
รูปที่ 2.23 ขั้นตอนทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีในการขึ้นรูปเหล็กเกรดSPFC 980Y..	27
รูปที่ 2.24 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์....	28
รูปที่ 2.25 โหนดในเอลิเมนต์แต่ละมิติ.....	29
รูปที่ 2.26 ชนิดของเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1 ถึง 3 มิติ.....	30

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.27 ชนิดของเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1 ถึง 3 มิติ.....	30
รูปที่ 2.28 การใช้เอลิเมนต์ 2 มิติ ในงานที่มีลักษณะเป็นผืนง.....	31
รูปที่ 2.29 การใช้งานเอลิเมนต์ 3 มิติ ในงานที่เป็นปริมาตรตันที่มีความหนา.....	31
รูปที่ 2.30 ตัวอย่างโครงสร้างเอลิเมนต์ดั้งเดิม	32
รูปที่ 2.31 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ กัน.....	33
รูปที่ 2.32 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่ จุดต่อ	34
รูปที่ 2.33 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ.....	36
รูปที่ 2.34 แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ	38
รูปที่ 2.35 ขั้นตอนสอบตามทศทางการรีด	41
รูปที่ 2.36 แสดงรูปร่างเรขาคณิตและโหลดในการจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	46
รูปที่ 2.37 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ตามเงื่อนไขความหยาบผิวของเครื่องมือ..	36
รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินการวิจัย.....	48
รูปที่ 3.2 เครื่องปั๊มโลหะขนาด 80 ตัน	49
รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร	50
รูปที่ 3.4 เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC automatic machine)	51
รูปที่ 3.5 ดรอปบีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra (ก), 0.963 Ra (ข), 0.152 Ra (ค).....	51
รูปที่ 3.6 อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน และอุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ	52
รูปที่ 3.7 แผ่นตัดเปล่าคำนวณโดยการประมาณค่า.....	52
รูปที่ 3.8 บริเวณจุดที่ตรวจวัดความเครียดบนชิ้นงาน	53
รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความหนาชิ้นงาน Point Micrometer	53
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างลักษณะขั้นตอนทดสอบหาสมบัติเชิงกล.....	55
รูปที่ 3.11 ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอะซิโตน	55
รูปที่ 3.12 ตัวอย่างแผนภาพความเค้น-ความเครียดวิศวกรรมและ ความเค้น-ความเครียดจริง ของเหล็กเกรดเย็น หนา 1 มิลลิเมตร.....	56
รูปที่ 3.13 ตัวอย่างหาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรงและเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดใช้แบบสมการกำลัง (Power Function)	57

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.14 การเตรียมพื้นผิวชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงเสียดทาน	58
รูปที่ 3.15 แผ่นชิ้นงานทดสอบความหยาบผิว 0.152 Ra, 0.963 Ra, 6.127 Ra ตามลำดับ (ก), และบอลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร (ข)	58
รูปที่ 3.16 เครื่องไตรบอมิเตอร์	58
รูปที่ 3.17 ตัวอย่างการสร้างชิ้นส่วนเครื่องมือและชิ้นงาน	59
รูปที่ 4.1 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCC โดยใช้ครอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra	61
รูปที่ 4.2 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCC โดยใช้ครอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.963 Ra	62
รูปที่ 4.3 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCC โดยใช้ครอว์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra	62
รูปที่ 4.4 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCD โดยใช้ครอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra	63
รูปที่ 4.5 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCD โดยใช้ครอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.963 Ra	63
รูปที่ 4.6 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCD โดยใช้ครอว์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra	64
รูปที่ 4.7 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCE โดยใช้ครอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra	65
รูปที่ 4.8 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCE โดยใช้ครอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.963 Ra	65
รูปที่ 4.9 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCE โดยใช้ครอว์บีดหน้าตัดครึ่งวงกลมที่มีความหยาบ ผิว 6.127 Ra	66
รูปที่ 4.10 บริเวณจุดที่ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความหนาบนชิ้นงาน	67
รูปที่ 4.11 ความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCC ที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ครอว์บีดที่มี ความหยาบผิว 0.152 Ra	68
รูปที่ 4.12 ความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCC ที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ครอว์บีดที่มี ความหยาบผิว 0.963 Ra	68
รูปที่ 4.13 ความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCC ที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ครอว์บีดที่มี ความหยาบผิว 6.127 Ra	69
รูปที่ 4.14 ความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCD ที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ครอว์บีดที่มี ความหยาบผิว 0.152 Ra	69
รูปที่ 4.15 ความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCD ที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ครอว์บีดที่มี ความหยาบผิว 0.963 Ra	70

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.16 ความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCD ที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra.....	71
รูปที่ 4.17 ความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCE ที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra.....	71
รูปที่ 4.18 ความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCE ที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.963 Ra.....	72
รูปที่ 4.19 ความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCE ที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra.....	72
รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบแรงลากขึ้นรูปจากการทดลองและการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	73
รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCC จากการทดลองและการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	74
รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCD จากการทดลองและการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	74
รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCE จากการทดลองและการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	75
รูปที่ 4.24 ความเครียดแนวความหนาบนชิ้นงานที่ผ่านการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	76
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบรูปทรงของชิ้นงาน SPCD ระหว่างการทดลองลากขึ้นรูปกับการการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra.....	77
รูปที่ 4.26 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของชิ้นงานวัสดุ SPCC ที่ผ่านการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra (ก), 0.963 Ra (ข) และ 6.127 Ra (ค).....	77
รูปที่ 4.27 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของชิ้นงานวัสดุ SPCD ที่ผ่านการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra (ก), 0.963 Ra (ข) และ 6.127 Ra (ค).....	78
รูปที่ 4.28 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของชิ้นงานวัสดุ SPCE ที่ผ่านการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra (ก), 0.963 Ra (ข) และ 6.127 Ra (ค).....	78
รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบผลการจำลองแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของชิ้นงานวัสดุ SPCC ที่ใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra กับชิ้นงานที่ผ่านการทดลองจริง.....	79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันธุรกิจมีการแข่งขันทางการค้าสูงมากในประเทศไทยมีผู้ประกอบการอุตสาหกรรมหลายสาขาได้มีการปรับปรุงคุณภาพการผลิตสินค้าและขยายตัวไปอย่างรวดเร็วมีการแข่งขันทางธุรกิจอุตสาหกรรมเกิดขึ้นตลอดเวลาทั้งทางด้านการตลาด รูปแบบของผลิตภัณฑ์ เทคโนโลยีทางการออกแบบแม่พิมพ์ได้เข้ามามีบทบาทในการเพิ่มผลผลิตทางด้านอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอุตสาหกรรมด้านยานพาหนะ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ในครัวเรือน หรือ อุตสาหกรรมด้านอื่นๆ และแม่พิมพ์ขึ้นรูป

ขึ้นส่วนมีความจำเป็นอย่างมาก ต่อการผลิตขึ้นรูป เพื่อเพิ่มปริมาณและคุณภาพของผลผลิตให้สูงขึ้น กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ใช้กันอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรม มีกระบวนการหรือวิธีการในการขึ้นรูปหลายวิธีด้วยกัน การลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ แต่ยังคงมีขีดจำกัดอยู่มากในการลากขึ้นรูปลึก ไม่ว่าจะเป็นความเร็วในการขึ้นรูป คุณสมบัติด้านแอนไอโซทรอปี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความเสียดทานและแรงกดขึ้นงาน โดยเฉพาะขึ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรเนื่องจากมีอัตราการไหลตัวของวัสดุที่ไม่เท่ากัน เพื่อให้การไหลตัวของวัสดุดีขึ้น จากขีดจำกัดดังกล่าวอาจทำให้เกิดข้อบกพร่องบนชิ้นงานได้ เช่น รอยย่น (Wrinkling) ของชิ้นงาน การเกิดรอยย่นมีผลมาจากโลหะแผ่นไหลไม่สม่ำเสมอหรือ การเกิดการฉีกขาด (Tearing) ซึ่งเกิดมาจากโลหะไหลเข้าช่องเปิดคายน้เข้าเกินไป ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาดรอว์บีด (Draw bead) มาใช้เพื่อควบคุมการไหลของโลหะแผ่นที่จะไหลเข้าสู่คายน้ [1]

ดรอว์บีด มีหน้าที่สำหรับควบคุมการไหลตัวของชิ้นงานเข้าสู่แม่พิมพ์ เพื่อป้องกันมิให้เกิดรอยย่นหรือให้เกิดรอยย่นน้อยที่สุด โดยดรอว์บีดจะถูกติดตั้งอยู่ที่แผ่นกดขึ้นงาน ขณะที่มีการขึ้นรูปลึกวัสดุจะไหลผ่านดรอว์บีด ภายในดรอว์บีดวัสดุจะเกิดการคดให้ไหลไปในทิศทางหนึ่งและถูกคดกลับมาในทิศทางตรงกันข้ามก่อนที่จะไหลคดกลับไปยังทิศทางเดิมจึงทำให้มีการชะลอการไหลของวัสดุไม่ให้ไหลเร็วเกินไป [2,3] อันเป็นสาเหตุของการเกิดรอยย่น ก่อนไหลเข้าสู่คายน้

ได้มีการวิจัยมากมายที่ทำการศึกษาอิทธิพลของดรอว์บีด T. Meiders [4] ได้ศึกษาการจำลองการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอว์บีดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) โดยกำหนดแรงในการควบคุมการไหลตัวของแผ่นโลหะ (Drawbead Restraining Force) การเปลี่ยนแปลงความหนาแบบพลาสติก , และแรงยกดรอว์บีด (Drawbead Lift Force) พบว่าการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือที่

สำคัญในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความหนาแบบพลาสติกได้ M.Samuel [5] ได้ศึกษารูปทรงของครอว์บีคในการลากขึ้นรูป ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อเปรียบเทียบรูปทรงของครอว์บีคระหว่างร่องบีคที่เป็นแบบครึ่งวงกลมกับร่องบีคที่เป็นแบบสี่เหลี่ยมและวิเคราะห์ความแตกต่างของการไหลตัวของวัสดุในการใช้ร่องบีคทั้งสองชนิด

แรงเสียดทานถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการกระบวนการลากขึ้นรูปลึก [6] การไหลตัวของแผ่น โลหะเพื่อเข้าสู่คาน์ต้องผ่านการสัมผัสกับพื้นผิวของแผ่นกดขึ้นงาน คาน์ และครอว์บีค ความหยาบผิวแต่ละพื้นผิวส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานที่แตกต่างกัน [7-10] หากความหยาบผิวมีค่ามาก แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นย่อมมีค่ามากเช่นกัน การควบคุมการไหลตัวของแผ่นโลหะไม่เพียงแต่จะใช้วิธีการ กำหนดแรงในการกด การใช้ครอว์บีค การใช้สารหล่อลื่น แต่ยังมีการกำหนดพื้นผิวให้เหมาะสมอีกด้วย Wen-yu MA และคณะ [6] ได้ศึกษาอิทธิพลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในการลากขึ้นรูปลึกวัสดุอลูมิเนียมอัลลอย เกรด AA6111 ที่สภาวะอุณหภูมิสูง โดยใช้การจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับการทดลองขึ้นรูป พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีผลต่อการลากขึ้นรูปอย่างมีนัยสำคัญ R. Padmanabhan และคณะ [11] ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการกระบวนการลากขึ้นรูป พบว่าร้อยละของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีผลต่อความหนาเฉลี่ยของขึ้นงาน มากกว่าแรงกดจากแผ่นกดขึ้นงาน

การจำลองการลากขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นอีกวิธีที่ใช้ในการศึกษากระบวนการลากขึ้นรูป เพื่อช่วยในการแก้ไขข้อบกพร่องบนชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ลดเวลาในการออกแบบแม่พิมพ์ แต่อย่างไรก็ตามถ้าต้องการผลวิเคราะห์ที่มีความละเอียดแม่นยำมากขึ้นจะต้องใช้จำนวนการแบ่งชิ้นงาน (Element) เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะตรงบริเวณรัศมีครอว์บีค ทำให้ต้องใช้เวลามากและเครื่องคอมพิวเตอร์ต้องมีประสิทธิภาพสูงยังมีจำนวนชิ้นงานที่มีความละเอียดมากเท่าใด ย่อมหมายถึงว่าต้องใช้เวลาและประสิทธิภาพของเครื่องมากเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ในการวิจัยจึงต้องกำหนดรูปร่างครอว์บีคให้มีความเหมาะสมและมีการควบคุมแรงในการกดขึ้นงานให้คงที่ ซึ่งจะมีเฉพาะการเปลี่ยนแปลงการกระจายความเครียด (Strain) และความหนาของชิ้นงานที่เปลี่ยนไป

จากความสำคัญและข้อมูลต่างๆ ที่ได้กล่าวถึง ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลความหยาบผิวของครอว์บีคที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปทรงไม่สมมาตร โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาปัญหาที่เกิดจากการไหลตัวของชิ้นงาน ที่เป็นผลให้เกิดรอยขุ่น ความเครียดตกค้าง เกิดการฉีก และความเรียบผิวไม่เท่ากันทั้งชิ้นงาน ในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปทรงไม่สมมาตร โดยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ซึ่งสามารถช่วยลดเวลาในการทดลองแม่พิมพ์ ลดของเสียที่เป็นต้นทุนจากการทดลองแม่พิมพ์ เพื่อการผลิตจริงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของความหยาบผิวของครอว์บีดที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปทรงไม่สมมาตรโดยการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2.2 เพื่อศึกษาความเครียดของชิ้นงานที่ใช้ครอว์บีดที่มีระดับความหยาบผิวต่างกันในกระบวนการลากขึ้นรูป

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป

1.3.1.1 เหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC,SPCD และ SPCE

1.3.1.2 ความหนา 1.0 มิลลิเมตร

1.3.2 ครอว์บีดที่ใช้ในการขึ้นรูป

1.3.2.1 วัสดุ (JIS: SKD11)

1.3.2.2 ความหยาบผิวของครอว์บีด (Ra : 6.127, 0.963, 0.152 μm)

1.3.2.3 ครอว์บีดรูปทรงแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Half-Round Draw bead) รัศมี 4 มิลลิเมตร ที่ปลายทั้งสองข้างมน โค้งเป็นครึ่งวงกลมรัศมี 4 มิลลิเมตร เท่ากับรัศมีของครอว์บีด

1.3.3 กำหนดแรงกดชิ้นงาน(Blank holder force)ของการจำลองการขึ้นรูปด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และการขึ้นรูปจริง 50% (52 kN) ของแรงที่ได้จากการคำนวณ

1.3.4 จำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม DYNAFORM 5.6 และเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปจริง

1.3.5 ศึกษาแรงที่เกิดจากการขึ้นรูปที่ความหยาบผิวของครอว์บีดแต่ละระดับ

1.3.6 ศึกษาความเครียดแนวความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปที่ความหยาบผิวของครอว์บีดแต่ละระดับ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ทราบอิทธิพลความหยาบผิวของครอว์บีดที่มีผลต่อการลากขึ้นรูป

1.7.2 สามารถเลือกใช้ความหยาบผิวของครอว์บีดได้อย่างเหมาะสม

1.7.3 สามารถนำไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับกำหนดผิวของครอว์บีดเพื่อประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก

1.7.4 ได้ทราบข้อดีและข้อเสียของความหยาบผิวครอว์บีดที่ใช้ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การดึงขึ้นรูปหรือการดรอป

การดึงขึ้นรูปหรือการดรอป (drawing) เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปแผ่นโลหะวิธีหนึ่งโดยใช้ Punch กดแผ่นโลหะแบนให้ไหลเข้าไปในช่องเปิด Die เพื่อทำให้เกิดรูปทรงกรวยไม่มีตะเข็บเช่น ถ้วยกรวย ก่องหรือ รูปทรงต่างๆ ที่คล้ายคลึงกับที่กล่าวมา เป็นต้น

แผ่นโลหะที่นำมาดึงขึ้นรูปจะเกิดการตัดผ่านปลายของ Punch และในเวลาเดียวกัน โลหะที่อยู่ทางด้านนอกของแผ่น Blank จะเคลื่อนที่เข้าหาศูนย์กลางของแผ่น Blank เรื่อยๆจนกระทั่งโลหะไหลไปตามรัศมีต่างๆ ของ Die และแผ่น Blank จะเปลี่ยนรูปทรงไปจนเหมือนกับ รูปทรงของช่องเปิด Die ในขณะที่โลหะที่อยู่ด้านนอกเคลื่อนที่เข้าหาศูนย์กลาง แผ่น Blank ก็จะมีความหนาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อแผ่น Blank เคลื่อนที่ผ่านรัศมีของ Die แรงดึงที่เกิดขึ้นระหว่างปลาย Punch กับรัศมีของ Die จะทำให้ความหนาของ Blank ลดลง ในบางครั้งความหนาที่เปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับ เกลียวแรนซ์ หรือช่องว่างระหว่าง Punch กับคายด้วย

กรรมวิธีการดรอปแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

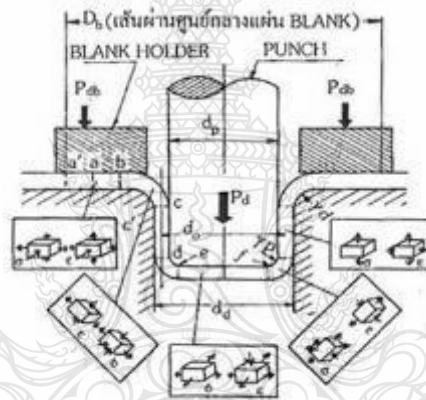
2.1.1 การดรอปปกติ หรือเรียกว่าการดรอป เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปแผ่นวัสดุให้เกิดรูปทรงโดยใช้ Punch และ Die และมี Blank holder กดแผ่นวัสดุไว้ในขณะทำการดรอป ความสูงของชิ้นงานที่จากการดรอปจะมีไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของชิ้นงาน

2.1.2 การตีปรดรอ เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปแผ่นวัสดุให้เกิดรูปทรง โดยใช้แรงดันแผ่น Blank หรืองานที่อยู่ภายใต้แรงกดด้วย Blank holder ผ่านเข้าไปข้างใน และผ่านออกจาก Die โดยใช้ Punch เพื่อทำให้เกิดเป็นรูปทรงกลวง โดยที่ความหนาของชิ้นงานที่ได้จากการตีปรดรอจะเท่ากับ ความหนาเดิมของวัสดุ ความสูงของชิ้นงานที่ได้จากการตีปรดรอ อย่างน้อยต้องมากกว่าครึ่งหนึ่งของ เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน

2.2 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป

การเลือกชนิดของโลหะที่เหมาะสมและใช้เครื่องจักรที่ทันสมัย ก็ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้แน่ใจว่าจะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพดีพอ ดังนั้นในแต่ละขั้นตอนของการทำงานจะต้องมีการวางแผนงานอย่างรอบคอบเพื่อที่จะผลิตสินค้าจำนวนมากให้ออกมามีคุณภาพเหมือนกันทุกชิ้น และลดการสูญเสียให้มีน้อยที่สุด

โลหะที่ถูกขึ้นรูปจะเกิดแรงเครียดขึ้น (stress) ขึ้นอย่างมาก ในระหว่างการไหลตัวของโลหะอยู่ 2 ประเภทคือ แรงดึง (tensile) และแรงกด (compressive) ซึ่งทำให้เกิดแรงเค้น (strain) 3 ประเภทคือ bending, stretching และ compressing ซึ่งปรากฏการณ์ทั้ง 3 อย่างนี้จะเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งหมดหรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับลักษณะของการขึ้นรูป ถ้าเป็นการขึ้นรูปลึก ๆ (deep draw) อาจเกิดแรงเค้นทั้ง 3 อย่างนี้ขึ้นพร้อมกันหรือถ้าเป็นการขึ้นรูปแบบตื้น ๆ (shallow draw) ก็อาจจะเกิดเฉพาะ bending เท่านั้น ก็ได้ในการขึ้นรูปลึก ๆ นั้นโลหะจะถูกขึ้นรูปหลายครั้งและถูกกระทำจนถึงขีดจำกัดของความยืดหยุ่น (limit of plasticity) เพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแต่ละขั้นตอนมากที่สุด ดังนั้นจึงต้องพยายามหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดความเครียดมากเกินไปเนื่องจากความเครียดที่เกิดจากการไหลตัวของโลหะจะเพิ่มมากขึ้นตามความลึกของการขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะการเกิด stress σ และ strain ϵ ในการขึ้นรูป [12]

2.2.1 แรงดึงขึ้นรูป

แรงที่ต้องใช้ในการขึ้นรูปจะแปรผันไปตามระยะชักของพื้นที่ สามารถจะกำหนดได้ 2 วิธี คือ การกำหนดสมการจากทฤษฎีการไหลตัวของโลหะ หรือใช้สมการที่ได้จากประสบการณ์จากการทดลอง ซึ่งในทางปฏิบัติส่วนใหญ่การออกแบบแม่พิมพ์จะต้องทราบค่าแรงสูงสุดในการดึงขึ้นรูปจากการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับแรงในการดึงขึ้นรูปที่แสดงถึงแรงสูงสุดนั้น จะขึ้นอยู่กับวัสดุของชิ้นงานและอัตราส่วนการขึ้นรูป ซึ่งจะได้ค่าของ $d_{F,max} \approx 0.07d_0$ การประมาณการหาแรงในการดึงขึ้นรูปสูงสุดที่ดีดังแสดงในสมการที่ 2.1 โดยแรงสูงสุดสามารถกำหนดจากประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูปของโลหะ ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง d_m ในสมการหมายถึงค่าเฉลี่ยระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางในถึง

เส้นผ่านศูนย์กลางนอกของชิ้นงาน $d_m = d_1 + s_0$ โดย η_{dfe} มีค่าอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.7 และประยุกต์ใช้กับการขึ้นรูปชิ้นงานรูปทรงไม่สมมาตรดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$F_d = \pi \times d_m \times s_0 \left[1.1 \frac{1.3 \times s_u}{\eta_{dfe}} \left[\ln \frac{d_0}{d_1} - 0.25 \right] \right] \quad (2.1)$$

$$F_d = \frac{s_y + s_u}{2} \times L_t \times s_0 \quad (2.2)$$

- เมื่อ
- F_d = แรงขึ้นรูป (kN)
 - D_m = ค่าเฉลี่ยระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางในถึงเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของชิ้นงาน (mm)
 - η_{dfe} = ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูปของโลหะ
 - d_0 = เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงาน (mm)
 - s_y = ความเค้นจุดคราก (N/mm^2)
 - s_0 = ความหนาของชิ้นงาน (mm)
 - s_u = ความเค้นสูงสุด (N/mm^2)

2.2.2 แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blankholder pressure)

ขอบปึกของชิ้นงานที่ดึงขึ้นรูปจะได้รับความเค้นแรงกด ซึ่งเกิดในลักษณะตั้งฉากกับแนวรัศมีเป็นสาเหตุของการเกิดรอยร่นเนื่องจากการโก่งตัวของวัสดุ รอยร่นนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้ขณะทำการดึงขึ้นรูป ถ้าพื้นที่สัมผัสของแผ่นจับยึดชิ้นงาน P_{BH} จะไปกดลงบนแผ่นขอบปึกชิ้นงานขณะทำการดึงขึ้นรูป ถ้าพื้นที่สัมผัสของแผ่นจับยึดชิ้นงาน คือ A_{BH} ดังนั้นการคำนวณค่าแรงกดที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงาน ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$F_{BH} = A_{BH} \times P_{BH} \quad (2.3)$$

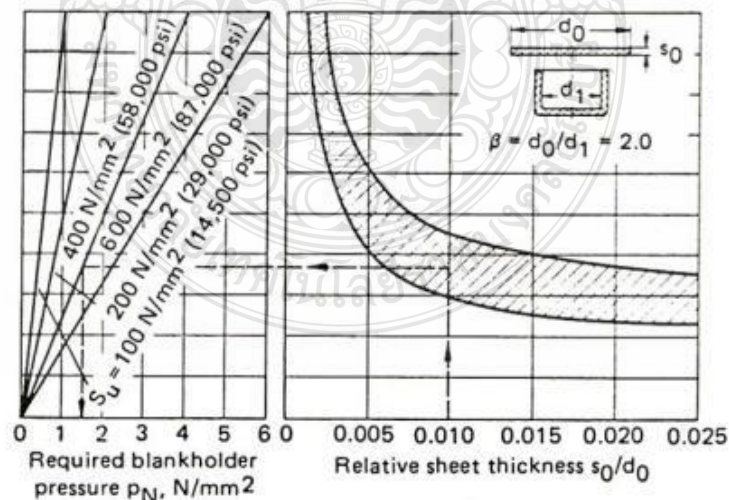
- เมื่อ
- F_{BH} = แรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน (N)
 - A_{BH} = พื้นที่สัมผัสของแผ่นจับยึดชิ้นงาน (N/mm^2)
 - P_{BH} = แรงกดดันที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงานต่ำที่สุด (mm^2)

แรงกดที่ใช้ในการหลีกเลี่ยงรอยย่นนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุของแผ่นชิ้นงาน โดยจะสัมพันธ์กับความหนาและอัตราส่วนการขึ้นรูปของวัสดุ แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงานสามารถประมาณค่าได้ โดย ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$P_{BH} = 10^{-3} \times C \times s_u \left[(\beta - 1) + \frac{0.005 \times d_0}{s_0} \right] \quad (2.4)$$

- เมื่อ
- P_{BH} = แรงกดดันที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงานต่ำที่สุด (N/mm²)
 - C = ค่าคงที่
 - S_u = ความเค้นสูงสุด (N/mm²)
 - β = อัตราส่วนการลดรูป
 - d_0 = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของแผ่นชิ้นงาน (mm)
 - S_0 = ความหนาของชิ้นงาน (mm)

ในที่นี้ตัวประกอบค่า C มีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 3 เป็นการคำนวณหาค่าแรงกดดังแสดงในสมการที่ 4 โดยใช้อัตราส่วนการขึ้นรูป $\beta = 2.0$ และใช้วัสดุที่มีค่า (Ultimate Tensile Strength) $S_u = 100, 200, 400$ และ 600 N/mm^2 ถูกพล็อตขึ้นมาเป็นกราฟโดยสัมพันธ์กันกับค่าความหนาของวัสดุ s_0 / d_0 ดังแสดงในรูปที่ 2.2



ความดันของตัวเหยียบ (P_{BH}) N/mm² ความหนาแผ่นสัมพันธ์ S_0/d_0

รูปที่ 2.2 ค่าแรงกดดันของแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ต้องการในการดึงขึ้นรูปครั้งแรก [13]

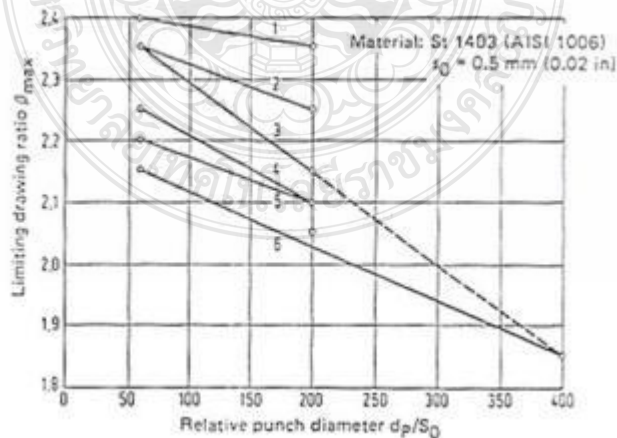
2.2.3 จีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูป

การกำหนดค่าจีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปที่เรียกว่า β_{max} คือค่าของการดึงขึ้นรูปที่เหมาะสมของวัสดุ และขึ้นกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแผ่นงาน d_0 และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของพื้นที่ d_1 ดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$\beta_{max} = \left[\frac{d_0}{d_1} \right]_{max} \quad (2.5)$$

เมื่อ β_{max} = จีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปที่เหมาะสมของวัสดุ
 d_0 = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแผ่นขึ้นงาน (mm)
 d_1 = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของพื้นที่ (mm)

ค่านี้เป็นค่าที่มีผลกระทบตามค่าตัวแปรหลายตัว สิ่งหนึ่งที่เป็นค่าตัวแปรที่สำคัญที่สุด คือ อัตราส่วนความหนาของเส้นผ่าศูนย์กลางแผ่นงานที่มีความสัมพันธ์กับเส้นผ่าศูนย์กลางพื้นที่ d_p / s_0 โดยปกติค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด β_{max} จะสูงขึ้นถ้าค่าความสัมพันธ์ของเส้นผ่าศูนย์กลางพื้นที่ d_p / s_0 มีค่าต่ำลง ดังนั้นการปฏิบัติงานในระบบการหล่อขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด β_{max} ด้วย ดังนั้นค่าความเสียดทานที่ตายและแผ่นจับยึดขึ้นงานจะมีค่าน้อยลง แต่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานพื้นผิวมีค่ามากขึ้น จึงสามารถใช้ค่าจีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปที่มีค่ามากได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และดังแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.3 อัตราส่วนการขึ้นรูป [13]

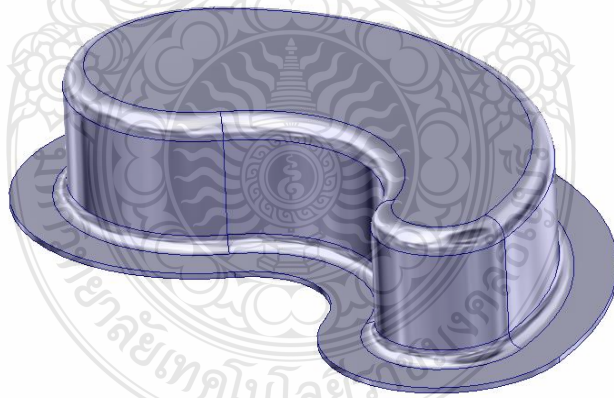
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด

Material	β_{max}
Steel sheet , depending on quality	1.8 – 2.2
Aluminum , copper , Al Cu Mg sheet	2.1
Brass sheet , depending on prestrain	1.7 – 2.2

2.3 การลากขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร

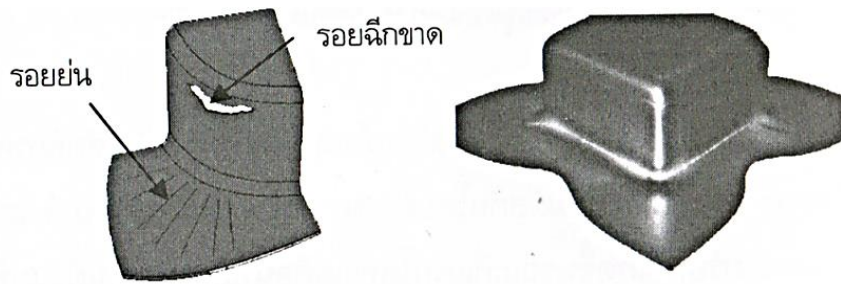
2.3.1 การขึ้นรูปแบบรูปทรงไม่สมมาตร (Non-symmetrical shell) [14]

จากการศึกษาในรูปแบบของการลากขึ้นรูปลึก (Deep drawing) ในรูปทรงต่างๆกันจึงเป็นแนวทางให้การศึกษาการลากขึ้นรูปลึกรูปทรงแบบไม่สมมาตร ซึ่งจะทำให้เกิดจุดบกพร่องตามพื้นที่ ที่ได้รับความเค้น (Stress) ที่แตกต่างกัน จึงเป็นไปได้ยากในการที่จะทำให้เกิดความสมดุลของความเครียดด้วยสาเหตุของปัจจัยในตัวแปรมีมากเกินไปจะควบคุมจึงนำไปสู่การเกิดความเสียหายในชิ้นงาน เช่น การเกิดการฉีกขาด เกิดรอยย่น เป็นต้น ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบไม่สมมาตร [14]

ชิ้นงานที่มีลักษณะการไหลตัวของวัสดุไม่สมมาตร เช่น รูปทรงถ้วยสี่เหลี่ยมหรือถ้วยวงรี ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นบนชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรนี้คือ เกิดรอยย่นที่ปีกถ้วย เกิดรอยฉีกขาดที่เกิดจากการไหลตัวไม่เท่ากันที่บริเวณต่างๆ ของชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร [14]

ที่บริเวณส่วนปีกของชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยม โดยเฉพาะขอบปีกตรงบริเวณรัศมีมุมโค้งจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการโก่งตัว (Buckle) และเกิดรอยย่นได้มากที่สุด เพราะบริเวณที่เกิดความเค้นอัด (Compressive stress) ในแนวเส้นรอบวงมากและบริเวณรัศมีมุมโค้งก็เกิดความเค้นอัด (Bending stress) ด้วย ทำให้การไหลตัวช้ากว่าบริเวณขอบเส้นตรงของถ้วย จึงทำให้เนื้อวัสดุเกิดการอัดตัวบริเวณมุมโค้ง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการโก่งตัวหรือเกิดรอยย่น ดังนั้น การลากขึ้นรูปจึงจำเป็นต้องใช้แรงในการลากขึ้นรูปที่สูงขึ้น เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในบางครั้งจะทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดตรงบริเวณรัศมีมุมโค้งที่กั้นถ้วย และรัศมีที่ปากของถ้วยสี่เหลี่ยม เพราะบริเวณนี้จะเกิดความเค้นคั่นที่สูง และความหนาของชิ้นงานบริเวณนี้ก็จะลดลงด้วย จึงทำให้เกิดการฉีกขาดได้ง่าย

จากผลงานวิจัยของ K. Lange ได้แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการลากขึ้นรูปหรือการเปลี่ยนแปลงรูปของแผ่นโลหะขึ้นกับความหนาของวัสดุและอัตราส่วนการขึ้นรูป (กรณีของแผ่นโลหะเปล่าและหน้าตัดพื้นที่ไม่กลม คิดค่าอัตราส่วนการลากขึ้นรูปจากการคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมติของวงกลมที่มีพื้นที่เท่ากัน) สำหรับการลากขึ้นรูปที่ใช้อัตราส่วนในการลากขึ้นรูปเท่ากับ 2.0 สำหรับแผ่นโลหะบาง ($d_0/T > 25-40$) นั้นจะมีความไวต่อการเกิดรอยย่นมาก เพราะมีโมเมนต์ความเฉื่อยในการต้านการโก่งตัวและการเกิดรอยย่นต่ำ จึงต้องการแรงกดบนแผ่นจับชิ้นงานที่มากกว่าแผ่นโลหะที่มีความหนามาก สำหรับแผ่นโลหะหนา ($d_0/T > 25$) โดยทั่วไปมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยย่นได้ยาก ทำให้สามารถลากขึ้นรูปได้โดยไม่ต้องใช้แผ่นจับชิ้นงาน และวัสดุที่มีค่า r_m (Normal anisotropy) ที่ต่ำ จะต้องใช้แรงกดบนของแผ่นจับชิ้นงานที่สูง และแรงกดบนแผ่นจับชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น เมื่อวัสดุมีค่า Δr (Planar anisotropy) สูงขึ้นด้วย

ดังนั้น การแก้ไขปัญหาการโก่งตัวหรือการเกิดรอยย่นสามารถแก้ไขได้โดยการใช้รัศมีมุมโค้งของพื้นที่และคายให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้วัสดุมีการไหลตัวได้ง่ายขึ้น หรือแก้ไขโดย

การเลือกใช้สารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติที่ดี เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นโลหะกับผิวของแม่พิมพ์ให้มีการไหลตัวที่ง่ายขึ้น และยังสามารถแก้ไขปัญหาการเกิดรอยย่นได้โดยการนำตัวครอว์บีด เข้ามาใช้เพื่อช่วยกักการไหลตัวของวัสดุที่บริเวณขอบปีกในแนวเส้นตรงให้มีการไหลตัวที่ช้าลงหรือไหลตัวเท่ากับบริเวณของปีกตรงรัศมีมุมโค้ง

2.3.2 ปัญหาในการขึ้นรูป [15]

2.3.2.1 การแตก เกิดขึ้นเมื่อแผ่นแบลงก์โลหะได้รับแรงจากการดึงยืดขึ้นรูปหรือแรงเฉือนจากการขึ้นรูปลึก มากเกินขีดจำกัดความเสียหายของวัสดุ ตามสภาพความเครียดที่พึงจะรับได้ อัตราความเครียดและอุณหภูมิ ในการดึงยืดเริ่มต้นแผ่นโลหะจะบางลงอย่างสม่ำเสมอในพื้นที่ทั่วไป เมื่อไป ถึงจุดที่มีการเปลี่ยนรูปมากทำให้เกิดแถบที่บางเฉพาะแห่งที่เรียกว่าการคอด ซึ่งสุดท้ายทำให้แผ่น โลหะแตก การเกิดรอยคอดโดยทั่วไปถือว่าเป็นความเสียหาย เพราะทำให้เกิดจุดบกพร่องที่มองเห็นได้และทำให้โครงสร้างอ่อนแอการแตกจากการเฉือนสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่มี การลดความหนามาก่อน ตัวอย่างทั่วไปของการแตกลักษณะนี้ก็คือการตัดซอย (Slitting) การแบลงก์(Blanking) และการทริม (Trimming) ในการปฏิบัติงานแผ่นโลหะจะถูกเฉือนโดยขอบคมมีดที่ใช้แรงกดในแนวตั้งจากกับระนาบของแผ่นโลหะจะทำให้มีความเสียหายเกิดขึ้น แต่จะน้อยกว่าความเสียหายจากการดึงยืดขึ้นรูป [15]

2.3.2.2 การโค้งและการย่น ในการขึ้นรูปด้วยพันธักอัดบนแผ่นแบลงก์โลหะจะทำให้แผ่นโลหะยืดและดึงผ่านแหวนจับยึดของแผ่นแบลงก์บริเวณขอบอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีขนาดเล็กลงทำให้เกิดความเค้นกดในแนวเส้นรอบวง ถ้าความเค้นนี้มีค่าถึงระดับวิกฤติของวัสดุและความหนาจะทำให้เกิดเป็นคลื่นเล็กน้อยซึ่งเรียกว่าการโค้ง การโค้งอาจจะพัฒนาเป็นคลื่นที่มองเห็นได้ชัดจำนวนมากต่อเนื่องกันเรียกว่ารอยย่น ถ้าแรงจับยึดแผ่นแบลงก์ไม่สูงพอสามารถทำให้เกิดรอยย่นที่ตำแหน่งอื่นๆได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่มีการเปลี่ยนหน้าตัดกะทันหัน และบริเวณที่ไม่มีโลหะไหลเข้ามาหรือสัมผัสเพียงด้านเดียวเท่านั้น ถ้ามีรอยย่นมากผิดปกติโลหะอาจพับทบกันสองถึงสามชั้นซึ่งอาจทำให้บริเวณอื่นแตกได้เพราะโลหะไม่สามารถไหลตามปกติได้ ด้วยเหตุนี้การเพิ่มแรงจับยึดแผ่นแบลงก์จึงใช้แก้ปัญหาคือการแตกได้

2.3.2.3 การเสียรูป โลหะจะเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติกด้วยแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป เมื่อเอาแรงภายนอกออกความเค้นยืดหยุ่นภายในมีการคลายตัว บางแห่งที่มีการคลายตัวอย่างสมบูรณ์ก็ทำให้ขนาดของชิ้นงานเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ในบริเวณที่ได้รับ การดัด (Bending) มีการกระจายความเค้นยืดหยุ่นตลอดความหนา นั่นคือความเค้นที่ผิวด้านนอกแตกต่างจากความเค้นด้านใน ถ้ารูปทรงของชิ้นงานไม่สามารถบังคับความเค้นเหล่านี้ไว้ได้ การคลาย

ตัวจะทำให้รูปร่างของชิ้นงานเปลี่ยนไปซึ่งเรียกว่าการเสียดรูปหรือการดีดกลับ (Springback) การดีดกลับสามารถชดเชยสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ให้เหมาะสมกับสมบัติวัสดุ แต่อาจจะยังคงมีปัญหา มากถ้าแผ่นแบลงก์ แต่ละแผ่นมีสมบัติของวัสดุหรือกรรมวิธีเปลี่ยนแปลง

2.3.2.4 โลหะหย่อน เกิดขึ้นในบริเวณที่ไม่มี การเปลี่ยนรูปและไม่ต้อง การให้เกิดขึ้น เพราะจะมีการเปลี่ยนรูปทรงได้ง่าย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ออยล์คานนิ่ง (Oil canning) ซึ่งอาจมีบาง แห่งขยุบหรือนูนจากปกติ ในการดัดงอเป็นมุมแหลมตั้งแต่ 2 แห่งขึ้นไปอย่างทันทีในทิศทางเดียวกัน เช่น การดัดเป็นลอนแหลมๆ มีแนวโน้มที่จะทำให้โลหะระหว่างลอนมีการหย่อนเพราะการดึงโลหะ ข้ามลอนเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก บางครั้งอาจหลีกเลี่ยงปัญหาได้โดยไม่ให้โลหะสัมผัสสรอยนูนทั้ง 2 รอยใน เวลาเดียวกันดังนั้นการยึดเกิดขึ้นก่อนสัมผัสสรอยที่สอง โลหะหย่อนมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นได้ใน บริเวณศูนย์กลางของชิ้นงานขนาดใหญ่ที่ค่อนข้างแบนเรียบหรือมีความโค้งเล็กน้อย การเพิ่มแรงเพื่อ ควบคุมรอบๆขอบแผ่นแบลงก์ทำให้ปัญหานี้ดีขึ้น

2.3.2.5 เนื้อผิวเสีย โลหะแผ่นที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าโลหะ มีเกรนหยาบมักจะทำให้เนื้อผิวโลหะไม่เรียบซึ่งเรียกว่าผิวส้ม (Orange peel) ปกติจะไม่ยอมให้เกิดขึ้น บนผิวชิ้นงานที่มองเห็นได้ในขณะใช้งาน ปัญหาของผิวที่เกิดขึ้นบนโลหะอีกอย่างหนึ่งก็คือการยึดที่ จุดคราก นั่นคือวัสดุยึดตัวออกอีกหลายเปอร์เซ็นต์หลังการคราก โดยไม่ต้องเพิ่มแรงกระทำ การเปลี่ยน รูปที่ระดับความเครียดต่ำใน โลหะเหล่านี้เกิดขึ้นมากในลักษณะที่เป็นแถบไม่สม่ำเสมอบนผิวโลหะ เรียกว่าเส้นลือเดอร์ (Lueders line) หรือริ้วคราก (Stretcher strains) ความบกพร่องนี้จะหายไปเมื่อมี ระดับความเครียดปานกลางและสูง อย่างไรก็ตามชิ้นงานเกือบทุกชิ้นมีบางบริเวณที่มีระดับ ความเครียดต่ำความบกพร่องนี้ไม่สามารถปกปิดด้วยการพ่นสี เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์ที่ผ่านการบ่ม อะลูมิเนียมและแมกนีเซียมเจือบางชนิดเกิดเส้นลือเดอร์อย่างชัดเจน

2.3.3 สาเหตุของการเกิดสิ่งบกพร่องในการดึงขึ้นรูป [1] ดังรูปที่ 2.6

2.3.3.1 เนื้อโลหะเกิดการฉีกขาดในระหว่างการดึงขึ้นรูป

- 1) ความหนาของแผ่นวัสดุชิ้นงานไม่ถูกต้อง
- 2) ความแข็ง ขนาดเม็ดเกรน หรือคุณภาพของแผ่นวัสดุชิ้นงานไม่เหมาะสม ซึ่งแก้ไขได้ด้วยการอบอ่อน หรือเปลี่ยนระดับชั้นคุณภาพของแผ่นวัสดุชิ้นงานให้สูงขึ้น
- 3) ผิวของวัสดุชิ้นงานมีสิ่งบกพร่อง เช่น รอยข่วน, สิ่งสกปรก, หรือ ความเครียดแฝงอยู่ในแผ่นวัสดุชิ้นงานซึ่งในขณะที่ทำการขึ้นรูปจะทำให้เกิดการเสียหายที่บริเวณนี้ เพราะเกิดความเค้นผสมอยู่
- 4) ผิวขอบคายบริเวณรัศมี, ผิวของดรอว์บีด และผิวของแบลงก์ไฮลเดอร์ไม่

เรียบพอ ซึ่งในบางครั้งต้องทำการขัดผิวให้เรียบถึงในระดับ “อย่างสูงมาก” โดยต้องไม่มีรอยขีดข่วน, รอยบุ๋ม, รอยเชื่อม หรือรอยขนแมวอยู่เลย

5) รัศมีขอบคายน้อยเกินไปทำให้เกิดแรงต้านการไหลของแผ่นวัสดุชิ้นงานสูงจนทำให้เกิดผนังบางหรือฉีกขาด ซึ่งแก้ไขได้โดยการเพิ่มรัศมีขอบคายให้สูงขึ้น หรือเปลี่ยนรูปร่างของช่องทางเข้าคายจากรัศมีโค้งให้เป็นมุมเอียง หรือเป็นวงรีแทน

6) ช่องว่าง หรือเคลียแรนซ์ระหว่างพื้นซ์กับคายมากเกินไป, น้อยเกินไป หรือไม่สม่ำเสมอ

7) แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์มากเกินไป

8) ใช้อัตราส่วนการดึงสูงเกินไป

9) รัศมีขอบพื้นซ์น้อยเกินไป

10) การหล่อเย็นไม่ดีพอหรือไม่เหมาะสม

2.3.3.2 เกิดรอยย่นหรือรอยจีบที่ปีกของชิ้นงาน

1) แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์น้อยเกินไป

2) รัศมีขอบพื้นซ์และคายมากเกินไป

3) รัศมีขอบพื้นซ์มากเกินไปชิ้นงานที่มีก้นเป็นรูปโดมครึ่งวงกลมมักจะเกิดปัญหานี้บ่อยๆ เพราะเหลือเนื้อโลหะอยู่ระหว่างรัศมีการดึงเป็นจำนวนมาก

2.3.3.3 ขอบหรือปีกของชิ้นงานมีขนาดไม่สม่ำเสมอ

1) รอยดึงหรือรอยยักที่เกิดขึ้นบนขอบของชิ้นงานเป็นผลมาจากค่าความเป็นแอนไอโซทรอปีของแผ่นวัสดุที่มีค่าต่างกันมาก

2) แผ่นวัสดุที่นำมาดึงขึ้นรูปมีรอยแหงหรือรอยเสี้ยนอยู่ที่ขอบ

3) พื้นซ์และคายไม่อยู่ร่วมศูนย์หรือวางแผ่นวัสดุไม่อยู่ในตำแหน่ง

4) มีสิ่งสกปรก, ฝุ่นผง, รอยขีดข่วนหรือ มีความเครียดแฝงอยู่บนพื้นผิวของแผ่นวัสดุ

5) แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ไม่สมดุลทำให้การไหลของแผ่นวัสดุไม่สม่ำเสมอ

2.3.3.4 เกิดรอยย่นหรือรอยจีบที่ขอบ

1) ความหนาของแผ่นวัสดุไม่ตรงตามที่กำหนด

2) รัศมีการดึงมากเกินไป

3) เคลียแรนซ์ (Clearance) ระหว่างพื้นซ์กับคายมากเกินไป

2.3.3.5 เกิดผนังบางที่บริเวณใกล้ๆ กับก้นของชิ้นงาน

- 1) ระดับคุณภาพของแผ่นวัสดุไม่เหมาะสม
- 2) รัศมีขอบคายเล็กเกินไปทำให้เกิดแรงดึงที่ผนังของชิ้นงานสูงมากจึงเกิด

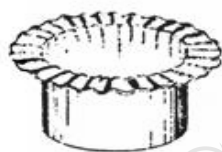
เป็นการดึงยึดแทน

- 3) ใช้ค่าอัตราส่วนการดึงสูงมากเกินไป
- 4) ใช้สารหล่อลื่นที่ไม่เหมาะสม หรือไม่พอเพียง

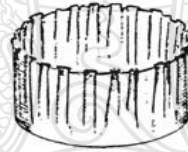
2.3.3.6 เกิดการน็อกขาดที่ก้นชิ้นงาน

- 1) มีสิ่งสกปรกหรือจุดบกพร่องอยู่บนผิวแผ่นวัสดุ
- 2) ผิวของรัศมีขอบคายและแบลงก์ไฮลเดอร์ไม่เรียบ, มีรอยขีดข่วนทำให้เกิดแรงต้านการไหลของแผ่นวัสดุที่จะเข้าไปในคาย

- 3) รัศมีขอบพันซ์และคายน้อยเกินไปทำให้แผ่นวัสดุไหลได้ยาก
- 4) ใช้สารหล่อลื่นไม่เหมาะสม หรือไม่เพียงพอ



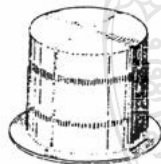
รอยขุ่นที่ปีกถ้วย



รอยขุ่นที่ผนังถ้วย



รอยร้าว



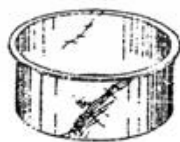
วงแหวนเป็นชั้นตอน



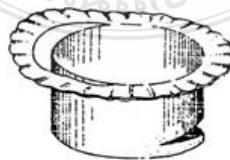
รอยตำหนิจากการลากชิ้นรูป



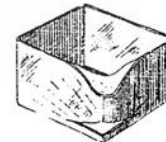
ผิวเปลือกส้ม



รอยขีดข่วน



รอยแตกที่ขอบและที่ก้นถ้วย



รอยแตกที่มุม

รูปที่ 2.6 สิ่งบกพร่องที่เกิดกับชิ้นงานดึงขึ้นรูป [1]



รูปที่ 2.6 สิ่งบกพร่องที่เกิดกับชิ้นงานดึงขึ้นรูป (ต่อ) [1]

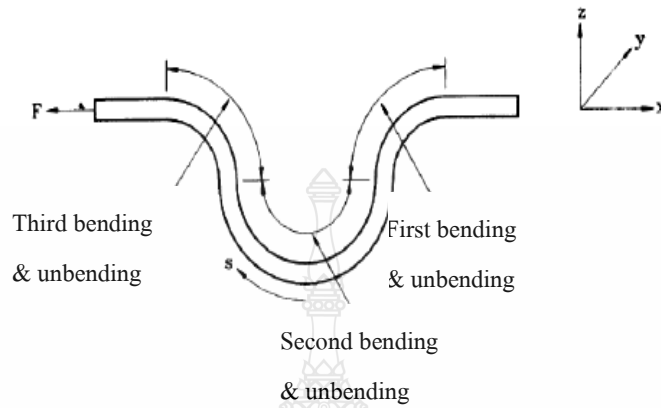
จะเห็นว่าปัญหาหลักๆ ในการดึงขึ้นรูปที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน คือการเกิดรอยย่น และการเกิดรอยจีบบนปีกของชิ้นงานอันเนื่องมาจากแรงกดแบบลengk์ไฮดรอลิ์น้อยเกินไปหรือเกิดการฉีกขาดอันเนื่องมาจากแรงกดแบบลengk์ไฮดรอลิ์มากเกินไปซึ่งเป็นการยากที่จะปรับให้เหมาะสม อีกทั้งยังต้องทำการปรับผิวของแบบลengk์ไฮดรอลิ์กับคายให้ขนานกัน ให้มากที่สุดด้วยเพื่อให้แรงกดกระจายทั่วทั้งพื้นที่ทำให้ชุดแม่พิมพ์มีราคาแพง รวมทั้งยังเกิดการสึกหล่อสูงด้วย ดังนั้นจึงมีการคิดค้นดรอว์บีดขึ้นเพื่อใช้สร้างแรงต้านการดึงขึ้นรูป มาติดตั้งไว้ในชุดแม่พิมพ์ดรอว์บีดเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงมากนัก ทำให้สามารถ ลดราคาแม่พิมพ์ลงได้มาก แล้วดรอว์บีดยังช่วยลดแรงกดแบบลengk์ไฮดรอลิ์ลงได้อีกด้วย หน้าที่ของดรอว์บีดคือ ช่วยควบคุมการไหลของแผ่นวัสดุและช่วยสร้างแรงต้านการดึงขึ้นรูปในแผ่นวัสดุที่กำลังจะไหลเข้าช่องเปิดคาย

2.4 ดรอว์บีด (Draw bead)

การควบคุมปริมาณวัสดุที่ถูกดึงเข้าไปในคายเพื่อป้องกันการเกิดรอยย่น หรือรอยย่นน้อยที่สุด ทำได้โดยใช้ดรอว์บีด ทำหน้าที่จำกัดการเคลื่อนที่ของวัสดุที่จะเข้าไปในคาย ขณะที่วัสดุไหลผ่านดรอว์บีด จะมีการตัดครั้งแรกในทิศทางหนึ่ง จากนั้นจึงตัดในทิศทางตรงกันข้าม แล้วตัดอีกครั้งหนึ่งในทิศทางแรก สุดท้ายจึงตัดตรง

แรงต้านมีสองแรงคือ แรงแรกเกิดจากงานที่ใช้ตัดและตัดกลับของแผ่นวัสดุขณะไหลผ่านดรอว์บีด และแรงที่สองเกิดจากความเสียดทาน การประเมิณแรงต่อความยาว ที่เกิดจากการตัดและตัด

กลับอย่างหายาๆสามารถทำได้โดยพิจารณาจากความเป็นจริงว่า ขณะที่แผ่นวัสดุไหลผ่านดรอว์บีด จะเกิดการคัตสามครั้ง และคัตกลับสามครั้ง ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการคัตของดรอว์บีด [16]

สำหรับการคัตหนึ่งครั้ง งานต่อความยาวของดรอว์บีด และต่อระยะทางที่เคลื่อนที่ของแผ่นวัสดุสามารถประเมินได้โดยใช้สมมติฐานต่อไปนี้คือ ไม่มีการทำให้แข็งด้วยความเครียด ไม่มีแกนยืดหยุ่น (Elastic core) และระนาบสะเทินยังคงอยู่ที่ระนาบศูนย์กลาง และไม่คิดความแตกต่างระหว่างความเครียดกับความเครียดวิศวกรรม ($\epsilon = e$) ในกรณีนี้ งานต่อปริมาตรในเอลิเมนต์ที่เคลื่อนที่เป็นระยะ Z จากจุดศูนย์กลางคือ $Y(z/r)$ เมื่อ Y คือความต้านการคราก และ r คือรัศมีของดรอว์บีดอินทิกเรต เอลิเมนต์ทั้งหมดระหว่างศูนย์กลาง ($z=0$) ถึงที่ผิว ($z = r/2$) ได้งานต่อความยาวของการคัต

$$\frac{dW}{dL} = 2 \int_0^r \frac{Y}{r} z dz = \frac{Yr^2}{4r} \quad (2.6)$$

แรงที่เหลือจากการคัตสามครั้งและคัตกลับสามครั้ง รวมเป็นหกครั้งคือ

$$F_b = \frac{6dW}{dL} = \frac{1.5Yr^2}{r} \quad (2.7)$$

การคำนวณที่ผ่านมานี้ไม่คิดผลของเบาชิงเจอร์ การหาค่าของแรง F_b ที่แม่นยำมากขึ้นสามารถทำได้โดยการทดลองวัดแรงที่ต้องใช้ดึงแผ่นวัสดุผ่านฟิกเจอร์ (Fixture) ที่มีกระบอกหมุนได้

อย่างอิสระ เลียนแบบดรอว์บีดที่ไม่มีคามเสียดทาน แรงจากคามเสียดทานที่มีส่วนสนับสนุนดรอว์บีดเป็นสัดส่วนกับแรงแบลงก์โฮลเดอร์ (Blank Holder Force; F_h) ซึ่ง $F_f = \mu F_h$ แรงต้านรวมหาได้จากผลรวมของแรงทั้งสองคือ $F = F_b + F_f$

ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบสองจังหวะ (Double-action) จังหวะแรกแบลงก์โฮลเดอร์เคลื่อนที่ลงมากดแผ่นชิ้นงานรอบๆ คาย ในจังหวะที่สองพันธเคลื่อนที่ขึ้นรูปชิ้นงาน กดเข้าไปในคาย มีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องควบคุมอัตราการไหลของเนื้อโลหะเข้าสู่คาย [16]

Nine ค้นพบว่าทิศทางของแรงเสียดทานจะตรงกันข้ามกับทิศทางเคลื่อนที่ (Coulomb friction) เกิดขึ้นสำหรับโลหะมากที่สุด แต่ไม่เกิดกับโลหะบางชนิดเช่น AI 2036-T4 เมื่อเกิดการเปลี่ยนรูปบริเวณดรอว์บีด Wang เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงที่ดรอว์บีด สำหรับการคำนวณแรง ที่แผ่นชิ้นงานที่ผ่านดรอว์บีด โดยมีหน้าตัดคงที่ Triantafy เสนอการวิจัยแบบจำลองและประยุกต์เทคนิควิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์การขึ้นรูปของโลหะแผ่นบริเวณดรอว์บีด

Levy ได้เสนอสมการของแรงหน่วงเหนี่ยว (Draw Bead Restraining Force; DBRF) แสดงสมการได้ดังนี้

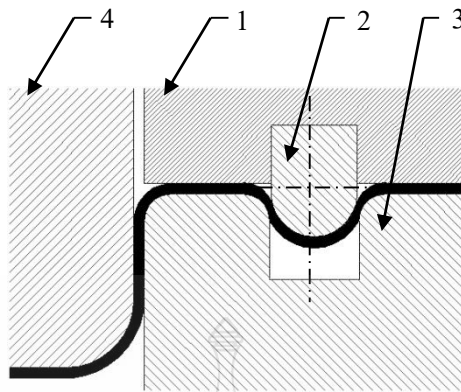
$$DBRF = a_0 + a_1 x_1 + a_2 \mu x_1 \quad (2.8)$$

เมื่อให้ a_i คือ สามารถกำหนดได้จากผลการทดลอง μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และ x_1 คือ แสดงได้โดย การเท่ากันของงาน ที่ดึงแผ่นชิ้นงาน ผ่านดรอว์บีด สมบัติของวัสดุชิ้นงาน โดยสมการความเครียดแข็ง (Holloman hardening) กับค่าอัตราเครียดของวัสดุ (Strain-rate)

การออกแบบดรอว์บีด [1]

แสดงการใช้ดรอว์บีดในแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปชิ้นส่วนรถยนต์เมื่อเริ่มทำงาน แบลงก์โฮลเดอร์ (1) ที่มีดรอว์บีด (2) ยึดติดอยู่จะเลื่อนลงมากดแผ่นวัสดุชิ้นงานทำให้แผ่นวัสดุชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปไปตามรูปพรรณของดรอว์บีดหลังจากที่ แบลงก์โฮลเดอร์ประกบสนิทเข้ากับคาย (3) แล้วพันธ (4) ก็จะเลื่อนลงมา เพื่อกดขึ้นรูปชิ้นงานต่อไป ดังรูปที่ 2.8

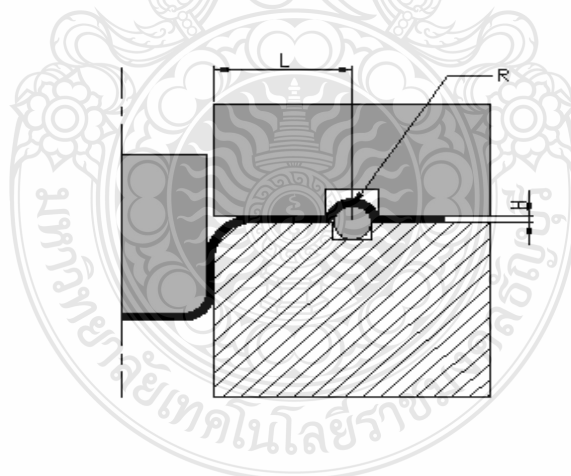
ความเร็วของการไหลของโลหะแผ่นที่อยู่ระหว่างผิวของแบลงก์โฮลเดอร์และคายขึ้นอยู่กับความลึกในการดึงขึ้นรูป ซึ่งสามารถปรับได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงช่องว่างระหว่างดรอว์บีดกับร่องและรัศมีของร่อง [17]



รูปที่ 2.8 ลักษณะของครอว์บีคในแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูป [17]

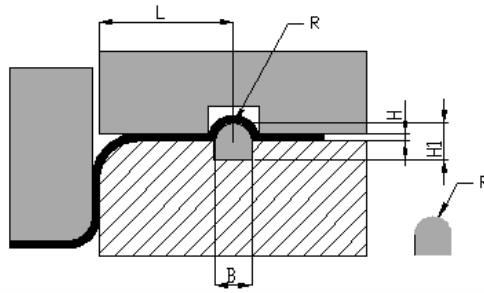
2.4.1 ครอว์บีคแบ่งออกได้เป็น 5 ชนิดตามรูปร่างหน้าตัดของครอว์บีค ดังต่อไปนี้

2.4.1.1 ครอว์บีคแบบหน้าตัดกลม (Round Drawbead) ตัวแปลที่ใช้ในการออกแบบคือ รัศมีของครอว์บีค (R) ความสูงที่พ้นจากผิวของแผ่นจับชิ้นงานหรือคาย (H) และระยะห่างจากปากคาย (L) ครอว์บีคประเภทนี้นิยมใช้ในงานวิจัยเพื่อช่วยลดค่าความเสียหาย และร่องรอยที่เกิดจากครอว์บีคบนแผ่นโลหะมีน้อย แต่ไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตจริงแสดงดังรูปที่ 2.9



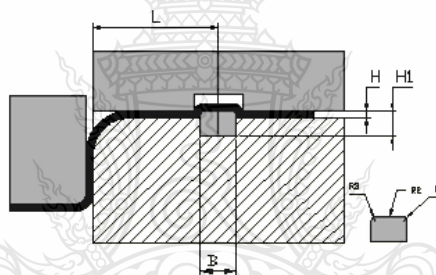
รูปที่ 2.9 ครอว์บีคแบบหน้าตัดกลม (Round Drawbead) [18]

2.4.1.2 ครอว์บีคแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Half-Round Drawbead) มีตัวแปลในการออกแบบคือ รัศมีของครอว์บีค (R) ความกว้าง ($B = 2R$) ความสูงที่พ้นจากผิวของแผ่นจับชิ้นงานหรือคาย (H) ความสูงของครอว์บีค (H1) และระยะห่างจากปากคาย (L) ครอว์บีคประเภทนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตจริงแสดงดังรูปที่ 2.10



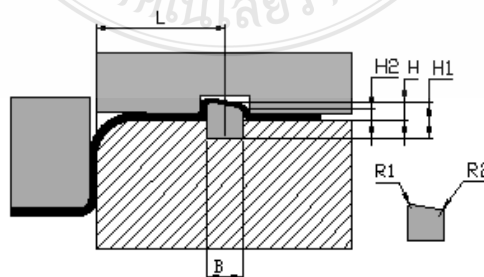
รูปที่ 2.10 ครอบปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Half-Round Drawbead) [18]

2.4.1.3 ครอบปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Drawbead) มีตัวแปลในการออกแบบคือ รัศมี (R_1, R_2, R_3) ความกว้าง (B) ความสูง (H, H_1) และระยะห่างจากปากคาย (L) ครอบปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่นิยมใช้แสดงดังรูปที่ 2.11



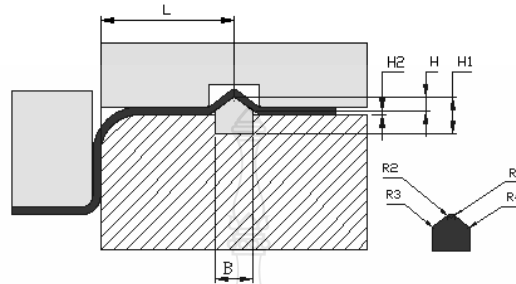
รูปที่ 2.11 ครอบปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Drawbead) [18]

2.4.1.4 ครอบปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapeziform Drawbead) มีตัวแปลในการออกแบบคือ รัศมี (R_1, R_2) ความกว้าง (B) ความสูง (H, H_1, H_2) และระยะห่างจากปากคาย (L) ครอบปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ครอบปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapeziform Drawbead) [18]

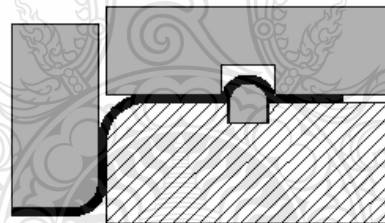
2.4.1.5 ครอปีดว์แบบหน้าตัดรูปตัววี (V-Shaped Drawbead) มีตัวแปลในการออกแบบคือ รัศมี ($R1, R2, R3, R4$) ความกว้าง (B) ความสูง ($H, H1, H2$) และระยะห่างจากปากคาย (L) ครอปีดว์แบบหน้าตัดรูปตัววี แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ครอปีดว์แบบหน้าตัดรูปตัววี (V-Shaped Drawbead) [18]

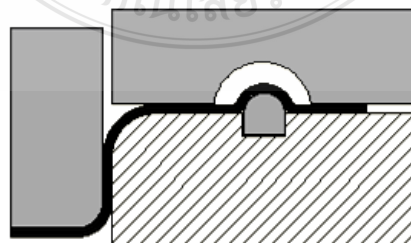
2.4.2 ส่วนของร่องบีด (Grooves) สามารถแบ่งตามรูปร่างหน้าตัดได้ 5 แบบ คือ

2.4.2.1 ร่องบีดแบบหน้าตัดตามรูปร่างของครอปีดว์ แสดงดังรูปที่ 2.14



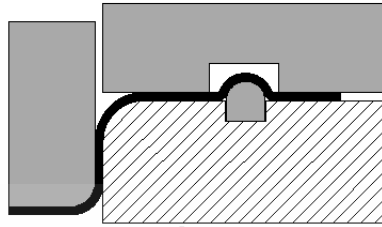
รูปที่ 2.14 ร่องบีดแบบหน้าตัดตามรูปร่างของครอปีดว์ [18]

2.4.2.2 ร่องบีดหน้าตัดครึ่งวงกลม แสดงดังรูปที่ 2.15



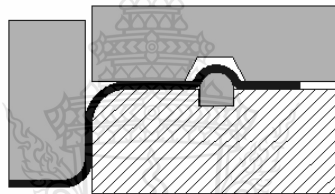
รูปที่ 2.15 ร่องบีดหน้าตัดครึ่งวงกลม [18]

2.4.2.3 ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า แสดงดังรูปที่ 2.16



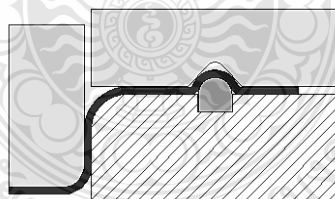
รูปที่ 2.16 ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [18]

2.4.2.4 ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู [18]

2.4.2.5 ร่องปิดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม แสดงดังรูปที่ 2.18

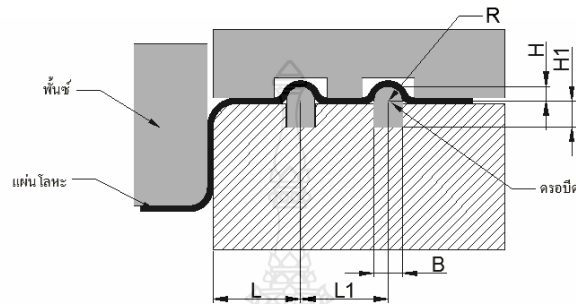


รูปที่ 2.18 ร่องปิดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม [18]

2.4.3 ตำแหน่งในการติดตั้งตัวดรอปีด์ (Drawbead Position) [18]

สามารถติดตั้งตัวดรอปีด์เพื่อการใช้งานได้ 2 ตำแหน่ง คือ ติดตั้งไว้บนหน้าคายหรือติดตั้งไว้บนผิวหน้าของแผ่นจับชิ้นงาน แล้วแต่รูปแบบและความเหมาะสมในการทำงาน โดยต้องคำนึงถึงการตัดขอบด้วย ตำแหน่งของดรอปีด์ต้องไม่เป็นอุปสรรคกับการทำงานในขั้นตอนอื่น

การวางครอปบีคร์อาจใช้ 1, 2, 3 แถว หรือมากกว่านั้นก็ได้ ขึ้นอยู่กับความลึกของงานที่ขึ้นรูป ความหนา และพื้นที่ในการไหลตัวของแผ่นโลหะ หรือความต้องการในการต้านการไหลตัวของแผ่นโลหะ ตารางที่ 2.2 เป็นการแนะนำขนาด ระยะห่างจากขอบ และสกรูในการจับยึดครอปบีคร์แบบหน้าตัดครึ่งวงกลมในตัวแปลตต่าง ๆ ในตารางแสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ตำแหน่งและระยะของครอปบีคร์ [18]

ตารางที่ 2.2 ขนาดของครอปบีคร์และตำแหน่งของระยะห่างในการยึดติด [18]

ขนาดแม่พิมพ์	L (mm)	L1 (mm)	B (mm)	R (mm)	H (mm)	H1 (mm)	D (mm)
เล็ก-กลาง	25-32	25-30	14	7	6	5	M6
กลาง-ใหญ่	28-35	28-32	16	8	7	6	M8
ใหญ่มาก	32-38	32-38	20	10	8	7	M10

2.5 ชนิดของเหล็กแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูป

เหล็กแผ่นรีดเย็นเป็นโลหะที่ใช้มากในการอัดโลหะ เนื่องจากเหล็กแผ่นชนิดนี้จะถูกรีดเป็นแผ่น ณ อุณหภูมิห้องจึงได้ผิวเรียบและละเอียด นิยมใช้ทำตัวถังส่วนนอกรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องเขียน หรือชิ้นส่วนของเครื่องใช้ที่ต้องการความสวยงาม JIS (Japanese Industrial Standard) ได้กำหนดชนิดของเหล็กแผ่น SPCC เป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุดในงานอัดโลหะ ยกเว้นอัดขึ้นรูปลึกมาก (Sever deep-drawing) ผิวของเหล็กแผ่นเหล่านี้จะแบ่งออกเป็นชนิดด้าน (Dull sheet) ซึ่งรีดจากลูกรีดผิวหยาบ และผิวเรียบ (Bright sheet) ซึ่งรีดจากลูกรีดละเอียด

SPCC เป็นสัญลักษณ์หนึ่งของเกรดเหล็ก (Steel grade) ตามมาตรฐาน JIS G3141:1996 (Cold reduced carbon steel sheets and strip) ซึ่งเป็นเหล็กแผ่นรีดเย็น (Commercial quality) ใช้สำหรับงานทั่วไป นอกจากนี้ยังมีเกรดอื่นอีก เช่น SPCD ซึ่งเป็น (Drawing quality) ใช้สำหรับงานขึ้นรูป และ SPCE (Deep draw quality) สำหรับงานขึ้นรูปลึก ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางเคมีของเหล็กรีดเย็น (มาตรฐาน JIS)

ชนิด	ส่วนผสม					การใช้งาน
	C	Si	Mn	P	S	
SPCC	<0.12	-	<0.05	<0.040	<0.045	ใช้อัดโลหะทั่วไป
SPCD	<0.10	-	<0.45	<0.035	<0.035	ใช้อัดขึ้นรูป
SPCE	<0.18	-	<0.40	<0.030	<0.030	ใช้อัดขึ้นรูปลึก

2.6 ความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness average: Ra)

เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวด้วยค่าเฉลี่ยทางเลขคณิตของผิวที่วัด ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้กันมากที่สุด และหลายมาตรฐานมักอ้างอิงค่านี้ในการกำหนดมาตรฐานความหยาบผิว การหาค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิตได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (Center-Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวเฉลี่ย (L_m) โดยที่ค่าของ Ra มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และสามารถนำมาคำนวณหาค่าของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ดังแสดงในสมการที่ 2.9



รูปที่ 2.20 การวัดความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness average: Ra)

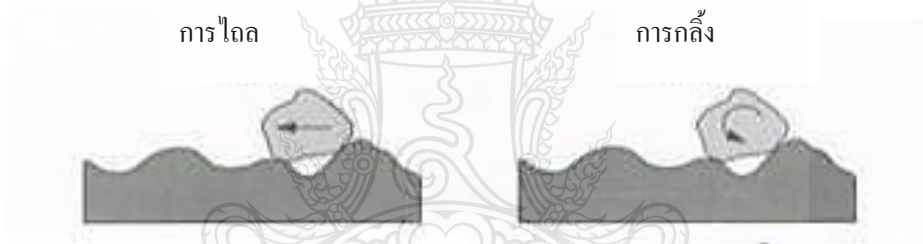
$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx = \frac{a+b+c+d+\dots}{n} \quad (2.9)$$

เมื่อ

- Ra = ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (μm)
- L = ความยาวอ้างอิงการวัดผิว (μm)
- y = ความลึกของผิว (μm)
- dx = อนุพันธ์ของความหยาบผิว

2.7 ความเสียดทาน (Friction)

ความเสียดทานเป็นแรงต้านทานการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างผิวสองผิว ลักษณะการเคลื่อนที่อาจจะเป็นการเลื่อนไถล (Sliding) หรือการกลิ้ง (Rolling) ของผิวหนึ่งไปบนอีกผิวหนึ่งซึ่งอาจจะสัมผัสกันโดยตรงหรือมีของเหลว หรือมีฟิล์มคั่นอยู่ระหว่างผิวที่มีการเคลื่อนที่สัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 2.21 [13]



รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่สัมผัสแบบการไถลและการกลิ้ง [13]

ปัญหาของการเสียดทาน คือ การที่มีความเสียดทานระหว่างผิววัสดุจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของระบบเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานหรือต้องใส่พลังงานให้แก่ระบบมากขึ้นเพื่อให้ระบบทำงานได้ พลังงานที่สูญเสียไปนี้เมื่อนำมารวมกันจะพบว่ามีมูลค่ามหาศาลทีเดียว การศึกษาเพื่อมุ่งเน้นที่การลดแรงเสียดทานจึงมีสำคัญเป็นอย่างมากในวิทยาการสมัยใหม่ทั้งในการพัฒนาวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ และการออกแบบระบบให้เกิดความเสียดทานขึ้นน้อยที่สุด การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความเสียดทานจึงประกอบด้วยการศึกษาเพื่อลดความเสียดทานให้ต่ำที่สุดในกรณีที่ไม่ต้องการและการศึกษาเพื่อรักษาค่าความเสียดทานในช่วงเวลาแคบๆ ให้สามารถควบคุมได้

กฎข้อที่ 1 แรงเสียดทานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงตั้งฉาก ($F = \mu N$)

กฎข้อที่ 2 ความเสียดทานไม่ขึ้นอยู่กับพื้นที่สัมผัส (Apparent area of contact)

กฎข้อที่ 3 แรงเสียดทานไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่สัมผัส

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่ากฎทั้ง 3 ข้อที่ตั้งขึ้นมานั้นเป็นเพียงแนวทางในการศึกษาความเสียดทานเท่านั้น ในทางปฏิบัติเราจะต้องนำปัจจัยอื่นๆ มาร่วมพิจารณาในการวิเคราะห์หาค่าเสียดทานด้วย

แรงเสียดทานสถิตแรงพยายามที่น้อยที่สุดที่ต้องใช้ในการทำให้วัตถุเคลื่อนตัวจากเดิมที่อยู่นิ่ง ดังแสดงในสมการที่ 2.10

$$f_s \leq \mu_s N \quad (2.10)$$

เมื่อ

μ_s = ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานสถิต

N = แรงปฏิกิริยาตั้งฉากระหว่างผิวสัมผัส

แรงเสียดทานจลน์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสในขณะที่วัตถุกำลังเคลื่อนที่ ดังแสดงในสมการที่ 2.11

$$f_s \leq \mu_k N \quad (2.11)$$

เมื่อ

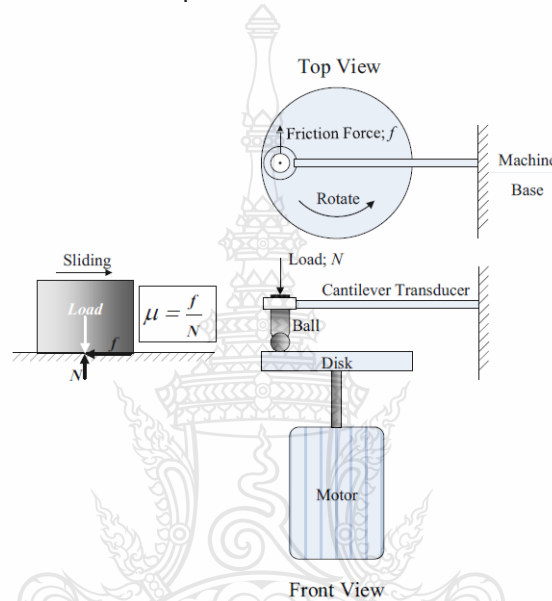
μ_k = คี้อค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานจลน์

N = คี้อแรงปฏิกิริยาตั้งฉากระหว่างผิวสัมผัส

2.8 การทดสอบทางไทรบอโลยี

การทดสอบทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสที่ต้องการศึกษา สามารถทำได้หลายวิธีตามมาตรฐาน ASTM เช่น การทดสอบเพื่อวัดการสึกหรอแบบขัดสีด้วยทรายและล้อยาง (Dry sand/rubber wheelabrasion test) ตามมาตรฐาน ASTM G65 ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อคุณลักษณะและวัดปริมาณการสึกหรอของชิ้นทดสอบ ด้วยการใช้ล้อยางหมุนบนชิ้นทดสอบ โดยระหว่างการทดสอบทรายแห้งจะถูกปล่อยผ่านผิวคู่สัมผัสด้วยอัตราการไหลที่กำหนด การทดสอบด้วยวิธีบล็อกบนแผ่นวงแหวน (Block-on-Ring) ตามมาตรฐาน ASTM G77 วัดชิ้นทดสอบที่ต้องการวัดความต้านทานการสึกหรอระหว่างผิวคู่สัมผัส จะถูกทำเป็นบล็อกหรือวงแหวนขึ้นกับผู้ทดสอบพิจารณา โดยการทดสอบจะให้วงแหวนหมุนด้วยความเร็วที่กำหนด ขณะที่บล็อกจะถูกกดลงบนวงแหวนหมุนด้วยแรงตั้งฉากกับผิวสัมผัส การทดสอบด้วยวิธีหมุดบนแผ่นจานหรือบอลบนแผ่นจาน (Pin-on-Disk หรือ Ball-on-Disk) ตาม

มาตรฐาน G99 ซึ่งเป็นการทดสอบการสึกหรอของผิวคู่สัมผัสอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมเนื่องจากเตรียมชิ้นทดสอบง่าย คือเตรียมเป็นแท่งหมุดที่มีปลายเป็นรัศมี และแผ่นจานวงกลม การทดสอบจะให้แผ่นจานหมุนด้วยความเร็วที่กำหนด โดยมีหมุดกดด้วยแรงที่ต้องการใช้ในการทดสอบกระทำตั้งฉากลงบนแผ่นจานหมุนการทดสอบที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการทดสอบในลักษณะที่ผิวคู่สัมผัสของชิ้นทดสอบเคลื่อนที่ลักษณะเชิงมุมทั้งนี้ยังมีการทดสอบทางไทรบอโลยีในลักษณะผิวคู่สัมผัสเคลื่อนที่เป็นเชิงเส้นด้วย ซึ่งผลการทดสอบทั้งเชิงมุมและเชิงเส้นต่างให้ผลการทดสอบในลักษณะเดียวกัน [19]



รูปที่ 2.22 หลักการทำงานของไทรบอมิเตอร์ ตามมาตรฐาน ASTM G99 [19]

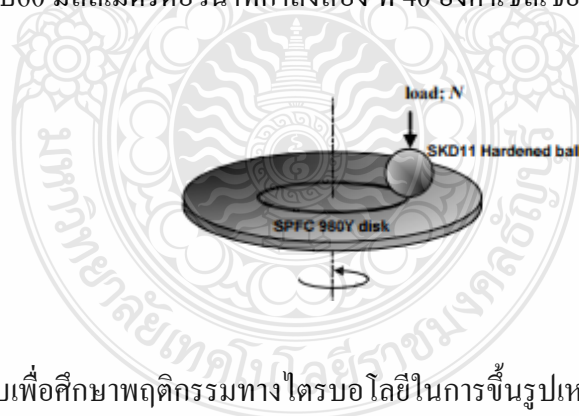
2.8.1 หลักการทดสอบ Ball-on-Disk

Ball-on-Disk เป็นวิธีการทดสอบเพื่อศึกษาการสึกหรอของผิวคู่สัมผัสที่เคลื่อนที่สัมผัสกัน และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัส โดยหน่วยวัดที่ใช้กำหนดอยู่ในระบบมาตรฐาน SI การทดสอบแต่ละครั้งต้องใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 2 ชิ้น ที่ต้องการศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิว

คู่สัมผัสเพื่อเตรียมเป็นบอลกับแผ่นจาน วัสดุชิ้นทดสอบที่ถูกเตรียมเป็นบอลจะถูกจับยึดด้วยค้ำจับที่มีความแข็งแรงเพียงพอ ในการทดสอบค้ำจับบอลจะถูกยึดติดกับก้านทดสอบของเครื่องไทรบอมิเตอร์ โดยมีแรงกด (Load; N) จากค้ำน้ำหนักกดบอลลงบนชิ้นงานที่เตรียมเป็นแผ่นจาน ในการทดสอบจานหมุนด้วยต้นกำลังจากมอเตอร์ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน μ สามารถหาได้โดยตรงจากอัตราส่วนของแรงเสียดทาน f ซึ่งเป็นแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างผิวคู่สัมผัสของชิ้นทดสอบ กับแรงกด N [19]

2.8.2 การทดสอบ Ball-on-Disk ในงานขึ้นรูปโลหะ

การจำลองการทำงานด้วยวิธี Ball-on-Disk เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสในงานขึ้นรูปโลหะ วัสดุที่ใช้ในการทดสอบจะใช้วัสดุชนิดเดียวกับวัสดุที่ใช้ทำคายและวัสดุที่ต้องการขึ้นรูป เช่นในงานขึ้นรูปเย็นโลหะ แผ่น วัสดุที่ใช้ทำคายนิยมใช้เหล็กกล้าเครื่องมือเย็นเกรด SKD11 (JIS) ชุบแข็งที่ค่าความแข็ง 60 ± 2 HRC โดยผิว แม่พิมพ์จะทำการขัดมัน (lapping) ดังนั้นบอลที่ใช้ทดสอบจะถูกเตรียมจากเหล็ก SKD11 ที่มีค่าความแข็ง และค่าความหยาบผิวเท่ากับคายที่ใช้ขึ้นรูป สำหรับโลหะแผ่นที่ต้องการขึ้นรูปจะถูกเตรียมเป็นแผ่นงาน สำหรับบทความนี้เครื่องไทรบอมิเตอร์ Anton Paar ถูกใช้ในการทดสอบพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสของ บอล SKD11 ความแข็ง 59 HRC มีค่าความหยาบผิว R_a เท่ากับ 0.0574 ไมโครเมตร กับผิวคู่สัมผัส เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ เกรด SPFC980Y มีลักษณะการทดสอบดังรูปที่ 2.23 บอลที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 มิลลิเมตร และขนาดของแผ่นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการหมุนของแผ่นงานกำหนดให้เท่ากับความเร็วที่ใช้ในการขึ้นรูปขึ้นงาน คือ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที กำหนดระยะทางการทดสอบเท่ากับ 50 เมตรสำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ ความเสียดทานระหว่างผิวคู่ สัมผัส โดยมีแรงกระทำระหว่างผิวคู่สัมผัสที่ให้โดยค้อนน้ำหนักขนาด 10 นิวตันทำการทดสอบทั้งกรณีใช้สารหล่อลื่น และไม่ใช้สารหล่อลื่น สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบเป็น สารหล่อลื่นที่ใช้ในงานขึ้นรูปโลหะที่มีขายตามท้องตลาด ทั่วไปมีค่าความหนืด (viscosity) เท่ากับ 60 มิลลิเมตรต่อวินาทีกำลังสอง ที่ 40 องศาเซลเซียส

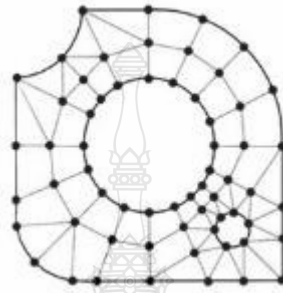


รูปที่ 2.23 ขึ้นทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีในการขึ้นรูปเหล็กเกรด SPFC 980Y [19]

2.9 ไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นมักประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาได้จะประกอบด้วยค่าของตัวแปรตามตำแหน่งต่าง ๆ กันบนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ผล

เฉลยแม่นยำจะประกอบด้วยค่าต่าง ๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัตินั้น เป็นไปไม่ได้ หลักการก็คือทำการลดค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณใน จำนวนที่นับได้ (finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์(elements) ดังรูปที่ 2.24 ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน [20]

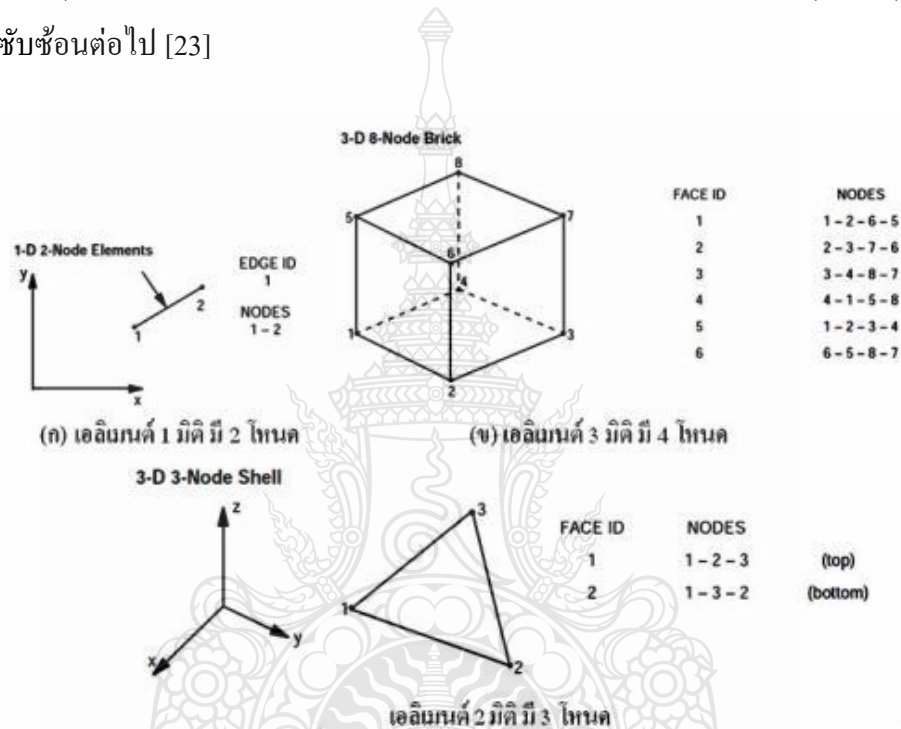


รูปที่ 2.24 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [20]

ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis : FEA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อให้ได้ผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหาที่หลากหลายในทางวิศวกรรม [21] ซึ่งประกอบด้วยสมการควบคุมระบบ และใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อแก้สมการ ในระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมกันด้วยจุดโหนด (Node) ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของปัญหาโดยประมาณต้องนำสมการควบคุมระบบมาสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์บน โดเมน จากนั้นจึงทำการแก้ปัญหาดังกล่าวซึ่งจะได้ผลเฉลยของปัญหาที่จุดต่อบน โดเมน แม้การพัฒนาระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์แรกเริ่มเดิมทีจะเน้นไปที่การศึกษาความเค้นใน โครงสร้างที่ซับซ้อน ตั้งแต่นั้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในสายงานที่เกี่ยวข้องทางกลศาสตร์ เพราะระเบียบการนี้มีความหลากหลาย อีกทั้งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีความยืดหยุ่นได้ ซึ่งทำให้ได้รับความสนใจในสถานศึกษาทางด้านวิศวกรรม และในอุตสาหกรรม ที่กล่าวข้างต้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิเคราะห์ได้ดังนี้ ความแข็งแรงของโครงสร้าง (Structural Analysis) ระบบของความร้อน (Thermal System Analysis) การไหล และการไหลที่มีการนำพาความร้อน (Flow Analysis and Flow Convection Heat Transfer) กระบวนการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน (Thermo Mechanical Process Analysis) เช่น การตีขึ้นรูป (Forging) การรีดขึ้นรูป (Rolling) งานฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) ฯลฯ [21]

2.9.1 โหนด (Node)

รูปที่ 2.25 โหนดเป็นตัวช่วยเชื่อมต่อโครงสร้างชิ้นเล็กๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) แต่ละเอลิเมนต์ให้ติดกันด้วยจุดของโหนด นอกจากนี้โหนดยังช่วยในการกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ที่มีองศาอิสระ โดยปกติแล้วโหนดจะอยู่ที่มุมของเอลิเมนต์ หรือ จุดของเอลิเมนต์ แล้วกลุ่มของเอลิเมนต์ และโหนดจะอยู่ติดกันเป็นกลุ่มที่เรียกว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) จะเป็นตัวแทนของชิ้นงานเพื่อนำไปจำลองเป็นสมการเมทริกซ์ (Matrix) เพื่อนำไปคำนวณที่ซับซ้อนต่อไป [23]

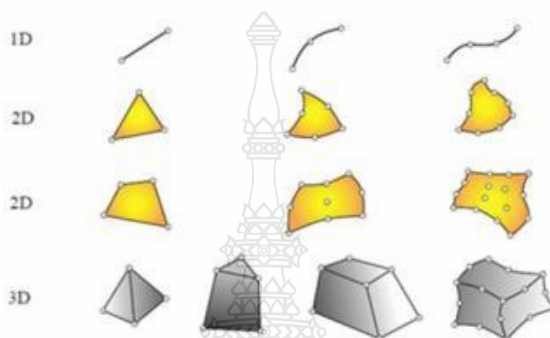


รูปที่ 2.25 โหนดในเอลิเมนต์แต่ละมิติ

2.9.2 เอลิเมนต์ (Element)

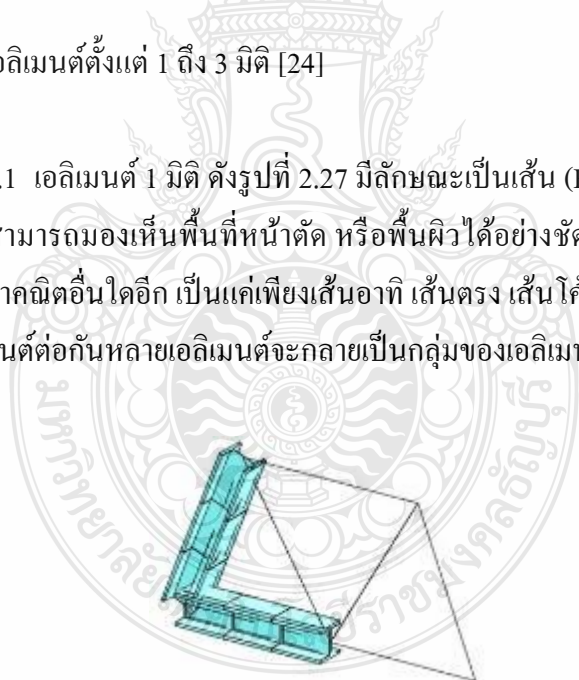
โดยทั่วไปแล้วเอลิเมนต์จะมีมิติอยู่ 1 ถึง 3 มิติ ดังรูปที่ 2.26 นอกจากนี้ยังมีเอลิเมนต์ชนิดพิเศษที่มีลักษณะ 0 มิติ ดังเช่น กลุ่มของจุด (Lumped Springs) เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าเอลิเมนต์ที่มีลักษณะ 1 มิติ จะเป็นเส้นตรง เส้นโค้ง (Beam Element) มักใช้ในการวิเคราะห์หงานลักษณะที่เป็นโครง เอลิเมนต์ 2 มิติ (Shell Element) จะเป็นรูปร่างรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมที่มีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์หงานที่เป็นพื้นผิว (Surface) ผนังบาง สอดท้ายแบบ 3 มิติ (Solid Element) โดยปกติส่วนมากรูปทรงเป็นแบบ Tetrahedral, Pentahedral, Hexahedral (Bricks) หรือ เป็นแบบปริซึม (Prisms) สามารถใช้กับงานที่เป็นปริมาตรตัน (Solid) ซึ่งเอลิเมนต์แต่ละมิติจะมีจุดที่สามารถสังเกตได้ง่าย จุด

เหล่านี้เรียกว่า จุด โหนด (Nodal Points) หรือ โหนด (Node) ประโยชน์แบบทวีคูณของโหนดคือ เป็นตัวกำหนดรูปร่างทางเรขาคณิตของเอลิเมนต์กับเอลิเมนต์ที่รูปร่างมีองศาเป็นแบบอิสระ โดยปกติ โหนดจะตั้งอยู่ที่มุม หรือ จุดปลายของเอลิเมนต์ดังแสดงในรูป มากกว่านั้นในทางกลศาสตร์เอลิเมนต์เหล่านี้จะมีความเฉพาะเจาะจงกับพฤติกรรมของวัสดุสำหรับตัวอย่างเช่น เชิงเส้นยืดหยุ่น (Linear Elastic) ในวัสดุที่เป็นท่อน (Bar Element) [24]



รูปที่ 2.26 ชนิดของเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1 ถึง 3 มิติ [24]

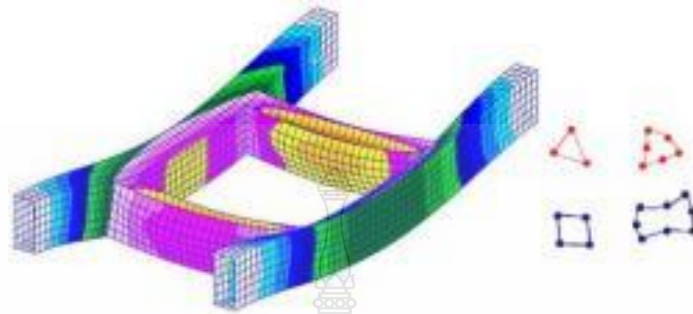
2.9.2.1 เอลิเมนต์ 1 มิติ ดังรูปที่ 2.27 มีลักษณะเป็นเส้น (Beam Element) เท่านั้นซึ่งมีแต่ความยาว และไม่สามารถมองเห็นพื้นที่หน้าตัด หรือพื้นผิวได้อย่างชัดเจน และนอกจากเป็นเส้นแล้วจะไม่มีรูปทรงเรขาคณิตอื่นใดอีก เป็นแค่เพียงเส้นอาทิ เส้นตรง เส้นโค้งเท่านั้น ซึ่งมักนิยมเรียกว่า บีม (Beam) โดยเอลิเมนต์ต่อกันหลายเอลิเมนต์จะกลายเป็นกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) [25]



รูปที่ 2.27 ชนิดของเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1 ถึง 3 มิติ [26]

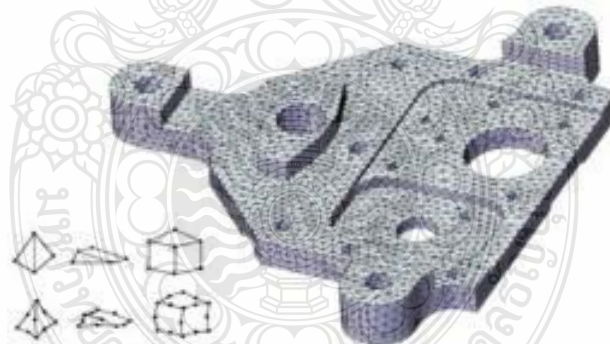
2.9.2.2 เอลิเมนต์ 2 มิติ (Shell Element) ดังรูปที่ 2.28 ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่เหลี่ยม โดยมีโหนด 3 และ 4 โหนดตามลำดับ แต่โดยพื้นฐานแล้วจะมีขั้นต่ำ 3 โหนด เอลิเมนต์ชนิด

นี้จะใช้กับงานที่เป็นพื้นผิว หรือ ผนัง ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น ผนังบาง (Thin Shell) และผนังหนา (Thick Shell) [26]



รูปที่ 2.28 การใช้เอลิเมนต์ 2 มิติ ในงานที่มีลักษณะเป็นผนัง [26]

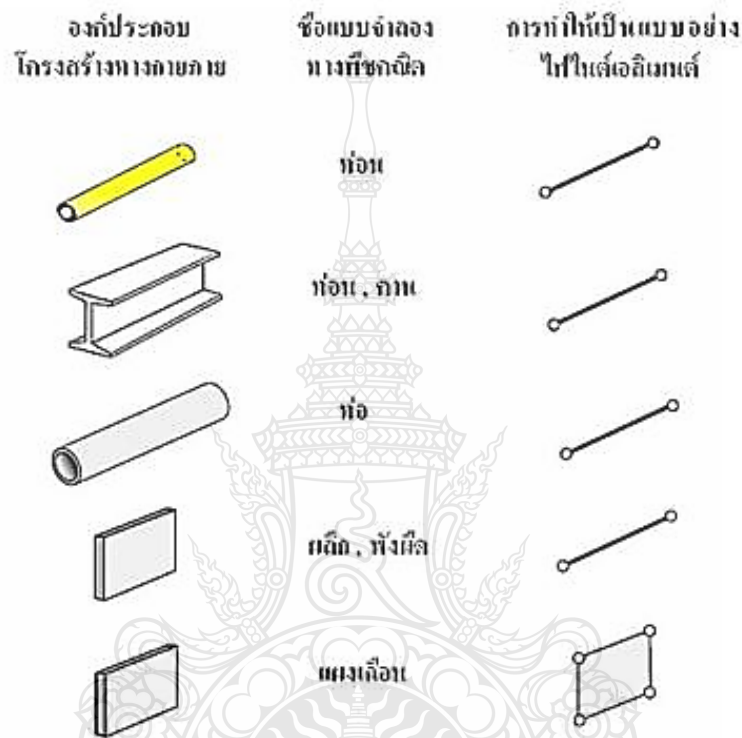
2.9.2.3 เอลิเมนต์ 3 มิติ (Solid Element) ดังรูปที่ 2.29 จะมีโครงสร้างเป็น 3 มิติ รูปทรงจะมีความกว้าง ยาว สูง โดยพื้นฐานของเอลิเมนต์ชนิดนี้จะมีโหนดตั้งแต่ 3 โหนดขึ้นไป เอลิเมนต์แบบนี้จะเหมาะกับกาจำลองโครงสร้างที่มีความหนา (Thick) เมื่อเทียบกับพื้นผิว [25]



รูปที่ 2.29 การใช้งานเอลิเมนต์ 3 มิติ ในงานที่เป็นปริมาตรตันที่มีความหนา [25]

การจัดหมวดหมู่แบ่งประเภทของระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ในทางกลศาสตร์โครงสร้าง ความเหนียวแน่น ความหลวมของเอลิเมนต์บนพื้นฐานจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางกายภาพดั้งเดิม ที่ชี้แจงหัวข้อนี้เพราะเป็นส่วนย่อยของระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งทำให้มีความเข้าใจในเทคนิคการออกแบบจำลองขั้นสูง ดังเช่น รายละเอียดลำดับขั้น และการวิเคราะห์โดยรวมกับเฉพาะแห่ง ดังรูปที่ 2.30 แสดงโครงสร้างดั้งเดิมของเอลิเมนต์ (Primitive Structural Element) โดยเอลิเมนต์เหล่านี้จะ

จำแนกตามโครงสร้างกลศาสตร์ โครงสร้างซึ่งเกี่ยวเนื่องกับลักษณะทางกายภาพของ โครงสร้าง เอลิเมนต์ทั้งหลายเหล่านี้ปกติมาจากกลศาสตร์ของวัสดุ (Mechanics of Materials) ซึ่งทำให้ง่ายต่อการเข้าใจ ทฤษฎีทางกายภาพของวัสดุมากกว่าทางคณิตศาสตร์ ดังตัวอย่างรูปที่ 2.30 เอลิเมนต์มีลักษณะเป็น แท่ง (Bars), ก้าน (Cables) และเส้น (Beams) [24]



รูปที่ 2.30 ตัวอย่าง โครงสร้างเอลิเมนต์ดั้งเดิม [24]

สำหรับการแบ่งเอลิเมนต์ในกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ที่เกี่ยวข้องกันด้วยจุดต่อ (Node) โดยการแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์สามารถใช้หลักการดังนี้ คือ ควรหลีกเลี่ยงการแบ่งเอลิเมนต์ที่มีรูปร่างผิดปกติ เช่น เอลิเมนต์ที่มีมุมป้านมากๆ หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีด้านยาวมากๆ เอลิเมนต์ที่มุมแคบมากๆ และมีลักษณะอัตราส่วนกว้าง (Large Aspect Ratio) เป็นต้น ควรเลือกใช้เอลิเมนต์ที่เป็นสี่เหลี่ยมด้านเท่าจะดีมาก หรืออัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความยาวมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง อีกทั้งควรใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กๆ เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ละเอียดในส่วนที่มีความหนาแน่น และแบ่งเอลิเมนต์ขนาดใหญ่ขึ้นในบริเวณที่ไกลออกไป [24]

2.9.3 ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Software) ในการวิเคราะห์โดยปกติทั่วไปจะประกอบด้วย 3 หลักการดังนี้ [23,27]

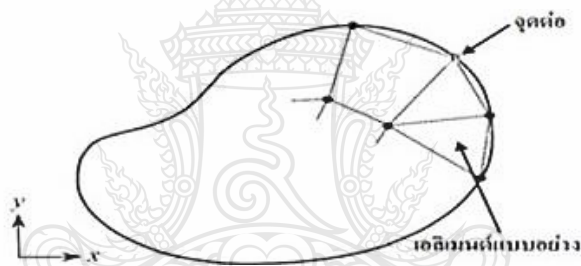
2.9.3.1 การเตรียมกระบวนการ (Pre Processing)

2.9.3.2 การวิเคราะห์ (Analysis)

2.9.3.3 การนำเสนอกระบวนการ (Post Processing)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลัก อธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่าง ๆ กัน เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง (elasticity problem) ปัญหาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความร้อน (Thermal problem) รวมทั้งปัญหาของการไหล (fluid problem) เป็นต้น ดังรูปที่ 2.31

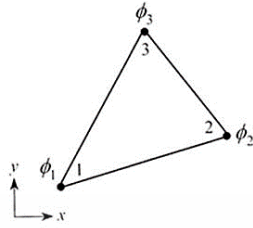


รูปที่ 2.31 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ กัน

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element interpolation functions) เช่นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม เอลิเมนต์นี้ประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 แสดงดังรูปที่ 2.32 โดยที่จุดต่อเป็นตำแหน่งที่ตั้งของตัวไม่รู้ค่า (nodal unknowns) ซึ่งก็คือ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ตามลำดับ ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่ออาจเป็นค่าของการเสียรูป (displacement) หากเราวิเคราะห์ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง หรืออาจเป็นค่าของอุณหภูมิหากเราทำปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นความเร็วของของไหล หากเราวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการไหล เป็นต้น ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นั้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ คือ

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (2.12)$$

โดย $N_i(x, y), i = 1, 2, 3$ แทนฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์



รูปที่ 2.32 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ

สมการ 2.13 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ คือ

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= [N_1 N_2 N_3] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \\ &= [N]_{(1 \times 3)} \{\phi\}_{(3 \times 1)} \end{aligned} \quad (2.13)$$

โดย $[N]$ แทนเมทริกซ์ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ และ $\{\phi\}$ แทนเวกเตอร์เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้น

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (element equations) ดังตัวอย่างเช่นสมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่าง จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e \quad (2.14)$$

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (2.15)$$

ขั้นตอนที่ 3 นี้ ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของการศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการ 2.15 สามารถทำได้โดย วิธีการโดยตรง (direct approach) วิธีการแปรผัน (variation approach) วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals)

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบรวมกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการรวม (system of simultaneous equations) ในรูปแบบดังนี้

$$\sum (\text{element equations}) \Rightarrow [K]_{\text{sys}} \{ \phi \}_{\text{sys}} = \{ F \}_{\text{sys}} \quad (2.16)$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ลงในระบบสมการรวม แล้วจึงแก้ระบบสมการรวมนี้เพื่อหา $\{ \phi \}_{\text{sys}}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ (nodal unknowns) ซึ่งอาจเป็นค่าของการเคลื่อนตัวตามจุดต่อต่าง ๆ ของโครงสร้าง หรือเป็นค่าของอุณหภูมิที่จุดต่อ หากเป็นปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นค่าของความเร็วของของไหลตามจุดต่อหากเป็นปัญหาเกี่ยวกับการไหล เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่าง ๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถนำมาใช้เพื่อหาค่าอื่น ๆ ที่ต้องการต่อไปได้อีก เช่น เมื่อรู้ค่าการเสียรูป (Displacement) ตามจุดต่อต่าง ๆ ของโครงสร้างก็สามารถนำไปใช้หาค่าความเครียด (strain) และความเค้น (stress) ได้ตามลำดับ หรือเมื่อรู้ค่าอุณหภูมิที่จุดต่อก็สามารถคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ หรือเมื่อรู้ค่าความเร็วของของไหลที่จุดต่อก็สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลได้ เป็นต้น

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้ จะเห็นได้ว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีที่มีระเบียบแบบแผนอย่างเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีหัวใจสำคัญอยู่ที่การสร้างสมการของเอลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 3

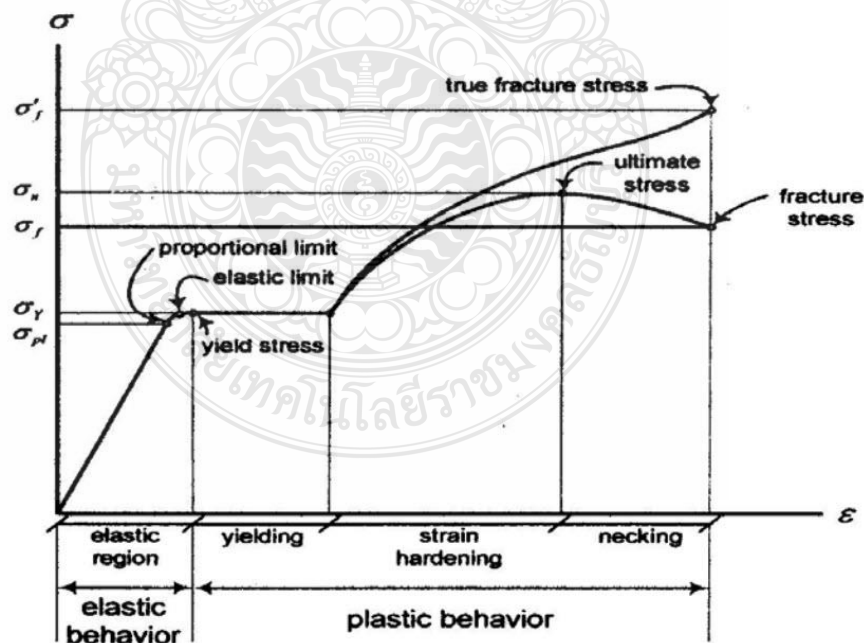
2.10 การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะ

การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะวัสดุแผ่น (Sheet Metal) พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปในช่วงถาวร (Plasticity) และพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น (Elasticity) เมื่อวัสดุซึ่งได้รับแรงกระทำจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรที่กระทำออก วัสดุจะคืนตัวเล็กน้อย เมื่อไม่ได้รับแรงกระทำ ในส่วนพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปถาวรเมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจนวัสดุเลยจุดคราก (Yield Point) ถ้านำแรงที่กระทำออกวัสดุจะไม่กลับคืนตัว วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร คุณสมบัติทางกลที่สำคัญอันหนึ่งซึ่งจะมีผลต่อการขึ้นรูปของวัสดุโลหะแผ่นคือ ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและ

ความเครียด (True Stress-Strain Relation) ซึ่งในกรณีที่ใช้กฎยกกำลัง (Power Law) จะต้องหาค่าคุณสมบัติของค่า Strength Coefficient (K) และ Strain Hardening Exponent (n) โดยค่า n เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการขึ้นรูป ถ้าค่า n มีค่ามากจะทำให้โลหะแผ่นมีความสามารถในการขึ้นรูปดี และค่าคุณสมบัติที่ไม่เท่ากันทุกทิศทางในแนวระนาบ (Planar Anisotropy) ซึ่งค่าที่สำคัญคือค่า R (r -value หรือ Plastic Strain Ratio) หาได้จากสัดส่วนความเครียดในแนวความกว้างกับความเครียดในแนวความหนา ซึ่งค่า R เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในด้านความต้านทานการหดตัวในแนวความหนา เนื่องจากเหล็กแผ่นผ่านการรีดมาทำให้อนุภาคภายในมีทิศทางตามแนวรีด ส่งผลให้ความสามารถในการยืดหดตัวของเหล็กแผ่นแตกต่างกัน ดังนั้นในการหาค่า R จำเป็นต้องหาอย่างน้อย 3 แนว คือค่า R ในทิศตามแนวรีดทิศ 45° กับแนวรีด และทิศทางตั้งฉากกับแนวรีด ถ้าค่า R แตกต่างกันมาก จะทำให้ขอบของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปยาวไม่เท่ากันหรือการเป็นคลื่นที่ขอบชิ้นงาน (Earing)[28]

2.10.1 การเปลี่ยนรูปช่วงยืดหยุ่น (Elastic Theory)

เมื่อวัสดุได้รับแรงดึงจะทำให้วัสดุเกิดการยืดตัวซึ่งสามารถแบ่งพฤติกรรมการยืดตัวออกเป็น 2 ส่วน หลัก ๆ คือ การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นหรือช่วงอีลาสติกและการเปลี่ยนรูปถาวรหรือช่วงพลาสติก ดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ [28]

คุณสมบัติของวัสดุที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งเขียนอยู่ในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริง (True Stress-True Strain Curve) หรือเรียกอีกชื่อว่า (Flow Curve) ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linearity) หรือไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linearity) โดยมีความสำคัญในการนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อช่วยให้ทำนายผลได้ถูกต้องแม่นยำ ในการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะกำหนดให้วัสดุของแบบจำลองมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropy) ซึ่งจะแตกต่างจากพฤติกรรมของวัสดุจริงเนื่องจากวัสดุจริงมีการเรียงตัวของผลึกไม่เท่ากันทุกทิศทางทำให้วัสดุมีคุณสมบัติแบบ Anisotropy โดยที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงของวัสดุสามารถหาได้จากการทดสอบดึง (Uni-Axial Tension Test) หรือการทดสอบกด (Compression Test) ในการทดสอบแรงดึงขึ้นทดสอบชนิดหน้าตัดกลมหรือชนิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะถูกแรงกระทำโดยการดึงหรือกดเพิ่มแรง (F) อย่างช้า ๆ และควบคุมความเร็วให้ขึ้นทดสอบเปลี่ยนรูปอย่างสม่ำเสมอตามแนวแกน แล้ววัดค่าแรงและระยะการเปลี่ยนรูปของขึ้นทดสอบ จนกระทั่งขึ้นทดสอบเกิดความเสียหายหรือขาดออกจากกัน ผลการทดสอบที่ได้จะนำไปหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุขึ้นทดสอบ ซึ่งความเค้นที่เกิดภายในวัสดุสามารถหาได้ โดยนำแรงภายนอก F_i ในแต่ละช่วงของการทดสอบหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน [29]

$$\sigma = \frac{F_i}{A_o} \quad (2.17)$$

โดย F_i คือ แรงดึงหรือโหลด A_o คือพื้นที่หน้าตัดเดิมของขึ้นทดสอบ และ σ คือความเค้นเฉลี่ยหรือความเค้นเชิงวิศวกรรม (Engineering Stress) ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด A_o

สำหรับความเครียดเชิงวิศวกรรม (Engineering Strain) สามารถคำนวณได้จากความยาวที่เปลี่ยนไปหารด้วยความยาวเดิมของขึ้นทดสอบ

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} = \frac{L_i - L_o}{L_o} \quad (2.18)$$

โดย ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป L_o คือความยาวเดิมของขึ้นทดสอบ L_i คือความยาวขณะใดขณะหนึ่งและ ε คือความเครียดเฉลี่ย เป็นความเครียดเชิงวิศวกรรม ซึ่งมีทิศทางเดียวกับทิศทางของแรง F ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวเดิมของขึ้นทดสอบเรียกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเชิง

วิศวกรรม (Engineering Stress-Strain Curve) ซึ่งในการทดสอบจริง ในขณะที่ระดับความเค้นในชิ้นงานทดสอบเพิ่มเลยความเค้นคราก พื้นที่หน้าตัดและความยาวของชิ้นงานทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจนเกิดคอคอดและขาดออกจากกันในที่สุด ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถหาได้โดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละขณะ ซึ่งเรียกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง (True Stress True Strain Curve) หรือเรียกอีกชื่อว่า (Flow Curve) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร ถ้า $\tilde{\sigma}$ เป็นความเค้นจริงและ $\tilde{\epsilon}$ เป็นความเครียดจริง ดังสมการที่ 2.19 และ 2.20

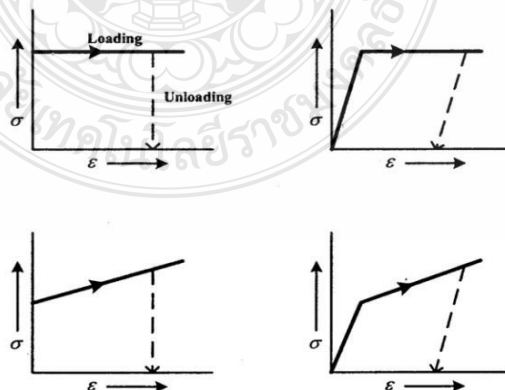
$$\tilde{\sigma} = \sigma(1 + \epsilon) \quad (2.19)$$

$$\tilde{\epsilon} = \ln \frac{A_o}{A_i} = 2 \ln \frac{d_o}{d_i} \quad (2.20)$$

โดย d_i คือเส้นผ่าศูนย์กลางใดๆ d_o คือเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ

2.10.2 การเปลี่ยนรูปถาวรหรือในช่วงพลาสติก (Plasticity Theory)

ในการขึ้นรูปวัสดุโลหะแผ่นให้มีรูปทรงตามที่ต้องการจะต้องให้แรงกระทำกับวัสดุเพื่อให้วัสดุเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ผลจากการทดสอบการดึงวัสดุพบว่าพฤติกรรมของวัสดุแบ่งได้เป็นสองช่วงคือ ช่วงยืดหยุ่นและช่วงเปลี่ยนรูปอย่างถาวรหรือช่วงพลาสติกพฤติกรรมเหล่านี้ อยู่ด้วยกันหลายลักษณะซึ่งสามารถแสดงด้วยแบบจำลอง (Model) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ [28]

ในการพิจารณาการเปลี่ยนรูป จะใช้เกณฑ์การคราก (Yield Criterion) เป็นเกณฑ์ที่จะกำหนดการเปลี่ยนรูป จากอิลาสติกไปเป็นพลาสติก และทฤษฎีพื้นฐานที่นิยมใช้ในการทำนายการครากตัวของโลหะแผ่นคือทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (Treska Yield Theory) ทฤษฎีฟอนมิสเซส (Von Misses Theory) และทฤษฎีของฮิล (Hill Theory) ในส่วนของทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดและทฤษฎีของฟอนมิสเซสจะมีข้อสมมุติฐานว่าวัสดุมีคุณสมบัติทางกลเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropy) ส่วนทฤษฎีของฮิล จะพิจารณาอิทธิพลของโลหะที่ผ่านการรีด (Anisotropy) ในการใช้กฎเกณฑ์การครากสำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานนี้จะใช้ทฤษฎีการครากของฮิล ทฤษฎีนี้เหมาะสำหรับวัสดุโลหะแผ่นที่มีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก [29]

2.10.3 แอนไอโซทรอปิกของ Hill 1948

ได้เสนอการพิจารณาพลาสติกแอนไอโซทรอปิกโดยไม่คำนึงถึงรูปผลึกเดิม โดยสมมติว่าวัสดุเอกพันธ์แสดงคุณลักษณะโดยแอนไอโซทรอปิก 3 แกนตั้งฉากกันคือ x , y และ z ซึ่งคุณสมบัติสมมาตร (ระนาบ x - y , y - z และ z - x คือระนาบสมมาตร) ในแผ่นรีดมักใช้ทิศทาง x , y และ z เป็นทิศทางรีด ทิศทางขวางการรีด และทิศทางความหนาตามลำดับ ทฤษฎีนี้ยังสมมติว่า ความต้านแรงดึงครากและแรงกดครากในทิศทางที่กำหนดมีค่าเท่ากันเกณฑ์การคราก แอนไอโซทรอปิกที่เสนออยู่ในรูปสมการที่ 2.21

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (2.21)$$

เมื่อ $f(\sigma_{ij})$ คือ ฟังก์ชันการคราก (ใช้ได้กับวัสดุแอนไอโซทรอปิกและไอโซทรอปิก) หาอนุพันธ์ของสมการที่ 2.21 ได้กฎการไหล

$$\begin{aligned} d\varepsilon_x &= d\lambda \left[H(\sigma_x - \sigma_y) + G(\sigma_x - \sigma_z) \right], d\varepsilon_{yx} = d\varepsilon_{zy} = d\lambda L\tau_{yz} \\ d\varepsilon_y &= d\lambda \left[F(\sigma_y - \sigma_z) + H(\sigma_y - \sigma_x) \right], d\varepsilon_{zx} = d\varepsilon_{xz} = d\lambda L\tau_{zx} \\ d\varepsilon_z &= d\lambda \left[H(\sigma_z - \sigma_y) + G(\sigma_z - \sigma_x) \right], d\varepsilon_{xy} = d\varepsilon_{yx} = d\lambda L\tau_{xy} \end{aligned} \quad (2.22)$$

มีฉะนั้นแล้วอนุพันธ์ย่อยจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ใช้ไม่ได้คือ $d\varepsilon_{yz} = 2 \cdot d\lambda L\tau_{yz}$ และ $d\varepsilon_{xy} = 0$ สังเกตว่าสมการที่ 2.22 คือ $d\varepsilon_x + d\varepsilon_y + d\varepsilon_z = 0$ แสดงว่าปริมาตรคงตัวพิจารณาการ

ทดสอบการดึงในทิศทาง x อีกครั้งหนึ่ง แทนค่า $\sigma_x = X$, $\sigma_y = \sigma_z = 0$ ในสมการ 2.22 ได้ ความเครียด

$$\begin{aligned}d\varepsilon_x &= d\lambda(H + G)X \\d\varepsilon_y &= -d\lambda(H)X \\d\varepsilon_z &= -d\lambda(G)X\end{aligned}\tag{2.23}$$

เนื่องจากอัตราส่วนความเครียดสำหรับการทดสอบการดึงในทิศทาง x นิยามว่า

$$R = R_0 = \left(\frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_z} \right)$$

ดังนั้น

$$R = \frac{H}{G}\tag{2.24}$$

ในทำนองเดียวกัน นิยามให้ $P = R_0$ คืออัตราส่วนความเครียดในทิศทางแกน Y และ $P = d\varepsilon_x / d\varepsilon_z$ เมื่อ $\sigma_y = Y$ และ $\sigma_x = \sigma_z = 0$ จากสมการที่ 2.22 ได้

$$P = \frac{H}{F}\tag{2.25}$$

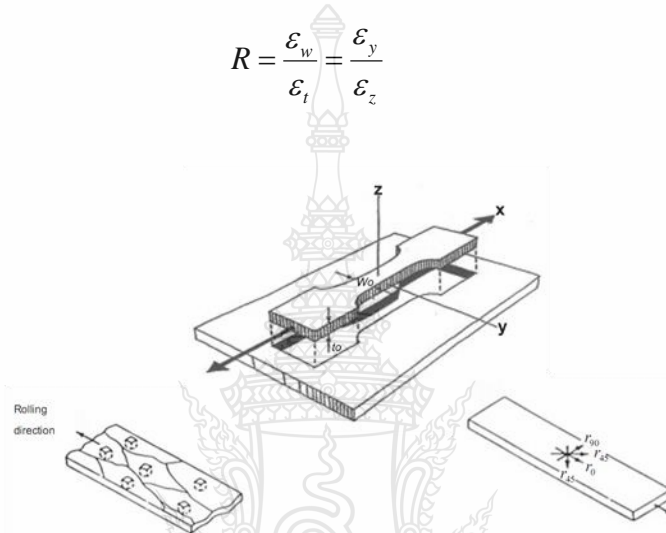
2.10.4 พลาสติกแอนไอโซทรอปี (Plastic Anisotropy)

สาเหตุที่สำคัญมากที่สุดซึ่งทำให้โลหะมีคุณสมบัติพลาสติกแอนไอโซทรอปีก็คือ ทิศทางของเกรนทิศทางที่เป็นไปหรือเนื้อของรูปผลึกที่พัฒนาขึ้นในเหล็กกล้าที่เกิดจากการหมุนของ แลตทิซในเกรนระหว่างการเปลี่ยนรูป โดยการสลิบหรือการทวิน (Twinning) พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของชิ้นทดสอบการดึงที่เป็นแผ่นแถบ ตัดออกมาจากแผ่นรีด เมื่อได้รับแรงดึงในแนวแกน สามารถเกิดการครากได้เฉพาะโดยการสลิบในระนาบความต้านแรงดึงครากของชิ้นทดสอบที่ตัดทำมุม θ กับทิศทางการรีดไม่แปรผันกันมากนัก ผลสรุปอย่างผิดพลาดว่าวัสดุเป็นไอโซทรอปีก ความผิดพลาดอาจเกิดขึ้นได้ถ้าวัดความดึงเครียดในแนวขวางซึ่งเป็นผลมาจากการดึง ถ้าทิศทางเป็นอุดมคติ ความ

หนาไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก การยึดในแนวยาวมีผลทำให้ความกว้างขึ้นทดสอบลดลง

พารามิเตอร์ที่มีประโยชน์คืออัตราส่วน R ของความเครียดพลาสติกเมื่อ w และ t คือทิศทางความกว้างและความหนาของชิ้นทดสอบการดึงตามลำดับ ดังนั้น $\varepsilon_w = \ln(w/w_0)$ และ $\varepsilon_t = \ln(t/t_0)$ สำหรับวัสดุไอโซทรอปิก $R = 1$

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (2.26)$$



รูปที่ 2.35 ชิ้นทดสอบตามทิศทางกริด [28]

รูปที่ 2.35 ในการวัดค่า R ถึงแม้ว่า มีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้าง ε_w ต่อแนวหนาความเครียดในแนวหนา ε_t ไม่สามารถวัดได้อย่างแม่นยำบนแผ่นบาง เพราะฉะนั้นความเครียดในแนวหนามักหาได้จาก การวัดความเครียดในแนวยาวและแนวกว้างโดยใช้ปริมาตรคงตัว $\varepsilon_t = (\varepsilon_l + \varepsilon_w)$ เพื่อการวัดที่แม่นยำ ควรใช้ภาคตัดลดลงให้ค่อนข้างยาวมากเมื่อเทียบกับความกว้าง และภาคตัดทดสอบที่ใช้วัดค่า ε_t และ ε_w ควรอยู่ห่างจากบ่ามาก

บางครั้งค่า R ไม่แปรผันตามความเครียด เพราะฉะนั้น อัตราส่วนของความเครียดที่เพิ่มขึ้น $d\varepsilon_w / d\varepsilon_t = R$ ค่า R คงตัวมีความสำคัญเมื่อใช้ R ประเมินค่าคงตัวในเกณฑ์การครากไอโซทรอปิก

สำหรับเหล็กกล้าค่า R และ โมดูลัสยืดหยุ่น E มักแปรผันคล้ายกันตามเนื้อรูปผลึก แม้ว่า สหสัมพันธ์พื้นฐานไม่แม่นยำ แต่ก็มีพื้นฐานสำหรับใช้กับเครื่องมือวัดเชิงอุตสาหกรรมขนาดเล็กซึ่งวัดค่า E ของแผ่นแถบบางด้วย Sonic Velocity และปรับให้อ่านค่า R ได้ โดยปกติค่า R มักแปรผันตามทิศทางทดสอบ θ และมักใช้แสดงคุณลักษณะของวัสดุโดยค่า R เฉลี่ยคือ \bar{R}

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45^\circ} + R_{90^\circ}}{4} \quad (2.27)$$

2.10.5 ความเครียดแข็ง (Strain Hardening)

ความเครียดแข็งเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีคุณสมบัติเหนียวที่ใช้ในงานขึ้นรูปเย็น เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำผ่านจุดครากตัวทำให้เกิดความเครียดสะสมขึ้นภายในวัสดุ จึงต้องใช้แรงที่มากกว่าเดิมในการทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปร่าง สำหรับการวิเคราะห์วัสดุแบบ อิลาสติก – พลาสติก ได้แสดงพฤติกรรมความเครียดแข็งของวัสดุ ดังนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่น จะเป็นในลักษณะเชิงเส้นการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำจะทำให้เกิดความเครียดเป็นสัดส่วนซึ่งหลักการนี้ จะเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's Law) [12]

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.28)$$

เมื่อ σ คือ ค่าความเค้น

E คือ ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นหรือ โมดูลัสของยัง

ε คือ ค่าความเครียด

สำหรับคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปในช่วงพลาสติกครั้งนี้ เป็นไปตามกฎยกกำลัง (Power Law) [7]

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.29)$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (Strength coefficient)

n คือ เลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (Strain - hardening exponent)

สำหรับค่าตัวเลขยกกำลังหรือความเครียดแข็ง n และค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรง K สามารถหาได้โดยทำการใส่ค่า \log เข้าไปในสมการยกกำลังซึ่งทำให้สามารถได้สมการใหม่

$$\log \sigma = n \log \varepsilon + \log K \quad (2.30)$$

2.11 ทบทวนวรรณกรรม

กิตติภักดิ์ รัตนจันทร์ [1] เพื่อศึกษาหาความสามารถในการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นของครอปีดิว (Drawbead) ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวต่างกันเช่นรูปร่างและความสูงของครอปีดิว ความเร็วในการดึงขึ้นรูป สภาพการหล่อลื่นและสมบัติของโลหะแผ่น สำหรับในการวิจัยนี้ใช้ครอปีดิวที่มีรูปร่างแบบครึ่งทรงกระบอกกลม (Half-Round Drawbead) โดยมีตัวแปรที่สนใจคือความสูงของครอปีดิว สภาพการหล่อลื่นและความเร็วในการดึงขึ้นรูป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสูงของครอปีดิวและการหล่อลื่นมีผลกระทบต่อควบคุมการไหลของโลหะแผ่นที่จะเข้าสู่ช่องเปิดคายเป็นอย่างมาก เมื่อเพิ่มความสูงครอปีดิวให้สูงขึ้นจะต้องใช้แรงกดขึ้นงานเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่รอยยับที่เกิดขึ้นจะลดลง ในส่วนของการหล่อลื่นพบว่าเมื่อไม่ใช้สารหล่อลื่นจะไม่สามารถดึงขึ้นรูปได้เพราะจะเกิดการฉีกขาดที่ผนังขึ้นงานก่อน สำหรับความเร็วในการดึงขึ้นรูปในช่วงที่ใช้ในการทดลองพบว่า มีผลต่อคุณภาพของขึ้นงานสำเร็จน้อยมาก

M.Samuel.[5] ได้ศึกษาอิทธิพลรูปร่างของครอปีดิวในการขึ้นรูปโลหะ ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองของครอปีดิวเปรียบเทียบกับรูปร่างของครอปีดิวระหว่างร่องปิดที่เป็นแบบครึ่งวงกลมกับร่องปิดที่เป็นแบบสี่เหลี่ยมและวิเคราะห์ความแตกต่างของการไหลตัวของวัสดุในการใช้ร่องปิดทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกับผลการทดลอง จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงความหนาและความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผิวของร่องปิดแบบสี่เหลี่ยมมีค่าสูงกว่าร่องปิดแบบครึ่งวงกลม

สุริยา ประสมทอง [27] ได้ศึกษาอิทธิพลรูปร่างของครอปีดิวในการลากขึ้นรูปโลหะที่มีรูปร่างไม่ สมมาตร โดยการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้ครอปีดิวที่มีรูปร่างหน้าตัดครึ่งวงกลม , หน้าตัดรูปตัววี และ หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ อิทธิพลแรงกดขึ้นงาน วัสดุที่ใช้ในการศึกษา เหล็กเกรด SPCC,SPCD และ SPCE ผลการทดลองพบว่ารูปร่างของครอปีดิว ,แรงกดขึ้นงานและชนิดของวัสดุ มีผลกระทบต่อการไหลตัวของโลหะแผ่นเป็นอันมาก จากการเปรียบเทียบผลการทดลองพบว่า แรงกดขึ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ครอปีดิวหน้าตัดครึ่งวงกลม และวัสดุเกรด SPCE โลหะสามารถไหลตัวได้ดีทำให้ขึ้นงานไม่เกิดการฉีกขาดและรอยยับลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่ามีความแตกต่างกันเฉลี่ย 7.4 เปอร์เซ็นต์ โดยวัดจากความหนาที่เปลี่ยนไปของวัสดุแต่ละจุด ดังนั้นจึงสรุป ผลการเปลี่ยนรูปร่างสุดท้ายของวัสดุจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับรูปร่างจริง ซึ่งผลการทดลองและวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายและหาแนวทางการแก้ไขรูปร่างของครอปีดิวในการลากขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

A. Watanapa S. Torsakul [30] ได้ศึกษาอิทธิพลความหยาบผิวของครอว์บีคที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปทรงไม่สมมาตร โดยทดสอบอิทธิพลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปคือ ความหยาบผิวครอว์บีคและวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นตัดเปล่า (Blank Geometry) ในขั้นตอนของการทดสอบจะมีการบันทึกผลแรงลากขึ้นรูปและแรงกดขึ้นงานในขณะที่ขึ้นรูปทุกครั้ง การวัดผลการทดลองจะนำเอาชิ้นงานหลังจากขึ้นรูปมาตรวจสอบความเสียหายและวัดขนาดของความเครียด (Strain) ที่เกิดในแต่ละตำแหน่งที่ต้องการทราบบนชิ้นงานเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์ผลพบว่าอิทธิพลความหยาบผิวของครอว์บีคทั้งสามผิว ผิวของครอว์บีคที่มีความละเอียดมาก จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อยสุด จะเกิดความเครียดที่ชิ้นงานน้อยสุด ความหนาที่เปลี่ยนไปของชิ้นงานมีค่าน้อย และผิวของชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปดีที่สุด และที่วัสดุ SPCE จะใช้แรงในการขึ้นรูปน้อยสุด จะเกิดความเครียดที่ชิ้นงานน้อยสุด ความหนาที่เปลี่ยนไปของชิ้นงานมีค่าน้อย และผิวของชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปดีที่สุด จากผิวครอว์บีคทั้งสามผิว มีผลของความหยาบผิวจริง แต่มีค่าความแตกต่างไม่มากนัก อาจจะไม่ต้องนำมาเป็นตัวแปรในการใช้งานจริง

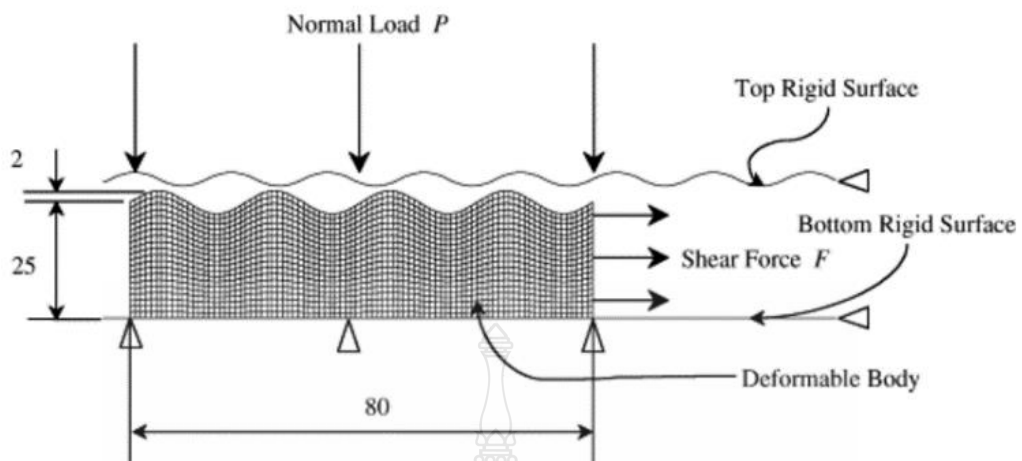
บุญส่ง จงกลณี [31] ได้ศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์ที่จะใช้ในการลากขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีลักษณะไม่สมมาตร เพื่อใช้ในการทดสอบอิทธิพลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูป 4 ตัวแปร รูปร่างแผ่นเปล่า (Blank geometry) ขนาดแรงกดขึ้นงาน (Blank holding force : BHF) ชนิดของสารหล่อลื่น (Lubricant type) และรูปร่างครอว์บีค (Drawbead geometry) ในขั้นตอนการทดสอบจะมีการบันทึกผลแรงกดขึ้นรูปและแรงกดขึ้นงานในขณะที่ขึ้นรูปทุกครั้ง การวัดผลการทดลองจะนำเอาชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วมาตรวจสอบความเสียหายและวัดขนาดของความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไป จากการทดลองพบว่า รูปร่างของแผ่นตัดเปล่า และแรงกดขึ้นงานที่เหมาะสมนอกจากจะสามารถลดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแล้วยังสามารถลดระดับความเครียดบนชิ้นงานได้อีกด้วย ขนาดของแรงกดขึ้นงานที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นตัดเปล่าและกลไกของแม่พิมพ์ สารหล่อลื่นจะลดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ผิวสัมผัสของชิ้นงานโดยตรง และการใช้ครอว์บีคที่มีขนาดที่เหมาะสม จะสามารถควบคุมการไหลของแผ่นตัดเปล่าเข้าสู่สายได้ดี จะทำให้สามารถลดขนาดของความเครียดในบริเวณวิกฤติได้ดี อย่างไรก็ตามการใช้ครอว์บีคจะต้องมีการปรับขนาด แผ่นตัดเปล่าให้โตขึ้น เพิ่มแรงกดขึ้นงาน และเลือกใช้สารหล่อลื่นให้เหมาะสม

Meiders, et al. [32] ได้ศึกษาการนำครอว์บีคมาใช้ในการขึ้นรูปโลหะ โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวแปรที่สำคัญประกอบด้วย แรงในการควบคุมการไหลตัวของโลหะ (Drawbead Restraining Force) การเปลี่ยนแปลงความหนาแบบพลาสติก, และ

แรงยกครอปีดัว (Drawbead Lift Force) ได้มีการจำลองครอปีดัวแบบสองมิติ และการทดลองจริงค่าความแตกต่างทางคณิตศาสตร์ทั้งสองค่าจะเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความหนาแบบพลาสติกได้

ทวิภัทร์ บูรณชิตติ [33] ได้ศึกษาการขึ้นรูปโลหะแผ่นในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ที่เกิ
ปัญหาการเกิดรอยย่น การฉีกขาด และการสปริงตัวกลับ ทั้งนี้กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นมีการกำหนดค่าตัวแปรกระบวนการผลิตต่างๆ ที่สำคัญเช่น แรงกดของตัวประสานหรือแรงจับยึดแบบลงค์ตำแหน่งของครอปีดัว และขนาดรูปร่างของแบบลงค์ เป็นต้นงานวิจัยนี้ได้นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นมาประยุกต์ในการจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะแผ่นของชิ้นส่วนวางยึดเครื่องยนต์มาเป็นกรณีศึกษา โดยทำการศึกษาถึงอิทธิพลของแรงกดของตัวประสานและตำแหน่งครอปีดัวแบบต่างๆ ต่อการไหลของวัสดุในกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่มีต่อการฉีกขาดและการเกิดรอยย่นซึ่งเป็นเงื่อนไขการออกแบบหลัก แผ่นโลหะที่ใช้ในการศึกษานี้คือ เหล็กกล้า JSC440W ที่มีความหนาเริ่มต้น 1 มม. ความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนนี้ถูกพิจารณาโดยการเปรียบเทียบกับแผนภูมิขีดจำกัดการขึ้นรูป ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่สำคัญทางด้านความไม่เสถียรทางพลาสติกของแต่ละชนิดโลหะแผ่น ผลจากการศึกษาพบว่าครอปีดัวสามารถควบคุมการไหลของวัสดุได้ดีกว่าการใช้แรงกดของตัวประสานเพียงอย่างเดียว การเลือกตำแหน่งครอปีดัวมีความสำคัญ โดยการวางแผนครอปีดัวอย่างสมำเสมอ นั้นไม่เพียงพอต่อการขึ้นรูปสำหรับกรณีศึกษาที่ใช้ครอปีดัวแบบ 6 ช่วงตำแหน่ง จะสามารถช่วยในการลดปัญหาทั้งการฉีกขาดและรอยย่นได้ดีในกรณีศึกษา

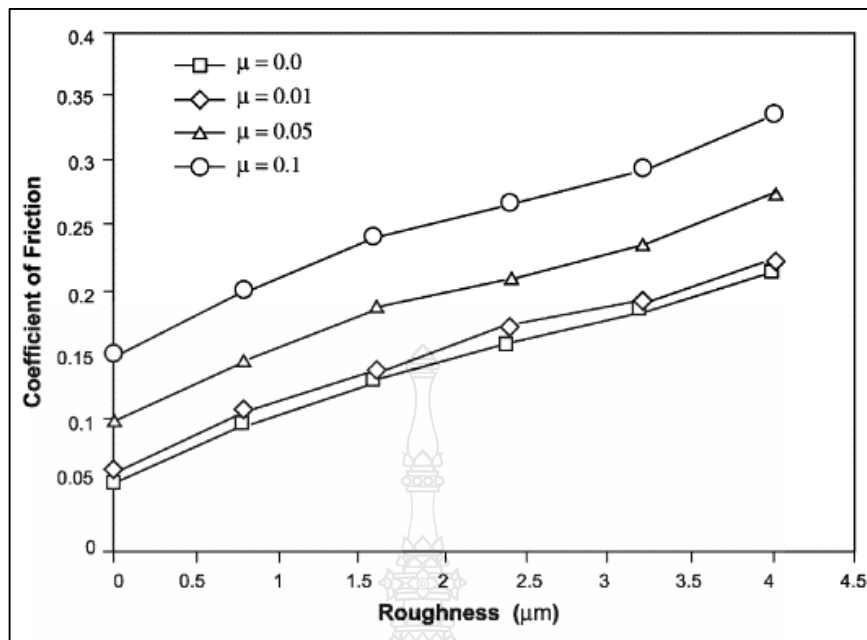
S. Zhang และคณะ [34] ได้ทำการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พฤติกรรมแรงเสียดทานในการขึ้นรูปโลหะ โดยกำหนดเงื่อนไขการจำลองเป็นแบบ 2 มิติ กำหนดระดับความหยาบผิวของชิ้นงานอยู่ที่ 4.0 ไมโครเมตร (4.0 Ra) กำหนดระดับความหยาบผิวของเครื่องมืออยู่ในช่วง 0-4.0 ไมโครเมตร (0-4.0 Ra) และกำหนดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในการยึดเกาะอยู่ในช่วง 0.0-0.1. (μadhesive) ซึ่งเงื่อนไขในการจำลองแสดงดังตารางที่ 2.4 ผลการจำลองตามเงื่อนไขที่กำหนด พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความหยาบผิว และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในการยึดเกาะเพิ่มขึ้นสำหรับโหนดปกติที่ดังรูปที่ 3.37



รูปที่ 2.36 แสดงรูปร่างเรขาคณิตและโหลดในการจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์ [34]

ตารางที่ 2.4 เงื่อนไขในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ [34]

Properties	Values
K (MPa)	590
n	0.22
Young's modulus (GPa)	210
Poisson's ratio	0.3
R_a sheet (μm)	4.0
R_a tool (μm)	0.0–4.0
Normal load P (N)	2
Relative speed (m/s)	1–50
Sliding length (μm)	45
Adhesive coefficient of friction μ adhesive	0.0, 0.01, 0.05, 0.1



รูปที่ 2.37 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ตามเงื่อนไขความหยาบผิวของเครื่องมือ [34]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องถึงผลกระทบของดรอปีดว์ที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่น พบว่าความเรียบผิวของดรอปีดว์มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่น กล่าวคือดรอปีดว์ทำหน้าที่สำหรับควบคุมการไหลตัวของแผ่น โลหะ ในขณะที่ผิวของชิ้นงาน ได้สัมผัสกับผิวของดรอปีดว์โดยตรง ทำให้เกิดแรงเสียดทานขึ้น และหากผิวของดรอปีดว์มีความหยาบผิวสูง ส่งผลให้เกิดการต้านทานการไหลตัวของแผ่น โลหะเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดความเครียดที่ชิ้นงานสูงจนเกิดการฉีกขาดของชิ้นงานได้ จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาอิทธิพลความหยาบผิวของดรอปีดว์ที่มีผลต่อการลากขึ้นรูป ว่ามีอิทธิพลในการควบคุมการไหลตัวของโลหะในลักษณะใด โดยเฉพาะในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร ทำการศึกษารูปทรงของดรอปีดว์แบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Half-Round Drawbead) ตัวแปลที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC , SPCD และ SPCE โดยการเปรียบเทียบผลการทดลองการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ศึกษาผลการขึ้นรูปมีความสอดคล้องให้ผลลัพธ์ในทิศทางเดียวกัน เพื่อทราบถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลการลากขึ้นรูป เพื่อนำไปใช้แก้ปัญหาในการออกแบบแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร

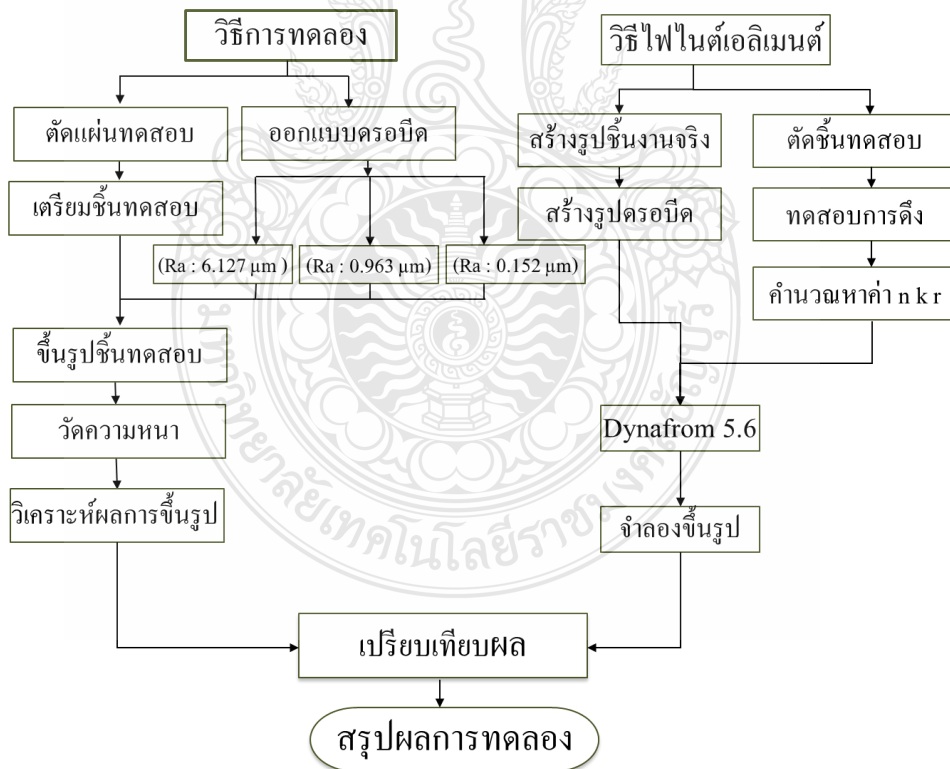
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินการทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วนดังนี้ ส่วนแรกคือการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง เพื่อวัดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป, ความเครียด, และความหนา บริเวณที่เกิดความเสียหายของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ส่วนที่สองเป็นการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบและวิเคราะห์เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างการทดลองจริงกับการจำลองขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งส่วนประกอบของงานวิจัยมีดังนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยนั้นแบ่งออกเป็นสองส่วนดังที่กล่าวในข้างต้น ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดและขั้นตอนดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินการวิจัย

3.2 การทดลอง

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

โดยใช้เครื่องปั๊มโลหะของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมที่มีขนาด 80 ตัน แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร และเครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC automatic machine) ใช้ในการสร้างครอว์บีด แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1.1 เครื่องปั๊มโลหะ

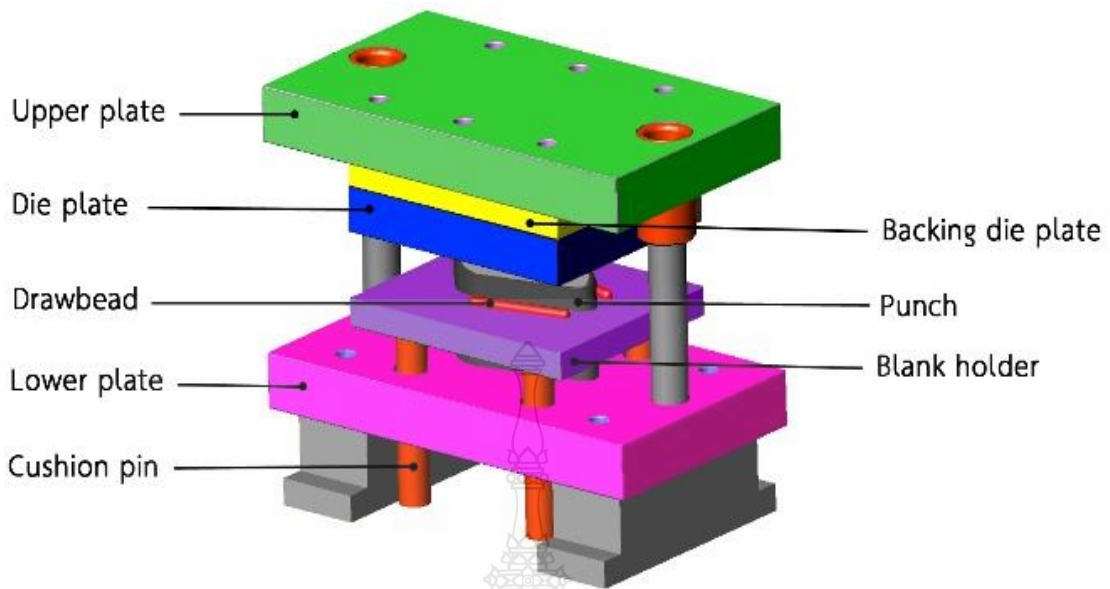
เครื่องปั๊มไฮดรอลิกที่มีขนาด 80 ตัน ที่สามารถตั้งระยะการลากขึ้นรูปได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องปั๊มโลหะขนาด 80 ตัน

3.2.1.2 แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร

แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปแบบไม่สมมาตรดังรูปที่ 3.3 แสดงรายละเอียดและส่วนประกอบดังตารางที่ 3.1 โดยมีหลักการทำงานของแม่พิมพ์ดังนี้ แผ่นรองแม่พิมพ์บน (Upper plate) จะยึดกับแผ่นรองคายน (Backing die plate) และแผ่นคายน (Die plate) มีชุดนำการปั๊ม (Guide post) เป็นชุดนำเพื่อความเที่ยงตรงในการปั๊มขึ้นลง แผ่นกดชิ้นงาน (Blank holder) มีหน้าที่ในการกดยึดชิ้นงาน โดยส่งถ่ายแรงจากคูด้านพื้น (Cushion pin) ขณะที่พินซ์ (Punch) จะประกอบด้วย ชุดล่าง (Lower plate) เพื่อยึดกับแท่นวางแม่พิมพ์ (table)



รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลิกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร

ตารางที่ 3.1 ตารางชิ้นส่วนแม่พิมพ์

รายการ	วัสดุ	ขนาด	จำนวน/ชิ้น
Upper plate	SS41	240x420x48	1
Backing die plate	S50C	210x250x25	1
Die plate	SKD11	210x250x40	1
Punch	SKD11	80x150x118	1
Blank holder	SS41	210x250x30	1
Lower plate	SS41	240x420x48	1
Cushion pin	SS41	35x400	4

3.2.1.3 เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC automatic machine)

เครื่องกัด CNC แนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ใช้ในการสร้างดรอว์บีค และชิ้นงานทดสอบแรงเสียดทานที่มีความหยาบผิวต่างกัน



รูปที่ 3.4 เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC automatic machine)

3.2.1.4 ครอว์บีด (Draw bead)

ครอว์บีดที่ใช้ในการทดลองมีรูปทรงหน้าตัดครึ่งวงกลม (Haft-Round Drawbead) ซึ่งเป็นรูปทรงที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับครอว์บีดหน้าตัดสามเหลี่ยม (V-Shaped Draw bead), ครอว์บีดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapeziform Draw bead) ได้รับการยืนยันจากการศึกษาของ สุริยา [27] ครอว์บีดที่ใช้มีขนาดรัศมีส่วนโค้ง 4 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และมีความสูงของ ครอว์บีด 8 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุ SKD 11 กำหนดค่าความหยาบผิว 3 ระดับได้แก่ 0.152 Ra, 0.963 Ra และ 6.127 Ra ดังรูปที่ 3.5



(ก)

(ข)

(ง)

รูปที่ 3.5 ครอว์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra (ก), 0.963 Ra (ข), 0.152 Ra (ค)

3.2.1.5 อุปกรณ์บันทึกแรงในการขึ้นรูป

อุปกรณ์จับเก็บสัญญาณ (Mini data logger) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดเก็บ ข้อมูลพื้นฐานของระบบ (data logger) ประกอบไปด้วย scanner หรือ multiplexer digital-voltmeter

และตัวบันทึกข้อมูล ซึ่งรับ Input ที่เป็นระบบ analog จาก sensor แล้วทำการเปลี่ยนข้อมูลเป็นระบบ digital และเก็บข้อมูลไว้ในหน่วยความจำเพื่อการนำไปใช้ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.6

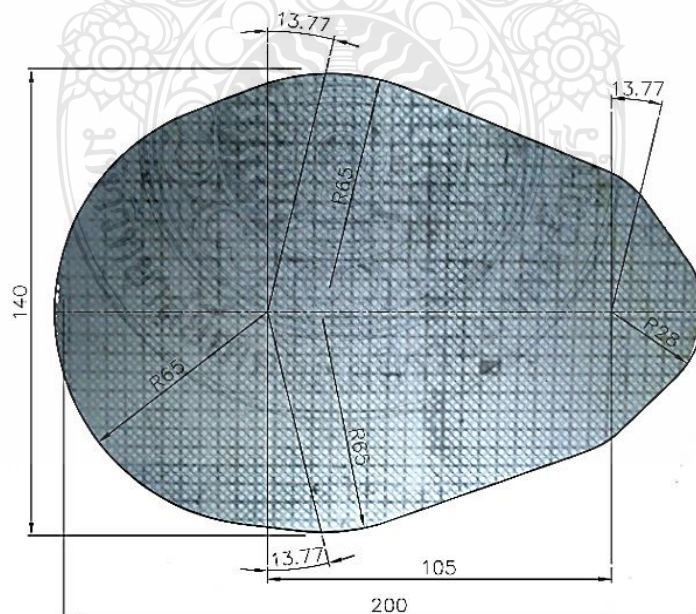


รูปที่ 3.6 อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน และอุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ

3.2.2 การเตรียมแผ่นชิ้นงานทดสอบ

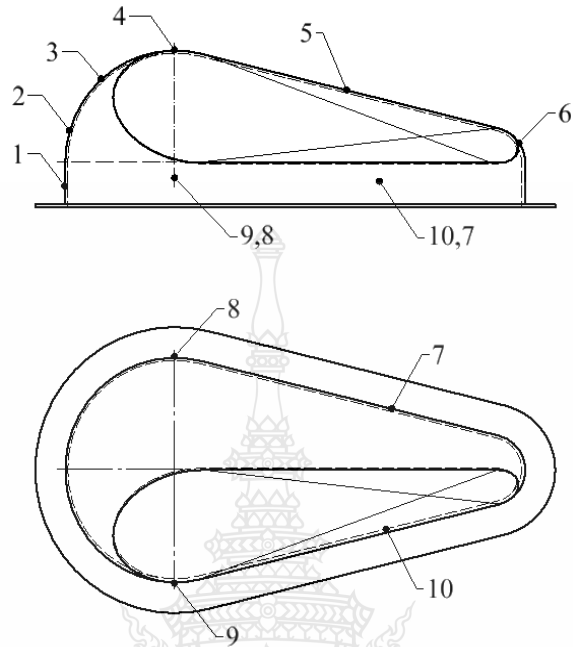
3.2.2.1 แผ่นตัดเปล่า

ตัดแผ่นงานตามแนวรีดมีขนาด 220 x 160 มม. ประมาณค่าโดยการคำนวณจากสมการพื้นฐานขนาดของแผ่นงาน (Blank size) นำมาประยุกต์กับรูปทรงที่ทำการศึกษาจนได้ขนาดและรูปร่าง โดยขยายขนาดของแผ่นตัดเปล่า (Blank size) ออกอีก 10 มม. โดยรอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผ่นตัดเปล่าคำนวณโดยการประมาณค่า

3.2.3 การบันทึกผล



รูปที่ 3.8 บริเวณจุดที่ตรวจวัดความเคียวบนชิ้นงาน

3.2.3.1 การวัดความหนา

การวัดความหนาชิ้นงาน โดยการผ่าชิ้นงานออกในแนวยาวแล้ววัดความหนา ทั้ง 10 จุด เพื่อหาความหนาของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปของแต่ละจุด โดย Point Micrometer ดังแสดงใน รูปที่ 3.9 และทำการบันทึกผลดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความหนาชิ้นงาน Point Micrometer

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างบันทึกความหนาชิ้นงาน: ความหนาผิวครอว์ปีด xxxx Ra.

ความหนา จุดที่	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	X	X	X	X
2	X	X	X	X
3	X	X	X	X
4	X	X	X	X
5	X	X	X	X
6	X	X	X	X
7	X	X	X	X
8	X	X	X	X
9	X	X	X	X
10	X	X	X	X

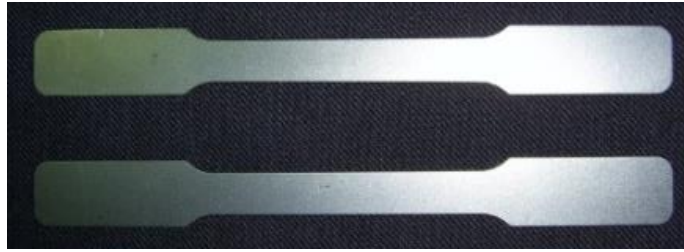
3.3 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3.1 ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

ทำการทดสอบหาสมบัติอัตราส่วนความเค้นดัด n,r (Anisotropy) ของแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCC,SPCD และ SPCE ความหนา 1.0 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM E517 vol.01.03.(1993)

3.3.1.1 นำแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCC, SPCD และ SPCE ความหนา 1.0 มิลลิเมตรมาทำการทดสอบหาค่า r (Anisotropy) ตัดชิ้นทดสอบ (Blanking) ตามแนวทิศทางการรีด (Rolling Direction) จากแผ่นเหล็กรีดเย็น ที่นำมาใช้ในการทดสอบ ดังรูปที่ 3.10

3.3.1.2 วัดความกว้าง (W_0) และความหนา (T_0) ของแต่ละชิ้นทดสอบทุกแนวการรีดบันทึกข้อมูล ในช่วงความยืด (Gage length)



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างลักษณะชิ้นทดสอบหาสมบัติเชิงกล

3.3.1.3 นำชิ้นทดสอบที่วัดค่าความกว้างและหนา มาทดสอบการดึงตามแนวแกน

3.3.1.4 วัดความกว้าง (W_x) และความหนา (T_x) ของชิ้นทดสอบที่ดึงทดสอบจากนั้นอุปกรณ์ (Extensometer) จะบันทึกการเปลี่ยนแปลงความยาวและพื้นที่หน้าตัด นำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกมาคำนวณ

Title	Thickness	Width	GaugeLength			
T1	1	12.5	50			
===== Summary for Data Processing =====						
Title	Max_Force	Max_Stress	YP_Stress	Break_Stra	LYP_Stress (N/mm2)	
T1	3730.69	93.27	68.9	74.33	68.29	
Mean	0	0	0	0	0	
===== Raw Data =====						
T1						
Time	Force	Stress	Stroke	Strain	Extensometer	
0	12.29	0.31	1	2	0	
1	-69.62	-1.74	1	2	0	
7	569.23	14.23	1	2	0.01	
7	724.84	18.12	1	2	0.01	
8	1015.6	25.39	1	2	0.02	

รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลการทดสอบการดึงจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.3.2 ทดสอบหาสมบัติเลขชี้กำลัง

ทดสอบหาสมบัติเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain-Hardening Exponent, n -values) และสัมประสิทธิ์ความต้านแรง (Strength Coefficient, K) ของเหล็กแผ่นรีดเย็นตามวิธีทดสอบ ASTM E 646-91 vol.03.01.(1993)

3.3.2.1 วัดความกว้างความหนาของชิ้นทดสอบช่วงระยะยึด (Gage Length)

3.3.2.2 จับชิ้นงานทดสอบแรงดึงบันทึกค่าแรงที่กระทำและระยะที่เปลี่ยนแปลงช่วง

ที่หนึ่ง

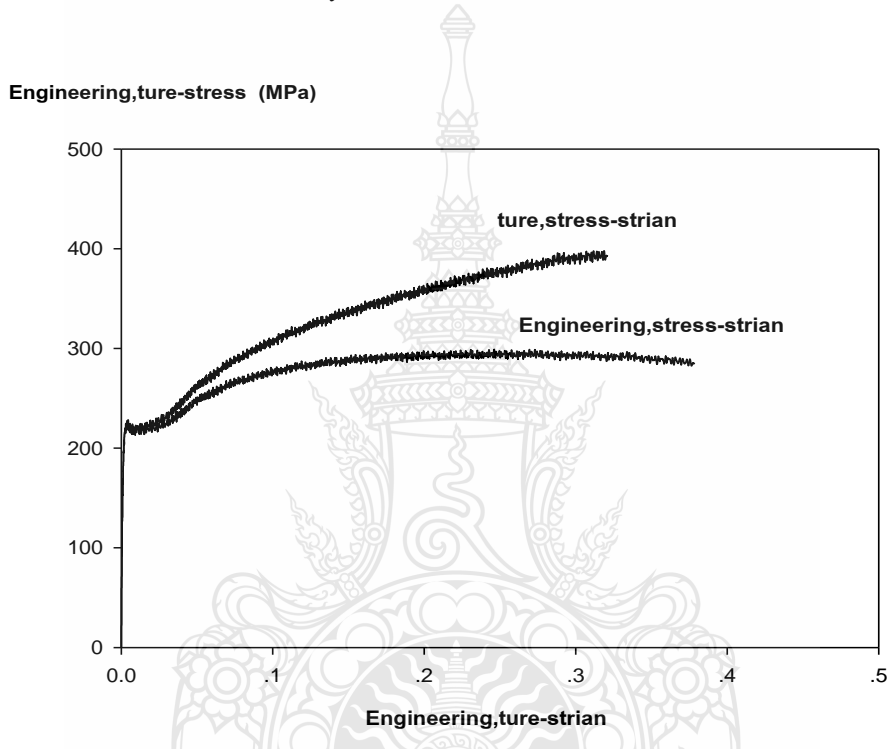
3.3.2.3 คำนวณหาความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress, S) เท่ากับแรงกระทำช่วงที่หนึ่งต่อขนาดพื้นที่หน้าตัด

3.3.2.4 คำนวณหาความเครียดวิศวกรรม (Engineering Strain, ϵ)

3.3.2.5 คำนวณหาความเค้นจริง (True Stress) = $S \times (1 + \epsilon)$

3.3.2.6 คำนวณหาความเครียดจริง (True Strain) = $\ln(1 + \epsilon)$

3.3.2.7 คำนวณหา y หรือ Log True Stress



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างแผนภาพความเค้น-ความเครียดวิศวกรรมและ ความเค้น-ความเครียดจริงของ เหล็กกรีดเย็น หน้า 1 มิลลิเมตร

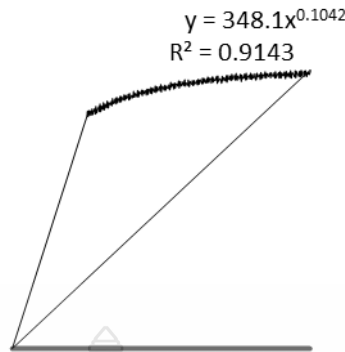
3.3.2.8 คำนวณหา x หรือ Log True Stress

3.3.2.9 คำนวณหา y^2

3.3.2.10 คำนวณหา x^2

3.3.2.11 คำนวณหา xy

3.3.2.12 คำนวณค่าจากการบันทึกในหัวข้อ 3.3.2.1 – 3.3.2.11 เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงระยะยึดในช่วง Gage Length โดยกำหนดจำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงระยะยึดเป็น N หาผลรวมทั้งหมด $\sum y, \sum x, \sum y^2, \sum x^2, \sum xy$



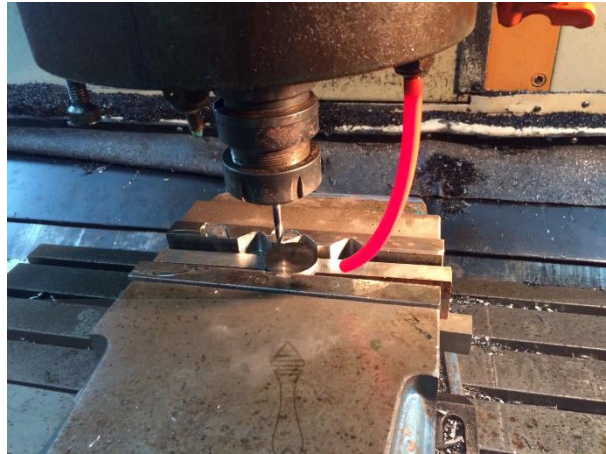
รูปที่ 3.13 ตัวอย่างหาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรงและเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดใช้แบบสมการกำลัง (Power Function)

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างสมบัติเชิงกลแผ่นเหล็กกริดเย็น SPCC, SPCD และ SPCE ความหนา 1.0 มิลลิเมตร

ชนิดของวัสดุ	เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วย ความเครียด(n)	สัมประสิทธิ์ความ ต้านแรง(K)	อัตราส่วนความเครียด พลาสติก (r)			
			R_0	R_{45}	R_{90}	R
SPCC	0.12	357	1.165	1.254	1.355	1.258
SPCD	0.14	366	1.301	1.365	1.468	1.378
SPCE	0.21	316	2.04	1.786	2.258	2.020

3.3.3 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

การใช้ดรัมที่ที่มีความหยาบผิวต่างกันนั้น จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการทดสอบแรงเสียดทาน เพื่อกำหนดเงื่อนไขการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ การทดสอบแรงเสียดทาน โดยเตรียมแผ่นชิ้นงานทดสอบที่มีความหยาบผิวเหมือนกับผิวดรัมที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโต 30 มิลลิเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุ SKD 11 ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง และเตรียมบอลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำรีดเย็น ดังรูปที่ 3.14 -3.15 จากนั้นทำการทดสอบโดยใช้วิธี Ball-on-Disk ด้วยเครื่องไทรบอมิเตอร์ ดังรูปที่ 3.16 จากผลการทดสอบได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.124, 0.213, 0.373 ที่ความหยาบผิว 0.152 Ra, 0.963 Ra, 6.127 Ra ตามลำดับ ซึ่งความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบมีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน กล่าวคือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ S. Zhang [34]



รูปที่ 3.14 การเตรียมพื้นผิวชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงเสียดทาน



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.15 แผ่นชิ้นงานทดสอบความหยาบผิว 0.152 Ra, 0.963 Ra, 6.127 Ra ตามลำดับ (ก), และบอลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร (ข)

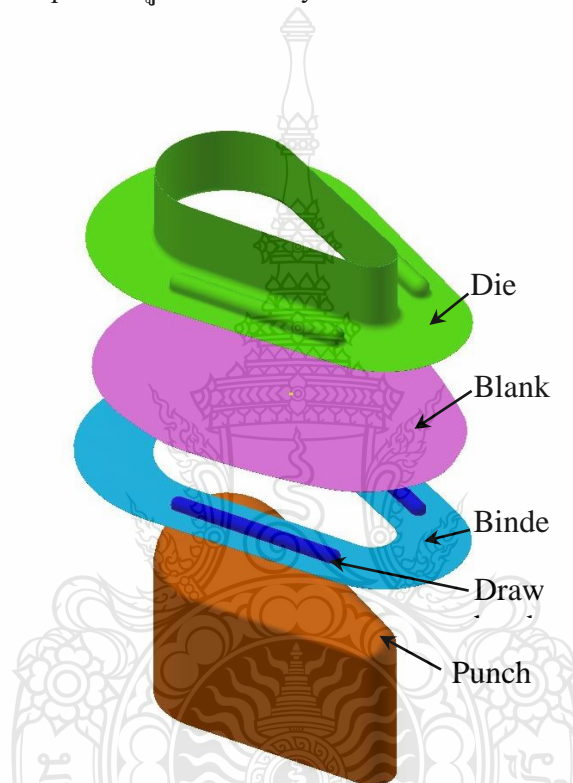


รูปที่ 3.16 เครื่องไทรบอมิเตอร์

3.3.4 การจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปของงานวิจัยนี้ ใช้โปรแกรม Dyna Form 5.6 จำลองการขึ้นรูปของเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC , SPCD และ SPCE มีขั้นตอนดังนี้

3.3.4.1 การสร้างพื้นผิวโมเดลแม่พิมพ์ และแผ่นขึ้นงาน สำหรับการจำลอง แสดงดังรูปที่ 3.17 ถูกสร้างด้วยโปรแกรม CAD (Computer Aided Design) และบันทึกเป็นไฟล์สกุล IGES Files สำหรับการ Import เข้าสู่โปรแกรม Dynaform เพื่อสร้างแบบจำลองตาข่าย (Mesh Model) และประมวลผล



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างการสร้างชิ้นส่วนเครื่องมือและขึ้นงาน

3.3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis)

การกำหนดชนิดการขึ้นรูป และการกำหนดลักษณะเฉพาะของขึ้นงาน และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขแรงในการขึ้นรูป (Boundary Condition) ประมวลการจำลองขึ้นรูปขึ้นงาน (Process) กำหนดระยะเวลาเคลื่อนที่ของพUNCH และความเร็วการเคลื่อนที่ของพUNCH

3.3.6 แสดงผลลัพธ์จากการประมวลผล (Post - Processing)

ประมวลผลการจำลองขึ้นรูปขึ้นงาน เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับ Geometry

กำหนดค่าสมบัติของวัสดุ กำหนดเครื่องมือ (Tools) จากนั้นจึงจำลองการขึ้นรูปเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง และทำการประมวลผลต่อไป

3.3.7 เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการประมวลผลการทดลองจริง และการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ตามขอบเขตที่วางไว้ได้แก่ แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป และการเปลี่ยนแปลงความหนาหลังการขึ้นรูป



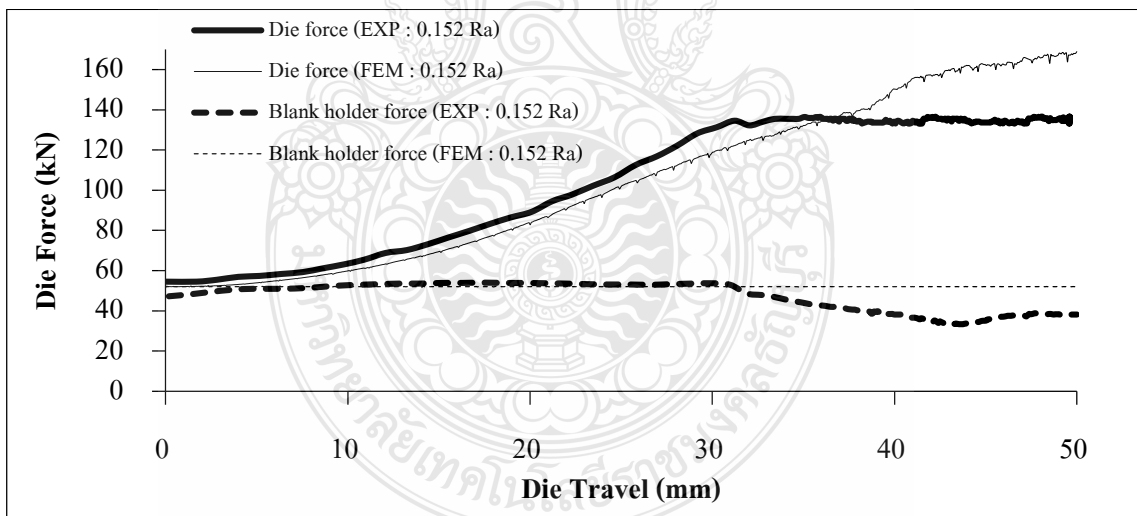
บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

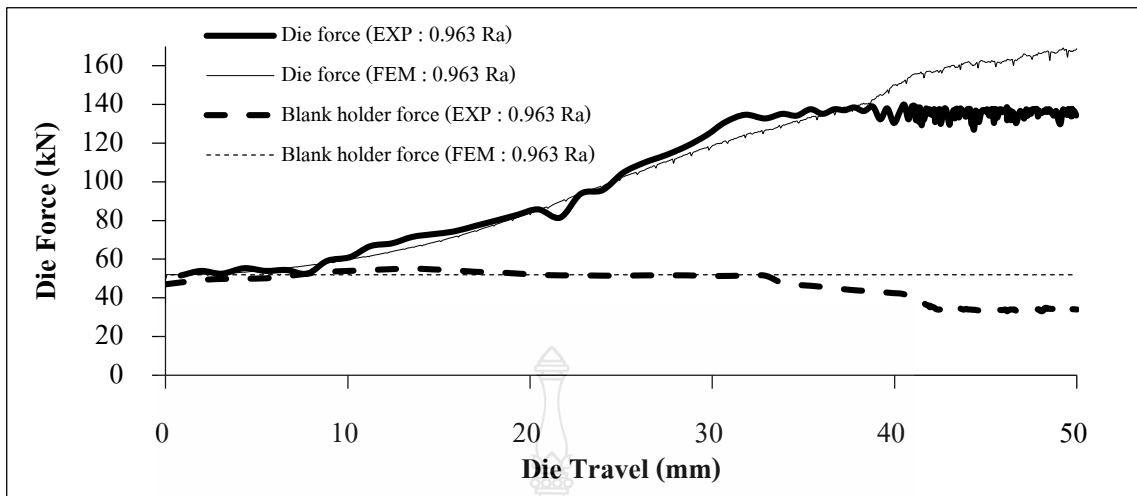
ผลการศึกษาลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร โดยใช้ดรรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 3 ระดับ ได้แก่ 0.152 Ra, 0.963 Ra และ 6.127 Ra สำหรับวัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือเหล็กกล้ารีดเย็น เกรด JIS : SPCC, SPCCD และ SPCE ที่มีความหนา 1.0 มม. ซึ่งผลการศึกษานำมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบระหว่างการทดลองจริงกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1 อิทธิพลของความหยาบผิวที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป

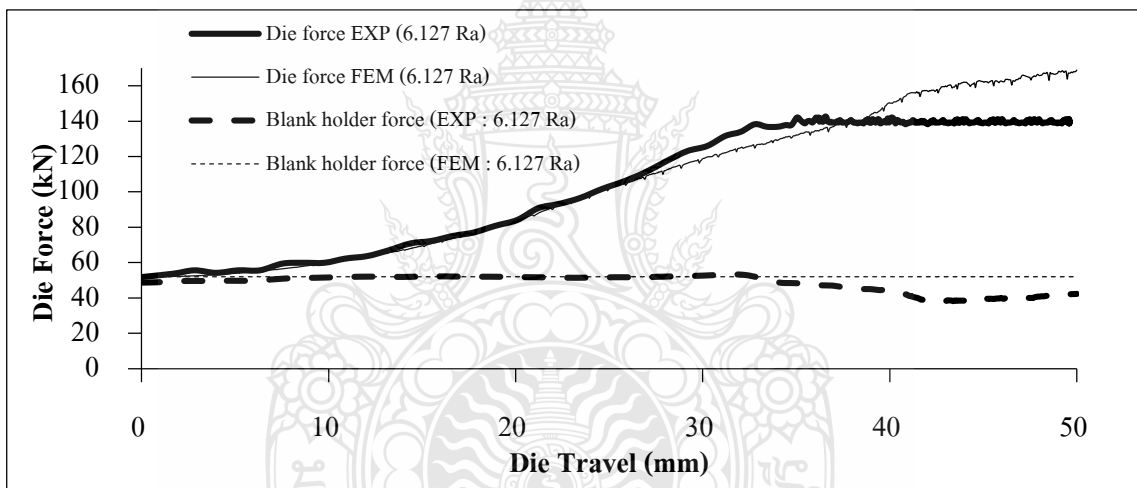
ผลการทดลองและผลการจำลองการลากขึ้นรูปชิ้นงาน โดยกำหนดแรงกดชิ้นงาน (Blank holder force) เท่ากับ 50 % (52 kN.) ของแรงที่ได้จากการคำนวณ และเป็นแรงกดที่ดีที่สุดจากการศึกษาก่อนหน้าของนาย สุริยา ประสมทอง [27] ซึ่งพบว่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปมีความแตกต่างกันภายใต้การทดสอบที่ตัวแปรต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 – 4.9



รูปที่ 4.1 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCC โดยใช้ดรรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra



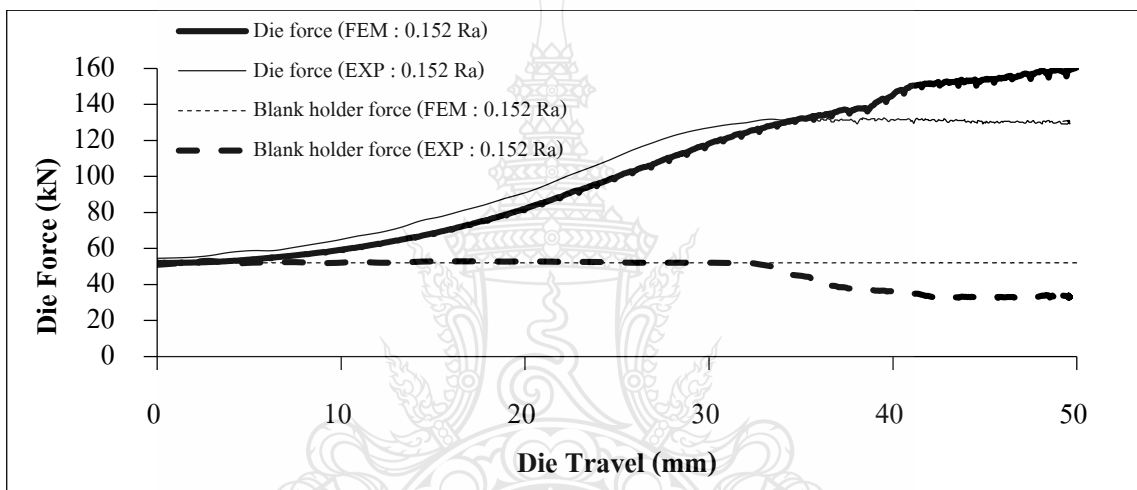
รูปที่ 4.2 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCC โดยใช้ครอร์บีดที่มีความหยาบผิว 0.963 Ra



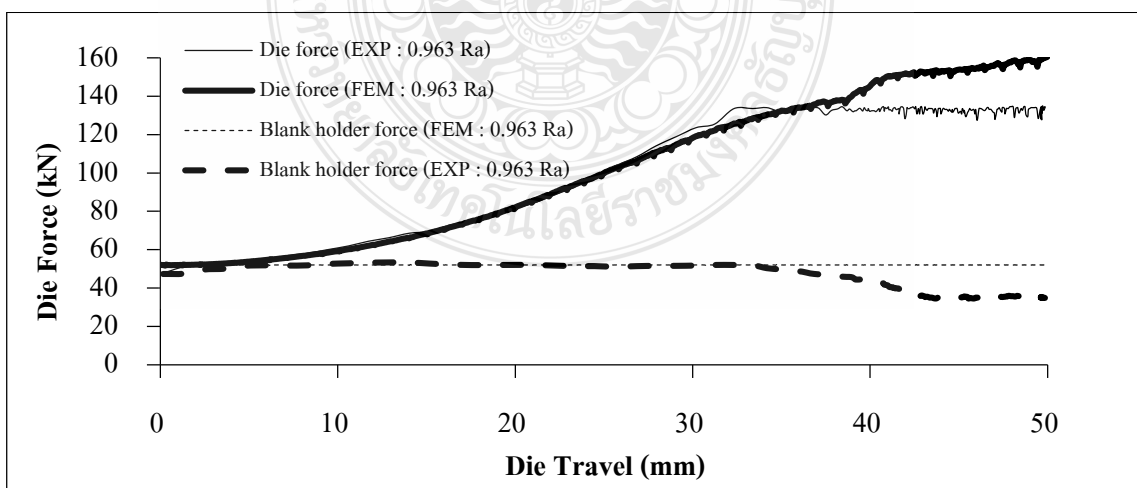
รูปที่ 4.3 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCC โดยใช้ครอร์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra

จากการทดลองลากขึ้นรูปวัสดุ SPCC โดยใช้ครอร์บีดที่มีความหยาบผิวต่างกันนั้น พบว่าแรงมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะในการกดคลิก แรงในการลากขึ้นรูปมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ระยะการกดคลิก 0-30 มิลลิเมตร การเพิ่มขึ้นของแรงในช่วงนี้มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง อย่างไรก็ตามที่ระยะการกดคลิก 30- 50 มิลลิเมตร แรงลากขึ้นรูปมีการปรับตัวคงที่ โดยการใช้ครอร์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra ดังรูปที่ 4.1 ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 135 kN ขณะที่การใช้ครอร์บีดที่มีความหยาบผิว 0.963 Ra ดังรูปที่ 4.2 ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 136 kN และ การใช้ครอร์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra ดังรูปที่ 4.3 ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 139 kN และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงลากขึ้นรูปมีแนวโน้มใกล้เคียงกันที่

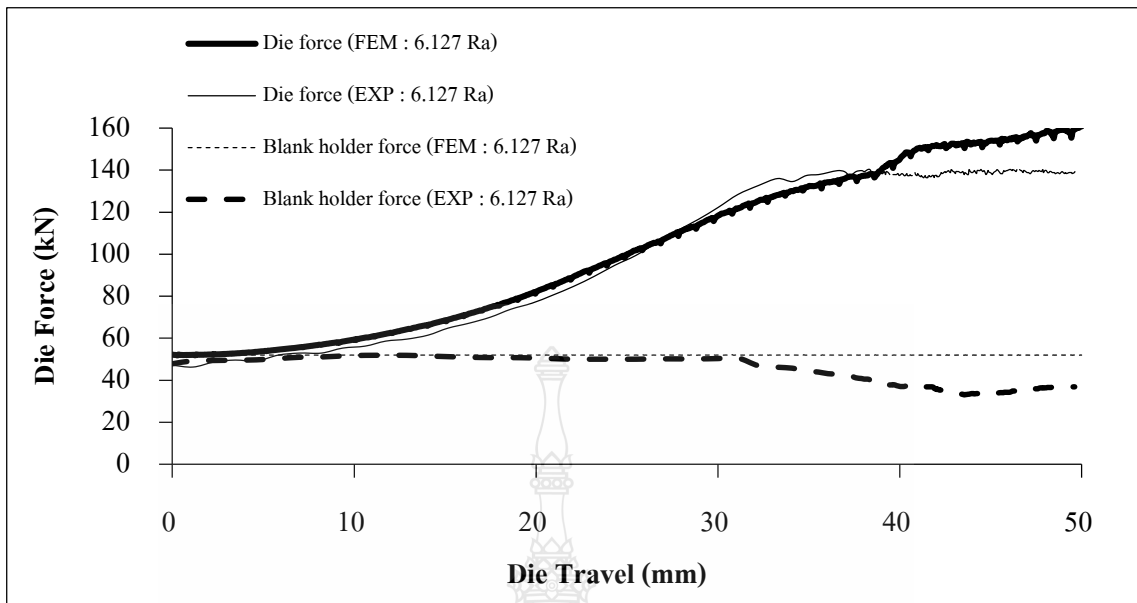
ระยะการกดลึก 0-30 มิลลิเมตร แต่ในช่วงที่ระยะการกดลึก 30-50 มิลลิเมตร แรงลากขึ้นรูปจากการจำลองยังคงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และมีค่าสูงกว่าการขึ้นรูปจริง ขณะที่แรงจากการทดลองลากขึ้นรูป มีความราบเรียบ เนื่องจากระยะลากขึ้นรูปในช่วงนี้ แรงกดชิ้นงานในการลากขึ้นรูปจริงที่ได้จากแรงกดชั้นพื้นมีการลดระดับลง ขณะที่แรงกดชิ้นงานจากการจำลองมีความคงที่ตามเงื่อนไขที่กำหนด ทำให้แรงลากขึ้นรูปมีความแตกต่างกัน และจากการเปรียบเทียบผลจากการจำลองภายใต้ความหยาบผิวของดรอว์บีดที่ 0.152 Ra, 0.963 Ra และ 6.127 Ra พบว่าแรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดมีค่า 164 kN, 166 kN และ 169 kN ตามลำดับ ทั้งนี้แรงที่จุดเริ่มต้นในการลากขึ้นรูปจะมีขนาดแรงที่สูงกว่าแรงกดชิ้นงานเล็กน้อยเนื่องจากการลากขึ้นรูป แรงขึ้นรูปต้องเอาชนะแรงต้านจาก กุสชัน



รูปที่ 4.4 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCD โดยใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra



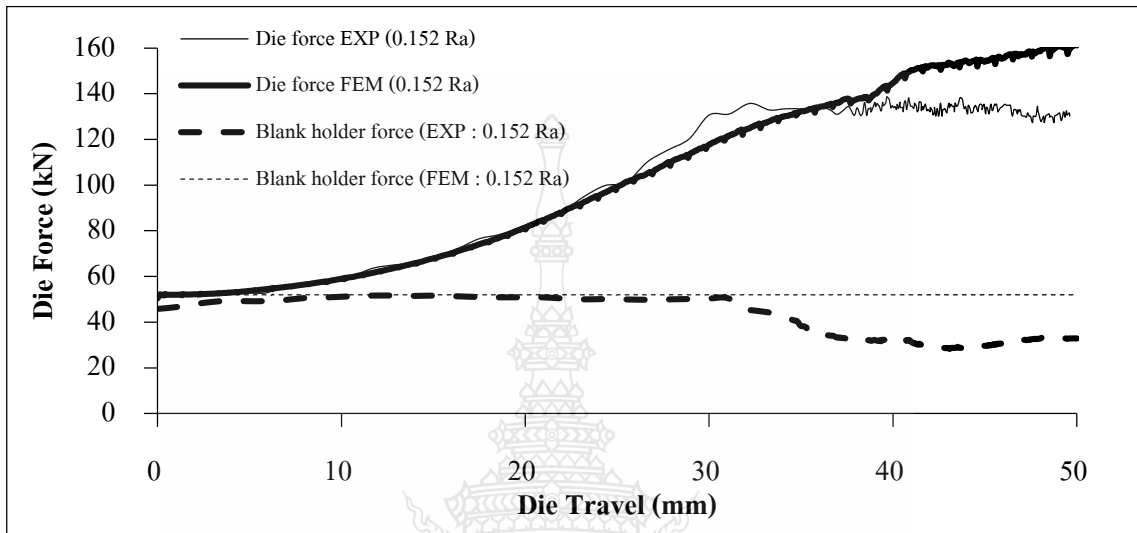
รูปที่ 4.5 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCD โดยใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.963 Ra



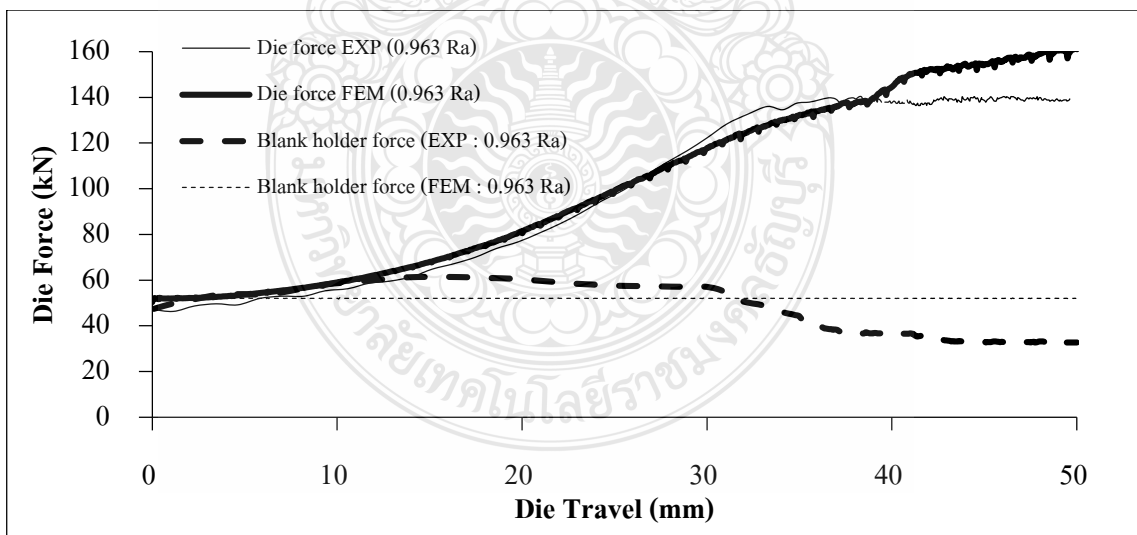
รูปที่ 4.6 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCD โดยใช้ครอว์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra

จากการทดลองลากขึ้นรูปวัสดุ SPCD โดยใช้ครอว์บีดที่มีความหยาบผิวต่างกันนั้น พบว่าแรงมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะในการกดลึกเช่นเดียวกันกับการทดลองลากขึ้นรูปวัสดุ SPCC แรงในการลากขึ้นรูปมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นที่ระยะการกดลึก 0-30 มิลลิเมตร แรงในช่วงนี้มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง และที่ระยะการกด 30- 50 มิลลิเมตร แรงลากขึ้นรูปมีการปรับตัวคงที่ ซึ่งการใช้ครอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra ดังรูปที่ 4.4 ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 133 kN ขณะที่การใช้ครอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.963 Ra ดังรูปที่ 4.5 ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 134 kN และการใช้ครอว์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra ดังรูปที่ 4.6 ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 139 kN และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงลากขึ้นรูปมีแนวโน้มใกล้เคียงกันที่ระยะการกดลึก 0-30 มิลลิเมตร แต่ในช่วงที่ระยะการกดลึก 30-50 มิลลิเมตร แรงลากขึ้นรูปจากการจำลองยังคงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าสูงกว่าการขึ้นรูปจริง ขณะที่แรงจากการทดลองลากขึ้นรูป มีความราบเรียบ เนื่องจากระยะลากขึ้นรูปในช่วงนี้ แรงกดชิ้นงานในการลากขึ้นรูปจริงที่ได้จากแรงคูลชันพินมีการลดระดับลง ขณะที่แรงกดชิ้นงานจากการจำลองมีความคงที่ตามเงื่อนไขที่กำหนด ทำให้แรงลากขึ้นรูปมีความแตกต่างกัน และจากการเปรียบเทียบผลจากการจำลองภายใต้ความหยาบผิวของครอว์บีดที่ 0.152 Ra, 0.963 Ra และ 6.127 Ra พบว่าแรงในการลาก

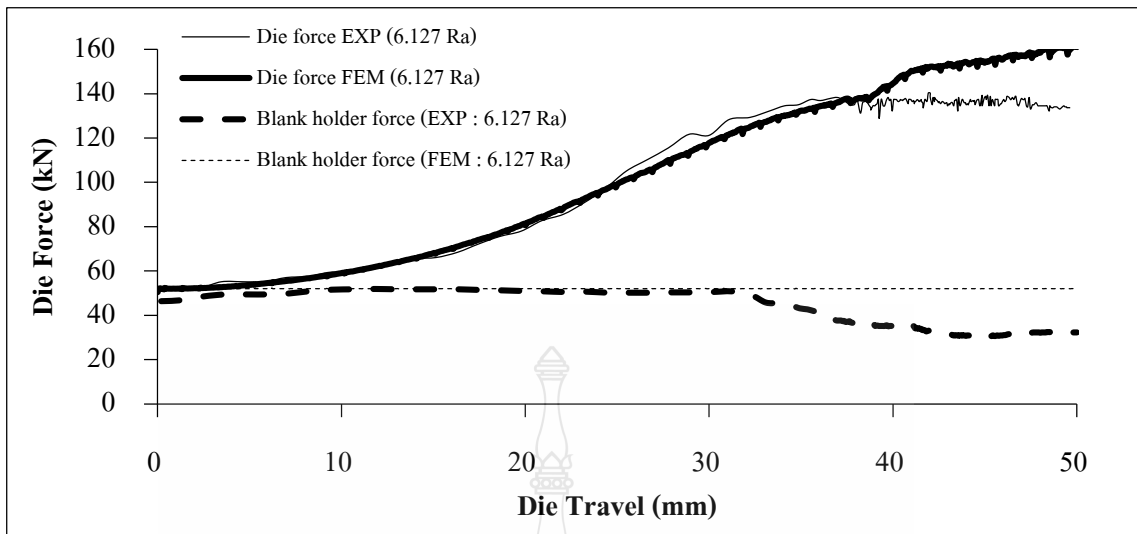
ขึ้นรูปสูงสุดมีค่า 163 kN, 164 kN และ 167 kN ตามลำดับ ทั้งนี้แรงที่จุดเริ่มต้นในการลากขึ้นรูปจะมีขนาดสูงกว่าแรงกดชิ้นงานเล็กน้อยเนื่องจากในการลากขึ้นรูป แรงขึ้นรูปต้องเอาชนะแรงต้านจาก คูส
 ชั้น



รูปที่ 4.7 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCE โดยใช้ครอว์บีคที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra



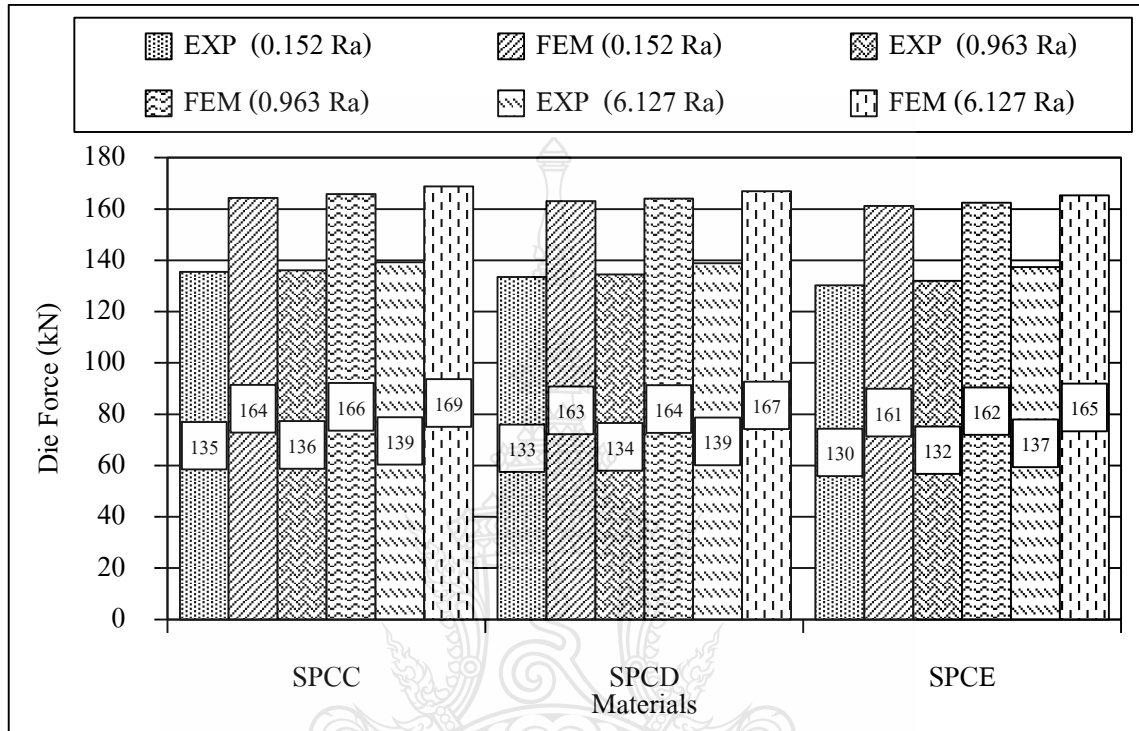
รูปที่ 4.8 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCE โดยใช้ครอว์บีคที่มีความหยาบผิว 0.963 Ra



รูปที่ 4.9 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCE โดยใช้ดรอว์บีดหน้าตัดครึ่งวงกลมที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra

จากการทดลองลากขึ้นรูปวัสดุ SPCE โดยใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิวต่างกันนั้น พบว่าแรงมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะในการกดลึก เช่นเดียวกันกับการทดลองลากขึ้นรูปวัสดุ SPCC และ SPCD แรงในการลากขึ้นรูปมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นที่ระยะการกดลึก 0-30 มิลลิเมตร จากนั้นจะเริ่มปรับตัวคงที่ ที่ระยะการกด 30- 50 มิลลิเมตร โดยการใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra ดังรูปที่ 4.7 ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 130 kN ขณะที่การใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.963 Ra ดังรูปที่ 4.8 ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 132 kN และการใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra ดังรูปที่ 4.9 ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 137 kN และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าที่ระยะการกดลึก 0-30 มิลลิเมตร แรงลากขึ้นรูปมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงที่ระยะการกดลึก 30-50 มิลลิเมตร แรงลากขึ้นรูปจากการจำลองยังคงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าสูงกว่าการขึ้นรูปจริง ขณะที่แรงจากการทดลองลากขึ้นรูป มีความราบเรียบ เนื่องจากระยะลากขึ้นรูปในช่วงนี้ แรงกดชิ้นงานในการลากขึ้นรูปจริงที่ได้จากแรงกูดชันพินมีการลดระดับลง ขณะที่แรงกดชิ้นงานจากการจำลองมีความคงที่ตามเงื่อนไขที่กำหนด ทำให้แรงลากขึ้นรูปมีความแตกต่างกัน และจากการเปรียบเทียบผลจากการจำลองภายใต้ความหยาบผิวของดรอว์บีดที่ 0.152 Ra, 0.963 Ra และ 6.127 Ra พบว่าแรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดมีค่า 161 kN, 162 kN และ 165 kN ตามลำดับ ทั้งนี้แรงที่จุดเริ่มต้นในการลากขึ้นรูปจะมีขนาดสูงกว่าแรงกดชิ้นงานเล็กน้อย เนื่องจากในการลากขึ้นรูป แรงขึ้นรูปต้องเอาชนะแรงต้านจาก กูดชัน

จากผลการทดลองและการจำลองในแต่ละตัวแปร เมื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบอิทธิพลของความหยาบผิวที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร โดยการนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.10



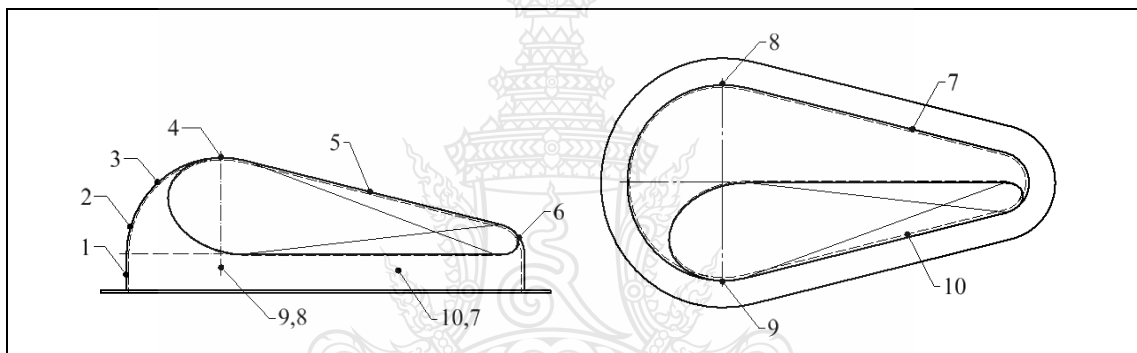
รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบแรงลากขึ้นรูปจากการทดลองและการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากกราฟเปรียบเทียบแรงลากขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ความลึกในการลากขึ้นรูป 50 มิลลิเมตร ใช้วัสดุทดลองเหล็ก SPCC , SPCD และ SPCE ที่แรงกดขึ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ โดยการใส่ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิวต่างกัน ผลการทดลองพบว่าการใส่ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิวต่ำสุด 0.152 Ra ใช้แรงในการลากขึ้นรูปต่ำสุดเมื่อเทียบกับดรอว์บีดที่มีความหยาบผิวแต่ละระดับ โดยวัสดุ SPCC ใช้แรงในการลากขึ้นรูปต่ำสุด 135 kN วัสดุ SPCD ใช้แรงในการลากขึ้นรูปต่ำสุด 133 kN และวัสดุ SPCE ใช้แรงในการลากขึ้นรูปต่ำสุด 130 kN ขณะที่ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิวสูงสุด คือ 6.127 Ra ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดทุกๆ วัสดุทดลอง จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความหยาบผิวของดรอว์บีดมีอิทธิพลส่งผลให้แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงขึ้น โดยดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra ส่งผลให้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นมากที่สุด และในทางตรงกันข้ามดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra ส่งผลให้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นน้อยที่สุด เนื่องจากความหยาบผิวส่งผลโดยตรงต่อแรงเสียดทาน (Friction) หากความหยาบผิวมีค่ามาก

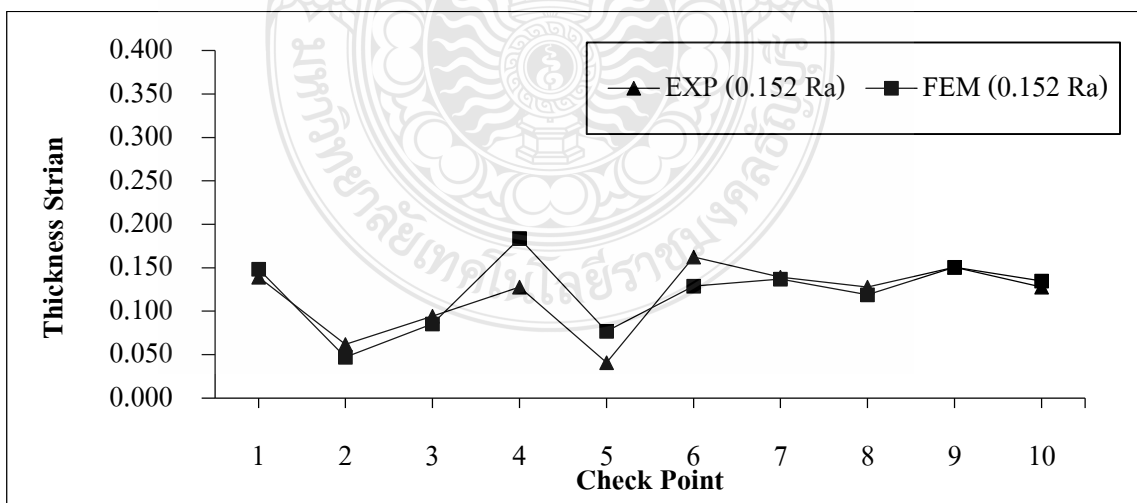
แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นย่อมมีค่ามาก จึงทำให้เกิดการต้านทานการไหลตัวของวัสดุมากขึ้น แต่จากการจำลองพบว่าแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปมีค่าสูงกว่าการขึ้นรูปจริง และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลองภายใต้ความหยาบผิวที่ต่างกัน

4.2 อิทธิพลของความหยาบผิวที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนา

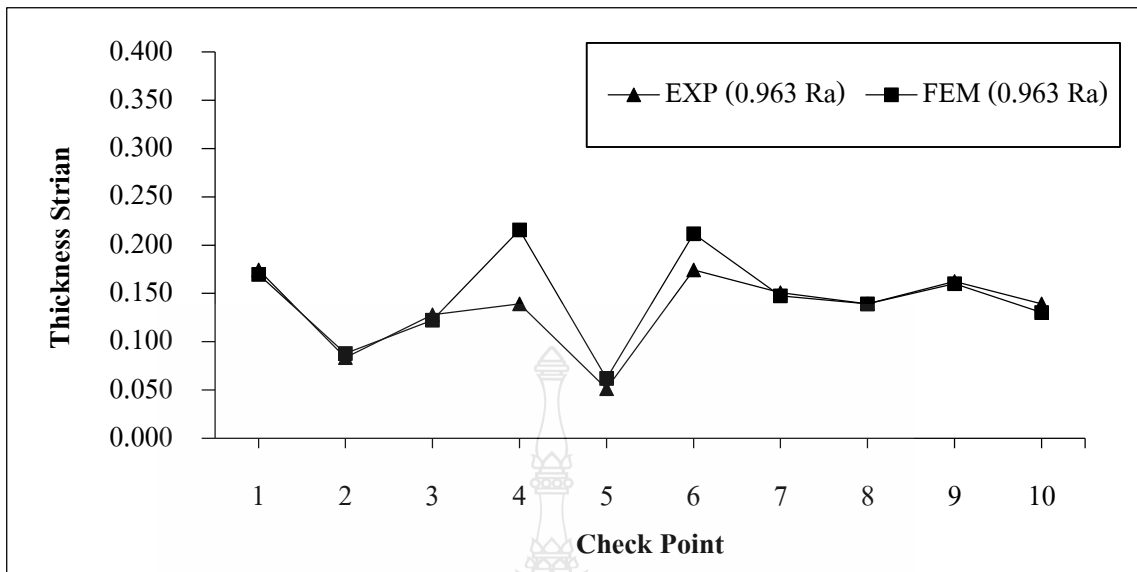
วัสดุที่ผ่านการลากขึ้นรูปจะมีการยึดตัวระหว่างชิ้นงานไหลเข้าสู่ดายน์ ทำให้ความหนามีการเปลี่ยนแปลง และจากรูปทรงชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรทำให้การยึดตัวในแต่ละส่วนไม่เท่ากัน ทำให้ความหนาของชิ้นงานในแต่ละจุดไม่เท่ากันด้วย ซึ่งตำแหน่งการวัดการเปลี่ยนแปลงความหนานบนชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.11 ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงค่าความเครียดแนวความหนาในแต่ละจุดที่มีความแตกต่างดังรูปที่ 4.12-4.20



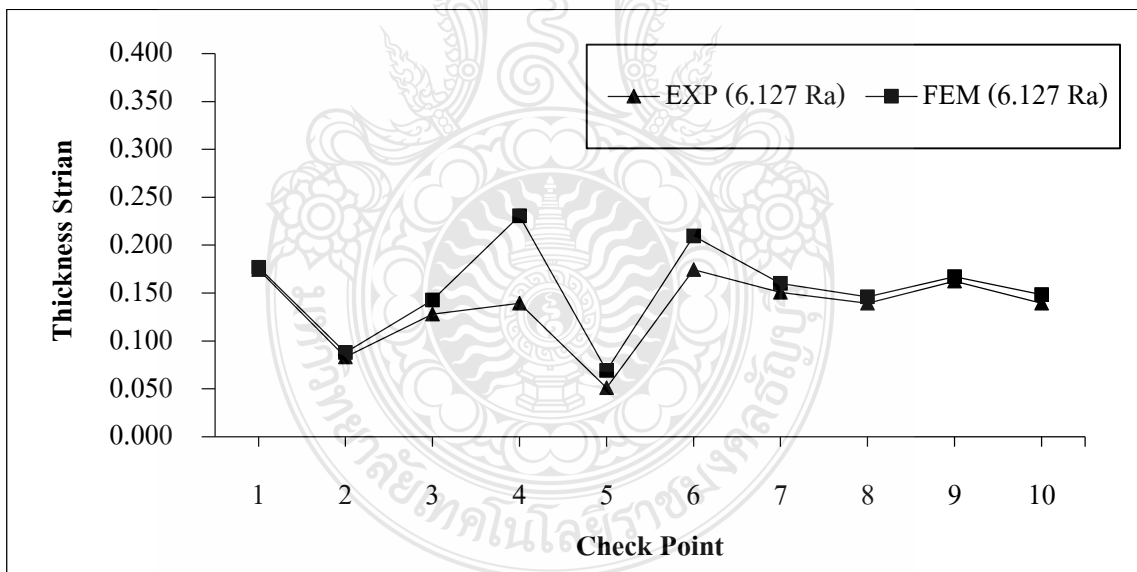
รูปที่ 4.11 บริเวณจุดที่ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความหนานบนชิ้นงาน



รูปที่ 4.12 ความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCC ที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ครอว์บีดที่มี ความหยาบผิว 0.152 Ra

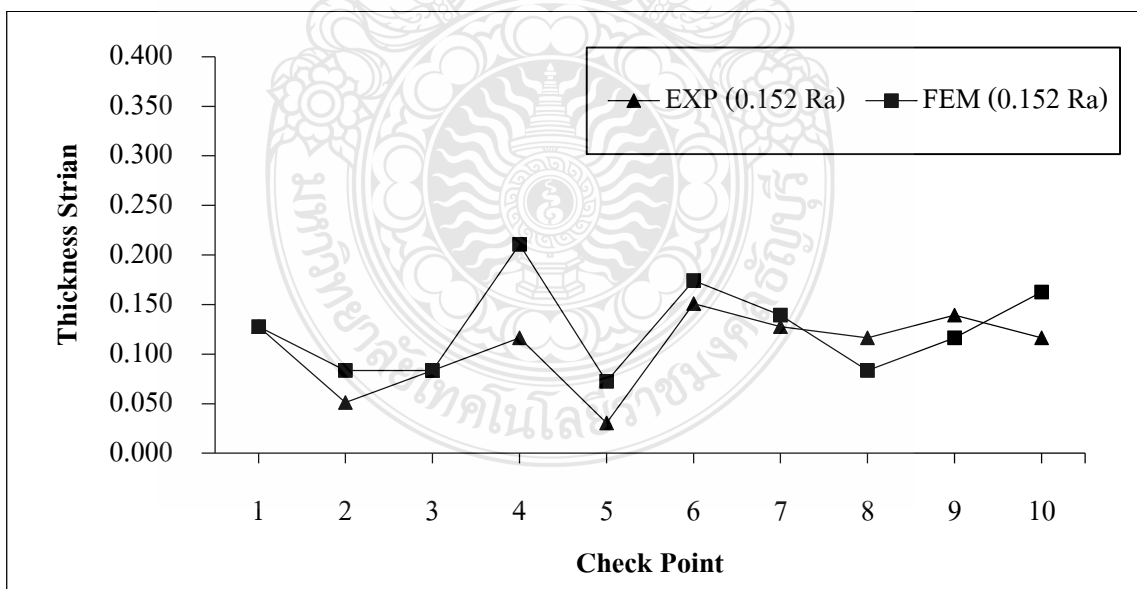


รูปที่ 4.13 ความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCC ที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอว์บีดที่มี ความหยาบผิว 0.963 Ra

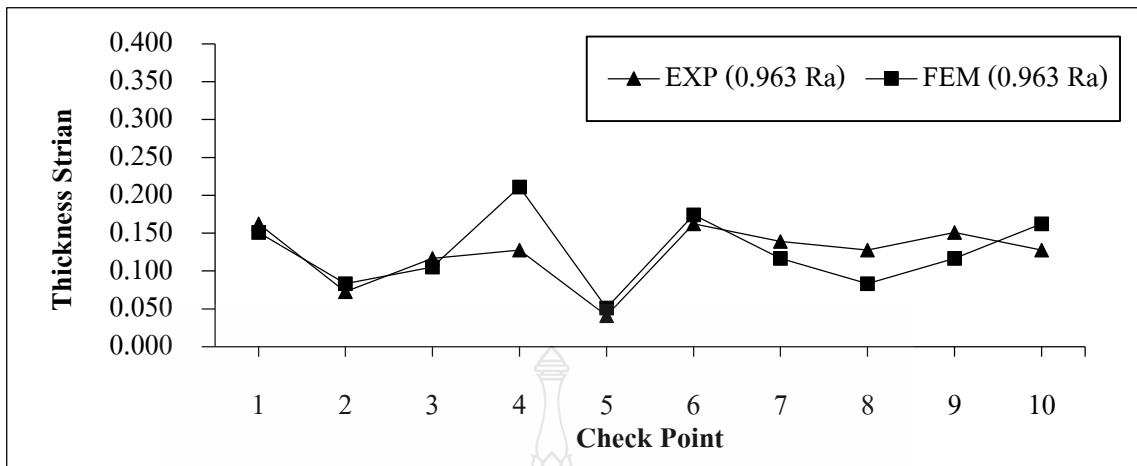


รูปที่ 4.14 ความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCC ที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอว์บีดที่มี ความหยาบผิว 6.127 Ra

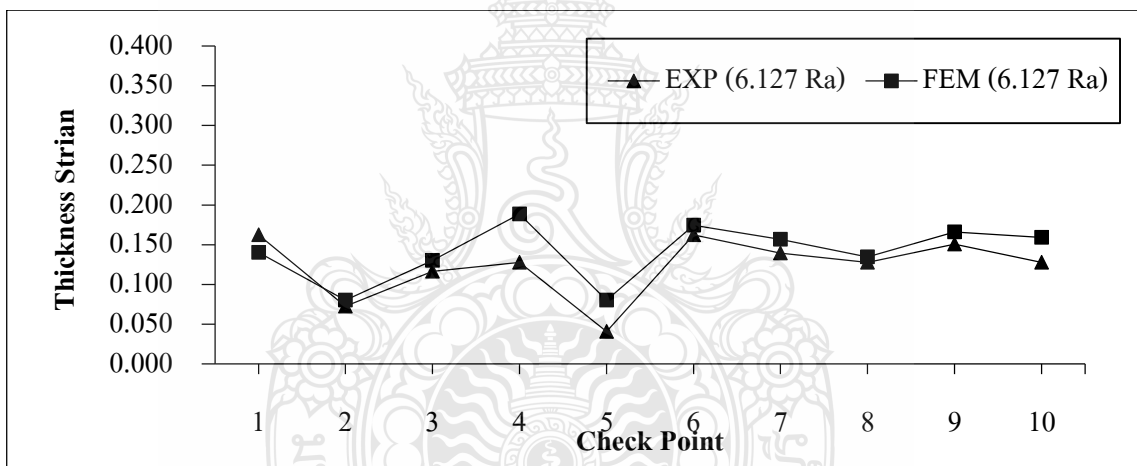
ผลการวัดความหนาทั้ง 10 จุด แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความหนาในแต่ละจุดที่มีความแตกต่างกัน จากกราฟความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCC ที่ผ่านการทดลองลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิวต่างกัน ดังรูปที่ 4.12-4.14 พบว่าจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานมากที่สุดคือจุดที่ 6 ทำให้จุดนี้มีค่าความเครียดแนวความหนาสูงสุด โดยเฉพาะชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปด้วยดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra ดังรูปที่ 4.14 มีค่าความเครียดแนวความหนาสูงสุดในจุดที่ 6 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.174 ในส่วนของดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.963 Ra ดังรูปที่ 4.13 มีค่าความเครียดแนวความหนาสูงสุดในจุดที่ 6 เช่นกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.174 และเช่นเดียวกันกับชิ้นงานที่ผ่านการทดลองลากขึ้นรูปด้วยดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra ดังรูปที่ 4.12 มีค่าความเครียดแนวความหนาสูงสุดในจุด 6 เท่ากับ 0.163 อย่างไรก็ตามจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า มีบางจุดที่มีค่าแตกต่างจากผลการทดลองมาก แม้ว่าในจุดอื่น ๆ จะมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองก็ตาม โดยจุดที่ 4 เป็นจุดที่ค่าความเครียดแนวความหนาจากการทดลองต่ำกว่าการจำลองลากขึ้นรูปทุกๆ ตัวแปรความหยาบผิวของดรอว์บีด เนื่องจากความแตกต่างของแรงกดชิ้นงานในช่วงสุดท้ายของการลากขึ้นรูป สูงกว่าการลากขึ้นรูปจริง ส่งผลให้เกิดการต้านทานการไหลตัวในช่วงสุดท้ายที่มีค่าสูงกว่าการขึ้นรูปจริง ซึ่งทำให้การเปลี่ยนแปลงความหนาในจุดที่ 4 ที่เป็นจุดสูงสุดของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงความหนาสูงขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.15 ความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCC ที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra



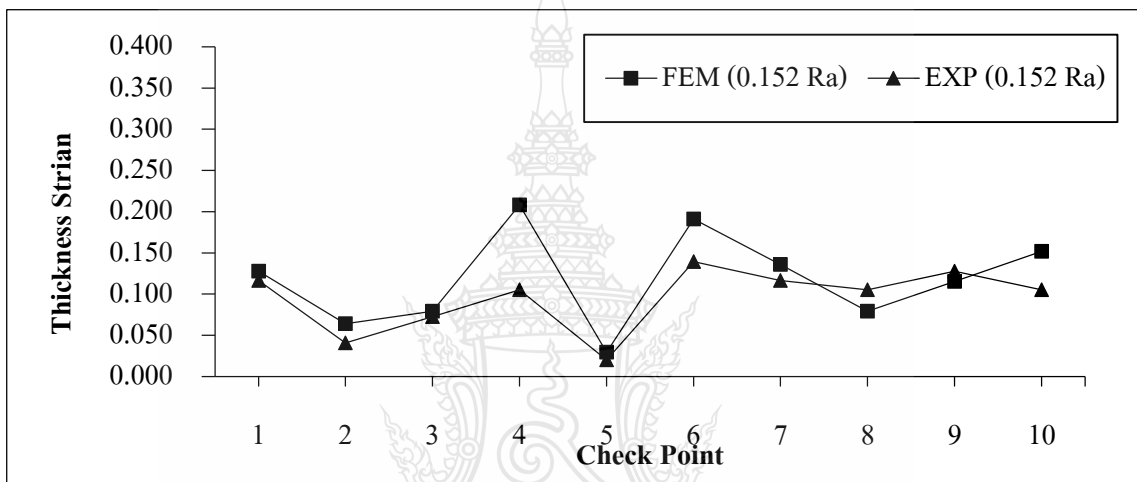
รูปที่ 4.16 ความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCD ที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.963 Ra



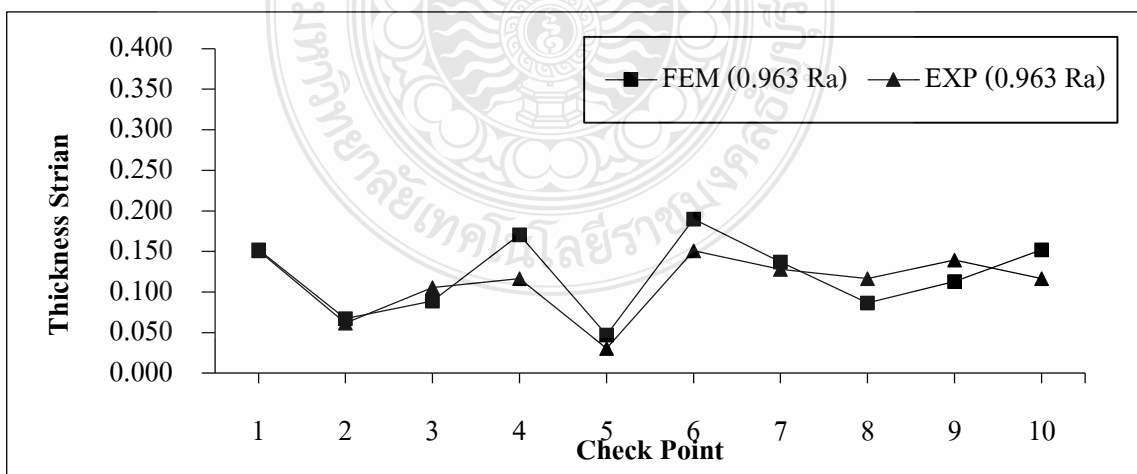
รูปที่ 4.17 ความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCD ที่ผ่านการทดลองลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra

ผลการวัดความหนาทั้ง 10 จุด ของชิ้นงาน SPCD ที่ผ่านการทดลองลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิวต่างกัน ดังรูปที่ 4.15 - 4.17 พบว่าจุดที่ 6 มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานมากที่สุด ทำให้จุดนี้มีค่าความเครียดแนวความหนาสูงที่สุด โดยเฉพาะการใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra ดังรูปที่ 4.17 มีความเครียดแนวความหนาสูงสุดเท่ากับ 0.163 ในจุดที่ 6 ขณะที่การใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.963 Ra ดังรูปที่ 4.16 มีค่าความเครียดแนวความหนาสูงสุดในจุดที่ 6 เช่นกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.163 และเช่นเดียวกันกับชิ้นงานที่ผ่านการทดลองลากขึ้นรูปด้วยดรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra ดังรูปที่ 4.15 มีค่าความเครียดแนวความหนาสูงสุดในจุดที่ 6 มีค่า

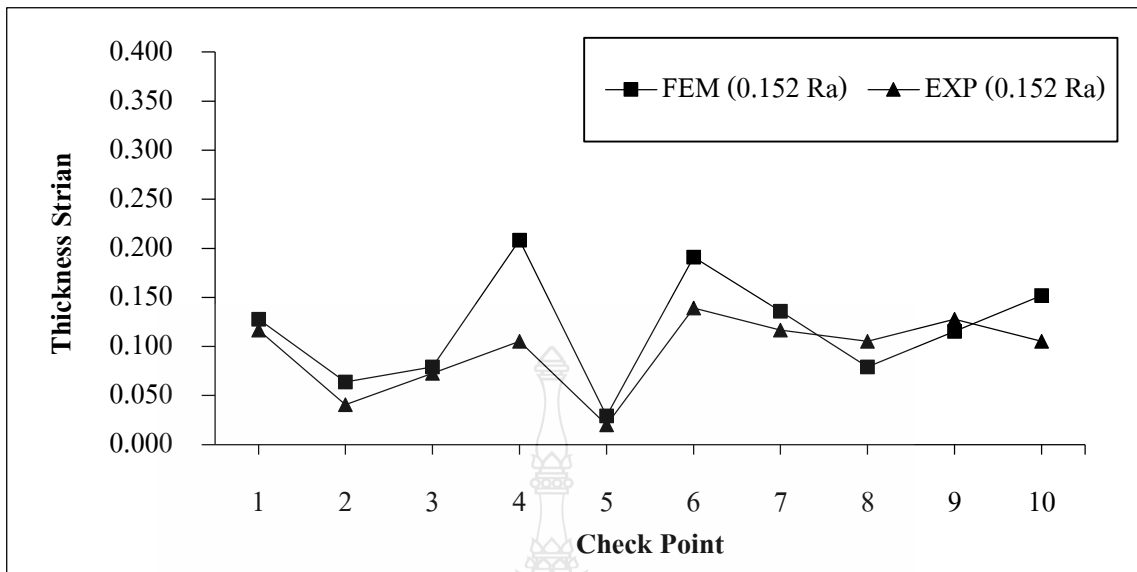
เท่ากับ 0.151 อย่างไรก็ตามผลจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีบางจุดที่มีค่าแตกต่างจากผลการทดลองมาก แม้ว่าในจุดอื่น ๆ จะมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองก็ตาม โดยจุดที่ 4 เป็นจุดที่ค่าความเครียดแนวความหนาจากการทดลองต่ำกว่าการจำลองลากขึ้นรูปทุกๆ ตัวแปรความหยาบผิวของครอว์บีค เนื่องจากความแตกต่างของแรงกดชิ้นงานในช่วงสุดท้ายของการลากขึ้นรูป สูงกว่าการลากขึ้นรูปจริง ส่งผลให้เกิดการต้านทานการไหลตัวในช่วงสุดท้ายที่มีค่าสูงกว่าการขึ้นรูปจริง ซึ่งทำให้การเปลี่ยนแปลงความหนาในจุดที่ 4 ที่เป็นจุดสูงสุดของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงความหนาสูงขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.18 ความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCE ที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ครอว์บีคที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra



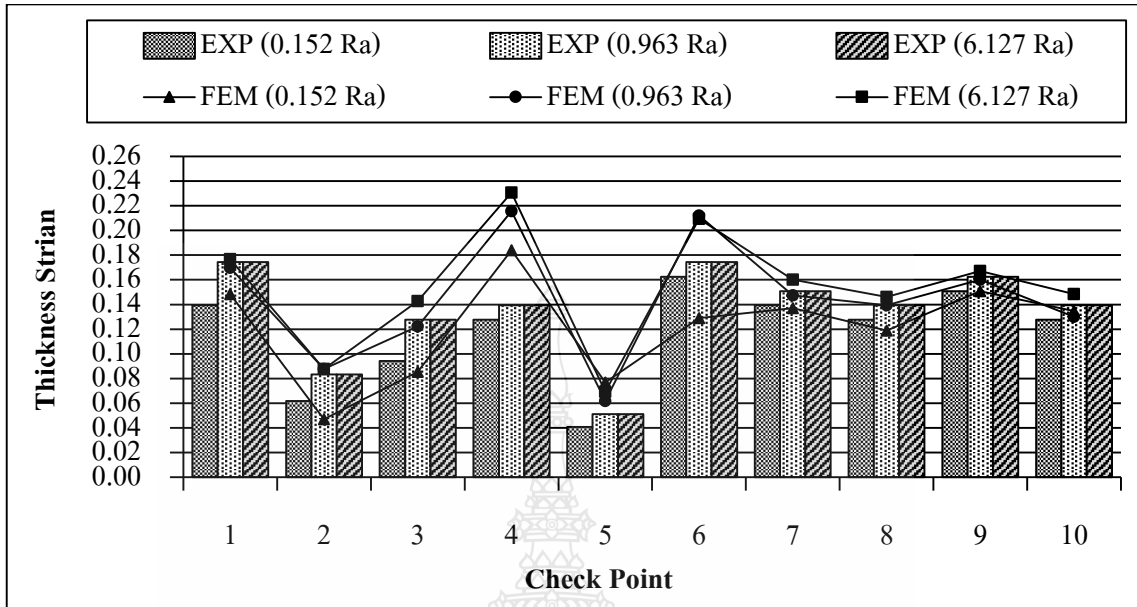
รูปที่ 4.19 ความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCE ที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ครอว์บีคที่มีความหยาบผิว 0.963 Ra



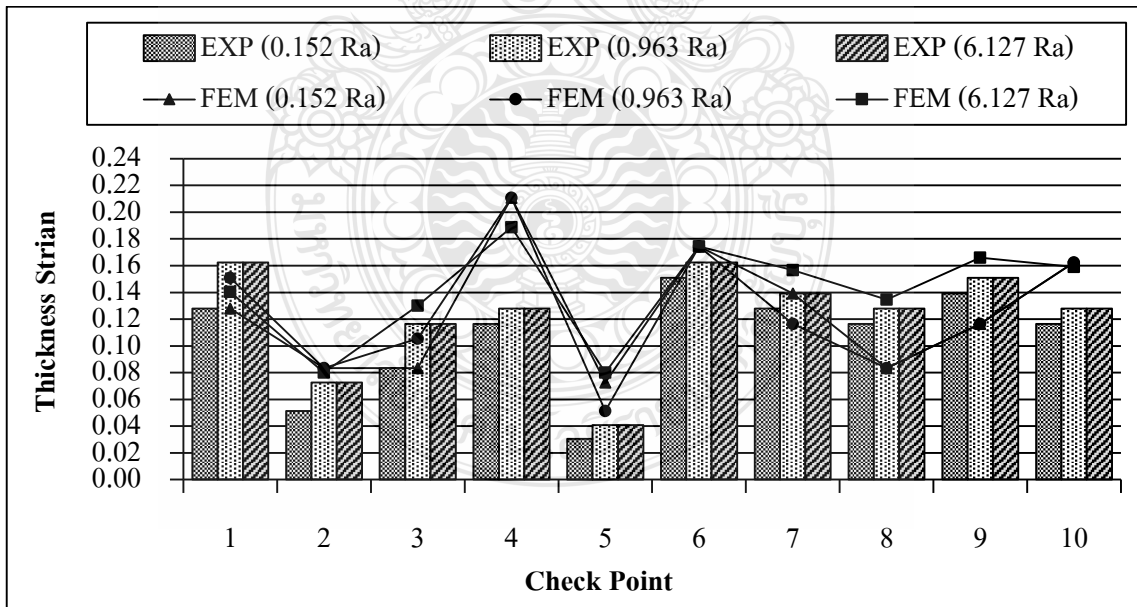
รูปที่ 4.20 ความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCE ที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอร์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra

จากผลการวัดความหนาทั้ง 10 จุด ของชิ้นงาน SPCE ที่ผ่านการทดลองลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอร์บีดที่มีความหยาบผิวต่างกัน ดังรูปที่ 4.18 – 4.20 พบว่าจุดที่ 6 มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานมากที่สุด ทำให้จุดนี้มีค่าความเครียดแนวความหนาสูงที่สุด โดยเฉพาะชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปด้วยดรอร์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra ดังรูปที่ 4.20 มีความเครียดแนวความหนาสูงสุดในจุดที่ 6 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.151 ขณะที่ดรอร์บีดที่มีความหยาบผิว 0.963 Ra ดังรูปที่ 4.19 มีความเครียดแนวความหนาสูงสุดในจุดที่ 6 เช่นกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.151 และเช่นเดียวกันกับชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปด้วยดรอร์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra ดังรูปที่ 4.18 มีค่าความเครียดแนวความหนาดำสุดในจุดที่ 6 เท่ากับ 0.139 อย่างไรก็ตามจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีบางจุดที่มีค่าแตกต่างจากผลการทดลองมาก แม้ว่าในจุดอื่น ๆ จะมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองก็ตาม โดยจุดที่ 4 เป็นจุดที่ค่าความเครียดแนวความหนาจากการทดลองต่ำกว่าการจำลองลากขึ้นรูปทุกๆ ตัวแปรความหยาบผิวของดรอร์บีด

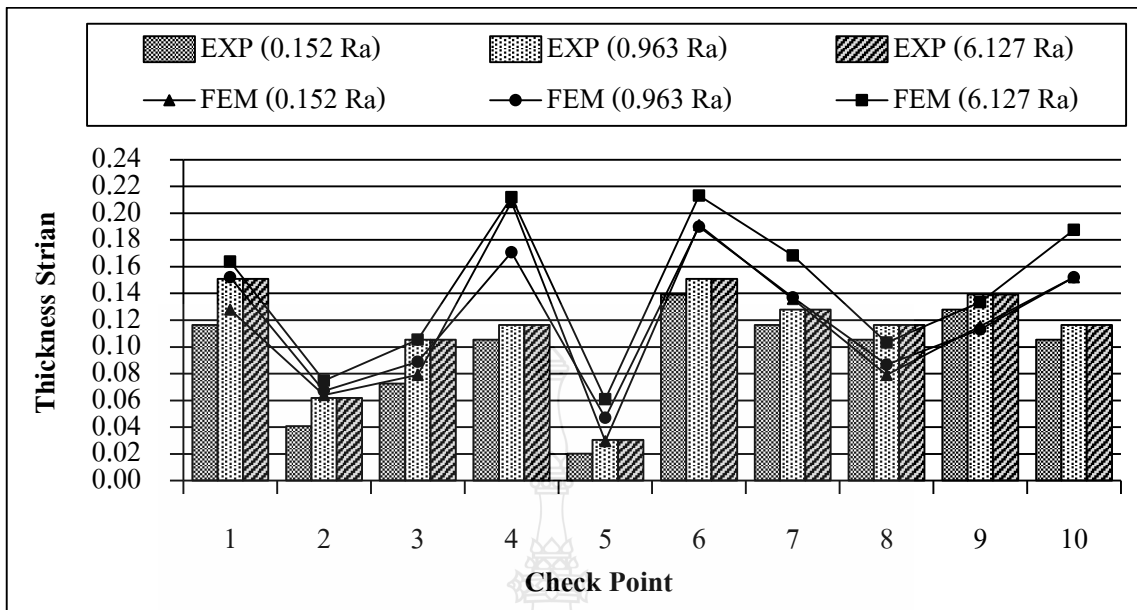
การผลการวัดการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอร์บีดที่มีความหยาบผิวต่างกัน ค่าที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบถึงอิทธิพลของความหยาบผิวที่มีผลต่อความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน[11]ที่มีรูปทรงไม่สมมาตร โดยการนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.21-4.23



รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCC จากการทดลอง และการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCC จากการทดลอง และการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

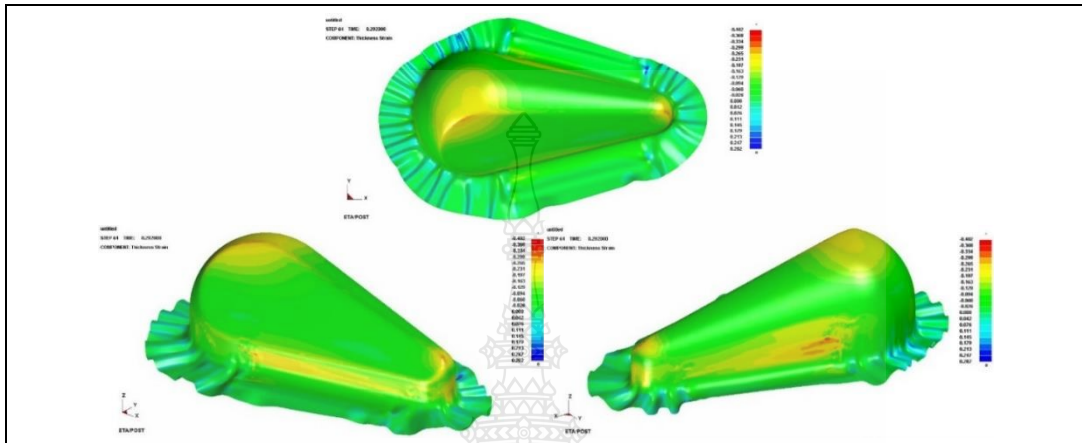


รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน SPCE จากการทดลอง และการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากกราฟความเครียดแนวความหนาของชิ้นงานทั้ง 3 ชนิดที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิวต่างกัน ผลการทดลองพบว่าจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานมากที่สุดคือจุดที่ 6 ทำให้จุดนี้มีค่าความเครียดแนวความหนาสูงที่สุด โดยเฉพาะการใช้ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิวสูงสุดคือ 6.127 Ra ขณะที่ดรอว์บีดที่มีความหยาบผิวดำสุด 0.152 Ra มีการเปลี่ยนแปลงความหนา ในจุดที่ 6 ต่ำสุด เมื่อเทียบกับความหยาบผิวแต่ละระดับ อย่างไรก็ตามในจุดที่ 1, 7, 8, 9 และ 10 ก็ยังถือว่ามีค่าความเครียดแนวความหนาสูงเช่นกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แม้ว่าผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีค่าความเครียดแนวความหนาส่วนใหญ่ใกล้เคียงกัน แต่ในจุดที่ 4 ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าความเครียดแนวความหนาสูงกว่าการทดลองจริง ซึ่งวัสดุ SPCC มีความแตกต่างอยู่ระหว่าง 0.05-0.09 , วัสดุ SPCD มีความแตกต่างอยู่ระหว่าง 0.06-0.09 และ วัสดุ SPCE มีความแตกต่างอยู่ระหว่าง 0.05-0.10

เมื่อพิจารณาบริเวณที่เกิดความเครียดแนวความหนาบนผิวชิ้นงานที่ผ่านการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น พบว่าบริเวณที่เกิดความเครียดแนวความหนาสูงมีทั้งหมด 4 บริเวณด้วยกัน ดังรูปที่ 4.24 บริเวณแรกคือส่วนโค้งที่จุดสูงสุดของชิ้นงาน หรือจุดที่ 4 ที่ทำการตรวจวัด ขณะที่บริเวณส่วนที่สองคือจุดปลายโค้งด้านเล็กของชิ้นงานหรือบริเวณจุดตรวจวัดที่ 6 และส่วนที่สามและสี่เป็นบริเวณที่แผ่นชิ้นงานไหลผ่านดรอว์บีดหรือจุดตรวจวัดที่ 7, 8, 9 และ 10 แต่เนื่องจากชิ้นงานมี

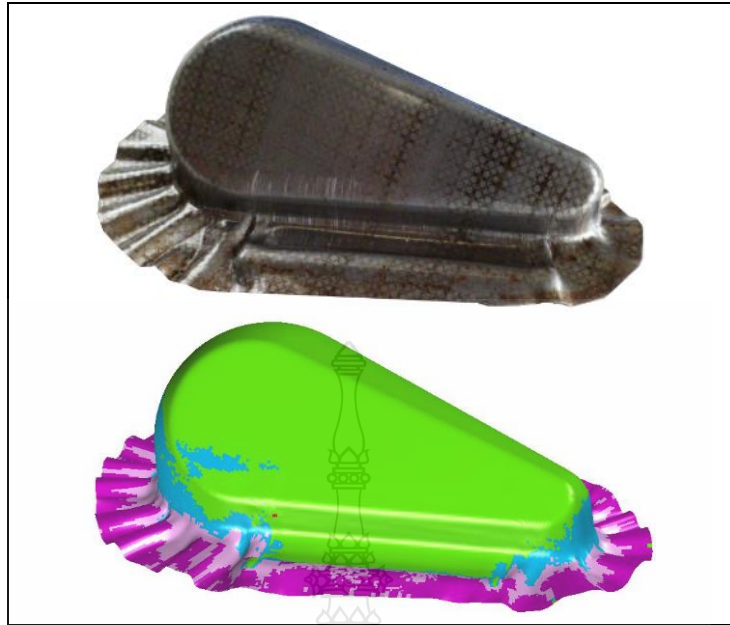
รูปทรงไม่สมมาตรทำให้ในแต่ละด้านมีการเปลี่ยนแปลงความหนาต่างกัน ชิ้นงานด้านที่รูปทรงโค้ง จะมีความเครียดแนวความหนาบริเวณที่ไหลผ่านดรอร์บีค สูงกว่าด้านที่มีหน้าตัดราบเอียง ซึ่งบริเวณที่กล่าวในข้างต้นนี้มีโอกาสเกิดการฉีกขาดสูง



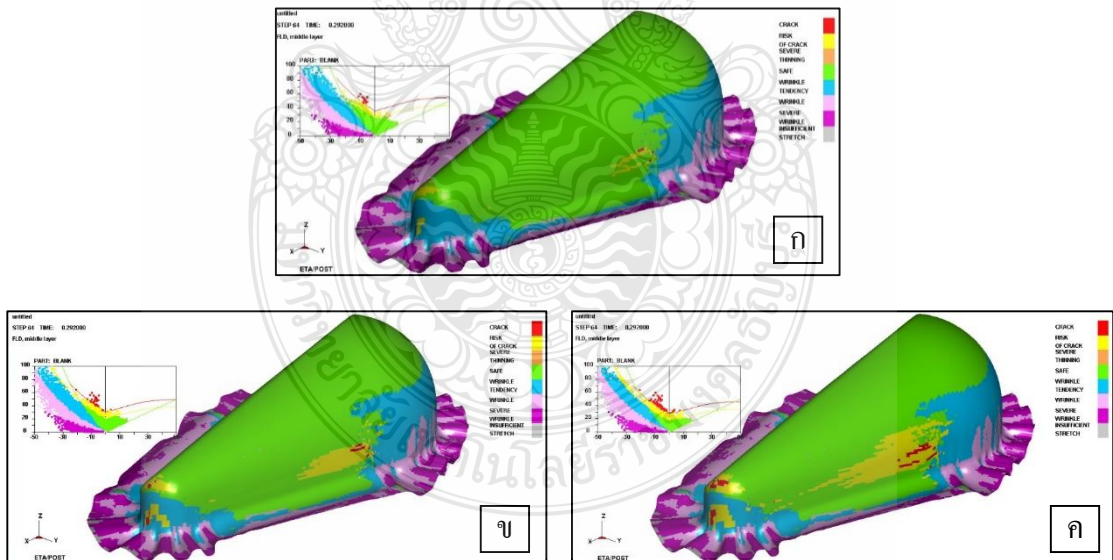
รูปที่ 4.24 ความเครียดแนวความหนาบนชิ้นงานที่ผ่านการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

4.3 การวิเคราะห์ทางกายภาพและแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

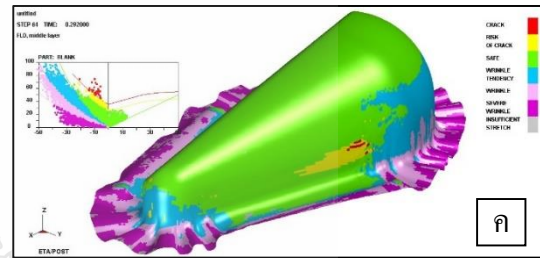
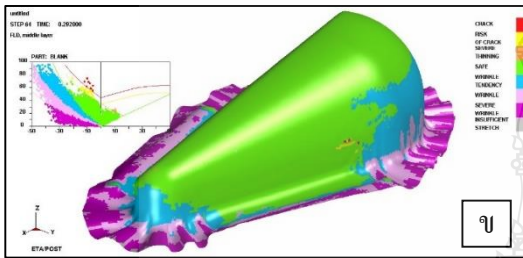
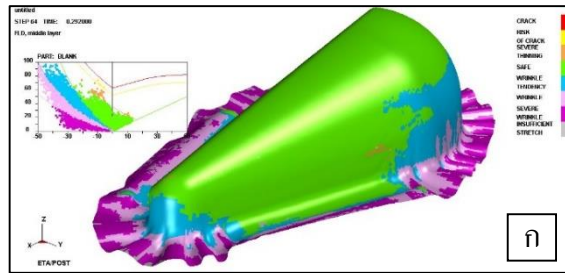
การตรวจสอบและวิเคราะห์ทางกายภาพ หรือรูปร่างของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปถือว่ามีความสำคัญเช่นเดียวกัน การพิจารณารูปร่างของชิ้นงานจากการทดลองลากขึ้นรูปกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกันดังรูปที่ 4.25 พบว่ามีการเกิดรอยยับบริเวณปีกชิ้นงาน และจากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram : FLD) ดังรูปที่ 4.26 - 4.28 แสดงผลการจำลองลากขึ้นรูปชิ้นงาน โดยใช้ดรอร์บีคที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra , 0.963 Ra และ 6.127 Ra พบว่าการใช้ดรอร์บีคที่มีความหยาบผิวสูงส่งผลให้ชิ้นงานมีโอกาสในการเกิดการฉีกขาดสูง ดังรูปที่ 4.26 (ค) ที่แสดงแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของชิ้นงาน SPCC พบว่าการใช้ดรอร์บีคที่มีความหยาบผิว 0.963 Ra ส่งผลให้พื้นที่การฉีกขาด และโอกาสในการเกิดการฉีกขาดเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับดรอร์บีคที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra และเพิ่มสูงขึ้นอีกเมื่อใช้ดรอร์บีคที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra โดยเฉพาะบริเวณจุดปลายโค้งด้านเล็กของชิ้นงาน และบริเวณที่ไหลผ่านดรอร์บีค และในส่วนของการใช้ดรอร์บีคที่มีความหยาบผิวต่ำส่งผลให้ชิ้นงานมีโอกาสเกิดการฉีกขาดต่ำตามไปด้วย ดังนั้นอิทธิพลความหยาบผิวของดรอร์บีคถือว่ามีส่วนต่อการต้านทานการไหลตัวของชิ้นงานเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะบริเวณที่มีการไหลผ่านดรอร์บีค



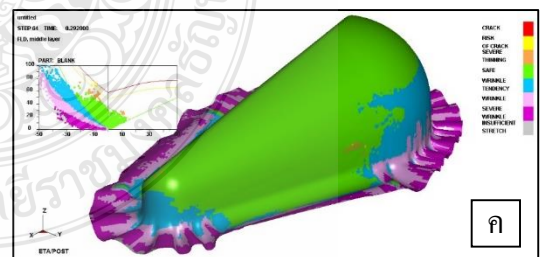
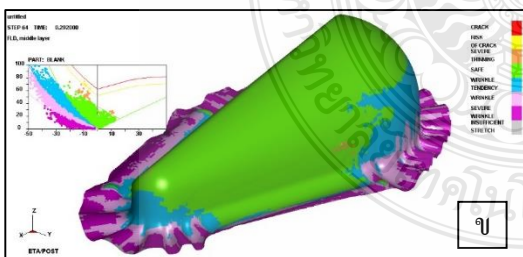
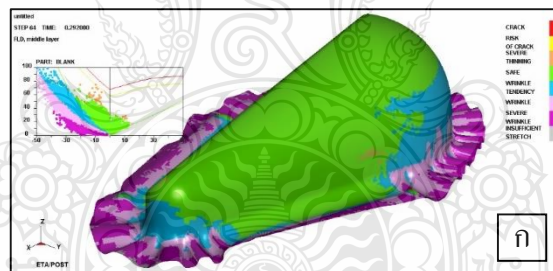
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบรูปทรงของชิ้นงาน SPCD ระหว่างการทดลองตกขึ้นรูปกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้ครอว์บีคที่มี ความหยาบผิว 0.152 Ra



รูปที่ 4.26 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของชิ้นงานวัสดุ SPCC ที่ผ่านการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้ครอว์บีคที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra (ก), 0.963 Ra (ข) และ 6.127 Ra (ค)

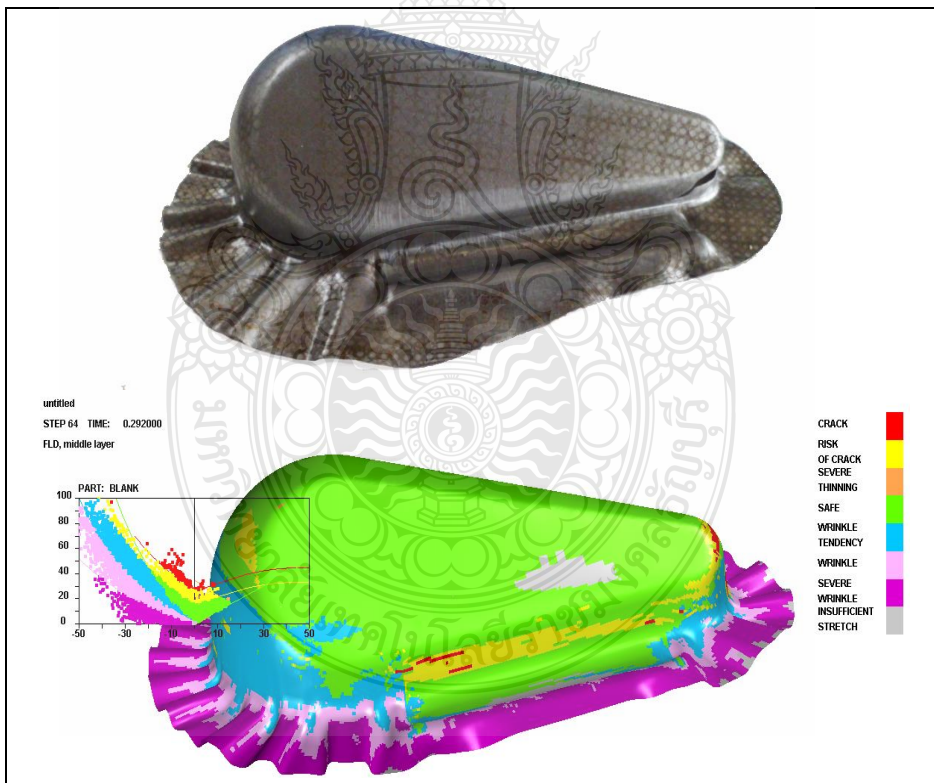


รูปที่ 4.27 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของชิ้นงานวัสดุ SPCD ที่ผ่านการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้เครื่องมือที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra (ก), 0.963 Ra (ข) และ 6.127 Ra (ค)



รูปที่ 4.28 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของชิ้นงานวัสดุ SPCE ที่ผ่านการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้เครื่องมือที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra (ก), 0.963 Ra (ข) และ 6.127 Ra (ค)

อย่างไรก็ตามชนิดของวัสดุถือว่ามีความสำคัญเช่นกันสำหรับการลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร เนื่องจากสมบัติทางกลของวัสดุจะส่งผลโดยตรงต่อการไหลตัวและการยึดตัวของชิ้นงาน ซึ่งวัสดุที่สามารถขึ้นรูปได้ดีที่สุดคือ SPCE รองลงมาคือวัสดุ SPCD และ SPCC ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีความสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกล ซึ่งวัสดุ SPCE มีค่าเลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (n - Strain - hardening exponent) และ R (r-value หรือ Plastic Strain Ratio) สูงสุดนั้นก็หมายความว่าขีดจำกัดในการเปลี่ยนรูปร่างและความสามารถในการต้านทานการหดตัวในแนวความหนา ของวัสดุสูงตามไปด้วย [35] และในทางตรงกันข้ามวัสดุ SPCC มีค่าเลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (n - Strain - hardening exponent) และ R (r-value หรือ Plastic Strain Ratio) ต่ำสุดทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปต่ำตามไปด้วย จากผลการจำลองแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของชิ้นงานวัสดุ SPCC ที่ใช้ครอว์บีคมีความหยาบผิว 6.127 Ra ดังรูปที่ 4.26 (ก) ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดที่ปลายโค้งด้านเล็ก ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบผลการจำลองแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของชิ้นงานวัสดุ SPCC ที่ใช้ครอว์บีคมีความหยาบผิว 6.127 Ra กับชิ้นงานที่ผ่านการทดลองจริง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการไหลตัวของโลหะแผ่นในกระบวนการลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร โดยการใช้ดรอปบีดที่มีความหยาบผิวต่างกัน และทำการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษานี้ใช้ดรอปบีดที่มีรูปทรงครึ่งวงกลม โดยกำหนดความหยาบผิว 3 ระดับ คือ 0.152 Ra, 0.963 Ra และ 6.127 Ra สำหรับวัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กกล้ารีดเย็น เกรด JIS : SPCC, SPCD และ SPCE ที่มีความหนา 1.0 มม. ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขแรงกดชิ้นงาน (blank holder force) 50 เปอร์เซ็นต์ ของแรงที่ได้จากการคำนวณ ในส่วนของการเก็บผลการทดลองจะทำการวัดแรงในการลากขึ้นรูป และวัดการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงาน เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง ซึ่งผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุป

5.1.1 ผลการทดลองลากขึ้นรูปชิ้นงาน SPCC, SPCD และ SPCE ที่มีรูปทรงไม่สมมาตร โดยใช้ดรอปบีดที่มีความหยาบผิวต่างกัันนั้น พบว่าความหยาบผิวของดรอปบีดมีผลต่อการไหลตัวของชิ้นงาน ดรอปบีดที่มีความหยาบผิวมากส่งผลให้ชิ้นงานมีโอกาสเกิดการฉีกขาด และ เกิดรอยย่น โดยผลของแรงในการลากขึ้นรูปที่ได้จากการทดลอง พบว่าการใช้ดรอปบีดที่มีความหยาบผิวน้อยที่สุด 0.152 Ra ใช้แรงในการลากขึ้นรูปต่ำสุด เมื่อเทียบกับดรอปบีดที่มีความหยาบผิวแต่ละระดับ โดยวัสดุ SPCC ใช้แรงในการลากขึ้นรูปต่ำสุด 135 kN วัสดุ SPCD ใช้แรงในการลากขึ้นรูปต่ำสุด 133 kN และวัสดุ SPCE ใช้แรงในการลากขึ้นรูปต่ำสุด 130 kN และเช่นเดียวกันกับค่าความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน ที่พบว่าการใช้ดรอปบีดที่มีความหยาบผิวน้อยที่สุด 0.152 Ra ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความเครียดแนวความหนา ลดลง โดยชิ้นงาน SPCC, SPCD และ SPCE ใช้ดรอปบีดที่มีความหยาบผิวน้อยที่สุด 0.152 Ra มีค่าความเครียดแนวความหนาสูงที่สุดที่บริเวณปลายโค้งด้านเล็ก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.163, 0.151 และ 0.139 ตามลำดับ

5.1.2 ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลองภายใต้ความหยาบผิวที่ต่างกัน อย่างไรก็ตามแรงจากผลการจำลองมีค่าสูงกว่าการทดลองขึ้นรูปจริงประมาณ 23 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของค่าความเครียดแนวความหนาของชิ้นงานมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แม้ว่าผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีค่าความเครียดแนว

ความหนาส่วนใหญ่อีกก็เช่นกัน แต่ในจุดปลายโคงด้านใหญ่ ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าความเครียดแนวความหนาสูงกว่าการทดลองจริง

จากผลการศึกษาจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้ครอปิดที่มีความหนาผิวสูงอาจส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด และเกิดรอยร้าวได้ โดยตัวแปรความหนาผิวต่ำสุด 0.152 Ra เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในการลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร และการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงถึงพฤติกรรมการขึ้นรูปชิ้นงาน ที่มีแนวโน้มของผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการทดลอง ซึ่งสามารถทำนายการเกิดการฉีกขาดได้ และรอยร้าวได้ เมื่อพิจารณาแผนภาพขีดจำกัดการขึ้น (FORMING LIMIT DIAGRAM: FLD) ที่แสดงถึงเอลิเมนต์ที่เกิดการฉีกขาด และรอยร้าว

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรอิทธิพลความหนาผิวของครอปิดต่อการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรกับวัสดุออกกลุ่มเหล็กโดยเปรียบเทียบกับไฟไนต์เอลิเมนต์

5.2.2 ในการขึ้นรูปอาจมีตัวแปรอื่นอีก ที่มีผลทำให้เกิด แรงเสียดทานได้ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป

5.2.3 การใช้ครอปิดที่หนาขนาดนั้นนอกจากจะต้องใช้แรงในการขึ้นรูปมากแล้วยังจะทำให้ได้ผิวชิ้นงานที่ไม่สวยงามอีกด้วย

บรรณานุกรม

- [1] กิตติภักดิ์ รัตนจันทร์. (2542). ผลกระทบจากครอว์บีตในการขึ้นรูปโลหะแผ่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ วิศวกรรมการผลิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพฯ.
- [2] Schuler GmbH. (1998). **Metal Forming Handbook**. Berlin: Springer-Verlag, ch. 4.
- [3] Meinder, T. (2000) **Developments in numerical simulations of the real-life deep drawing process**. Ph.D. dissertation. Univ. Twente-Enschede, Netherlands.
- [4] Meinders, T., Carleer, B.D., Geijselaers, H.J.M., & Huétink, J. (1998). **The implementation of an Equivalent Drawbead model in a finite Element code for sheet metal forming**. Journal of material processing Technology. Vol. 83 (1–3). pp. 234-244.
- [5] Samuel, M. (2002). **Influence of drawbead geometry on sheet metal forming**. Journal of Materials Processing Technology. Vol. (1) 122. pp.103-94.
- [6] Wen-yu, MA., Bao-yu WANG., Lei FU., Jing ZHOU., & Ming-dong HUANG. (2015). **Effect of friction coefficient in deep drawing of AA 6111 sheet at elevated temperatures**. Trans. Nonferrous Met. Soc. China. Vol. 25. pp. 2351-2342.
- [7] Zhang, S., Hodgson, P.D., & Cardew-Hall, M.J. (2003). **A finite element simulation of micro-mechanical frictional behaviour in metal forming**. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 134, pp. 81-91.
- [8] Hsu, T.-C., & Yang, T.-S. (2001). **The Computer Simulation of Tribological Influence on Strain Path and Forming Limit in Punch Stretching of Sheet Metal**. Int J Adv Manuf Technol. Vol. 17. pp. 393-399.
- [9] Wilson, W.R.D., Huang, X.B., & Hsu, T.C. (1995). **A realistic friction model for computer simulation of sheet metal forming processes**. ASME J. Eng. Ind. Vol. 117. pp. 209-202.
- [10] Wiklunda, D., Rosén, B.-G., & Wihlborg, A. (2009). **A friction model evaluated with results from a bending-under-tension test**. Tribology International. Vol. 42 pp.1448-1452.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] Padmanabhan, R., Oliveira, M.C., Alves, J.L. & Menezes, L.F. (2007). **Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel.** Finite Element in Analysis and Design. Vol. 43(14). pp.1062-1067.
- [12] นัตร์ชัย จันทร์เด่นดวง. (2550). การวิเคราะห์การลากขึ้นรูปด้วย. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.u.lib.kmutt.ac.th>
- [13] ชาญ อดันงาน. (2541). เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะและพื้นฐานการขึ้นรูปโลหะ. ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [14] Sivakorn Anghthong. (1994). **Submitted as partial fulfillment for the degree of master of Engineering in Advanced Manufacturing Technology.** A Critical Analysis of the Non-Symmetrical Deep Drawing Process. Vol. 46. pp.14-71.
- [15] อดิศร ประสิทธิ์ศักดิ์. การทำนายการเสียหายแบบอ่อนหนืดในการขึ้นรูปลึกแผ่นอลูมิเนียมรูปถ้วยทรงสี่เหลี่ยมจตุรัส. วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [16] สุรวุฒิ ยะนิล (2551). การวิเคราะห์หาแรงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดดรอว์บีดของกรรมวิธีขึ้นรูปลึกถ้วยสี่เหลี่ยม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [17] ชาญชัย ทรัพย์ากร. (2537). การออกแบบแม่พิมพ์. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี. (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [18] Zharkov, V.A. (1995) **Theory and Practice of Deep Drawing.** Mechanical Engineering Publication Limited. London.
- [19] ภาสพิรุฬห์ ศรีสำโรง และ ณัฐชานันท์ อังศุเสรมณี. (2554). การจำลองการทำงานบนเครื่อง Ball-on-Disk เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยี ในงานขึ้นรูปโลหะแผ่น. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.
- [20] Van Sant Enterprises. **Truman Road Pella.** IA 50219 877-VAN-SANT.
- [21] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2550). ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 4. : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 3-18.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [22] Clough, R.W. (1960). **The Finite Element Method**. Pittsburgh, PA, September pp. 8-9.
- [23] Tai Hun Kwon. **IN TRODUCTION TO FINITE ELEMENT METHOD**. Department of Mechanical Engineering Pohang University of Science and Technology. pp. 2.
- [24] MSC.Software Corporation. (2007). **INTRODUCTION TO MSC. MARC AND MENTAT**. 815 Colorado Boulevard Innsbrucker Ring 15 Los Angeles.
- [25] J D Square Inc. (2009). **2244 Eddie Williams Rd**. Johnson City, Opyright.
- [26] Daryl, L. **FINITE ELEMENT METHOD Fourth Edition**. University of Wisconsin-Platteville.
- [27] สุริยา ประสมทอง. (2555). **ศึกษาอิทธิพลรูปทรงของดรอปีดในการลากขึ้นรูปโลหะที่มีรูปทรงไม่สมมาตรโดยการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์**.วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [28] Kobayashi, S., Oh, S. & Altan, T. (1989). **Metal Forming and Finite Element Method**. New York Oxford University. pp.58-109.
- [29] พนา แซ่มสวัสดิ์. (2541). **การแก้ปัญหารอยย่นในงานขึ้นรูปด้วยที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [30] Watanapa, A., & Torsakul, S. (2012). **The Influence of Surface Roughness of Drawbead no Non-Symmetry Deep Drawing Cold Rolled Steel Sheet**. World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol:6. pp. 05-23.
- [31] บุญส่ง จงกลนี้. (2552). **การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปลึกขึ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรต่อสมบัติการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [32] Meiders, et al. (1998). **The implementation of an Equivalent Drawbead model in a finite Element code for sheet model forming**. Journal of material processing Technology. pp.234-244.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [33] ทวีภัทร์ บูรณชาติ. (2550). การออกแบบการขึ้นรูปชิ้นส่วนขวางยึดเครื่องยนต์โดยการวิเคราะห์การฉีกขาดและรอยย่น. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [34] Zhang, S., Hodgson, P.D., & Cardew-Hall, M.J. (2003). **A finite element simulation of micro-mechanical frictional behaviour in metal forming.** Journal of Materials Processing Technology. Vol.134. pp. 81–91.
- [35] ชนสาร อินทรกำธร. 5 คำถามกับการจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่น. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.



ภาคผนวก

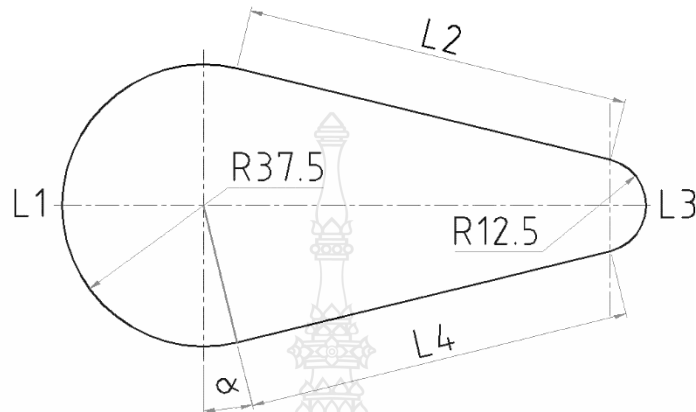


ภาคผนวก ก
การคำนวณแรง



ก.1 การคำนวณแรงขึ้นรูปลึก

แรงในการขึ้นรูปสามารถหาได้จากสมการที่ 2.3 มีการคำนวณโดยการประมาณค่าดังแสดงวิธี
ดังนี้



รูปที่ ก.1 เส้นรอบรูปขึ้นงานหาความยาว Lt (L Total)

เมื่อ L2 กับ L4 เป็นเส้นตรงที่มีขนาดเท่ากันและ L1 กับ L3 เป็นเส้นโค้ง R1 = 37.5 มม. R2 = 12.5 มม. ตามลำดับเพื่อหาค่ามุม α

$$\sin \alpha = \frac{R1 + R2}{105}$$

แทนค่าในสมการ

$$\sin \alpha = \frac{37.5 + 12.5}{105} = \frac{25}{105}$$

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{25}{105} = 13.77 \text{ องศา}$$

$$L2 = L4 = 105 \cos \alpha$$

$$= 105 \cos 13.77$$

$$L2 = L4 = 102 \text{ มม}$$

หาค่า $L1$ และ $L3$ ที่สัมผัสส่วนโค้งของ $R1$ และ $R2$

$$L1 = \frac{\pi(180 + 2\alpha)R1}{180}$$

$$L1 = \frac{\pi(180 + 2 \times 13.77) \times 37.5}{180}$$

$$L1 = 135.8 \text{ mm}$$

$$L1 = \frac{\pi(180 + 2\alpha)R2}{180}$$

$$L3 = \frac{\pi(180 + 2 \times 13.77) \times 12.5}{180}$$

$$L3 = 33.3 \text{ mm}$$

$$Lt = L1 + L2 + L3 + L4$$

$$Lt = 135.8 + 102 + 102 + 33.3$$

$$Lt = 373.1 \text{ mm}$$

แทนค่าในสมการที่ 2.00

$$Fd = \frac{241 + 321}{2} \times 373.1 \times 1.0$$

$$Fd = \frac{104841}{1000} \text{ N หรือ } = 104.84 \text{ kN}$$

ก.2 แรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน

แรงกดยึดแผ่นชิ้นงานสามารถหาได้จากสมการที่ 2.4 และ 2.5 ดังนี้

หาค่า
$$h = \sqrt{105^2 - (37.5 - 12.5)^2} = 101.98 \text{ mm}$$

$$A_o = \frac{207.54}{360} \pi (75)^2 + \frac{152.46}{360} \pi (38)^2 + \frac{87+48}{2} 101.98 + \frac{81+46}{2} 101.98$$

$$A_o = 25468.17 \text{ mm}^2$$

$$A_{st} = \frac{207.54}{360} \pi (37.5)^2 + \frac{154.46}{360} \pi (12.5)^2 + 2 \left[\frac{37.5+12.5}{2} 101.98 \right]$$

$$A_{st} = 7853.78 \text{ mm}^2$$

คำนวณค่า k , m ของวัสดุ SPCC

$$k = \frac{1 + (r_{\max} - r_{\min})}{r_m n_m} 0.49 \times 10^{-3}$$

$$m = 1 + \left[\frac{d_{fo}}{t_o} - 175 \right] \frac{0.17}{100}$$

ค่าคุณสมบัติของวัสดุ SPCC ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E517-92

$$r_m = \frac{(r_0 + 2r_{45} + r_{90})}{4}$$

$$r_m = \frac{(0.89 + 2(0.699) + 1.102)}{4}$$

$$r_m = 0.848$$

$$r_{\max} = 1.102$$

$$r_{\min} = 0.699$$

$$n_m = \frac{(n_0 + 2n_{45} + n_{90})}{4}$$

$$n_m = 0.184$$

หาค่า n ตามมุมใดๆจากสมการที่ 2.15

จากสมการเส้นตรงของข้อมูลคู่ระหว่างแรงกับความเครียด F, ε

$$k = \left[\frac{1 + (1.102 - 0.699)}{0.848 \times 0.180} \right] 0.49 \times 10^{-3}$$

$$k = 4.5038 \times 10^{-3}$$

d_{fo} , (The fictitious equivalent punch diameter)

$$d_{fo} = \sqrt{\frac{4A_{st}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(7854)}{\pi}} = 100 \text{ mm}$$

ค่าตัวแปรของวัสดุ m

$$m = 1 + \left[\frac{100}{1} - 175 \right] \frac{0.17}{100}$$

$$m = 0.87$$

แรงกดที่ F_{NA} แผ่นกดชิ้นงาน (BHF)

$$P_{NA} = (4.5038 \times 10^{-3})(0.87) \times \left(\frac{25468}{7854} - 1 \right) \times 321$$

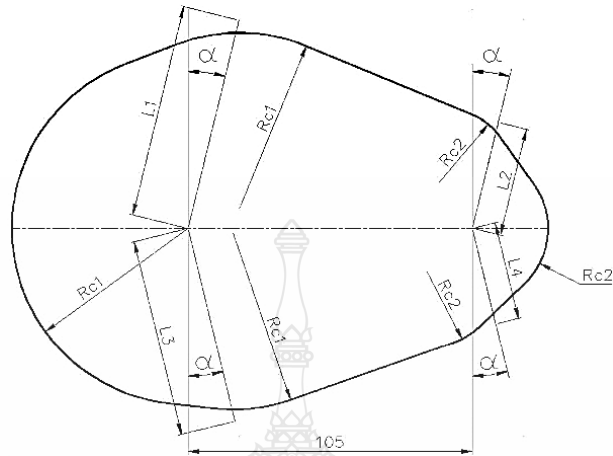
$$P_{NA} = 2.8208 \text{ N/mm}^2$$

\therefore BHF จาก $F_{NA} = P_{NA}(A_o - A_{st})$

$$F_{NA} = 2.8208(25468 - 7854)$$

$$F_{NA} = 49685.57 \text{ N หรือ } \cong 49.6 \text{ kN}$$

ก.3 ขนาดของแผ่นชิ้นงาน



รูปที่ ก.2 การคำนวณแผ่นตัดเปล่า

หาค่า รัศมี $Rc1$ จากสมการ

$$D1 = \sqrt{d^2 + (d + 2a)^2 + 4d(h - 0.43r)}$$

เมื่อกำหนดให้

$$d = 75 \text{ mm}$$

$$h = 15 \text{ mm}$$

$$a = 5 \text{ mm}$$

$$r = 4 \text{ mm}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} D1 &= \sqrt{75^2 + (75 + 2(5))^2 + 4(75)(15 - 0.43(4))} \\ &= 129.75 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$Rc1 = \frac{D1}{2} = \frac{129.75}{2} = 64.88 \cong 65 \text{ mm}$$

หาค่า รัศมี $Rc2$

$$\begin{aligned} D2 &= \sqrt{25^2 + (25 + 2(5))^2 + 4(25)(15 - 0.43(4))} \\ &= 56.37 \text{ mm} \end{aligned}$$

เมื่อกำหนดให้ $d = 25$ mm

$$h = 15 \text{ mm}$$

$$a = 5 \text{ mm}$$

$$r = 4 \text{ mm}$$

$$Rc2 = \frac{D2}{2} = \frac{56.37}{2} = 28.19 \cong 28 \text{ mm}$$

หาค่าความยาว $L1$ และ $L2$

$$L1 = \frac{\pi}{2} R1 + (h - r) + \frac{\pi}{2} r + (a - r)$$

เมื่อกำหนดให้ $R1 = 37.5$ mm

$$h = 15 \text{ mm}$$

$$a = 5 \text{ mm}$$

$$r = 4 \text{ mm}$$

แทนค่าตัวแปรในสมการเพื่อหาค่า $L1$

$$L1 = \frac{\pi}{2} (37.5) + (15 - 4) + \frac{\pi}{2} (4) + (5 - 4)$$

$$L1 = 77.16 \cong 77 \text{ mm}$$

$$L2 = \frac{\pi}{2} R2 + (h - r) + \frac{\pi}{2} r + (a - r)$$

เมื่อกำหนดให้ $R1 = 12.5$ mm

$$h = 15 \text{ mm}$$

$$a = 5 \text{ mm}$$

$$r = 4 \text{ mm}$$

$$L2 = \frac{\pi}{2}(12.5) + (15 - 4) + \frac{\pi}{2}(4) + (5 - 4)$$

$$L2 = 37.91 \cong 38 \text{ mm}$$

หาค่าความยาว $L3$ และ $L4$

$$L3 = 2R1 \sin 45 + (h - r) + \frac{\pi}{2}r + (a - r)$$

เมื่อกำหนดให้ $R1 = 37.5 \text{ mm}$

$$h = 15 \text{ mm}$$

$$a = 5 \text{ mm}$$

$$r = 4 \text{ mm}$$

แทนค่าในสมการหาค่า $L3$

$$L3 = 2(37.5) \sin 45 + (15 - 4) + \frac{\pi}{2}(4) + (5 - 4)$$

$$L3 = 71.31 \cong 71 \text{ mm}$$

$$L4 = 2R2 \sin 45 + (h - r) + \frac{\pi}{2}r + (a - r)$$

เมื่อกำหนดให้ $R2 = 12.5 \text{ mm}$

$$h = 15 \text{ mm}$$

$$a = 5 \text{ mm}$$

$$r = 4 \text{ mm}$$

แทนค่าในสมการหาค่า $L4$

$$L4 = 2(12.5) \sin 45 + (15 - 4) + \frac{\pi}{2}(4) + (5 - 4)$$

$$L4 = 35.95 \cong 36 \text{ mm}$$



ภาคผนวก ข
การวัดความหนาชิ้นงาน

ข.1 ความหนาชิ้นงานหลังการทดลองลากขึ้นรูป

ตารางที่ ข.1 ผลการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการทดลองลากขึ้นรูปวัสดุ SPCC

ตำแหน่ง ความหนาผิว	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra : 6.127	0.820	0.910	0.875	0.867	0.935	0.830	0.850	0.865	0.850	0.865
	0.830	0.920	0.865	0.850	0.930	0.835	0.840	0.860	0.850	0.850
	0.825	0.915	0.870	0.859	0.933	0.833	0.845	0.863	0.850	0.858
Ra : 0.963	0.860	0.915	0.885	0.870	0.940	0.840	0.865	0.870	0.855	0.870
	0.830	0.925	0.890	0.870	0.955	0.830	0.870	0.860	0.860	0.860
	0.845	0.920	0.888	0.870	0.948	0.835	0.868	0.865	0.858	0.865
Ra : 0.152	0.880	0.940	0.915	0.880	0.965	0.860	0.870	0.890	0.860	0.880
	0.870	0.940	0.910	0.870	0.960	0.840	0.880	0.875	0.860	0.885
	0.875	0.940	0.913	0.875	0.963	0.850	0.875	0.883	0.860	0.883

ข.2 ความหนาชิ้นงานวัสดุ SPCD ดังแสดงในตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.2 ผลการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการทดลองลากชิ้นรูปวัสดุ SPCD ผิว

ตำแหน่ง ความหยาบผิว	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Ra : 6.127	0.840	0.950	0.865	0.920	0.920	0.850	0.880	0.830	0.900
0.845		0.900	0.900	0.830	0.960	0.840	0.850	0.920	0.810	0.850
0.843		0.925	0.883	0.875	0.940	0.845	0.865	0.875	0.855	0.880
Ra : 0.963	0.870	0.910	0.850	0.920	0.950	0.860	0.855	0.890	0.880	0.845
	0.835	0.960	0.930	0.845	0.980	0.845	0.890	0.880	0.850	0.920
	0.853	0.935	0.890	0.883	0.965	0.853	0.873	0.885	0.865	0.883
Ra : 0.152	0.890	0.940	0.915	0.870	0.955	0.840	0.860	0.870	0.900	0.910
	0.880	0.970	0.940	0.915	0.990	0.890	0.910	0.910	0.845	0.865
	0.885	0.955	0.928	0.893	0.973	0.865	0.885	0.890	0.873	0.888

ข.3 การวัดความหนาชิ้นงานวัสดุ SPCE ดังแสดงในตารางที่ ข.3

ตารางที่ ข.3 ผลการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการทดลองลากชิ้นรูปวัสดุ SPCE

ตำแหน่ง ความหยาบผิว	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Ra : 6.127	0.870	0.900	0.890	0.840	0.940	0.870	0.900	0.850	0.900
0.830		0.965	0.900	0.935	0.965	0.840	0.850	0.910	0.830	0.865
0.850		0.933	0.895	0.888	0.953	0.855	0.875	0.880	0.865	0.888
Ra : 0.963	0.885	0.940	0.880	0.865	0.960	0.870	0.860	0.865	0.910	0.850
	0.840	0.940	0.930	0.920	0.985	0.860	0.900	0.930	0.840	0.930
	0.863	0.940	0.905	0.893	0.973	0.865	0.880	0.898	0.875	0.890
Ra : 0.152	0.900	0.955	0.980	0.882	0.980	0.850	0.870	0.880	0.900	0.920
	0.890	0.970	0.883	0.930	0.990	0.895	0.910	0.920	0.860	0.890
	0.863	0.940	0.905	0.893	0.973	0.865	0.880	0.898	0.875	0.890

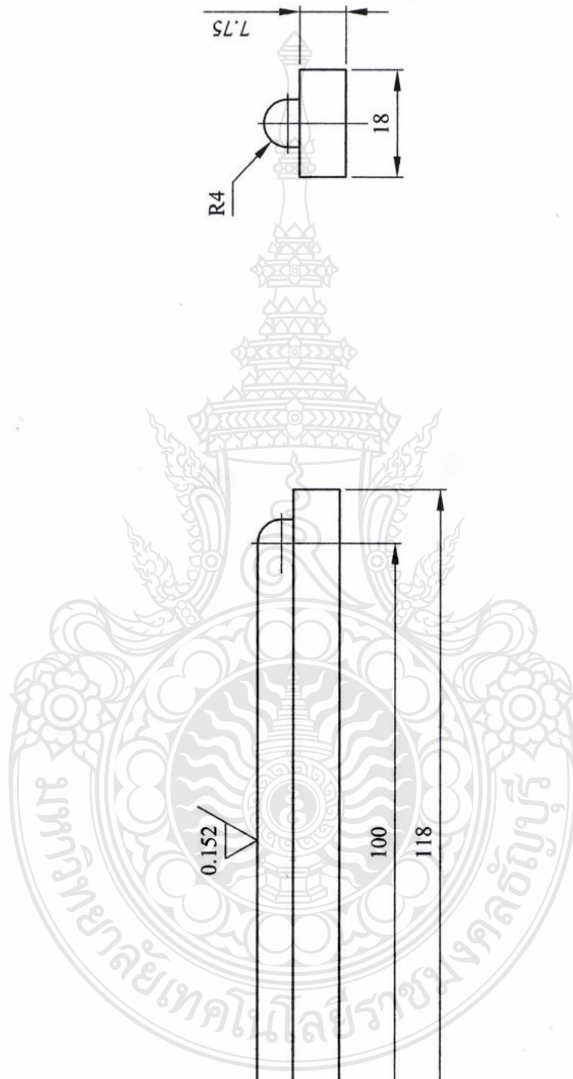
ข.2 ความหนาชิ้นงานหลังการจำลองลากขึ้นรูปด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ ข.4 ผลการวัดความหนาหลังการจำลองลากขึ้นรูปวัสดุ SPCC, SPCD และ SPCE

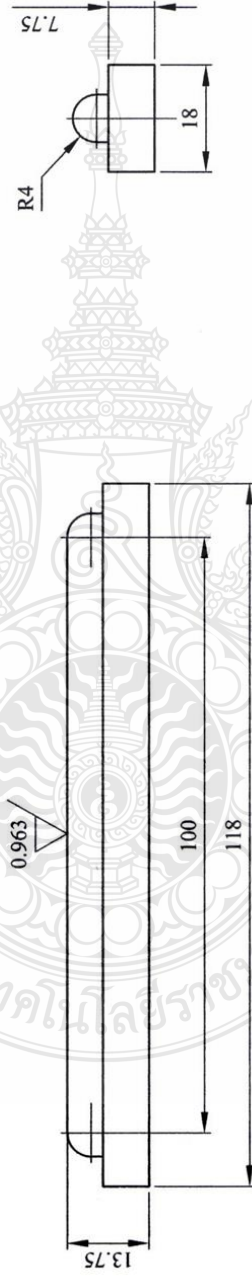
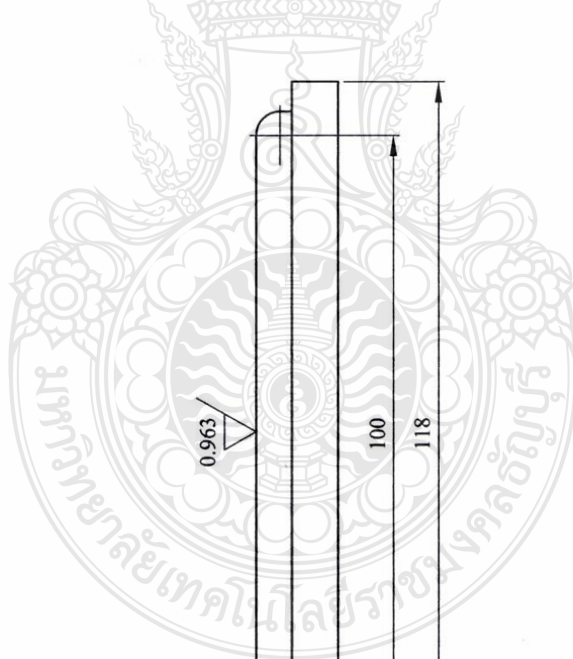
วัสดุ	ความหยาบผิว	ตำแหน่งการวัด									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SPCC	Ra : 6.127	0.840	0.920	0.870	0.790	0.940	0.820	0.855	0.870	0.885	0.870
	Ra : 0.963	0.850	0.930	0.900	0.815	0.945	0.820	0.860	0.875	0.860	0.880
	Ra : 0.152	0.865	0.955	0.925	0.840	0.930	0.885	0.870	0.890	0.860	0.870
SPCD	Ra : 6.127	0.880	0.925	0.885	0.840	0.920	0.845	0.860	0.880	0.850	0.850
	Ra : 0.963	0.870	0.920	0.910	0.820	0.950	0.840	0.890	0.925	0.890	0.850
	Ra : 0.152	0.880	0.920	0.920	0.815	0.930	0.845	0.870	0.925	0.890	0.850
SPCE	Ra : 6.127	0.875	0.925	0.920	0.815	0.930	0.835	0.875	0.920	0.895	0.865
	Ra : 0.963	0.880	0.930	0.920	0.810	0.940	0.830	0.875	0.920	0.890	0.860
	Ra : 0.152	0.970	0.935	0.920	0.810	0.930	0.830	0.870	0.920	0.890	0.860

ภาคผนวก ค
แบบตรวจวัด

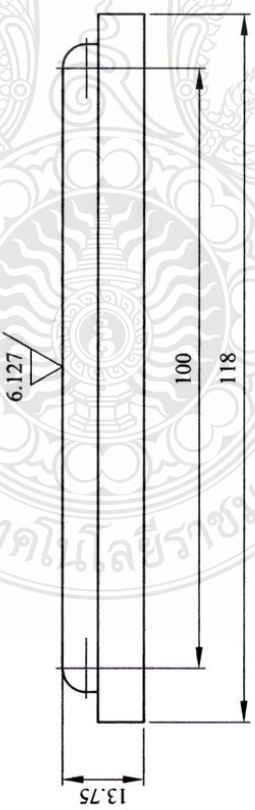
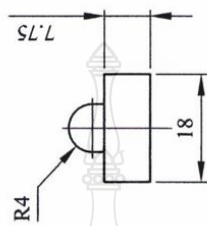




3	ชื่อที่	ชื่อหน่วยงาน	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
	ผู้เขียน	ชื่อชิ้นงาน	20x120x14.5	SKD11	3	2
	ผู้ออกแบบ	Drawbead		วัสดุ		
	ผู้ตรวจ					
	ผู้ตรวจ ม.ช					
	มาตราส่วน					
	1:1					
			คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี			
			หมายเลขแบบ		3	



2	ผิวหน้า รายการ	20x120x14.5 ขนาดวัสดุ	SKD11 วัสดุ	2	2
ชื่อที่				หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน					
ผู้ออกแบบ					
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ ม.ช					
มาตราส่วน 1:1	ชื่อชิ้นงาน Drawbead	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์		2	
		หมายเลขแบบ			



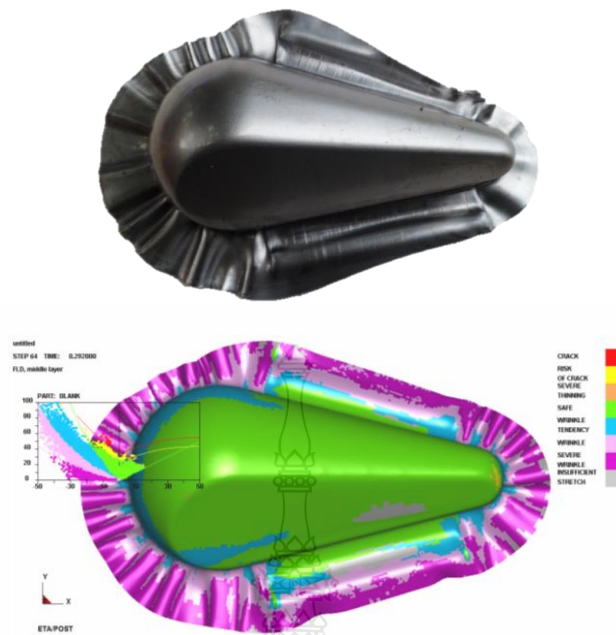
1	ผิวหยาบ รายการ	20x120x14.5 ขนาดวัสดุ	SKD11 วัสดุ	1	1	2
ชื่อที่				หมายเลขแบบ		จำนวน
ผู้เขียน				คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
ผู้ออกแบบ						
ผู้ตรวจ						
ผู้ตรวจ ม.ข						
มาตรฐาน 1:1	ชื่อชิ้นงาน Drawbead		1	หมายเลขแบบ		



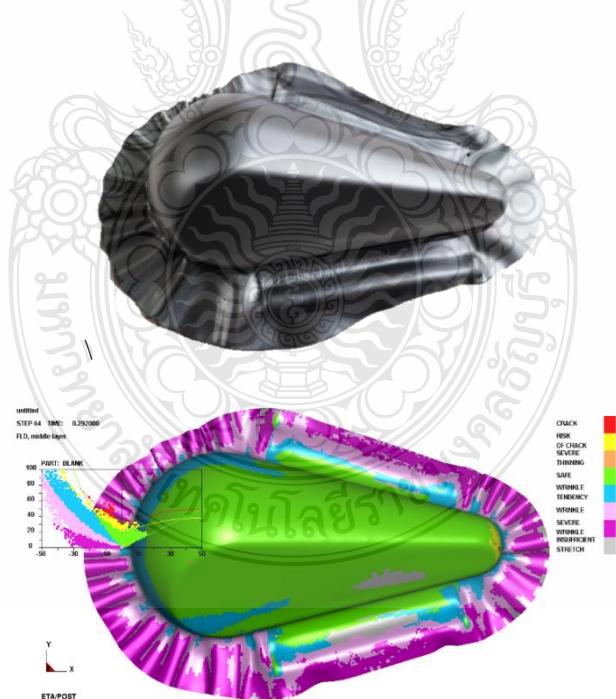
ภาคผนวก ง

ผลการเปรียบเทียบทางกายภาพ และแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

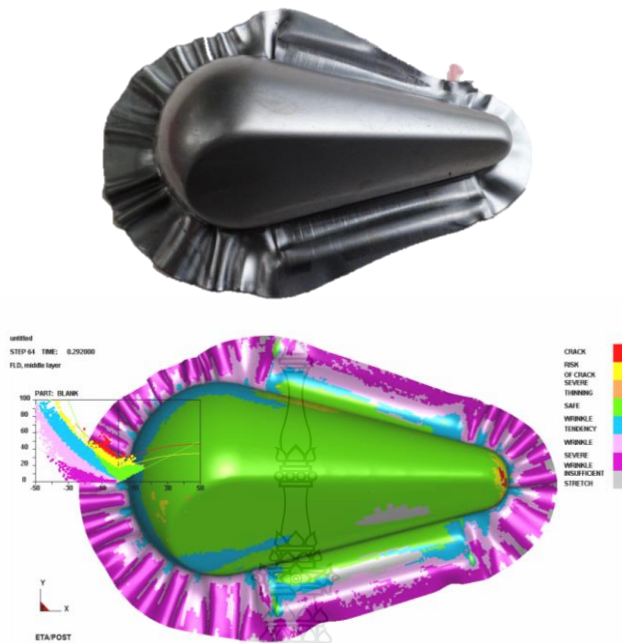




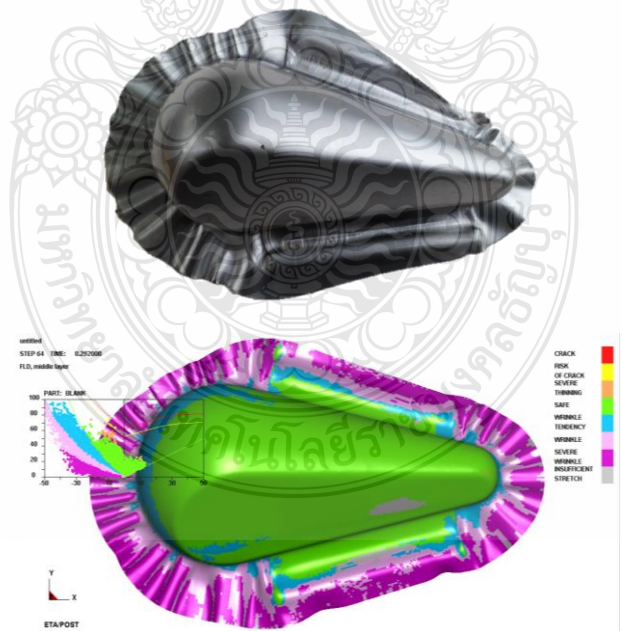
รูปที่ ๑.๑ ผลการเปรียบเทียบทางกายภาพ และแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของ SPCC ที่มีความหยาบผิว $Ra = 0.152 \mu\text{m}$



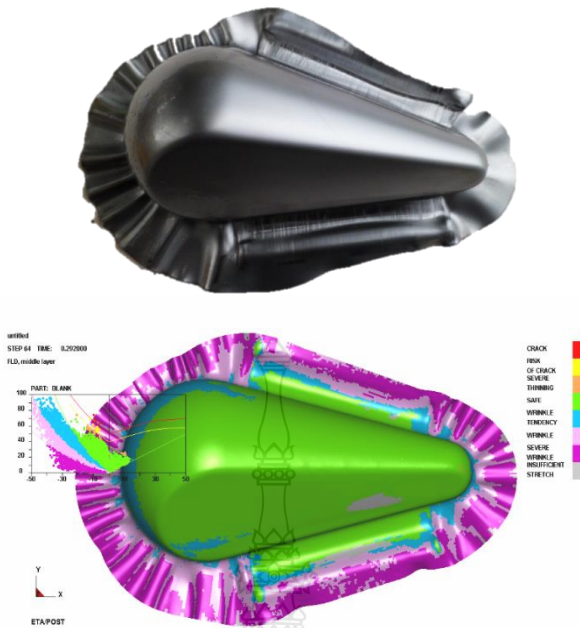
รูปที่ ๑.๒ ผลการเปรียบเทียบทางกายภาพ และแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของ SPCC ที่มีความหยาบผิว $Ra = 0.963 \mu\text{m}$



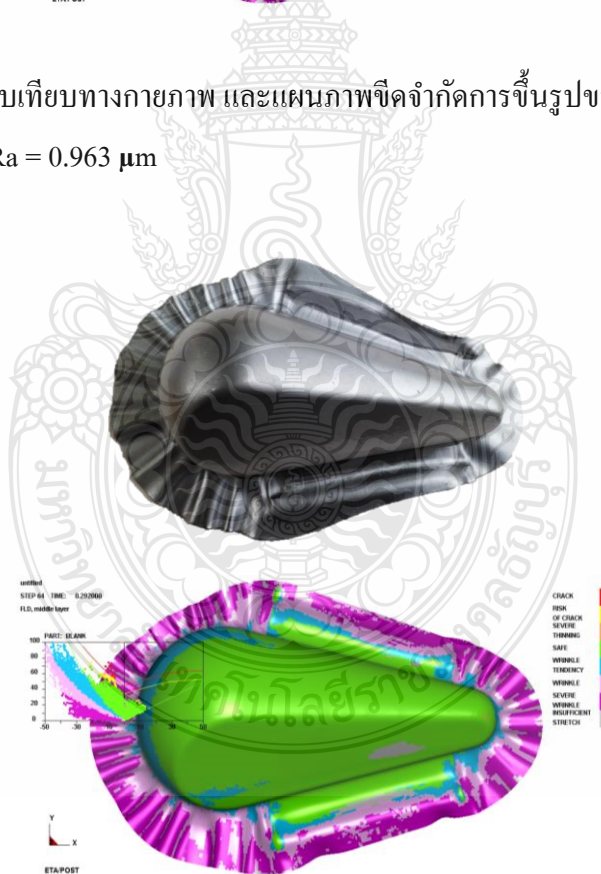
รูปที่ 3.3 ผลการเปรียบเทียบทางกายภาพ และแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของ SPCC ที่มีความหยาบผิว $Ra = 6.127 \mu\text{m}$



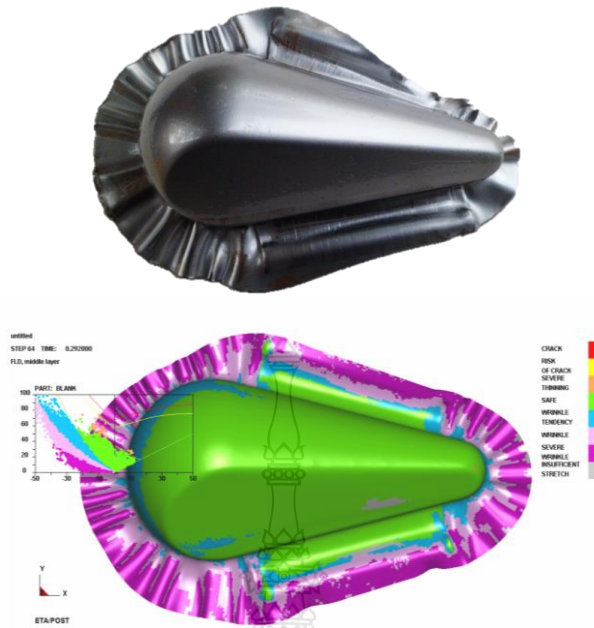
รูปที่ 3.4 ผลการเปรียบเทียบทางกายภาพ และแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของ SPCCD ที่มีความหยาบผิว $Ra = 0.152 \mu\text{m}$



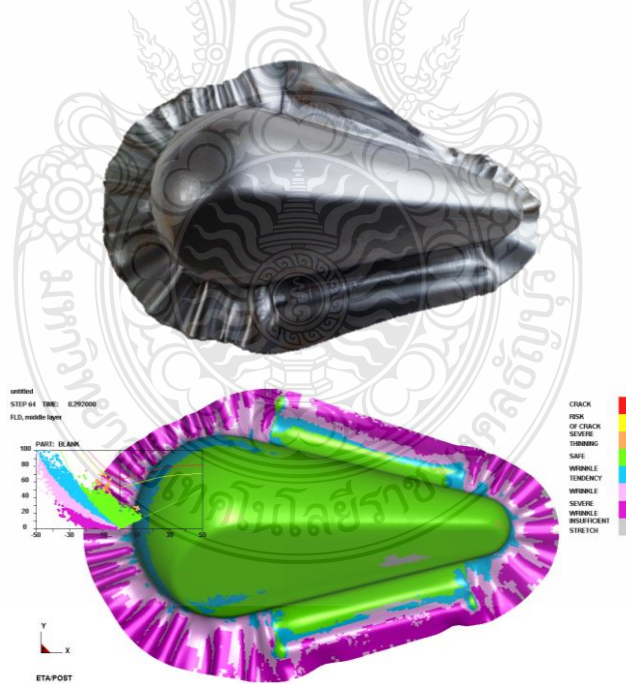
รูปที่ 3.5 ผลการเปรียบเทียบทางกายภาพ และแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของ SPCD ที่มีความหยาบผิว $Ra = 0.963 \mu\text{m}$



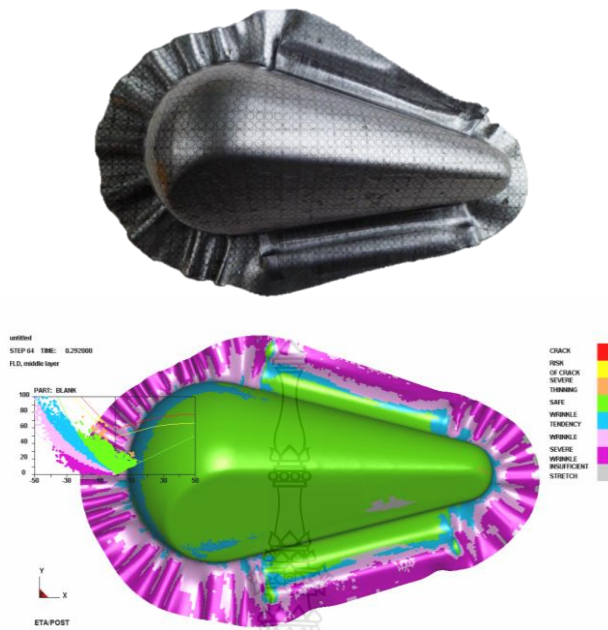
รูปที่ 3.6 ผลการเปรียบเทียบทางกายภาพ และแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของ SPCD ที่มีความหยาบผิว $Ra = 6.127 \mu\text{m}$



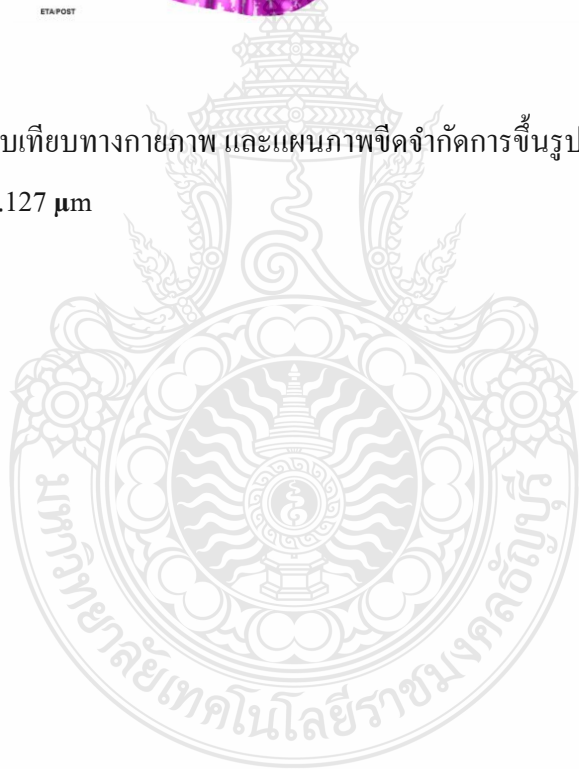
รูปที่ ๗.๗ ผลการเปรียบเทียบทางกายภาพ และแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของ SPCE ที่มีความหยาบผิว $Ra = 0.152 \mu\text{m}$



รูปที่ ๗.๘ ผลการเปรียบเทียบทางกายภาพ และแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของ SPCE ที่มีความหยาบผิว $Ra = 0.963 \mu\text{m}$



รูปที่ ง.9 ผลการเปรียบเทียบทางกายภาพ และแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของ SPCE ที่มีความหยาบผิว Ra = 6.127 μm



ภาคผนวก จ
ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน



จ.1 ขั้นตอนการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

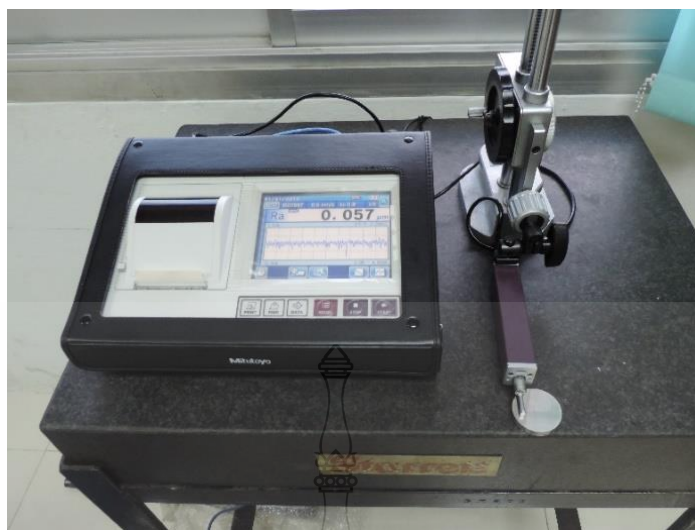
โดยเตรียมแผ่นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องกัด CNC ดังรูปที่ จ.1 ขนาดชิ้นงานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุ SKD 11 ดังรูปที่ จ.2 จากนั้นทำการวัดความหยาบผิวเพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงกับผิวของครอว์บีด ดังรูปที่ จ.3 ซึ่งค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ จ.1 จากนั้นทำการทดสอบโดยใช้วิธี Ball-on-Disk ด้วยเครื่องไทรบอมิเตอร์ ดังรูปที่ จ.4 จากผลการทดสอบได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.124, 0.213, 0.373 ตามลำดับความหยาบผิว ดังรูปที่ จ.5



รูปที่ จ.1 การเตรียมพื้นผิวชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน



รูปที่ จ.2 ชิ้นงานสำเร็จที่ใช้ในการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน



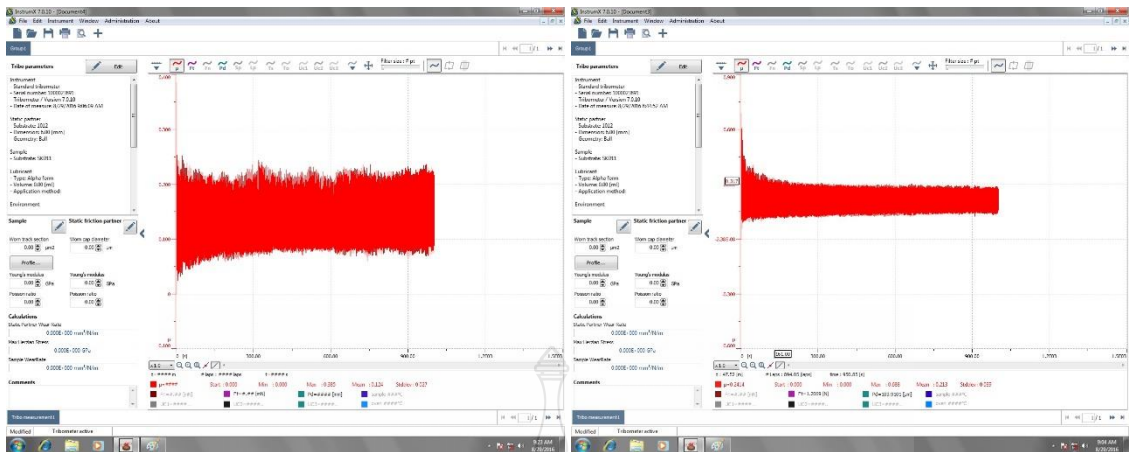
รูปที่ จ.3 เครื่องวัดความหยาบผิวชิ้นงานทดสอบ

ตารางที่ จ.1 ผลการวัดความหยาบผิวชิ้นงานทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

ชิ้นงาน	ครั้งที่			เฉลี่ย
	1	2	3	
▽▽▽	0.136 Ra	0.123 Ra	0.137 Ra	0.132 Ra
▽▽▽	1.011 Ra	1.034 Ra	1.019 Ra	1.021 Ra
▽▽▽	6.565 Ra	6.559 Ra	6.567 Ra	6.564 Ra

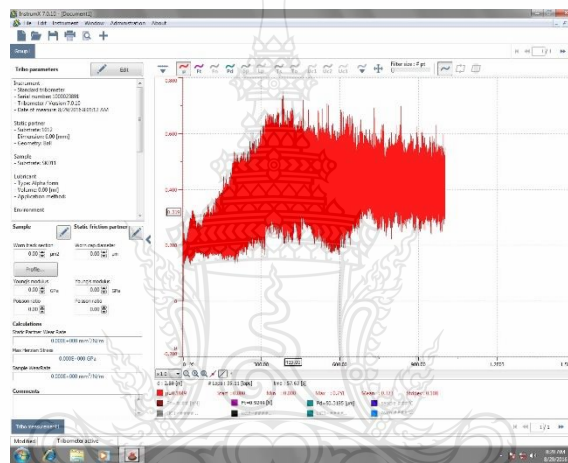


รูปที่ จ.4 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธี Ball-on-disk ด้วยเครื่อง ไตรบอมิเตอร์



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ ๑.5 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานทดสอบที่มีผิว

▽▽▽ (ก), ▽▽ (ข), ▽ (ค)



ภาคผนวก ฉ
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

NUUEJ

NARESUAN UNIVERSITY ENGINEERING JOURNAL

JANUARY - JUNE 2017 Vol.12, No.1
ISSN 1905 - 615X



วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร

ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย	วงศ์เศษ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ศรินทร์ทิพย์	แทนธานี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.อุรุธยา	วิสกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

บรรณาธิการ

ดร.พิสุทธิ์	อภิขยกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
-------------	----------	-------------------------------------

รองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนัส	นัฎฤทธิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
----------------------------	---------	-------------------------------------

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร. วรสิทธิ์	อึ้งภากรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ประดิษฐ์	เทอดทูล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.วินิตา	จินศาสตร์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมราช	วันทวิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.นิเวศ	เจริญใจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.สงวน	ปัทมธรรมกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร	โกคา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.กำชัย	นุ้ยฉัตรกุล	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
รองศาสตราจารย์ ดร.วิสนัย	วรรณจงธรียา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.วิระสิทธิ์	อิมถวิล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์	โพธิ์เงิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ	ชุมฤทธิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ	ชินชุกกลิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.มีหนี่	สงวนเสริมศรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.กุลยา	กนกจารุวิจิตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.พวงรัตน์	ชัชติวิชานุกูล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชัย	ฤทธิวิรุฬห์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.สมร	หิรัญประดิษฐ์กุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	มณีสว่าง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	แย้มแมน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาจรีย์	ทองสนิท	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมลักษณ์ วรรณกุล	กียลาไรว่า	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรณ์กร	เหมะวิบูลย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวรรณ	พลพิทักษ์ชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แก้วกัญญา	สุดประเสริฐ	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.นฤมล	สิพลโกธ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.นารัตน์	วรอุทัย	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
Dr. Ivan	Lee	School of Information Technology and Mathematical Sciences University of South Australia

ดร.สิทธิพงษ์

มหาธนบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นางสาวนุชนารถ	แก้วแดง
นายวิสุทธิ์	แก้วบ้องปก

กำหนดออกวารสาร	ปีละ 2 ฉบับ	ฉบับที่ 1	มกราคม – มิถุนายน
		ฉบับที่ 2	กรกฎาคม – ธันวาคม

สารบัญ

Research Articles

Feasibility Study of Friction Stir Welding of Dissimilar Metals between 6063 Aluminium Alloy and Pure Copper.....	1
K. Rojanapanya, R. Canyook, K. Fakpan	
Investigation of Approaching Speed at Highway-Railway Grade Crossing: Songkhla Case Study.....	9
D. Settasuwacha, W. Wichitphongs, J. Pochan	
การพัฒนาฮีริสติกสำหรับขั้นตอนการวางแผนในการวางแผนตัดภายใต้บริบทของการผลิตแบบเฉพาะลูกค้าเชิงมวล The heuristic for mark planning process in a context of mass customization production.....	17
กฤษดา พิวสกุล, ปวีณา เขาวลิตวงศ์ Kritsada Puasakul, Paveena Chaovalitwongse	
การออกแบบบูสคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อแบบอนุกรมสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ Design of Series Connected Boost converter for Single-Phase Stand-alone Photovoltaic Inverter.....	35
มนชล นาวงษ์ Monthon Nawong	
การพัฒนาเครื่องตรวจวัดสมรรถภาพปอดด้วยตัวตรวจการไหลชนิดท่อบีโด้ The Development of a Spirometer with Pitot tube sensors.....	47
ปฏิวัติ โชติมล, ไกลตา ศรีสิงห์, สุชาติ แยมเม่น Phatiwat Chotimol, Klaita Srisingh, Suchart Yammen	
การลดการชะละลายของโลหะหนักจากกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบแอส Reduction of Heavy Metals Leaching from Sludge of Activated Sludge of Domestic Wastewater Treatment System.....	55
พิมพ์ชนก บุญชู, คณิดา ตั้งคณาภิรักษ์, นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์ Pimchanok Boonchoo, Kanita Tungkananurak, Nipon Tungkananurak	
การเปรียบเทียบความหยาบผิวของดรอว์บีดในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปทรงไม่สมมาตรด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ Comparison of surface roughness of drawbead on non symmetry deep drawing of sheet metal by using finite element simulation.....	63
กฤติธรณ์ นามสง่า, ชัยยะ ประณีตพลกรัง, กุลชาติ จุลเพ็ญ, และ ศิริชัย ต้อสกุล Kittitorn Namsanga, Chaiya Praneetpongung, Kullachart Junlapen, Sirichai Torsakul	

สารบัญ (ต่อ)

Research Articles

การวิเคราะห์สภาวะการแข่งขันของผู้ประกอบการชิ้นส่วนยานยนต์ไทยภายใต้ข้อตกลงเขตการค้าเสรีอาเซียน The Competitive Situation Analysis of Thai Automotive-Part Manufacturers Under Asean Free Trade Area Agreement.....	73
ภัทรเวช ธาราเวชชารักษ์, พีรภพ จอมทอง, ชูศักดิ์ พรสิงห์, ทองแท่ง ทองลิ้ม Pattrawet Tharawetcharak, Peerapop Jomthong, Choosak Pomsing, Thongtang Thonglim	
จลนพลศาสตร์ กลไกและการถ่ายโอนมวลในการดูดซับไอออนทองแดง และไอออนตะกั่ว โดยผงไคโตซาน และเรซินไคโตซานดัดแปรโดยโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต Adsorption of copper and lead ions by chitosan powder and sodium tripolyphosphate-modified chitosan resin: Kinetics, mechanism and mass transfer.....	83
พิมพ์ชยา วัจนะรัตน์, โกวิท ปิยะมังกลา Pimchaya Vatjanarat, Kowit Piyamongkala	
การประยุกต์ใช้เซรามิกสัฟรอนที่ประกอบด้วยซีโอไลต์ Y และสารประกอบคล้ายไฮโดรทัลไซต์เพื่อบำบัดมลสารในน้ำเสียชุมชน Application of Porous Zeolite Y and Hydrotalcite - Like Compound Ceramic for Pollutants Treatment in Municipal Wastewater.....	97
ชานนท์ แดงสีพล, นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, คณิตา ตั้งคณานุรักษ์ Chanon Dangsepon, Nipon Tungkananurak, Kanita Tungkananurak	
การพัฒนาอาหารหมักเปลือกข้าวโพดสำหรับโคเนื้อพื้นเมืองโดยการออกแบบการทดลอง Development of Maize Husk Silage for Native Beef Cattle Using Design of Experiment.....	107
เอราวิล ถาวร, สมชาติ ธนะ, โชค โสรังกุล, ชยุต ดงปาลีธรรม, ชรรค์ชัย ตันเมษ Eravin Thavorn, Somchart Thana, Choke Sorachakula, Chayut Dongpaleedham, Khanchai Danmek	
การวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนจากฉนวนเสื่อมสภาพโดยประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคุณค่าสำหรับหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน Analysis of Heat Loss from Insulation Deterioration by Applying Value Engineering Technique for a Boiler of a Thermal Power Plant.....	115
มานพ นิลรัตน์, เสกสรร สุธรรมานนท์, จันทกานต์ ทวีกุล Manop Nilrat, Sakesun Suthummanon, Juntakan Taweekun	

การเปรียบเทียบความหยาบผิวของดรอว์บีตในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปทรงไม่สมมาตร
ด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

Comparison of surface roughness of drawbead on non symmetry deep drawing of
sheet metal by using finite element simulation

กฤติธรรม นามสง่า¹, ชัยยะ ประณีตพลกรัง², กุลชาติ จุลเพ็ญ³, ศิริชัย ต่อสกุล^{4*}
Kittitorn Namsanga¹, Chaiya Praneetpong², Kunlachart Junlapen³, Sirichai Torsakul^{4*}

^{1,2,3,4}ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

*Corresponding author. E-mail address: sirichai.to@en.mutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการไหลตัวของโลหะแผ่นในกระบวนการลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร ทำการทดลองโดยใช้ดรอว์บีตที่มีความหยาบผิวต่างกัน และทำการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การทดลองนี้ใช้ดรอว์บีตที่มีรูปร่าง ครึ่งวงกลม โดยกำหนดความหยาบผิว 3 ระดับ คือ 0.152 Ra, 0.963 Ra และ 6.127 Ra วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือเหล็กกรีดเย็นเกรด SPCD (JIS) โดยทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ของแรงที่ได้จากการคำนวณ ผลการทดลองพบว่าความหยาบผิวของดรอว์บีตมีผลต่อการไหลตัวของชิ้นงาน ดรอว์บีตที่มีความหยาบผิวมากส่งผลให้ชิ้นงานมีโอกาสเกิดการฉีกขาด และ เกิดรอยย่นได้มาก ขณะที่ดรอว์บีตที่มีความหยาบผิวน้อย เกิดรอยย่นน้อยที่สุด และไม่เกิดการฉีกขาด การจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการทดลองจริง แสดงถึงพฤติกรรมของการลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร ที่มีแนวโน้มของผลลัพธ์สอดคล้องกัน สามารถแสดงให้เห็นบริเวณที่เกิดการฉีกขาด และรอยย่นของชิ้นงานในการลากขึ้นรูปได้ การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายและหาแนวทางแก้ไขการไหลตัวของชิ้นงานในการลากขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : ความหยาบผิว, ดรอว์บีต, การลากขึ้นรูป, การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.

Abstract

This research aims to study the flow of sheet metal in non symmetry shape deep drawing process. The experiment used different surface roughness of drawbeads and then they were simulated by finite element method. The shape of drawbeads is semicircle with 3 levels of surface roughness--0.152 Ra, 0.963 Ra and 6.127 Ra. The material used was cold rolled steel SPCD (JIS) which was under the condition of using 50 percent of blank holder force from calculation. The results show that the surface roughness of drawbeads effect the flow of sheet metal. Drawbeads with high surface roughness results in increase of tare and wrinkle on workpiece. While those with low surface roughness results in no tare and less wrinkle. Finite element simulation and experiment show a coherent result in the behavior of non symmetry shape deep drawing process. Additionally, finite element simulation can show the area with tare and wrinkle of workpiece. The adaptation of finite element can effectively predict and provide a way to fix the flow of deep drawing process.

Keywords: surface roughness, drawbead, deep drawing, finite element simulation

1. บทนำ

ในปัจจุบันการแข่งขันทางธุรกิจอุตสาหกรรมเกิดขึ้นตลอดเวลาทั้งทางด้านการตลาด และรูปแบบของผลิตภัณฑ์ เทคโนโลยีทางการออกแบบแม่พิมพ์ได้เข้ามามีบทบาทในการเพิ่มผลผลิตทางด้านอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอุตสาหกรรมด้านยานพาหนะ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ในครัวเรือน หรืออุตสาหกรรมด้านอื่นๆ และแม่พิมพ์ขึ้นรูปขึ้นส่วนมีความจำเป็นอย่างมาก ต่อการผลิตชิ้นส่วนเพื่อเพิ่มปริมาณและคุณภาพของผลผลิตที่สูงขึ้น

กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ใช้กันอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรม มีกระบวนการหรือวิธีในการขึ้นรูปหลายวิธีด้วยกัน การลากขึ้นรูป (Deep Drawing) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ แต่ยังคงมีขีดจำกัดอยู่มากในการลากขึ้นรูป ไม่ว่าจะเป็นความเร็วในการขึ้นรูปสมบัติด้านแอนไอโซทรอปี (anisotropic) โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเสียดทานและแรงกดขึ้นงาน โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรเนื่องจากมีอัตราการใช้ของวัสดุที่ไม่เท่ากัน จากขีดจำกัดดังกล่าวอาจทำให้เกิดข้อบกพร่องบนชิ้นงานได้ เช่น รอยย่น (Wrinkling) ของชิ้นงาน การเกิดรอยย่นมีผลมาจากโลหะแผ่นไหลตัวไม่สม่ำเสมอหรือ การเกิดการฉีกขาด (Tearing) ซึ่งเกิดมาจากโลหะไหลเข้าแม่พิมพ์ช้าเกินไป

ได้มีการนำเอาตัว (Drawbead) มาใช้เพื่อควบคุมการไหลของโลหะแผ่น [1] โดยตัวนี้จะถูกติดตั้งที่แม่กดขึ้นงาน ขณะที่มีการลากขึ้นรูปวัสดุจะไหลผ่านตัวนี้โดยในตัวนี้วัสดุจะเกิดการตัดให้ไหลไปในทิศทางหนึ่งและถูกตัดกลับมาในทิศทางตรงกันข้ามก่อนที่จะไหลตัดกลับไปยังทิศทางเดิมจึงทำให้มีการชะลอการไหลของวัสดุไม่ให้ไหลเร็วเกินไป [2,3] อันเป็นสาเหตุของการเกิดรอยย่นก่อนไหลเข้าแม่พิมพ์

แรงเสียดทานถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการลากขึ้นรูป [4] การไหลตัวของแผ่นโลหะเพื่อเข้าแม่พิมพ์ต้องผ่านการสัมผัสกับพื้นผิวของแม่กดขึ้นงาน แม่พิมพ์ และตัว (Drawbead) ความหยาบผิวแต่ละพื้นผิวส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานที่แตกต่างกัน [5-8] Padmanabhan, R. และคณะ [9] ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการลากขึ้นรูป พบว่าร้อยละของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีผลต่อความหนาเฉลี่ยของชิ้นงาน มากกว่าแรงกดจากแม่กดขึ้นงาน การจำลองการลากขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นอีกวิธีที่ใช้ในการศึกษากระบวนการลากขึ้นรูป เพื่อช่วยในการแก้ไข

ข้อบกพร่องบนชิ้นงานหลังการขึ้นรูป และลดเวลาในการออกแบบแม่พิมพ์ [10] Meiders, T. [11] ได้ศึกษาการจำลองการลากขึ้นรูปโดยใช้ตัว (Drawbead) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดแรงในการควบคุมการไหลตัวของแผ่นโลหะ (Drawbead Restraining Force) การเปลี่ยนแปลงความหนาแบบพลาสติก และแรงยกตัว (Drawbead Lift Force) พบว่าการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความหนาแบบพลาสติกของชิ้นงาน Samuel, M. [12] ได้ศึกษารูปทรงของตัว (Drawbead) ในการลากขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบรูปทรงของตัว (Drawbead) ระหว่างตัวที่เป็นแบบครึ่งวงกลมกับตัวที่เป็นแบบสี่เหลี่ยม และวิเคราะห์ความแตกต่างของการไหลตัวของวัสดุในการใช้ตัวทั้งสองชนิด Ma, W.Y. และคณะ [4] ได้ศึกษาอิทธิพลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในการลากขึ้นรูปวัสดุอลูมิเนียมอัลลอยเกรด AA6111 ที่สภาวะอุณหภูมิสูง โดยใช้การจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับการทดลอง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีผลต่อการลากขึ้นรูปอย่างมีนัยสำคัญ Trzepiecincki, T. และ Lemu, H.G. [13] ได้ทำการศึกษาแรงเสียดทานจากความหยาบผิวของโลหะแผ่นที่แตกต่างกันด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการลากขึ้นรูปโดยใช้ตัว (Drawbead) เพื่อหาผลกระทบต่อการขึ้นรูปด้านไอโซทรอปี (Isotropic) และ แอนไอโซทรอปี (anisotropic) ในการลากขึ้นรูปโดยใช้ตัว (Drawbead) Zhang, S. และ คณะ [5] ได้ศึกษาพฤติกรรมแรงเสียดทานในการลากขึ้นรูป โดยการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าความหยาบผิวของโลหะแผ่นลดลงระหว่างการไหลตัว และแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นตามความหยาบที่เพิ่มขึ้นของผิวสัมผัส Hol J. และคณะ [14] ได้สร้างแบบจำลองแรงเสียดทานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อพัฒนาแบบจำลองของแรงเสียดทานจากความแตกต่างของพื้นผิวสำหรับการนำไปใช้ในการจำลองการลากขึ้นรูปขึ้นงาน

อย่างไรก็ตามถ้าต้องการผลวิเคราะห์ที่มีความละเอียดแม่นยำมากขึ้นจะต้องใช้จำนวนการแบ่งชิ้นงาน (Element) เป็นจำนวนมากโดยเฉพาะบริเวณรัศมีตัว (Drawbead) ทำให้ต้องใช้เวลามากและเครื่องคอมพิวเตอร์ต้องมีประสิทธิภาพสูง ยังมีงานชิ้นงานที่มีความละเอียดมากเท่าใด ย่อมหมายถึงว่าต้องใช้เวลาและประสิทธิภาพของเครื่องมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ในการวิจัยจึงต้องกำหนดรูปทรงตัว (Drawbead) ให้มีความเหมาะสมและมีการควบคุมการไหลของชิ้นงานให้คงที่ ซึ่งจะมีเฉพาะการเปลี่ยนแปลงการกระจายความเครียด (Strain) และความหนาของชิ้นงานที่เปลี่ยนไป

จากความสำเร็จและข้อมูลต่างๆ ที่ได้กล่าวถึง ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลความหยาบผิวของดรอว์บีตที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปทรงไม่สมมาตรโดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาปัญหาที่เกิดจากการไหลตัวของชิ้นงาน ที่เป็นผลให้เกิดรอยย่น ความเครียดตกค้าง เกิดการฉีก ในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปทรงไม่สมมาตร โดยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ซึ่งสามารถช่วยลดเวลาในการทดลองแม่พิมพ์ ลดของเสียที่เป็นต้นทุนจากการทดลองแม่พิมพ์ เพื่อการผลิตจริงต่อไป

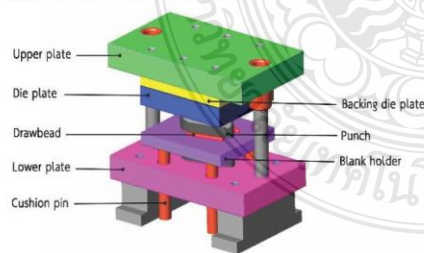
2. วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินการทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วนดังนี้ ส่วนแรกคือการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงความหนา และการตรวจสอบทางกายภาพ ส่วนที่สองเป็นการจำลองการลากขึ้นรูปด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการทดลองจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

2.1 เครื่องมือสำหรับการทดลอง

2.1.1 แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปชิ้นงานไม่สมมาตร

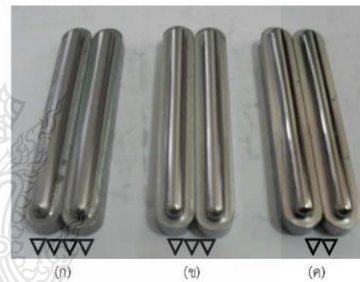
แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปแบบไม่สมมาตรนั้น แสดงรายละเอียดและส่วนประกอบดังรูปที่ 1 โดยมีหลักการทำงานของแม่พิมพ์ดังนี้ แผ่นรองแม่พิมพ์บน (Upper plate) จะยึดกับแผ่นรองตายัน (Backing die plate) และแผ่นตายัน (Die plate) มีชุดนำการป้อน (Guide post) เป็นชุดนำเพื่อความเที่ยงตรงในการป้อนชิ้นงาน แผ่นกดชิ้นงาน (Blank holder) มีหน้าที่ในการกดยึดชิ้นงานโดยส่งแรงจากคูกั้นชิ้นงาน (Cushion pin) ขณะที่พินซ์ (Punch) จะประกอบกับ ชุดล่าง (Lower plate) เพื่อยึดกับแท่นวางแม่พิมพ์ (Table)



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปแบบไม่สมมาตร

2.1.2 ดรอว์บีต

ดรอว์บีตที่ใช้ในการทดลองมีรูปทรงหน้าตัดครึ่งวงกลม (Half-Round Drawbead) ซึ่งเป็นรูปทรงที่ตีที่สุดเมื่อเทียบกับดรอว์บีตหน้าตัดสามเหลี่ยม (V-Shaped Drawbead) และ ดรอว์บีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapeziform Drawbead) โดยรับการยืนยันจากการศึกษาของ Karnchanaseangthong, T. และคณะ [15] ดรอว์บีตที่ใช้มีขนาดรัศมีส่วนโค้ง 4 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และมีความสูงของดรอว์บีต 8 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุ SKD 11 โดยกำหนดสภาพผิวจากการตัดเฉือนของเครื่องมือตัดออกเป็น 3 แบบ คือ ผิวหยาบที่มองเห็นได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า ผิวละเอียดปานกลางที่พอมองเห็นได้บ้างแต่ไม่ชัดเจน และผิวละเอียดจะมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น ซึ่งมีค่าความหยาบผิวดังนี้ 0.152 Ra, 0.963 Ra และ 6.127 Ra ดังรูปที่ 2

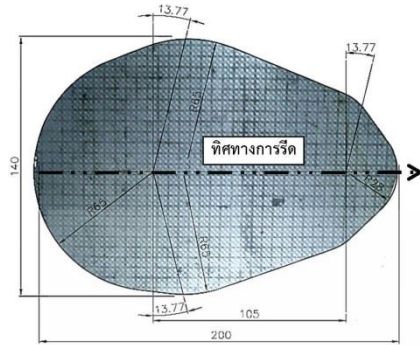


รูปที่ 2 ดรอว์บีตหน้าตัดครึ่งวงกลมที่มีความหยาบผิว (ก) 0.152 Ra , (ข) 0.963 Ra และ (ค) 6.127 Ra

2.1.3 วัสดุทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้นเป็นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ รีดเย็น (low carbon steel) SPCD ที่ผ่านกรรมวิธีการผลิตแบบเย็น ส่วนมากจะใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ จากการทดสอบสมบัติเชิงกล เพื่อหาอัตราส่วนความเครียดพลาสติก r (Anisotropy) และ เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain-Hardening Exponent, n -value) ของแผ่นเหล็กที่มีความหนา 1.0 มิลลิเมตร ตามวิธีการของ ASTM E517 [16] และ ASTM E 646-91 [17] ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 1

การเตรียมแผ่นชิ้นงานโดยการตัดแผ่นงานตามแนวรีด ที่มีขนาด 220 x 160 มิลลิเมตร ประมาณค่าจากการ pre-test ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปร่างของแผ่นเหล็ก SPCD ที่ใช้ในการขึ้นรูป

2.2 การทดลองลากขึ้นรูป

นำแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปแบบไม่สมมาตรติดตั้งบนเครื่องบีบไฮดรอลิก (Hydraulic press) ขนาด 80 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 4 จากนั้นทำการทดลองลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรโดยใช้ดอร์บิตที่มีความหยาบผิวต่างกัน กำหนด

ความเร็วในการขึ้นรูป (Die Velocity) 10 มิลลิเมตรต่อวินาที แรงในการกดชิ้นงาน (blank holder force) 50 เฟอร์เซนต์ (52 kN) ของแรงขึ้นรูปที่ได้จากการคำนวณ และมีระยะในการลากขึ้นรูป 50 มิลลิเมตร โดยไม่ใช้สารหล่อลื่นในการทดลองลากขึ้นรูปทุกตัวแปร



รูปที่ 4 การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องบีบไฮดรอลิก 80 ตัน

ตารางที่ 1 สมบัติเชิงกลแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCD

Material	Strength Coefficient (K)	Strength Hardening (n)	Anisotropy Coefficients			
			R_0	R_{45}	R_{90}	\bar{R}
SPCD	317	0.15	.1301	.1365	468.1	1.378

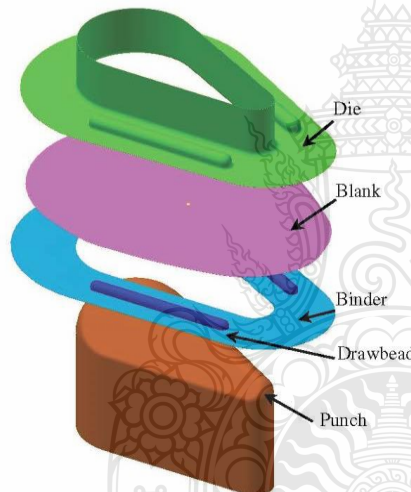
2.3 การจำลองการลากขึ้นรูป

การจำลองการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปทรงไม่สมมาตรเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยใช้โปรแกรม Dynaform และการใช้ดอร์บิตที่มีความหยาบผิวต่างกันั้น จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการทดสอบแรงเสียดทานเพื่อกำหนดเงื่อนไขโปรแกรม การทดสอบแรงเสียดทานโดยใช้วิธี Ball-on-Disk ด้วยเครื่องไทรบอมิเตอร์ Anton Paar ภายใต้สภาวะการทดสอบโดยไม่ใช้สารหล่อลื่น ดังรูปที่ 6 แผ่นชิ้นงานทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุ SKD 11 ที่มีความหยาบผิวเหมือนกับดอร์บิต ขณะที่บอลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำรีดเย็น จากผลการทดสอบได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.124, 0.213, 0.373 ที่ความหยาบผิว 0.152 Ra, 0.963 Ra, 6.127 Ra ตามลำดับ

การสร้างพื้นผิว 3 มิติ (Surface modeling) โมเดลแม่พิมพ์และแผ่นชิ้นงาน สำหรับการจำลอง แสดงดังรูปที่ 5 ถูกสร้างด้วยโปรแกรม CAD (Computer Aided Design) และ บันทึกเป็นไฟล์สกุล IGES Files สำหรับการ Import เข้าสู่โปรแกรม Dynaform เพื่อสร้างแบบจำลองตาข่าย (Mesh Model) โดยกำหนดให้โปรแกรมทำการคำนวณให้จากขนาดเอลิเมนต์โตสุดเท่ากับ 3 mm และเล็กสุดเท่ากับ 1 mm ซึ่งชิ้นงานมีจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 3,471 เอลิเมนต์ ที่มีสมบัติวัสดุเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก ซึ่งมีพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่น-พลาสติก (Elastic-Plastic) ขณะที่ชุดแม่พิมพ์มีสมบัติเป็นแบบ แข็งแกร่ง (Rigid body) โดยการจำลองแสดงเงื่อนไขการตั้งค่างดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

Material	JIS G3141 : SPCD	
Thickness	1 mm	
Material Model	MAT_3-PARAMETER_BARLAT(*36)	
Die Velocity	10 mm/s	
Number of Element	3,471	
Blank holder force	52 kN	
Friction coefficient of Drawbead	0.124, 0.213, 0.373	
Contact Type	FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE	
Hardening curve $\sigma = K\epsilon^n$	K	n
	371	0.15



รูปที่ 5 ขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนเครื่องมือและชิ้นงาน



รูปที่ 6 เครื่องโรตารีไดร์

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

การลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรโดยใช้ดอร์บีดรูปทรงหน้าตัดครึ่งวงกลมที่มีความหนาผิวแต่ละระดับนั้นพบว่าแรงในการลากขึ้นรูปมีความแตกต่างกัน รูปที่ 7 (ก) การใช้ดอร์บีดที่มีความหนาผิว 0.152 Ra ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 131 kN รูปที่ 7 (ข) การใช้ดอร์บีดที่มีความหนาผิว 0.963 Ra ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 134 kN รูปที่ 7 (ค) การใช้ดอร์บีดที่มีความหนาผิว 6.127 Ra ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 139 kN เมื่อเปรียบเทียบกับแรงจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงลากขึ้นรูปที่ระยะลากขึ้นรูป 0 - 40 มิลลิเมตร มีแนวโน้มในแต่ละช่วงใกล้เคียงกัน แต่ในช่วง 40 -50 มิลลิเมตร แรงที่ได้จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มีแนวโน้มสูงขึ้นและมีค่าสูงกว่าการขึ้นรูปจริง ขณะที่แรงจากการทดลองลากขึ้นรูป มีความราบเรียบ เนื่องจากระยะลากขึ้นรูปในช่วงนี้ แรงกดชิ้นงานในการลากขึ้นรูปจริงที่ได้จากแรงกดชิ้นพื้นมีการลดระดับลง ขณะที่แรงกดชิ้นงานจากการจำลองมีความคงที่ตามเงื่อนไขที่กำหนด ทำให้แรงลากขึ้นรูปมีความแตกต่างกัน ซึ่งการใช้ดอร์บีดที่มีความหนาผิวมากส่งผลให้แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงขึ้น โดยสภาพพื้นผิวของดอร์บีดทำให้เกิดการต้านทานการไหลตัวของแผ่นชิ้นงาน แม้จะเป็นแค่เพียงจุดสัมผัสเล็กน้อยของแผ่นชิ้นงาน

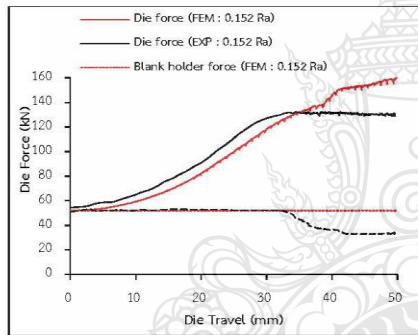
ชิ้นงานหลังการลากขึ้นรูปถูกนำมาวิเคราะห์ความเครียดแนวความหนา ที่เกิดจากการยืดตัวและการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นชิ้นงานในแต่ละจุด โดยบริเวณจุดที่ตรวจวัดชิ้นงาน แสดงดังในรูปที่ 8 ซึ่งสามารถคำนวณความเครียดแนวความหนาจากการวัดได้ดังนี้

$$\epsilon_3 = \ln(t/t_0) \quad (1)$$

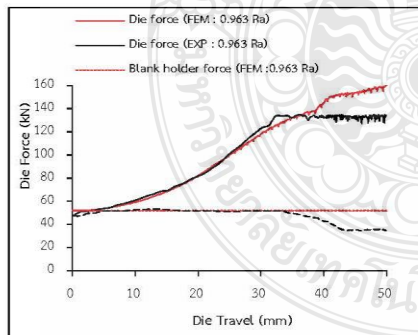
เมื่อ t_0 คือความหนาก่อนการขึ้นรูป และ t คือความหนาหลังการขึ้นรูป

การวิเคราะห์ความเครียดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงาน SPCD จากการวัดชิ้นงานทั้ง 10 จุด พบว่าความเครียดแนวความหนาในแต่ละจุดมีความแตกต่างกันซึ่งเกิดจากการไหลตัวของแผ่นชิ้นงานที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากชิ้นงานมีรูปทรงไม่สมมาตร ดังรูปที่ 9 แสดงกราฟความเครียดแนวความหนาของชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปโดยใช้ดอร์บีดที่มีความหนาผิวต่างกัน พบว่าจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานมากที่สุดคือจุดที่ 6 ทำให้จุดนี้มีค่า

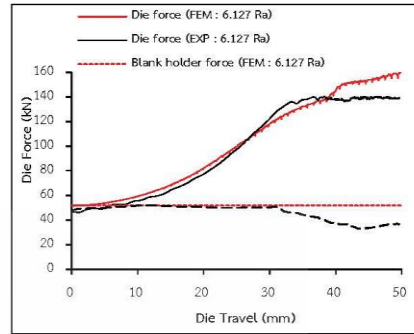
ความเครียดแนวความหนาสูงสุด โดยเฉพาะชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปด้วยดอร์บีตที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra ดังรูปที่ 9 (ค) มีค่าความเครียดแนวความหนาสูงสุดในจุดที่ 6 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.163 และเช่นเดียวกันกับชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปด้วยดอร์บีตที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra มีค่าความเครียดแนวความหนาสูงสุดในจุดที่ 6 เท่ากับ 0.151 อย่างไรก็ตามจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีบางจุดที่มีค่าแตกต่างจากผลการทดลอง แม้ว่าในจุดอื่น ๆ จะมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองก็ตาม โดยจุดที่ 4 เป็นจุดที่ค่าความเครียดแนวความหนาจากการจำลองสูงกว่าการทดลองลากขึ้นรูปทุกๆ ความหยาบผิวของดอร์บีต ดังรูปที่ 9 (ก) – (ค) เนื่องจากความแตกต่างของแรงกดชิ้นงานในช่วงสุดท้ายของการลากขึ้นรูป สูงกว่าการลากขึ้นรูปจริง ส่งผลให้เกิดการต้านทานการไหลตัวในช่วงสุดท้ายมีค่าสูงกว่าการขึ้นรูปจริง ซึ่งทำให้การเปลี่ยนแปลงความหนาในจุดที่ 4 ที่เป็นจุดสูงสุดของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงความหนาสูงขึ้นด้วยเช่นกัน



(ก)

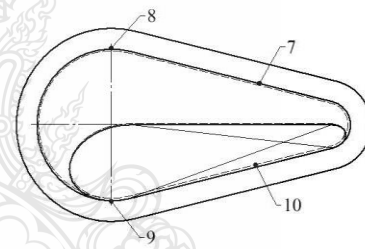
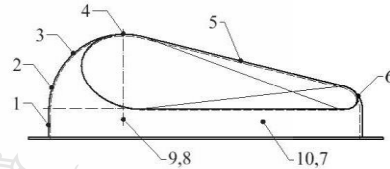


(ข)



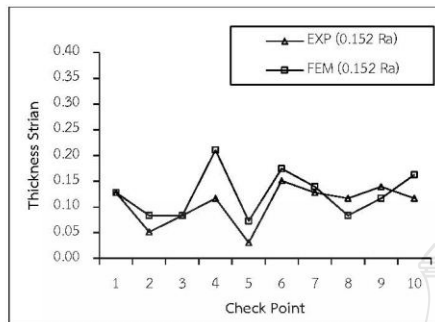
(ค)

รูปที่ 7 แรงลากขึ้นรูปโดยใช้ ดอร์บีตหน้าตัดครึ่งวงกลมที่มีความหยาบผิว (ก) 0.152 Ra, (ข) 0.963 Ra และ (ค) 6.127 Ra

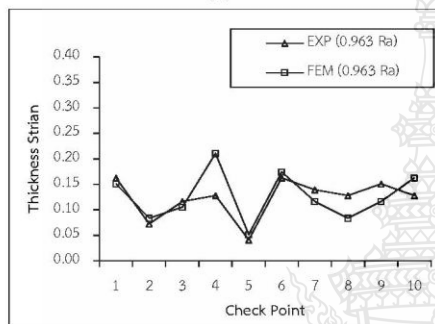


รูปที่ 8 บริเวณจุดที่ตรวจวัดความเครียดแนวความหนาบนชิ้นงาน

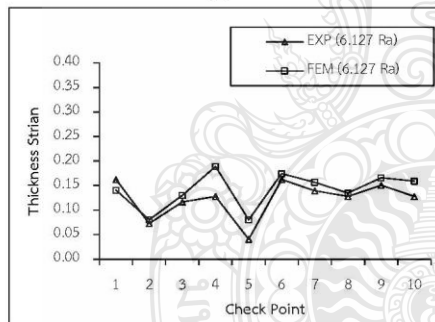
การตรวจสอบและวิเคราะห์ทางกายภาพ หรือรูปร่างของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปถือว่ามีความสำคัญเช่นเดียวกัน จากการพิจารณารูปร่างของชิ้นงานระหว่างการทดลองลากขึ้นรูปกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีความสอดคล้องกันดังรูปที่ 10 พบว่ามีการเกิดรอยยับบริเวณปึกชิ้นงาน



(ก)



(ข)



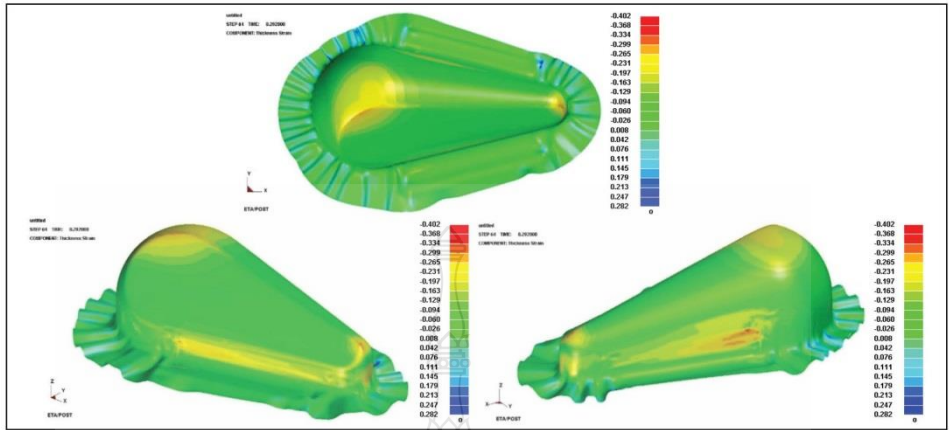
(ค)

รูปที่ 9 ความเครียดแนวความหนาโดยใช้ดอร์บีตหน้าตัดครึ่งวงกลมที่มีความหนาผิว (ก) 0.152 Ra, (ข) 0.963 Ra และ (ค) 6.127 Ra

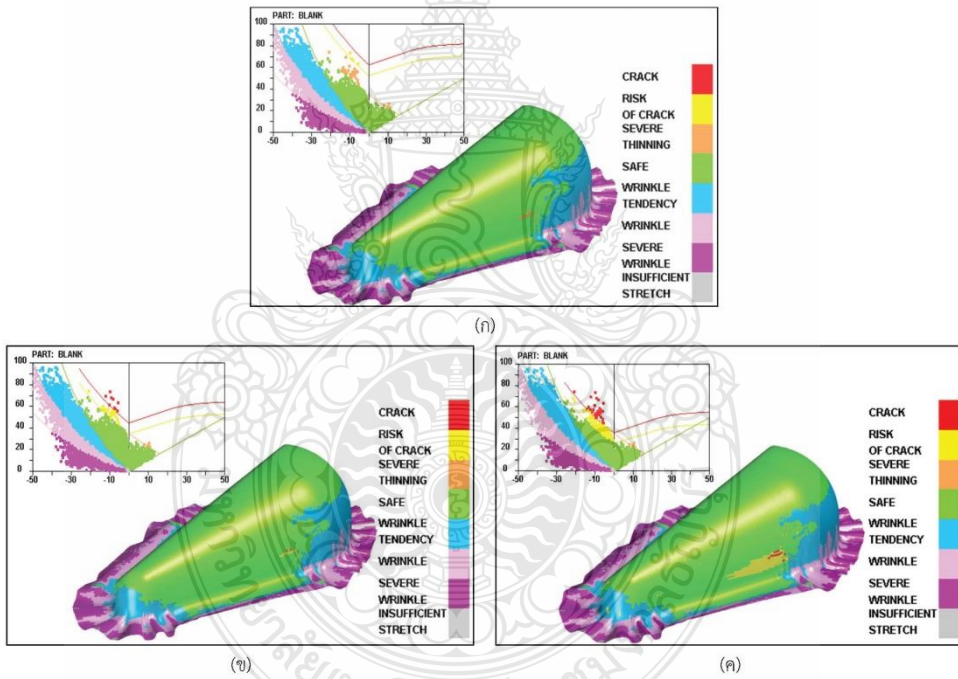


รูปที่ 10 เปรียบเทียบรูปร่างของชิ้นงานระหว่างการผลิตลงขั้นรูปกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้ดอร์บีตที่มีความหนาผิว 0.152 Ra

เมื่อพิจารณาบริเวณที่เกิดความเครียดแนวความหนาบนผิวชิ้นงานที่ผ่านการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น พบว่าบริเวณที่เกิดความเครียดแนวความหนาสูงมีทั้งหมด 4 จุดด้วยกัน ดังรูปที่ 11 บริเวณแรกคือส่วนโค้งที่จุดสูงสุดของชิ้นงาน หรือจุดที่ 4 ที่ทำการตรวจวัด ขณะที่บริเวณส่วนที่สองคือจุดปลายโค้งด้านเล็กของชิ้นงานหรือบริเวณจุดตรวจวัดที่ 6 และส่วนที่สามและสี่เป็นบริเวณที่แผ่นชิ้นงานไหลผ่านดอร์บีตหรือจุดตรวจวัดที่ 7, 8, 9 และ 10 แต่เนื่องจากชิ้นงานมีรูปทรงไม่สมมาตรทำให้ในแต่ละด้านมีการเปลี่ยนแปลงความหนาต่างกัน ชิ้นงานด้านที่รูปทรงโค้งจะมีความเครียดแนวความหนาบริเวณที่ไหลผ่านดอร์บีต สูงกว่าด้านที่มีหน้าตัดราบเอียง ซึ่งบริเวณที่กล่าวในข้างต้นนี้มีโอกาสเกิดการฉีกขาดสูงจากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram :FLD) ดังรูปที่ 12 พบว่าการเกิดรอยย่นมีความแตกต่างกันไม่มาก อย่างไรก็ตามการฉีกขาดของชิ้นงานมีความแตกต่างกันอยู่บ้าง ซึ่งการใช้ดอร์บีตที่มีความหนาผิวต่ำสุดส่งผลให้การฉีกขาดของชิ้นงานมีค่าต่ำ ขณะที่การใช้ดอร์บีตที่มีความหนาผิวมากย่อมส่งผลให้การฉีกขาดสูงขึ้นเช่นกัน ความหนาผิวของดอร์บีตส่งผลต่อการลากขึ้นรูปชิ้นงาน การต้านทานการไหลตัวของชิ้นงานที่เกิดจากการตัดโค้งตามรูปทรงของดอร์บีต และผิวสัมผัสระหว่างผิวดอร์บีตกับชิ้นงาน ทำให้เกิดความเค้นอัดบริเวณปีกชิ้นงาน และหากเกิดการต้านทานการไหลตัวมากเกินไป จะส่งผลให้โลหะไหลตัวได้น้อยชิ้นงานเกิดการดึงยืดขึ้นรูปสูง และการดอร์บีตลงส่งผลให้ชิ้นงานมีโอกาสยืดขึ้นรูปสูงเกินขีดจำกัด บริเวณขอบชิ้นงานเกิดความเค้นอัดสูงซึ่งส่งผลให้เกิดรอยย่นเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 11 ความเครียดแนวความหนาบนชิ้นงานที่ผ่านการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้ตรอบิตที่มีความหยาบผิว 0.125 Ra



รูปที่ 12 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของชิ้นงานที่ผ่านการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้ตรอบิตหน้าตัดครึ่งวงกลมที่มีความหยาบผิว (ก) 0.152 Ra, (ข) 0.963 Ra และ (ค) 6.127 Ra

4. สรุปผล

จากการจำลองลากขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุ SPCD ที่มีรูปทรงไม่สมมาตร โดยใช้ดรรชนีหน้าตัดครึ่งวงกลม ที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่างกัน ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองลากขึ้นรูปชิ้นงานจริง พบว่าสามารถแสดงถึงพฤติกรรมของการขึ้นรูปชิ้นงาน ที่มีแนวโน้มของผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน ซึ่งสามารถทำนายการเกิดการฉีกขาด และรอยย่นได้ เมื่อพิจารณาจากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram FLD) ที่แสดงถึงเอลิเมนต์ที่เกิดการฉีกขาด และรอยย่น

ปัจจัยแรงเสียดทานจากความหยาบผิวของดรรชนี มีผลต่อความเครียดแนวความหนา การฉีกขาด และรอยย่น การใช้ดรรชนีที่มีความหยาบผิว 0.125 Ra ชิ้นงานมีความเครียดแนวความหนาน้อยกว่าการใช้ดรรชนีที่มีความหยาบผิว 0.963 และ 6.127 Ra ดรรชนีที่มีความหยาบผิวสูงทำให้ชิ้นงานมีโอกาสเกิดการฉีกขาด และ เกิดรอยย่นได้ โดยเฉพาะบริเวณที่มีการไหลผ่านดรรชนี

การใช้ดรรชนีในการลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรต้องการการควบคุมการไหลตัวแตกต่างกัน โดยการใช้อุปกรณ์ที่มีความหยาบผิวสูง ในด้านที่มีการยึดตัวสูงจะทำให้ชิ้นงานมีโอกาสเกิดการฉีกขาด และความเครียดแนวความหนาเพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (ทอว) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Murali, A., Gopal, B., Rajadurai, C. (2010). Analysis of Influence of Draw Bead Location and Profile in Hemispherical Cup Forming. *Journal of Engineering and Technology*, 2(4), 1793-8236.
- [2] Schuler GmbH. (1998). *Metal Forming Handbook*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- [3] Meinders, V.T. (2000). Developments in numerical simulations of the real-life deep drawing process. PhD thesis, University of Twente.
- [4] Ma, W.Y., Wang, B., Fu, L., Zhou, J., Huang, M. (2015). Effect of friction coefficient in deep drawing of AA6111 sheet at elevated temperatures. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.*, 25, 2342-2351.
- [5] Zhang, S., Hodgson, P.D., Cardew-Hall, M.J. (2003). A finite element simulation of micro-mechanical frictional behaviour in metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 34, 81-91.
- [6] Hsu, T.C., Yang, T.S. (2001). The Computer Simulation of Tribological Influence on Strain Path and Forming Limit in Punch Stretching of Sheet Metal. *Advanced Manufacturing Technology*, 7, 393-399.
- [7] Wilson, W.R.D., Huang, X.B., Hsu, T.C. (1995). A realistic friction model for computer simulation of sheet metal forming process. *Journal of Engineering for Industry*, 117, 202-209.
- [8] Wiklunda, D., Rosén, B.G., Wihlborg, A. (2009). A friction model evaluated with results from a bending-under-tension test. *Tribology International*, 42(10), 1448-1452.
- [9] Padmanabhan, R., Oliveira, M.C., Alves, J.L., Menezes, L.F. (2007). Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel. *Finite Element in Analysis and Design*, 43, 1062-1067.
- [10] Wongkalasin, K., Piyasin S. (2009) A Study of Deep Draw process of Titanium sheet by finite element method and experimental method. The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand.
- [11] Meinders, T., Carleer, B.D., Geijselaers, H.J.M., Huétink, J. (1998). The implementation of an Equivalent Drawbead model in a finite Element code for sheet metal forming. *Journal of material processing Technology*, 83 (1-3), 234-244.
- [12] Samuel, M. (2002). Influence of drawbead geometry on sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 22(1), 94-103.
- [13] Trzeplecinski, T., Lemu, H. G. (2014). Frictional Conditions of AA5251 Aluminium Alloy Sheets Using Drawbead Simulator Tests and Numerical Methods. *Journal of Mechanical Engineering*, 60, 51-60.
- [14] Hol, J., Cid Alfaro, M.V., de Rooij, M.B., Meinders, T. (2012). Advanced friction modeling for sheet metal forming. *Wear* 286- 287, 66- 78

- [15] Karnchanaseangthong, T., Inpunyo, C., Torsakul, S. (2016). A Study of the Effect of Drawbead Shapes in Non-Symmetry Deep Drawing Process by Using Finite Element- Simulation. IE Network Conference 2016 Thailand. pp.192
- [16] ASTM E517. (1993). Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal. 1993 Annual Book of ASTM Standard, vol.3.01, Mechanical Testing, American Society for Testing of Material.
- [17] ASTM E 646-91. (1993). Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponent (n value) of Metallic Sheet Materials. 1993 Annual Book of ASTM Standard, vol. 3. 01, Mechanical Testing. American Society for Testing of Material.



ประวัติผู้เขียน



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายกฤติธรรม นามสง่า
วัน เดือน ปีเกิด	17 เมษายน 2534
ที่อยู่	59/1 ม.2 ตำบลทุ่งทราย อำเภอทรายทองวัฒนา จังหวัดกำแพงเพชร 62190
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม – การผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	ผู้ช่วยนักวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2557 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	085-051-3987
อีเมล	kittitorn.meng@gmail.com

