

การศึกษาและพัฒนากระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วนฝาซีลเครื่องซักผ้า
โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

STUDY AND DEVELOPMENT OF PART FORMING PROCESS OF
COVER SEAL IN WASHING MACHINE BY
FINITE ELEMENT ANALYSIS

กิตติ สมักรไทย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษาที่ 2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาและพัฒนากระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วนฝาซีลเครื่องซักผ้า
โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

กิตติ สมัครไทย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษาที่ 2554
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและพัฒนากระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วนฝาซีลเครื่องชักผ้า โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์
ชื่อ-นามสกุล	นายกิตติ สมัครไทย
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย ต่อสกุล
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

การลากขึ้นรูปเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการลากขึ้นรูปถือเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง เพื่อลดต้นทุนในกระบวนการผลิต สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการลากขึ้นรูปเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อทราบอิทธิพลของพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปร่างของโลหะแผ่น งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาและพัฒนากระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วนฝาซีลโดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์ปัญหาของการน็อกของฝาซีลในชิ้นส่วนเครื่องชักผ้า โดยศึกษาอิทธิพลของรัศมีด้าย มีต่อการเกิดความเครียด ความหนา พฤติกรรมการน็อกของชิ้นงาน

การทดลองออกแบบชุดแม่พิมพ์ 3 ชุด ดังนี้ คือ รัศมีด้าย 2.0 มิลลิเมตร 2.5 มิลลิเมตร และ 3.0 มิลลิเมตร เพื่อทำการวิเคราะห์การลากขึ้นรูป โดยการจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม Dyna Form 5.5 และทำการลากขึ้นรูปจริงด้วยวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 ความหนา 2.0 มิลลิเมตร ผลการจำลองถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลทดลองจริง เพื่อวิเคราะห์ความเครียด ความหนา และพฤติกรรมการน็อกของชิ้นงาน จากนั้นผลที่ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ที่ได้จากการจำลองและทดลองนำไปวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปฝาซีล

ผลการวิจัยพบว่าการออกแบบรัศมีของพินซ์ 2.0 มิลลิเมตร กับรัศมีของด้าย 3.0 มิลลิเมตร ให้ผลการทดลองด้านการไหลตัวของแผ่นชิ้นงานสู่แม่พิมพ์ดีที่สุด โดยปราศจากการน็อก ชิ้นงานมีความหนาลดลงเฉลี่ย 0.308 มิลลิเมตร และมีความหนาแตกต่างกันโดยเฉลี่ย 3.51 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ตำแหน่งวิกฤตของชิ้นงานมีค่าความเครียดหลัก และค่าความเครียดรองลดลง ซึ่งเกิดจากรัศมีของด้ายที่มีขนาด 3.0 มิลลิเมตร ทำให้ลดการยืดตัวของแผ่นชิ้นงาน และสามารถประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการจำลองการขึ้นรูป และการทดลอง นำไปวิเคราะห์ค่าความเครียดที่เกิดจากการขึ้นรูปชิ้นส่วนฝาซีลได้

คำสำคัญ : เหล็กกล้าไร้สนิม ไฟไนต์เอลิเมนต์ แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ความเครียด

Thesis Title	Study and Development of Part Forming Process of Cover Seal in Washing Machine by Finite Element Analysis
Name - Surname	Mr. Kittti Samakthai
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr.-Ing. Sirichai Torsakul
Academic Year	2011

ABSTRACT

Deep drawing is a common sheet metal forming process. Optimization of process parameters in deep drawing process is an important task to reduce manufacturing cost. To determine the optimum values of the process parameters, it is essential to find their influence on the deformation behavior of the sheet metal. This research aimed to study and develop the forming process of cover seal part by finite element analysis. This study analyzed tearing of cover seal part problem in washing machine and studied the influence of die radius to strain, thickness and tearing behavior of work pieces.

The experiment was designed using 3 die sets such as the die radius of 2.0, 2.5 and 3.0 mm, respectively. The material in this experiment was 2.0 mm. of AISI 304 stainless steel that was carried out to be 2 groups. First group of the material was experimentally simulated using Dyna Form 5.5 finite element software for prediction of the deep drawing properties. Second group of the material was carried out using the deep drawing process with the designed experiment conditions. The comparison and analysis of the experiment results such as strain, thickness and failure behavior of the work pieces were carried out. The experimental results also apply to construct the forming limit diagram that could be benefit for analyzing the seal part of washing machine forming process in near future.

The results showed that punch radius of 2.0 mm. and die radius of 3.0 mm. gave the best result of sheet metal flow in to the die without any tearing. The average thickness of work piece was reduced at 0.308 mm. and the thickness difference was 3.51 % on average. The critical area of the major strain and the minor strain were decreased according to the increasing of die radius size 3.0 mm. So, the elongation of the work piece was decreased. This research could be applied to the application of the forming limit diagram which obtained from the simulation and experiment in order to analyze the strain caused by forming the cover seal part.

Keywords : stainless steel, finite element, forming limit diagram, strain

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร. วารุณี เปรมานนท์ ประธานกรรมการ ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ กรรมการ ดร. สมศักดิ์ อธิธิโสภณกุล กรรมการ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนจาก โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัยทุน สกว. อุตสาหกรรม (MAG Window I) บริษัทชีวาปริม แมชีนเนอร์รี่ แมนูแฟกเจอร์ริง จำกัด ดร. สุวัฒน์ จีระเชียรนาถ คุณอรรรถพล พลาศรัย จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี ตลอดจนให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ ในการวิจัยจนประสบความสำเร็จ

ผู้วิจัย ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาหลักที่กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และข้อปรับปรุง อย่างมีคุณค่าอนันต์

ท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อาจารย์ทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุน และแนะนำแนวทางการศึกษา และทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงตามกำหนด

กิตติ สมัครไทย

สารบัญ

หน้า

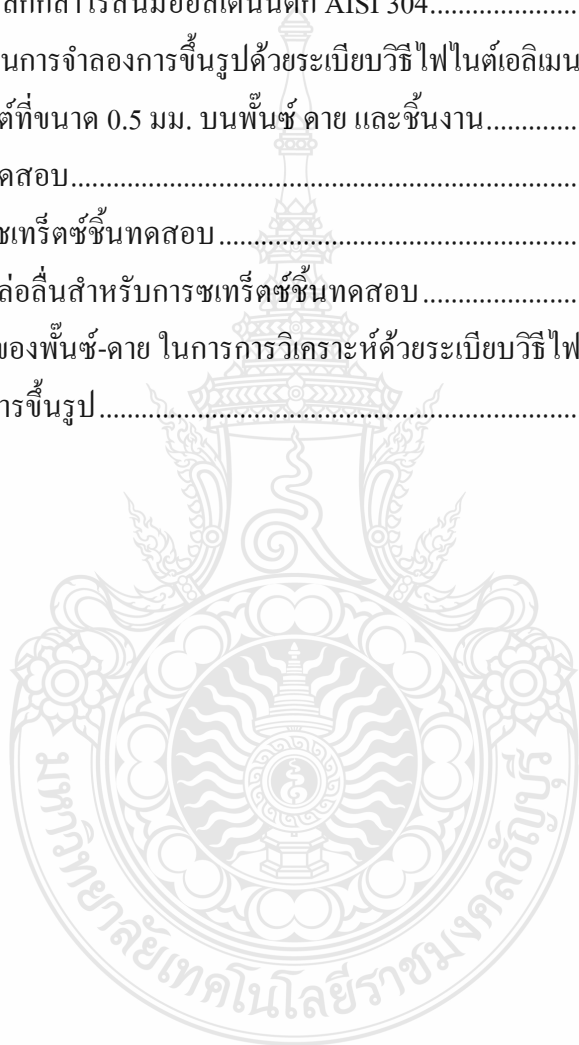
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 คำจำกัดความในการวิจัย.....	3
1.6 กรอบแนวความคิดในการวิจัย.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะ.....	5
2.2 กระบวนการพื้นฐานของโลหะแผ่น และระนาบความเค้น.....	16
2.3 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป.....	20
2.4 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	23
2.5 ทฤษฎีเหล็กกล้าไร้สนิม.....	34
2.6 วัสดุแม่พิมพ์สำหรับงานลากขึ้นรูป.....	38
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	41
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	41
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	42

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัย.....	61
4.1 ผลวิเคราะห์เปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	61
4.2 ผลการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304.....	66
4.3 ผลการประยุกต์ใช้วิธีการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	69
4.4 ผลการทดลองขึ้นรูปจริงจากการปรับค่ารัศมีพื้นซ์และคาย.....	79
4.5 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	80
5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	82
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	82
5.2 การอภิปรายผล.....	83
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	83
รายการอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก การลากขึ้นรูปชิ้นงานฟาส์ดเครื่องชักผ้า.....	88
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง.....	95
ภาคผนวก ค วิธีสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304.....	103
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	112
ประวัติผู้เขียน.....	128

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะการวิเคราะห์ความอิสระของการเคลื่อนที่ของแต่ละชนิด.....	29
2.2 ส่วนประกอบทางเคมีเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 304 ของแผ่นทดสอบ	36
2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม	36
3.1 สมบัติเชิงกลเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304.....	44
3.2 ค่าพารามิเตอร์ในการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	46
3.3 จำนวนเอลิเมนต์ที่ขนาด 0.5 มม. บนพื้นที่ คาย และชิ้นงาน	47
3.4 ขนาดชิ้นงานทดสอบ.....	52
3.5 ค่าพารามิเตอร์ชเร็ดซ์ชิ้นทดสอบ	53
3.6 ชนิดของสารหล่อลื่นสำหรับการชเร็ดซ์ชิ้นทดสอบ	53
4.1 ค่าพารามิเตอร์ของพื้นที่-คาย ในการการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	70
4.2 ผลการจำลองการขึ้นรูป.....	76



สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ.....	6
2.2 แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ.....	9
2.3 เปรียบเทียบกรอบการแตกหัก.....	10
2.4 ชั้นทดสอบตามทิศทางการรีด.....	14
2.5 ทิศทางหลักในการทดสอบแรงดึง.....	16
2.6 ทิศทางหลักของความเค้นและความเครียด.....	17
2.7 (ก) วงกลมบนโลหะแผ่น ขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูป (ข) เมื่อมีการเปลี่ยนรูปกิริตวงกลมจะ เปลี่ยนเป็น รูปวงรี ขนาดของแกนหลักคือ d_1 และขนาดแกนรองคือ d_2 (ค) การดึง, T, หรือแรง ส่งผ่านต่อหน่วยความกว้าง.....	18
2.8 (ก) การขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก (ข) ชั้นส่วนย่อยของถ้วยทรงกระบอกแสดงค่าความเครียด ที่วัดได้ (ค) ผลค่าความเครียดที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก.....	18
2.9 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป.....	20
2.10 ลักษณะการยืดหดตัวของกริดวงกลม.....	21
2.11 แผนภาพการพฤติกรรมของโลหะแผ่นหลังขึ้นรูปแบ่งออกเป็นพื้นที่.....	22
2.12 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	23
2.13 โหนดในเอลิเมนต์แต่ละมิติ.....	25
2.14 ชนิดของเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1 ถึง 3 มิติ.....	26
2.15 การใช้เอลิเมนต์ 1 มิติ ในงานโครงสร้าง.....	26
2.16 การใช้เอลิเมนต์ 2 มิติ ในงานที่มีลักษณะเป็นผนัง.....	27
2.17 การใช้เอลิเมนต์ 3 มิติ ในงานที่เป็นปริมาตรตันที่มีความหนา.....	27
2.18 ตัวอย่าง โครงสร้างเอลิเมนต์ดั้งเดิม.....	28
2.19 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ กัน.....	31
2.20 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่ง ที่จุดต่อ.....	32
3.1 ขั้นตอนวิธีการทดลอง.....	41
3.2 ขนาดชั้นทดสอบการดึง.....	42
3.3 เครื่องทดสอบการดึง.....	42

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
3.4 เครื่องบันทึกการเปลี่ยนแปลงระยะความยืดตัว	43
3.5 เครื่องบันทึกการเปลี่ยนแปลงระยะความยืดด้านขวาง.....	43
3.6 ข้อมูลสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 จากการทดสอบแรงดึง	44
3.7 กำหนดชื่อของเครื่องมือ	44
3.8 (ก) ขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนเครื่องมือและชิ้นงาน	45
3.8 (ข) ตำแหน่งของการปรับรัศมีพื้นซ์และคาย.....	45
3.9 การสร้างผิวสำหรับเครื่องมือและชิ้นงาน	46
3.10 การสร้างพื้นผิวเครื่องมือและชิ้นงาน.....	47
3.11 กำหนดชนิดการขึ้นรูป.....	48
3.12 กำหนดชนิดวัสดุของชิ้นงาน	48
3.13 เครื่องมือและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการขึ้นรูป	49
3.14 การประมวลผลของโปรแกรม Dyna Form 5.5	49
3.15 การกำหนดค่าสมบัติของวัสดุใน โปรแกรม Dyna Form 5.5.....	50
3.16 ค่าความเครียดวิเคราะห์จากโปรแกรม Dyna Form 5.5	50
3.17 ค่าความหนาวิเคราะห์จากโปรแกรม Dyna Form 5.5	51
3.18 ลักษณะการตัดขึ้นทดสอบตามค่ารัศมี.....	52
3.19 นำขึ้นทดสอบสร้างกริดโดยวิธีกักรัด.....	52
3.20 ชิ้นงานที่ผ่านการตีกริด.....	53
3.21 แม่พิมพ์ขึ้นรูปขึ้นทดสอบ	54
3.22 วิธีการถ่ายภาพการยืดตัวของกริด.....	54
3.23 วัดความเครียดหลักและความเครียดรอง ในตำแหน่งที่เกิดการคอดและตำแหน่งปลอดภัย... 55	
3.24 กล้องถ่ายภาพ	55
3.25 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่สร้างจากการทดลอง.....	56
3.26 ลักษณะของเครื่องเพรสแบบเพลลาข้อเหวี่ยงขนาด 40 ตัน.....	57
3.27 ลักษณะแม่พิมพ์คาย	57
3.28 ลักษณะแม่พิมพ์พื้นซ์	58
3.29 ตำแหน่งวางแผ่นขึ้นทดสอบบนแม่พิมพ์คาย	58

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
3.30 ตำแหน่งการวัดการยึดตัวของกริดวงกลม.....	59
3.31 ตำแหน่งการวัดความหนาของผนังชิ้นงาน	59
3.32 ไมโครมิเตอร์ดิจิตอลชนิดหัวบอล	60
4.1 ไนต์เอลิเมนต์.....	61
4.2 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดจากการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	62
4.3 การกระจายตัวของค่าความเครียดจากการทดลองจริง	63
4.4 กระจายตัวของค่าความเครียดจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	63
4.5 กราฟเปรียบเทียบความหนาของชิ้นงาน จากการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	64
4.6 พฤติกรรมของการขึ้นรูปชิ้นงานจากการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	65
4.7 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 2 mm. ที่สร้างจากการทดลอง	67
4.8 ตำแหน่งความเครียดจากการขึ้นรูปชิ้นส่วนฝาซีล บนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 2mm.	68
4.9 ผลการเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากวิธีทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	69
4.10 จำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คาร์ซีมีพื้นที่ 1.5 mm. และรัศมีดาย 2 mm.	70
4.11 จำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คาร์ซีมีพื้นที่ 1.5 mm. และรัศมีดาย 2.5 mm.	71
4.12 จำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คาร์ซีมีพื้นที่ 1.5 mm. และรัศมีดาย 3 mm.	72
4.13 จำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คาร์ซีมีพื้นที่ 2 mm. และรัศมีดาย 2 mm. ..	73
4.14 จำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คาร์ซีมีพื้นที่ 2 mm. และรัศมีดาย 2.5 mm.	74
4.15 จำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คาร์ซีมีพื้นที่ 2 mm. และรัศมีดาย 3 mm. ..	75
4.16 ชิ้นงานขึ้นรูปผ่านกระบวนการแก้ไขแม่พิมพ์	76

สารบัญภาพ

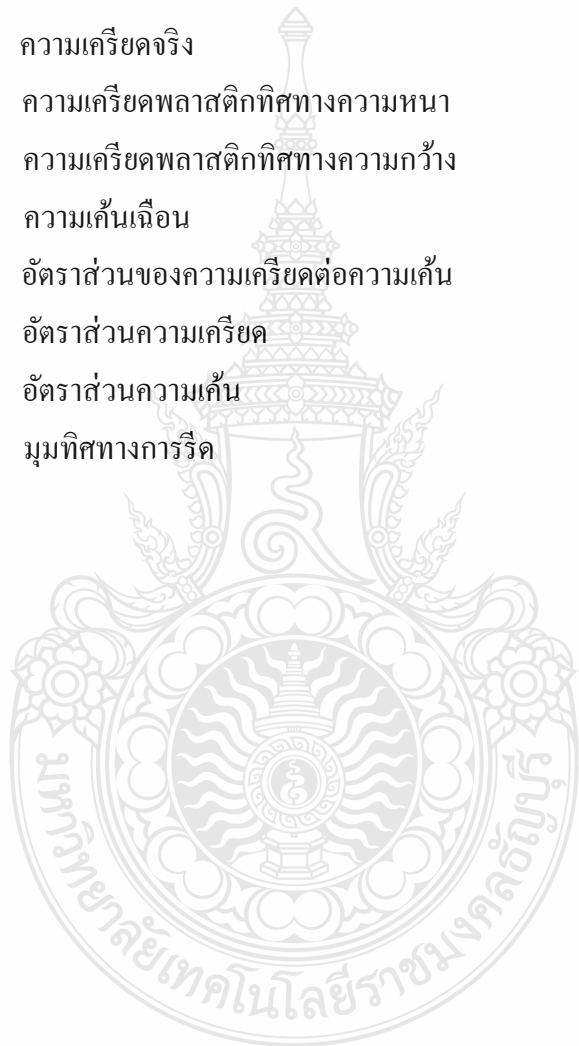
ภาพที่	หน้า
4.17 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดหลักก่อนและหลังแก้ไขรัศมีพื้นซ์ ดาย.....	77
4.18 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดรองก่อนและหลังแก้ไขรัศมีพื้นซ์ ดาย.....	77
4.19 ความเครียดจากการแก้ไขแม่พิมพ์ บนแผนภาพจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทน นิติก AISI 304 2 mm.....	78
4.20 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาของชิ้นงานจากการทดลองจริงก่อนแก้ไขเปรียบเทียบ หลังแก้ไข	79



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A_i	พื้นที่หน้าตัดใด ๆ
A_o	พื้นที่หน้าตัดเดิม
E	ยังโมดูลัส
F	ค่าคงตัวแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก
G	ค่าคงตัวแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก
H	ค่าคงตัวแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก
J_2	ลำดับที่สองของความเค้นเบี่ยงเบน
K	สัมประสิทธิ์ความต้านแรง
L	ค่าคงตัวแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก
L_i	ความยาวขณะใดขณะหนึ่ง
L_o	ความยาวเดิม
M	ค่าคงตัวแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก
N	ค่าคงตัวแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก
R	อัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้างต่อแนวหนา
\bar{R}	อัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้างต่อแนวหนาเฉลี่ย
d_i	เส้นผ่านศูนย์กลางใด ๆ
d_o	เส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น
n	เลขยกกำลังของความเครียดแข็ง
t	ความหนาของวัสดุ
t_o	ความหนาของวัสดุที่ลดลง
w	ความกว้างของวัสดุ
w_o	ความกว้างของวัสดุที่ลดลง
$\{F\}_e$	เมทริกซ์ของแรงกระทำที่จุดต่อ
$\{F\}_{sys}$	เมทริกซ์รวมของแรงกระทำที่จุดต่อ
$[k]_e$	สทیفเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์
$[K]_{sys}$	สทیفเนสเมทริกซ์ของรวมระบบ
$[N]$	เมทริกซ์ฟังก์ชัน

$\{\phi\}$	เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเอลิเมนต์
$\{\phi\}_{sys}$	เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเอลิเมนต์ของระบบ
σ	ความเค้น
$\tilde{\sigma}$	ความเค้นจริง
σ_0	ความเค้นคราก
ϵ	ความเครียด
$\tilde{\epsilon}$	ความเครียดจริง
ϵ_t	ความเครียดพลาสติกทิศทางความหนา
ϵ_w	ความเครียดพลาสติกทิศทางความกว้าง
τ	ความเค้นเฉือน
$d\lambda$	อัตราส่วนของความเครียดต่อความเค้น
β	อัตราส่วนความเครียด
α	อัตราส่วนความเค้น
θ	มุมทิศทางการรีด



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ปัจจุบันความจำเป็นที่ภาคอุตสาหกรรม ต้องมีการปรับตัวเองให้มีศักยภาพในการผลิตและลดต้นทุนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่จำเป็นต้องใช้กระบวนการขึ้นรูปจากเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 โดยกระบวนการผลิตจะพบปัญหาการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Metal Forming) ไม่ได้รูปทรงชิ้นงานตามที่ออกแบบไว้ การขึ้นรูปโลหะแผ่นให้ได้ชิ้นงานออกมามีคุณภาพขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน อาทิเช่น รูปร่างของแม่พิมพ์ ความเร็วของแม่พิมพ์ แรงในการจับยึดชิ้นงาน เป็นต้น ในทางปฏิบัติการกำหนดปัจจัยดังกล่าวให้ได้ค่าที่เหมาะสมอาจต้องเสียระยะเวลาสำหรับการทดลอง ซึ่งภาคอุตสาหกรรมได้มีการนำโปรแกรมคำนวณบนเครื่องคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการจำลองกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น เพื่อหลีกเลี่ยงการสร้างแม่พิมพ์ที่ไม่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาคอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ [1] และการจำลองการขึ้นรูปบนคอมพิวเตอร์สามารถทำนายพฤติกรรมของชิ้นงานที่ไม่ได้รูปทรงตามที่ต้องการ เนื่องจากเกิดการเกิดรอยย่น (Wrinkling) การเกิดการคอด (Necking) การเกิดฉีกขาด (Fracture) ปัญหาดังกล่าวล้วนแล้วแต่เป็นการสูญเสียของกระบวนการผลิตทั้งสิ้น

พื้นฐานการเปลี่ยนรูปหรือผิดรูปอย่างถาวรของโลหะ จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีแรงมากพอที่จะทำให้ผลึกโครงสร้างทำให้อะตอมเกิดการเคลื่อนไถลหรือเคลื่อนที่ไปบนอะตอมอื่น ๆ ซึ่งถ้าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นน้อยกว่าความเค้นเฉือนไหลตัว (Shear Stress) อะตอมจะกลับสู่สถานะเดิมเมื่อแรงเฉือนเลิกกระทำจะเรียกการเกิดการเปลี่ยนรูปร่าง Elastic ในขณะที่เฉือนมีสูงกว่าจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวร Plastic การเปลี่ยนรูปอย่างถาวรในผลึกโครงสร้างโดยในรูปแบบของการเคลื่อน (Slip) การจัดเรียงตัวของอะตอมจำนวนมากย่อมมีข้อบกพร่องเกิดขึ้น และพบว่าเป็นข้อบกพร่องของผลึกที่ไม่สมบูรณ์เรียกว่า Dislocations ดังนั้นแนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการทดลองคือการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram) ที่ประกอบด้วยเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Curve) อธิบายถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูป ทำให้ทราบบริเวณวิกฤตบนชิ้นงาน การเกิดรอยย่น การเกิดการคอด การเกิดฉีกขาด แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลอง สามารถนำวิเคราะห์การขึ้นรูปอย่างถาวรภายใต้ทรงกรวย และการทดลองขึ้นรูปชิ้นงาน

จริง ให้ผลสอดคล้องกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [2] และแบบจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เพื่อช่วยในการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือวิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะแผ่น [3] ใช้การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับการพยากรณ์การบิดงอของโลหะแผ่น ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ เพื่อศึกษาและทำนายผลการขึ้นรูปโลหะกับวัสดุแผ่นความหนา 0.81 มม. และทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับการขึ้นรูปจริง จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถจำลองและทำนายความเสียหายได้จริง [4] การวิจัยครั้งนี้เป็นการแก้ไขปัญหาการขึ้นรูปชิ้นส่วนของฝาซีล วัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หนา 2 มม. ด้วยวิธีการจำลองการขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Dyna Form 5.5 เปรียบเทียบกับการทดลองขึ้นรูปจริง และประยุกต์ปรับค่าพารามิเตอร์ของพื้นที่และคายในการจำลองการขึ้นรูป ศึกษาพฤติกรรมของชิ้นงาน เช่น การบิดงอ ความเครียด ความหนา เพื่อนำค่าที่มีความเหมาะสมสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการแก้ปัญหาการบิดงอของฝาซีล โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของรัศมีคาย ต่อการเกิดความเครียด ความหนา และพฤติกรรมการบิดงอของชิ้นงาน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบแม่พิมพ์ฝาซีล ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 281 มิลลิเมตร ลึก 33 มิลลิเมตร ด้วยโปรแกรม Dyna Form 5.5
- 1.3.2 การจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่รัศมีคาย 2 มิลลิเมตร 2.5 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร ด้วยโปรแกรม Dyna Form 5.5
- 1.3.3 ทดลองขึ้นรูปฝาซีลด้วยวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตร ใช้สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว
- 1.3.4 สร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตร โดยทดลองขึ้นรูปครึ่งวงกลมโดยวิธีการเซเทิร์ตซ์ขึ้นทดสอบ ใช้สารหล่อลื่น น้ำมันขึ้นรูปรีโนฟอร์ม น้ำมันมะพร้าว แผ่นโพลีเอททีลีน
- 1.3.5 เปรียบเทียบผลการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบ ความเครียด และความหนา และพฤติกรรมการบิดงอ

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ทดสอบหาสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หน้า 2 มิลลิเมตร
- 1.4.3 ออกแบบสร้างแม่พิมพ์ฝ้าซึล สำหรับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม Dyna Form 5.5
- 1.4.4 ศึกษาผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการจำลองการขึ้นรูป
- 1.4.5 ทดลองขึ้นรูปฝ้าซึลตามแบบที่กำหนด
- 1.4.6 ทำการเก็บข้อมูลได้แก่ ความเครียด ความหนา และพฤติกรรมการน็อกที่ ได้จากการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง
- 1.4.7 นำแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หน้า 2 มิลลิเมตร ไปวิเคราะห์ความเครียดของชิ้นงานที่ได้จากการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง
- 1.4.8 ศึกษาวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูลผลการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาแนวโน้มและความสอดคล้องของข้อมูล
- 1.4.9 ปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ในการจำลองการขึ้นรูป
- 1.4.10 วิเคราะห์ผลลัพธ์ และสรุปผลการวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงาน

1.5 คำจำกัดความในการวิจัย

- 1.5.1 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLD) หมายถึง เป็นกราฟซึ่งเกิดจากการวัดความสัมพันธ์ของความเครียดหลัก และความเครียดรอง ผสมผสานกันนำมาพล็อตเพื่อดูการพัฒนาเป็นเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป
- 1.5.2 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLC) หมายถึง เป็นส่วนโค้งที่ได้มาโดยการสังเกตแสดงให้เห็นถึงระดับความเครียดสองแกน ซึ่งเหนือเส้นขึ้นไปเป็นตำแหน่งการเกิดรอยคอด

1.6 กรอบแนวความคิดในการวิจัย

กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น เป็นการเปรียบรูปทรงของแผ่นโลหะแบบราบให้เป็นรูปทรงตามที่ต้องการ โดยปราศจากการแตกหรือการบางเฉพาะแห่ง กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น จะถูกทำให้เสียรูปการด้วยเครื่องมือ ซึ่งประกอบด้วย พินซ์ ดาย โดยอาศัยแรงกดจากพินซ์ทำให้วัสดุเกิดการ

ไหลตัวเป็นไปตามขนาดและรูปทรงของคาย ดังนั้นต้องศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุที่นำมาขึ้นรูป อิทธิพลตัวแปรของรัศมีพื้นผิวและคายที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งได้อธิบายดังนี้

พฤติกรรมของแผ่น โลหะที่เกิดขึ้น ในกระบวนการลากขึ้นรูปในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดและคุณสมบัติของวัสดุเป็นแบบแอนไอโซทรอปี่ (Anisotropy) [5] สมบัติเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain-Hardening Exponent, n - Values) และสัมประสิทธิ์ความต้านแรง (Strength Coefficient, K) โดยค่า n เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการขึ้นรูป ถ้าค่า n มีค่ามากจะทำให้โลหะแผ่นมีความสามารถในการขึ้นรูปดี และอัตราส่วนความเครียดพลาสติก R (Anisotropy) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในด้านความต้านทานการหดตัวในแนวความหนา จะทำให้ขอบของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปยาวไม่เท่ากันหรือเกิด Earing [6]

อิทธิพลของค่ารัศมีพื้นผิวและรัศมีคาย พบว่ารัศมีพื้นผิวเปลี่ยนแปลงไปแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปจะแปรเปลี่ยนน้อยมาก เนื่องจากรัศมีพื้นผิวมีผลต่อแรงที่ใช้ในการงอขึ้นรูปในขั้นตอนแรกเท่านั้นและเมื่อรัศมีคายแปรเปลี่ยนไป แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปจะแปรเปลี่ยนไปอย่างมาก รัศมีคายน้อยจะใช้แรงในการลากขึ้นรูปมาก รัศมีคายมากจะใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อย [7]

เมื่อพิจารณาความเสียหายจากการขึ้นรูป ล้วนแล้วมีสาเหตุจากคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ และอิทธิพลของค่ารัศมีพื้นผิวและรัศมีคาย ฉะนั้นกรอบแนวความคิดในการวิจัยครั้งนี้คือ ทดสอบหาสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตร ใช้เป็นข้อมูลสำหรับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง ซึ่งถ้าพบว่าผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีมีค่าความเครียดหลัก ค่าความเครียดรอง จุดบกพร่องต่างๆ ที่สอดคล้องกัน แสดงว่าสามารถนำการจำลองการขึ้นรูปด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ไปประยุกต์ในการวิเคราะห์การขึ้นรูป โดยปรับค่าพารามิเตอร์ของรัศมีพื้นผิวและรัศมีคาย เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการลดเวลาสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน
- 1.7.2 เป็นแนวทางในการวิเคราะห์แก้ไขปัญหาในการขึ้นรูป
- 1.7.3 สามารถนำแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตรที่ได้จากการทดลองไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปได้

บทที่ 2

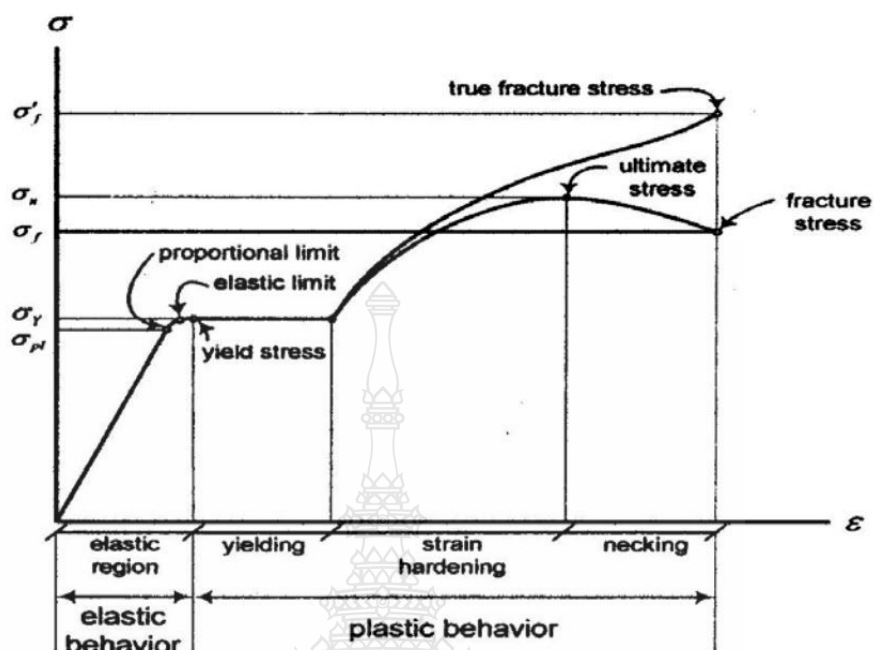
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะ

ทฤษฎีในการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะวัสดุแผ่น (Sheet Metal) พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปในช่วงถาวร (Plasticity) และพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น (Elasticity) เมื่อวัสดุซึ่งได้รับแรงกระทำจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรที่กระทำออก วัสดุจะคืนตัวเล็กน้อยเมื่อไม่ได้รับแรงกระทำ ในส่วนพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปถาวรเมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจนวัสดุเลยจุดคราก (Yield Point) ถ้านำแรงที่กระทำออกวัสดุจะไม่กลับคืนตัว วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร คุณสมบัติทางกลที่สำคัญอันหนึ่งซึ่งจะมีผลต่อการขึ้นรูปของวัสดุโลหะแผ่นคือ ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (True Stress-Strain Relation) ซึ่งในกรณีที่ใช้กฎยกกำลัง (Power Law) จะต้องหาค่าคุณสมบัติของค่า Strength Coefficient (K) และ Strain Hardening Exponent (n) โดยค่า n เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการขึ้นรูป ถ้าวัดค่า 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 ถ้าวัดค่า R แตกต่างกันมาก จะทำให้ขอบของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปยาวไม่เท่ากันหรือการเป็นคลื่นที่ขอบชิ้นงาน (Earing) [8]

2.1.1 ทฤษฎีในการเปลี่ยนรูปช่วงยืดหยุ่น (Elastic Theory)

เมื่อวัสดุได้รับแรงดึงจะทำให้วัสดุเกิดการยืดตัวซึ่งสามารถแบ่งพฤติกรรมการยืดตัวออกเป็น 2 ส่วน หลัก ๆ คือ การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นหรือช่วงอีลาสติกและการเปลี่ยนรูปถาวรหรือช่วงพลาสติก ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ [9]

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_t ในแต่ละช่วงของการทดสอบหารด้วยพื้นที่หน้าจัดเริ่มต้นของชิ้นงาน [9]

$$\sigma = \frac{F_i}{A_o} \quad (2.1)$$

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

สำหรับความเครียดเชิงวิศวกรรม (Engineering Strain) สามารถคำนวณได้จากความยาวที่เปลี่ยนไปหารด้วยความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} = \frac{L_i - L_o}{L_o} \quad (2.2)$$

โดย ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป L_o คือความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ L_i คือความยาวขณะใดขณะหนึ่งและ ε คือความเครียดเฉลี่ย เป็นความเครียดเชิงวิศวกรรม ซึ่งมีทิศทางเดียวกับทิศทางของแรง F ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการคำนวณโดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวเดิมของชิ้นทดสอบเรียกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเชิงวิศวกรรม (Engineering Stress-Strain Curve) ซึ่งในการทดสอบจริง ในขณะที่ระดับความเค้นในชิ้นงานทดสอบเพิ่มเลยความเค้นคราก พื้นที่หน้าตัดและความยาวของชิ้นงานทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจนเกิดคอคอดและขาดออกจากกันในที่สุด ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถหาได้โดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละขณะ ซึ่งเรียกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง (True Stress True Strain Curve) หรือเรียกอีกชื่อว่า (Flow Curve) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร ถ้า $\tilde{\sigma}$ เป็นความเค้นจริงและ $\tilde{\varepsilon}$ เป็นความเครียดจริง

$$\tilde{\sigma} = \frac{F_i}{A_i} = \sigma \left(\frac{A_o}{A_i} \right) \quad (2.3)$$

โดย A_i คือพื้นที่หน้าตัดใด ๆ A_o คือพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น σ คือความเค้นเฉลี่ย F_i คือแรงดึงที่กระทำบนชิ้นทดสอบ

สำหรับความเครียดจริง $\tilde{\varepsilon}$ สามารถหาได้โดยพิจารณาที่ความยาวใด ๆ ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหาได้จากการ อินทิเกรตความยาว dL_i ใด ๆ

$$\varepsilon = \int_{L_o}^{L_i} \frac{dL_i}{L_i} = \ln \frac{L_i}{L_o} \quad (2.4)$$

ในกรณีการขึ้นรูปโลหะมีปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้น จะสมมุติให้ปริมาตรไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังการขึ้นรูปทำให้มีปริมาตรเท่าเดิม

$$A_o L_o = A_i L_i \quad (2.5)$$

$$\frac{A_o}{A_i} = \frac{L_i}{L_o} = \frac{L_o + \Delta L}{L_o} = 1 + \varepsilon \quad (2.6)$$

ดังนั้นความเค้นจริงและความเครียดจริงโดยสมมุติฐานให้ปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูปคงที่

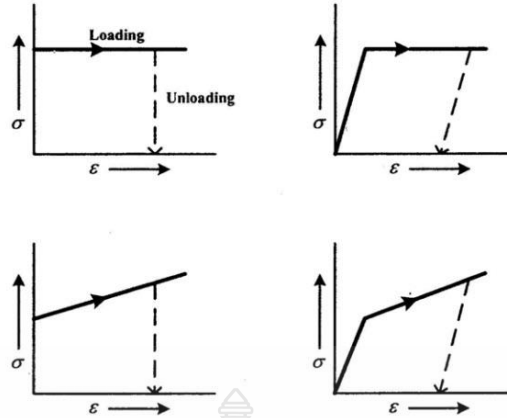
$$\tilde{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2.7)$$

$$\tilde{\varepsilon} = \ln \frac{A_o}{A_i} = 2 \ln \frac{d_o}{d_i} \quad (2.8)$$

โดย d_i คือเส้นผ่าศูนย์กลางใดๆ d_o คือเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ

2.1.2 ทฤษฎีในการเปลี่ยนรูปถาวรหรือในช่วงพลาสติก (Plasticity Theory)

ในการขึ้นรูปวัสดุโลหะแผ่นให้มีรูปทรงตามที่ต้องการจะต้องให้แรงกระทำกับวัสดุเพื่อให้วัสดุเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ผลจากการทดสอบการดึงวัสดุพบว่าพฤติกรรมของวัสดุแบ่งได้เป็นสองช่วงคือ ช่วงยืดหยุ่นและช่วงเปลี่ยนรูปอย่างถาวรหรือช่วงพลาสติกพฤติกรรมเหล่านี้ อยู่ด้วยกันหลายลักษณะซึ่งสามารถแสดงด้วยแบบจำลอง (Model) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ [9]

ในการพิจารณาการเปลี่ยนรูป จะใช้เกณฑ์การคราก (Yield Criterion) เป็นเกณฑ์ที่จะกำหนดการเปลี่ยนรูป จากอีลาสติกไปเป็นพลาสติก และทฤษฎีพื้นฐานที่นิยมใช้ในการทำนายการครากตัวของโลหะแผ่นคือทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด ทฤษฎีพอนมิเชลล์ (Von Mises Theory) และทฤษฎีของฮิล (Hill Theory) ในส่วนของทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดและทฤษฎีของพอนมิเชลล์จะมีข้อสมมุติฐานว่าวัสดุมีคุณสมบัติทางกลเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropy) ส่วนทฤษฎีของฮิล จะพิจารณาอิทธิพลของโลหะที่ผ่านการรีด (Anisotropy) ในการใช้กฎเกณฑ์การครากสำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานนี้จะใช้ทฤษฎีการครากของฮิล ทฤษฎีนี้เหมาะสำหรับวัสดุโลหะแผ่นที่มีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก [9]

2.1.3 เกณฑ์การคราก (Yield Criteria)

ทฤษฎีของพอนมิเชลล์หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าทฤษฎีพลังงานแปรรูป (Distortion Theory) ซึ่งพอนมิเชลล์ ได้เสนอว่าการครากจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานแปรรูปภายในเนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะที่แรงกระทำมีค่าเท่ากับพลังงานแปรรูปจากการทดสอบแรงดึงของวัสดุทดสอบ ซึ่งก็คือค่าความเค้นเบี่ยงเบนอันดับสอง J_2 ซึ่ง $J_2 = k_2$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.9)$$

ในกรณีของชิ้นทดสอบที่ได้รับแรงดึง $\sigma_1 = \sigma_o$, $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_o$

$$J_2 = \frac{1}{6} (\sigma_o^2 + \sigma_o^2) = k \quad (2.10)$$

$$\sigma_o = \sqrt{3}k \quad (2.11)$$

เมื่อ σ_o คือความเค้นคราก
 k คือความเค้นเฉือนสูงสุดที่ได้จากการทดสอบดึงวัสดุ

สำหรับวัสดุทดสอบที่ได้รับแรงเฉือนเพียงอย่างเดียว $\tau = \sigma_1 = -\sigma_3, \sigma_2 = 0$ เมื่อแทนลงในสมการที่ (2.9) [9] จะได้สมการการครากคือ

$$\sigma_1^2 + \sigma_1^2 + 4\sigma_1^2 = 6k \quad (2.12)$$

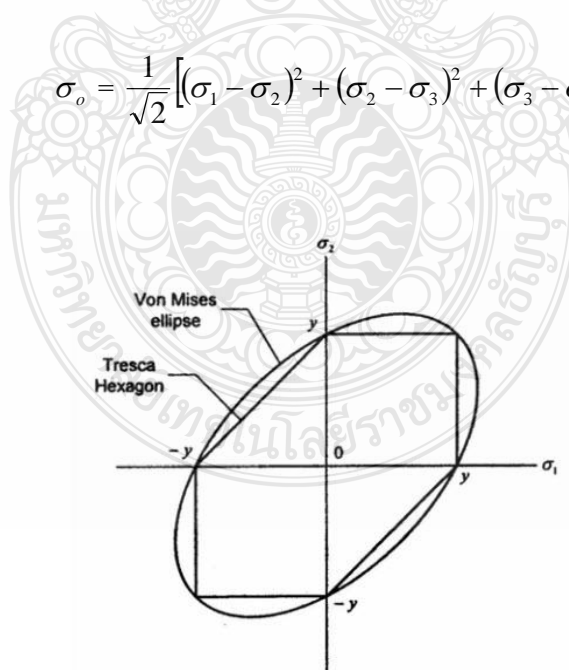
$$\sigma_1 = k \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (2.11) และ (2.13) จึงสามารถหาค่า k ได้คือ

$$k = \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} = \sigma_1 \quad (2.14)$$

จาก $j_2 = k^2$ สามารถจัดสมการที่ (2.9) และ (2.14) ได้ใหม่คือ

$$\sigma_o = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$



ภาพที่ 2.3 เปรียบเทียบกรอบการแตกหัก [9]

จะเห็นได้ว่าการครากจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{3}}$ เท่าของความเค้นคราก ที่ได้จากการดึงวัสดุทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบทฤษฎีทั้งสองโดยพิจารณาจากภาพที่ 2.3 ซึ่งแสดงกรอบการแตกหักของวัสดุพบว่าทฤษฎีของฟอนมิเชลส์ ให้ผลการทำนายการครากใกล้เคียงมากกว่าทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดสำหรับงานขึ้นรูปโลหะแผ่น [9]

2.1.4 ทฤษฎีแอนไอโซทรอปีของ Hill 1948

ได้เสนอการพิจารณาพลาสติกแอนไอโซทรอปีโดยไม่คำนึงถึงรูปผลึกเดิม โดยสมมติว่าวัสดุเอกพันธ์แสดงคุณลักษณะโดยแกนไอโซทรอปี 3 แกนตั้งฉากกันคือ x , y และ z ซึ่งคุณสมบัติสมมาตรสองหน (ระนาบ x - y , y - z และ z - x คือระนาบสมมาตร) ในแผ่นรีดมักใช้ทิศทาง x , y และ z เป็นทิศทางรีด ทิศทางขวางการรีด และทิศทางความหนาตามลำดับ ทฤษฎีนี้ยังสมมติว่าความต้านแรงดึงครากและแรงกดครากในทิศทางที่กำหนดมีค่าเท่ากันเกณฑ์การคราก แอนไอโซทรอปิกที่เสนออยู่ในรูป [10]

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (2.16)$$

เมื่อ F , G , H , L , M และ N คือค่าคงตัวซึ่งแสดงคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิกสังเกตว่าถ้า $F=G=H$ และ $L=M=N=3F$ สมการนี้ลดรูปลงเป็นเกณฑ์ของฟอนมิเชลส์ ค่าคงตัว F , G และ H สามารถประเมินได้จากการทดสอบการดึง

พิจารณาการทดสอบในทิศทาง x และให้ X เป็นความเค้นดึงคราก ขณะคราก

$$\begin{aligned} \sigma_x &= X \\ \sigma_y &= \sigma_z = \tau_{ij} = 0 \end{aligned}$$

ดังนั้น สมการที่ (2.16) เป็น

$$(G+H)X^2 = 1 \quad (2.17)$$

หรือ

$$X^2 = \frac{1}{(G+H)}$$

ในการทำงานเดียวกัน ถ้า Y และ Z คือความเค้นดึงครากในทิศทาง y และ z

$$\begin{aligned} X^2 &= \frac{1}{G+H} \\ Y^2 &= \frac{1}{H+F} \\ Z^2 &= \frac{1}{F+G} \end{aligned} \quad (2.18)$$

แก้สมการพร้อมกันได้

$$\begin{aligned} 2F &= \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2} \\ 2G &= \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2} \\ 2H &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} \end{aligned} \quad (2.19)$$

ในกรณีของโลหะแผ่นวัด Z ได้ยาก ค่าคงตัว L , M และ N สามารถหาได้จากการทดสอบการเลื่อน กฎการไหลสามารถหาได้โดยใช้สมการ

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial f(\sigma_{ij})} \quad (2.20)$$

เมื่อ $f(\sigma_{ij})$ คือฟังก์ชันการคราก (ใช้ได้กับวัสดุแอนไอโซทรอปิกและไอโซทรอปิก) หาคำนวณฟังก์ชันของสมการที่ (2.20) ได้กฎการไหล

$$\begin{aligned} d\varepsilon_x &= d\lambda \left[H(\sigma_x - \sigma_y) + G(\sigma_x - \sigma_z) \right], d\varepsilon_{yx} = d\varepsilon_{zy} = d\lambda L \tau_{yz} \\ d\varepsilon_y &= d\lambda \left[F(\sigma_y - \sigma_z) + H(\sigma_y - \sigma_x) \right], d\varepsilon_{zx} = d\varepsilon_{xz} = d\lambda L \tau_{zx} \\ d\varepsilon_z &= d\lambda \left[H(\sigma_z - \sigma_y) + G(\sigma_z - \sigma_x) \right], d\varepsilon_{xy} = d\varepsilon_{yx} = d\lambda L \tau_{xy} \end{aligned} \quad (2.21)$$

ในการหากฎไหลสำหรับความเครียดเฉือน $d\varepsilon_{yz}$, $d\varepsilon_{zx}$ และ $d\varepsilon_{xy}$ ต้องเขียนเกณฑ์การคราก สมการที่ (2.16) ใหม่ เพื่อให้พจน์ของความเค้นเฉือนปรากฏในรูป

$$L(\tau_{yz}^2 + \tau_{zy}^2) + M(\tau_{zx}^2 + \tau_{xz}^2) + N(\tau_{xy}^2 + \tau_{yx}^2)$$

มีฉะนั้นแล้วอนุพันธ์ย่อยจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ใช้ไม่ได้คือ $d\varepsilon_{yz} = 2 \cdot d\lambda L \tau_{yz}$ และ $d\varepsilon_{zy} = 0$ สังเกตว่าสมการที่ 2.21 คือ $d\varepsilon_x + d\varepsilon_y + d\varepsilon_z = 0$ แสดงว่าปริมาตรคงตัวพิจารณาการทดสอบการดึงในทิศทาง x อีกครั้งหนึ่ง แทนค่า $\sigma_x = X$, $\sigma_y = \sigma_z = 0$ ในสมการ (2.21) ได้ความเครียด

$$\begin{aligned} d\varepsilon_x &= d\lambda(H + G)X \\ d\varepsilon_y &= -d\lambda(H)X \\ d\varepsilon_z &= -d\lambda(G)X \end{aligned} \quad (2.22)$$

เนื่องจากอัตราส่วนความเครียดสำหรับการทดสอบการดึงในทิศทาง x นิยามว่า

ดังนั้น

$$\begin{aligned} R = R_0 &= \left(\frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_z} \right) \\ R &= \frac{H}{G} \end{aligned} \quad (2.23)$$

ในทำนองเดียวกัน นิยามให้ $P = R_{90}$ คืออัตราส่วนความเครียดในทิศทางแกน Y $P = d\varepsilon_x / d\varepsilon_z$ เมื่อ $\sigma_y = Y$ และ $\sigma_x = \sigma_z = 0$ จากสมการที่ (2.21) ได้

$$P = \frac{H}{F} \quad (2.24)$$

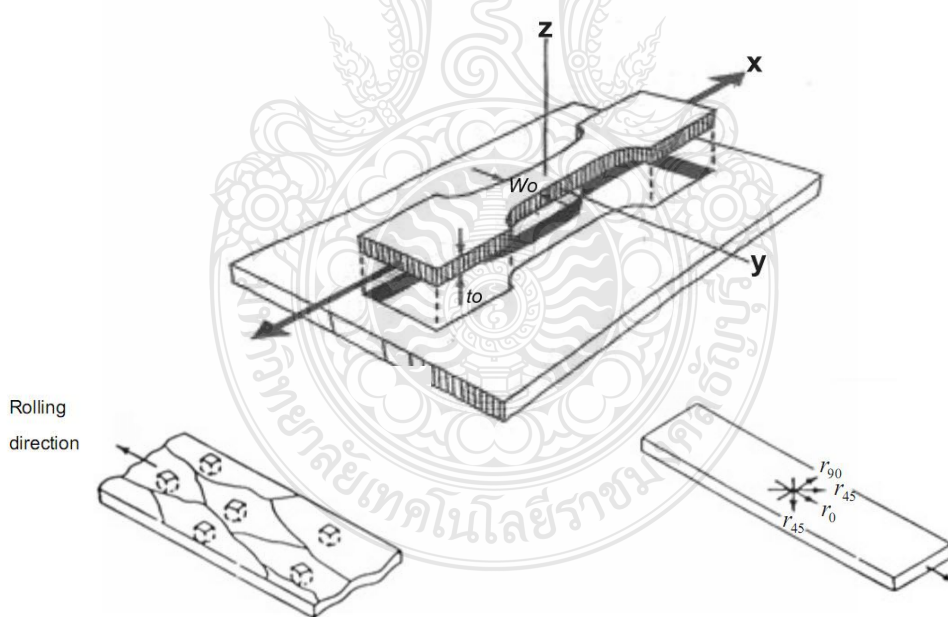
2.1.5 พลาสติกแอนไอโซทรอปี (Plastic Anisotropy)

สาเหตุที่สำคัญมากที่สุดซึ่งทำให้โลหะมีคุณสมบัติพลาสติกแอนไอโซทรอปีก็คือทิศทางของเกรนทิศทางที่เป็นไปหรือเนื้อของรูปผลึกที่พัฒนาขึ้นในเหล็กล้วนเกิดจากการหมุนของ

แลคทิกในเกรนระหว่างการเปลี่ยนรูป โดยการสลิปหรือการทวิน (Twinning) พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของชั้นทดสอบการดึงที่เป็นแผ่นแถบ ตัดออกมาจากแผ่นรีด เมื่อได้รับแรงดึงในแนวแกน สามารถเกิดการครากได้เฉพาะ โดยการสลิปในระนาบความต้านแรงดึงครากของชั้นทดสอบที่ตัดทำมุม θ กับทิศทางการรีดไม่แปรผันกันมากนัก ผลสรุปอย่างผิดพลาดว่าวัสดุเป็นไอโซทรอปิก ความผิดพลาดอาจเกิดขึ้นได้ถ้าวัดความดึงเครียดในแนวขวางซึ่งเป็นผลมาจากการดึง ถ้าทิศทางเป็นอุดมคติ ความหนาไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก การยืดในแนวยาวมีผลทำให้ความกว้างชั้นทดสอบลดลง [10]

พารามิเตอร์ที่มีประโยชน์คืออัตราส่วน R ของความเครียดพลาสติกเมื่อ w และ t คือ ทิศทางความกว้างและความหนาของชั้นทดสอบการดึงตามลำดับ ดังนั้น $\epsilon_w = \ln(w/w_0)$ และ $\epsilon_t = \ln(t/t_0)$ สำหรับวัสดุไอโซทรอปิก $R = 1$

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \quad (2.25)$$



ภาพที่ 2.4 ชั้นทดสอบตามทิศทางการรีด [2]

ภาพที่ 2.4 ในการวัดค่า R ถึงแม้ว่า มีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้าง ε_w ต่อแนวหนาความเครียดในแนวหนา ε_t ไม่สามารถวัดได้อย่างแม่นยำบนแผ่นบาง เพราะฉะนั้นความเครียดในแนวหนามักหาได้จากการวัดความเครียดในแนวยาวและแนวกว้างโดยใช้ปริมาตรคงตัว $\varepsilon_t = (\varepsilon_t + \varepsilon_w)$ 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 แม้ว่าสหสัมพันธ์พื้นฐานไม่แม่นยำ แต่ก็มีพื้นฐานสำหรับใช้กับเครื่องมือวัดเชิงอุตสาหกรรมขนาดเล็กซึ่งวัดค่า E ของแผ่นแถบบางด้วย Sonic Velocity และปรับให้อ่านค่า R ได้ โดยปกติค่า R มักแปรผันตามทิศทางทดสอบ θ และมักใช้แสดงคุณลักษณะของวัสดุโดยค่า R เฉลี่ยคือ \bar{R}

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45^\circ} + R_{90^\circ}}{4} \quad (2.26)$$

2.1.6 ความเครียดแข็ง (Strain Hardening)

ความเครียดแข็งเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีคุณสมบัติเหนียวที่ใช้ในงานขึ้นรูปเย็น เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำผ่านจุดครากตัวทำให้เกิดความเครียดสะสมขึ้นภายในวัสดุ จึงต้องใช้แรงที่มากกว่าเดิมในการทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปร่าง สำหรับการวิเคราะห์วัสดุแบบ อีลาสติก - พลาสติก ได้แสดงพฤติกรรมความเครียดแข็งของวัสดุ ดังนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่น จะเป็นในลักษณะเชิงเส้นการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำจะทำให้เกิดความเครียดเป็นสัดส่วนซึ่งหลักการนี้จะนำไปตามกฎของฮุก (Hook's Law) [11]

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.27)$$

เมื่อ σ คือ ค่าความเค้น

E คือ ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นหรือ โมดูลัสของยัง

ε คือ ค่าความเครียด

สำหรับคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปในช่วงพลาสติก
ครั้งนี้เป็นไปตามกฎยกกำลัง (Power Law) [12]

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.28)$$

โดยที่ K คือ สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (Strength coefficient)

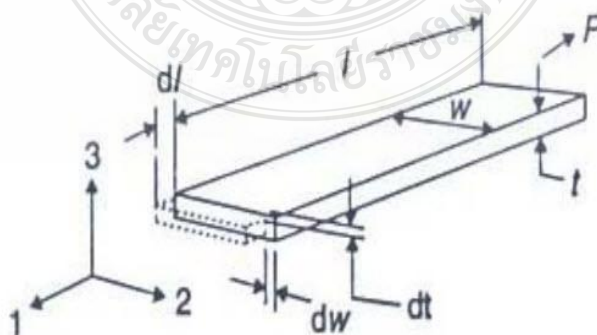
n คือ เลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (Strain - hardening exponent)

สำหรับค่าตัวเลขยกกำลังหรือความเครียดแข็ง n และค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรง K
สามารถหาได้โดยทำการใส่ค่า \log เข้าไปในสมการยกกำลังซึ่งทำให้สามารถได้สมการใหม่

$$\log \sigma = n \log \varepsilon + \log K \quad (2.29)$$

2.2 กระบวนการพื้นฐานของโลหะแผ่น และระนาบความเค้น (General Sheet Processes ; Plane Stress)

ภาพที่ 2.5 เป็นการทดสอบการดึงเป็นแนวทางการกระบวนการหาระนาบความเค้น (Plane Stress) การทดสอบการดึงแกนเดียว (Uniaxial Tension) คือการแสดงตัวอย่างของการเปลี่ยนรูปแบบระนาบความเค้น การดึงแกนเดียว (Uniaxial Tension) ให้พิจารณาจุดเล็ก ๆ ในชิ้นทดสอบในการดึงให้เปลี่ยนรูปแกนเดียวทำการทดสอบเริ่มจากการเปลี่ยนรูปที่ละน้อยจนถึงสูงสุดเราพิจารณาพื้นที่หน้าตัดระหว่างเปลี่ยนรูปลักษณะของจุดเล็ก ๆ (Element) ยังคงตั้งฉากแต่ทิศทางไม่มีความเคลื่อนที่เกี่ยวกับทิศทางหลัก 1, 2, 3



ภาพที่ 2.5 ทิศทางหลักในการทดสอบแรงดึง [2]

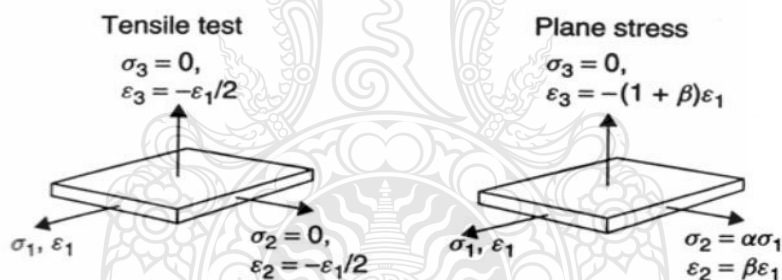
ในทางตรงกันข้ามในการทดสอบการดึง 2 ความเค้นหลักมีค่า เป็นศูนย์ในลักษณะ ชิ้นส่วนเล็ก ๆ ที่เปลี่ยนรูปค่าความเค้น 1 และ 2 ไม่เท่ากับศูนย์ ความเค้น 3 คือตั้งฉากกับผิว แท้จริง เกิดจากการสัมผัสระหว่างแผ่นบางกับ Tooling โดยทั่วไปแล้วน้อยกว่าจุด Yield ของวัสดุ จะให้เป็น ศูนย์ได้และให้เป็น Plane Stress Deformation [2]

2.2.1 อัตราส่วนความเค้นและความเครียด (Stress and Strain Ratios)[2]

ในความหมายเฉพาะที่กล่าวถึงการเปลี่ยนรูปของจุดเล็ก ๆ Element ในแต่ละเทอม ของอัตราส่วนความเครียด (Strain Ratio , β) หรืออัตราส่วนความเค้น (Stress Ratio , α) สำหรับ วิธี Proportional ค่าความจริงที่ใกล้เคียงที่สุด ดังภาพที่ 2.6

ในหลักทิศทางตั้งนั้นให้ $\sigma_1 > \sigma_2$ และทิศทางตั้งสามตั้งฉากกับพื้นผิว เมื่อ $\sigma_3 = 0$ ลักษณะการเปลี่ยนรูป

$$\begin{aligned} \varepsilon_1; & \quad \varepsilon_2 = \beta\varepsilon_1; & \quad \varepsilon_3 = -(1 + \beta)\varepsilon_1 \\ \sigma_1; & \quad \sigma_2 = \alpha\sigma_1; & \quad \sigma_3 = 0 \end{aligned}$$

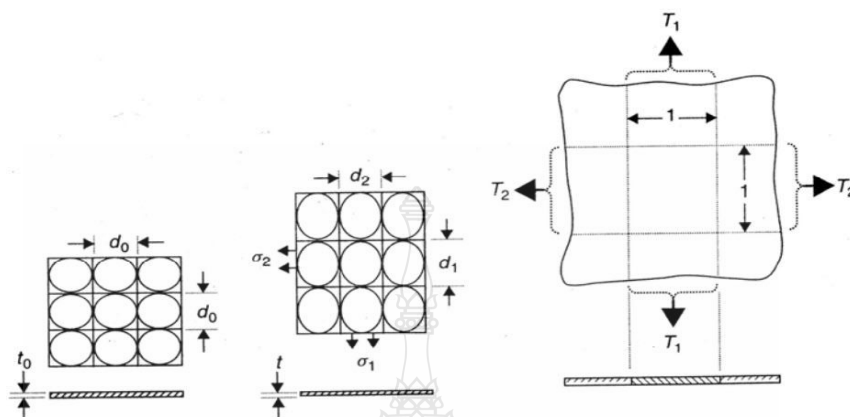


ภาพที่ 2.6 ทิศทางหลักของความเค้นและความเครียด [2]

2.2.2 การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of Sheet in Plane Stress)

ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane stress) พิจารณา (Work hardening) ของวัสดุ ซึ่งเข้ากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูป ในรูปที่ 2.7 ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา t_0 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_0 หรือตารางขนาด d_0 ดังภาพที่ 2.7 (ก) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปร่างจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนของ Major คือ d_1 แกนของ Minor คือ d_2 ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางหลักของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า

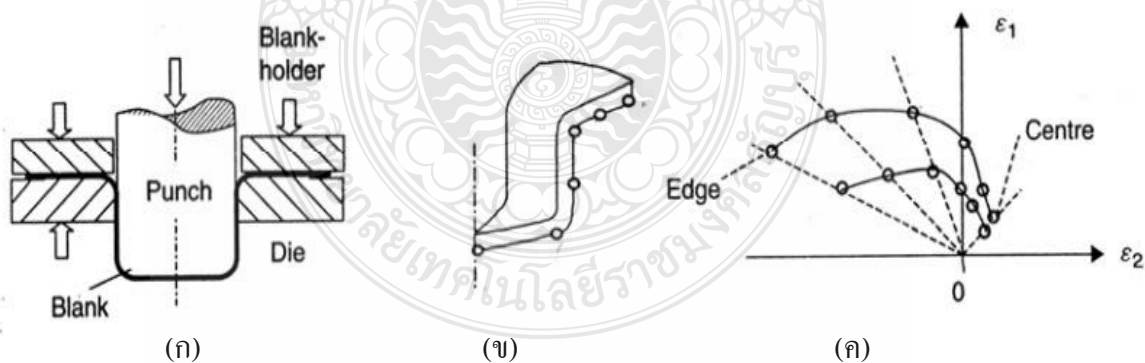
ดังภาพที่ 2.7 (ข) ส่วนความหนา คือ t ตามที่กรณี ดังภาพที่ 2.7 (ค) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ σ_1 และ σ_2 [13]



ภาพที่ 2.7 (ก) วงกลมบนโลหะแผ่น ขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูป (ข) เมื่อมีการเปลี่ยนรูปกริด วงกลมจะเปลี่ยนเป็นรูปวงรี ขนาดของแกนหลักคือ d_1 และขนาดแกนรองคือ d_2 (ค) การดึง, T , หรือแรงส่งผ่านต่อหน่วยความกว้าง [14]

2.2.3 แผนภาพความเครียด (Strain Diagram)[2]

ความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้น ดังภาพที่ 2.8 สามารถวัดได้จากกริดวงกลมในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.8 (ก) การขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก (ข) ชิ้นส่วนย่อยของถ้วยทรงกระบอกแสดงค่าความเครียดที่วัดได้ (ค) ผลค่าความเครียดที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก [2]

2.2.4 ค่าความเครียดหลัก (Principal Strains)[2]

ความเครียดหลักที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการ

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} ; \quad \varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} ; \quad \varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} \quad (2.30)$$

2.2.5 อัตราส่วนของความเครียด (Strain Ratio) [2]

โดยปกติเส้นแนวความเครียด (Strain Path) ยังคงเป็นสัดส่วนเส้นตรง ดังสมการที่

$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\ln \left(\frac{d_2}{d_0} \right)}{\ln \left(\frac{d_1}{d_0} \right)} \quad (2.31)$$

2.2.6 ความเครียดหนาและความหนา (Thickness strain and Thickness)[2]

จากสมการ (2.30) ความเครียดหาได้โดยการวัดความหนาหรือหาได้จากความเครียดหลัก (Major Strain) ความเครียดรอง (Minor Strain) โดยให้พิจารณาว่าการเปลี่ยนรูปที่ปริมาตรคงที่

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} = -(1 + \beta)\varepsilon_1 = -(1 + \beta) \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (2.32)$$

จากสมการ (2.32) ความหนาโดยทั่วไปคือ

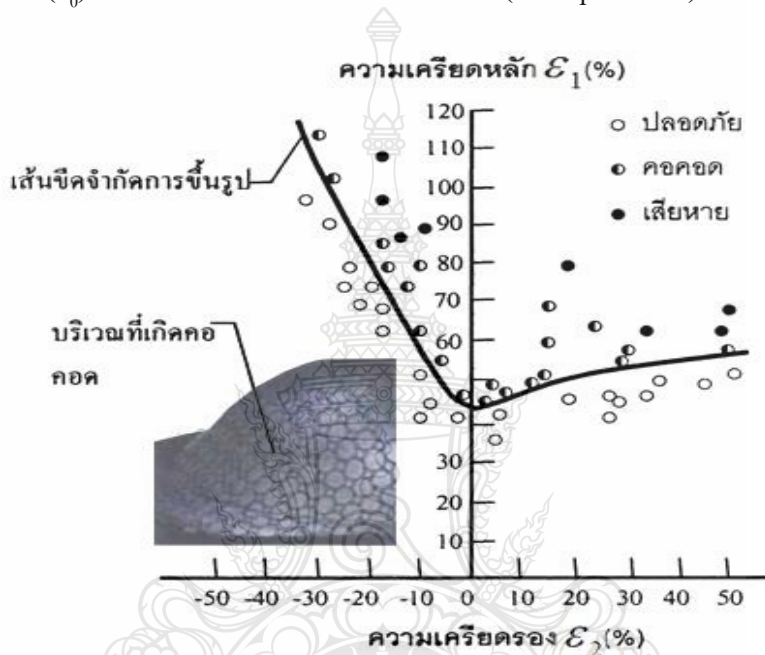
$$t = t_0 \exp(\varepsilon_3) = t_0 \exp[-(1 + \beta)\varepsilon_1] \quad (2.33)$$

หรืออีกแนวทางหนึ่งที่ปริมาตร $td_1d_2 = t_0d_0^2$ ที่ปริมาตรคงที่

$$t = t_0 \frac{d_0^2}{d_1d_2} \quad (2.34)$$

2.3 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram ; FLD) [6]

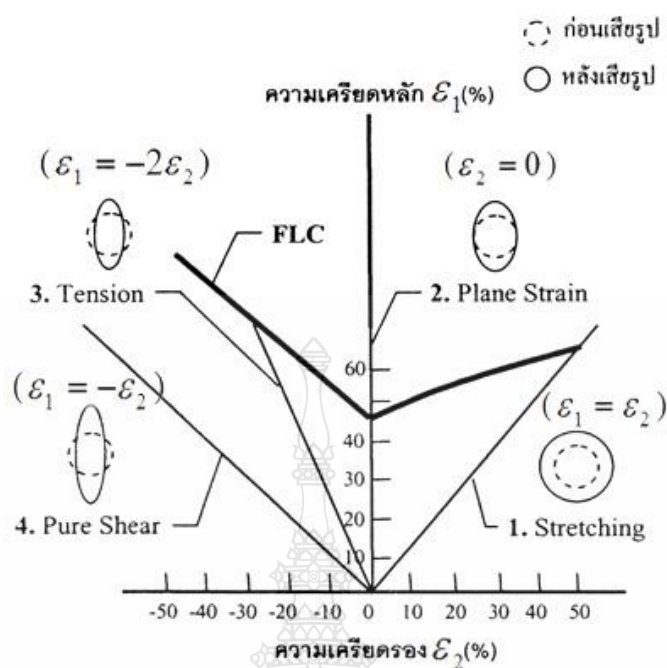
แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป เป็นแผนภาพที่บอกว่าคุณสมบัติของโลหะแผ่นสามารถขึ้นรูปได้เท่าไร ก่อนที่จะเกิดคอคอด (Necking) แผนภาพดังกล่าวได้จากการนำโลหะแผ่นมาทำสัญลักษณ์เป็นรูปวงกลมเล็ก ๆ ตลอดแผ่นระหว่างทำการขึ้นรูป วงกลมดังกล่าวจะมีการเสียรูปเป็นวงรี หลังจากนั้นทำการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางในแกนหลัก (Major Strain) และแกนรอง (Minor Strain) เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางเดิม (d_0) เพื่อพิจารณาค่าของความเครียดหลัก (Principal Strain) ซึ่งสามารถหาได้



ภาพที่ 2.9 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป [6]

โดยค่าความเครียดของวงกลมบริเวณที่เกิดคอคอดจะพิจารณาเป็นบริเวณที่เสียหาย ส่วนค่าความเครียดของวงกลมที่นอกเหนือจากนั้นจะพิจารณาว่าเป็นบริเวณที่ปลอดภัย หลังจากนั้นนำค่าความเครียดต่าง ๆ มาพล็อตลงในแผนภาพแล้วทำการลากเส้นตามแนวอนุภาคที่เกิดคอคอด ซึ่งเส้นดังกล่าวเรียกว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Curve; FLC) ก็จะได้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ดังภาพที่ 2.9

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมของโลหะแผ่นหลังจากทำการบ่มขึ้นรูป โดยการสังเกตการยืดและหดตัวของวงกลมที่ได้วางลงบนโลหะแผ่นเรียบก่อนทำการบ่มขึ้นรูป การเสียรูปของวงกลมสามารถนำมาหาค่าความเครียด (Strain) ในแนวแกนหลัก (แนวที่มีระยะยืดตัวมากกว่า) และแนวแกนรอง (แนวที่มีระยะยืดตัวน้อยกว่า) ได้เมื่อพิจารณาค่าความสัมพันธ์ของค่าความเครียดทั้งสอง แนวแกนที่เกิดขึ้นกับชั้นงานลักษณะต่าง ๆ สามารถแบ่งสภาวะที่สำคัญออกเป็น 4 สภาวะ ดังภาพที่ 2.10



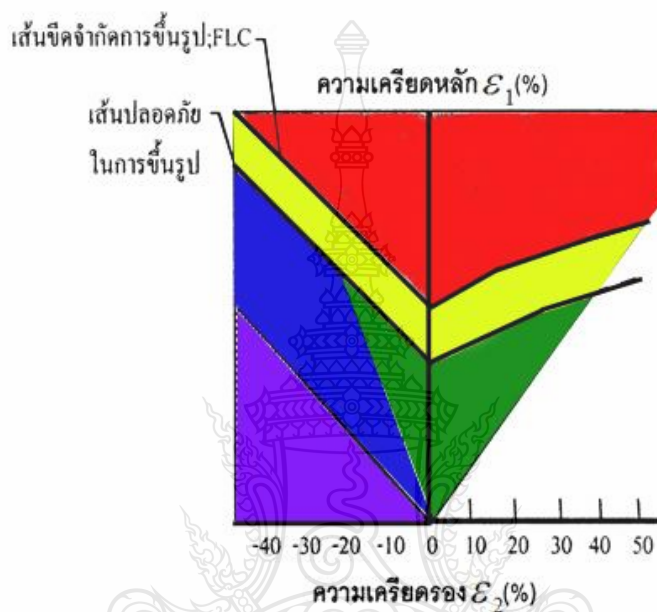
ภาพที่ 2.10 ลักษณะการยืดหดตัวของกริดวงกลม [6]

1. สภาวะยืดตรง (Stretching) เป็นกรณีที่วงกลมใดวงกลมหนึ่งมีการเพิ่มของค่าความเครียดในแนวแกนหลักและแนวแกนรองที่เท่ากัน ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2$) ตลอดตั้งแต่เริ่มทำการบีบขึ้นรูปจนเกิดคอคอด ซึ่งลักษณะของวงกลมจะมีการขยายตัวออกจากเดิมเท่ากันทุกทิศทาง เมื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนหลักและแนวแกนรองจะได้ ดังเส้นที่ 1 ในภาพที่ 2.10

2. สภาวะความเครียดในแนวระนาบ (Plain Strain) เป็นกรณีที่วงกลมเกิดการยืดตัวเฉพาะในแนวแกนหลักคือมีแต่ค่าความเครียดในแนวแกนหลักแต่ไม่มีความเครียดในแนวแกนรอง ($\varepsilon_2 = 0$) ตลอดการเสียรูปของโลหะเมื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนหลักและแนวแกนรองจะได้ดังเส้นที่ 2 ในภาพที่ 2.10 สภาวะนี้เป็นสภาวะที่โลหะอ่อนแอที่สุด เมื่อพิจารณาประกอบกับเส้น FLC จุดต่ำสุดของเส้น FLC จะอยู่บนเส้นนี้

3. สภาวะดึง (Tensile) เป็นกรณีที่วงกลมเกิดการยืดออกในแนวแกนหลักและหดตัวในแนวแกนรอง โดยมีค่าความเครียดหลักเท่ากับค่าลบของสองเท่าของค่าความเครียดรอง ($\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2$) ตลอดการเสียรูปของโลหะเมื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนหลักและแนวแกนรองจะได้ดังเส้นที่ 3 ในภาพที่ 2.10 สภาวะนี้เป็นสภาวะที่โลหะแผ่นมีพฤติกรรมเหมือนถูกนำไปดึงในเครื่องทดสอบแรงดึง

4. สภาวะเฉือนอย่างเดียว (Pure Shear) เป็นกรณีที่วงกลมเกิดการยืดออกในแนวแกนหลัก และหดตัวในแนวแกนรอง โดยมีค่าความเครียดหลักเท่ากับค่าลบของค่าความเครียดรอง ($\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$) ตลอดการเสียรูปของโลหะเมื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนหลัก และแนวแกนรองจะได้ดังเส้นที่ 4 ในภาพที่ 2.10 สภาวะนี้เป็นสภาวะที่ไม่สามารถเป็นไปได้ในทางปฏิบัติเนื่องจากโลหะแผ่นจะเกิดการยับย่นก่อนเสมอ



ภาพที่ 2.11 แผนภาพการพฤติกรรมของโลหะแผ่นหลังขึ้นรูปแบ่งออกเป็นพื้นที่ [6]

ในทางการคำนวณก็นำหลักการดังกล่าวมาใช้โดยพิจารณาค่าความเครียดในแนวแกนหลัก และแนวแกนรองที่เกิดขึ้นบนเอลิเมนต์ตลอดการขึ้นรูป โลหะแผ่นว่ามีค่าเท่าไรและตกอยู่ในพื้นที่ใด บนแผนภาพ FLD โดยแบ่งเป็น 5 พื้นที่ ดังภาพที่ 2.11 คือ

พื้นที่ที่ 1 (สีเขียว) คือบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นสภาวะยืดตรง สภาวะคิ่งและเส้นปลอดภัยในการขึ้นรูป ถ้าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณใดมีค่าความเครียดหลังขึ้นรูปตกอยู่ในพื้นที่นี้ แสดงให้เห็นว่าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณนั้นมีความเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป

พื้นที่ที่ 2 (สีเหลือง) คือบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นปลอดภัยในการขึ้นรูป และเส้นขีดจำกัดในการขึ้นรูป ถ้าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณใดมีค่าความเครียดหลังขึ้นรูปตกอยู่ในพื้นที่นี้ แสดงให้เห็นว่าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณนั้นจะเสี่ยงที่จะเกิดคอคอดหลังขึ้นรูป

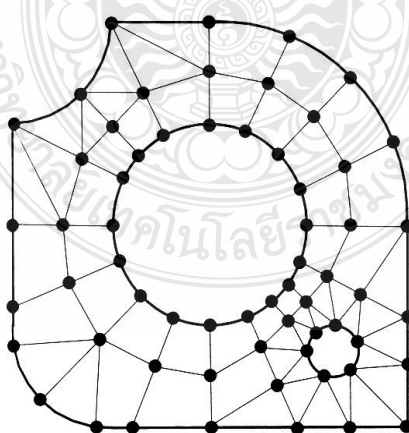
พื้นที่ที่ 3 (สีน้ำเงิน) คือบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นสภาวะดึง และสภาวะเฉือนอย่างเดียวยุโรป ถ้าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณใดมีค่าความเครียดหลังขึ้นรูปตกอยู่ในพื้นที่นี้ แสดงให้เห็นว่าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณนั้นมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยร่นหลังขึ้นรูป

พื้นที่ที่ 4 (สีม่วง) คือบริเวณที่อยู่ใต้เส้นสภาวะเฉือนอย่างเดียวยุโรป ถ้าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณใดมีค่าความเครียดหลังขึ้นรูปตกอยู่ในพื้นที่นี้ แสดงให้เห็นว่าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณนั้นจะเกิดรอยร่นหลังขึ้นรูป

พื้นที่ที่ 5 (สีแดง) คือบริเวณที่อยู่เหนือเส้นขีดจำกัดในการขึ้นรูป ถ้าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณใดมีค่าความเครียดหลังขึ้นรูปตกอยู่ในพื้นที่นี้ แสดงให้เห็นว่าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณนั้นจะเกิด คอขวดหรือการฉีกขาดหลังขึ้นรูป

2.4 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหาที่มักประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ผลเฉลยแม่นยำ (Exact Solution) ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาได้จะประกอบด้วยค่าของตัวแปรตามตำแหน่งต่าง ๆ กันบนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ผลเฉลยแม่นยำจะประกอบด้วยค่าต่าง ๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ หลักการก็คือทำการลดค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณในจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (Elements) ดังภาพที่ 2.12 ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน [15]

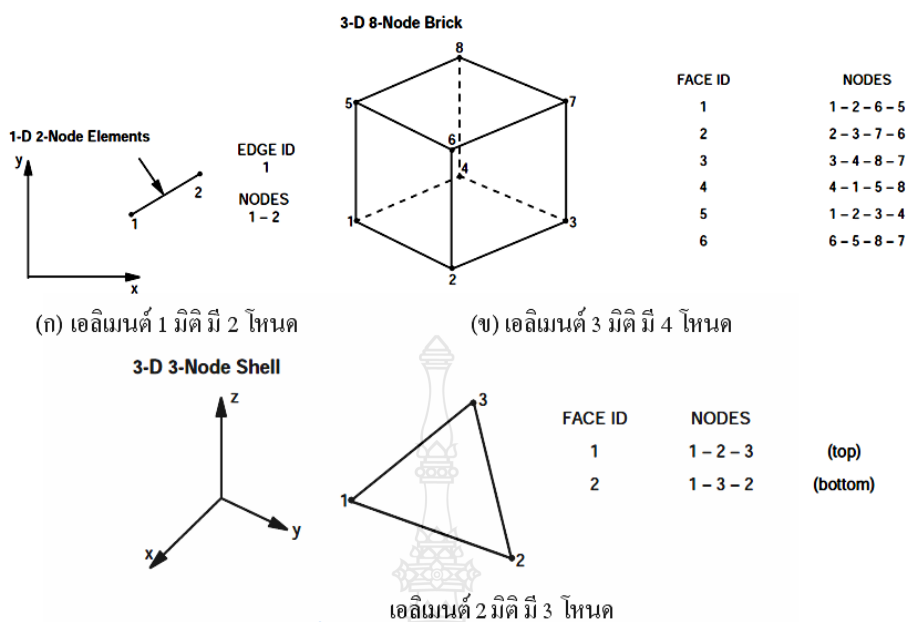


ภาพที่ 2.12 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [15]

ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis : FEA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อให้ได้ผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหาที่หลากหลายในทางวิศวกรรม [16] ซึ่งประกอบด้วยสมการควบคุมระบบ และใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อแก้สมการ ในระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมกันด้วยจุดโหนด (Node) ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของปัญหาโดยประมาณต้องนำสมการควบคุมระบบมาสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์บนโดเมน จากนั้นจึงทำการแก้ปัญหาดังกล่าวซึ่งจะได้ผลเฉลยของปัญหาที่จุดต่อบนโดเมน แม้การพัฒนาระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์แรกเริ่มเดิมทีจะเน้นไปที่การศึกษาความเค้นในโครงสร้างที่ซับซ้อน ตั้งแต่นั้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในสาขาที่เกี่ยวข้องทางกลศาสตร์ เพราะระเบียบการนี้มีความหลากหลาย อีกทั้งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีความยืดหยุ่นได้ ซึ่งทำให้ได้รับความสนใจในสถานศึกษาทางด้านวิศวกรรม และในอุตสาหกรรม [17] 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 [17]

2.4.1 โหนด (Node)

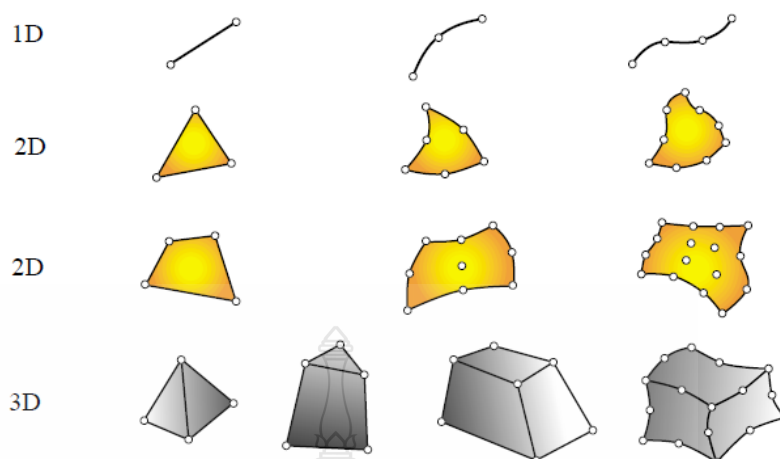
ภาพที่ 2.13 โหนดเป็นตัวช่วยเชื่อมต่อโครงสร้างชิ้นเล็กๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) แต่ละเอลิเมนต์ให้ติดกันด้วยจุดของโหนด นอกจากนี้โหนดยังช่วยในการกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ที่มีองศาอิสระ โดยปกติแล้วโหนดจะอยู่ที่มุมของเอลิเมนต์ หรือ จุดของเอลิเมนต์ แล้วกลุ่มของเอลิเมนต์ และ โหนดจะอยู่ติดกันเป็นกลุ่มที่เรียกว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) จะเป็นตัวแทนของชิ้นงานเพื่อนำไปจำลองเป็นสมการเมทริกซ์ (Matrix) เพื่อนำไปคำนวณที่ซับซ้อนต่อไป [18]



ภาพที่ 2.13 โหนดในเอลิเมนต์แต่ละมิติ [19]

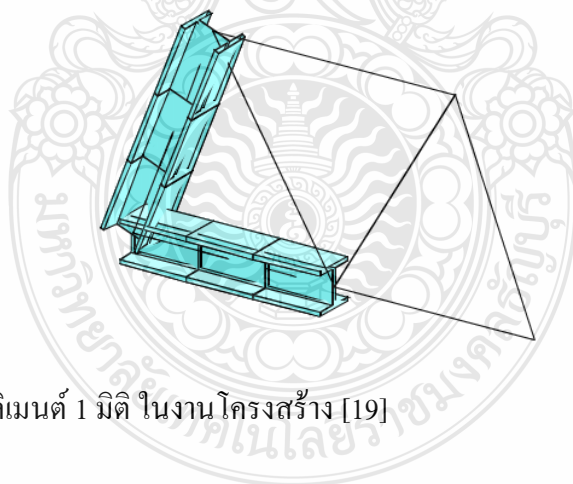
2.4.2 เอลิเมนต์ (Element)

โดยทั่วไปแล้วเอลิเมนต์จะมีมิติอยู่ 1 ถึง 3 มิติ ดังภาพที่ 2.14 นอกจากนี้ยังมีเอลิเมนต์ชนิดพิเศษที่มีลักษณะ 0 มิติ ดังเช่น กลุ่มของจุด (Lumped Springs) เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าเอลิเมนต์ที่มีลักษณะ 1 มิติ จะเป็นเส้นตรง เส้นโค้ง (Beam Element) มักใช้ในการวิเคราะห์งานลักษณะที่เป็นโครง เอลิเมนต์ 2 มิติ (Shell Element) จะเป็นรูปร่างรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมที่มีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์งานที่เป็นพื้นผิว (Surface) ผนังบาง สอดท้ายแบบ 3 มิติ (Solid Element) โดยปกติส่วนมากรูปทรงเป็นแบบ Tetrahedral, Pentahedral, Hexahedral (Bricks) หรือ เป็นแบบปริซึม (Prisms) สามารถใช้กับงานที่เป็นปริมาตรตัน (Solid) ซึ่งเอลิเมนต์แต่ละมิติจะมีจุดที่สามารถสังเกตได้ง่าย จุดเหล่านี้เรียกว่า จุดโหนด (Nodal Points) หรือ โหนด (Node) ประโยชน์แบบทวิคูณของโหนดคือเป็นตัวกำหนดรูปร่างทางเรขาคณิตของเอลิเมนต์กับเอลิเมนต์ที่รูปร่างมีองศาเป็นแบบอิสระ โดยปกติโหนดจะตั้งอยู่ที่มุม หรือ จุดปลายของเอลิเมนต์ดังแสดงในรูป มากกว่านั้นในทางกลศาสตร์เอลิเมนต์เหล่านี้จะมีความเฉพาะเจาะจงกับพฤติกรรมของวัสดุสำหรับตัวอย่างเช่น เชิงเส้นยืดหยุ่น (Linear Elastic) ในวัสดุที่เป็นท่อน (Bar Element) [20]



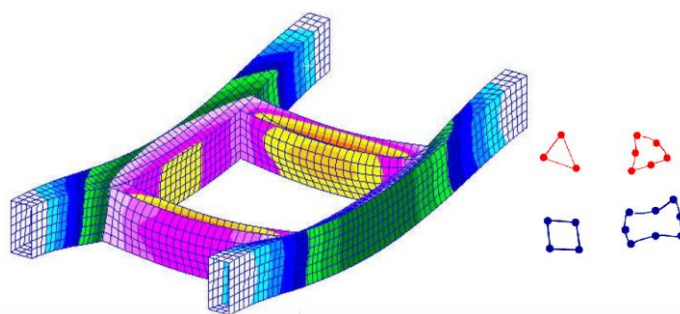
ภาพที่ 2.14 ชนิดของเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1 ถึง 3 มิติ [20]

1. เอลิเมนต์ 1 มิติ ดังภาพที่ 2.15 มีลักษณะเป็นเส้น (Beam Element) เท่านั้นซึ่งมีแต่ความยาว และไม่สามารถมองเห็นพื้นที่หน้าตัด หรือพื้นผิวได้อย่างชัดเจน และนอกจากเป็นเส้นแล้ว จะไม่มีรูปทรงเรขาคณิตอื่นใดอีก เป็นแค่เพียงเส้นอาทิ เส้นตรง เส้นโค้งเท่านั้น ซึ่งมักนิยมเรียกว่า บีม (Beam) โดยเอลิเมนต์ต่อกันหลายเอลิเมนต์จะกลายเป็นกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) [21]



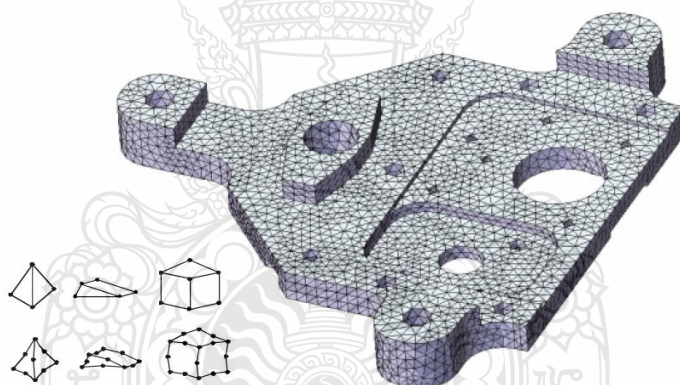
ภาพที่ 2.15 การใช้เอลิเมนต์ 1 มิติ ในงาน โครงสร้าง [19]

2. เอลิเมนต์ 2 มิติ (Shell Element) ดังภาพที่ 2.16 ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่เหลี่ยม โดยมีโหนด 3 และ 4 โหนดตามลำดับ แต่โดยพื้นฐานแล้วจะมีขั้นต่ำ 3 โหนด เอลิเมนต์ชนิดนี้จะใช้กับงานที่เป็นพื้นผิว หรือ ผนัง ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น ผนังบาง (Thin Shell) และผนังหนา (Thick Shell) [19]



ภาพที่ 2.16 การใช้เอลิเมนต์ 2 มิติ ในงานที่มีลักษณะเป็นผนัง [19]

3. เอลิเมนต์ 3 มิติ (Solid Element) ดังภาพที่ 2.17 จะมีโครงสร้างเป็น 3 มิติ รูปทรง จะมีความกว้าง ขาว สูง โดยพื้นฐานของเอลิเมนต์ชนิดนี้จะมีโหนดตั้งแต่ 3 โหนดขึ้นไปเอลิเมนต์แบบนี้จะเหมาะกับกาจำลองโครงสร้างที่มีความหนา (Thick) เมื่อเทียบกับพื้นผิว [21]

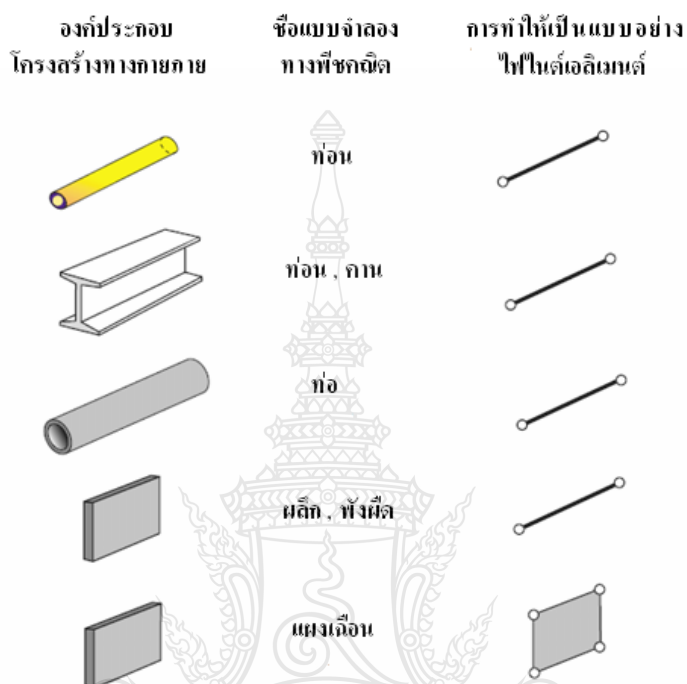


ภาพที่ 2.17 การใช้งานเอลิเมนต์ 3 มิติ ในงานที่เป็นปริมาตรตันที่มีความหนา [22]

การจัดหมวดหมู่แบ่งประเภทของระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ในทางกลศาสตร์ โครงสร้าง ความเหนียวแน่น ความหลวมของเอลิเมนต์บนพื้นฐานจะเกี่ยวข้องกับ โครงสร้างทางกายภาพดั้งเดิม ที่ชี้แจงหัวข้อนี้เพราะเป็นส่วนย่อยของระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งทำให้มีความเข้าใจในเทคนิคการออกแบบจำลองขั้นสูง ดังเช่น รายละเอียดลำดับขั้น และการวิเคราะห์โดยรวมกับเฉพาะแห่ง [20] ดังภาพที่ 2.18

ภาพที่ 2.18 แสดงโครงสร้างดั้งเดิมของเอลิเมนต์ (Primitive Structural Element) โดยเอลิเมนต์เหล่านี้จะจำแนกตามโครงสร้างกลศาสตร์ โครงสร้างซึ่งเกี่ยวเนื่องกับลักษณะทางกายภาพ

ของโครงสร้าง เอลิเมนต์ทั้งหลายเหล่านี้ปกติมาจากกลศาสตร์ของวัสดุ (Mechanics of Materials) ซึ่งทำให้ง่ายต่อการเข้าใจ ทฤษฎีทางกายภาพของวัสดุมากกว่าทางคณิตศาสตร์ ดังตัวอย่างภาพที่ 2.18 เอลิเมนต์มีลักษณะเป็น แท่ง (Bars), ก้าน (Cables) และเส้น (Beams) [19]



ภาพที่ 2.18 ตัวอย่างโครงสร้างเอลิเมนต์ดั้งเดิม [20]

สำหรับการแบ่งเอลิเมนต์ในกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ที่เกี่ยวข้องกันด้วยจุดต่อ (Node) โดยการแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์สามารถใช้หลักการดังนี้ คือ ควรหลีกเลี่ยงการแบ่งเอลิเมนต์ที่มีรูปร่างผิดปกติ เช่น เอลิเมนต์ที่มีมุมป้านมากๆ หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีด้านยาวมากๆ เอลิเมนต์ที่มุมแคบมากๆ และมีลักษณะอัตราส่วนกว้าง (Large Aspect Ratio) เป็นต้น ควรเลือกใช้เอลิเมนต์ที่เป็นสี่เหลี่ยมด้านเท่าจะดีมาก หรืออัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความยาวมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง อีกทั้งควรใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กๆ เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ละเอียดในส่วนที่มีความหนาแน่น และแบ่งเอลิเมนต์ขนาดใหญ่ขึ้นในบริเวณที่ไกลออกไป [19]

2.4.3 ความอิสระของการเคลื่อนที่ (Degree of Freedom ; DOF)

ความอิสระของการเคลื่อนที่จะเป็นตัวกำหนดสถานะของเอลิเมนต์ ซึ่งจะทำหน้าที่เรื่องจัดการ การเชื่อมต่อของเอลิเมนต์ ในการเชื่อมต่อของตัวแปรในจุดโหนดการกำหนดค่าอนุพันธ์ ตัวแปรของอิสระการเคลื่อนที่จะมีหลายค่า สำหรับความอิสระของการเคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของลักษณะชนิดของการวิเคราะห์ โดยที่ความอิสระของการเคลื่อนที่จะเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ซึ่งความอิสระของการเคลื่อนที่แต่ละชนิดสรุปได้ดังนี้ [21 , 22] ดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะการวิเคราะห์ความอิสระของการเคลื่อนที่ของแต่ละชนิด [23 , 24]

ขอบข่าย (Discipline)	อิสระการเคลื่อนที่ (DOF)
โครงสร้าง (Structural)	การเคลื่อนที่ (Displacement)
ความร้อน (Thermal)	อุณหภูมิ (Temperature)
ไฟฟ้า (Electrical)	โวลต์ (Voltage)
ของไหล (Fluid)	ความดัน (Pressure)
แม่เหล็ก (Magnetic)	สภาพแม่เหล็ก (Magnetic Potential)

2.4.4 การวิเคราะห์แบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น (Linear and Nonlinear Analysis)

ไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีความสามารถในการวิเคราะห์สมการทั้งแบบเชิงเส้น (Linear) และไม่เชิงเส้น (Nonlinear) สำหรับสมการแบบไม่เชิงเส้นจะเหมาะสมสำหรับชิ้นงาน หรือวัสดุที่มีการเสียรูปร่าง (Deformation) ไปแล้ว ดังนั้นจึงมีความยุ่งยากมากกว่า ใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่มากกว่า ความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น ก็คือ การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น สมการแบบไม่เชิงเส้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าของเวลา เมื่อเกิดการเสียรูปร่าง เปลี่ยนแปลงรูปร่าง อีกทั้งสมบัติทางกายภาพจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปทำให้ค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ส่วนแบบเชิงเส้น เมื่อวัสดุเกิดการเสียรูปร่าง สมบัติทางกายภาพจะไม่เปลี่ยนแปลงไปแต่จะคงที่เสมอซึ่งทำให้ค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) ไม่เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย [25 , 26]

ดังนั้นก่อนที่จะวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จึงต้องพิจารณาเสียก่อนว่า ชิ้นงานจะวิเคราะห์แบบเชิงเส้น หรือแบบไม่เชิงเส้น ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมเนื่องจากการวิเคราะห์แบบสถิต (Static) และพลศาสตร์ (Dynamic) จะสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งแบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น [27]

ในการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ถ้าแบ่งตามพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะแบ่งได้ออกเป็น 3 รูปแบบดังนี้

1. เรขาคณิตแบบไม่เชิงเส้น (Geometric Nonlinear) คือ มีสาเหตุของการเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปทรงทางเรขาคณิต (Geometry) ประเภทการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมาก (Large Deflection) หรือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการหมุนขนาดใหญ่ (Large Rotation) มักจะเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีความเหนียวสูง และมี Deflection มากเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ หรือมีความสามารถในการบิดตัวได้มาก คือ วัสดุมีการเสียรูป หรือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมาก (Large Deformation) จนทำให้ค่าความแข็งแรง (Stiffness) ของวัสดุ ขึ้นงานสูงขึ้นมากกว่าเดิมตามเวลาที่ผ่านไป ซึ่งสมการทั่วไปแบบเรขาคณิตแบบไม่เชิงเส้น (Geometric Nonlinear) มีดังนี้ [24,28,29]

$$[K] = \int [B]^T [D] [B] dv \quad (2.35)$$

เมื่อ K = เมทริกซ์ความแข็งแรง (Stiffness Matrix)

B = ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกรณี (Large Strain)

D = ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (DOF)

2. วัสดุแบบไม่เชิงเส้น (Materials Nonlinear) โดยปกติแล้วการวิเคราะห์วัสดุแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) จะอยู่ภายใต้สมมติฐานที่จะเกิดการคืนรูปอย่างสมบูรณ์เมื่อนำแรงหรือภาระกระทำออกไปแล้ว ค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ซึ่งเรียกว่า อีลาสติกมอดูลัส (Elastic Modulus) จะมีค่าคงที่เสมอ แต่สำหรับวัสดุบางประเภทการคืนรูปเมื่อนำแรง หรือ ภาระกระทำออกไป จะเกิดความไม่สมบูรณ์จนเกิดช่วง Plastic Strain มักเกิดจากแรงที่มากระทำกับวัสดุมีขนาดมากเกินกว่าค่าจุดคราก (Yield) จนทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ซึ่งจะต้องใช้การวิเคราะห์แบบวัสดุไม่เชิงเส้น (Materials Nonlinear) ซึ่งในการวิเคราะห์จะใช้รูปแบบสมการโดยทั่วไปเหมือนกับสมการที่ 2.35 แต่แตกต่างกันที่ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (D) จะเป็นกรณี (Small Strain) อย่างเดียวเท่านั้น และความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (B) ไม่เป็นกรณี (Small Strain) [15,18,20]

$$[K] = \int [B]^T [D] [B] dv \quad (2.36)$$

เมื่อ K = เมทริกซ์ความแข็งเกร็ง (Stiffness Matrix)

B = ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

D = ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (DOF) กรณี (Small Strain)

3. การเปลี่ยนสถานะแบบไม่เชิงเส้น (Changing Status Nonlinear) มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงสถานะจนทำให้สมบัติของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ดังตัวอย่าง การดึงสลักกับการหย่อนสายเคเบิลนานๆ หรือ ยางที่ต้องสัมผัสกับความร้อน ความเย็นสลักกันจนทำให้สมบัติของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปคือ ความสามารถในการรับแรงของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา หรือ ความสมบัติด้านอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) เท่านั้น [5,30,31]

2.4.5 ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

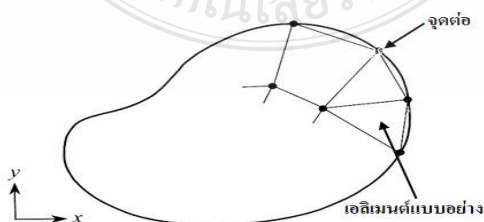
ในการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Software) ในการวิเคราะห์โดยปกติทั่วไปจะประกอบด้วย 3 หลักการดังนี้ [18,32]

1. การเตรียมกระบวนการ (Pre Processing)
2. การวิเคราะห์ (Analysis)
3. การนำเสนอกระบวนการ (Post Processing)

2.4.6 ขั้นตอนหลักของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลัก อธิบายได้ดังนี้ [15]

1. ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่าง ๆ กัน เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง (Elasticity Problem) ปัญหาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความร้อน (Thermal Problem) รวมทั้งปัญหาของการไหล (Fluid Problem) เป็นต้น ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ กัน [15]

2. ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Functions) เช่นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม เอลิเมนต์นี้ประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 แสดงดังภาพที่ 2.20 โดยที่จุดต่อเป็นตำแหน่งที่ตั้งของตัวไม่รู้ค่า (Nodal Unknowns) ซึ่งคือ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ตามลำดับ ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่ออาจเป็นค่าของการเสียรูป (Displacement) หากเราวิเคราะห์ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง หรืออาจเป็นค่าของอุณหภูมิหากเราทำปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นความเร็วของของไหล หากเราวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการไหล เป็นต้น ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นั้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน และตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ คือ

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (2.37)$$

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



ภาพที่ 2.20 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ [15]

สมการ (2.37) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ คือ

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= [N_1 N_2 N_3] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \\ &= [N]_{(1 \times 3)} \{\phi\}_{(3 \times 1)} \end{aligned} \quad (2.38)$$

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

3. ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element Equations) ดังตัวอย่างเช่น สมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่าง ดังภาพที่ 2.20 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e \quad (2.39)$$

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (2.40)$$

ขั้นตอนที่ 3 นี้ ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของการศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการ (2.39) สามารถทำได้โดย วิธีการโดยตรง (Direct Approach) วิธีการแปรผัน (Variation Approach) วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals)

4. ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบรวมกันเข้า ก่อให้เกิดระบบสมการรวม (System of Simultaneous Equations) ในรูปแบบดังนี้

$$\sum (Element Equations) \Rightarrow [K]_{sys} \{\phi\}_{sys} = \{F\}_{sys} \quad (2.41)$$

5. ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ลงในระบบสมการรวม (2.41) แล้วจึงแก้ระบบสมการรวมนี้เพื่อหา $\{\phi\}_{sys}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ (Nodal Unknowns) ซึ่งอาจเป็นค่าของการเคลื่อนตัวตามจุดต่อต่าง ๆ ของโครงสร้าง หรือเป็นค่าของอุณหภูมิที่จุดต่อ หากเป็นปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นค่าของความเร็วของของไหลตามจุดต่อหากเป็นปัญหาเกี่ยวกับการไหล เป็นต้น

6. ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่าง ๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถนำมาใช้เพื่อหาค่าอื่น ๆ ที่ต้องการต่อไปได้อีก เช่น เมื่อรู้ค่าการเสียดรูป (Displacement) ตามจุดต่อต่าง ๆ ของโครงสร้างก็สามารถนำไปใช้หาค่าความเครียด (Strain) และความเค้น (Stress) ได้ตามลำดับ หรือเมื่อรู้

ค่าอุณหภูมิที่จุดต่อก็สามารถคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ หรือเมื่อรู้ค่าความเร็วของของไหลที่จุดต่อก็สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลได้ เป็นต้น

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้ จะเห็นได้ว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีที่มีระเบียบแบบแผนอย่างเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีหัวใจสำคัญอยู่ที่การสร้างสมการของเอลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 3

2.5 ทฤษฎีเหล็กกล้าไร้สนิม [33]

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) เหล็กชนิดนี้จะถูกนำมาใช้ในงานต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมเครื่องครัวเรือน อุตสาหกรรมสิ่งทอ เหล็กชนิดนี้จะทนต่อการเกิดสนิม ทนต่อสารเคมี อากาศชื้น น้ำ โดยทั่วไปจะต้องมีปริมาณโครเมียมเจือไม่น้อยกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนัก

การแบ่งเหล็กกล้าไร้สนิมตามโครงสร้างจุลภาคจะแบ่งเป็นดังนี้

1. เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic Grade)
2. เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic Grade)
3. เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex Grade)
4. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (Martensitic Grade)
5. เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก (Precipitation-hardening grade)

เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก ที่ใช้กันมากจะผสมโครเมียม (Cr) ประมาณ 12% หรือ 17% (ช่วงของส่วนผสมของ Cr +/-1%) มีนิเกิลน้อยมาก (ติงกับวัตดูคิบ) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์และมีคุณสมบัติที่แม่เหล็กสามารถดูดติดได้ มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength) และค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ปานกลาง มีค่าความยืด (Elongation) สูง เช่น เกรด 430, 409 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติกมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มออสเทนนิติก แต่อาจพบปัญหาเรื่องเกรนหยาบ (Grain Coarsening) และสูญเสียความแกร่ง (Toughness) หลังการเชื่อม การใช้งาน เช่น ชิ้นส่วนเครื่องซักผ้า ชิ้นส่วนระบบท่อไอเสีย และในบางเกรดจะผสมโครเมียมสูงเพื่อใช้กับงานที่ต้องทนอุณหภูมิสูง

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่ใช้กันมากจะผสมโครเมียมประมาณ 17% (ช่วงของส่วนผสมของ Cr +/-1%) และนิเกิล (Ni) ประมาณ 9% (ช่วงของส่วนผสมของ Ni +/-1%) การผสมนิเกิลทำให้เหล็กกลุ่มนี้ต่างจากกลุ่มเฟอร์ริติก โดยนิเกิลจะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน และทำให้โครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนต์ เหล็กกลุ่มนี้บางเกรดจะผสมโครเมียมและนิเกิลเพิ่มเพื่อให้สามารถทนต่อการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง ซึ่งทำให้สามารถใช้เป็นส่วนประกอบของเตา

หลอม เหล็กกลุ่มออสเทนนิติกนี้จะทนทานต่อการกัดกร่อนดีกว่าเหล็กกลุ่มเฟอร์ริติก ในด้านคุณสมบัติเชิงกล เหล็กกลุ่มออสเทนนิติกจะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength) ใกล้เคียงกับของกลุ่มเฟอร์ริติก แต่จะมีค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) และค่าความยืด (Elongation) สูงกว่าจึงสามารถขึ้นรูปได้ดีมาก เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีคุณสมบัติที่แม่เหล็กไม่ดูดติด (ในสภาพผ่านการอบอ่อน) เช่น เกรด 304, 316L, 321, 301 การใช้งาน เช่น หม้อ ช้อน ถาด

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก จะผสมโครเมียมประมาณ 11.5-18% เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีคาร์บอนพอสมเหมาะและสามารถชุบแข็งได้เหล็กกล้ากลุ่มนี้มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength) และความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) สูงมาก แต่จะมีค่าความยืด (Elongation) ต่ำ เช่น เกรด 420 การใช้งาน เช่น ใช้ทำเครื่องมือตัดชิ้นส่วน มีด

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ จะมีโครงสร้างผสมระหว่างออสเทนไนต์และเฟอร์ไรต์ มีโครเมียมผสมประมาณ 21-28% และนิกเกิลประมาณ 3-7.5% เหล็กกล้ากลุ่มนี้จะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากสูงและค่าความยืดสูง จึงเรียกได้ว่ามีทั้งความแข็งแรงและความเหนียว (Ductility) สูง เช่น เกรด 2304, 2205, 2507

เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก มีโครเมียมผสมประมาณ 15-18% และนิกเกิลอยู่ประมาณ 3-8% เหล็กกล้ากลุ่มนี้สามารถทำการชุบแข็งได้ จึงเหมาะสำหรับทำแกน ปืน หัววาล์ว ตัวอย่างเกรดของเหล็กกลุ่มนี้ เช่น PH13-9Mo, AM-350

2.5.1 ผลของธาตุผสมธาตุในเหล็กกล้าไร้สนิม ดังนี้

1. คาร์บอน (Carbon) เป็นธาตุที่มีอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมโดยทั่วไปจะไม่เกิน 0.15% (ยกเว้นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก) เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีคาร์บอนต่ำจะเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรน เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็น ตลอดจนเพิ่มความสามารถในการเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมคาร์บอนอยู่ 2 ช่วง คือ 0.02% ($\leq 0.03\%$) และ 0.07% (0.04-0.15%) นอกจากนี้ การผสมไทเทเนียมหรือไนโอเบียมไปในเหล็กกล้าไร้สนิมจะช่วยให้จับตัวกับคาร์บอนและให้ผลดีต่อคุณสมบัติทั้งสามข้อที่กล่าวมาเหมือนเหล็กกล้าไร้สนิมคาร์บอน 0.02% เหล็กกล้าไร้สนิมที่ในเกรดมีอักษร “L” กำกับจะควบคุมคาร์บอนไม่ให้เกิน 0.03% ทำให้สามารถเชื่อมได้ดี มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) และความสามารถในการขึ้นรูปเย็นสูงกว่าเกรดที่มีคาร์บอนสูงกว่า

2. โครเมียม (Chromium) ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาพบรรยากาศทั่วไป โดยผสมอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างน้อย 10.5% แต่เพื่อให้มั่นใจว่าเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมมีการกระจายของโครเมียมอย่างน้อย 10.5% อย่างสม่ำเสมอ จึงมักผสมโครเมียมมากกว่าเล็กน้อย

เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมโครเมียมอยู่ 2 ช่วง คือ 12% (10.5-14.0%) และ 17% (16.0-24.0%) ถ้าผสมโครเมียมเกินกว่า 30% จะทำให้เหล็กเปราะ

3. นิกเกิล (Nickel) ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบมูมอับในสารละลายกรด เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็น ตลอดจนเพิ่มความสามารถในการเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมนิกเกิลอยู่ 2 ช่วง คือ 0% (ปริมาณเล็กน้อยติดมากับเหล็ก) และ 9% (6.0-15.0%)

4. โมลิบดีนัม (Molybdenum) ช่วยเสริมผลความต้านทานต่อการกัดกร่อนของโครเมียม โดยเฉพาะการกัดกร่อนแบบมูมอับ และช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในสภาพคลอไรด์ด้วย เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมโมลิบดีนัมอยู่ 2 ช่วง คือ 0% (ปริมาณเล็กน้อยติดมากับเหล็ก) และ 2% (1.0-3.0%)

5. ไทเทเนียม (Ti) หรือไนโอเบียม (Nb) ช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบขอบเกรน (Intergranular Corrosion) โดยสารทั้งสองตัวจะช่วยป้องกันการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ นอกจากนี้ไทเทเนียมหรือไนโอเบียมยังเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็นและความสามารถในการเชื่อมด้วย

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 304 ของแผ่นทดสอบ

Heat Analysis (%)							
C	Si	Mn	Ni	Cr	S	P	N
0.08%	0.75%	2.00%	10.5%	20.00%	0.03%	0.045%	0.10%

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม

กลุ่ม	เกรด	ต้านการกัดกร่อน	ขึ้นรูป	เชื่อม	ตัวอย่างการใช้งาน
เฟอร์ริติก	430	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	งานทางสถาปัตยกรรมภายใน งานตกแต่ง เครื่องใช้ภายในบ้าน เครื่องซักผ้า(Washing Machines) เครื่องครัว ช้อน
เฟอร์ริติก	430Ti	กลาง	ดี	ดีมาก	เครื่องใช้ภายในบ้าน อ่างล้างจาน ท่อ
เฟอร์ริติก	409	ปานกลาง	ดี	ดี	ระบบท่อไอเสียรถยนต์
เฟอร์ริติก	444	ดี	ดี	ดีมาก	แท็งก์น้ำร้อน (Hot Water tanks) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger)

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม (ต่อ)

กลุ่ม	เกรด	ด้านการกัดกร่อน	ขึ้นรูป	เชื่อม	ตัวอย่างการใช้งาน
ออสเทนนิติก	304	ดี	ดีมาก	ดี	เครื่องใช้ในบ้าน ภาชนะเครื่องครัว เครื่องหุงต้มความดัน แท็งก์น้ำ (Water Tanks) อ่าง (Kitchen Sinks) ซ้อม ส้อม อุตสาหกรรมอาหาร และงานขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) งานตกแต่ง
ออสเทนนิติก	304L	ดี	ดีมาก	ดีมาก	อุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรมเคมีและอุตสาหกรรมอาหารที่ต้องการใช้งานเหล็กที่หนาโดยไม่ต้องทำ Sensitization ทำหม้อไอน้ำ เครื่องถ่ายความร้อน แท็งก์ อุตสาหกรรมนิวเคลียร์
ออสเทนนิติก	316Ti	ดีมาก	ดี	ดีมาก	ใช้กับงานที่ต้องการความทนทานต่อการกัดกร่อนแบบขอบเกรน (Intergranular Corrosion) และต้องการความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง
ออสเทนนิติก	317	ดีมาก	ดี	ดี	ใช้ทำอุปกรณ์ตามโรงงานทางเคมีที่ต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่า 316 โดยเฉพาะที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเลและ Halogen salts
ออสเทนนิติก	321	ดี	ดีมาก	ดีมาก	ทำท่อ แท็งก์ ชิ้นส่วนเครื่องบินไอพ่น งานเชื่อมในอุตสาหกรรมเคมี เหมาะกับงานที่ใช้ที่อุณหภูมิสูงถึง 800 °C
ออสเทนนิติก	347	ดี	ดีมาก	ดีมาก	ท่อ
มาร์เทนซิติก	420	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	เครื่องมือตัดชิ้นส่วน มีด ซ้อนส้อม ปุ่มและ Valve Shafts.
มาร์เทนซิติกและตะกอน	PH 17-4				งานด้านอากาศยานและนิวเคลียร์ แม่พิมพ์สำหรับพลาสติก Valves และ Fittings

2.6 วัสดุทำแม่พิมพ์สำหรับงานลวกขึ้นรูป [34]

วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์มีอยู่ด้วยกันมากมายหลายชนิด ทั้งที่เป็นเหล็ก และโลหะนอกกลุ่มเหล็ก วัสดุเหล่านี้มีอาทิ เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสม เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กหล่อ และอะลูมิเนียม เป็นต้น การเลือกใช้วัสดุให้ถูกต้องกับการสร้างแม่พิมพ์แต่ละประเภท ถือว่าเป็นสิ่งที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง ทำให้สามารถสร้างแม่พิมพ์ได้อย่างเหมาะสมตามคุณสมบัติของการใช้งาน สามารถสร้างแม่พิมพ์ได้ง่าย แม่พิมพ์มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน สำหรับแม่พิมพ์ปั๊มโลหะ และแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกจะประกอบด้วยชิ้นส่วนต่าง ๆ มากมาย ทั้งที่เป็นตัวแม่พิมพ์ในส่วนที่ต้องสัมผัสกับชิ้นงาน และส่วนประกอบต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ ซึ่งชิ้นส่วนแต่ละตัวอาจมีคุณสมบัติที่เหมือนกัน หรือ แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชิ้นส่วนนั้น ๆ จะต้องถูกใช้งานในลักษณะใด เช่น ต้องทนการเสียดสีสูง ต้องทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ต้องสัมผัสกับความร้อน หรือต้องรับแรงกระแทก เป็นต้น

เหล็กหล่อ (Cast Iron) แม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปโลหะขนาดใหญ่ เช่น แม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูป ประตู และตัวถังรถยนต์ จำเป็นต้องใช้เหล็กหล่อเป็นฐานรองแม่พิมพ์ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการสร้างแม่พิมพ์ เนื่องจาก ถ้าแม่พิมพ์ขนาดใหญ่นี้ ทำจากเหล็กแม่พิมพ์ทั้งหมด แม่พิมพ์จะมีราคาแพงมาก และไม่มี ความจำเป็น การใช้งาน จะทำการหล่อเหล็กให้มีขนาดตามที่ต้องการ จากนั้น จะมีการอบด้วยความร้อน เพื่อให้เหล็กคลายความเค้นจากการเย็นตัวในแบบ จากเหล็กหลอมเหลวไปเป็นของแข็ง นอกจากนี้ การอบคลายความเค้น จะทำให้เหล็กมีรูปร่างที่แน่นอนไม่บิดงอในขณะที่ใช้งาน เหล็กหล่อสีเทาที่ใช้ทำฐานแม่พิมพ์ตามมาตรฐานของ JIS จะอยู่ในชั้นคุณภาพ FC 25 และ FC 30 สำหรับชั้นคุณภาพ FC 25 มีความเค้นแรงดึงต่ำสุด 25 kg/mm² และชั้นคุณภาพ FC 30 มีความเค้นแรงดึงต่ำสุด 30 kg/mm²

เหล็กกล้าทั่วไป (Mild Steels) เหล็กกล้า ทั่วไปจะจัดอยู่ในกลุ่มของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steels) โดยมีคาร์บอนสูงสุดไม่เกิน 0.25% โดยน้ำหนัก เป็นเหล็กที่มีราคาถูก ขึ้นรูปได้ง่าย เนื่องจากมีความแข็งต่ำ นอกจากนี้ ยังสามารถทำการเชื่อมได้ดี จึงใช้ทำโครงสร้างทั่วไปของแม่พิมพ์ ในส่วนที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมากนัก เกรดที่นิยมใช้งานจะเป็นเกรด JIS SS 40 และ JIS SS 41

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steels) เหล็กกลุ่มนี้ที่มักใช้ ในงานแม่พิมพ์ จะเป็นเกรด S 45 C หรือ S 50 C โดยทั่วไป จะนิยมใช้ทำ โครงแม่พิมพ์ เช่น แผ่นประกบหน้า-หลัง ขารอง (Spacer Block) แผ่นรองรับ (Backing Plate หรือ Retaining Plate) นอกจากนี้ เหล็กในกลุ่มนี้ยังสามารถใช้ทำตัวแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ที่ใช้ฉีดชิ้นงานจำนวนไม่มากนัก โดยสามารถขึ้นรูปเป็น

แม่พิมพ์ แล้วนำไปชุบเคลือบผิวแข็งฮาร์ดโครมก่อนนำไปใช้งาน นอกจากนี้ ยังสามารถใช้เป็นแผ่นโครงสำหรับใช้เป็นฐานฝัง (Insert) ตัวแม่พิมพ์ได้

เหล็กกล้าคาร์บอนเครื่องมือ (Carbon Tool Steels) เหล็กใน กลุ่มนี้ จะมีคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.60-1.40 % เป็นเหล็กชุบแข็งด้วยน้ำ ภายหลังการชุบแข็งที่ผิวชิ้นงานจะมีความแข็งสูงระหว่าง 65-68 HRC แต่เนื่องจากเหล็กเกรดนี้มีความสามารถในการชุบแข็งต่ำ จึงทำให้ภายในชิ้นงานจะมีความแข็งไม่สูงนัก ลักษณะเช่นนี้ ชิ้นงานจะมีผิวแข็ง แต่แกนในยังคงมีความเหนียวอยู่ ชิ้นงานจะทนการเสียดสีได้ดี และรับแรงกระแทกได้ดีด้วย แม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กกลุ่มนี้ จะทนการเสียดสีได้ดี แต่ไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ มักใช้ทำแม่พิมพ์ปั๊มโลหะ เช่น แม่พิมพ์ ตัด เจาะ โลหะบาง ๆ แม่พิมพ์ที่ใช้ในงานขึ้นรูปเย็นที่ใช้ผลิตชิ้นงานจำนวนมาก เป็นต้น และเนื่องจากเป็นเหล็กที่ชุบแข็งด้วยน้ำ ทำให้ชิ้นงานมีโอกาสที่จะเกิดการคดงอ และแตกร้าวภายหลังการชุบแข็งได้ ตามมาตรฐานของ JIS จะอยู่ในกลุ่มเหล็กเกรด SK 1 ถึง SK 7 แต่ที่นิยมใช้ และสามารถหาซื้อได้ง่ายภายในประเทศจะเป็นเกรด JIS SK 3 และ JIS SK 5

เหล็กกล้าผสมเครื่องมืองานเย็น (Alloy Tool Steel Cold Work) ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง และผสมโครเมียมสูง นิยมใช้งานกันมากที่สุดจะเป็นเกรด JIS SKD 11 เนื่องจากมีความเหนียวทนแรงกระแทกได้สูงกว่าเกรดอื่น ๆ ในกลุ่ม สามารถชุบแข็งได้ลึก ชิ้นงานจะมีคุณสมบัติทนการเสียดสีได้สูงมาก แต่คุณสมบัติด้านทนแรงกระแทกจะไม่สูงนัก ตัวอย่างชิ้นงาน เช่น เครื่องมือมีคมที่ใช้กับโลหะและเหล็ก แม่พิมพ์ปั๊มโลหะแผ่น แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เป็นต้น

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พรชัย คงวัฒนาชัย [35] ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลการทดลองจากวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง ลักษณะชิ้นงานเป็นแบบ Covert Fuel Filler วัสดุเป็น โลหะแผ่น SPCC หนา 0.8 mm. จากการศึกษาพบว่าผลการขึ้นรูปชิ้นงานจริงและผลการจำลองการวิเคราะห์ ไฟไนต์เอลิเมนต์ มีผลใกล้เคียงกันสามารถยอมรับได้และใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แทนการขึ้นชิ้นงานจริงเพื่อลดเวลาและต้นทุนอื่น ๆ

สามารถ แซ่มคำ [36] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในการจำลองวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงการขึ้นรูปชิ้นงานจริง ในการขึ้นรูปภาคอะลูมิเนียม AL 1100 หนา 1.00 mm. โดยใช้โปรแกรมอ็อปทริสจากผลงานการทดลองทั้งสองแนวทาง ได้ผลใกล้เคียงกันมากมีความเห็นให้การจำลองผลแทนการทดลองขึ้นรูปจริง จึงทำให้เกิดผลดีทางธุรกิจและลดต้นทุนการผลิต

คมสันต์ งามจำ [2] ได้ทำการวิจัย พบว่า แผนภาพขีดจำกัด การขึ้นรูปสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 สร้างได้ตาม ASTM 2218-02 และ ความหนาขึ้นทดสอบเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ขีดจำกัดการขึ้นรูปสูงขึ้นไม่เป็นไปตามสัดส่วนความหนา แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้วิเคราะห์ผลการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความหนาเดียวกัน แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ที่ได้จากการทดลอง สามารถนำวิเคราะห์การขึ้นรูปอย่างล้าชานะ ถ้วยทรงกรวย และการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง ให้ผลสอดคล้องกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สวัสดิ์ โสตามุข [37] ได้ศึกษาเรื่องการทำนายความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ผลการวิจัยพบว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปโดยวิธีการทดลองสร้างได้ตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02 เมื่อเทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแตกต่าง 12% ณ ความเครียดในระนาบ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานจริงได้ ทำนายผลการขึ้นรูปได้สอดคล้องกับความเสียหาย

Nalamachi, E. [4] ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์ เพื่อศึกษาและทำนายผลการขึ้นรูปโลหะกับวัสดุแผ่นความหนา 0.81 มม. ซึ่งวัสดุมีสมบัติทางกลแตกต่างกันในแต่ละทิศทางการรีด และทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับการขึ้นรูปจริง จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถจำลองและทำนายความเสียหายได้จริง

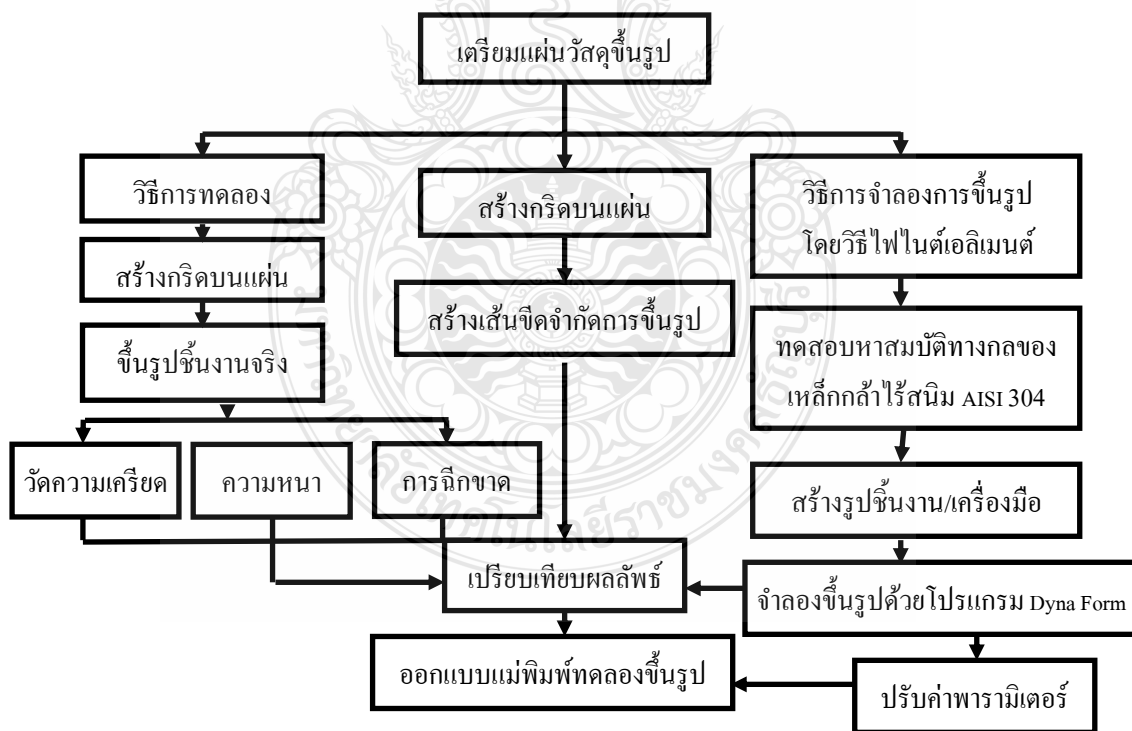
สรุป จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง มีแนวทางการทำวิจัยโดยการเปรียบเทียบผลการทดลองการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ศึกษาผลการขึ้นรูปมีความสอดคล้องให้ผลลัพธ์ในทิศทางเดียวกัน และการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป เพื่อทราบถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การขึ้นรูปโลหะแผ่น ศึกษาถึงผลกระทบขีดจำกัดการขึ้นรูป เพื่อนำไปใช้แก้ปัญหการขึ้นรูป ชิ้นส่วนฝาซีลของเครื่องซักผ้าและเปรียบเทียบผลการจำลองการขึ้นรูปวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

การดำเนินการทดลองแบ่งออกเป็นดังนี้ ส่วนแรกคือการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนที่สองคือการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 ขนาด 2 มิลลิเมตร ส่วนที่สามคือการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง โดยสร้างกริดบนแผ่นชิ้นงาน เพื่อวัดความเครียด ความหนาและบริเวณที่เกิดความเสียหาย นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างการทดลองจริงกับการจำลองขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังภาพที่ 3.1 ซึ่งเมื่อมีแนวโน้มใกล้เคียงกันจึงปรับค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนวิธีการทดลอง

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2.1 ทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หน้า 2 มิลลิเมตร โดยตัดชิ้นทดสอบดังตามแนวทิศทางการรีด (R_0 , R_{45} , R_{90}) ดังภาพที่ 3.2



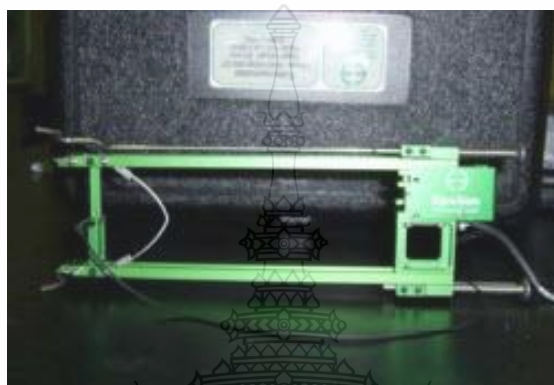
ภาพที่ 3.2 ขนาดชิ้นทดสอบการดึง

3.2.1.1 การทดสอบหาเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain-Hardening Exponent, n - Values) และสัมประสิทธิ์ความต้านแรง (Strength Coefficient, K) ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 โดยการทดสอบการดึง ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 เครื่องทดสอบการดึง

3.2.1.2 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนความเครียดพลาสติก R (Anisotropy) ทดสอบการดึงขึ้นงานตามแนวแกน วัดความกว้างและความหนาในช่วงความยืด (Gage Length) ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยอุปกรณ์ Extensometer ดังภาพที่ 3.4 และภาพที่ 3.5 และนำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกมาคำนวณ ดังภาพที่ 3.6 โดยนำเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด และค่าอัตราส่วนความเครียดพลาสติก ดังในตารางที่ 3.1 เพื่อเป็นข้อมูลในการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 3.4 เครื่องบันทึกการเปลี่ยนแปลงระยะความยืดตัว (Extensometer)



ภาพที่ 3.5 เครื่องบันทึกการเปลี่ยนแปลงระยะความยืดด้านกว้าง (Extensometer)

Gauge Length											
mm											
50.07											
Break_Stress	YS1_Force	YS1_Stress	YP_Force	YP_Stress	Max_Force	Max_Stress	Elongation	n value	r value	value	
	0.20%	0.20%	0.1 %/FS	0.1 %/FS				10- 20 %	20%	10-20%	
	N/mm2	N/mm2	kN	N/mm2	kN	N/mm2	%				
	545.677	16.8375	348.685	32.1219	665.206	32.5969	675.043	56.0415	0.36231	0.92168	1216.5
Time	Force	Stroke	Ext.1	Width Sensor							
sec	kN	mm	mm	mm							
0	0.5267187	0	0	0							
0.05	0.5270312	0	-0.0015625	0							
0.1	0.5279688	0.002	-0.003125	-4.69E-04							
0.15	0.5339062	0.004	-7.81E-04	-0.0003125							
0.2	0.5435938	0.006	-0.003125	-0.0003125							
0.25	0.556875	0.008	-3.91E-03	-1.56E-04							
0.3	0.5721875	0.01	-7.81E-04	1.56E-04							
0.35	0.5921875	0.012	0	-4.69E-04							
0.4	0.6146875	0.014	-2.34E-03	-1.56E-04							

ภาพที่ 3.6 ข้อมูลสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 จากการทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 3.1 สมบัติเชิงกลเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304

ความหนา	เลขชี้กำลังการทำให้ แข็งด้วยความเครียด(n)	สัมประสิทธิ์ ความต้านแรง(K)	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r)			
			R_0	R_{45}	R_{90}	\bar{R}
2 mm.	0.3528	1,154	0.9217	1.1616	0.9870	1.05796

3.2.2 การจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

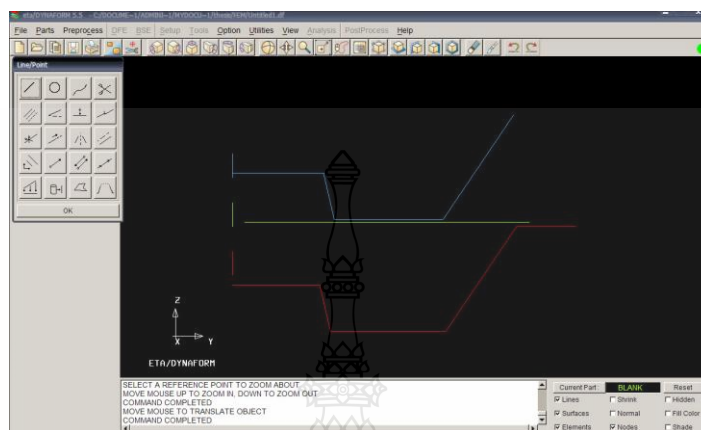
การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปของงานวิจัยนี้ ใช้โปรแกรม Dyna Form 5.5 จำลองการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตร แบ่งขั้นตอนหลักของการทำงานเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. ก่อนการประมวลผล (Pre – processing)
 2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis)
 3. แสดงผลลัพธ์จากการประมวลผล (Post - Processing)
1. ก่อนการประมวลผล (Pre – processing) มีขั้นตอนดังนี้



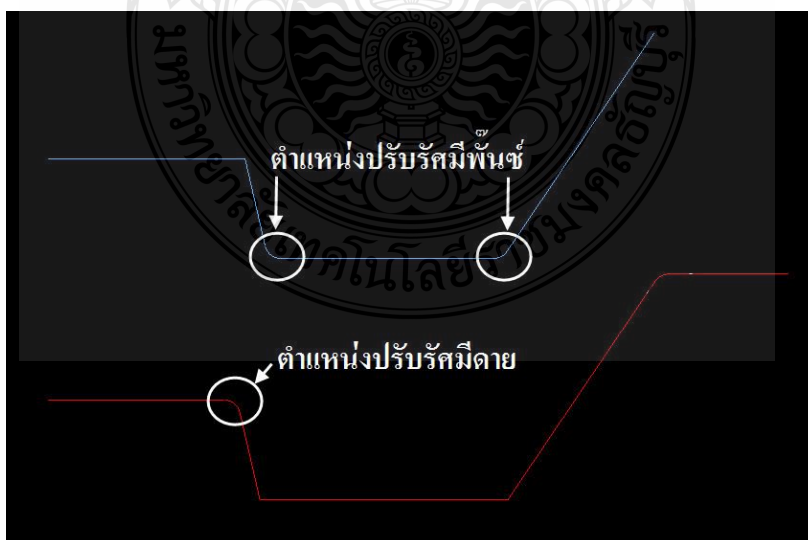
ภาพที่ 3.7 กำหนดชื่อของเครื่องมือ

- ขั้นตอนการกำหนดชื่อของเครื่องมือเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 3.7 จากเมนูบาร์ เลือกเมนู Part โดยเลือกฟังก์ชัน Create กำหนดชื่อ Die , Punch และ Blank จากนั้นกำหนดสีเพื่อแทนชนิดของเครื่องมือและชิ้นงาน



ภาพที่ 3.8 (ก) ขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนเครื่องมือและชิ้นงาน

- การสร้างเครื่องมือและชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.8 (ก) จากเมนูบาร์ เลือกเมนู Preprocess เลือกฟังก์ชัน Line/Point เลือกสร้างเส้นแบบ Point โดยกำหนดตำแหน่งแรกและตำแหน่งสุดท้ายของเส้น เมื่อป้อนครบทุกตำแหน่ง คลิกปุ่ม Apply Input Value คลิก OK เพื่อจบการสร้างเส้น ซึ่งสีฟ้ากำหนดให้เป็นพื้นซ์ สีเขียวกำหนดให้เป็นชิ้นงาน และสีแดงกำหนดให้เป็นคาย

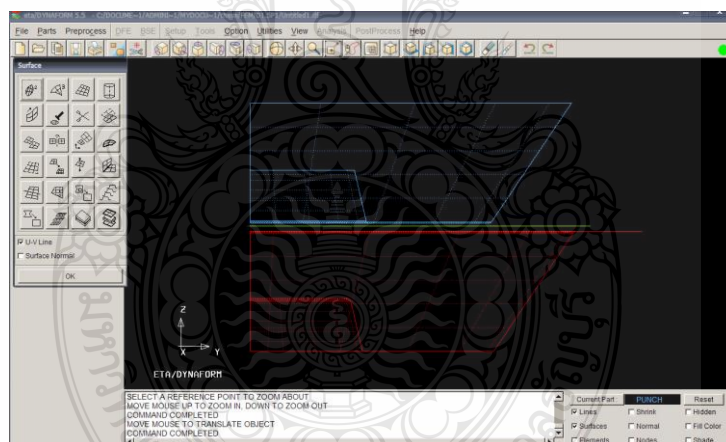


ภาพที่ 3.8 (ข) ตำแหน่งของการปรับรัศมีพื้นซ์และคาย

ภาพที่ 3.8 (ข) เป็นตำแหน่งการปรับรัศมีของพื้นซ์และตายในการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยปรับค่ารัศมีตามตารางที่ 3.2 เพื่อวิเคราะห์ผลการจำลองการขึ้นรูป

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ในการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

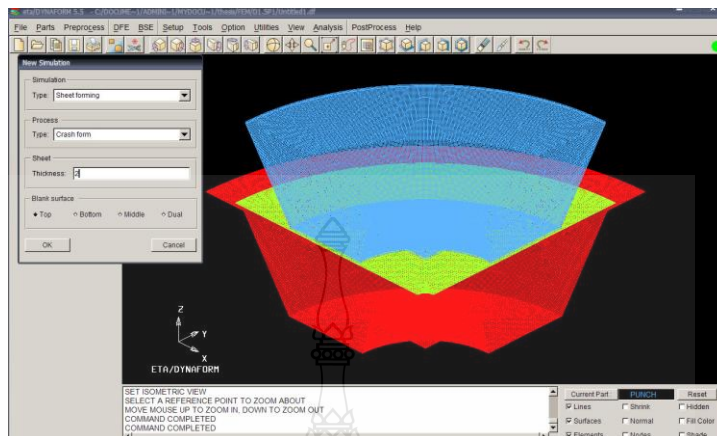
Punch(mm.)	Die(mm.)	ไม่พบการฉีกขาด	เกิดรอยคอด	เกิดการฉีกขาด
1.5	2	-	-	-
	2.5	-	-	-
	3	-	-	-
2	2	-	-	-
	2.5	-	-	-
	3	-	-	-



ภาพที่ 3.9 การสร้างผิวสำหรับเครื่องมือและชิ้นงาน

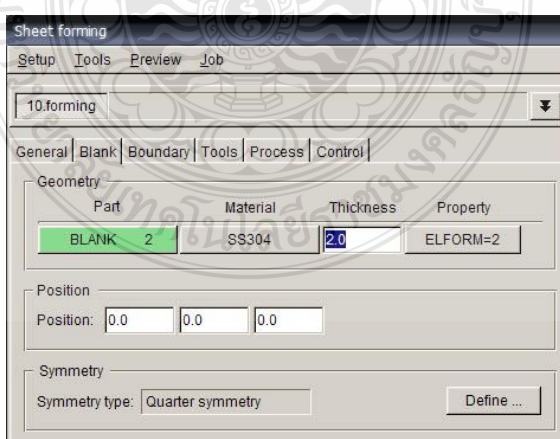
- การสร้างผิวสำหรับเครื่องมือและชิ้นงาน เนื่องจากการขึ้นรูปเป็นแบบสมมาตร จึงวิเคราะห์การขึ้นรูปหนึ่งในสี่ของชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.9 จากเมนูบาร์ เลือกเมนู Preprocess เลือก ฟังก์ชัน Surface คลิก ไอคอน Revolution เลือก Part กำหนด Input แบบมุม 0 องศา ถึง 90 องศา

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis) มีขั้นตอนดังนี้



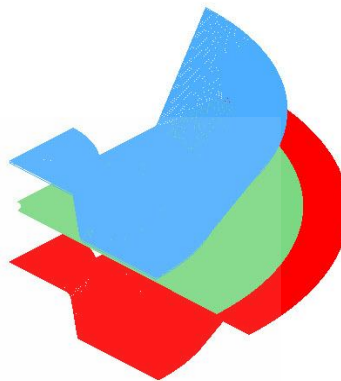
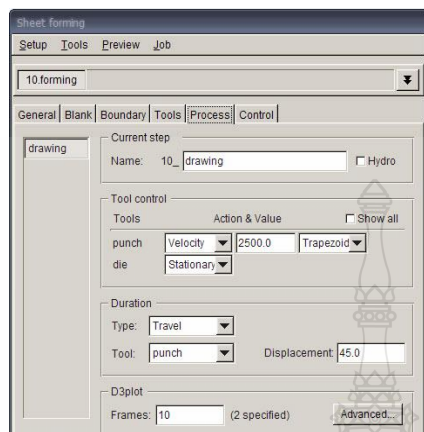
ภาพที่ 3.11 กำหนดชนิดการขึ้นรูป

- กำหนดค่าของ Simulation Type เป็นชนิด Sheet Forming ดังภาพที่ 3.11 จากเมนูบาร์ เลือกเมนู Setup เลือกฟังก์ชัน Auto Setup กำหนดความหนาของชิ้นงาน 2 มิลลิเมตร กำหนดชนิดของการขึ้นรูปแบบ Crash form กำหนด Blank Surface แบบ Top ซึ่งการกำหนดชนิดการขึ้นรูปขึ้นกับลักษณะของงานที่วิเคราะห์ โดยแบ่งได้ดังนี้ แบบ Single action แบบ Double Action แบบ Triple action แบบ Springback

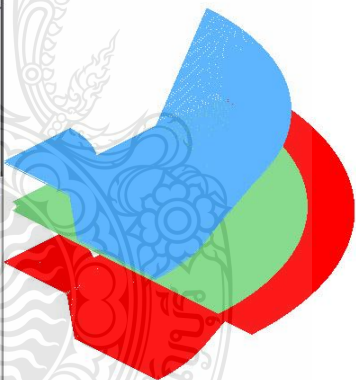
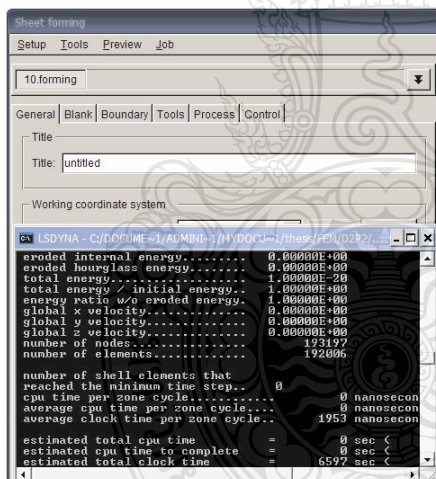


ภาพที่ 3.12 กำหนดชนิดวัสดุของชิ้นงาน

ภาพที่ 3.12 เป็นการกำหนดชนิดของวัสดุคลิกไอคอน Blank กำหนดวัสดุคลิกไอคอน Material เลือกเกรดวัสดุ Stainless Steel เบอร์ 304



ภาพที่ 3.13 เครื่องมือและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการขึ้นรูป

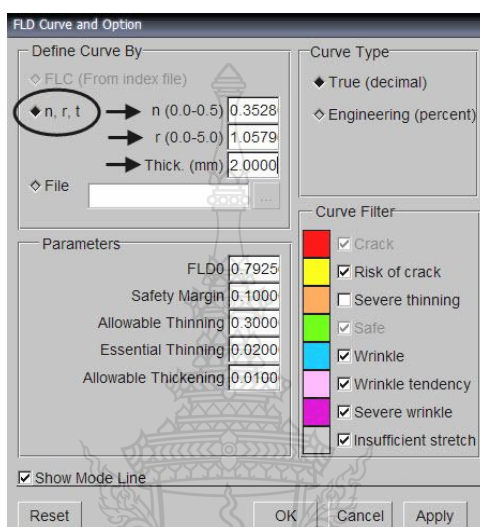


ภาพที่ 3.14 การประมวลผลของโปรแกรม Dyna Form 5.5

ภาพที่ 3.13 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตการขึ้นรูป (Boundary Condition) ประมวลผลการจำลองขึ้นรูปชิ้นงาน (Process) กำหนดระยะเวลาเคลื่อนที่ของพินซ์เท่ากับ 45 มิลลิเมตร ความเร็วของการเคลื่อนที่พินซ์เท่ากับ 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที กำหนดตายไม่เคลื่อนที่ ภาพที่ 3.14 เป็นการประมวลผล ซึ่งก่อนการประมวลผลต้องตรวจสอบความถูกต้องของการเคลื่อนที่ ให้คลิก Preview ดูการเคลื่อนที่ จากนั้นเลือก Job Submitter

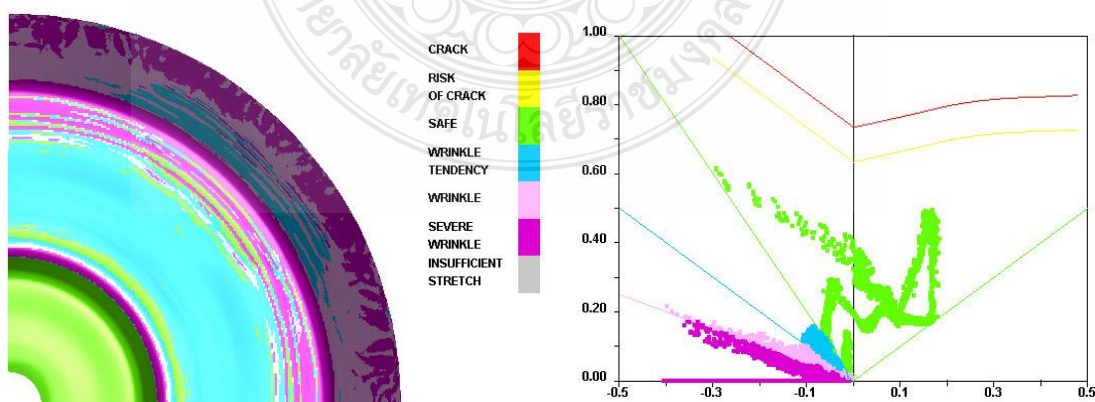
3. แสดงผลลัพธ์จากการประมวลผล (Post - Processing)

ประมวลผลการจำลองขึ้นรูปชิ้นงาน เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับ Geometry กำหนดค่าสมบัติของวัสดุ กำหนดเครื่องมือ (Tools) จากนั้นจึงจำลองการขึ้นรูปเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง และทำการประมวลผลต่อไป



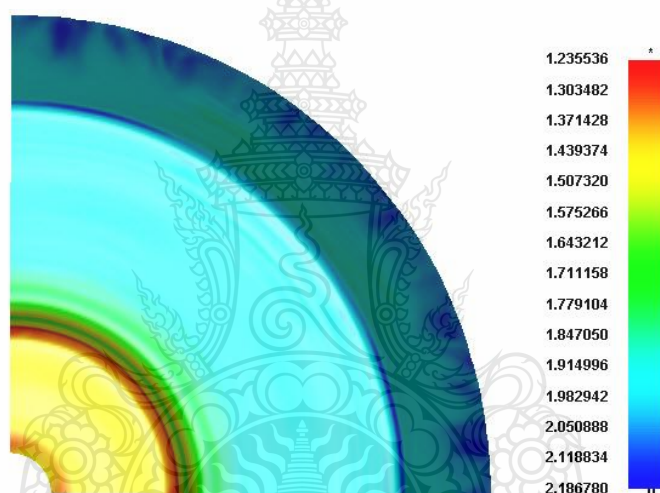
ภาพที่ 3.15 การกำหนดค่าสมบัติของวัสดุใน โปรแกรม Dyna Form 5.5

ภาพที่ 3.15 การนำค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด และค่าอัตราส่วนความเครียดพลาสติก จากการทดสอบการดึง เพื่อให้โปรแกรม Dyna Form 5.5 สร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป



ภาพที่ 3.16 ค่าความเครียดวิเคราะห์จากโปรแกรม Dyna Form 5.5

ภาพที่ 3.16 แสดงผลลัพธ์การประมวลผล (Post-process) หลังจากโปรแกรม Dyna Form 5.5 ทำการวิเคราะห์ประมวลผล นำผลลัพธ์จากค่าความเครียดหลัก (Major strain) ค่าความเครียดรอง (Minor Strain) เพื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองขึ้นรูปจริง จากรูปภาพบริเวณพื้นที่สีเขียวคือบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นสภาวะยืดตรง สภาวะดิ่งและเส้นปลอดภัยในการขึ้นรูป พื้นที่สีน้ำเงินคือบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นสภาวะดิ่ง และสภาวะเหนือนอย่างเดียวยุโรป ถ้าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณใดมีค่าความเครียดหลังขึ้นรูปตกอยู่ในพื้นที่นี้ แสดงให้เห็นว่าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณนั้นจะมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยร่นหลังขึ้นรูป พื้นที่สีม่วงคือบริเวณที่อยู่ใต้เส้นสภาวะเหนือนอย่างเดียวยุโรป ถ้าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณใดมีค่าความเครียดหลังขึ้นรูปตกอยู่ในพื้นที่นี้ แสดงให้เห็นว่าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณนั้นจะเกิดรอยร่นหลังขึ้นรูป



ภาพที่ 3.17 ค่าความหนาวิเคราะห์จากโปรแกรม Dyna Form 5.5

ภาพที่ 3.17 แสดงถึงตำแหน่งของความหนาของชิ้นงาน (Thickness) โดยแสดงค่าความหนาตามสีที่ปรากฏบนชิ้นงาน เพื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองขึ้นรูปจริง

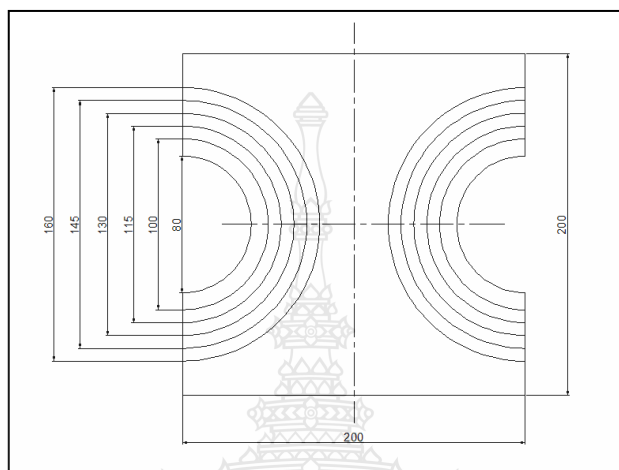
3.2.3 สร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304

การสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตร เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02 2002 มีขั้นตอนการสร้างดังนี้

1. เตรียมชิ้นงานทดสอบ ขนาด 200 มิลลิเมตร × 200 มิลลิเมตร ตัดขอบตามรัศมีที่กำหนดดังภาพที่ 3.18 และจำนวนชิ้นทดสอบมีทั้งหมด ดังในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ขนาดชิ้นงานทดสอบ

ขนาด (มม.)	200×200	R40	R50	R57.5	R65	R72.5	R80	รวม
จำนวน(ชิ้น)	10	10	10	10	10	10	10	70

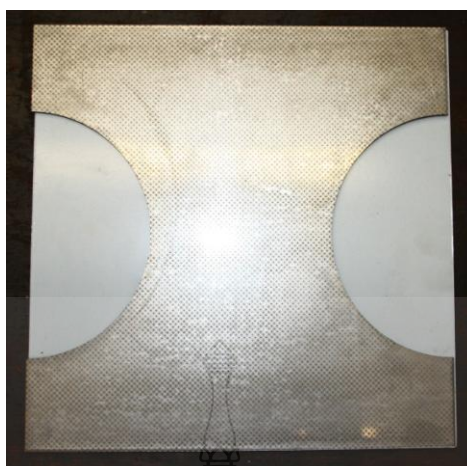


ภาพที่ 3.18 ลักษณะการตัดชิ้นทดสอบตามคาร์ตมี



ภาพที่ 3.19 นำชิ้นทดสอบสร้างกริด โดยวิธีกัดกรด (Electrochemical Etching)

2. วิธีการตีกริดวงกลม ขนาด 2.5 มม. ดังภาพที่ 3.19 นำผ้าสักราชมารชุบน้ำยากรดกัด สูตร LNC-Z Electrolyte) สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม วางทับแผ่นกรงกกัด จากนั้นเปิดสวิตช์อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขั้วบวกต่อกับลูกกลิ้ง และนำลูกกลิ้งกลิ้งไปมาบนผ้าสักราชม และใช้น้ำยา Cleaner เช็ดทำความสะอาดแผ่นชิ้นทดสอบ



ภาพที่ 3.20 ชิ้นงานที่ผ่านการตีกริด

3. นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการตีกริด ดังภาพที่ 3.20 ขึ้นรูปครึ่งวงกลมโดยวิธีการชเทอร์ตซ์ขึ้นทดสอบ ลักษณะแม่พิมพ์ดังภาพที่ 3.21 วางแผ่นทดสอบในตำแหน่งตรงศูนย์กลางของหัวพิมพ์ ขึ้นรูปแผ่นทดสอบ มีค่าพารามิเตอร์สำหรับการขึ้นรูปดังข้อมูลในตารางที่ 3.5 และใช้สารหล่อลื่นทาทั่วบริเวณหัวพิมพ์ ดาย และขึ้นทดสอบ ชนิดของสารหล่อลื่นมีดังในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ชเทอร์ตซ์ขึ้นทดสอบ

ความเร็วในการขึ้นรูป	1 มม. / วินาที
แรงกดแบลงก์โฮลเคอร์	70 ตัน
แรงขึ้นรูป	30 ตัน

การปรับระยะความลึกสำหรับการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ ให้ขึ้นรูปจนขึ้นทดสอบเกิดการฉีกขาด จากนั้นนำค่าระยะเคลื่อนที่ของพิมพ์ ณ ตำแหน่งเกิดการฉีกขาดจากเครื่องบันทึก ปรับลดระยะเคลื่อนที่พิมพ์ลง ทดลองขึ้นรูปจนให้ชิ้นงานเกิดรอยคอด

ตารางที่ 3.6 ชนิดของสารหล่อลื่นสำหรับการชเร็ดซ์ขึ้นทดสอบ

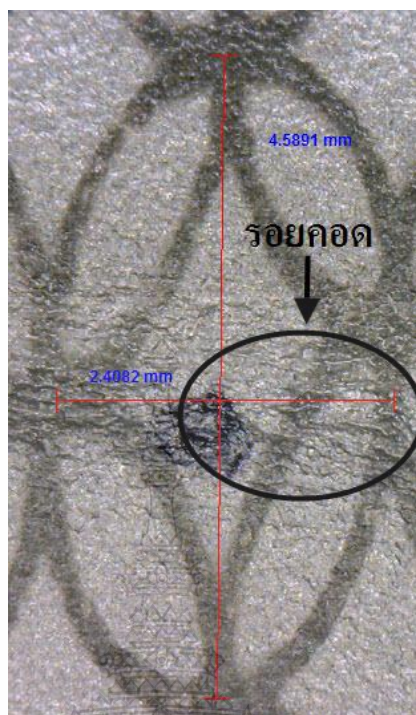
ชนิดสารหล่อลื่น	ขนาด (มม.)						
	200×200	R40	R50	R57.5	R65	R72.5	R80
น้ำมันรีโนฟอร์ม	/	/	/	/	/	/	/
น้ำมันมะพร้าว	/						
แผ่นโพลีเอททีลีน	/						



ภาพที่ 3.21 แม่พิมพ์ขึ้นรูปขึ้นทดสอบ



ภาพที่ 3.22 วิธีการถ่ายภาพการยึดตัวของกริด



ภาพที่ 3.23 วัดความเครียดหลักและความเครียดรอง ในตำแหน่งที่เกิดการกดและตำแหน่งปลดก๊วย

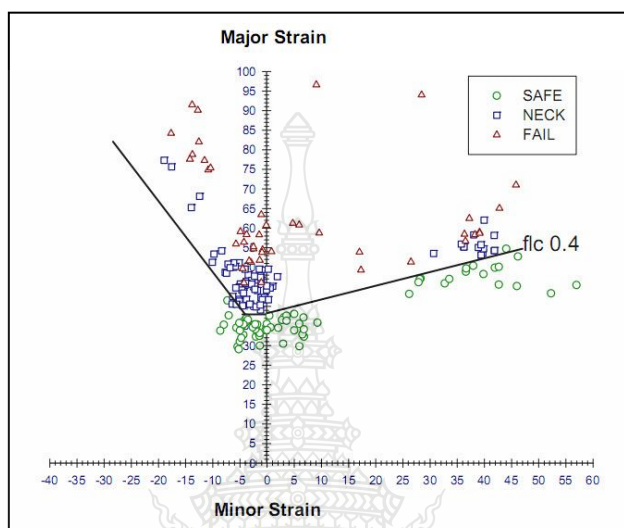


ภาพที่ 3.24 กล้องถ่ายภาพ (Dino Capture)

4. ภาพที่ 3.22 และ 3.23 เป็นการวัดการยืดตัวของกรีตบนแผ่นชิ้นงานด้วยกล้องถ่ายภาพ (Dino Capture) มีกำลังขยาย 400 เท่า ความละเอียด 1.3 ล้านพิกเซล ดังภาพที่ 3.24 วัดตรงจุดที่ปลดก๊วยและจุดที่เกิดความเสียหาย บริเวณเกิดการกด แล้วนำค่าที่เปลี่ยนไปคำนวณตามสมการที่ (3.1) และ (3.2) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปพล็อตในแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

$$\text{Major strain} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100 = e_1(\%) \quad (3.1)$$

$$\text{Manor strain} = \frac{W_f - W_o}{W_o} \times 100 = e_2(\%) \quad (3.2)$$



ภาพที่ 3.25 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่สร้างจากการทดลอง

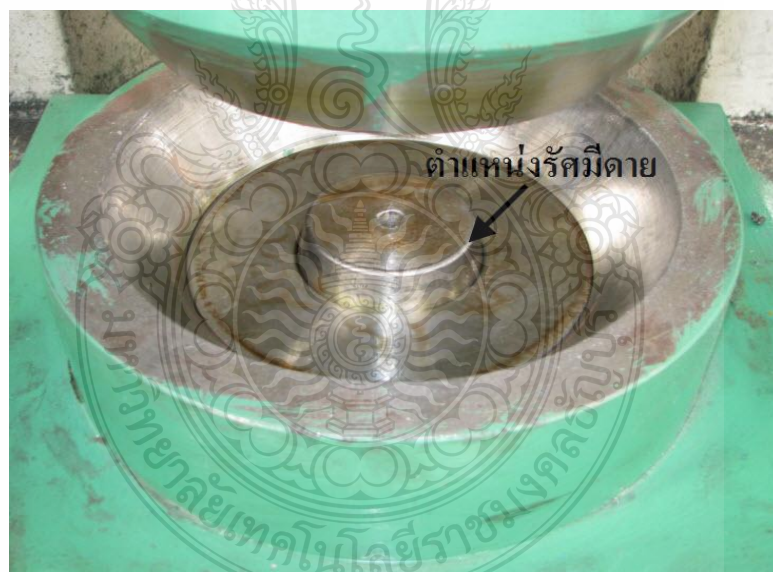
ภาพที่ 3.25 แสดงการนำค่ามาพล็อตสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป โดยการลากเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปให้อยู่ระหว่างตำแหน่งการเกิดการคอด กับตำแหน่งที่ขึ้นรูปตลอดภัย

3.2.4 การทดลองขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตร

1. การทดลองขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตร มีค่าพารามิเตอร์ รัศมีพื้นซ์ 1 มิลลิเมตร รัศมีคาย 1.5 มิลลิเมตร ตามแบบก่อนการแก้ไข ขึ้นงานทดลอง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 245 มิลลิเมตร จากนั้นนำขึ้นงานทดลองตีกรีดวงกลม ขนาด 2.5 มิลลิเมตร เพื่อสำหรับขึ้นรูปขึ้นงานจริง โดยใช้เครื่องเพรสแบบเพลลาข้อเหวี่ยงขนาด 40 ตัน ดังภาพที่ 3.26 และมีลักษณะแม่พิมพ์ ดังภาพที่ 3.27 และภาพที่ 3.28



ภาพที่ 3.26 ลักษณะของเครื่องเพรสแบบเพลาค้อเหวี่ยงขนาด 40 ตัน



ภาพที่ 3.27 ลักษณะแม่พิมพ์ตาย

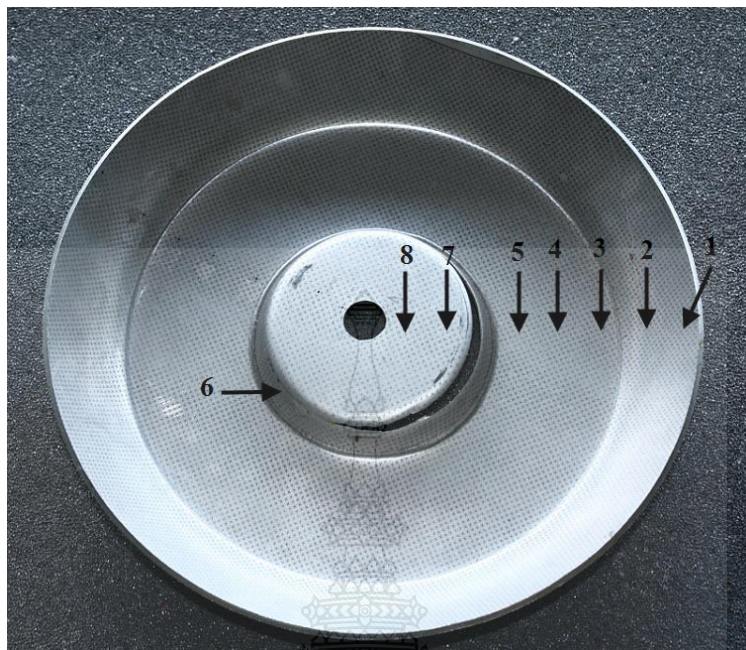


ภาพที่ 3.28 ลักษณะแม่พิมพ์พื้นซ์

ภาพที่ 3.29 เป็นขั้นตอนการขึ้นรูป วางชิ้นงานทดลองที่ผ่านการตีกริด ให้ตำแหน่งรูตรงกับสลักบนแม่พิมพ์คาย จากนั้นขึ้นรูปลึก 19.5 มิลลิเมตร ใช้สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว

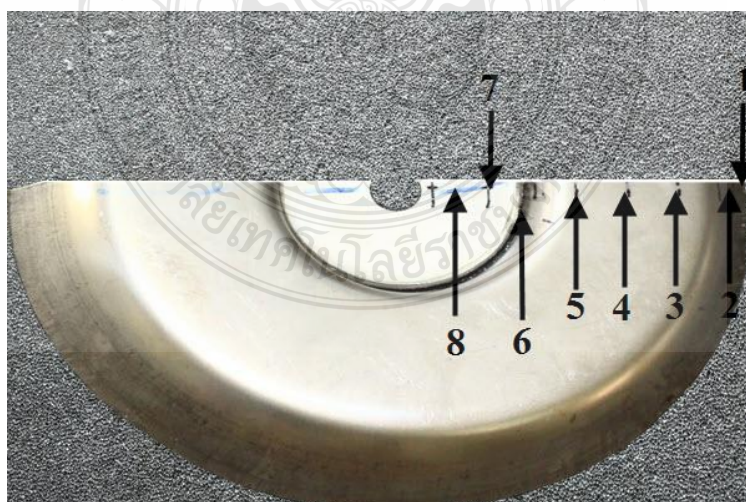


ภาพที่ 3.29 ตำแหน่งวางแผ่นขึ้นทดสอบบนแม่พิมพ์คาย



ภาพที่ 3.30 ตำแหน่งการวัดการยืดตัวของกริดวงกลม

2. ทำการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางในแกนหลัก (Major Strain) และแกนรอง (Minor Strain) ดังภาพที่ 3.30 ตามตำแหน่งที่กำหนด เปรียบเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางเดิม คำนวณหาค่าความเครียดเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 3.31 ตำแหน่งการวัดความหนาของผนังชิ้นงาน

3. นำชิ้นงานทดลองไปตัดแบ่งครึ่ง ดังภาพที่ 3.31 และวัดความหนาของผนังชิ้นงานทดสอบ ตรงตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนรูปหลังจากการขึ้นรูปจริง ด้วยไมโครมิเตอร์ดิจิทัลชนิดหัวบอล ความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.32 เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 3.32 ไมโครมิเตอร์ดิจิทัลชนิดหัวบอล



บทที่ 4

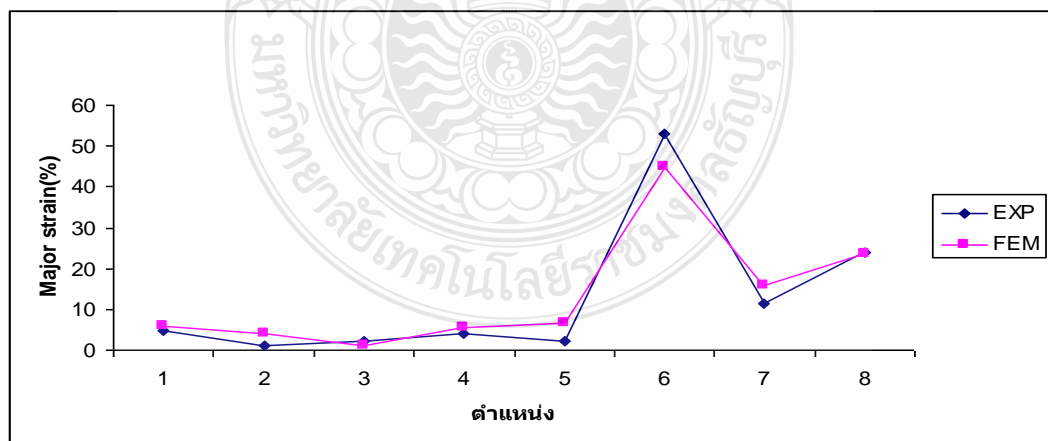
ผลการวิจัย

การแก้ไขปัญหาการขึ้นรูปชิ้นส่วนของฝาซีล ด้วยวิธีการทดลองขึ้นรูปจริง เปรียบเทียบกับวิธีการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม Dyna Form 5.5 และการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างการทดลองจริงกับการจำลองขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับหาค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบแม่พิมพ์ มีผลการวิจัยดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

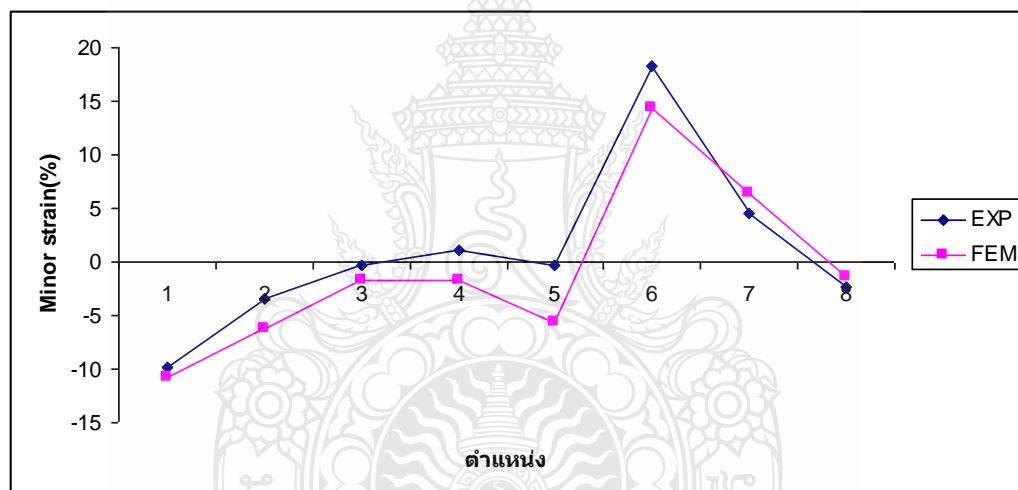
การทดลองขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตร มีค่าพารามิเตอร์ รัศมีพื้นซ์ 1 มิลลิเมตร รัศมีคาย 1.5 มิลลิเมตร ขึ้นรูปลึก 19.5 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีผลวิเคราะห์ดังนี้

4.1.1 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความเครียดของชิ้นงานจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดหลักจากการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

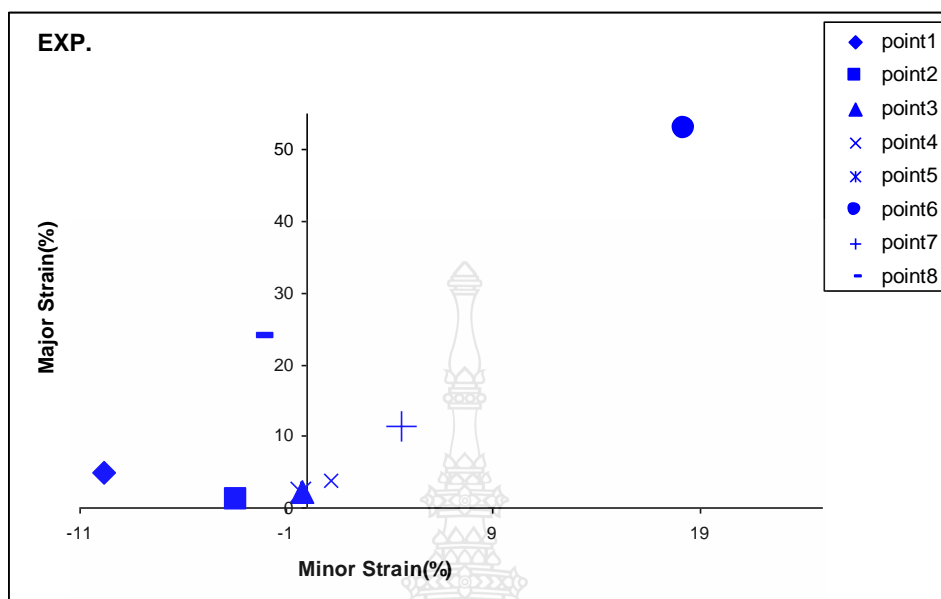
ภาพที่ 4.1 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก (Major Strain) ของชิ้นงานจริงที่ได้จากการทดลอง กับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าทุกตำแหน่งมีความสอดคล้องกัน และมีค่าความเครียดหลักเป็นบวกทั้งหมด แสดงการยืดตัวของเนื้อวัสดุออกในแนวแกนหลัก การทดลองชิ้นรูปจริง ตำแหน่งที่ 1 - 5 มีค่าความเครียดหลัก ระหว่าง 0 – 10 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งที่ 6 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 53.02 เปอร์เซ็นต์ มีการยืดตัวของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านในของชิ้นงาน ตำแหน่งที่ 7 - 8 มีค่าความเครียดหลักลดลงมา สำหรับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าทุกตำแหน่งมีค่าความเครียดหลัก เช่นเดียวกันกับการทดลองจริง โดยตำแหน่งที่ 6 มีค่าความเครียดหลักสูงเท่ากับ 44.86 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบทุกตำแหน่งพบว่า มีค่าความเครียดหลักแตกต่างกันเพียง 3.025 เปอร์เซ็นต์



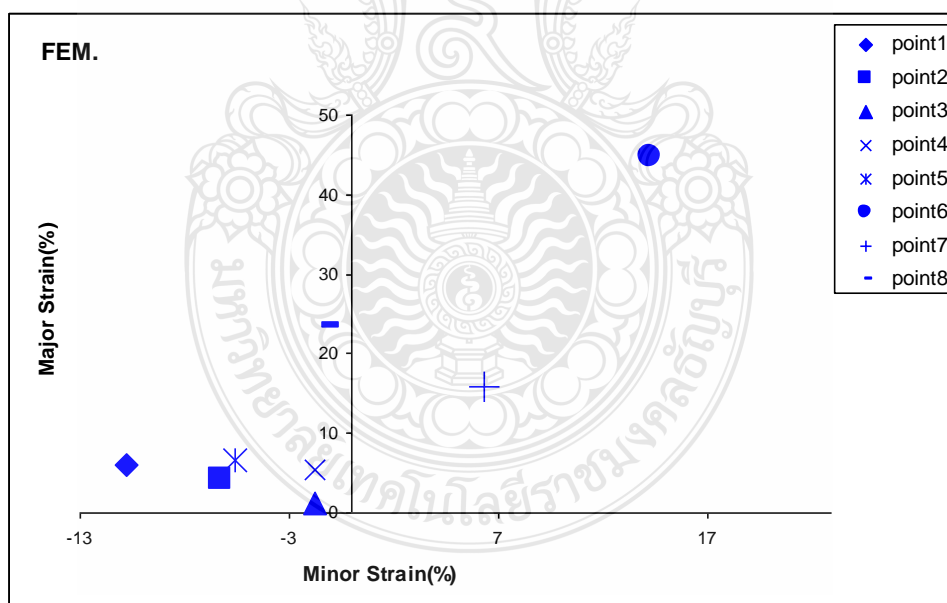
ภาพที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดรองจากการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาพที่ 4.2 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดรอง (Minor Strain) ของชิ้นงานจริงที่ได้จากการทดลอง กับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าช่วงตำแหน่งที่ 1 – 5 มีค่าความเครียดรองเป็นลบ หลังจากตำแหน่งที่ 5 มีค่าเป็นบวกทั้งการทดลองจริงและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และทุกตำแหน่งพบว่าค่าความเครียดรองมีความสอดคล้องกัน โดยตำแหน่งที่ 6 มีค่าความเครียดรองของชิ้นงานจริงสูงสุดเท่ากับ 18.28 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าความเครียดรองสูงสุดเท่ากับ 14.31 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบทุกตำแหน่ง พบว่ามีค่าความเครียดรองแตกต่างกันเพียง 2.528 เปอร์เซ็นต์

4.1.2 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าความเครียด



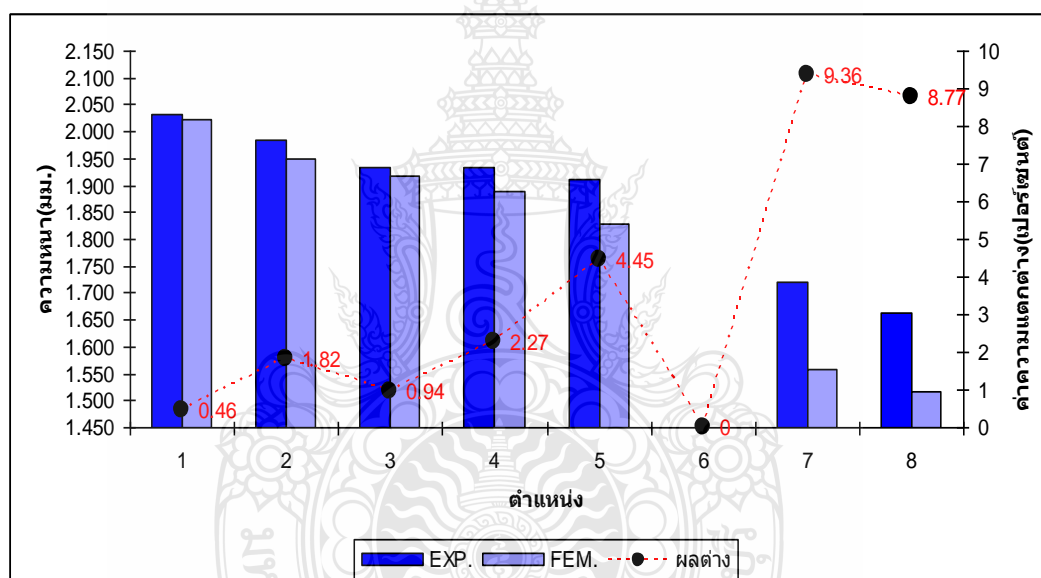
ภาพที่ 4.3 การกระจายตัวของค่าความเครียดจากการทดลองจริง



ภาพที่ 4.4 การกระจายตัวของค่าความเครียดจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาพที่ 4.3 และ 4.4 แสดงกราฟการกระจายตัวของค่าความเครียดจากการทดลองจริง กับ การกระจายตัวของค่าความเครียดด้วยการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าทุกตำแหน่งมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน แบ่งเป็นส่วนแรกเป็นสภาวะสภาวะยืดตรง (Stretching) มีการเพิ่มของค่าความเครียดในแนวแกนหลักและแนวแกนรองทั้งคู่ ซึ่งอยู่ทางด้านขวาของกราฟ คือตำแหน่งที่ 6 และ 7 ส่วนที่สองเป็นสภาวะความเครียดในแนวระนาบ (Plain Strain) มีการกระจายตัวของความเครียดในแนวแกนหลัก (Major Strain) คือ ตำแหน่งที่ 3 , 4 , 5 และตำแหน่งที่ 8 ส่วนที่สามซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายของกราฟแสดงการเกิดรอยย่น (Wrinkle) ของชิ้นงานคือตำแหน่งที่ 1 และ 2

4.1.3 การวิเคราะห์ค่าความหนาของชิ้นงานจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

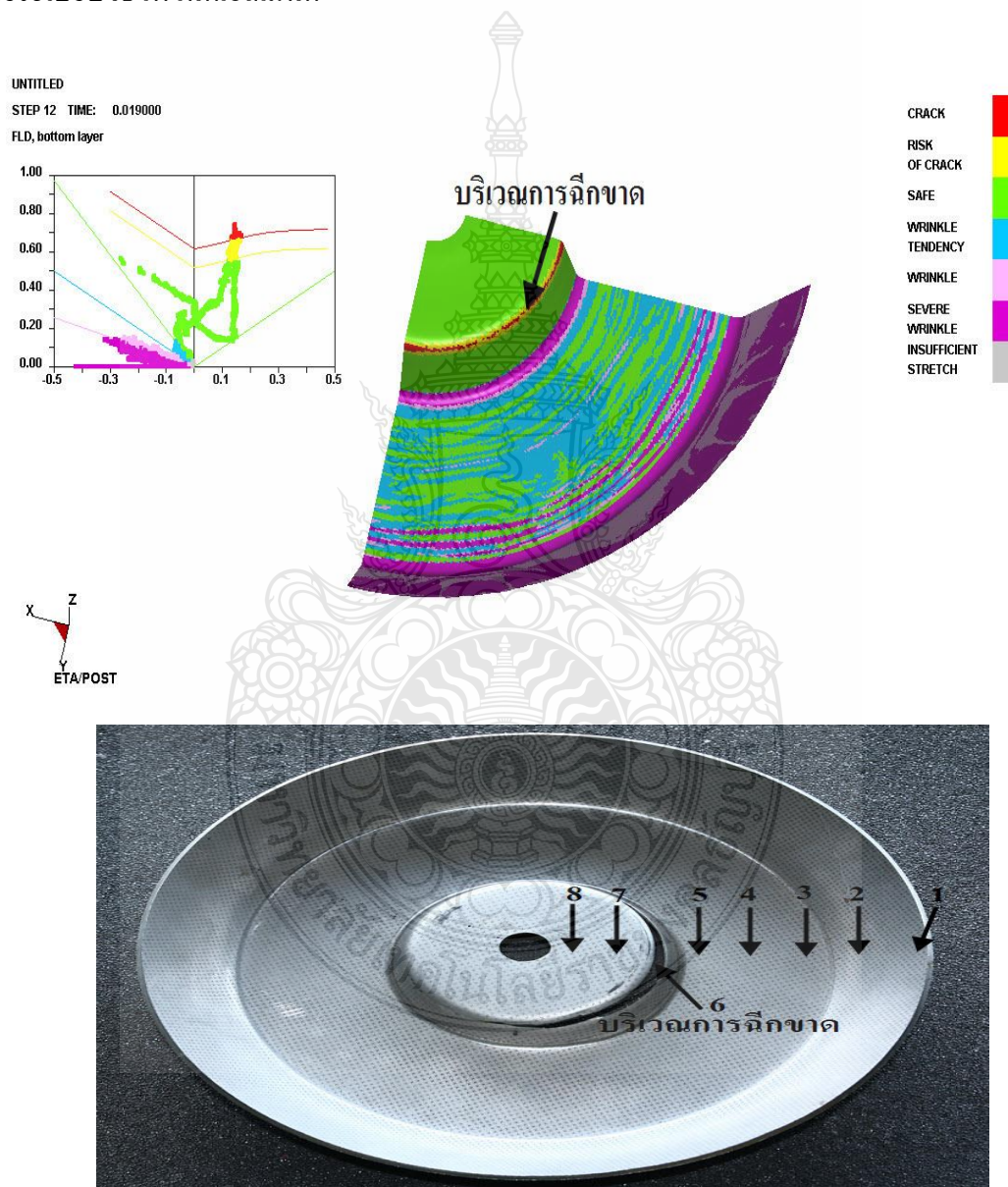


ภาพที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาของชิ้นงาน จากการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาพที่ 4.5 การวิเคราะห์ค่าความหนาของชิ้นงานจากการทดลองจริง กับ การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าทุกตำแหน่งเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูป เป็นในทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความหนาตำแหน่งที่ 1 มีค่าความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเพราะรอยย่นที่เกิดขึ้นบริเวณขอบของชิ้นงานจากการไหลตัวของวัสดุลงไปโดยขณะเดียวกันถูกแรงกดจากพื้นที่ทำให้ความหนาเพิ่มขึ้น สำหรับตำแหน่งที่ 2 – 5 มีค่าความหนาลดลงตามลำดับ ตำแหน่งที่ 6 พบการถักขาดของชิ้นงาน ส่งผลให้การไหลตัวของวัสดุหยุดลงในตำแหน่งที่

7-8 จากการทดลองจริง มีค่าความหนาแตกต่างกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มากที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาทุกตำแหน่งพบว่าตำแหน่งที่ 7 มีค่าความหนาแตกต่างกันมากที่สุดคือ 9.36 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความแตกต่างกันน้อยที่สุด 0.46 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบทุกตำแหน่ง พบว่ามีค่าความหนาแตกต่างเฉลี่ย 3.51 เปอร์เซ็นต์

4.1.4 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการขึ้นรูปชิ้นงาน ระหว่างการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



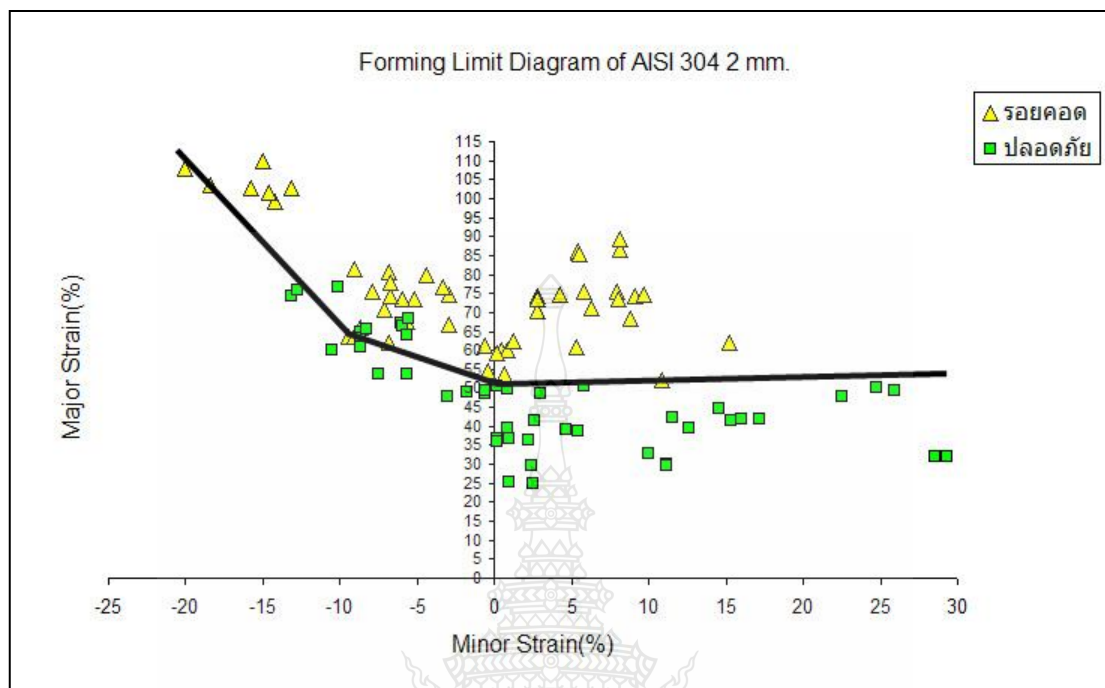
ภาพที่ 4.6 พฤติกรรมของการขึ้นรูปชิ้นงานจากการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบพฤติกรรมการขึ้นรูปชิ้นงาน ระหว่างการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าการขึ้นรูปตำแหน่งที่ 1 - 2 เกิดค่าความเครียดอัด ที่เกิดจากการไหลตัวของวัสดุเข้าไปในคาน ทำให้เกิดรอยย่นซึ่งมีความหนาเพิ่มขึ้น ตำแหน่งที่ 3 - 5 เกิดค่าความเค้นกด บริเวณขอบด้านล่างของชิ้นงาน เนื่องจากแรงกดระหว่างพินซ์-คาน และความหนา มีการเปลี่ยนแปลงน้อย ตำแหน่งที่ 6 เกิดการฉีกขาดของชิ้นงานเช่นเดียวกัน ทั้งการทดลองจริงและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และตำแหน่งที่ 7 - 8 สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างปลอดภัย

สรุปผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าพารามิเตอร์ รัศมีพินซ์ 1 มิลลิเมตร รัศมีคาน 1.5 มิลลิเมตร ขึ้นรูปลึก 19.5 มิลลิเมตร พบว่าการเกิดความเครียดของชิ้นงาน ทุกตำแหน่งมีความสอดคล้องการกระจายตัวของค่าความเครียดมีการกระจายตัวใกล้เคียงกัน การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาจากการขึ้นรูป พบว่าทุกตำแหน่งเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูป เป็นในทางเดียวกัน แตกต่างเฉลี่ย 3.51 เปอร์เซ็นต์ และพฤติกรรมการขึ้นรูปชิ้นงานที่สอดคล้องกัน ทั้งการทดลองจริงและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปแทนจากการขึ้นรูปจริงได้ และสามารถวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของรัศมีพินซ์และคาน สำหรับการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 ได้

4.2 ผลการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304

4.2.1 การสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตร เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02 2002 มีผลดังนี้



ภาพที่ 4.7 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค AISI 304 2 mm. ที่สร้างจากทดลอง

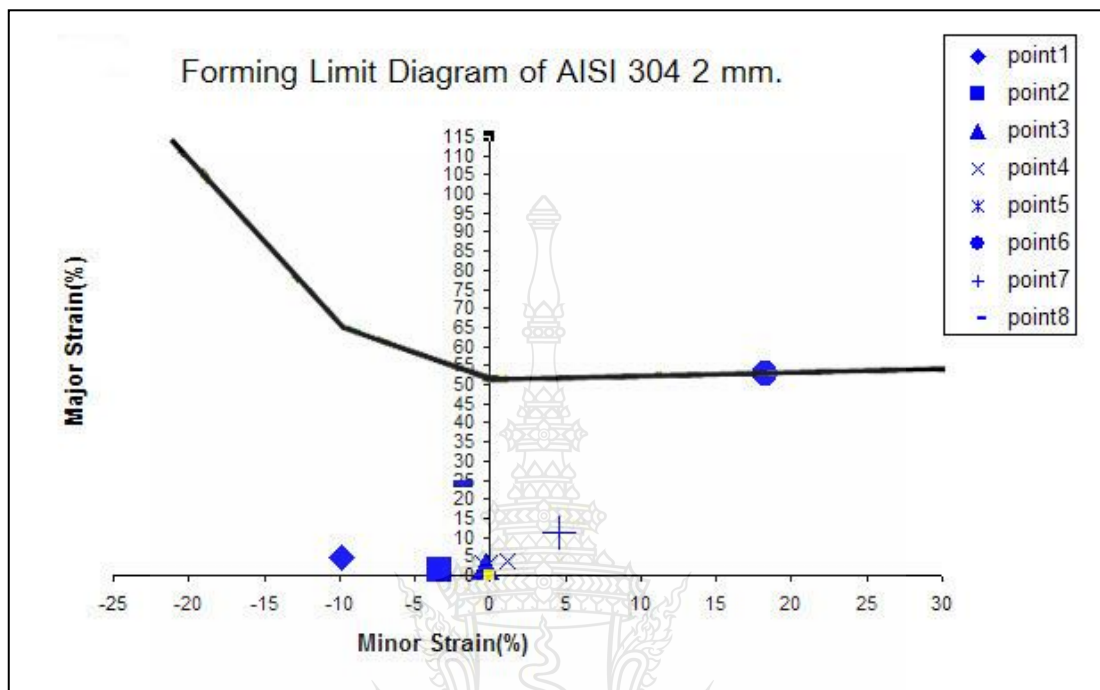
ภาพที่ 4.7 พบว่าชิ้นทดสอบขนาด 200×200 มิลลิเมตร ที่สภาวะหล่อลื่นด้วยน้ำมันขึ้นรูปรีโนฟอร์ม น้ำมันมะพร้าว และแผ่น โพลีเอททิลีน พบค่าความเครียดรองอยู่ระหว่าง 0.90 เปอร์เซ็นต์ ถึง 31 เปอร์เซ็นต์

ชิ้นทดสอบตัดขอบรัศมี 57.5 ถึง 40 มิลลิเมตร พบว่าที่สภาวะหล่อลื่นด้วยน้ำมันขึ้นรูปรีโนฟอร์ม พบค่าความเครียดรองอยู่ระหว่าง 0.12 เปอร์เซ็นต์ ถึง 18.352 เปอร์เซ็นต์

ชิ้นทดสอบตัดขอบรัศมี 80 ถึง 65 มิลลิเมตร พบว่าที่สภาวะหล่อลื่นด้วยน้ำมันขึ้นรูปรีโนฟอร์ม พบค่าความเครียดรองอยู่ระหว่าง -3.044 เปอร์เซ็นต์ ถึง -18.352 เปอร์เซ็นต์

เมื่อนำค่าความเครียดทุกตำแหน่งพล็อตบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตร พบว่าค่าความเครียดหลักในแนวระนาบจากการขึ้นรูปจนเกิดรอยคอด มีค่าต่ำสุดเท่า 52.24 เปอร์เซ็นต์ และค่าความเครียดรองอยู่ระหว่าง -18.352 เปอร์เซ็นต์ ถึง 31.22 เปอร์เซ็นต์

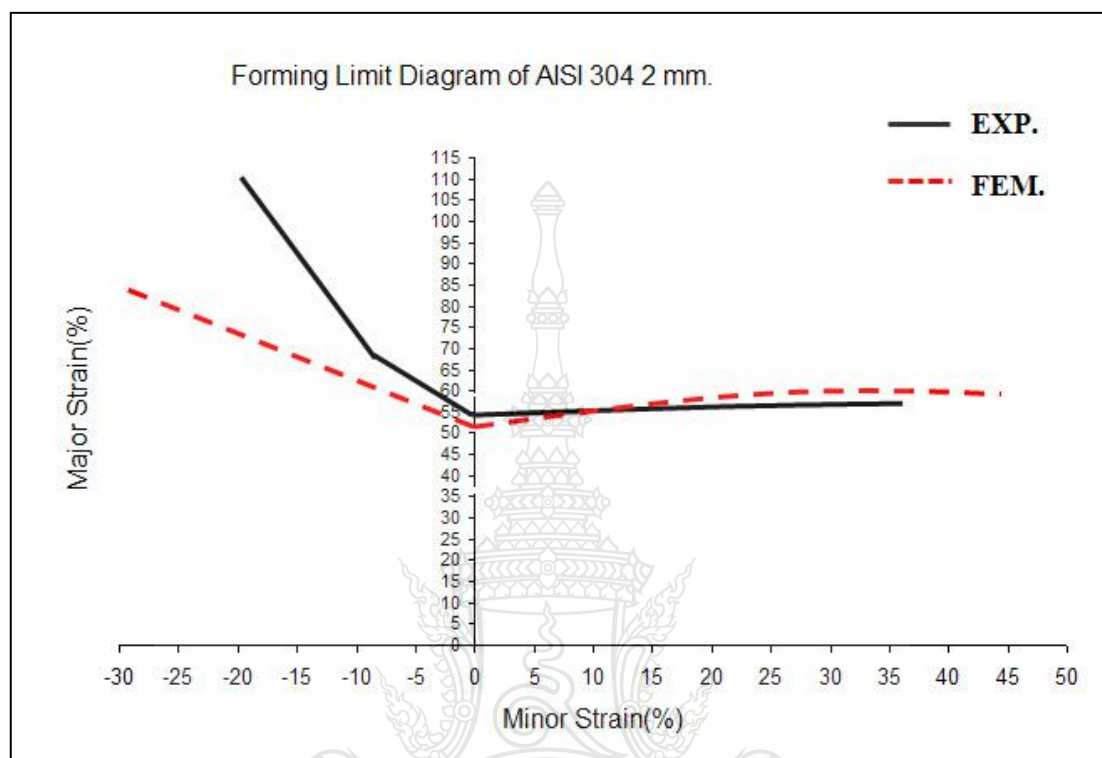
4.2.2 ผลการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 ไปวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปชิ้นงานฝาซีล



ภาพที่ 4.8 ตำแหน่งความเครียดจากการขึ้นรูปชิ้นส่วนฝาซีล บนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 2 mm.

ภาพที่ 4.8 แสดงค่าความเครียดจากการทดลองขึ้นรูปชิ้นส่วนฝาซีล มาพล็อตบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตร พบว่าตำแหน่งที่ 1 - 5 และตำแหน่งที่ 8 อยู่ใต้เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLC) เป็นจุดที่ปลอดภัยไม่พบการฉีกขาด และมีความเครียดในแนวระนาบ (Plain Strain) มีการยืดตัวเฉพาะในแนวแกนหลัก สำหรับบริเวณขอบชิ้นงานจะเกิดรอยย่น (Wrinkles) ส่วนตำแหน่งที่ 6 อยู่บนเส้นขีดจำกัดการขึ้นรูป เป็นจุดที่พบการฉีกขาดของชิ้นส่วนฝาซีล

4.2.3 การเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูประหว่างการทดลองจริงกับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากวิธีทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

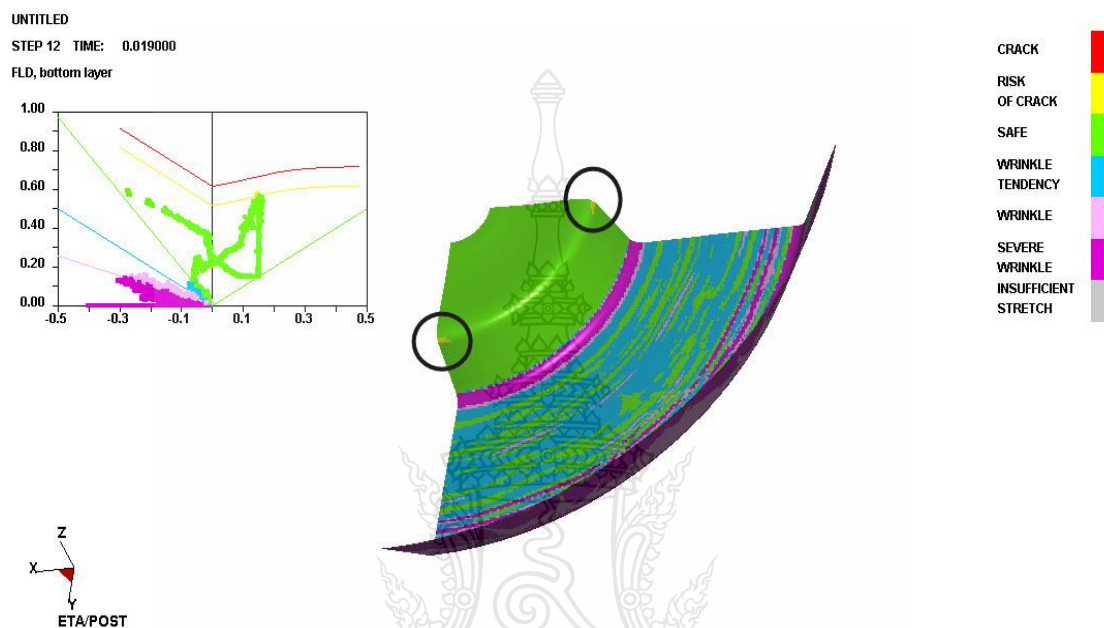
ภาพที่ 4.9 แสดงเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากวิธีการทดลองมีค่าความเครียดหลักสูงกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 1.24 เปอร์เซ็นต์ ณ ความเครียดในแนวระนาบ ซึ่งวิธีการทดลองมีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 52.24 เปอร์เซ็นต์ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 51 เปอร์เซ็นต์

4.3 ผลการประยุกต์ใช้วิธีการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความสอดคล้องกับขึ้นรูปจริงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของพื้นที่-ดาย และวิเคราะห์การขึ้นรูป เพื่อนำค่ารัศมีที่เหมาะสมสำหรับออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นส่วนฝาซีล ดังในตารางที่ 4.1

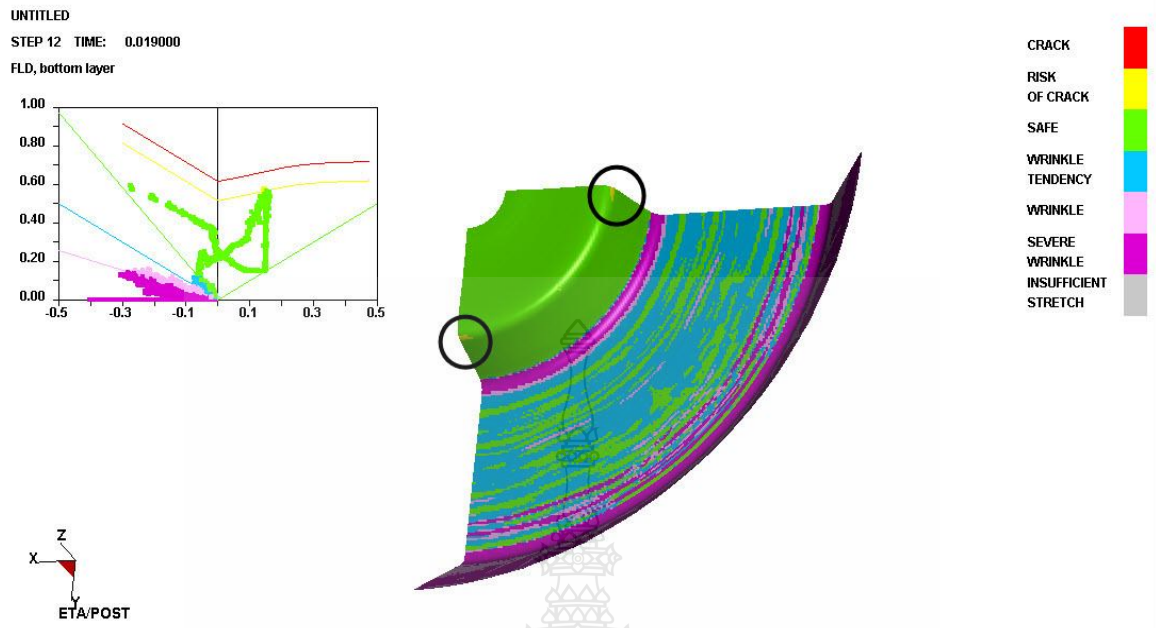
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของพื้นที่-คาย ในการการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Punch(mm.)	1.5			2		
Die(mm.)	2	2.5	3	2	2.5	3



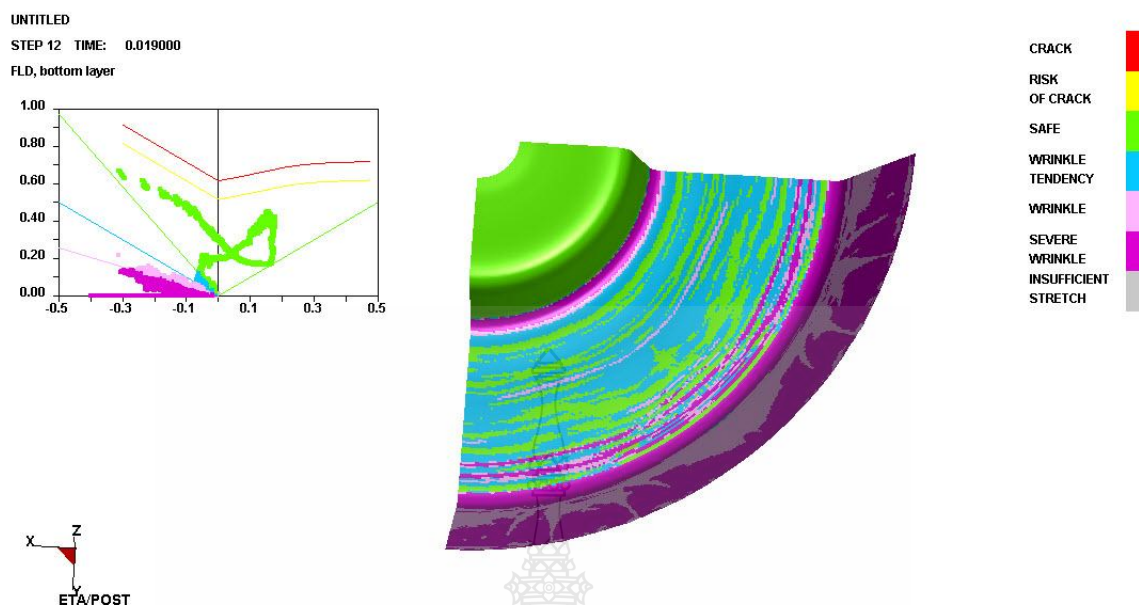
ภาพที่ 4.10 ผลจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่ารัศมีพื้นที่ 1.5 mm. และรัศมีคาย 2 mm.

ภาพที่ 4.10 ผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไปประยุกต์ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ ที่รัศมีพื้นที่ 1.5 มิลลิเมตร และรัศมีคาย 2 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อปรับรัศมีพื้นที่และคายใหญ่ขึ้น 0.5 มิลลิเมตร จากขนาดเดิมก่อนการแก้ไข บริเวณขอบด้านในของชิ้นงานมีความเสียหายลดลงอย่างเห็นได้ชัด คือพบความเสี่ยงจากการเกิดการคอด (Risk of Cracks) ซึ่งบริเวณเดิมเป็นการนิกขาดของ (Crack) ชิ้นงานมีค่าความเครียดอยู่ระหว่างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLC) แสดงเส้นเป็นสีเหลือง ณ บริเวณขอบด้านใน และบริเวณขอบชิ้นงานเกิดรอยขุ่น (Wrinkles)



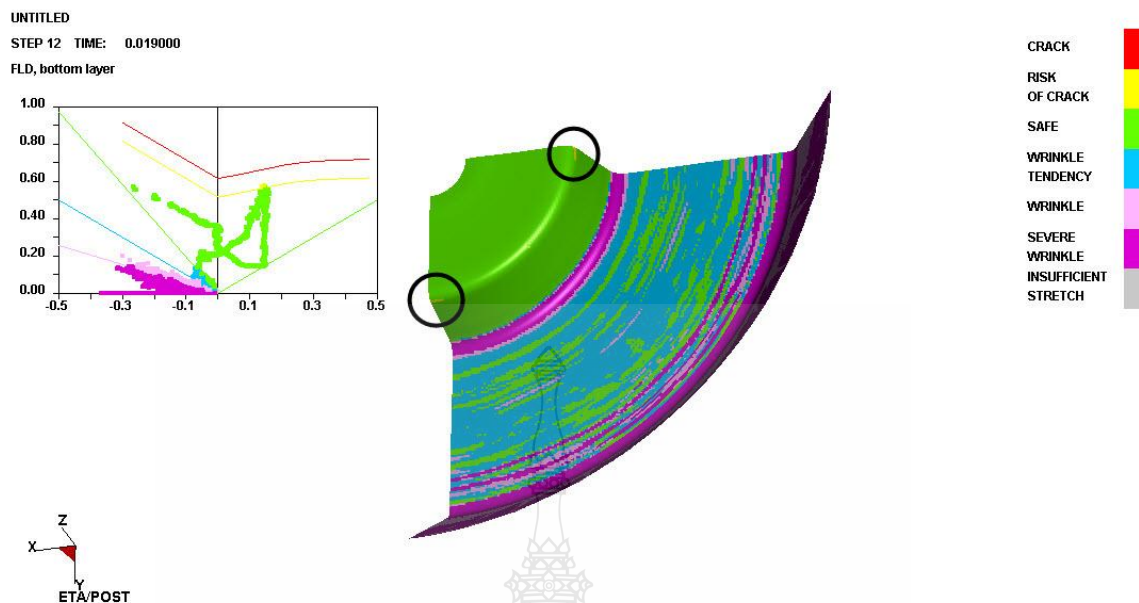
ภาพที่ 4.11 จำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คาร์ซีมีพื้นที่ 1.5 mm. และรัศมีคาย 2.5 mm.

ภาพที่ 4.11 ผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไปประยุกต์ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ ที่รัศมีพื้นที่ 1.5 มิลลิเมตร และรัศมีคาย 2.5 มิลลิเมตร พบว่าบริเวณขอบด้านในของชิ้นงาน มีค่าความเครียดอยู่ระหว่างเส้นโค้งจำกัดการขึ้นรูป (FLC) ทางด้านขวาของกราฟ มีความเสี่ยงจากการเกิดการคอด (Risk of Cracks) แสดงเป็นจุดสีเหลือง 2 จุด บริเวณภายในวงกลม



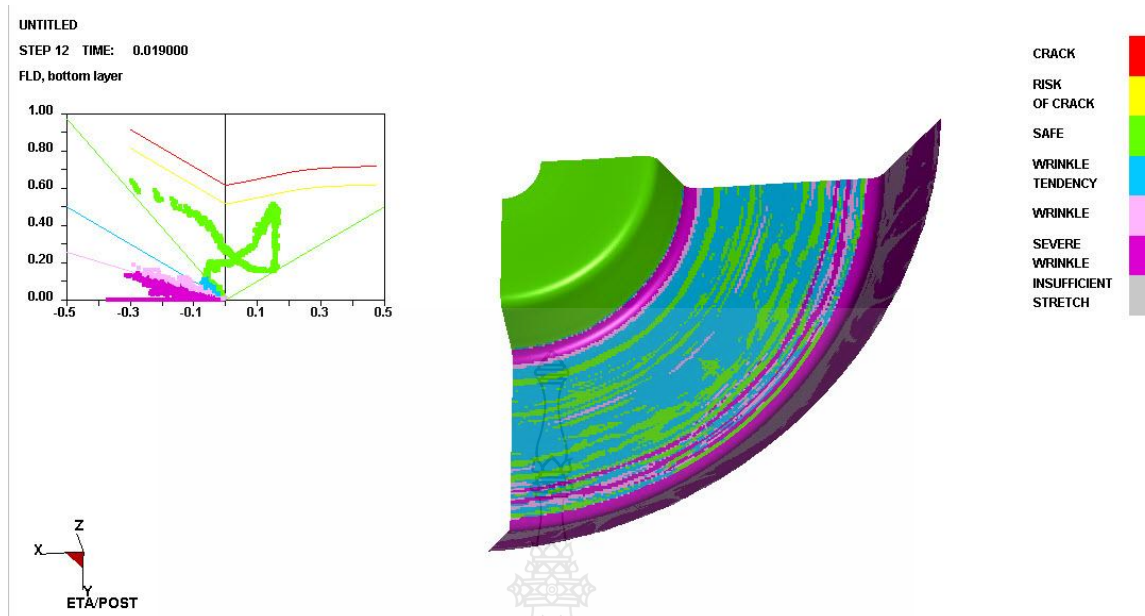
ภาพที่ 4.12 จำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คาร์ซีมีพื้นที่ 1.5 mm. และรัศมีคาย 3 mm.

ภาพที่ 4.12 ผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไปประยุกต์ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ ที่รัศมีพื้นที่ 1.5 มิลลิเมตร และรัศมีคาย 3 มิลลิเมตร พบว่าบริเวณขอบด้านในของชิ้นงานอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย (Safe) มีค่าความเครียดทางด้านขวามือของกราฟลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 4.10 และ 4.11 และอยู่ใต้เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLC) เนื่องจากรัศมีคายที่ใหญ่ขึ้นช่วยในการไหลของวัสดุจึงลดการยืดตัวของวัสดุได้ดีขึ้น สามารถขึ้นรูปได้โดยไม่พบการฉีกขาดที่ชิ้นงาน



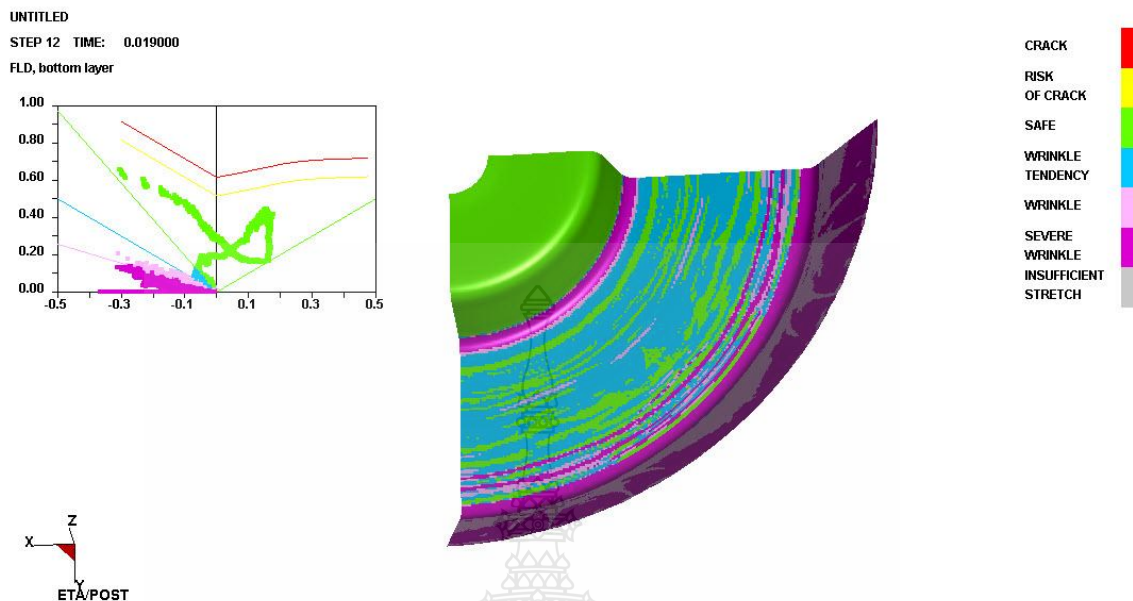
ภาพที่ 4.13 จำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คาร์ซีมีพื้นที่ 2 mm. และรัศมีคาย 2 mm.

ภาพที่ 4.13 ผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไปประยุกต์ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ ที่รัศมีพื้นที่ 2 มิลลิเมตร และรัศมีคาย 2 มิลลิเมตร พบว่าบริเวณขอบด้านในของชิ้นงานมีความเสี่ยงจากการเกิดการคอด (Risk of Cracks) แสดงถึงรัศมีคายนขนาดเล็กมีอิทธิพลต่อผลการขึ้นรูป ซึ่งชิ้นงานมีค่าความเครียดอยู่ระหว่างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLC) ทางด้านขวาของกราฟมีความเสี่ยงจากการเกิดการคอด (Risk of Cracks) แสดงเป็นจุดสี่เหลี่ยม 2 จุด บริเวณภายในวงกลม เช่นเดียวกับภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.14 จำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คาร์ซีมีพื้นที่ 2 mm. และรัศมีคาย 2.5 mm.

ภาพที่ 4.14 ผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไปประยุกต์ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ ที่รัศมีพื้นที่ 2 มิลลิเมตร และรัศมีคาย 2.5 มิลลิเมตร พบว่าความเครียดด้านขวามือของกราฟอยู่ต่ำกว่าเส้นเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLC) เล็กน้อย สามารถขึ้นรูปได้โดยไม่พบการฉีกขาดของชิ้นงาน แสดงถึงอิทธิพลของรัศมีพื้นที่ที่มีผลต่อการขึ้นรูปเมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 4.11 แต่ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นยังมีแนวโน้มใกล้เคียงกับความเสี่ยงจากการเกิดการคอด (Risk of Cracks) อยู่ ดังนั้นเมื่อนำคาร์ซีมีของพื้นที่และคายที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ไปทดลองขึ้นรูปจริงอาจพบการฉีกขาดของชิ้นงานได้



ภาพที่ 4.15 จำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่ารัศมีพื้นซ์ 2 mm. และรัศมีด้าย 3 mm.

ภาพที่ 4.15 ผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไปประยุกต์ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ ที่รัศมีพื้นซ์ 2 มิลลิเมตร และรัศมีด้าย 3 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อปรับขนาดรัศมีที่ใหญ่ขึ้นส่งผลต่อความเครียดของชิ้นงานจากการขึ้นรูปอย่างชัดเจน โดยเฉพาะค่ารัศมีด้ายซึ่งเป็นเพราะรัศมีด้ายที่เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปลดลง เนื่องจากการดัดองชิ้นงานเพื่อไหลลงในแม่พิมพ์ง่ายขึ้น และเมื่อพิจารณาผลลัพธ์จากการจำลองการขึ้นรูปชิ้นงานไม่เกิดการรื้อขาด

ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองการขึ้นรูป

Punch(mm.)	Die(mm.)	ไม่พบการฉีกขาด	เกิดรอยคอด	เกิดการฉีกขาด
1.5	2		/	
	2.5		/	
	3	/		
2	2		/	
	2.5	/		
	3	/		

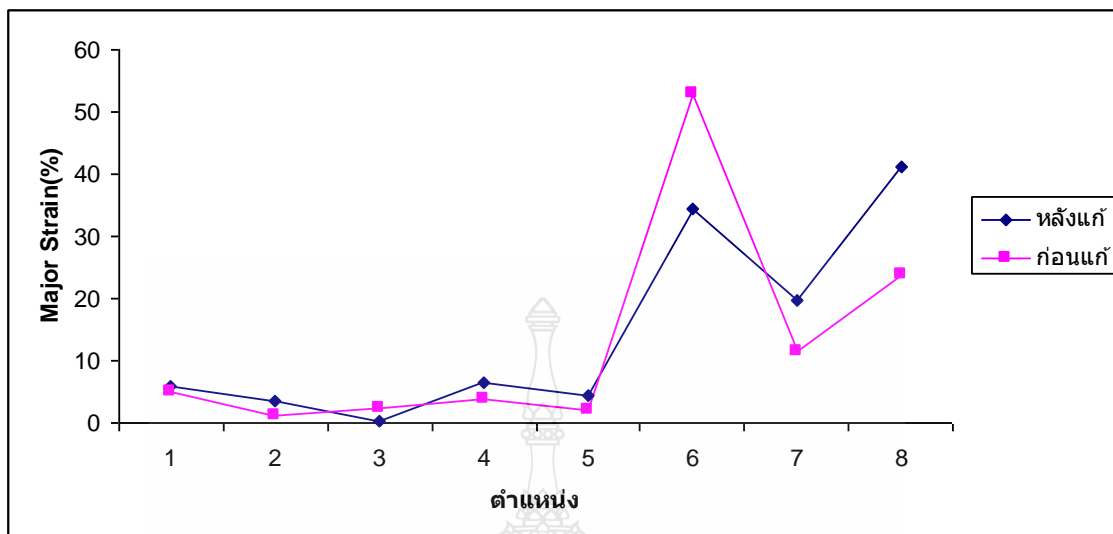
ตารางที่ 4.2 แสดงผลจากการจำลองการขึ้นรูป พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปคือ รัศมีตาย โดยค่ารัศมีที่ 2 มิลลิเมตร มีความเสี่ยงจากการเกิดการคอดและมีโอกาสเสี่ยงต่อการฉีกขาด สำหรับค่ารัศมีตายที่ 2.5 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างปลอดภัย เป็นเพราะค่ารัศมีตายที่มีขนาดโตจะช่วยในการไหลตัวของวัสดุได้ดีกว่า ลดการยึดตัวของชิ้นงาน ส่งผลให้ค่าความเครียดลดลง ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่ารัศมีพื้นซ์เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และค่ารัศมีตายเท่ากับ 3 มิลลิเมตร เนื่องผลจำลองขึ้นรูปมีค่าต่ำกว่าขึ้นรูปจริงเล็กน้อยจึงใช้ค่าพารามิเตอร์ที่สูงกว่า ในการออกแบบแม่พิมพ์และทำการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง

4.4 ผลการทดลองขึ้นรูปจริงจากการปรับค่ารัศมีพื้นซ์และตาย

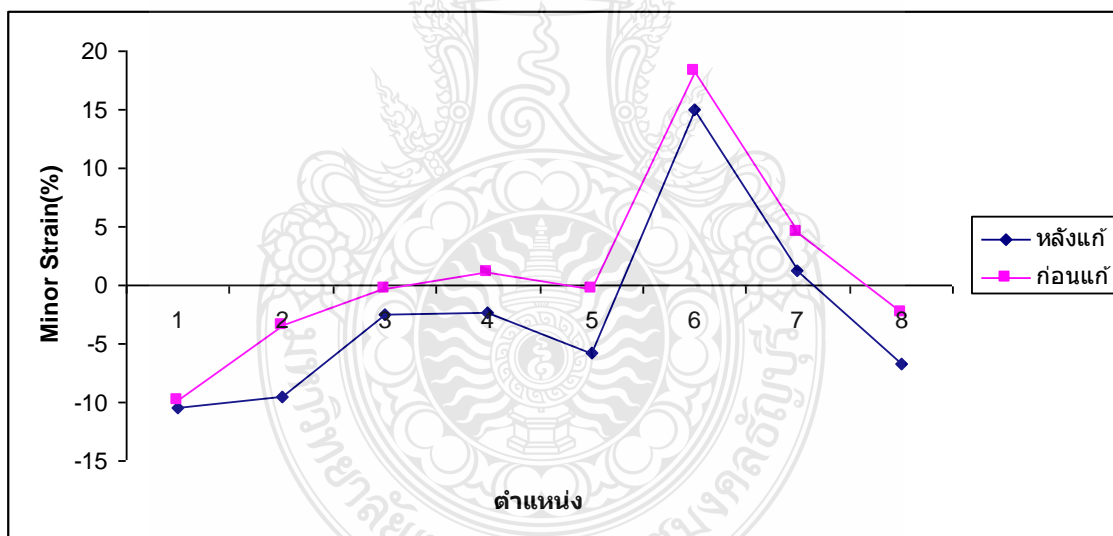
การทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริงโดยใช้ค่ารัศมีพื้นซ์ 2 มิลลิเมตร รัศมีตาย 3 มิลลิเมตร ใช้ขั้นตอนการขึ้นรูปและเงื่อนไขเช่นเดียวกันก่อนการแก้ไขแม่พิมพ์ เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการประยุกต์ใช้ไฟในอิเล็กเมนต์สำหรับการออกแบบแก้ไขแม่พิมพ์ขึ้นรูปฝาซิลเครื่องซักผ้า



ภาพที่ 4.16 ชิ้นงานขึ้นรูปผ่านกระบวนการแก้ไขแม่พิมพ์



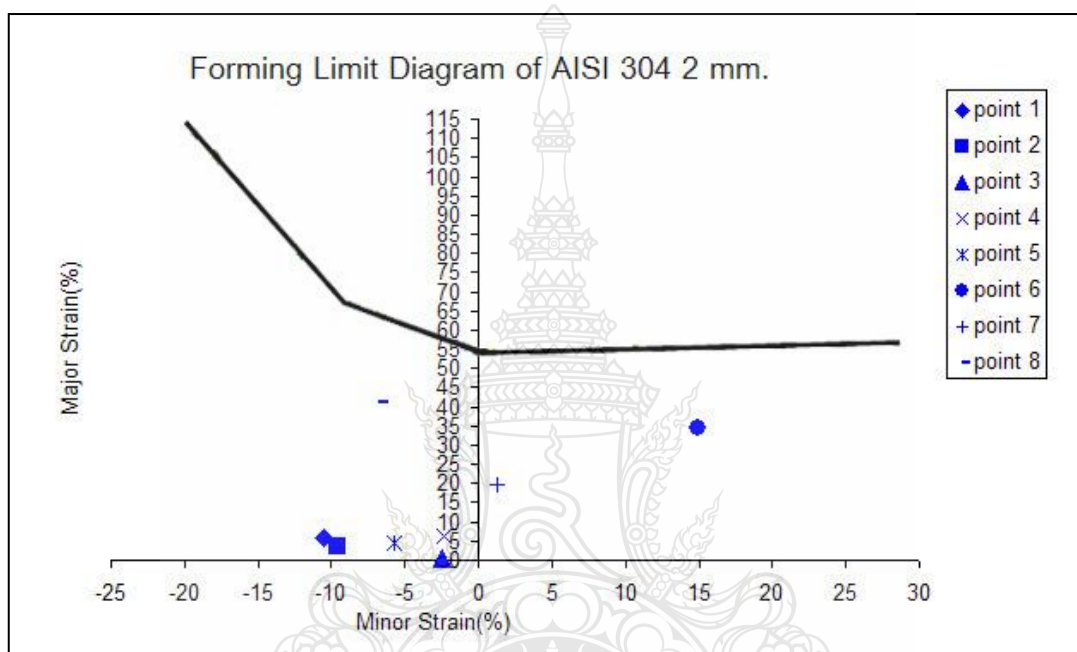
ภาพที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดหลักก่อนและหลังแก้ไขรัศมีพื้นซ์ ดาย



ภาพที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดรองก่อนและหลังแก้ไขรัศมีพื้นซ์ ดาย

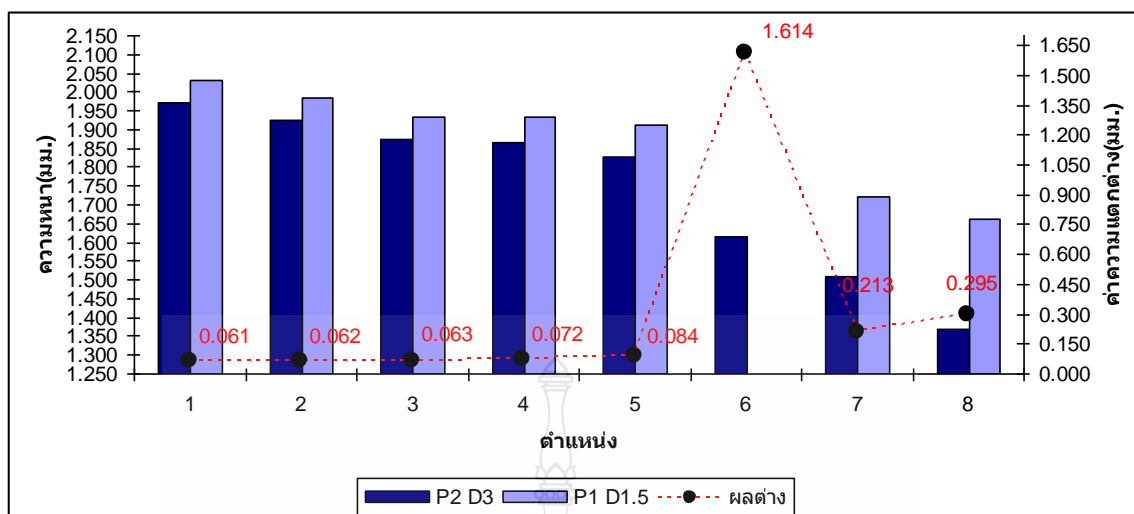
ภาพที่ 4.17 และ 4.18 แสดงค่าความเครียดของชิ้นงานหลังจากการปรับค่ารัศมีพื้นซ์ 2 มิลลิเมตร และดาย 3 มิลลิเมตร พบว่าช่วงตำแหน่งที่ 1 – 5 และ มีการหดตัวของกริดวงกลมในแนวแกนรองเพิ่มขึ้น เป็นลักษณะการไหลตัวของวัสดุแสดงถึงสภาวะดึง (Tensile) ตำแหน่งที่ 6 พบค่าความเครียดลดลงซึ่งมีผลจากรัศมีพื้นซ์ ดาย ใหญ่ขึ้น ค่าความเครียดมีค่าเป็นบวกและมีการขยายตัว

ของกริดวงกลมออกทั้งในแนวแกนหลัก แกนรอง เป็นลักษณะของสภาวะยืดตรง (Stretching) ซึ่งพิจารณาจากตำแหน่งที่ 6 ที่อยู่ใกล้บริเวณรัศมีคายนหลังจากแก้ไขแม่พิมพ์แล้วไม่พบการร้าวของชิ้นงาน ตำแหน่งที่ 7 – 8 พบการยึดตัวของกริดวงกลมในแนวแกนหลักเพิ่มขึ้น เป็นบริเวณกลางของชิ้นงาน เกิดจากส่วนของจุ่มกึ่งที่มีการปรับรัศมีใหญ่ขึ้นทำหน้าที่ลากวัสดุไหลลงแม่พิมพ์ และขณะเดียวกันการปรับรัศมีคายนให้ใหญ่ ส่งผลต่อการไหลของวัสดุขึ้น



ภาพที่ 4.19 ความเครียดจากการแก้ไขแม่พิมพ์ บนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก AISI 304 2 mm.

ภาพที่ 4.19 แสดงค่าความเครียดจากการทดลองขึ้นรูปชิ้นส่วนฝาซีลจากการแก้ไข มาพล็อตบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตร พบว่าทุกตำแหน่งอยู่ใต้เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLC) เป็นจุดที่ปลอดภัยไม่พบการร้าว



ภาพที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาของชิ้นงานจากการทดลองจริงก่อนแก้ไขเปรียบเทียบหลังแก้ไข

ภาพที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาระหว่างก่อนและหลังแก้ไขแม่พิมพ์พบว่าช่วงตำแหน่งที่ 1 – 5 ค่าความหนาลดลง 0.061 – 0.084 มิลลิเมตร ตำแหน่งที่ 6 ความหนาเพิ่มขึ้น 1.614 มิลลิเมตร เป็นบริเวณผนังด้านในของชิ้นงาน ซึ่งเป็นจุดเดียวกันที่พบการน็อกขาดก่อนแก้ไขแม่พิมพ์ ตำแหน่งที่ 7 – 8 พบความหนาลดลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาก่อนแก้ไข เนื่องจากการปรับรัศมีคายที่ใหญ่ขึ้นช่วยในการไหลตัวของวัสดุจากตำแหน่งที่ 7 และ 8 ผู้ตำแหน่งที่ 6 เพิ่มขึ้น พิจารณาจากด้านซ้ายของตำแหน่งที่ 6 ค่าความหนาแต่ละจุดลดลงน้อยกว่าด้านขวา ดังนั้นรัศมีคายจึงมีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปชิ้นงานฝาซีล ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 เมื่อปรับค่ารัศมีพันซ์เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ รัศมีของคายเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ทดลองขึ้นรูปจริงส่งผลให้ขึ้นรูปชิ้นงานได้สำเร็จ โดยตำแหน่งที่ 6 ไม่พบการน็อกขาด และผลการทดลองพบว่าการปรับรัศมีคายที่ใหญ่ส่งผลต่อความหนาโดยทุกตำแหน่งมีค่าความหนาลดลงเฉลี่ย 0.308 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนแก้ไขแม่พิมพ์

4.5 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยการศึกษาและพัฒนากระบวนการขึ้นรูปฝาชีลเครื่องซักผ้า โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ผู้วิจัยได้ทดลอง เก็บข้อมูลเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผล สามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อหลักได้ดังนี้

1. การประยุกต์ใช้การจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการแก้ไขปัญหาการบิดงอของชิ้นงานจากการขึ้นรูปชิ้นงานจริง โดยมีขั้นตอนเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการขึ้นรูปจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งผลของการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลการขึ้นรูป เช่น ค่าความเครียด ผลของความหนาชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านการขึ้นรูป รวมถึงพฤติกรรมของตำแหน่งที่พบการบิดงอ รอยคอด การเกิดการยุบ และการขึ้นรูปที่ปลอดภัย จากผลการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวมา สามารถใช้ผลลัพธ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แทนการขึ้นรูปชิ้นงานจริงได้เนื่องจากการศึกษาผลลัพธ์พบว่า การเกิดความเครียดของชิ้นงานทุกตำแหน่งมีความสอดคล้อง การกระจายตัวของค่าความเครียดมีการกระจายตัวใกล้เคียงกัน การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาจากการขึ้นรูปพบว่าทุกตำแหน่งเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูป เป็นในทางเดียวกัน มีความแตกต่างเฉลี่ย 3.51 เปอร์เซ็นต์ และพฤติกรรมการขึ้นรูปชิ้นงานที่สอดคล้องกันทั้งการทดลองจริงและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งผลการวิเคราะห์เป็นเช่นเดียวกับ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในการจำลองวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงการขึ้นรูปชิ้นงานจริง ในการขึ้นรูปถาดอะลูมิเนียม AL 1100 หนา 1.00 mm. โดยใช้โปรแกรมอ็อปทริสจากผลงานการทดลองทั้งสองแนวทาง ได้ผลใกล้เคียงกันมากมีความเห็นให้การจำลองผลแทนการทดลองขึ้นรูปจริง จึงทำให้เกิดผลดีทางธุรกิจและลดต้นทุนการผลิต [36] และการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ เพื่อศึกษาและทำนายผลการขึ้นรูปโลหะกับวัสดุแผ่นความหนา 0.81 มม. ซึ่งวัสดุมีสมบัติทางกลแตกต่างกันใน แต่ละทิศทางการรีด และทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับการขึ้นรูปจริง จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถจำลองและทำนายความเสียหายได้จริง [4]

2. การวิเคราะห์อิทธิพลของรัศมีคायต่อการเกิดความเครียด ความหนา และพฤติกรรมการบิดงอของชิ้นงาน จากการทดลองพบว่าความเครียด โดยที่รัศมีคायขนาดเล็ก การไหลตัวของวัสดุชิ้นงานจะไหลตัวได้ยาก และวัสดุเกิดความเค้นสูงขึ้นบริเวณที่วัสดุไหลผ่านรัศมีคाय ส่งผลให้ค่าความเครียดสูง ส่วนความหนาบบริเวณผนังชิ้นงานจะบางลงเป็นเพราะเนื้อวัสดุถูกยึดด้วยคायขนาดเล็ก และลากลงด้วยพื้นซึ่งจึงทำให้มีการยึดตัวสูง ซึ่งตำแหน่งที่ 6 เป็นจุดวิกฤตพบการบิดงอของชิ้นงาน และค่าความเครียดอยู่เหนือเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป แต่เมื่อปรับรัศมีคायใหญ่ขึ้นทำให้วัสดุไหลง่าย

ลดการยึดตัวและค่าความเครียดทุกตำแหน่งอยู่ที่เส้นโค้งจำกัดการขึ้นรูป เช่นเดียวกับ การศึกษาอิทธิพลของค่ารัศมีพื้นซ์และรัศมีคาย พบว่ารัศมีพื้นซ์เปลี่ยนแปลงไปแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปจะแปรเปลี่ยนน้อยมาก เนื่องจากรัศมีพื้นซ์มีผลต่อแรงที่ใช้ในการงอขึ้นด้วยในขั้นตอนแรกเท่านั้นและเมื่อรัศมีคายแปรเปลี่ยนไป แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปจะแปรเปลี่ยนไปอย่างมาก รัศมีคายน้อยจะใช้แรงในการลากขึ้นรูปมาก รัศมีคายมากจะใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อย [7]



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาการบิดงอของฝาซีล โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Dyna Form 5.5 จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยลากขึ้นรูปวัสดุที่ใช้ในการทดลองทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตร เพื่อทำการวิเคราะห์ความเครียด ความหนา พฤติกรรมการบิดงอของชิ้นงาน

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 เปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการวิเคราะห์จากการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1. เปรียบเทียบพฤติกรรมการบิดงอจากการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่ามีความสอดคล้องกัน

2. การวิเคราะห์ค่าความเครียดบนชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง การขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าความเครียดการกระจายตัวใกล้เคียงกัน

3. การวิเคราะห์ค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลง เปรียบเทียบกันระหว่าง การขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าความหนาแตกต่างกันเพียง 3.51 เปอร์เซ็นต์

5.1.2 การประยุกต์ใช้แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตร

ผลการสร้างแผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตรจากการทดลองจริง สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานจริงได้ และทำนายผลการขึ้นรูปได้สอดคล้องกับความเสียหาย เมื่อเทียบกับแผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแตกต่าง 1.24 เปอร์เซ็นต์ ณ ความเครียดในแนวระนาบ

5.1.3 ผลการการปรับค่าพารามิเตอร์ของพื้นที่และคาย จากการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การปรับรัศมีพื้นที่ 2 มิลลิเมตร และรัศมีคาย 3 มิลลิเมตร มีผลให้ การไหลตัวของแผ่นชิ้นงาน ได้ดี ทำให้ไม่เกิดการฉีกขาด ความหนาของชิ้นงานเฉลี่ยทุกตำแหน่งมีค่าลดลง 0.308 มิลลิเมตร และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของพื้นที่และคาย ไปออกแบบแม่พิมพ์ ผลปรากฏว่าสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ประสบความสำเร็จ

5.2 การอภิปรายผล

จากผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าสามารถแสดงถึงพฤติกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่น ที่มีแนวโน้มของผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน ดังนั้นจึงสามารถนำผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จากการจำลองการขึ้นรูป ไปประยุกต์ใช้สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น สำหรับในส่วนการแก้ไขแม่พิมพ์ พบว่ารัศมีคาย มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปชิ้นงานฝาชิล ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนนิติก AISI 304 โดยที่รัศมีคายขนาดเล็ก การไหลตัวของวัสดุชิ้นงานจะไหลตัวได้ยาก และวัสดุเกิดความเค้นสูงขึ้นบริเวณที่วัสดุไหลผ่านรัศมีคาย จึงทำให้มีการยืดตัวสูง ซึ่งบริเวณจุดวิกฤตพบการฉีกขาดของชิ้นงาน และค่าความเครียดในบริเวณนั้นมีค่าสูงกว่าเส้นขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLC) ของวัสดุ และเมื่อปรับรัศมีพื้นที่ 2 มิลลิเมตร และรัศมีคาย เป็น 3 มิลลิเมตร ซึ่งได้จากการจำลองการขึ้นรูป ผลสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้สำเร็จ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า รัศมีคายมีผลต่อการขึ้นรูป โดยรัศมีคายที่มีขนาดโตจะช่วยในการไหลตัวของวัสดุได้ดีกว่า รัศมีคายที่มีขนาดเล็ก และการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการขึ้นรูปสามารถนำไปประยุกต์ใช้หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์

5.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรมีการศึกษาความไว (Sensitivity) ของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ หรือตัวแปรใดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเล็กน้อย ที่จะส่งผลในกระบวนการขึ้นรูปจากการจำลองขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
2. ควรมีการศึกษาความหนาของชิ้นงานทดลองที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อค่าความเครียดจากการวัดกริดที่บริเวณผนังของชิ้นงาน ในการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

รายการอ้างอิง

- [1] Mattiasson, K., **On finite element simulation of steel metal forming process in industry**, European Congress on computational methods in applied sciences and engineering, Barcelona, 2000. pp.11-14.
- [2] คมสันต์ งามขำ, **ขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา**, ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2549.
- [3] Takuda, H., **Finite element analysis of limit strains in biaxial stretching of sheet metals allowing for ductile fracture**, Department of Energy Science and Technology, Kyoto University, 2000.
- [4] Nakamachi, E., **“Static-Explicit Plastic Finite Element Simulation and Virtual Manufacturing of Sheet Metal Forming,”** Engineering Computations, Vol. 13, No. 2/34, 1996. pp. 283-307.
- [5] ชัยยศ นูระณะชีพ, **การวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์โดยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป**, ภาควิชาวิศวกรรมการผลิตบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระนครเหนือ, 2549.
- [6] ธนสาร อินทรกำธร, **“5 คำถามกับการจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่น,”** ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [7] ชนะชัย วลิตวารังค์กูร และ ชัยวัฒน์ ทองหลี่, **การศึกษาตัวแปรในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น**, ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.
- [8] มาโนช กรอบเงิน, **การออกแบบแม่พิมพ์และการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์การลากขึ้นรูปชิ้นงานขอบสันผ่าข้างท้ายรถกระบะ**, ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [9] Kobayashi, S., Oh, S. and Altan, T., **Metal Forming and Finite Element Method**, New York Oxford University, 1989. pp.58-109.

- [10] พนา แซ่มสวัสดิ์, การแก้ปัญหาการย่นในงานขึ้นรูปด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2541.
- [11] สุบิน ชันดี, การศึกษาความไว้อุณหภูมิของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์, ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [12] ชาญ ถนัดงาน, “เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะและพื้นฐานการขึ้นรูปโลหะ,” ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2541.
- [13] Manfred Jasner, Meinhard Hecht, Wolfgang Beckmann, Heat Exchangers and Piping Systems from Copper Alloys - Commissioning, Operating and Shutdown, May 2009
- [14] Van Sant Enterprises, Inc. 80 Truman Road Pella, IA 50219 877-VAN-SANT.
- [15] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 4. : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550. หน้า 3-18.
- [16] R. W. Clough, **The Finite Element Method**. Pittsburgh, PA, September 1960, pp. 8-9.
- [17] Tai Hun Kwon, **IN TRODUCTION TO FINITE ELEMENT METHOD**, Department of Mechanical Engineering Pohang University of Science and Technology, pp. 2.
- [18] Daryl L. Logan, **FINITE ELEMENT METHOD Fourth Edition**, University of Wisconsin-Platteville.
- [19] MSC.Software Corporation, “**INTRODUCTION TO MSC. MARC AND MENTAT,**” 815 Colorado Boulevard Innsbrucker Ring 15 Los Angeles, 2007.
- [20] T. H. Kwon, FEM MODELLING INTRODUCTION, 2005.
- [21] MSC.Software Corporation, “**MSC. MARC USER GUIDE VERSION 2008 R1 VOLUME B.**” 815 Colorado Boulevard Innsbrucker Ring 15 Los Angeles, March 2008.
- [22] MSC.Software, “**MSC. MARC. MENTAT.**” 815 Colorado Boulevard Innsbrucker Ring 15 Los Angeles, 2003.
- [23] D.A.Anderson, J.C. Tannehill, and R.H. Pletcher, “**COMPUTATATIONAL FLUID MECHANICS AND HEAT TRANSFER,**” Hemisphere, Washington, DC, 1984.
- [24] GK Lal SK Chhouthury, “**FUNDAMENTALS OF MANUFACTURING PROCESSES,**” Alpha Science Internationnal Ltd. Harrow, U.K., 2005.

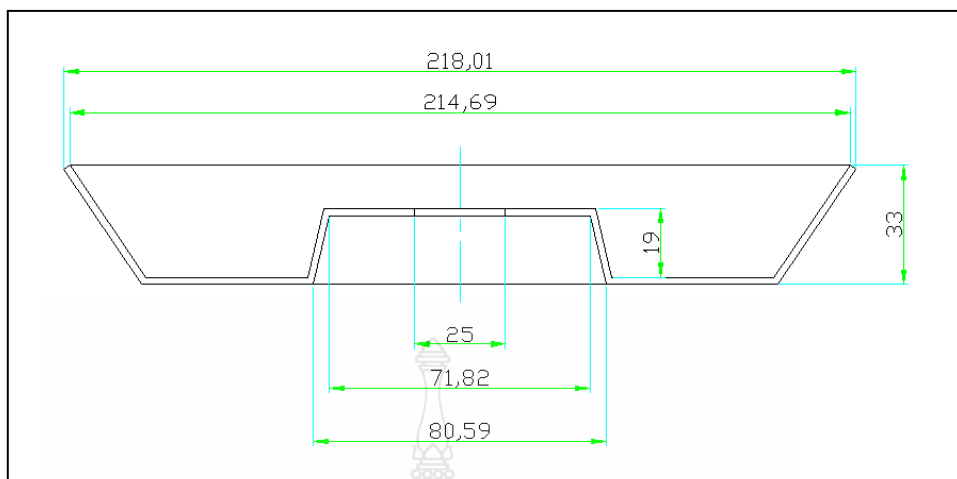
- [25] วิทยา สงวนวรรณ และทีมงานวิชาการ, “NX CAE THE FINITE ELEMENT (FEA) ANALYSIS,” : สำนักพิมพ์ เอนจิเนียร์ แอนด์ อคิเตค พลัส 315/22-23 ถ.สุขาภิบาล 6 ต. บางพลีใหญ่ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ 10540
- [26] รศ.ดร.เดช พุทธเจริญทอง, “ทฤษฎีพลาสติกซิติ์ และการเปลี่ยนรูปถาวร,” ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, :ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ 431/5 ถ.ประชากรายภูมิบำเพ็ญ เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร 10320
- [27] Frank J. Vecchio, Professor, **Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Membranes**, Department of Civil Engineering, University of Toronto , Ontario Canada.
- [28] Kurt Lage, Professor, “HANDBOOK OF METAL FORMING,” University of Stuttgart.
- [29] Bill Smith and Mark King, Bending Square and Retangular Tubing, May 16, 2002.
- [30] J D Square Inc. 2244 Eddie Williams Rd. Johnson City, Opyright 2009.
- [31] T. Pepelnjak , K. Kuzman, **Nomerical Determination of The Forming Limit Diagrams**, **Faculty of Mechanical Engineering**, University of Ljubljana , Askerceva 6 , SI-1000 Ljubljana, Slovenia.
- [32] David Roylance, **FINITE ELEMENT ANALYSIS**, Department of Materials Science and Engineering Massachusetts Institute of Technology Cambridge, February 28, 2001.
- [33] มานพ ตันตระบัณฑิตย์, **วัสดุวิศวกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 6 .:สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2542. หน้า. 102-108.
- [34] Administrator, วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์, 2010. Availble.//www.plastic.freevar.com (22 June 2010).
- [35] พรชัย คงวัฒนาชัย, **การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การขึ้นโลหะแผ่น**, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546.
- [36] สามารถ แซ่มคำ, **การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปลาดอลูมิเนียมโดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์**,วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546.
- [37] สวัสดิ์ โสคามุข, **การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2549.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
การลากขึ้นรูปชิ้นงานฝาซีลเครื่องซักผ้า

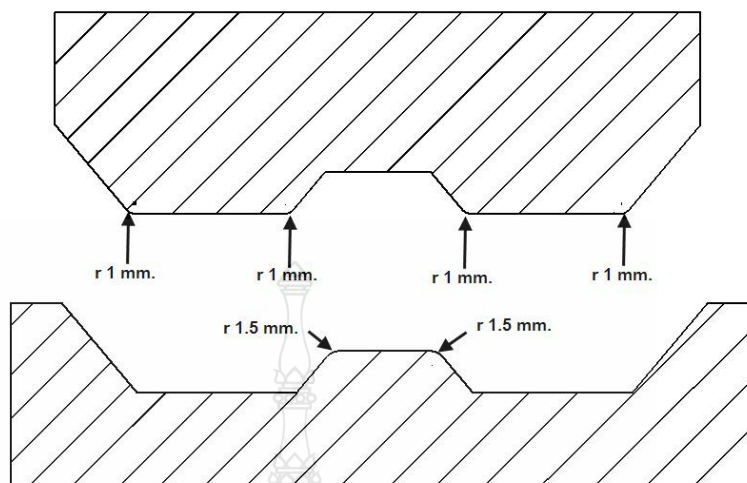




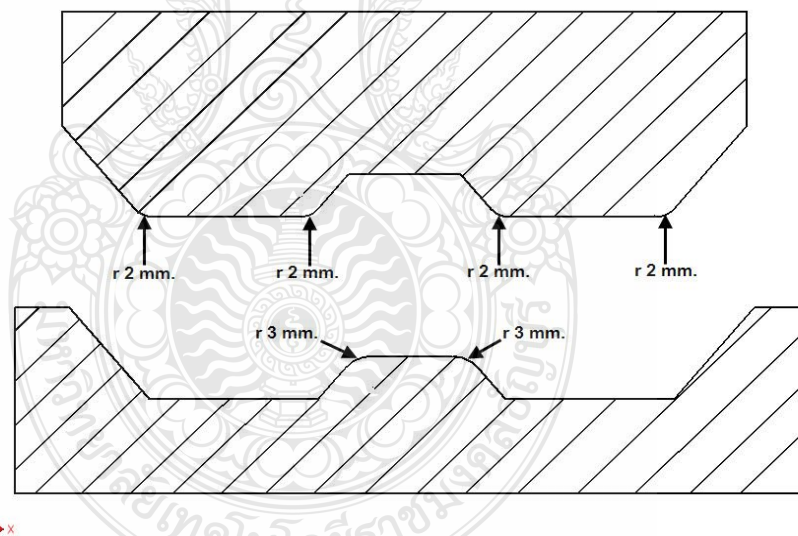
ภาพที่ ก.3 แบบฝาซิลเครื่องซักผ้า



ภาพที่ ก.4 ขนาดแผ่น Blank



ภาพที่ ก.5 ขนาดรัศมีของแม่พิมพ์ก่อนแก้ไข

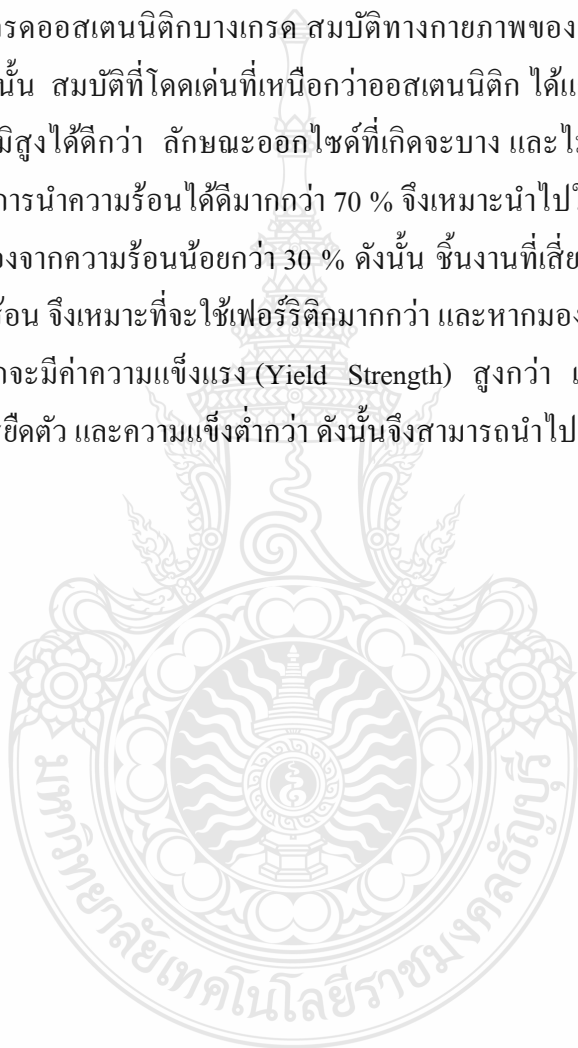


ภาพที่ ก.6 ขนาดรัศมีของแม่พิมพ์ที่แก้ไขใหม่

ภาพที่ ก.5 และ ก.6 แสดงตำแหน่งการปรับรัศมีจากขนาดพื้นที่ 1 มม. คาย 1.5 มม. เป็นรัศมีพื้นที่ 2 มม. คาย 3 มม. ทำการลากขึ้นรูปที่เปอร์เซ็นต์การลดตัว 33 เปอร์เซ็นต์

การเลือกชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับงานขึ้นรูป

ปัจจัยในการขึ้นรูปในทางเทคนิคที่เป็นส่วนสำคัญ ได้แก่สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลของวัสดุ และสัดส่วนการขึ้นรูป ซึ่งในงานอุตสาหกรรมได้มีการพัฒนาความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 และ 430 ซึ่งเป็นตัวแทนของออสเทนนิติกและเฟอร์ริติก ตามลำดับ โดยเฉพาะกลุ่มเฟอร์ริติกได้พัฒนาขึ้นอย่างมากจนมีหลายเกรดที่มีความสามารถ และมีคุณสมบัติที่เทียบเท่า และเหนือเกรดออสเทนนิติกบางเกรด สมบัติทางกายภาพของเฟอร์ริติกไม่ใช่มีแค่สมบัติความเป็นแม่เหล็กเท่านั้น สมบัติที่โดดเด่นที่เหนือกว่าออสเทนนิติก ได้แก่ การที่มีสมบัติทนต่อการเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่า ลักษณะออกไซด์ที่เกิดจะบาง และไม่หลุดร่อนง่ายเหมือนเกรดออสเทนนิติก สมบัติการนำความร้อนได้ดีมากกว่า 70 % จึงเหมาะนำไปใช้เป็นเครื่องครัว ในขณะที่สมบัติการขยายตัวเนื่องจากความร้อนน้อยกว่า 30 % ดังนั้น ชิ้นงานที่เสี่ยงต่อความเสียหายเนื่องจากการขยายตัวจากความร้อน จึงเหมาะที่จะใช้เฟอร์ริติกมากกว่า และหากมองในด้านสมบัติเชิงกลพบว่า โดยภาพรวมเฟอร์ริติกจะมีค่าความแข็งแรง (Yield Strength) สูงกว่า แต่มีค่าความแข็งแรงสูงสุด (Tensile Strength) การยึดตัว และความแข็งต่ำกว่า ดังนั้นจึงสามารถนำไปตัด พับ หรือ แปรรูปได้ง่ายกว่า



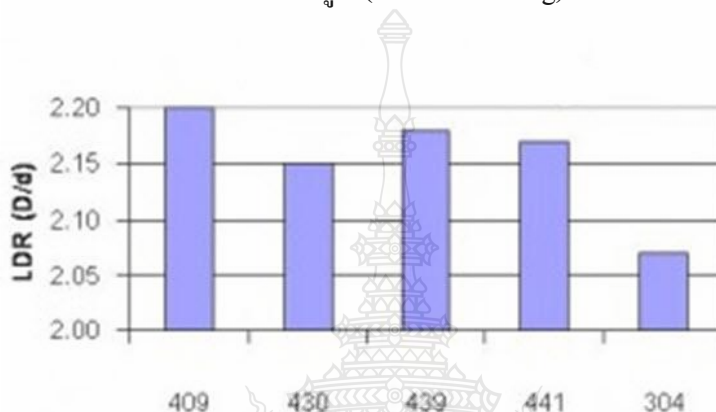
ตารางที่ ก.1 ชนิดของสมบัติทางกลเหล็กกล้าไร้สนิม

ชนิด	ตามมาตรฐาน ASTM A240-05a			
	YS min Mpa	TS min Mpa	EI min %	Hardness Max HRB
เกรด 409	170	380	20	88
เกรด 410B	205	415	22	89
เกรด 430	205	450	22	89
เกรด 434	240	450	22	89
เกรด 436	240	450	22	89
เกรด 439	205	415	22	89
เกรด 441	205	415	22	89
เกรด 444	275	415	20	96
เกรด 446	310	470	20	96
เกรด 447	415	550	20	20 HRC
เกรด 304	205	515	40	92

ตารางที่ ก.2 ชนิดของสมบัติทางกายภาพเหล็กกล้าไร้สนิม

ชนิด	ความหนาแน่น g/cm ²	ค่าแรงต้านทานไฟฟ้า โอมม mm ² /m.	ความจุความร้อนจำเพาะ 0-100 องศา JKg	ยังโมดูลัส N/mm ² (10 ²)
เกรด 409-410	7.7	0.58	460	220
เกรด 430-440	7.7	0.60	460	220
เกรด 445-446	7.7	0.62	460	220
เกรด 304	7.9	0.72	500	200

ความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเกรดเฟอร์ริติกที่จะนำมาทดแทน และพารามิเตอร์ที่จะต้องปรับเปลี่ยนในขั้นตอนการผลิตเป็นส่วนสำคัญ โดยทั่วไปเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปออสเทนนิติก สามารถนำมาใช้กับเฟอร์ริติกได้เลย แต่จะต้องมีการปรับพารามิเตอร์ในการผลิตบางค่า สัดส่วนการขึ้นรูปสูงสุด (Limited Drawing Ratio : LDR = เส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงาน ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวกด = D/d) ของเกรดเฟอร์ริติกจะสูงกว่าเกรดออสเทนนิติก แต่ความลึกของการึงดึงขึ้นรูป (Stretch Forming) จะต่ำกว่าชนิดเกรดออสเทนนิติก

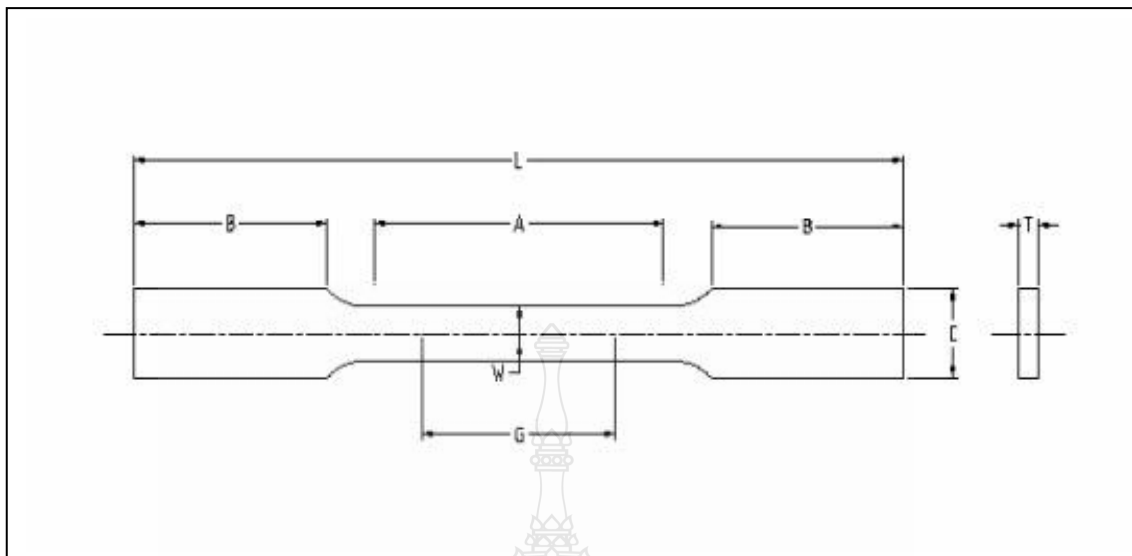


ภาพที่ ก.7 เปรียบเทียบสัดส่วนการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม

ส่วนพารามิเตอร์ในการขึ้นรูปที่ควรปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับเฟอร์ริติก คือ LDR อยู่ในช่วง 2.05 – 2.10 ช่องว่างระหว่างตัวกดและคาย (Clearance) ประมาณ 10-15% ของความหนา รัศมีความโค้งของคาย (Die Radius) ประมาณ 4-8 เท่าของความหนา ส่วนการดีดกลับ (Spring Back) จะต่ำกว่าออสเทนนิติก ดังนั้นจึงควรออกแบบระยะเพื่อการดีดกลับน้อยลง นอกจากนี้การที่เฟอร์ริติกมีสมบัติการแข็งตัวจากงานกล (Work Hardening) ต่ำมาก จึงมีความได้เปรียบกว่าในการแปรรูป ส่วนประเด็นที่เป็นจุดด้อยหนึ่งของเฟอร์ริติกคือ การเกิดผิวลายเส้นเชือก (Roping or Ridging) ขนานกับแนวการยึดตัวหลังการขึ้นรูป หากเป็นชิ้นงานที่ต้องอวดผิวด้วยก็จะต้องทำการขัดออก ในการเลือกหากขึ้นรูปไม่ลึกมากและไม่ซับซ้อน อาจเลือกใช้เกรดเฟอร์ริติก ชนิด 430 หรือเกรดเฟอร์ริติกที่มีโครเมียมประมาณ 14-18% ซึ่งนิยมใช้การมาก แต่หากต้องการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น คุณต้องเลือกใช้เฟอร์ริติกกลุ่มเสถียร ที่มีไทเทเนียมและไนโอเบียมเป็นส่วนประกอบ ได้แก่ เกรด 439 และเกรด 441 เป็นต้น



ภาคผนวก ข
ข้อมูลการทดลอง



ภาพที่ ข.1 ชิ้นทดสอบการดึง (Plain-End Specimen)

ชิ้นทดสอบการดึงเพื่อหาค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (n) ของวัสดุโลหะแผ่น ตามมาตรฐาน ASTM E 646-91 ดังภาพที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 ขนาดของชิ้นทดสอบการดึง

รายละเอียด	ขนาด	
	นิ้ว	มิลลิเมตร
G ความยาวเกจ	2.000 ± 0.005	50.00 ± 0.01
W ความกว้าง	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25
T ความหนา	ความหนาของชิ้นทดสอบ	
R รัศมีของส่วนโค้ง, น้อยที่สุด	1/2	13
L ความยาวรวม, น้อยที่สุด	8	200
A ความยาวของการลดพื้นที่หน้าตัด, น้อยที่สุด	$2 \frac{1}{4}$	60
B ความยาวของส่วนที่ใช้จับยึด, น้อยที่สุด	2	50
C ความกว้างของส่วนที่ใช้จับยึด	3/4	20

ข้อมูลการทดสอบดึงวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 หนา 2 mm. ตามทิศทางการรีด 0 องศา 45 องศา และ 90 องศา ข้อมูลที่จากการบันทึกในช่วงความยืด (Gage Length) 50 mm. ประมาณ 3,200 ค่า ได้ค่า $K = 1154$ ค่า $n = 0.3528$ และค่า $R = 1.05796$

Gauge Length	Thickness	Width	Elastic	Break Force									
mm	mm	mm	4- 16 kN										
50.07	1.93	25.02	N/mm2	kN									
			69494.2	26.35									
Break_Stress	YS1_Force	YS1_Stress	YP_Force	YP_Stress	Max_Force	Max_Stress	Elongation	n value	r value	value			
0.20%	0.20%	0.20%	0.1 %/FS	0.1 %/FS				10- 20 %	20%	10-20%			
N/mm2	kN	N/mm2	kN	N/mm2	kN	N/mm2	%						
545.677	16.8375	348.685	32.1219	665.206	32.5969	675.043	56.0415	0.36231	0.92168	1216.5			
Time	Force	Stroke	Ext.1	Width Sensor									
sec	kN	mm	mm	mm									
0	0.5267187	0	0	0									
0.05	0.5270312	0	-0.0015625	0									
0.1	0.5279688	0.002	-0.003125	-4.69E-04									
0.15	0.5339062	0.004	-7.81E-04	-0.0003125									
0.2	0.5435938	0.006	-0.003125	-0.0003125									
0.25	0.556875	0.008	-3.91E-03	-1.56E-04									
0.3	0.5721875	0.01	-7.81E-04	1.56E-04									
0.35	0.5921875	0.012	0	-4.69E-04									
0.4	0.6146875	0.014	-2.34E-03	-1.56E-04									

ภาพที่ ข.2 ข้อมูลสมบัติวัสดุทิศทางการรีด 0 องศา

Shape:	Batch Size:	SubBatch Size:												
Plate	1	1												
Name:	Thickness	Width	Gauge Length											
Size Unit:	mm	mm	mm											
45	1.93	25.03	50.04											
Name	Elastic	Break_Force	Break_Stress	YS1_Force	YS1_Stress	YP_Force	YP_Stress	Max_Force	Max_Stress	Elongation	n value	r value	k value	
Parameter	4- 16 kN			0.20%	0.20%	0.1%/FS	0.1%/FS				10- 20 %	20%	10-20%	
Units	N/mm2	kN	N/mm2	kN	N/mm2	kN	N/mm2	kN	N/mm2	%				
45	45641.2	24.6484	510.236	16.0544	332.334	13.8725	287.168	30.9375	640.423	61.251	0.3477	1.1616	981.97	
Time	Force	Stroke	Ext.1	Width Sensor										
sec	kN	mm	mm	mm										
0	0.230781	0	0	0										
0.05	0.231094	0.001	-7.81E-04	-1.56E-04										
0.1	0.233594	0.003	0	0										
0.15	0.240781	0.005	0	1.56E-04										
0.2	0.250938	0.007	0	1.56E-04										
0.25	0.262188	0.009	0	0										
0.3	0.275313	0.011	7.81E-04	1.56E-04										
0.35	0.292031	0.013	0.0015625	1.56E-04										
0.4	0.309688	0.015	2.34E-03	-1.56E-04										
0.45	0.328594	0.017	7.81E-04	1.56E-04										

ภาพที่ ข.3 ข้อมูลสมบัติวัสดุทิศทางการรีด 45 องศา

Shape:	Batch Size:	SubBatch Size:												
Plate	1	1												
Name:	Thickness	Width	Gauge Length											
Size Unit:	mm	mm	mm											
90	1.93	25.01	50.08											
Name	Elastic	Break Force	Break Stress	YS1 Force	YS1 Stress	YP Force	YP Stress	Max Force	Max Stress	Elongation	n value	r value	k value	
Parameter	4- 16 kN			0.20%	0.20%	0.1%/FS	0.1%/FS				10- 20 %	20%	10-20%	
Units	N/mm2	kN	N/mm2	kN	N/mm2	kN	N/mm2	kN	N/mm2	%				
90	79886.9	26.8531	556.319	16.3431	338.582	13.1381	272.184	31.7281	657.315	59.7843	0.34843	0.98696	1264	
1- 1														
Time	Force	Stroke	Ext. 1	Width Sensor										
sec	kN	mm	mm	mm										
0	0.3685938	0	0	0										
0.05	0.36875	0.002	-7.81E-04	-1.56E-04										
0.1	0.3729688	0.004	0.0015625	1.56E-04										
0.15	0.3815625	0.006	7.81E-04	0.000625										
0.2	0.3928125	0.008	0.003125	1.56E-04										
0.25	0.4054688	0.01	0.0015625	1.56E-04										
0.3	0.42375	0.012	7.81E-04	0										
0.35	0.443125	0.014	7.81E-04	0										
0.4	0.4632812	0.016	2.34E-03	-1.56E-04										

ภาพที่ ข.4 ข้อมูลสมบัติวัสดุทิศทางรีด 90 องศา

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลการยืดและหดของกริดวงกลมในแนวแกนหลักก่อนแก้ไขแม่พิมพ์ (ขนาดก่อนการเปลี่ยนแปลง 2.5 มม.) ของการทดลองจริง

ตำแหน่ง	ความยาวของกริดวงกลม (มม.)							ความเครียด (%)
	1	2	3	4	5	6	เฉลี่ย	
1	2.6153	2.6344	2.6635	2.6683	2.6023	2.5516	2.6226	4.903
2	2.5759	2.6266	2.5952	2.4149	2.4987	2.4699	2.5302	1.208
3	2.5763	2.587	2.5873	2.5478	2.5281	2.5184	2.5575	2.299
4	2.547	2.5373	2.5281	2.6725	2.6627	2.6352	2.5971	3.885
5	2.5952	2.5759	2.5881	2.5279	2.5195	2.5189	2.5543	2.170
6	3.8211	3.8115	3.8256	3.8114	3.872	3.8114	3.8255	53.020
7	2.7509	2.7688	2.722	2.7889	2.8075	2.8654	2.7839	11.357
8	3.0294	3.0486	3.0679	3.1354	3.1741	3.126	3.0969	23.876

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลการขีดและหคของกริดวงกลมในแนวแกนรองก่อนแก้ไขแม่พิมพ์ (ขนาดก่อนการเปลี่ยนแปลง 2.5 มม.) ของการทดลองจริง

ตำแหน่ง	ความยาวของกริดวงกลม (มม.)							ความเครียด (%)
	1	2	3	4	5	6	เฉลี่ย	
1	2.3057	2.2865	2.3161	2.2429	2.1888	2.1792	2.2532	-9.872
2	2.518	2.4215	2.4409	2.3745	2.3733	2.3636	2.4153	-3.388
3	2.518	2.4902	2.5277	2.4698	2.4893	2.4664	2.4936	-0.257
4	2.5085	2.5083	2.4988	2.5189	2.5757	2.5601	2.5284	1.135
5	2.5391	2.5183	2.5115	2.5279	2.4315	2.4222	2.4918	-0.330
6	2.9547	2.9182	3.0165	2.9913	2.947	2.9141	2.9570	18.279
7	2.7019	2.6723	2.6455	2.5472	2.547	2.5669	2.6135	4.539
8	2.5083	2.5276	2.5471	2.3545	2.3266	2.3796	2.4406	-2.375

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลการขีดและหคของกริดวงกลมในแนวแกนหลักหลังแก้ไขแม่พิมพ์ (ขนาดก่อนการเปลี่ยนแปลง 2.5 มม.) ของการทดลองจริง

ตำแหน่ง	ความยาวของกริดวงกลม (มม.)							ความเครียด (%)
	1	2	3	4	5	6	เฉลี่ย	
1	2.6305	2.5901	2.6112	2.6823	2.6922	2.6824	2.6481	5.924667
2	2.6063	2.5758	2.5698	2.5674	2.6083	2.6179	2.5909	3.636667
3	2.4991	2.4895	2.462	2.5665	2.518	2.5181	2.5089	0.354667
4	2.6831	2.6552	2.6451	2.6531	2.682	2.6531	2.6619	6.477333
5	2.5414	2.5522	2.55	2.6545	2.6828	2.673	2.6090	4.359333
6	3.1559	3.2825	3.0884	3.5406	3.5521	3.5407	3.3600	34.40133
7	2.9521	2.9618	2.8847	3.0994	2.9937	3.059	2.9918	19.67133
8	3.3683	3.3705	3.36	3.7047	3.7051	3.6757	3.5307	41.22867

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลการยืดและหดของกริดวงกลมในแนวแกนรองหลังแก้ไขแม่พิมพ์ (ขนาดก่อนการเปลี่ยนแปลง 2.5 มม.) ของการทดลองจริง

ตำแหน่ง	ความยาวของกริดวงกลม (มม.)							ความเครียด (%)
	1	2	3	4	5	6	เฉลี่ย	
1	2.2038	2.2302	2.2412	2.248	2.2489	2.2578	2.238317	-10.4673
2	2.1926	2.1926	2.1899	2.3456	2.3308	2.3109	2.2604	-9.584
3	2.4045	2.4131	2.3664	2.4702	2.489	2.4892	2.438733	-2.45067
4	2.4034	2.3935	2.3761	2.5085	2.4891	2.4699	2.440083	-2.39667
5	2.2657	2.3494	2.3013	2.402	2.4315	2.3926	2.357083	-5.71667
6	2.7524	2.8309	2.7509	2.9909	2.9637	2.9527	2.873583	14.94333
7	2.5088	2.5373	2.5472	2.4713	2.567	2.5667	2.53305	1.322
8	2.3356	2.3199	2.326	2.3347	2.3452	2.3257	2.331183	-6.75267

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลความหนาของชิ้นงานจากการขึ้นรูปทดลองจริงก่อนแก้ไขแม่พิมพ์

ตำแหน่ง	ความหนา(มม.)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
1	2.020	2.047	2.049	2.016	2.032	2.033
2	1.974	1.998	1.994	1.975	1.984	1.985
3	1.926	1.942	1.941	1.929	1.935	1.935
4	1.935	1.937	1.938	1.928	1.935	1.935
5	1.913	1.918	1.905	1.914	1.913	1.913
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	1.721	1.746	1.710	1.701	1.720	1.720
8	1.673	1.704	1.622	1.652	1.663	1.663

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลความหนาของชิ้นงานจากการขึ้นรูปทดลองจริงหลังแก้ไขแม่พิมพ์

ตำแหน่ง	ความหนา(มม.)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
1	1.987	1.97	1.96	1.97	1.972	1.972
2	1.934	1.919	1.92	1.92	1.924	1.923
3	1.879	1.881	1.86	1.87	1.873	1.873
4	1.875	1.869	1.85	1.86	1.864	1.864
5	1.844	1.831	1.82	1.82	1.83	1.829
6	1.603	1.594	1.64	1.62	1.615	1.614
7	1.481	1.479	1.53	1.54	1.509	1.508
8	1.318	1.354	1.37	1.43	1.371	1.369

ตารางที่ ข.8 ข้อมูลค่าความเครียดหลักด้วยการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ก่อนแก้ไขแม่พิมพ์

ตำแหน่ง	ค่าความเครียดหลัก (%)						
	1	2	3	4	5	6	เฉลี่ย
1	6	5.98	5.97	5.97	5.94	5.95	5.968
2	4.3	4.31	4.29	4.13	3.95	3.94	4.153
3	1.44	1.124	1.485	0.997	1.254	0.996	1.216
4	4.48	5.53	6.45	5.36	5.56	4.78	5.360
5	4.75	7.4	6.48	6.8	7.72	7.12	6.712
6	38.56	42.98	48.95	44.79	44.31	49.48	44.845
7	15.55	16.14	15.72	15.86	15.78	16.13	15.863
8	21.78	22.58	25.5	23.53	23.05	24.75	23.532

ตารางที่ ข.9 ข้อมูลค่าความเครียดตรงด้วยการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ก่อนแก้ไขแม่พิมพ์

ตำแหน่ง	ค่าความเครียดตรง (%)						
	1	2	3	4	5	6	เฉลี่ย
1	-11.01	-10.76	-9.87	-11.07	-12.02	-9.84	-10.762
2	-6.66	-6.289	-5.78	-6.09	-6.32	-6.5	-6.273
3	-1.38	-1.801	-1.74	-1.66	-2.55	-1.57	-1.784
4	-1.86	-1.742	-1.64	-1.83	-1.77	-1.65	-1.749
5	-6.08	-5.587	-5.39	-5.3	-5.59	-5.78	-5.621
6	14.55	14.31	13.58	14.52	14.09	14.78	14.305
7	6.51	6.31	6.1	6.05	6.51	6.62	6.350
8	-1.43	-1.39	-1.47	-1.27	-1.46	-1.36	-1.397

ตารางที่ ข.10 ข้อมูลค่าความหนาด้วยการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ก่อนแก้ไขแม่พิมพ์

ตำแหน่ง	ความหนา(มม.)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
1	2.008	2.02	2.032	2.04	2.018	2.0236
2	1.948	1.955	1.941	1.949	1.953	1.9492
3	1.895	1.94	1.918	1.893	1.936	1.9164
4	1.892	1.889	1.893	1.89	1.889	1.8906
5	1.833	1.835	1.831	1.818	1.82	1.8274
6	0	0	0	0	0	0
7	1.56	1.561	1.559	1.553	1.56	1.5586
8	1.524	1.513	1.505	1.519	1.524	1.517

ภาคผนวก ค

วิธีสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304



การสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

1. ตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 2 mm. ขนาด 200 × 200 mm. ใช้เป็นชิ้นงานทดสอบนำไปตัดขอบมีรัศมี 40 mm. 50 mm. 57.5 mm. 65 mm. 72.5 mm. 80 mm. และแผ่นเต็ม อย่างละจำนวน 10 แผ่น สำหรับการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป

2. นำชิ้นงานทดสอบมาสร้างกริดวงกลม

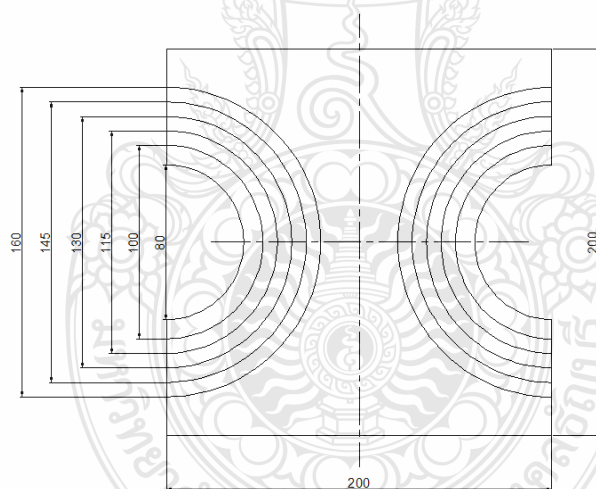
2.1 ใช้น้ำยาล้างทำความสะอาด ชิ้นทดสอบ เพื่อกำจัดคราบไขมัน

2.2 นำชิ้นงานทดสอบมาวางบนแผ่นรองที่ต่อพ่วงกับขั้วลบอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า

2.3 นำแผ่นกรองกวดกัด (Stencils) มาวางทับซ้อนแผ่นชิ้นงานทดสอบ

2.4 นำผ้าสักหลาดมาชุบน้ำยากรดกัดสูตร LNC-Z Electrolyte) สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 วางทับแผ่นกรองกวดกัด

2.5 เปิดสวิตช์อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขั้วบวกต่อกับลูกกลิ้ง และนำลูกกลิ้งกลิ้งไปมาบนผ้าสักหลาด



ขนาด (มม.)	200×200	R40	R50	R57.5	R65	R72.5	R80	รวม
จำนวน (ชิ้น)	10	10	10	10	10	10	10	70

ภาพที่ ค.1 การตัดชิ้นงานทดสอบตามค่ารัศมี



ภาพที่ ค.2 สร้างกริดโดยวิธีกัดกรดด้วยไฟฟ้า (Electrochemical Etching)

3. นำชิ้นงานทดสอบขึ้นรูปโดม โดยใช้สารหล่อลื่นเป็น น้ำมันขึ้นรูปรีโนฟอร์ม น้ำมันมะพร้าวและแผ่นโพลิเอททีลีน ทดลองขึ้นรูปจนชิ้นงานเกิดการคอด จึงหยุด

4. วัดการยึดตัวของกริดบนแผ่นขึ้นงานด้วยโปรแกรม Dino Capture ตรงจุดที่ปลอดภัยและจุดที่เกิดความเสียหาย บริเวณเกิดการคอด แล้วนำค่าไปพล็อตบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป



ภาพที่ ค.3 วัดความเครียดหลักและความเครียดรอง



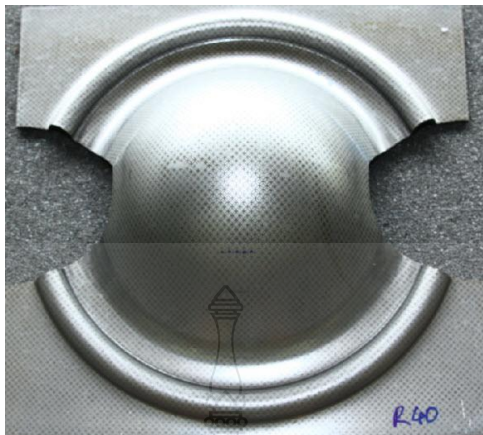
ภาพที่ ค.4 ชิ้นรูปขึ้นทศสอบจากแผ่นเต็ม สารหล่อลื่นน้ำมันรีโนฟอร์ม



ภาพที่ ค.5 ชิ้นรูปขึ้นทศสอบจากแผ่นเต็ม สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว



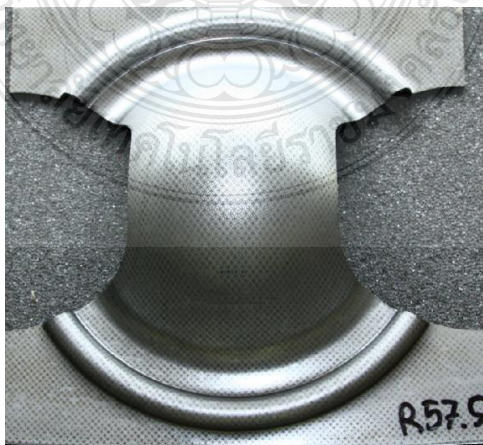
ภาพที่ ค.6 ชิ้นรูปขึ้นทศสอบจากแผ่นเต็ม สารหล่อลื่นน้ำมันรีโนฟอร์มและแผ่น โพลีเอททิลีน



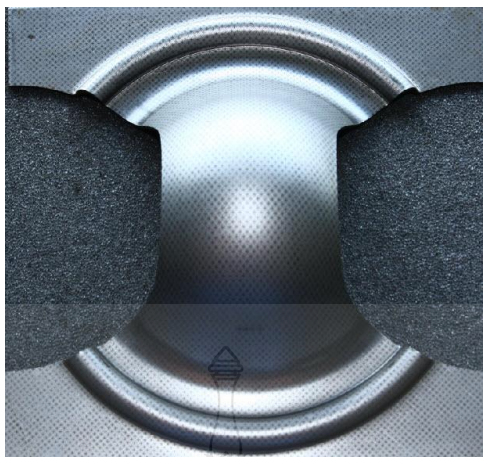
ภาพที่ ค.7 ชิ้นรูปขึ้นทศสอบจากแผ่นตัดขอบรัศมี 40 mm.



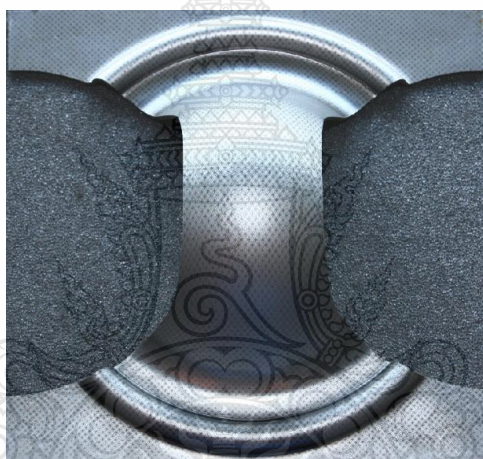
ภาพที่ ค.8 ชิ้นรูปขึ้นทศสอบจากแผ่นตัดขอบรัศมี 50 mm.



ภาพที่ ค.9 ชิ้นรูปขึ้นทศสอบจากแผ่นตัดขอบรัศมี 57.5 mm.



ภาพที่ ค.10 ชิ้นรูปชั้นทดสอบจากแผ่นตัดขอบรัศมี 65 mm.



ภาพที่ ค.11 ชิ้นรูปชั้นทดสอบจากแผ่นตัดขอบรัศมี 72.5 mm.



ภาพที่ ค.12 ชิ้นรูปชั้นทดสอบจากแผ่นตัดขอบรัศมี 80 mm.

ตาราง ค.1 ข้อมูลจากการยืดตัวของกริดวงกลม

ขนาด (มม.)	ชนิดสาร หล่อลื่น	ขั้นรูปปลดกัย		พบรอยคอด	
		ความเครียด หลัก(Major Strain) %	ความเครียด รอง(Minor Strain) %	ความเครียด หลัก(Major Strain) %	ความเครียด รอง(Minor Strain) %
200 × 200	น้ำมันรีโนฟอร์ม	32.76	9.98	75.64	7.984
		30.172	11.14	74.188	9.1
		29.728	11.14	74.632	9.728
		-	-	73.316	8.084
		-	-	68.384	8.844
		-	-	60.796	5.352
200 × 200	น้ำมันมะพร้าว	25.188	0.904	71.176	6.304
		29.736	2.44	70.28	2.776
		24.84	2.452	73.316	2.776
		-	-	74.84	4.292
		-	-	75.616	5.832
		-	-	85.832	5.432
		-	-	86.62	8.1
		-	-	86.216	5.44
		-	-	89.244	8.088
		-	-	85.196	5.516
200 × 200	น้ำมันรีโนฟอร์ม	41.472	15.296	53.6	0.66
	แผ่น โพลีเอททิลีน	39.568	12.636	54.352	-0.456
		42.22	11.496	52.24	10.828
		31.976	31.22	62.028	15.276
		36.152	30.08	-	-
		31.992	29.324	-	-
		49.44	25.912	-	-
		47.936	22.524	-	-

ตาราง ก.1 ข้อมูลจากการยืดตัวของกริดวงกลม (ต่อ)

ขนาด (มม.)	ชนิดสาร หล่อลื่น	ขึ้นรูปตลอดทั้ง		พบรอยคอด	
		ความเครียด หลัก(Major Strain) %	ความเครียด รอง(Minor Strain) %	ความเครียด หลัก(Major Strain) %	ความเครียด รอง(Minor Strain) %
200 × 200	น้ำมันรีโนฟอร์ม	50.204	24.784	-	-
	แผ่นโพลีเอททิลีน				
200 × 200	น้ำมันมะพร้าว	41.836	16.052	-	-
	แผ่นโพลีเอททิลีน	44.492	14.532	-	-
		41.856	17.192	-	-
		32.744	30.46	-	-
		31.976	28.564	-	-
R 40	น้ำมันรีโนฟอร์ม	39.184	4.672	61.18	-0.636
		38.816	5.432	60.04	0.504
		41.304	2.576	60.044	0.88
		48.496	2.952	62.316	1.26
		50.616	5.832	59.288	0.124
R 50	น้ำมันรีโนฟอร์ม	39.568	0.88	66.872	-2.912
		36.908	0.12	74.452	2.776
		36.644	0.98	77.868	-6.708
		36.504	2.244	79.768	-4.432
		35.772	0.124	76.728	-3.292
R 57.5	น้ำมันรีโนฟอร์ม	49.804	0.88	74.832	-2.912
		48.68	-0.636	70.664	-7.084
		49.432	-0.636	73.316	-5.118
		49.056	-1.776	73.692	-5.944
		50.64	0.132	74.452	-6.708

ตาราง ก.1 ข้อมูลจากการยืดตัวของกริดวงกลม (ต่อ)

ขนาด (มม.)	ชนิดสาร หล่อลื่น	ขึ้นรูปตลอดทั้ง		พบรอยคอด	
		ความเครียด หลัก(Major Strain) %	ความเครียด รอง(Minor Strain) %	ความเครียด หลัก(Major Strain) %	ความเครียด รอง(Minor Strain) %
R 65	น้ำมันรีโนฟอร์ม	67.024	-6.044	65.912	-8.66
		64.792	-8.652	67.396	-5.676
		66.46	-5.944	62.176	-6.796
		68.288	-5.604	63.668	-9.404
		47.644	-3.044	63.668	-9.032
R 72.5	น้ำมันรีโนฟอร์ม	63.308	-8.66	80.816	-6.796
		64.044	-5.676	81.56	-9.032
		65.54	-8.28	75.596	-7.916
		53.608	-7.536	102.816	-15.744
		53.616	-5.676	101.7	-14.624
R 80	น้ำมันรีโนฟอร์ม	59.948	-10.52	102.816	-13.136
		60.688	-8.66	109.896	-15
		74.104	-13.132	103.568	-18.352
		76.716	-10.148	108	-20
		75.988	-12.76	99.084	-14.252

ภาคผนวก ง
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



รวมบทความวิชาการประชุมวิชาการระดับชาติ
“มหาวิทยาลัยบูรพา ๒๕๕๔”
 Burapha University National Conference 2011
 จัดโดย มหาวิทยาลัยบูรพา และ เครือข่ายอุดมศึกษา ภาคตะวันออก

วันที่ ๖-๗ กรกฎาคม พ.ศ. ๒๕๕๔
 ณ อาคาร ๕๐ ปี มหาวิทยาลัยบูรพา
 (ศาสตราจารย์ประยูร จินทรประดิษฐ์)

คำกล่าวนำ

ทรงจัดประชุมวิชาการระดับชาติ “มหาวิทยาลัยบูรพา ๒๕๕๔” ในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อการเผยแพร่ผลงานวิจัยและงานสร้างสรรค์ การแลกเปลี่ยนเรียนรู้ด้านการวิจัยและงานสร้างสรรค์และการนำภูมิปัญญา ของกณณาจารย์ นักวิจัย และนิสิต / นัักศึกษา มหาวิทยาลัยบูรพา สถาบันอุดมศึกษา เครือข่ายพัฒนาอุดมศึกษา ภาคตะวันออก และสถาบันอุดมศึกษาทั่วประเทศ ผู้การใช้ประโยชน์ จากผลงานการวิจัยและ งานสร้างสรรค์ ในลักษณะการถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชนฐานราก การสร้างมูลค่าเพิ่มในเชิงพาณิชย์ และการคัดลอกสร้างสรรค์องค์ความรู้จากงานวิจัยและงานสร้างสรรค์ต่อไป

การประชุมวิชาการในครั้งนี้มีกิจกรรมสำคัญประกอบด้วย การบรรยายพิเศษ การนำเสนอ ผลงานการวิจัยและงานสร้างสรรค์แบบบรรยาย และผลงานการวิจัยและงานสร้างสรรค์แบบโปสเตอร์ ใน ๓ กลุ่มสาขา คือ กลุ่มสาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ กลุ่มสาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพ และ กลุ่มสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยบูรพาขอขอบคุณทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องที่ให้การส่งเสริมสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานในด้านต่าง ๆ ของการจัดการประชุมวิชาการระดับชาติ “มหาวิทยาลัยบูรพา ๒๕๕๔” ในครั้งนี้สืบเนื่องการไปได้ด้วยความเรียบร้อยอย่างดียิ่ง



มหาวิทยาลัยบูรพา

กรกฎาคม ๒๕๕๔

สารบัญ

หน้า

๓๓.	การพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องตัดเหล็กมีดลิฟท์กัน โดยการจำลองไฟในสโตนเมนต์ นายศิริชัย ต่อสกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.....	๑๖๖
๓๔.	การศึกษาและพัฒนาระบบการขึ้นรูปชิ้นส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยการ วิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ นายกิติ สมัครไทย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.....	๑๖๗
๓๕.	ผลการลดความร้อนของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ในระบบปรับอากาศโดยวิธีการฉีดน้ำยาเหลว นายภาณุภูมิ เกื้อคำ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.....	๑๖๘
๓๖.	วิเคราะห์หาสภาวะการเชื่อมโยงเชิงข้ามเปลือกด้วยอิมัลชันอินฟราเรด นายพรศักดิ์ จิตรอำไท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.....	๑๖๙
๓๗.	อุปกรณ์ TDR แบบมีดัดเหล็ก นายประวิทย์ บุญเอก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.....	๑๗๐
๓๘.	การสลับโหมคนโมโนสำหรับระบบไวเมกเมื่อสายอากาศด้านส่งส่งที่ นางสาวกัญญาพร คำชาย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	๑๗๑
๓๙.	การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์วิเคราะห์ได้ออบระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เพื่อหาพื้นที่ที่มีศักยภาพ ในการทำประปาบาดาลดื่มได้ ด้วยระบบกรองน้ำแบบออสโมซิสย้อนกลับ ในเขต อำเภอเมืองนครราชสีมา นางสาวกัญญาพร เข้มพิลา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา.....	๑๗๒
๔๐.	การหาแร่ที่มีที่เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบความผิดปกติด้วยวิธี K-MEAN นายรังสิวุฒิ ฤคัม มหาวิทยาลัยบูรพา.....	๑๗๓
๔๑.	การพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนด้วยชุดทดลองแบบ ๕ ชั้น เรื่อง การหักเหของแสงแก้วโบโรซิลิเกตที่นำกลับมาใช้ใหม่ นางสาวนิตตา หอมกลิ่น มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.....	๑๗๔
๔๒.	ผลของการใช้กิจกรรมเสนอแนะร่วมกับสื่อการเรียนรู้ที่ทำจากแก้วที่มีผลสัมฤทธิ์ ทางการเรียนเรื่อง สมบัติของแสง นางสาวอังศรารัตน์ น้อยสงวน มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.....	๑๗๕
๔๓.	การพัฒนาหน่วยสอนเรื่องคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้รูปแบบผสม นางสาวสมสกล นิลชอบ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.....	๑๗๖

๑๖๗

การประชุมวิชาการระดับชาติ "มหาวิทยาลัยบูรพา ๒๕๕๔" ๖-๗ กรกฎาคม ๒๕๕๔ ณ มหาวิทยาลัยบูรพา

การศึกษาและพัฒนากระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

Study and Development of Part forming process in Stainless steel AISI 304
by using FEM Analysis

กิตติ สมักรไทย¹ ศิริรัช ท่อสกุล²

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

E-mail: Kitti.samoi@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาการฉีกขาดของฝาซีล โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Dyna Form 5.5 จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการทดลอง โดยเอาชิ้นรูปวัสดุที่ใช้ในการทดลองทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตร เพื่อทำการวิเคราะห์ความเครียด ความหนา พฤติกรรมการฉีกขาดของชิ้นงาน

ผลการวิจัยพบว่าการออกแบบรัศมีของพunch 2 มิลลิเมตร และรัศมีของตาย 3 มิลลิเมตร ให้ผลการทดลองได้คุณภาพใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ดีที่สุด โดยปราศจากการฉีกขาด มีความหนาลดลงเฉลี่ย 0.112 มิลลิเมตร และมีควาหนาบนแตกต่างกันโดยเฉลี่ย 3.44 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ตำแหน่งวิกฤตของชิ้นงานมีค่าความเครียดหลักและค่าความเครียดรองลดลงซึ่งเกิดจากรัศมีของตายมีขนาดโต ทำให้ลดการบีบตัวของชิ้นงาน ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลการทดลองมีความสอดคล้องกันอย่างยิ่ง

ABSTRACT

This research was aimed to solve the tearing of cover seal by using finite element analysis with Dyna Form 5.5. The simulation result was compared to the experiment result by applying deep drawing stainless steel AISI 304 with 2.0 mm. thickness. In order to analyze the stress, thickness and tearing behavior of the work-pieces.

The result of the simulation was that the 2 mm. punch radius and 3 mm. die radius had produced better quality stainless steel parts without any fracture zone, which the thickness average decreased about 0.112 mm. and also the work-pieces had difference of the thickness about 3.44 %. Furthermore, the critical position of work-pieces had the major strain and minor strain decreased. It occurred from radius of die had bigger than usual; therefore the stretching work-piece was decreased. The results were a good agreement between the simulation and experimental data.

Keyword (s):Stainless Steel, FEM, Strain



รวมบทความ
การประชุมวิชาการย้ายงาน
วิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554
IE NETWORK CONFERENCE 2011

20 - 21 ตุลาคม 2554

โรงแรมแอมบาสเตอร์ซิตี จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ
การประชุมหน่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รศ.ดร.จิตรา รุ่งกิจการพานิช
ผศ.ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย
ผศ.ดร.ประมวล สุธีจาร์วัฒน

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

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.ปฎิภาณ จุ้ยเจิม
ดร.สุदारัตน์ วงศ์กั๊วเกียรติ

ดร.ปุ่นณมี สัจจกมล
ดร.สุวิษภรณ์ วิชกุล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

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

ดร.เพ็ญสุดา พันธุ์ธำ
ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ผศ.ชานนท์ มุลวรรณ
อ.ประภาพรรณ เกษราพงศ์

ดร.ศักดิ์ชาย รักการ
อ.จักรินทร์ กลั่นเงิน

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

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

รศ.ดร.ศุภชัย ปทุมนากุล
ผศ.ดร.दनัยพงศ์ เชษฐโชติศักดิ์
ดร.ธนา ราชภู่ภักดี

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รศ.ดร.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์
ผศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล
ผศ.ดร.สรรฐติชัย ชิวสุทธิศิลป์
ผศ.ดร.อรรถพล สมุทรคุปต์
ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์
ดร.อนิรุท ไชยจาร์วณิช

รศ.ดร.วิมลสิน เหล่าศิริถาวร
ผศ.ดร.วัสสนัย วรธนัจฉริยา
ผศ.ดร.อภิชาติ ไส้กาแดง
ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์าวงศ์
ดร.วสวัชร นาคเขียว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ.คมสัน จิระภัทรศิลป์

รศ.ดร.สิทธิชัย แก้วเกื้อกุล

ผศ.ดร. เจริญชัย โขมพัตราภรณ์

ผศ.พจมาน เตียวัฒน์รัฐติกาล

ดร.วิศิษฐ์ศรี วิยะรัตน์

อ.ปรัชญา เพ็ญสุระ

รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์

รศ.สันติรัฐ นันสะอา

ผศ.ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์

ดร.ช่อแก้ว จตุรานนท์

ดร.อิศรทัต พึ่งอัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รศ.วันชัย แผลมหลักสกุล

ดร.กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

ผศ.ดร. สกนธ์ คล่องบุญจิต

ดร. อุดม จันทร์จรัสสุข

ดร.ชุมพล ยวงใย

รศ.ดร. ฤดี มาสุจันทร์

ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพัสกุล

ดร.พิชญ์วดี กิตติปัญญางาม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผศ.พิชัย จันทรมณี

ผศ.วิชาญ ช่วยพันธ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

ผศ.ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ดร.นเรศ อินต๊ะวงศ์

ดร.ภาคภูมิ จารุภูมิ

ดร.บรรเจิด แสงจันทร์

ผศ.มนวิภา อาวิพันธุ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

รศ.สุชาติ เย็นวิเศษ

ผศ.สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์

ผศ.เดช เหมือนขาว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผศ.ดร.พรศิริ จงกล

ดร.ปภากร สุวานนท์

อ.นรา สมัตถภาพงศ์

ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย

ดร.เป็วีร์ ศิริรักษ์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.จิรรัตน์ ธีระวราพฤกษ์
ผศ.ดร.วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร
ผศ.ดร.สวัสดิ์ ภาวระราช

รศ.ดร.จิรศิริพงษ์ เจริญภัณฑารักษ์
ผศ.ดร.วรารัตน์ กังสัมฤทธิ์
ผศ.ดร.เสมอจิตร์ หอมรสสุนธ์

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ผศ.ดร.อุพงษ์ พงษ์เจริญ
ดร.ขวัญนิตี คำเมือง
ดร.ภาณุ บุรณจารุกร
อ.ศรีสัจจา วิทาศักดิ์

ผศ.ศิษฏา สิมารักษ์
ดร.สมลักษณ์ วรรณฤมล
อ.ธณิกานต์ ธงชัย

มหาวิทยาลัยปทุมธานี

ดร. ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเร็จ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป
ผศ.ดร.บพิช บุปผาโชติ
ดร.นิตา ชัยมูล

ผศ.ดร.สุดสาคร อินธิเดช
ดร.อรอุมา ลาสุนนท์

มหาวิทยาลัยมหิดล

รศ.ดร.ดวงพรรณม ศฤงคารินทร์
ดร.จิรพรรณ เลียงโรคาพาธ

ผศ.ดร.วเรศรา วีระวัฒน์
ผศ.ศุภชัย นาทะพันธ์

มหาวิทยาลัยรังสิต

ผศ.ดร.ธนวรรณ อัศวไพบูลย์
ผศ.สินี สุขกรมใส
อ.ศิลปชัย วัฒนเสย
อ.พรรคพงษ์ แก่นณรงค์

ผศ.ดร.เพียงจันทร์ จรุงจิตร
ดร.พิษณุ มั่นสปีติ
อ.ต่อศักดิ์ อุทัยไขฟ้า
อ.สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผศ.ดร. กฤษดา พิศลยบุตร
อ.นุกูล อุบลบาน

ดร.เลิศเลขา ธนะชัยพันธ์
อ.นันทวรรณ อ้าเอี่ยม

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รศ.ธนรัตน์ เตวีวัฒนา
ผศ.ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์
ดร.สิริเดช ขาตินิยม

ผศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล
ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ
ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ผศ.พัฒนพงศ์ อริยสิทธิ์

อ.จักรพันธ์ กัณหา

อ.ธนิน ศรีวระรัมย์

อ.วรพจน์ พันธุ์คง

ดร.ธริณี มณีศรี

อ.ขวลิต มณีศรี

อ.พิสุทธิ รัตนแสนวงษ์

อ.สุพัฒตรา เกษราพงศ์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร

ผศ.ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ

ผศ.สุขุม โฆษิตชัยมงคล

ดร.กัญจนา ทองสนิท

ดร.สิทธิชัย แซ่แหล่ม

ผศ.จันทร์เพ็ญ อนุรัตนานนท์

ผศ.วันชัย ลีลาทวิวงศ์

ผศ.สุวัฒน์ เณรโต

ดร.ณัฐพล ศิริสว่าง

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รศ.ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล

รศ.สมชาย ชูโณม

ผศ.ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์

ผศ.ดร.นภิสพร มีมงคล

ผศ.ดร.รัฐชนา สินธวาลัย

ผศ.ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์

ผศ.เจริญ เจตวิจิตร

ผศ.ยอดดวง พันธุ์นรา

รศ.วนิดา รัตนมณี

ผศ.ดร.กลางเดือน โพชนา

ผศ.ดร.ธเนศ รัตนวิไล

ผศ.ดร.ประภาส เมืองจันทร์บุรี

ผศ.ดร.สุภาพรณ ไชยประพัทธ์

ผศ.ดร.อรุณ สังข์พงศ์

ผศ.พิเชฐ ตระการชัยศิริ

ผศ.สงวน ตั้งโพธิธรรม

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

อ.จิตลดา ชัมเจริญ

อ.วรลักษณ์ เสถียรรังสฤษฏ์

อ.อรอุมา กอสนาน

อ.นิตากร สมสุข

อ.อัญชลี สุพิทักษ์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผศ.ดร.คณิศร ภูนิคม

ผศ.ดร.นุชสรุา เกรียงกรกฎ

ผศ.ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส

ผศ.ดร.สุขอังคณา ลี

ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์

ผศ.ดร.นลิน เพียรทอง

ผศ.ดร.ปรีชา เกรียงกรกฎ

ผศ.ดร.สมบัติ สินธุเชาวน์

ดร.ธารชуда พันธุ์นิกุล

ดร.สัณณ์ โอฬาพิริยะกุล

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ดร.กรกฎ เหมสถาปัตย์

ดร.ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

ผศ.ชัยพฤกษ์ อากาศเวท

อ.เจษฎา วงศ์อ่อน

ผศ.ประยูร สุรินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รศ.ดร.ชัยยุทธ ช่างสาร

ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ผศ.ดร.ณฐา คุปต์ชัยเยียร

ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง

ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสอาด

ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ

ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ

ดร.สรพงษ์ ภาสุปรีย์

ผศ.สุรัตน์ ตรีวนพงษ์

รศ.มานพ ตันตระบัณฑิตย์

ผศ.ดร.จตุรงค์ ลังกาพินธุ์

ผศ.ดร.วารุณี อริยวิริยะนันท์

ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล

ผศ.ชวลิต แสงสวัสดิ์

ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง

ดร.ระพี กาญจนะ

ดร.สุมนมาลย์ เนียมกลาง



สารบัญ (ต่อ)

- MPM08 การวิเคราะห์อิทธิพลของชนิดทางเข้าและความเร็วฉีดที่มีต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีด
ชนิดโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
พิชัย เล็กโล่ง วิภู ศรีสืบสาย
- MPM09 การพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเบื้องมุงหลังคาดินเผาโดยใช้เทคนิคการกระจายหน้าที่
เชิงคุณภาพ
วิสสนัย วรรัตน์จรรย์ยา เทพฤทธิ์ เล็กกิจเจริญชัย
- MPM10 การศึกษาและพัฒนากระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยการ
วิเคราะห์ไฟไนเอลิเมนต์
กิตติ สมัครไทย ศิริชัย ต่อสกุล
- MPM11 การประยุกต์กระบวนการเติมเนื้อวัสดุเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์
สิริชัย จีรวงศ์นุสรณ์ จังหวัด เจริญสุข
- MPM12 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุ Alloy 617 ในบริเวณกระทบร้อน (HAZ)
ณิชากร ศุภพัฒน์สิริกุล นพกร ภูระยา อิศรทัต พิงอัน
- MPM13 การออกแบบ และปรับปรุงเครื่องทำเครื่องหมายบนผิวชิ้นงานโดยใช้ลำแสงเลเซอร์
วรพจน์ เสรีรัฐ เอกรินทร์ สายก้อน
- MPM14 การออกแบบและสร้างเครื่องบดบอลมิลล์ ขนาด 6 ลิตร
เดชา สุขมา ประกวด หงษาชาติ เอกสิทธิ์ ชนินทรภูมิ ชนม์ รอดผล
- MPM15 การปรับปรุงประสิทธิภาพการทำความเย็นของตู้บ่มเนื้อด้วยแผ่นทำความเย็น
Peltier Thermoelectric
เดชา สุขมา เอกสิทธิ์ ชนินทรภูมิ ประกวด หงษาชาติ ภูเมศวร์ สิ่งทอง
- MPM16 การประมาณค่าจุดควบคุมของผิวโค้งเนียร์ปจากกลุ่มข้อมูลจุด
บพิตร ฉุยฉาย ชนะ รักศิริ
- MPM17 การเปรียบเทียบวิธีการเคลือบผิวแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าขึ้นอ่อนภายใต้ค่า
Peeling Strength
ศิริศักดิ์ รังกลาง ปภากร พิทยชวล จิระพล ศรีเสรีฐผล



การศึกษาและพัฒนากระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

Study and Development of Part Forming Process in Stainless Steel AISI 304

by Using FEA

กิตติ สัมครไทย^{1*} ศิริชัย ต่อสกุล²

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12110

E-mail: kitti.sainoi@gmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วนฝาซีลทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตรโดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Dyna Form 5.5 เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง เพื่อทำการวิเคราะห์ความเครียด ความหนา พฤติกรรมการฉีกขาดของชิ้นงาน ผลการวิจัยพบว่าการออกแบบรัศมีของพินซ์ 2 มิลลิเมตร และรัศมีของตาย 3 มิลลิเมตร ให้ผลการทดลองด้านการไหลตัวของแผ่นชิ้นงานที่ดีที่สุด โดยปราศจากการฉีกขาด มีความหนาลดลงเฉลี่ย 0.112 มิลลิเมตร และมีความหนาแตกต่างกันโดยเฉลี่ย 3.44 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ตำแหน่งวิกฤตของชิ้นงานมีค่าความเครียดหลักและค่าความเครียดรองลดลงซึ่งเกิดจากรัศมีของตายมีขนาดโต ทำให้ลดการยึดตัวของแผ่นชิ้นงาน ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลการทดลองมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

คำหลัก ไฟไนต์เอลิเมนต์, ความเครียด

1. บทนำ

การขึ้นรูปโลหะแผ่นให้ได้ชิ้นงานออกมามีคุณภาพขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน อาทิเช่น รูปร่างของแม่พิมพ์ ความเร็วของแม่พิมพ์ แรงในการจับยึดชิ้นงาน เป็นต้น [1] ในทางปฏิบัติการกำหนดปัจจัยดังกล่าวให้ได้ค่าที่เหมาะสมอาจต้องเสียระยะเวลาสำหรับการทดลอง ซึ่งปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมได้มีการนำโปรแกรมคำนวณบนเครื่องคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการจำลองกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น เพื่อหลีกเลี่ยงการสร้างแม่พิมพ์ที่ไม่เหมาะสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งภาคอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ [2] งานวิจัยครั้งนี้เป็นการแก้ไขปัญหาการขึ้นรูปชิ้นส่วนของฝาซีลวัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หนา 2 มม. ด้วยวิธีการจำลองการขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Dyna Form 5.5 เปรียบเทียบกับการทดลองขึ้นรูปจริง การประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และปรับค่าค่าพารามิเตอร์ของพินซ์และตายในการจำลองการขึ้นรูป ศึกษาพฤติกรรมของชิ้นงานเช่น

การฉีกขาด ความเครียด ความหนา เพื่อนำค่าที่มีความเหมาะสมสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ต่อไป

2. วิธีการทดลอง

2.1 ทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

พฤติกรรมของแผ่นโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการลากขึ้นรูปในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดและคุณสมบัติของวัสดุเป็นแบบแอนไอโซทรอปี้(Anisotropy)[3]

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (1)$$

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (2)$$

ซึ่งนำขึ้นทดสอบตัดตามแนวทิศทางการรีด (r_0, r_{45}, r_{90}) จำนวนอย่างละ 5 ชิ้นทดสอบ แล้วทดสอบการดึงตามแนวแกนเพื่อทดสอบหาสมบัติเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain-hardening exponent, n - values) และสัมประสิทธิ์ความต้านแรง (Strength coefficient, K) ตามสมการที่ (1) และอัตราส่วนความเครียดพลาสติก r (Anisotropy) ตามสมการที่ (2) แสดงในตารางที่ 1

2.2 การทดลองขึ้นรูปจริง

นำชิ้นงานทดลองตีกรีดวงกลมขนาด 2.5 มม. ขึ้นรูปจริงที่รัศมีพินซ์ 1 มม. รัศมีตาย 1.5 มม. จำนวน 5 ชิ้น จากนั้นนำชิ้นงานไปวัดการยึดตัวของกรีดบนแผ่นชิ้นงานเพื่อหาความเครียดด้วยโปรแกรม Dino Capture แสดงดังรูปที่ 1 วัดความหนาของผนังชิ้นงานขึ้นรูปด้วยไมโครมิเตอร์ชนิดหัวบอล แสดงดังรูปที่ 2

2.3 แบบจำลองวิเคราะห์ทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์การฉีกขาด ความเครียดและความหนาของการจำลองการขึ้นรูป ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Dyna Form 5.5 และ



เนื่องจากการขึ้นรูปเป็นแบบสมมาตร จึงใช้หนึ่งในสี่มาสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 3

ตารางที่ 1 สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

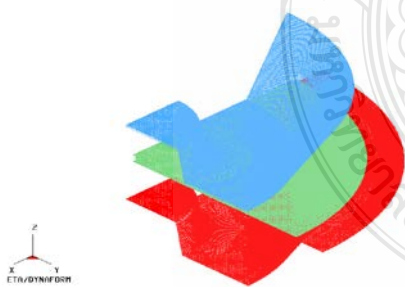
ความหนา	เลขที่กำไลการทำให้แข็งด้วย ความเครียด (n)	สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (K)	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r)			
			r_{0°	r_{45°	r_{90°	\bar{r}
2 mm.	0.3528	1154	0.9217	1.1616	0.9870	1.05796



รูปที่ 1 ตำแหน่งการวัดการยืดตัวของกริดวงกลม



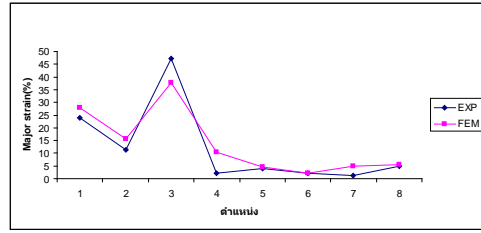
รูปที่ 2 ตำแหน่งวัดความหนา



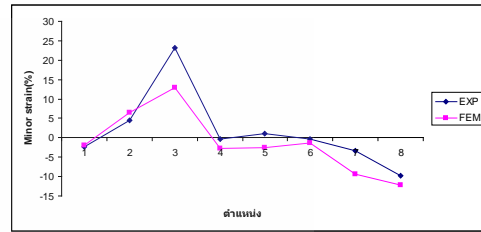
รูปที่ 3 แบบจำลองและกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการขึ้นรูป

3. ผลการทดลอง

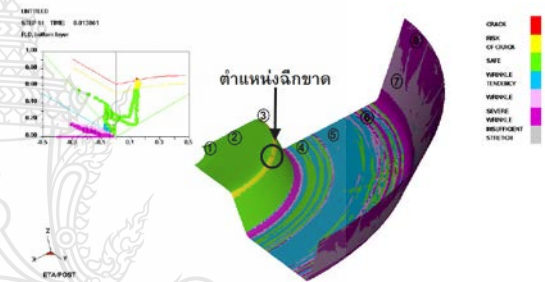
จากการทดลองแสดงผลเปรียบเทียบการจำลองการขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Dyna Form 5.5 กับการทดลองขึ้นรูปจริง และการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 จากการทดลอง จากนั้นประยุกต์ปรับค่าพารามิเตอร์ของพันธ์และตายในการจำลองการขึ้นรูป ศึกษาพฤติกรรมของชิ้นงานเช่น การฉีกขาด ความเครียด ความหนา



รูปที่ 4 เปรียบเทียบค่าความเครียดหลัก

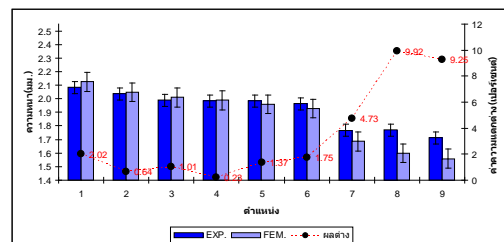


รูปที่ 5 เปรียบเทียบค่าความเครียดรอง



รูปที่ 6 แสดงพฤติกรรมของการขึ้นรูปชิ้นงานจากวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

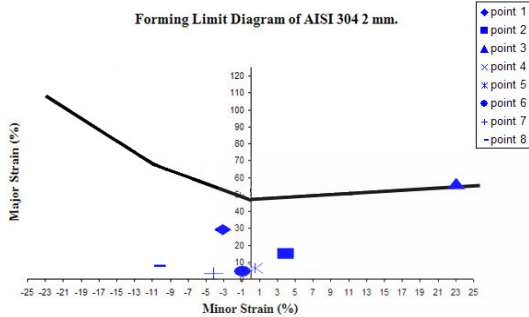
เปรียบเทียบพฤติกรรมการขึ้นรูปชิ้นงาน ระหว่างการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงดังรูปที่ 4,5,6, พบว่าตำแหน่งที่ 3 เกิดการฉีกขาดของชิ้นงานเหมือนกัน มีค่าความเครียดสูงสุด ตำแหน่งที่ 4 ถึง 6 เกิดค่า Compressive Stress บริเวณขอบด้านล่างของชิ้นงานใกล้เคียงกัน เนื่องจากแรงกดระหว่างพันธ์-ตาย และความหนามีการเปลี่ยนแปลงน้อย ตำแหน่งที่ 7 ถึง 8 เกิดค่า Compressive Strain ที่เกิดจากการไหลตัวของวัสดุ เกิดรอยยับซึ่งทำให้มีความหนาที่มากขึ้น



รูปที่ 7 กราฟแสดงเปรียบเทียบความหนา



การวิเคราะห์ค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง การขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าความหนาแตกต่างเฉลี่ย 3.44 % แสดงดังรูปที่ 7



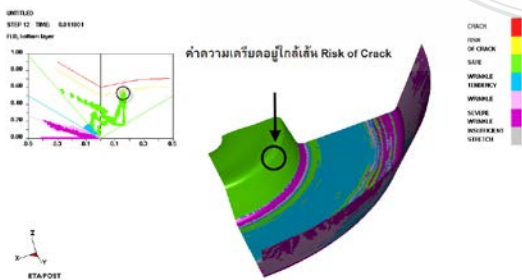
รูปที่ 8 ตำแหน่งความเครียดจากการขึ้นรูปชิ้นส่วนฝาซีล บนแผ่นภาพซีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 2mm.

พบว่าตำแหน่งที่ 1 ถึง 8 ยกเว้น ตำแหน่งที่ 3 อยู่ใต้เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLC) เป็นจุดที่ปลอดภัยไม่พบการฉีกขาด และมีความเครียดในแนวระนาบ (Plain Strain) มีการยืดตัวเฉพาะในแนวแกนหลัก สำหรับบริเวณขอบชิ้นงานจะเกิดรอยย่น (Wrinkles) เนื่องจากมีการยืดออกในแนวแกนหลักและหดตัวในแนวแกนรอง เป็นบริเวณที่อยู่ใต้เส้นสภาวะเฉือนอย่างเดียว ส่วนตำแหน่งที่ 3 อยู่เหนือเส้นขีดจำกัดการขึ้นรูป เป็นจุดที่พบการฉีกขาดของชิ้นส่วนฝาซีล แสดงดังรูปที่ 8

ผลการจำลองการขึ้นรูปด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความสอดคล้องกับชิ้นรูปจริง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของพินซ์-ตาย และวิเคราะห์การขึ้นรูป เพื่อนำค่ารัศมีที่เหมาะสมสำหรับออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นส่วนฝาซีล ดังในตารางที่ 2

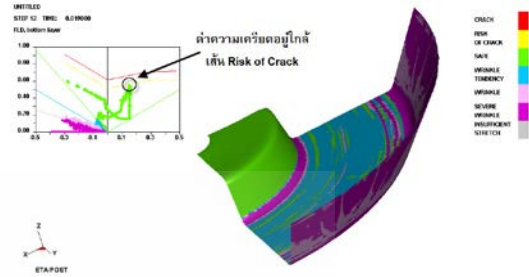
ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของพินซ์-ตาย

Punch(mm.)	1.5			2		
Die(mm.)	2	2.5	3	2	2.5	3



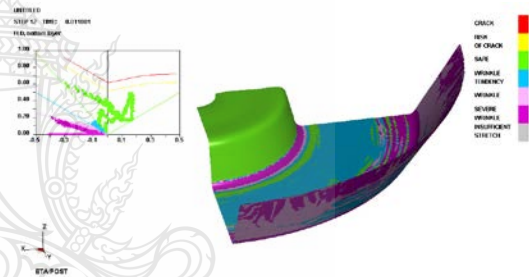
รูปที่ 9 จำลองการขึ้นรูป รัศมีพินซ์ 1.5 มม. และรัศมีตาย 2 มม.

พบว่าบริเวณขอบด้านในของชิ้นงาน มีค่าความเครียดอยู่ระหว่างเส้นขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLC) มีโอกาสเกิดฉีกขาด (Risk of Cracks) แสดงเป็นสีเหลือง บริเวณขอบชิ้นงานเกิดรอยย่น (Wrinkles) ทำให้มีความหนาเพิ่มขึ้น แสดงดังรูป 9



รูปที่ 10 จำลองการขึ้นรูป ค่ารัศมีพินซ์ 2 มม. และรัศมีตาย 2 มม.

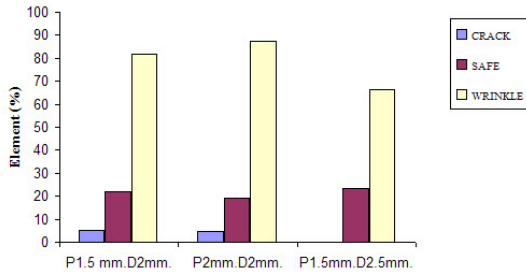
พบว่าบริเวณขอบด้านในของชิ้นงานมีค่าความเครียดอยู่ใกล้เส้นขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLC) บริเวณขอบชิ้นงานเกิดรอยย่น (Wrinkles) ทำให้มีความหนาเพิ่มขึ้น แสดงดังรูป 10



รูปที่ 11 จำลองการขึ้นรูป ค่ารัศมีพินซ์ 1.5 มม. และรัศมีตาย 2.5 มม.

พบว่าบริเวณขอบด้านในของชิ้นงานอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย (Safe) มีค่าความเครียดอยู่ใต้เส้นขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLC) บริเวณขอบชิ้นงานเกิดรอยย่น (Wrinkles) ทำให้มีความหนาเพิ่มขึ้น แสดงดังรูป 11

จากการจำลองการขึ้นรูป พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการขึ้นรูปคือ รัศมีตาย โดยค่ารัศมีที่ 2 มม. มีโอกาสเสี่ยงต่อการฉีกขาด สำหรับค่ารัศมีตายที่ 2.5 มม. และ 3 มม. สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างปลอดภัย ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่ารัศมีพินซ์เท่ากับ 2 มม. และค่ารัศมีตายเท่ากับ 3 มม. เนื่องจากผลจำลองขึ้นรูปมีค่าต่ำกว่าชิ้นรูปจริงเล็กน้อยจึงใช้ค่าพารามิเตอร์ที่สูงกว่า ในการออกแบบแม่พิมพ์และทำการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง แสดงดังรูปที่ 12 และตามข้อมูลที่ ดังในตารางที่ 3



รูปที่ 12 ผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 3 แสดงผลการจำลองการขึ้นรูป

Punch(mm.)	Die(mm.)	Crack	Risk of Crack	Safe
1.5	2		/	
	2.5			/
	3			/
2	2		/	
	2.5			/
	3			/

4. สรุป

จากผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบระหว่างการขึ้นรูปขึ้นงานจริงกับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าสามารถแสดงถึงพฤติกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่น ที่มีแนวโน้มของผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน ดังนั้นจึงสามารถนำผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จากการจำลองการขึ้นรูป ไปประยุกต์ใช้สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น สำหรับในส่วนการแก้ไขแม่พิมพ์ พบว่ารัศมีตาย มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปขึ้นงานผิวซีลของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยที่รัศมีตายขนาดเล็ก การไหลตัวของวัสดุขึ้นงานจะไหลตัวได้ยาก และวัสดุเกิดความเค้นสูงขึ้นบริเวณที่วัสดุไหลผ่านรัศมีตาย จึงทำให้มีการยึดตัวสูง ซึ่งบริเวณจุดวิกฤตพบการฉีกขาดของขึ้นงาน และค่าความเครียดในบริเวณนั้นมีค่าสูงกว่าเส้นขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLC) ของวัสดุ และเมื่อปรับรัศมีตาย เป็น 3 มม. ซึ่งได้จากการจำลองการขึ้นรูป ผลสามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้สำเร็จ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า รัศมีตายมีผลต่อการขึ้นรูปโดยรัศมีตายที่มีขนาดเล็ก จะช่วยในการไหลตัวของวัสดุได้ดีกว่ารัศมีตายที่มีขนาดใหญ่ และการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการขึ้นรูปสามารถนำไปประยุกต์ใช้หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนจากโครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัยทุนสกว.- อุตสาหกรรม (MAG Window I) บริษัทชีวปริม แมชชีนเนอร์รี่ แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด ดร.สุวัฒน์ จีระเกียรติ คุณอรรรถพล พลาศรัย จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในการดำเนินการวิจัย

เป็นอย่างดี ตลอดจนให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ ในการวิจัยจนประสบความสำเร็จ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ตำรง ไชยธีรานุวัฒน์ศิริ. (2537). การขึ้นรูปโลหะ. กรุงเทพฯ.
- [2] Mattiasson, K. 2000. On finite element simulation of steel metal forming process in industry, European Congress on computational methods in applies sciences and engineering, Barcelona, 11-14.
- [3] ชัยยศ บุรณะชีพ. 2549. การวิเคราะห์พฤติกรรมการขึ้นรูปโดยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป. ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระนครเหนือ.
- [4] คมสันต์ งามข้า. 2549. ขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนไนต์ SUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [5] พรชัย คงวัฒนาชัย. 2546. การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะแผ่น. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [6] สามารถ แซ่มคำ. (2546). การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปกดดอลูมิเนียมโดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [7] Chanderkam. 1996. Deep Drawing of Rectangular Pans from Aluminum Alloy 2008-T4. Journal of Material A Processing Technology, 27-34.
- [8] Nakamachi, E. 1996. Static-Explicit Plastic Finite Element Simulation and Virtual Manufacturing of Sheet Metal Forming, Engineering Computations, 283-307.
- [9] Li-Ping Lei, Sang-Moon Hwang, Beom-Soo Kang. 2000. Finite element analysis and design in Stainless steel sheet forming and its experimental comparison, Journal of Materials Processing Technology.
- [10] Takuda, H. 2000. Finite element analysis of limit strains in biaxial stretching of sheet metals allowing for ductile fracture. Department of Energy Science and Technology.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายกิตติ สมัครไทย
วัน เดือน ปีเกิด	24 พฤษภาคม 2517
ที่อยู่	145/1 หมู่ 9 ตำบลบ้านป่า อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี 18500
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ปี พ.ศ. 2550
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2539-ปัจจุบัน ตำแหน่ง ครูชำนาญการ วิทยาลัยเทคนิคนนทบุรี

