

การศึกษาอิทธิพลของรัศมีบ่าตายในการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัส
แบบมีปีกสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงสำหรับโครงสร้างยานยนต์
ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

A STUDY OF INFLUENCE DIE RADIUS ON RECTANGULAR CUP
DEEP DRAW FOR HIGH STRENGTH STEEL FOR AUTOMOBILE
STRUCTURAL WITH FINITE ELEMENT METHOD



ธวัชชัย แก้วสีใส

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาอิทธิพลของรัศมีบ่าคายในการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัส
แบบมีปีกสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงสำหรับโครงสร้างยานยนต์
ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ชัชชัย แก้วสีใส

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของรัศมีบ่าคายในการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงสำหรับโครงสร้างยานยนต์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์
ชื่อ – นามสกุล	นายรัชชัย แก้วสีใส
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์กุลชาติ จุลเพ็ญ, D.Eng.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของรัศมีบ่าคายในการลากขึ้นรูปลึกด้วย (Deep drawing) สี่เหลี่ยมแบบมีปีกด้วยเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงสำหรับโครงสร้างยานยนต์ โดยการจำลองวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวของวัสดุในแต่ละรัศมีบ่าคายที่มีผลต่อการลากขึ้นรูป ด้วยโปรแกรมไดนาฟอร์ม เวอร์ชัน 5.6 (Dynaform Version 5.6)

การจำลองกำหนดขนาดชิ้นงานเป็นถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก มีความกว้าง 60 มิลลิเมตร ความยาว 60 มิลลิเมตร และความลึก 30 มิลลิเมตร ความกว้างปีกด้านละ 10 มิลลิเมตร เปรียบเทียบวัสดุที่ใช้เป็นเหล็กขึ้นรูปสำหรับโครงสร้างยานยนต์ 4 ชนิด คือ เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SPCC(JIS) และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง เกรด SAPH 440(JIS) SPFC590(JIS) และ JSC980Y (JIS) ทุกวัสดุมีความหนาเท่ากันคือ 1.4 มิลลิเมตร กำหนดรัศมีบ่าคายขนาดเท่ากับ 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตร รัศมีมุมพื้นซ์เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และรัศมีของบ่าพื้นซ์เท่ากับ 10 มิลลิเมตร

ผลการจำลองโดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการทดลองจริงระหว่าง เหล็ก SPCC และ SAPH440 พบว่าขนาดของรัศมีบ่าคายทั้ง 4 ระดับ สามารถทำการลากขึ้นรูปวัสดุสองชนิดได้สมบูรณ์ทั้งหมด ความแข็งแรงของวัสดุที่เพิ่มขึ้นทำให้ต้องใช้แรงในการขึ้นรูปสูงขึ้น โดยที่รัศมีบ่าคายเท่ากับ 12 มิลลิเมตร ใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อย และความหนาของถ้วยมีการเปลี่ยนแปลงจากความหนาเดิมน้อยที่สุด วัสดุมีการไหลตัวของแผ่นชิ้นงานสู่แม่พิมพ์ดีที่สุด โดยปราศจากการฉีกขาด รัศมีบ่าคายที่มีขนาดเล็กลง จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีพฤติกรรมการไหลตัวของชิ้นงานที่ยากขึ้น ซึ่งผลการจำลองโดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการทดลองจริงมีความแม่นยำ 97% จากนั้นได้ทดลองเปลี่ยนวัสดุเป็นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SPFC590 และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด JSC980Y โดยที่เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SPFC590 สามารถขึ้นรูปได้ทุกระศมีบ่าคาย แต่เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด JSC980Y สามารถทำการขึ้นรูปได้สำเร็จที่รัศมีบ่าคายตั้งแต่ 10 มิลลิเมตรขึ้นไป ดังนั้นผลการจำลองจึงมีความถูกต้อง และมีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่สามารถนำมาวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองก่อนทำการทดลองจริงได้

คำสำคัญ: การลากขึ้นรูป ไฟไนต์เอลิเมนต์ เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

Thesis Title	A Study of Influence Die Radius on Rectangular Cup Deep Draw for High Strength Steel for Automobile Structural with Finite Element Method
Name – Surname	Mr. Thawatchai Kaewseesai
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Mr.Kunlachart junlapen, D.Eng
Academic Year	2012

ABSTRACT

This research is to study the influence of die radius on the deep drawing square cup for high strength steel for automobile structural focusing on the flowing behavior of the material in each die radius affecting the effectiveness of the deep drawing. In this simulation, Dynaform version 5.6 finite element software used deep drawing square cup,

This simulation determine the dimension of 60 mm in width, 60 mm in length and 30 mm in depth and 10 mm wing width compared the material of automobile structural steel 4 kinds including SPCC (JIS) SAPH440 (JIS) SPFC590 (JIS) and JSC980Y (JIS) 1.4 mm thickness at 6, 8, 10, and 12 mm die radius and 10 mm punch angle radius and 10 mm punch shoulder radius.

The results of finite element simulation compare with the results of experiment. SPCC and SAPH440 were found that the 4 kinds of die radius were able to form the deep drawing. The punch force using in deep drawing was at the low level and the thickness of the work pieces was changed at the low level at the 12mm die radius and offered the best result in forming the work piece to the mold without cracked. The punch force using in deep drawing reduced when using bigger die radius and it was likely to form the deep drawing of the work piece well and the work piece could flow well without wrinkle while the punch force in deep drawing was used more at the smaller size of die radius. The accuracy 97% of finite element method simulation compared with the actual experiment. After that, simulation by change material to high strength steel grade SPFC590 (JIS) and JSC980Y (JIS). Results of finite element simulation high strength steel grade SPFC590 (JIS) were able to form the deep drawing all of die radius, but high strength steel grade JSC980Y (JIS) were able to form the deep drawing more at 10 mm die radius. Therefore, the results of the simulation were accurate and reliable enough to be used for analyzing the experimental results of the simulation before the actual experiment.

Keywords: deep drawing, finite element, carbon steel, high strength steel

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบคุณนายไพศาล เอี่ยมมิ นายบัญชา วงศ์ศรีทา นายบุญเรือง เข็นศิริ และนายชวลา วรรณสิทธิ์ ที่ช่วยเหลือในการสนับสนุนเงินทุนในการวิจัย ขอขอบคุณ นายกฤษฎา หนูมา นายศรัณ ลอยวรรณ นายบรรพต ชาติมนตรี นายอนิรุช ปิ่นแก้ว นายอิสรา ไหมพรหม นายชิษณุ สุระทักษะ และนายสรพงศ์ วงษ์พัฒน์ นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยทำการทดลองและบันทึกผลจนได้ความสมบูรณ์ของงาน ขอขอบคุณอาจารย์สุริยา ประสมทอง ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ วิทยาเขตสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องทดลองทางโลหะวิทยา ขอขอบคุณบุคลากร บัณฑิตวิทยาลัยทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำหรับโปรแกรมไฟไนต์ เอลิเมนต์ Dynaform Version 5.6 ที่ใช้ในการจำลองการลากขึ้นรูปและอาจารย์รามิต เกศวรรกุล จากมหาวิทยาลัยปทุมธานี ในการแนะนำการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Dynaform Version 5.6

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ธวัชชัย แก้วสีใส

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะ.....	3
2.2 กระบวนการพื้นฐานของโลหะแผ่นและระนาบความเค้น.....	15
2.3 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	18
2.4 การลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม.....	29
2.5 ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในระหว่างการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม.....	33
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	38
3.1 เครื่องและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินการวิจัย.....	38
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	38
3.3 การเก็บผลและเปรียบเทียบผลการทดลอง.....	50
3.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	52
4 ผลการทดลอง.....	54
4.1 อิทธิพลของรัศมีบาคายที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป.....	54

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2	อิทธิพลของรัศมีบ่าคายนที่มีผลต่อที่มีผลต่อความหนาถ้วย 56
4.3	อิทธิพลของรัศมีบ่าคายนที่มีผลต่อความเครียดของชิ้นงาน 61
4.4	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป..... 64
4.5	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SPFC590..... 69
4.6	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด JSC980..... 72
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 74
5.1	สรุปผลการทดลอง..... 74
5.2	ข้อเสนอแนะ 75
	รายการอ้างอิง..... 77
	ภาคผนวก..... 81
	ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการทดลอง..... 82
	ภาคผนวก ข คุณสมบัติทางกลของเหล็ก..... 86
	ภาคผนวก ค ตารางสถิติ..... 90
	ภาคผนวก ง กราฟเส้นโค้งไอซี..... 92
	ภาคผนวก จ ผลงานตีพิมพ์และเผยแพร่..... 94
	ประวัติผู้เขียน..... 110

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ลักษณะการวิเคราะห์ความอิสระของการเคลื่อนที่ของแต่ละชนิด	24
3.1	สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง เกรด SAPH440 (JIS) ความหนา 1.4 มิลลิเมตร	42
3.2	สมบัติทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง เกรด SAPH440 (JIS) ความหนา 1.4 มิลลิเมตร	43
3.3	ตัวอย่างใบบันทึกผลการทดลองแรงสูงสุดที่ใช้ลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้ โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง.....	50
3.4	ค่าความหนาและความเครียดในแนวความหนาของชิ้นงานในแต่ละจุดตรวจวัด.....	51
3.5	การหาขนาดสิ่งตัวอย่างที่เหมาะสม	52
3.6	ตัวอย่างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง.....	53



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	พฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ.....	4
2.2	แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ.....	7
2.3	การเปรียบเทียบกรอบการแตกหัก.....	9
2.4	ขั้นตอนทดสอบตามทิศทางการรีด.....	13
2.5	ทิศทางการรีดในการทดสอบแรงดึง.....	15
2.6	ทิศทางการรีดของความเค้นและความเครียด.....	16
2.7	ขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	16
2.8	ขั้นตอนการทดลองหาความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้น.....	17
2.9	การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	19
2.10	โหนดในเอลิเมนต์แต่ละมิติ.....	20
2.11	ชนิดของเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1 - 3 มิติ.....	21
2.12	การใช้เอลิเมนต์ 1 มิติ ในงาน โครงสร้าง.....	21
2.13	การใช้เอลิเมนต์ 2 มิติ ในงานที่มีลักษณะเป็นผนัง.....	22
2.14	การใช้เอลิเมนต์ 3 มิติ ในงานที่เป็นปริมาตรตันที่มีความหนา.....	22
2.15	ตัวอย่างโครงสร้างเอลิเมนต์ดั้งเดิม.....	23
2.16	การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ กัน.....	26
2.17	เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบประกอบด้วยสามจุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่า ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ ..	27
2.18	การแบ่งกล่องสี่เหลี่ยมออกเป็นส่วนต่างๆ.....	30
2.19	การวิเคราะห์ที่มุมของกล่องสี่เหลี่ยม.....	30
2.20	การไหลของของไหลที่บริเวณผนังส่วนตรงของการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม.....	32
2.21	ลักษณะของรอยย่นที่เกิดจากอัตราการไหล.....	32
3.1	แผนภาพการดำเนินการวิจัยการศึกษาอิทธิพลของรัศมีคานในการลากขึ้นรูปด้วยเหลี่ยมแบบมีปีกสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	39
3.2	ลักษณะขั้นตอนทดสอบหาสมบัติเชิงกล.....	40
3.3	การบันทึกข้อมูลการทดสอบการดึงจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	40
3.4	แผนภาพความเค้น-ความเครียดวิศวกรรมและความเค้น-ความเครียดจริงของเหล็กรีดเย็นหนา 1.4 mm.	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.5	หาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรงและเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดใช้แบบ สมการกำลัง (Power Function)..... 42
3.6	กำหนดชื่อของเครื่องมือ..... 44
3.7	ขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนเครื่องมือและชิ้นงาน..... 44
3.8	การสร้างผิวสำหรับเครื่องมือและชิ้นงาน..... 45
3.9	การสร้างผิวสำหรับเครื่องมือและชิ้นงาน โดยกำหนด Part Mesh 45
3.10	กำหนดชนิดการขึ้นรูป..... 46
3.11	กำหนดชนิดวัสดุของชิ้นงาน 47
3.12	เครื่องมือและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการขึ้นรูป..... 47
3.13	การประมวลผลของโปรแกรม Dyna Form 5.6..... 48
3.14	การกำหนดค่าสมบัติของวัสดุใน โปรแกรม Dyna Form 5.6..... 49
3.15	ค่าความเครียดวิเคราะห์จาก โปรแกรม Dyna Form 5.6..... 49
3.16	ค่าความหนาวิเคราะห์จาก โปรแกรม Dyna Form 5.6 50
3.17	ตำแหน่งในการวัดความหนาของถ้วยสี่เหลี่ยม..... 51
4.1	เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SAPH440 55
4.2	เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPCC..... 55
4.3	ตำแหน่งการวัดความหนาของชิ้นงาน..... 56
4.4	ความหนาของชิ้นงาน SAPH440 แต่ละระดับรัศมีบ่าคาย 58
4.5	ความหนาของชิ้นงาน SPCC แต่ละระดับรัศมีบ่าคาย..... 60
4.6	ความเครียดของชิ้นงานของเหล็ก SAPH440 แต่ละระดับรัศมีบ่าคาย..... 62
4.7	ความเครียดของชิ้นงานของเหล็ก SPCC แต่ละระดับรัศมีบ่าคาย 64
4.8	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูประหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการลากขึ้นรูปจริงของ เหล็ก SPCC ที่ระดับรัศมีบ่าคาย 6 มิลลิเมตร 65
4.9	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการลากขึ้นรูปจริงของ เหล็ก SPCC ที่ระดับรัศมีบ่าคาย 8 มิลลิเมตร 65
4.10	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการลากขึ้นรูปจริงของ เหล็ก SPCC ที่ระดับรัศมีบ่าคาย 10 มิลลิเมตร 66

สารบัญภาพ (ต่อ)

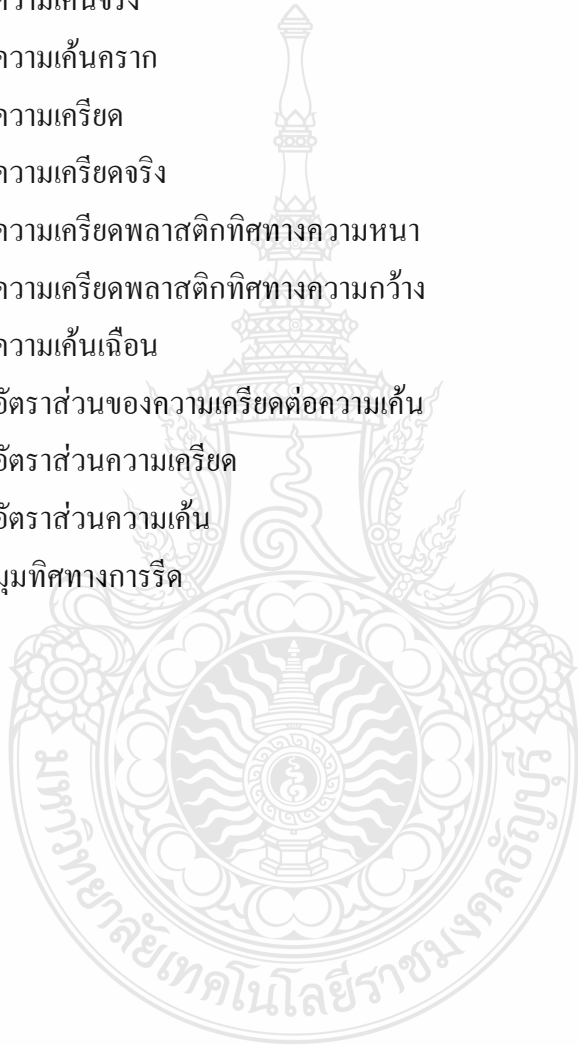
ภาพที่	หน้า
4.11 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการลากขึ้นรูปจริงของเหล็ก SPCC ที่ระดับรัศมีบ่าคาย 12 มิลลิเมตร	66
4.12 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูประหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการลากขึ้นรูปจริงของเหล็ก SAPH440 ที่ระดับรัศมีบ่าคาย 6 มิลลิเมตร	67
4.13 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูประหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการลากขึ้นรูปจริงของเหล็ก SAPH440 ที่ระดับรัศมีบ่าคาย 8 มิลลิเมตร	68
4.14 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูประหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการลากขึ้นรูปจริงของเหล็ก SAPH440 ที่ระดับรัศมีบ่าคาย 10 มิลลิเมตร	68
4.15 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูประหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการลากขึ้นรูปจริงของเหล็ก SAPH440 ที่ระดับรัศมีบ่าคาย 12 มิลลิเมตร	69
4.16 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPFC590 ที่ระดับรัศมีบ่าคาย 6 มิลลิเมตร	70
4.17 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPFC590 ที่ระดับรัศมีบ่าคาย 8 มิลลิเมตร	70
4.18 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPFC590 ที่ระดับรัศมีบ่าคาย 10 มิลลิเมตร	71
4.19 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPFC590 ที่ระดับรัศมีบ่าคาย 12 มิลลิเมตร	71
4.20 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก JSC980Y ที่ระดับรัศมีบ่าคาย 6 มิลลิเมตร	72
4.21 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก JSC980Y ที่ระดับรัศมีบ่าคาย 8 มิลลิเมตร	72
4.22 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก JSC980Y ที่ระดับรัศมีบ่าคาย 10 มิลลิเมตร	73
4.23 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก JSC980Y ที่ระดับรัศมีบ่าคาย 12 มิลลิเมตร	73

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A_i	พื้นที่หน้าตัดใด
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	เส้นผ่านศูนย์กลางใดๆ
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

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\{\phi\}$	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 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันธุรกิจมีการแข่งขันทางการค้าสูงมากในประเทศไทยมีผู้ประกอบการธุรกิจอุตสาหกรรมหลายสาขาได้มีการปรับปรุงคุณภาพการผลิตสินค้าและขยายตัวไปอย่างรวดเร็วมีการแข่งขันทางธุรกิจอุตสาหกรรมเกิดขึ้นตลอดเวลาทั้งทางด้านการตลาด รูปแบบของผลิตภัณฑ์และเงินลงทุนผู้ประกอบการอุตสาหกรรมแต่ละแห่งต้องเร่งพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีต่างๆ การขึ้นรูปโลหะมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมยานยนต์หรืออุตสาหกรรมครัวเรือน การพัฒนากระบวนการขึ้นรูปโลหะจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพื่อลดต้นทุนการผลิต โดยเหล็กกล้าแรงความแข็งแรงสูงได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์เป็นวัตถุดิบในการผลิตชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงสูง

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High Strength Steel; HSS) นั้นเป็นเหล็กที่มีค่า Yield Strength มากกว่า 270 MPa โดยส่วนมากแล้วจะใช้เหล็กชนิดนี้ในการผลิตชิ้นส่วนของรถยนต์ ซึ่งวัสดุชนิดนี้ จะมีความแข็งแรงและทนแรงดึงสูง เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงถูกพัฒนาเพื่อใช้เป็นวัสดุในการผลิตชิ้นส่วนที่ต้องการความสามารถในการรับแรงกระแทก โดยในอุตสาหกรรมยานยนต์ใช้เหล็กดังกล่าวเป็นวัตถุดิบในการผลิต กันชน คานกันกระแทกและชิ้นส่วนรับแรงต่างๆ ด้วยค่าความแข็งแรงที่เพิ่มสูงขึ้นนี้ ทำให้ขึ้นรูปยาก มีการติดตัวกลับสูงและเกิดการยึดติดกับผิวแม่พิมพ์ได้ง่ายทำให้เกิดรอยบนชิ้นงานที่ไม่สามารถยอมรับได้และยังส่งผลทำให้แม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตเกิดการสึกหรอและหมดอายุการใช้งานได้เร็วขึ้น ดังนั้นในการขึ้นรูปโลหะแผ่นให้ได้ชิ้นงานออกมามีคุณภาพสูงกับรูปร่างลักษณะของแม่พิมพ์และเงื่อนไขในการผลิต เช่น ขนาดของรัศมีค้ำ (Die Radius) แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป (Punch Force) แรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน (Blank Holder Force) และการหล่อลื่น (Lubrication) เป็นต้น

การออกแบบแม่พิมพ์และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการผลิตในทางปฏิบัติ นั้น มักจะทำได้ยาก ต้องอาศัยการลองผิดลองถูกหลายๆ ครั้ง (Trial and Error) จนกว่าจะได้รูปร่างแม่พิมพ์และเงื่อนไขในการผลิตที่เหมาะสม ทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก การนำคอมพิวเตอร์มาช่วยจำลองพฤติกรรมการขึ้นรูปโลหะมีประโยชน์ในการลดเวลาและค่าใช้จ่ายจากการลองผิดลองถูก เนื่องจากการจำลองพฤติกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นทำให้ทราบถึงลักษณะการไหล การเสียรูปของโลหะแผ่นและช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบแม่พิมพ์ที่เหมาะสม ตลอดจนสามารถคาดการณ์จุดเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นหลังจากการลากขึ้นรูปได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์การลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมแบบมีปีกมาช่วยในการวิเคราะห์หาเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมในการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมแบบมีปีก โดยมุ่งเน้นไปที่พฤติกรรมการไหลตัวและอิทธิพลของรัศมีบ่าคายนายที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลากขึ้นรูป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาการจำลองการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมแบบมีปีกด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของรัศมีบ่าคายนายที่มีผลต่อการไหลตัวของวัสดุในการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ทำการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก ขนาด 60 x 60 x 30 มิลลิเมตร ด้วยโปรแกรม Dynaform Version 5.5

1.3.2 วัสดุแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) เหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH440 (JIS), เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SPFC590 (JIS) และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด JSC980Y (JIS) ขนาดความกว้าง 120 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร หนา 1.4 มิลลิเมตร

1.3.3 ทำการศึกษาการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกที่ระดับรัศมีบ่าคายนายขนาด 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตร รัศมีมุมพื้นซึ้งที่ 10 มิลลิเมตร รัศมีของบ่าพื้นซึ้งที่ 10 มิลลิเมตร

1.3.4 วิเคราะห์แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปและความหนาของชิ้นงาน

1.3.5 วิเคราะห์แผนภาพขีดจำกัดในการขึ้นรูปและความเครียดของชิ้นงาน

1.3.6 เปรียบเทียบผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ใช้เป็นแนวทางในการจำลองการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมแบบมีปีกโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4.2 สามารถใช้เป็นแนวทางในการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก

1.4.3 สามารถใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในงานลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก

1.4.4 สามารถนำไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการประยุกต์ใช้กับชิ้นงานรูปทรงอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

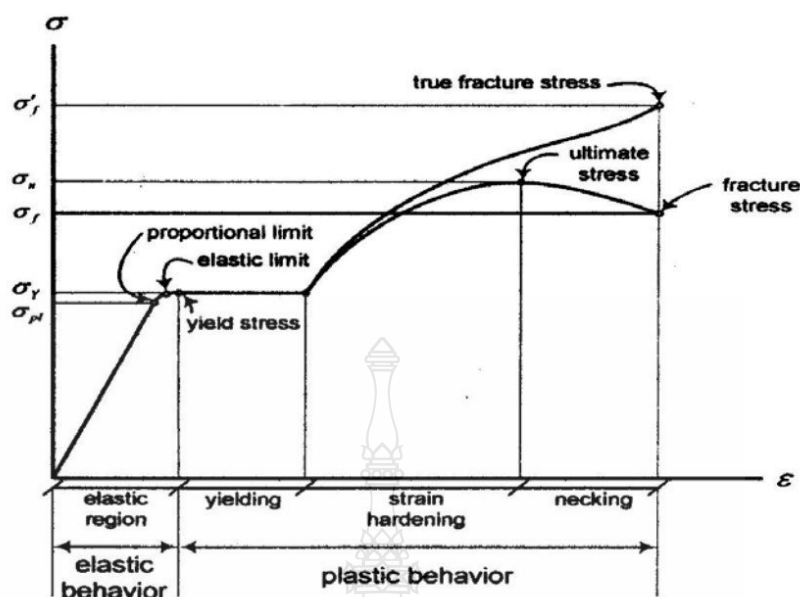
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะ

ทฤษฎีในการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะวัสดุแผ่น (Sheet Metal) พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปในช่วงถาวร (Plasticity) และพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น (Elasticity) เมื่อวัสดุซึ่งได้รับแรงกระทำจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรที่กระทำออก วัสดุจะคืนตัวเล็กน้อยเมื่อไม่ได้รับแรงกระทำ ในส่วนพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปถาวรเมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจนวัสดุเลยจุดคราก (Yield Point) ถ้านำแรงที่กระทำออกวัสดุจะไม่กลับคืนตัววัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร คุณสมบัติทางกลที่สำคัญอันหนึ่งซึ่งจะมีผลต่อการขึ้นรูปของวัสดุโลหะแผ่นคือค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (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) ซึ่งในค่าที่สำคัญคือค่า R (r -Value) หรือ Plastic Strain Ratio) หาได้จากสัดส่วนความเครียดในแนวความกว้างกับความเครียดในแนวความหนา ซึ่งค่า R เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในด้านความต้านทานการหดตัวในแนวความหนา เนื่องจากเหล็กแผ่นผ่านการรีดมาทำให้อนุภาคภายในมีทิศทางตามแนวรีดส่งผลให้ความสามารถในการยืดหดตัวของเหล็กแผ่นแตกต่างกัน ดังนั้นในการหาค่า R จำเป็นต้องหาอย่างน้อย 3 แนว คือค่า R ในทิศตามแนวรีดทิศ 45° กับแนวรีดและทิศทางตั้งฉากกับแนวรีด ถ้าวัดค่า R แตกต่างกันมาก ทำให้ขอบของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปยาวไม่เท่ากันหรือการเป็นคลื่นที่ขอบชิ้นงาน (Earing) [1]

2.1.1 ทฤษฎีในการเปลี่ยนรูปช่วงยืดหยุ่น (Elastic Theory)

เมื่อวัสดุได้รับแรงดึงจะทำให้วัสดุเกิดการยืดตัวซึ่งสามารถแบ่งพฤติกรรมการยืดตัวออกเป็น 2 ส่วน หลักๆ คือการเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นหรือช่วงอีลาสติกและการเปลี่ยนรูปถาวรหรือช่วงพลาสติก ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ [2]

คุณสมบัติของวัสดุที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งเขียนอยู่ในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริง (True Stress-True Strain Curve) หรือเรียกอีกชื่อได้ว่า (Flow Curve) ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linearity) หรือไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linearity) โดยมีความสำคัญในการนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อช่วยให้ทำนายผลได้ถูกต้องแม่นยำ ในการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะกำหนดให้วัสดุของแบบจำลองมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropy) ซึ่งจะแตกต่างจากพฤติกรรมของวัสดุจริงเนื่องจากวัสดุจริงมีการเรียงตัวของผลึกไม่เท่ากันทุกทิศทางทำให้วัสดุมีคุณสมบัติแบบ Anisotropy โดยที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงของวัสดุนั้น สามารถหาได้จากการทดสอบดึง (Uni-Axial Tension Test) หรือการทดสอบกด (Compression Test) ในการทดสอบแรงดึงขึ้นทดสอบชนิดหน้าตัดกลมหรือชนิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะถูกแรงกระทำโดยการดึงหรือกดเพิ่มแรง (F) อย่างช้าๆ และควบคุมความเร็วให้ขึ้นทดสอบเปลี่ยนรูปอย่างสม่ำเสมอตามแนวแกนแล้ววัดค่าแรงและระยะการเปลี่ยนรูปของขึ้นทดสอบ จนกระทั่งขึ้นทดสอบเกิดความเสียหายหรือขาดออกจากกัน ผลการทดสอบที่ได้จะนำไปหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุขึ้นทดสอบ ซึ่งความเค้นที่เกิดภายในวัสดุสามารถหาได้โดยนำแรงภายนอก F , ในแต่ละช่วงของการทดสอบหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน [2]

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

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

สำหรับความเครียดเชิงวิศวกรรม (Engineering Strain) สามารถคำนวณได้จากความยาวที่เปลี่ยนแปลงหารด้วยความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ

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

โดย ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป L_o คือความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ L_i คือความยาวขณะใดขณะหนึ่งและ ε คือความเครียดเฉลี่ย เป็นความเครียดเชิงวิศวกรรม ซึ่งมีทิศทางเดียวกับทิศทางของแรง F ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดนั้น หาค่าได้จากการคำนวณโดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวเดิมของชิ้นทดสอบเรียกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเชิงวิศวกรรม (Engineering Stress-Strain Curve) ซึ่งในการทดสอบจริง ในขณะที่ระดับความเค้น ในชิ้นงานทดสอบเพิ่มเลยความเค้นคราก 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 คือพื้นที่หน้าตัดใดๆ A_o คือพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น σ คือความเค้นเฉลี่ย F_i คือแรงดึงที่กระทำบนชิ้นทดสอบ

สำหรับความเครียดจริง $\tilde{\varepsilon}$ สามารถหาได้โดยพิจารณาที่ความยาวใดๆ ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหาได้จากการอินทิเกรตความยาว dL_i ใดๆ

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

ในกรณีการขึ้นรูปโลหะมีปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นจะสมมุติให้ปริมาตรไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังการขึ้นรูปทำให้มีปริมาตรเท่าเดิม

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

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

ดังนั้นความเค้นจริงและความเครียดจริงโดยสมมุติฐานให้ปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูปคงที่

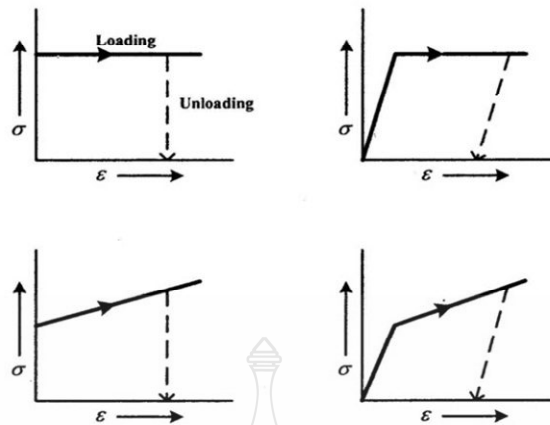
$$\tilde{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2.7)$$

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

โดย d_i คือเส้นผ่าศูนย์กลางใดๆ d_o คือเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ

2.1.2 ทฤษฎีในการเปลี่ยนรูปถาวรหรือในช่วงพลาสติก (Plasticity Theory)

ในการขึ้นรูปวัสดุโลหะแผ่นให้มีรูปทรงตามที่ต้องการจะต้องให้แรงกระทำกับวัสดุเพื่อให้วัสดุเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ผลจากการทดสอบการดึงวัสดุพบว่าพฤติกรรมของวัสดุแบ่งได้เป็นสองช่วง คือ ช่วงยืดหยุ่นและช่วงเปลี่ยนรูปอย่างถาวรหรือช่วงพลาสติกพฤติกรรมเหล่านี้ อยู่ด้วยกันหลายลักษณะซึ่งสามารถแสดงด้วยแบบจำลอง (Model) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ [2]

ในการพิจารณาการเปลี่ยนรูปจะใช้เกณฑ์การคราก (Yield Criterion) เป็นเกณฑ์เพื่อที่จะกำหนดการเปลี่ยนรูปจากอลาสติกไปเป็นพลาสติกและทฤษฎีพื้นฐานที่นิยมใช้ในการทำนายการครากตัวของโลหะแผ่นคือทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (Treska Yield Theory) ทฤษฎีฟอนมิเชส (Von Misses Theory) และทฤษฎีของฮิล (Hill Theory) ในส่วนของทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดและทฤษฎีของฟอนมิเชสจะมีข้อสมมุติฐานว่าวัสดุมีคุณสมบัติทางกลเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropy) ส่วนทฤษฎีของฮิล จะพิจารณาอิทธิพลของโลหะที่ผ่านการรีด (Anisotropy) ในการใช้กฎเกณฑ์การครากสำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานนี้จะใช้ทฤษฎีการครากของฮิล ทฤษฎีนี้เหมาะสำหรับวัสดุโลหะแผ่นที่มีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก [2]

2.1.3 เกณฑ์การคราก (Yield Criteria)

ทฤษฎีของฟอนมิเชสหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าทฤษฎีพลังงานแปรรูป (Distortion Theory) ซึ่งฟอนมิเชส ได้เสนอว่าการครากจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานแปรรูปภายในเนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะที่แรงกระทำมีค่าเท่ากับพลังงานแปรรูป จากการทดสอบแรงดึงของวัสดุทดสอบ 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 คือ ความเค้นคราก

k คือ ความเค้นเฉือนสูงสุดที่ได้จากการทดสอบดึงวัสดุ

สำหรับวัสดุทดสอบที่ได้รับแรงเฉือนเพียงอย่างเดียว $\tau = \sigma_1 = -\sigma_3, \sigma_2 = 0$ เมื่อแทนลงในสมการที่ 2.9 [2] 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

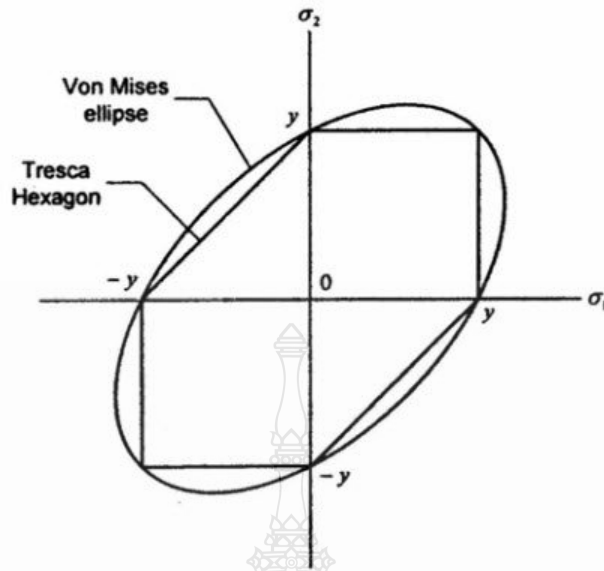
$$k = \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} = \sigma_1 \quad (2.14)$$

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

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

จะเห็นได้ว่าการครากจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{3}}$ เท่าของความเค้นครากที่ได้

จากการดึงวัสดุทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบทฤษฎีทั้งสองโดยพิจารณาจากภาพที่ 2.3 ได้แสดงกรอบการแตกหักของวัสดุพบว่าทฤษฎีของฟอนมิเซส ให้ผลการทำนายการครากใกล้เคียงมากกว่าทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดสำหรับงานขึ้นรูปโลหะแผ่น [2]



ภาพที่ 2.3 การเปรียบเทียบกรอบการแตกหัก [2]

2.1.4 ทฤษฎีแอนไอโซทรอปีของ Hill 1948

ได้เสนอการพิจารณาพลาสติกแอนไอโซทรอปีโดยไม่คำนึงถึงรูปผลึกเดิม โดยสมมติว่าวัสดุเอกพันธ์แสดงคุณลักษณะโดยแกนไอโซทรอปี 3 แกนตั้งฉากกันคือ x , y และ z ซึ่งคุณสมบัติสมมาตรสองหน้า (ระนาบ x - y , y - z และ z - x คือระนาบสมมาตร) ในแผ่นรีดมักใช้ทิศทาง x , y และ z เป็นทิศทางรีด ทิศทางขวางการรีดและทิศทางความหนาตามลำดับ ทฤษฎีนี้ยังสมมติว่าความต้านแรงดึงครากและแรงกดครากในทิศทางที่กำหนดมีค่าเท่ากันเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีกที่เสนออยู่ในรูป [3] ดังนี้

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

เมื่อ F, G, H, L, M และ N คือค่าคงตัวซึ่งแสดงคุณสมบัติแอนไอโซทรอปีกสังเกตว่า ถ้า $F=G=H$ และ $L=M=N=3F$ นี้ลดรูปลงเป็นเกณฑ์ของฟอนมิเชส ค่าคงตัว F, G และ H สามารถประเมินได้จากการทดสอบการดึง โดยที่พิจารณาการทดสอบในทิศทาง x และให้ X เป็นความเค้นดึงครากขณะคราก

$$\sigma_x = X \quad (2.17)$$

$$\sigma_y = \sigma_z = \tau_{ij} = 0 \quad (2.18)$$

ดังนั้น จากสมการที่ 2.16 จะได้

$$(G+H)X^2 = 1 \quad (2.19)$$

หรือ

$$X^2 = \frac{1}{(G+H)} \quad (2.20)$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้า Y และ Z คือความเค้นดึงครากในทิศทาง y และ z

$$X^2 = \frac{1}{G+H} \quad (2.21)$$

$$Y^2 = \frac{1}{H+F} \quad (2.22)$$

$$Z^2 = \frac{1}{F+G} \quad (2.23)$$

เมื่อแก้สมการพร้อมกันจะได้สมการที่ 2.24 - 2.26 คือ

$$2F = \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2} \quad (2.24)$$

$$2G = \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2} \quad (2.25)$$

$$2H = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} \quad (2.26)$$

ในกรณีของโลหะแผ่นวัด Z ได้ยาก ค่าคงตัว L, M และ N สามารถหาได้จาก การทดสอบ การเลื่อน กฎการไหลสามารถหาได้ดังนี้

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial f(\sigma_{ij})} \quad (2.27)$$

เมื่อ $f(\sigma_{ij})$ คือฟังก์ชันการคราก (ใช้ได้กับวัสดุแอนไอโซทรอปิกและไอโซทรอปิก) หาอนุพันธ์ของสมการที่ 2.27 ได้กฎการไหล

$$d\varepsilon_x = d\lambda \left[H(\sigma_x - \sigma_y) + G(\sigma_x - \sigma_z) \right], d\varepsilon_{yx} = d\varepsilon_{zy} = d\lambda L \tau_{yz} \quad (2.28)$$

$$d\varepsilon_y = d\lambda \left[F(\sigma_y - \sigma_z) + H(\sigma_y - \sigma_x) \right], d\varepsilon_{zx} = d\varepsilon_{xz} = d\lambda L \tau_{zx} \quad (2.29)$$

$$d\varepsilon_z = d\lambda \left[H(\sigma_z - \sigma_y) + G(\sigma_z - \sigma_x) \right], d\varepsilon_{xy} = d\varepsilon_{yx} = d\lambda L \tau_{xy} \quad (2.30)$$

การหากฎไหลสำหรับความเครียดเลื่อน $d\varepsilon_{yz}$, $d\varepsilon_{zx}$ และ $d\varepsilon_{xy}$ ต้องเขียนเกณฑ์การคราก ในสมการที่ 2.16 ใหม่ เพื่อให้พจน์ของความเค้นเลื่อนปรากฏ ดังสมการที่ 2.31

$$L(\tau_{yz}^2 + \tau_{zy}^2) + M(\tau_{zx}^2 + \tau_{xz}^2) + N(\tau_{xy}^2 + \tau_{yx}^2) \quad (2.31)$$

มีฉะนั้นแล้วอนุพันธ์ย่อยจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ใช้ไม่ได้คือ $d\varepsilon_{yz} = 2 \cdot d\lambda L \tau_{yz}$ และ $d\varepsilon_{zy} = 0$ สังเกตว่าสมการที่ 2.29 คือ $d\varepsilon_x + d\varepsilon_y + d\varepsilon_z = 0$ แสดงว่าปริมาตรคงตัวพิจารณาการทดสอบการดึงในทิศทาง x อีกครั้งหนึ่งและแทนค่า $\sigma_x = X$, $\sigma_y = \sigma_z = 0$ ในสมการที่ 2.28 – 2.30 จะได้ความเครียด ดังสมการที่ 2.32 – 2.34

$$d\varepsilon_x = d\lambda(H + G)X \quad (2.32)$$

$$d\varepsilon_y = -d\lambda(H)X \quad (2.33)$$

$$d\varepsilon_z = -d\lambda(G)X \quad (2.34)$$

เนื่องจากอัตราส่วนความเครียดสำหรับการทดสอบการดึงในทิศทาง x นิยามได้ว่า

$$R = R_0 = \left(\frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_z} \right) \quad (2.35)$$

ดังนั้น

$$R = \frac{H}{G} \quad (2.36)$$

ในการทำงานเดียวกัน นิยามให้ $P = R_{90}$ คืออัตราส่วนความเครียดในทิศทางแกน Y โดยที่ $P = d\varepsilon_x / d\varepsilon_z$ เมื่อ $\sigma_y = Y$ และ $\sigma_x = \sigma_z = 0$ จากสมการที่ 2.29 ได้

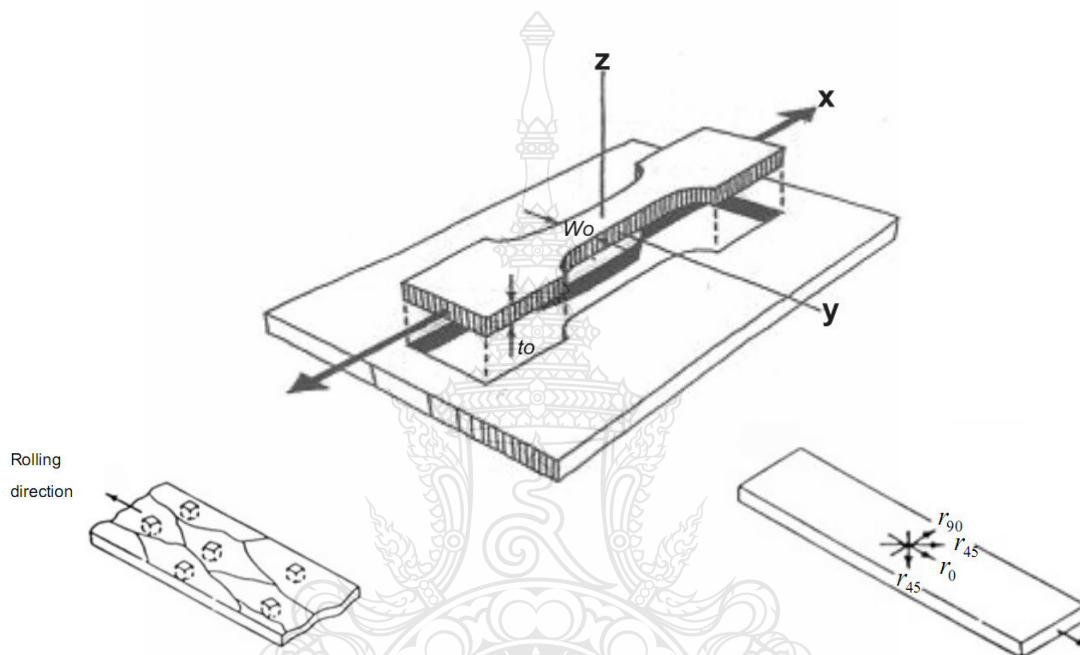
$$P = \frac{H}{F} \quad (2.37)$$

2.1.5 พลาสติกแอนไอโซทรอปี (Plastic Anisotropy)

สาเหตุที่สำคัญมากที่สุดซึ่งทำให้โลหะมีคุณสมบัติพลาสติกแอนไอโซทรอปีก็คือทิศทางของเกรนทิศทางที่เป็นไปหรือเนื้อของรูปผลึกที่พัฒนาขึ้นในเหล็กกล้าที่เกิดจากการหมุนของแลตทิซในเกรนระหว่างการเปลี่ยนรูป โดยการสลิปหรือการทวิน (Twining) พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของชิ้นทดสอบการดึงที่เป็นแผ่นแถบ ตัดออกมาจากแผ่นรีด เมื่อได้รับแรงดึงในแนวแกน สามารถเกิดการครากได้เฉพาะโดยการสลิปในระนาบความต้านแรงดึงครากของชิ้นทดสอบที่ตัดทำมุม θ กับทิศทางการรีดไม่แปรผันกันมากนัก ผลสรุปอย่างผิดพลาดว่าวัสดุเป็นไอโซทรอปี ความผิดพลาดอาจเกิดขึ้นได้ถ้าวัดความดึงเครียดในแนวขวางซึ่งเป็นผลมาจากการดึง ถ้าทิศทางเป็นอุดมคติ ความหนาไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เพราะการยัดในแนวขวางมีผลทำให้ความกว้างชิ้นทดสอบลดลง [3]

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

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (2.38)$$



ภาพที่ 2.4 ชิ้นทดสอบตามทิศทางการรีด

จากภาพที่ 2.4 ในการวัดค่า R ถึงแม้ว่า มีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้าง ε_w ต่อแนวหนาความเครียดในแนวหนา ε_t นั้นไม่สามารถวัดได้อย่างแม่นยำบนแผ่นบาง เพราะฉะนั้นความเครียดในแนวหนามักหาได้จากการวัดความเครียดในแนวยาวและแนวกว้างโดยใช้ปริมาตรคงตัว $\varepsilon_t = (\varepsilon_l + \varepsilon_w)$ เพื่อการวัดที่แม่นยำ ควรใช้ภาคตัดลดลงให้ค่อนข้างยาวมากเมื่อเทียบกับความกว้าง และภาคตัดทดสอบที่ใช้วัดค่า ε_t และ ε_w ควรอยู่ห่างจากบ่ามาก

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

สำหรับเหล็กกล้าค่า R และโมดูลัสยืดหยุ่น E มักแปรผันคล้ายกันตามเนื้อรูปผลึก แม้ว่าสหสัมพันธ์พื้นฐานไม่แม่นยำ แต่ก็มีพื้นฐานสำหรับใช้กับเครื่องมือวัดเชิงอุตสาหกรรมขนาดเล็กซึ่ง

วัดค่า E ของแผ่นแถบบางด้วย Sonic Velocity และปรับให้อ่านค่า R ได้ โดยปกติค่า R มักแปรผันตามทิศทางทดสอบ θ และมักใช้แสดงคุณลักษณะของวัสดุโดยค่า R เฉลี่ยคือ \bar{R}

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45^\circ} + R_{90^\circ}}{4} \quad (2.39)$$

2.1.6 ความเครียดแข็ง (Strain Hardening)

ความเครียดแข็งเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีคุณสมบัติเหนียวที่ใช้ในงานขึ้นรูปเย็น เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำผ่านจุดครากตัวทำให้เกิดความเครียดสะสมขึ้นภายในวัสดุ จึงต้องใช้แรงที่มากกว่าเดิมในการทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปร่าง สำหรับการวิเคราะห์วัสดุแบบอลาสติก-พลาสติก ได้แสดงพฤติกรรมความเครียดแข็งของวัสดุดังนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่น จะเป็นในลักษณะเชิงเส้นการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำจะทำให้เกิดความเครียดเป็นสัดส่วนซึ่งหลักการนี้จะเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's Law) [4] ดังสมการที่ 2.40

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.40)$$

เมื่อ σ คือ ค่าความเค้น

E คือ ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นหรือ โมดูลัสของยัง

ε คือ ค่าความเครียด

สำหรับคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปในช่วงพลาสติกครั้งนี้ เป็นไปตามกฎยกกำลัง (Power Law) [5] ดังสมการที่ 2.41

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.41)$$

โดยที่ K คือ สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (Strength Coefficient)

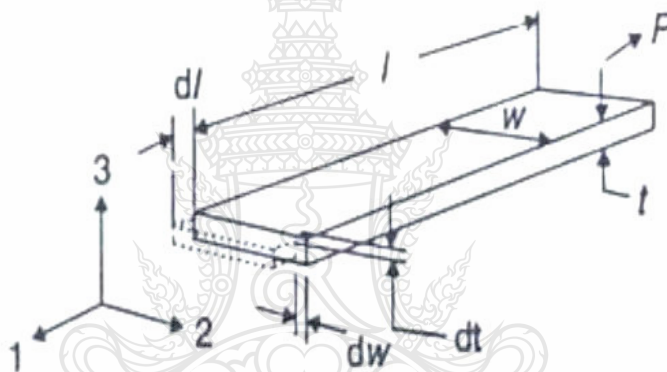
n คือ เลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (Strain-Hardening Exponent)

สำหรับค่าตัวเลขยกกำลังหรือความเครียดแข็ง n และค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรง K สามารถหาได้โดยทำการใส่ค่า \log เข้าไปในสมการยกกำลังซึ่งทำให้สามารถได้สมการที่ 2.42

$$\log \sigma = n \log \epsilon + \log K \quad (2.42)$$

2.2 กระบวนการพื้นฐานของโลหะแผ่นและระนาบความเค้น

กระบวนการพื้นฐานของโลหะแผ่นและระนาบความเค้น (General Sheet Processes; Plane Stress) โดยภาพที่ 2.5 เป็นการทดสอบการดึงเป็นแนวทางกระบวนการหาระนาบความเค้น (Plane Stress) การทดสอบการดึงแกนเดียว (Uniaxial Tension) คือการแสดงตัวอย่างของการเปลี่ยนรูปแบบระนาบความเค้น การดึงแกนเดียวให้พิจารณาจุดเล็กๆ ในชิ้นทดสอบในการดึงให้เปลี่ยนรูปแกนเดียว ทำการทดสอบเริ่มจากการเปลี่ยนรูปที่เล็กน้อยจนถึงสูงสุด เราจะพิจารณาพื้นที่หน้าตัดระหว่างเปลี่ยนรูปลักษณะของจุดเล็กๆ (Element) ตั้งฉากแต่ละทิศทางไม่มีความเคลื่อนที่เกี่ยวกับทิศทางหลัก 1, 2, 3



ภาพที่ 2.5 ทิศทางหลักในการทดสอบแรงดึง

ในทางตรงกันข้ามในการทดสอบการดึง 2 ความเค้นหลักมีค่าเป็นศูนย์ในลักษณะชิ้นส่วนเล็กๆ ที่เปลี่ยนรูปค่าความเค้น 1 และ 2 ไม่เท่ากับศูนย์ ความเค้น 3 คือตั้งฉากกับผิว แท้จริงเกิดจากการสัมผัสระหว่างแผ่นบางกับ Tooling โดยทั่วไปแล้วน้อยกว่าจุด Yield ของวัสดุ จะให้เป็นศูนย์ได้และให้เป็น Plane Stress Deformation

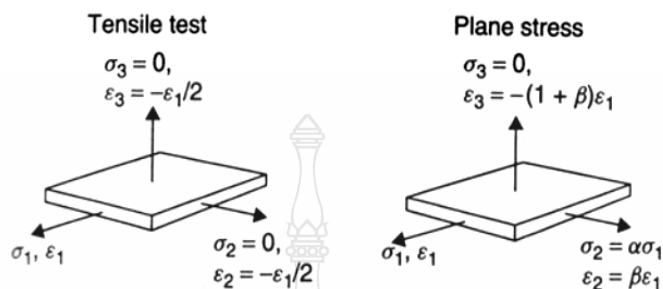
2.2.1 อัตราส่วนความเค้นและความเครียด (Stress and Strain Ratios)

กล่าวในความหมายเฉพาะที่กล่าวถึงการเปลี่ยนรูปของจุดเล็กๆ Element ในแต่ละเทอมของอัตราส่วนความเครียด (Strain Ratio, β) หรืออัตราส่วนความเค้น (Stress Ratio, α) สำหรับในส่วนของวิธี Proportional ค่าความจริงที่ใกล้เคียงที่สุด ดังภาพที่ 2.6

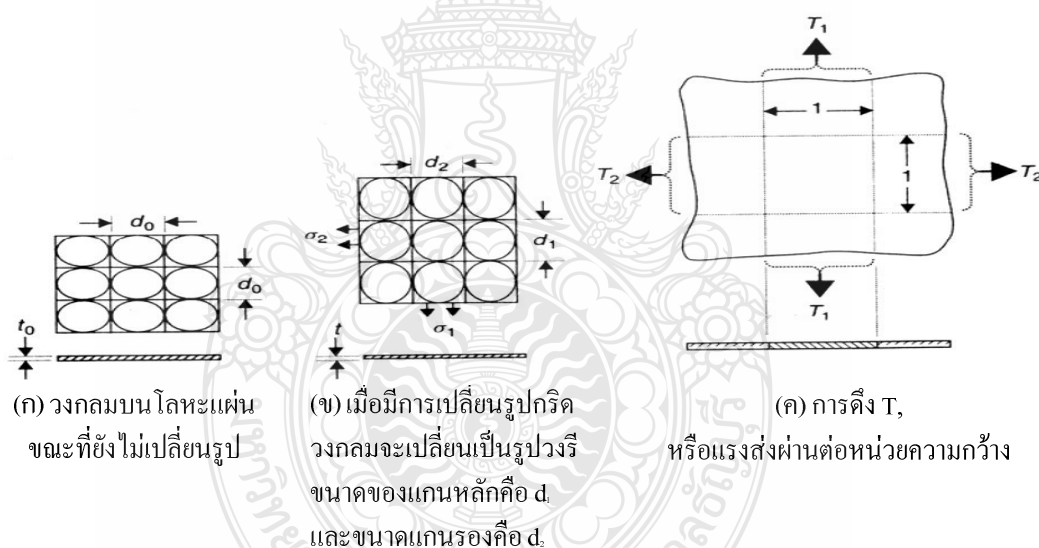
ในหลักของทิศทางกำหนดให้ $\sigma_1 > \sigma_2$ และทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิว เมื่อ $\sigma_3 = 0$ ลักษณะการเปลี่ยนรูป ดังสมการที่ 2.43 - 2.44

$$\varepsilon_1; \quad \varepsilon_2 = \beta\varepsilon_1; \quad \varepsilon_3 = -(1 + \beta)\varepsilon_1 \tag{2.43}$$

$$\sigma_1; \quad \sigma_2 = \alpha\sigma_1; \quad \sigma_3 = 0 \tag{2.44}$$



ภาพที่ 2.6 ทิศทางหลักของความเค้นและความเครียด



(ก) วงกลมบนโลหะแผ่น
ขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูป

(ข) เมื่อมีการเปลี่ยนรูปกริด
วงกลมจะเปลี่ยนเป็นรูปวงรี
ขนาดของแกนหลักคือ d_1
และขนาดแกนรองคือ d_2

(ค) การดึง T,
หรือแรงส่งผ่านต่อหน่วยความกว้าง

ภาพที่ 2.7 ขั้นตอนในการดำเนินงาน [6]

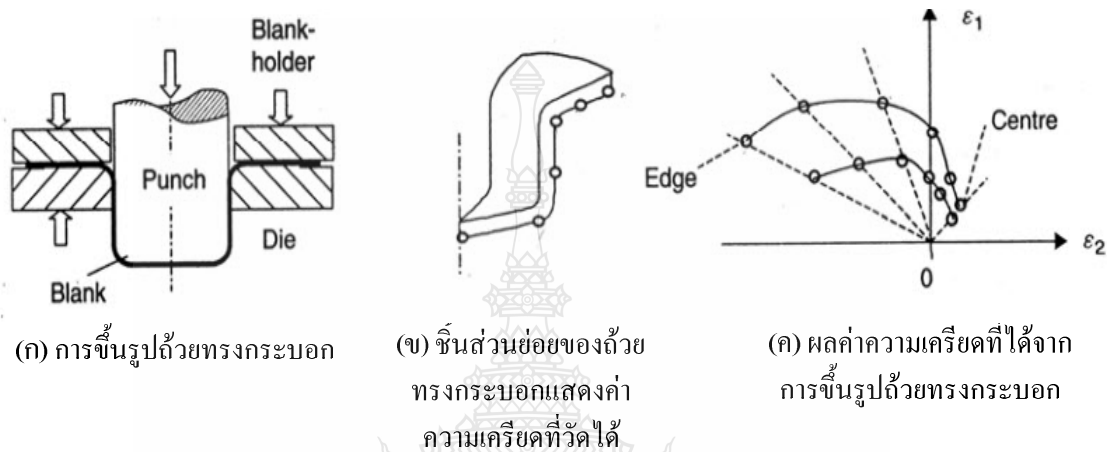
2.2.2 การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of Sheet in Plane Stress)

ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane Stress) พิจารณา (Work Hardening) ของวัสดุ ซึ่งเข้ากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูป ในภาพที่ 2.7 ลักษณะที่ังไม่มีการเปลี่ยนภาพที่ความหนา t_0 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_0 หรือตารางขนาด d_0 ดังภาพที่ 2.7 (ก) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปวงกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนของ Major คือ d_1 แนวแกนของ Minor คือ d_2

ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมเข้ากับทิศทางหลักของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังภาพที่ 2.7 (ข) ส่วนความหนาคือ t ตามที่กรณี ดังภาพที่ 2.7 (ค) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ σ_1 และ σ_2 [6]

2.2.3 แผนภาพความเครียด (Strain Diagram)

ความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้น ดังภาพที่ 2.8 สามารถวัดได้จากกริดวงกลมในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.8 ขั้นตอนการทดลองหาความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้น

2.2.4 ค่าความเครียดหลัก (Principal Strains)

ความเครียดหลักที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการ ดังสมการที่ 2.45

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0}; \varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0}; \varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} \quad (2.45)$$

2.2.5 อัตราส่วนของความเครียด (Strain Ratio)

โดยปกติเส้นแนวความเครียด (Strain Path) ยังคงเป็นสัดส่วนเส้นตรง ดังสมการที่ 2.46

$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\ln \left(\frac{d_2}{d_0} \right)}{\ln \left(\frac{d_1}{d_0} \right)} \quad (2.46)$$

2.2.6 ความเครียดหนาและความหนา (Thickness Strain and Thickness)

จากสมการ 2.45 ความเครียดหาได้โดยการวัดความหนาหรือหาได้จากความเครียดหลัก (Major Strain) ความเครียดรอง (Minor Strain) โดยให้พิจารณาว่าการเปลี่ยนภาพที่ปริมาตรคงที่

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} = -(1 + \beta)\varepsilon_1 = -(1 + \beta)\ln \frac{d_1}{d_0} \quad (2.47)$$

จากสมการ 2.47 ความหนาโดยทั่วไปคือ

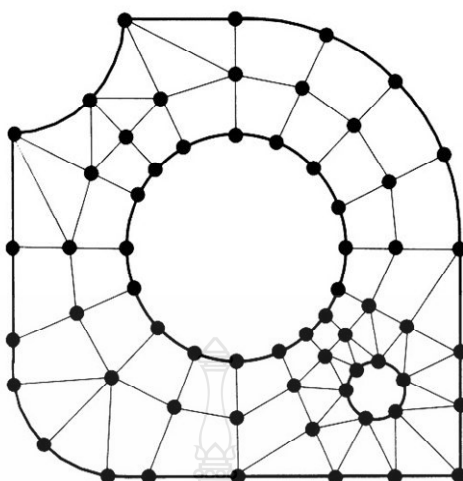
$$t = t_0 \exp(\varepsilon_3) = t_0 \exp[-(1 + \beta)\varepsilon_1] \quad (2.48)$$

หรืออีกแนวทางหนึ่งที่ปริมาตร $td_1d_2 = t_0d_0^2$ ที่ปริมาตรคงที่ ดังสมการที่ 2.49

$$t = t_0 \frac{d_0^2}{d_1d_2} \quad (2.49)$$

2.3 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นเหล่านักประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ และในเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นมา จะประกอบด้วยค่าของตัวแปรตามตำแหน่งต่างๆ กันบนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติ นั้นเป็นไปได้ หลักการก็คือทำการลดค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณในจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (Elements) ดังภาพที่ 2.9 ซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน [7]

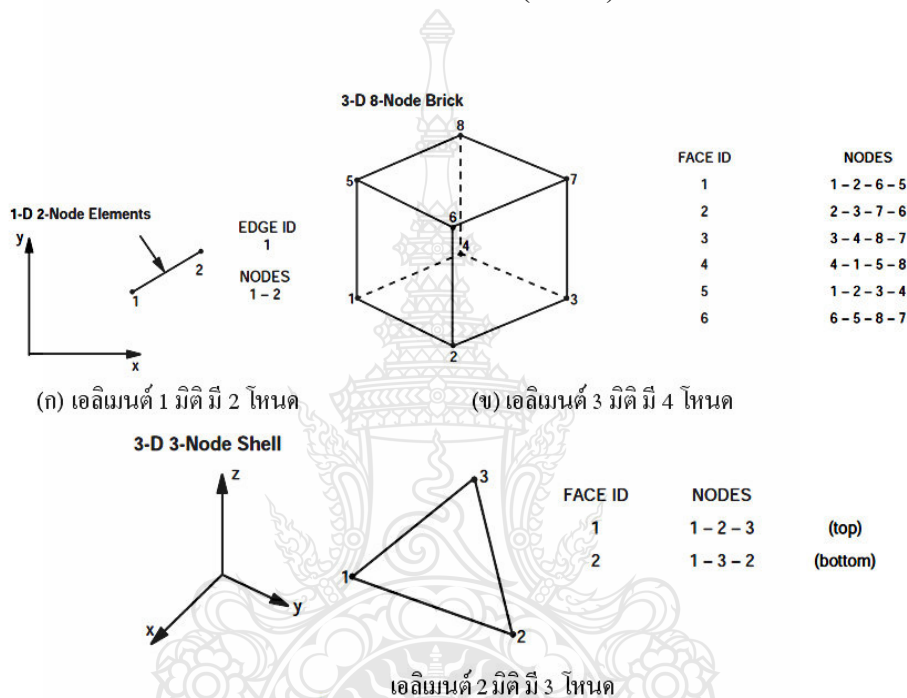


ภาพที่ 2.9 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [7]

ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis: FEA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อให้ได้ผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหาที่หลากหลายในทางวิศวกรรม [8] ซึ่งประกอบด้วยสมการควบคุมระบบ และใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อแก้สมการ ในระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมกันด้วยจุดโหนด (Node) ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของปัญหาโดยประมาณต้องนำสมการควบคุมระบบมาสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์บนโดเมน จากนั้นจึงทำการแก้ปัญหาดังกล่าวซึ่งจะได้ผลเฉลยของปัญหาที่จุดต่อบนโดเมน แม้การพัฒนาระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์แรกเริ่มเดิมทีจะเน้นไปที่การศึกษาความเค้นในโครงสร้างที่ซับซ้อน ตั้งแต่นั้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในสายงานที่เกี่ยวข้องทางกลศาสตร์ เพราะระเบียบการนี้มีความหลากหลาย อีกทั้งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีความยืดหยุ่นได้ ซึ่งทำให้ได้รับความสนใจในสถานศึกษาทางด้านวิศวกรรม และในอุตสาหกรรม [8] 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 [8]

2.3.1 โหนด (Node)

ภาพที่ 2.10 โหนดเป็นตัวช่วยเชื่อมต่อโครงสร้างชิ้นเล็กๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) แต่ละเอลิเมนต์ให้ติดกันด้วยจุดของโหนด นอกจากนี้โหนดยังช่วยในการกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ที่มีองศาอิสระ โดยปกติแล้วโหนดจะอยู่ที่มุมของเอลิเมนต์หรือจุดของเอลิเมนต์ แล้วกลุ่มของเอลิเมนต์และโหนดจะอยู่ติดกันเป็นกลุ่มที่เรียกว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) จะเป็นตัวแทนของชิ้นงานเพื่อนำไปจำลองเป็นสมการเมทริกซ์ (Matrix) เพื่อคำนวณที่ซับซ้อนต่อไป [9]

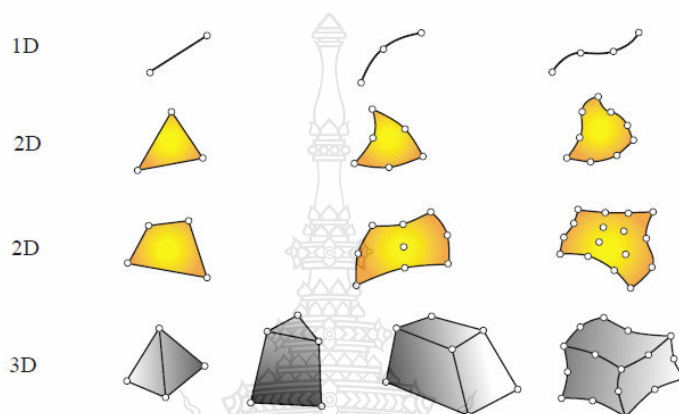


ภาพที่ 2.10 โหนดในเอลิเมนต์แต่ละมิติ [10]

2.3.2 เอลิเมนต์ (Element)

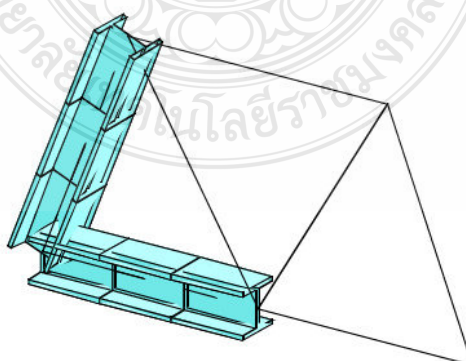
โดยทั่วไปแล้วเอลิเมนต์จะมีมิติอยู่ 1 - 3 มิติ ดังภาพที่ 2.11 นอกจากนี้ยังมีเอลิเมนต์ชนิดพิเศษที่มีลักษณะ 0 มิติ ดังเช่น กลุ่มของจุด (Lumped Springs) เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าเอลิเมนต์ที่มีลักษณะ 1 มิติ จะเป็นเส้นตรง เส้นโค้ง (Beam Element) มักใช้ในการวิเคราะห์งานลักษณะที่เป็นโครงเอลิเมนต์ 2 มิติ (Shell Element) จะเป็นรูปร่างรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมที่มีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์งานที่เป็นพื้นผิว (Surface) ผนังบาง สดุดท้ายแบบ 3 มิติ (Solid Element) โดยปกติส่วนมากรูปทรงเป็นแบบ Tetrahedral, Pentahedral, Hexahedral (Bricks) หรือ เป็นแบบปริซึม (Prisms) สามารถใช้กับงานที่เป็นปริมาตรตัน (Solid) ซึ่งเอลิเมนต์แต่ละมิติจะมีจุดที่สามารถสังเกตได้ง่าย จุดเหล่านี้เรียกว่า จุด

โหนด (Nodal Points) หรือ โหนด (Node) ประโยชน์แบบทวีคูณของโหนดคือเป็นตัวกำหนดรูปร่างทางเรขาคณิตของเอลิเมนต์กับเอลิเมนต์ที่รูปร่างมีองศาเป็นแบบอิสระ โดยปกติโหนดจะตั้งอยู่ที่มุมหรือจุดปลายของเอลิเมนต์ดังแสดงในรูป มากกว่านั้นในทางกลศาสตร์เอลิเมนต์เหล่านี้จะมีความเฉพาะเจาะจงกับพฤติกรรมของวัสดุสำหรับตัวอย่างเช่น เชิงเส้นยืดหยุ่น (Linear Elastic) ในวัสดุที่เป็นท่อน (Bar Element) [11]



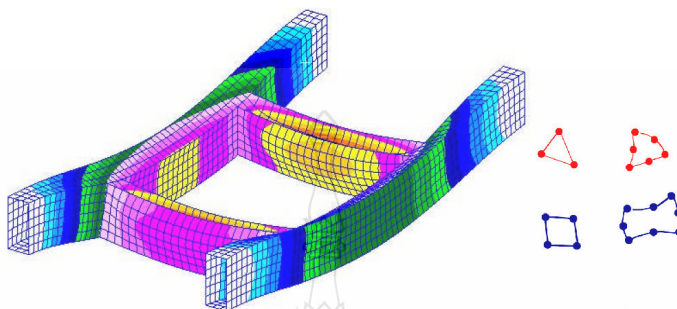
ภาพที่ 2.11 ชนิดของเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1 - 3 มิติ [11]

1) เอลิเมนต์ 1 มิติ ดังภาพที่ 2.12 มีลักษณะเป็นเส้น (Beam Element) เท่านั้นซึ่งมีแต่ความยาว และไม่สามารถมองเห็นพื้นที่หน้าตัด หรือพื้นผิวได้อย่างชัดเจน และนอกจากเป็นเส้นแล้วจะไม่มีรูปทรงเรขาคณิตอื่นใดอีก เป็นแค่เพียงเส้นอาทิ เส้นตรง เส้นโค้งเท่านั้น ซึ่งมักนิยมเรียกว่า บีม (Beam) โดยเอลิเมนต์ต่อกันหลายเอลิเมนต์จะกลายเป็นกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) [12]



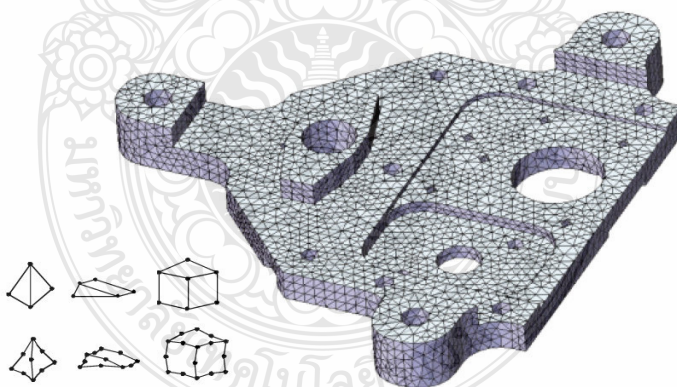
ภาพที่ 2.12 การใช้เอลิเมนต์ 1 มิติ ในงาน โครงสร้าง [10]

2) เอลิเมนต์ 2 มิติ (Shell Element) ดังภาพที่ 2.13 ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม โดยมีโหนด 3 และ 4 โหนดตามลำดับ แต่โดยพื้นฐานแล้วจะมีขั้นต่ำ 3 โหนด เอลิเมนต์ชนิดนี้จะใช้กับงานที่เป็นพื้นผิวหรือผนัง อาจแบ่งได้เป็นผนังบาง (Thin Shell) และผนังหนา (Thick Shell) [10]



ภาพที่ 2.13 การใช้เอลิเมนต์ 2 มิติ ในงานที่มีลักษณะเป็นผนัง [10]

3) เอลิเมนต์ 3 มิติ (Solid Element) ดังภาพที่ 2.14 จะมีโครงสร้างเป็น 3 มิติ รูปทรงจะมีความกว้าง ยาว สูง โดยพื้นฐานของเอลิเมนต์ชนิดนี้จะมีโหนดตั้งแต่ 3 โหนดขึ้นไป เอลิเมนต์แบบนี้จะเหมาะกับกาจำลองโครงสร้างที่มีความหนา (Thick) เมื่อเทียบกับพื้นผิว [12]

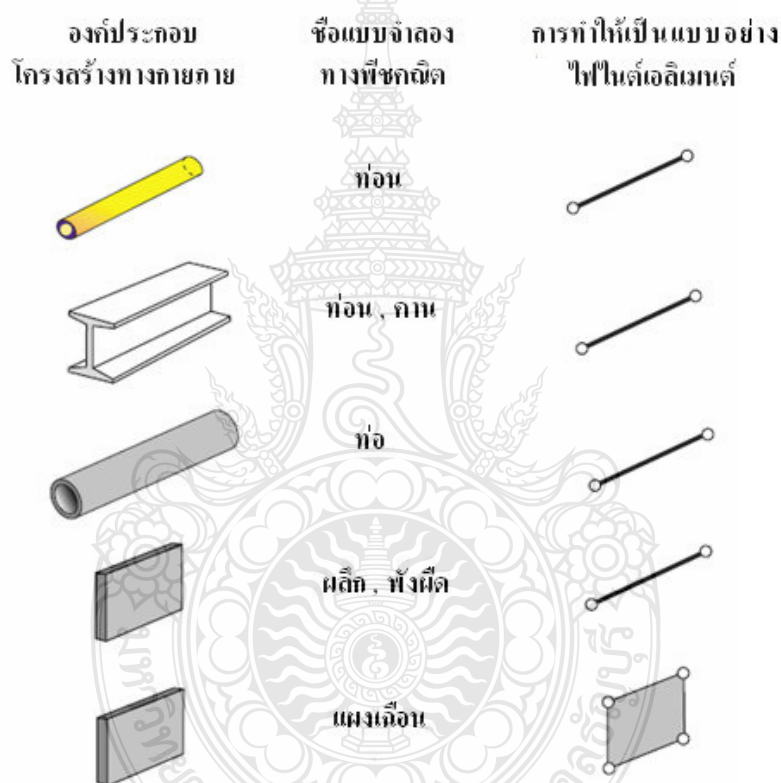


ภาพที่ 2.14 การใช้งานเอลิเมนต์ 3 มิติ ในงานที่เป็นปริมาตรตันที่มีความหนา [13]

การจัดหมวดหมู่แบ่งประเภทของระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ในทางกลศาสตร์โครงสร้าง ความเหนียวแน่น ความหยาบของเอลิเมนต์บนพื้นฐานจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางกายภาพดั้งเดิม ที่ชี้แจงหัวข้อนี้เพราะเป็นส่วนย่อยของระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งทำให้มีความเข้าใจในเทคนิค

การออกแบบจำลองชิ้นสูง ดังเช่น รายละเอียดลำดับขั้นและการวิเคราะห์โดยรวมกับเฉพาะแห่ง [11] ดังภาพที่ 2.15

จากภาพที่ 2.15 นั้น ได้แสดงโครงสร้างดั้งเดิมของเอลิเมนต์ (Primitive Structural Element) โดยเอลิเมนต์เหล่านี้จะจำแนกตามโครงสร้างกลศาสตร์ โครงสร้างซึ่งเกี่ยวข้องกับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้าง โดยที่เอลิเมนต์ทั้งหลายเหล่านี้ปกติมาจากกลศาสตร์ของวัสดุ (Mechanics of Materials) ซึ่งทำให้ง่ายต่อการเข้าใจ ทฤษฎีทางกายภาพของวัสดุมากกว่าทางคณิตศาสตร์ ดังตัวอย่างภาพที่ 2.15 เอลิเมนต์มีลักษณะเป็น แท่ง (Bars) ก้าน (Cables) และเส้น (Beams) [10]



ภาพที่ 2.15 ตัวอย่างโครงสร้างเอลิเมนต์ดั้งเดิม [11]

สำหรับการแบ่งเอลิเมนต์ในกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น จำเป็นต้องแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ที่เกี่ยวข้องกันด้วยจุดต่อ (Node) โดยทำการแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์สามารถใช้หลักการดังนี้ คือ ควรหลีกเลี่ยงการแบ่งเอลิเมนต์ที่มีรูปร่างผิดปกติ เช่น เอลิเมนต์ที่มีมุมป้านมากๆ หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีด้านยาวมากๆ เอลิเมนต์ที่มุมแคบมากๆ และมีลักษณะอัตรา

ส่วนกว้าง (Large Aspect Ratio) เป็นต้น ควรเลือกใช้เอลิเมนต์ที่เป็นสี่เหลี่ยมด้านเท่าจะดีมากกว่าหรืออัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความยาวมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง อีกทั้งควรใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กๆ เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ละเอียดในส่วนที่มีความหนาแน่น และแบ่งเอลิเมนต์ขนาดใหญ่ขึ้นในบริเวณที่ไกลออกไป [10]

2.3.3 ความอิสระของการเคลื่อนที่ (Degree of Freedom; DOF)

ความอิสระของการเคลื่อนที่จะเป็นตัวกำหนดสถานะของเอลิเมนต์ ซึ่งจะทำหน้าที่เรื่องจัดการการเชื่อมต่อของเอลิเมนต์ ในการเชื่อมต่อของตัวแปรในจุดโหนดการกำหนดค่าอนุพันธ์ตัวแปรของอิสระการเคลื่อนที่จะมีหลายค่า สำหรับความอิสระของการเคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของลักษณะชนิดของการวิเคราะห์ โดยที่ความอิสระของการเคลื่อนที่จะเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ซึ่งความอิสระของการเคลื่อนที่แต่ละชนิดสรุปได้ดังนี้ [12-13] ดังในตารางที่ 2.1 [13-14]

ตารางที่ 2.1 ลักษณะการวิเคราะห์ความอิสระของการเคลื่อนที่ของแต่ละชนิด

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)

2.3.4 การวิเคราะห์แบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น (Linear and Nonlinear Analysis)

ไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีความสามารถในการวิเคราะห์สมการทั้งแบบเชิงเส้น (Linear) และไม่เชิงเส้น (Nonlinear) สำหรับสมการแบบไม่เชิงเส้นจะเหมาะสมสำหรับชิ้นงาน หรือวัสดุที่มีการเสียรูปร่าง (Deformation) ไปแล้ว ดังนั้นจึงมีความยุ่งยากมากกว่า ใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่มากกว่า ความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ก็คือ การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น สมการแบบไม่เชิงเส้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าของเวลา เมื่อเกิดการเสียรูปร่าง เปลี่ยนแปลงรูปร่าง อีกทั้งสมบัติทางกายภาพจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปทำให้ค่าความแข็งแกร่ง (Stiffness) เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ส่วนแบบเชิงเส้น เมื่อวัสดุเกิดการเสียรูปร่าง สมบัติทางกายภาพจะไม่เปลี่ยนแปลงไปแต่จะคงที่เสมอซึ่งทำให้ค่าความแข็งแกร่ง (Stiffness) ไม่เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย [15-16]

ดังนั้นก่อนจะวิเคราะห์ไฟในต์เอลิเมนต์นั้น จึงต้องพิจารณาเสียก่อนว่าชิ้นงานจะวิเคราะห์แบบเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้น ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมเนื่องจากการวิเคราะห์แบบสถิต (Static) และพลศาสตร์ (Dynamic) จะสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น [17]

ในการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ถ้าแบ่งตามพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะแบ่งได้ออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

1) เรขาคณิตแบบไม่เชิงเส้น (Geometric Nonlinear) คือ มีสาเหตุของการเกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปทรงทางเรขาคณิต (Geometry) ประเภทการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมาก (Large Deflection) หรือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการหมุนขนาดใหญ่ (Large Rotation) มักจะเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีความเหนียวสูงและมี Deflection มากเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุหรือมีความสามารถในการบิดตัวได้มาก คือ วัสดุมีการเสีรูปร่าง หรือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมาก (Large Deformation) จนทำให้ค่าความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของวัสดุ ชีงงานสูงขึ้นมากกว่าเดิมตามเวลาที่ผ่านไป ซึ่งสมการทั่วไปแบบเรขาคณิตแบบไม่เชิงเส้น [18-19] ดังสมการที่ 2.50

$$[K] = \int [B]^T [D] [B] dv \quad (2.50)$$

เมื่อ K คือ เมทริกซ์ความแข็งแกร่ง (Stiffness Matrix)

B คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Large Strain)

D คือ ความเคลื่อนที่อิสระของโหนดเอลิเมนต์ (DOF)

2) วัสดุแบบไม่เชิงเส้น (Materials Nonlinear) โดยปกติแล้วการวิเคราะห์วัสดุแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) จะอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าจะเกิดการคืนรูปอย่างสมบูรณ์เมื่อนำแรงหรือภาระกระทำออกไปแล้ว ค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ซึ่งเรียกว่า อีลาสติกมอดูลัส (Elastic Modulus) จะมีค่าคงที่เสมอ แต่สำหรับวัสดุบางประเภทการคืนรูปเมื่อนำแรงหรือ ภาระกระทำออกไป จะเกิดความไม่สมบูรณ์จนเกิดช่วง Plastic Strain มักเกิดจากแรงที่มากระทำกับวัสดุมีขนาดมากเกินกว่าค่าจุดคราก (Yield) จนทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ซึ่งจะต้องใช้การวิเคราะห์แบบวัสดุไม่เชิงเส้น (Materials Nonlinear) ซึ่งในการวิเคราะห์จะใช้รูปแบบสมการโดยทั่วไปเหมือนกับสมการที่ 2.50 แต่แตกต่างกันที่ความเคลื่อนที่อิสระของโหนดเอลิเมนต์ (D) จะเป็นกรณี (Small Strain) อย่างเดียวเท่านั้น และความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (B) ไม่เป็นกรณี (Small Strain) [14] ดังสมการที่ 2.51

$$[K] = \int [B]^T [D] [B] dv \quad (2.51)$$

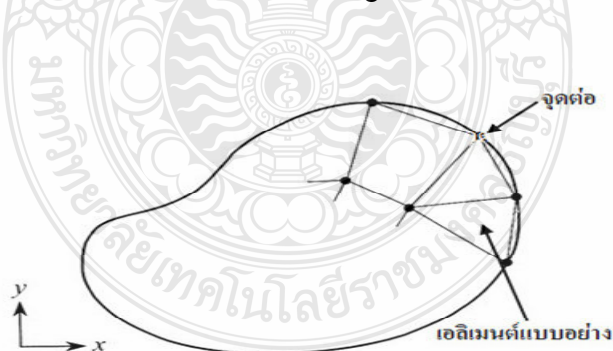
- เมื่อ K คือ เมทริกซ์ความแข็งแกร่ง (Stiffness Matrix)
 B คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง
 D คือ ความเคลื่อนที่อิสระของโหนดเอลิเมนต์ (DOF) กรณี (Small Strain)

3) การเปลี่ยนสถานะแบบไม่เชิงเส้น (Changing Status Nonlinear) มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงสถานะจนทำให้สมบัติของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปดังตัวอย่าง การดึงสลักกับการหย่อนสายเคเบิลต่างๆ หรือ ยางที่ต้องสัมผัสกับความร้อน ความเย็นสลักกันจนทำให้สมบัติของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปคือ ความสามารถในการรับแรงของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา หรือ ความสมบัติด้านอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) เท่านั้น [20-21]

2.3.5 ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Software) ในการวิเคราะห์โดยปกติทั่วไปจะประกอบด้วย 3 หลักการดังนี้ [22]

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



ภาพที่ 2.16 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างกัน [7]

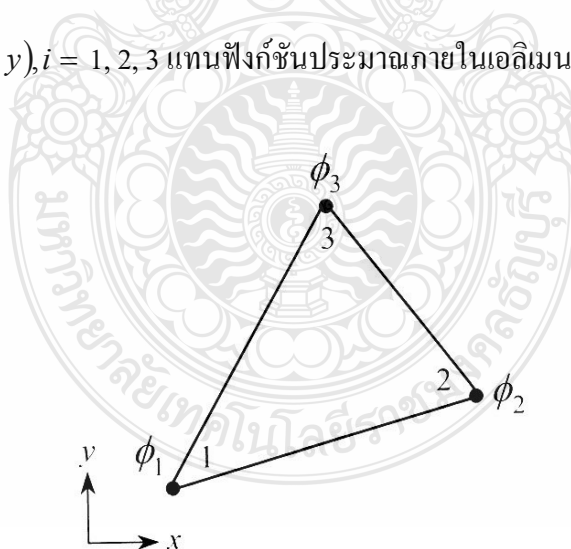
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลัก [7] อธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆ กัน เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง (Elasticity Problem) ปัญหาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความร้อน (Thermal Problem) และปัญหาของการไหล (Fluid Problem) เป็นต้น ดังภาพที่ 2.16

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Functions) เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม เอลิเมนต์นี้ประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 แสดงดังภาพที่ 2.17 โดยที่จุดต่อเป็นตำแหน่งที่ตั้งของตัวไม่รู้ค่า (Nodal Unknowns) ซึ่งก็คือ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ตามลำดับ ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่ออาจเป็นค่าของการเสียรูป (Displacement) หากเราวิเคราะห์ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็งหรืออาจเป็นค่าของอุณหภูมิหากเราทำปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นความเร็วของของไหล หากเราวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการไหล เป็นต้น ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นั้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ ดังสมการที่ 2.52

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (2.52)$$

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



ภาพที่ 2.17 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบประกอบด้วยสามจุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่า ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ [7]

จากสมการที่ 2.37 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้คือ

$$\phi(x, y) = [N_1 N_2 N_3] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} = \underset{(1 \times 3)}{[N]} \underset{(3 \times 1)}{\{\phi\}} \quad (2.53)$$

โดย $[N]$ แทนเมทริกซ์ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์และ $\{\phi\}$ แทนในเวกเตอร์เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้น

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element Equations) ดังตัวอย่างเช่น สมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่าง ดังภาพที่ 2.17 จะอยู่ในรูปแบบ ดังสมการที่ 2.54

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e \quad (2.54)$$

ซึ่งเขียนย่อได้ ดังสมการที่ 2.55

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (2.55)$$

ขั้นตอนที่ 3 นี้ ถือเป็นหัวใจสำคัญของการศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการ 2.54 สามารถทำได้โดย วิธีการโดยตรง (Direct Approach) วิธีการแปรผัน (Variation Approach) วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals)

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบรวมกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการรวม (System of Simultaneous Equations) ในรูปแบบ ดังสมการที่ 2.56

$$\sum(\text{element equations}) \Rightarrow [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (2.56)$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ลงในระบบสมการรวมดังสมการที่ 2.56 แล้วจึงแก้ระบบสมการรวมนี้เพื่อหา $\{\phi\}_{\text{sys}}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ

(Nodal Unknowns) ซึ่งอาจเป็นค่าของการเคลื่อนตัวตามจุดต่อต่างๆ ของ โครงสร้างหรือเป็นค่าของ อุณหภูมิที่จุดต่อ หากเป็นปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นค่าของความเร็วของของไหลตามจุดต่อหากเป็นปัญหาเกี่ยวกับการไหล เป็นต้น

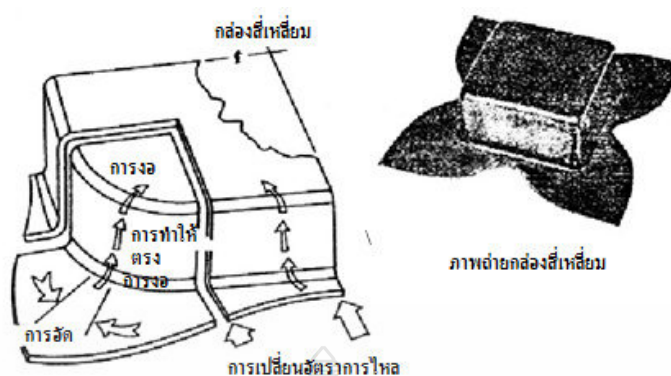
ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถนำมาใช้เพื่อหาค่าอื่นๆ ที่ ต้องการต่อไปได้อีก เช่น เมื่อรู้ค่าการเสียรูป (Displacement) ตามจุดต่อต่างๆ ของโครงสร้างก็สามารถ นำไปใช้หาค่าความเครียด (Strain) และความเค้น (Stress) ได้ตามลำดับ หรือเมื่อรู้ค่าอุณหภูมิที่จุดต่อก็ สามารถคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ หรือเมื่อรู้ค่าความเร็วของของไหลที่จุดต่อก็ สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลได้ เป็นต้น

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้ จะเห็นได้ว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น เป็นระเบียบวิธีที่มี ระเบียบแบบแผนอย่างเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีหัวใจสำคัญอยู่ที่การสร้างสมการของเอลิเมนต์ใน ขั้นตอนที่ 3

2.4 การลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม

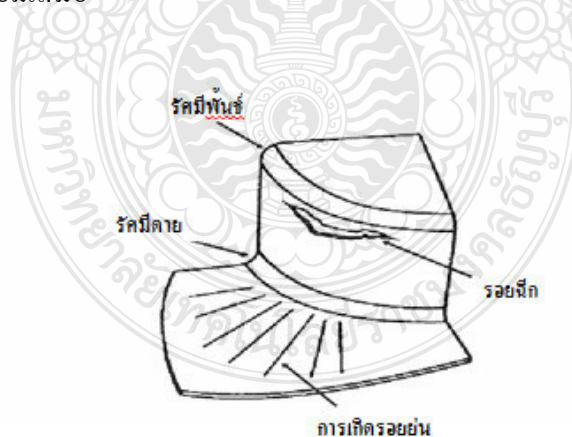
การลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม [23] นั้นการไหลตัวของโลหะจะไม่เท่ากันทุกจุดทุกด้าน เหมือนการลากขึ้นรูปทรงกระบอก ดังนั้น แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปแต่ละส่วนก็จะไม่เท่ากันตามไป ด้วย โดยการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจะเกิดการไหลตัวของโลหะได้ 2 ส่วน คือ ส่วนตรงมุมของ กล่องซึ่งเกิดการลากขึ้นรูป (Drawing) อย่างแท้จริงและส่วนของผนังกล่องจะเป็นการลากขึ้นรูปใน ลักษณะเดียวกับการพับ (Bending)

การวิเคราะห์การไหลตัวของโลหะตรงมุมกล่อง ซึ่งการศึกษาการไหลตัวของโลหะระหว่าง การลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมนั้นทำได้โดยใช้กระแสไฟฟ้ากัด (Etching) ที่ผิวของแผ่นชิ้นงานแบน ให้เป็นวงกลมเล็กๆ ลักษณะของการไหลของโลหะจะถูกแสดงให้เห็นถึงครั้งแรก เมื่อวงกลมเล็กๆ นั้นถูกเปลี่ยนเป็นรูปวงรี การศึกษาการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมนั้นต้องแบ่งกล่องสี่เหลี่ยมออกเป็น ส่วนต่างๆ แล้วนำมาศึกษา ดังแสดงในภาพที่ 2.18 เนื่องจากมุมของกล่องที่จะนำมาวิเคราะห์นั้น จะใช้ มุมกล่องสี่เหลี่ยมเพียงแอมุมเดียว ลักษณะต่างๆ ที่ขึ้น เมื่อลากขึ้นรูปกล่องก็ยังคงเกิดขึ้นที่มุมของ กล่องมุมอื่นๆเหมือนกัน ลูกศรอันใหญ่ที่ได้แสดงในภาพที่ 2.8 ได้แสดงให้เห็นว่าโลหะจะมีการอัดตัว ตรงมุมของแผ่นชิ้นงานก่อนจะยินยอมไหลไปเหนืออร์สมิของคาย ซึ่งที่ส่วนนี้ยังคงมีโลหะเหลืออยู่มาก เกินไป อาจจะทำให้รอยยับขึ้นได้ง่าย ขณะที่มีการลากขึ้นรูปจะต้องใช้แรงของแผ่นกดยึดชิ้นงานเพื่อ ป้องกันการเกิดรอยยับที่ตรงมุมของกล่องนี้



ภาพที่ 2.18 การแบ่งกล่องสีเหลืองออกเป็นส่วนต่างๆ [23]

การใช้รัศมีของคายที่ใหญ่ตรงมุมของกล่องจะช่วยลดแรงที่เกิดจากการจ่อและการทำให้ตรงซึ่งมันจะช่วยให้การลากขึ้นรูปทำได้ง่ายขึ้น มันเป็นความจริงเช่นเดียวกับการลากขึ้นรูปกล่อง เพราะว่ารอยย่นที่เกิดขึ้นที่มุมของแผ่นขึ้นงานจะเบียดกันเพื่อแย่งการไหลตรงมายังมุมของกล่อง การเกิดรอยย่นเช่นนี้จะมองเห็นได้โดยตา สำหรับรอยย่นและการฉีกขาดที่เกิดขึ้นจากการลากขึ้นรูปภาพที่บริเวณมุมของกล่องได้แสดงในภาพที่ 2.19 เมื่อมีแรงดึงเกิดขึ้นอย่างรุนแรงที่ผนังซึ่งเป็นบริเวณมุมของกล่อง จะทำให้มีการฉีกขาดเกิดขึ้นที่บริเวณนั้น การฉีกขาดที่ตรงมุมของกล่องนี้อาจจะมากขึ้นจนลามไปถึงผนังส่วนที่แบน การฉีกขาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดมันจะเริ่มต้นเกิดขึ้นที่มุมของกล่องระหว่างการลากขึ้นรูปกล่องสีเหลืองเสมอ



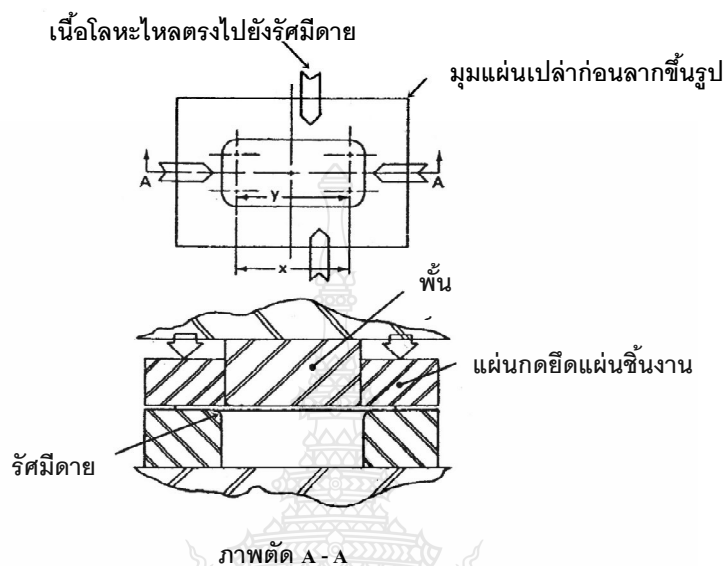
ภาพที่ 2.19 การวิเคราะห์ที่มุมของกล่องสีเหลือง [23]

การวิเคราะห์การไหลตัวของโลหะตรงส่วนของผนังกลอง จะใช้กระแสไฟฟ้ากัดให้เป็นวงกลมเพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงของโลหะที่ได้จากการลากขึ้นรูป การลากขึ้นรูปบริเวณมุมกลองนั้น โลหะจะเกิดการอัดตัวตรงมุมของแผ่นขึ้นงานก่อน จึงจะยินยอมให้โลหะไหลตัวลงไปเหนือรัศมีคาย แต่สำหรับการทำผนังส่วนที่แบนของกลองนั้นไม่มีการอัดตัวของโลหะเพื่อยอมให้โลหะไหลไปยังรัศมีของคาย การศึกษาถึงเงื่อนไขนี้จะถูกพบ ดังภาพที่ 2.20 ความยาวของแผ่นขึ้นงานเพื่อที่จะป้อนเข้าไปเป็นผนังส่วนที่แบนของกลองได้ถูกแทนที่โดยใช้สัญลักษณ์ x ความยาวของปากคายที่จะทำให้โลหะไหลผ่านลงไปเป็นผนังส่วนที่แบนได้ถูกแสดงโดยการใช้ความยาว y เพราะความยาว x เท่ากับความยาว y การอัดตัวของโลหะจึงไม่เป็นที่จำเป็น ถ้าไม่มีการอัดตัวของโลหะเกิดขบวนการนั้นไม่สามารถจะเรียกได้ว่าการลากขึ้นรูป

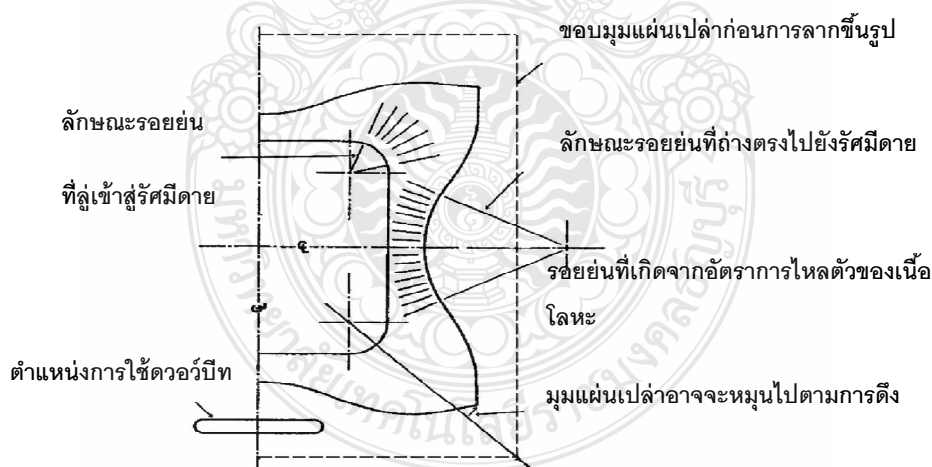
ในการบรรยายการไหลของโลหะที่ผนังส่วนที่แบนของกลองที่เหลื่อมได้โดยการแสดงถึงขั้นตอนดังนี้ เริ่มแรกแผ่นขึ้นงานจะเลื่อนตรงไปยังรัศมีของคายโดยไม่มีการแข็งตัวระหว่างถูกแปรรูปหรือไม่มีการเปลี่ยนขนาด ต่อมาเมื่อโลหะถูกป้อนอยู่เหนือรัศมีของคาย โลหะจะถูกทำให้งอ ลำดับสุดท้าย โลหะได้ทำให้ตรงเพื่อสร้างผนังส่วนที่แบนของกลองที่เหลื่อมขึ้นมา ขั้นตอนของการที่เกิดเหตุการณ์เหล่านี้ได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 2.18 ด้วยเหมือนกัน ขบวนการของการเปลี่ยนแปลงของโลหะนี้ได้ถูกเรียกว่า การงอ และการทำให้ตรง (Bend and Straighten) การลากขึ้นรูปกลองที่เหลื่อมก็จะเป็นขบวนการที่ผสมผสานระหว่างขบวนการลากขึ้นรูปกับขบวนการงอและการทำให้ตรงดังที่กล่าวมาแล้ว เมื่อไหร่ก็ตามที่มีการลากขึ้นรูปเพียงบางส่วนของขึ้นงาน โดยการใช้การลากขึ้นรูป ในการปฏิบัติภายในโรงงานจะเรียนการผลิตขึ้นงานในลักษณะเช่นนั้น รวมทั้งกันว่าเป็นการใช้กระบวนการการลากขึ้นรูป

รอยยับที่เกิดจากอัตราการไหล (Flow Rate Wrinkle) ผนังส่วนที่เป็นมุมและส่วนที่แบนของกลองที่เหลื่อมนั้นสามารถที่จะมองเหมือนกับว่าแยกส่วนออกจากกัน โดยไม่มีความยุ่งยาก แต่บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของโลหะจากส่วนหนึ่ง ไปยังอีกส่วนหนึ่ง ของผนังส่วนที่เป็นมุมกับส่วนที่แบนนั้น โลหะซึ่งถูกลากขึ้นรูปที่มุมของกลองจะไหลตรงไปยังรัศมีของคายก่อนข้างจะเข้าเนื่องจากมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการอัดตัวของโลหะ แผ่นขึ้นงานส่วนที่เป็นมุมนี้สามารถเคลื่อนที่ตรงไปยังรัศมีของคายได้เร็วเท่ากับการเคลื่อนที่ของแท่งพื้นที่ลากผ่านขึ้นงาน แต่ในส่วนของผนังส่วนที่แบนแผ่นขึ้นงานจะเคลื่อนที่ตรงไปยังรัศมีของคายด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของแท่งพื้นที่ระหว่างที่แท่งพื้นที่ ลากโลหะผ่านขั้นตอนของการทำให้งอและการทำให้ตรงของผนังส่วนที่แบนนั้นจะทำให้มีการอัดตัวของโลหะเกิดขึ้นบ้าง ปัญหาที่สำคัญในการลากขึ้นรูปกลองที่เหลื่อมก็คือ การแปรผันใน

อัตราของการไหลหรืออัตราของการไหลที่เร็วกว่าของผนังส่วนที่แบนนี้ ผลก็คือจะเกิดการรัศมีตัว (Pull-In) ของขอบแผ่นชิ้นงานอย่างรุนแรง



ภาพที่ 2.20 การไหลของของโลหะที่บริเวณผนังส่วนตรงของการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม [23]



ภาพที่ 2.21 ลักษณะของรอยย่นที่เกิดจากอัตราการไหล [23]

ปัญหาของการผลิตหลายๆ อย่าง อาจจะมาจกอัตราการไหลที่แปรเปลี่ยน ซึ่งจะมองเห็น รอยย่นที่เกิดขึ้นได้ที่ปีกขอบของผนังส่วนที่ตรง รอยย่นที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะถ่างออกตรงไปยังรัศมีตาย

และจะเรียกมันว่า รอยย่นที่เกิดจากอัตราการไหล ดังแสดงในภาพที่ 2.21 การเกิดรอยย่นที่ปีกของผนัง ส่วนที่ตรงจะไม่เหมือนกับรอยย่นที่ปีกของผนังส่วนที่เป็นมุมซึ่งการเกิดรอยย่นที่ปีกของผนังส่วนที่เป็นมุมจะมีลักษณะลู่เข้า จะต้องมีการใช้แผ่นยึดกดชิ้นงานเพื่อป้องกันหรือกำจัดการเกิดรอยย่นเหล่านั้นที่บริเวณรอบๆ เส้นรอบรูปของกล่องสี่เหลี่ยม การลากชิ้นรูปกล่องก็มีการเกิดรอยย่นทั้งสองแบบนี้เช่นเดียวกัน ลูกศรใหญ่และเล็กที่ได้แสดงเอาไว้ในผนังส่วนที่ตรงในภาพที่ 2.18 จะแสดงให้เห็นถึงการลดลงของอัตราการไหลใกล้กับมุมของกล่อง

2.5 ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในระหว่างการลากชิ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม

ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet Metal Forming) ที่ได้มาจากการผลิตโดยวิธีการขึ้นรูปเย็น (Cold Forming) ในรูปแบบการปั๊มขึ้นรูป (Stamping) นั้น มักจะเกิดความเสียหายแบบการคอคอด (Necking) การฉีกขาด (Tearing) การเกิดรอยย่น (Wrinkling) และเกิดการสปริงตัวกลับ (Spring Back) อย่างไรก็ตามวิธีนี้ทำให้การผลิตชิ้นส่วนเป็นไปอย่างสะดวกและรวดเร็วเมื่อแม่พิมพ์ได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสมจึงมีความจำเป็นที่จะต้องออกแบบกระบวนการปั๊มขึ้นรูปที่ปราศจากความเสียหายจากกรณีดังกล่าว การเกิดรอยย่นและการฉีกขาดจากการปั๊มขึ้นรูปนั้นมักเป็นปัญหาหลักที่ผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรกก่อน จากนั้นจึงพิจารณาผลกระทบจากการเกิดการสปริงตัวกลับ [24]

ปัญหาหลักที่พบในการขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นคือการแตก การโก่ง (Buckling) และการย่น การเสียรูป (Shape Distortion) โลหะหย่อน (Loose Metal) และเนื้อผิวเสีย (Undesirable Surface Textures) เกิดขึ้นอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างซึ่งจะทำให้ชิ้นงานโลหะแผ่นนั้นใช้ไม่ได้ ผลของปัญหาดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ [25]

2.5.1 การแตก (Cracking)

เกิดขึ้นเมื่อแผ่นแบล็กโลหะ ได้รับแรงจากการดึงยึดขึ้นรูปหรือแรงเฉือนจากการดรอว์มากเกินไปจนขีดจำกัดความเสียหายของวัสดุ ตามสภาพความเครียดที่พึงจะรับได้ อัตราความเครียดและอุณหภูมิ ในการดึงยึดเริ่มต้นแผ่นโลหะจะบางลงอย่างสม่ำเสมอในพื้นที่ทั่วไป เมื่อไปถึงจุดที่มีการเปลี่ยนรูปมากทำให้เกิดแถบที่บางเฉพาะแห่งที่เรียกว่าการคอคอด ซึ่งสุดท้ายทำให้แผ่นโลหะแตก การเกิดรอยคอคอดโดยทั่วไปถือว่าเป็นความเสียหาย เพราะทำให้เกิดจุดบกพร่องที่มองเห็นได้และทำให้โครงสร้างอ่อนแอ การแตกจากการเฉือนสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่มีการลดความหนามาก่อน ตัวอย่างทั่วไปของการแตกลักษณะนี้ก็คือการตัดซอย (Slitting) การแบล็ก (Blanking) และการทริม

(Trimming) ในการปฏิบัติงานแผ่นโลหะจะถูกเลื่อน โดยขอบคมมีดที่ใช้แรงกดในแนวตั้งฉากกับระนาบของแผ่นโลหะจะทำให้มีความเสียหายเกิดขึ้น แต่จะน้อยกว่าความเสียหายจากการดึงยึดขึ้นรูป

2.5.2 การโก่งและการย่น (Buckling and Wrinkling)

ในการขึ้นรูปด้วยพื้นที่กดอัดบนแผ่นแบนลงก็โลหะจะทำให้แผ่นโลหะยืดและดึงผ่านแหวนจับยึดของแผ่นแบนลงก็บริเวณขอบอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีขนาดเล็กลงทำให้เกิดความเค้นกดในแนวเส้นรอบวง ถ้าความเค้นนี้มีค่าถึงระดับวิกฤติของวัสดุและความหนาที่จะทำให้เกิดเป็นคลื่นเล็กน้อยซึ่งเรียกว่าการโก่ง การโก่งอาจจะพัฒนาเป็นคลื่นที่มองเห็นได้ชัดเจนจำนวนมากต่อเนื่องกันเรียกว่ารอยย่น ถ้าแรงจับยึดแผ่นแบนลงก็ไม่สูงพอสามารถทำให้เกิดรอยย่นที่ตำแหน่งอื่นๆได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่มีการเปลี่ยนหน้าตัดกะทันหันและบริเวณที่ไม่มีโลหะไหลเข้ามาหรือสัมผัสเพียงด้านเดียวเท่านั้น ถ้ามีรอยย่นมากผิดปกติโลหะอาจพับทบกันสองถึงสามชั้นซึ่งอาจทำให้บริเวณอื่นแตกได้ เพราะโลหะไม่สามารถไหลตามปกติได้ ด้วยเหตุนี้การเพิ่มแรงจับยึดแผ่นแบนลงก็จึงใช้แก้ปัญหาการแตกได้

2.5.3 การเสียรูป (Shape Distortion)

โลหะจะเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติกด้วยแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป เมื่อเอาแรงภายนอกออกความเค้นยืดหยุ่นภายในมีการคลายตัว บางแห่งที่มีการคลายตัวอย่างสมบูรณ์ก็ทำให้ขนาดของชิ้นงานเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตามในบริเวณที่ได้รับการดัด (Bending) มีการกระจายความเค้นยืดหยุ่นตลอดความหนา นั่นคือความเค้นที่ผิวด้านนอกแตกต่างจากความเค้นด้านใน ถ้ารูปทรงของชิ้นงานไม่สามารถบังคับกับความเค้นเหล่านี้ไว้ได้ การคลายตัวจะทำให้รูปร่างของชิ้นงานเปลี่ยนไปนั้น ซึ่งเรียกว่าการเสียรูปหรือการดีดกลับ (Spring Back) การดีดกลับสามารถชดเชยสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ให้เหมาะสมกับสมบัติวัสดุ แต่อาจจะยังคงมีปัญหาหากถ้าแผ่นแบนลงแต่ละแผ่นมีสมบัติของวัสดุหรือกรรมวิธีเปลี่ยนแปลง

2.5.4 โลหะหย่อน (Loose Metal)

เกิดขึ้นในบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนรูปและไม่ต้องการให้เกิดขึ้นเพราะจะมีการเปลี่ยนรูปทรงได้ง่าย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าออยล์คานนิ่ง (Oil Canning) ซึ่งอาจมีบางแห่งยุบหรือนูนจากปกติ ในการดัดงอเป็นมุมแหลมตั้งแต่ 2 แห่งขึ้นไปอย่างทันทีในทิศทางเดียวกัน เช่น การดัดเป็นลอนแหลมๆ มีแนวโน้มที่จะทำให้โลหะระหว่างลอนมีการหย่อนเพราะการดึงโลหะข้ามลอนเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก บางครั้งอาจหลีกเลี่ยงปัญหาได้โดยไม่ให้โลหะสัมผัสสรอยนูนทั้ง 2 รอย ในเวลาเดียวกันดังนั้นการยึดเกิดขึ้นก่อนสัมผัสสรอยที่สอง โลหะหย่อนมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นได้ในบริเวณศูนย์กลางของ

ชิ้นงานขนาดใหญ่ที่ค่อนข้างแบนเรียบหรือมีความโค้งเล็กน้อย การเพิ่มแรงเพื่อควบคุมรอบๆขอบแผ่นแบลงก็ทำให้ปัญหานี้ดีขึ้น

2.5.5 เนื้อผิวเสีย (Undesirable Surface Textures)

โลหะแผ่นที่มีการเปลี่ยนรูปร่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าโลหะมีเกรนหยาบมักจะทำให้เกิดเนื้อผิวโลหะไม่เรียบซึ่งเรียกว่าผิวส้ม (Orange Peel) ปกติจะไม่ยอมให้เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานที่มองเห็นได้ในขณะใช้งาน ปัญหาของผิวที่เกิดขึ้นบนโลหะอีกอย่างหนึ่งก็คือการขีดที่จุดคราก นั่นคือวัสดุได้ขีดตัวออกอีกหลายเปอร์เซ็นต์หลังจากการครากโดยไม่ต้องเพิ่มแรงกระทำ ในการเปลี่ยนภาพที่ระดับความเครียดต่ำในโลหะเหล่านี้เกิดขึ้นมากในลักษณะที่เป็นแถบไม่สม่ำเสมอบนผิวโลหะเรียกว่าเส้นลือเดอร์ (Lueders Line) หรือริ้วคราก (Stretcher Strains) ความบกพร่องนี้จะหายไปเมื่อมีระดับความเครียดปานกลางและสูง อย่างไรก็ตามชิ้นงานเกือบทุกชิ้นมีบางบริเวณที่มีระดับความเครียดต่ำ ความบกพร่องนี้ไม่สามารถปกปิดด้วยการพ่นสี เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์ที่ผ่านการบ่ม อะลูมิเนียมและแมกนีเซียมเจือบางชนิดเกิดเส้นลือเดอร์อย่างชัดเจน [25]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 อิทธิพลของแรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน

นฤทธิ์ คชฤทธิ์ [26] ได้ทำการศึกษาถึงแรงกดยึดชิ้นงานที่ใช้ในการลากขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแล้ว โดยเปรียบเทียบกับสัดส่วนกับแรงที่เกิดขึ้นในพื้นที่ ในการทำการทดลองนั้นได้ใช้เครื่องเพรสหนึ่งจังหวะมาทำการลากขึ้นรูป โดยให้แรงกดยึดแผ่นชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากความเสียดทานของยางยูรีเทนที่ได้สวมอยู่กับแกนในชุดพั้นซ์และชุดกดยึดแผ่นชิ้นงาน วงแหวนยางยูรีเทนขยายตัว เมื่อได้รับแรงกดขณะขึ้นรูปทำให้เกิดความเสียดทานเพื่อต้านการเคลื่อนที่ของชุดกดยึดแผ่นชิ้นงาน ทำให้เกิดแรงกดยึดแผ่นชิ้นงานขึ้นอย่างอัตโนมัติ เมื่อใช้หลักการดังกล่าวกับการลากขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแผ่นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ที่มีอัตราส่วนการลากขึ้นรูปเท่ากับ 1.92 ต้องใช้แรงกดยึดแผ่นชิ้นงานประมาณ 29% ของแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสูงสุด จึงเพียงพอในการยับยั้งการเกิดรอยย่นในระหว่างการขึ้นรูปได้

2.6.2 อิทธิพลของรัศมีคานในการลากขึ้นรูป

ไพฑูรย์ โกวิทพะวงศ์ [27] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรัศมีคานในการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดกว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร และความลึก 53 มิลลิเมตร ความหนา 0.8 มิลลิเมตร มีรัศมีพั้นซ์คงที่ 10 มิลลิเมตร และใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น โดยที่มีตัวแปรที่ต้องการศึกษาคือรัศมีคานที่ 4, 10, 12 และ 16 มิลลิเมตร โดยที่ทำการทดลองศึกษาถึงอิทธิพลของรัศมี

คายที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป และความหนาของชิ้นทดลอง ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยผลการทดลองที่เกิดขึ้นคือที่รัศมี 4 มิลลิเมตร ไม่สามารถที่จะลากขึ้นรูปได้ ส่วนที่รัศมีคาย 10, 12 และ 16 มิลลิเมตร สามารถที่จะทำการลากขึ้นรูปได้ และแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปมีค่าต่ำลงเมื่อรัศมีคายมีค่ามากขึ้น คือที่รัศมีคาย 10 มิลลิเมตร จะใช้แรงสูงที่สุดในการลากขึ้นรูป และความหนาของชิ้นทดลองในบริเวณที่มุมของกันกล่องจะมีความหนามากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มรัศมีของคาย โดยที่ความหนาที่วัดได้จะมีค่า 0.63, 0.64 และ 0.67 มิลลิเมตร ที่รัศมีคายเท่ากับ 10, 12 และ 16 มิลลิเมตร ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมเพื่อจะทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

2.6.3 ด้านงานลากขึ้นรูปโดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ชาญศักดิ์ ภัทรพรนนท์ [28] ทำการศึกษาการลากขึ้นรูปลึกลงสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วัสดุที่ใช้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (JIS:SPCEN) ขนาดกว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร ความลึก 53 มิลลิเมตร และความหนา 0.78 มิลลิเมตร ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยพัฒนาด้วยโปรแกรม OPTRIS งานวิจัยจะแบ่งการทำงานเป็น 2 ส่วนคือ

ส่วนที่ 1 เป็นการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของโปรแกรม โดยทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการลากขึ้นรูปกับผลการทดลองที่มีผู้ที่ทำมาก่อนแล้ว ซึ่งผลที่นำมาเปรียบเทียบคือแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ความหนาของชิ้นงานและการแตกหรือการย่นของชิ้นงานในการจำลองพบว่าผลจากการจำลองที่ได้จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลอง ในส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของรัศมีคายที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป การแตกหรือการย่นที่เกิดขึ้นในการลากขึ้นรูป และความหนาของชิ้นงานที่ได้ จากผลงานวิจัยพบว่าขนาดของรัศมีคายที่สามารถจะทำการลากขึ้นรูปได้นั้นจะอยู่ในช่วงระหว่าง 5 - 21 มิลลิเมตร (6 - 26 เท่าของความหนาแผ่นเปล่า) โดยที่ช่วงรัศมีคาย 12 - 16 มิลลิเมตร จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อยและความหนาของแผ่นเปล่าเปลี่ยนน้อยที่สุด

สวัสดี โสคามุข [29] ได้ทำนายความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปซึ่งผลการวิจัยพบว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปโดยวิธีการทดลองสร้างได้ตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02 เมื่อเทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแตกต่างกัน 12 % ณ ความเครียดในระนาบ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์การขึ้นรูปขึ้นงานจริงได้ ทำนายผลการขึ้นรูปได้สอดคล้องกับความเสียหายและความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นงานจริงกับผลจากการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Chandorkan [30] ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของแผ่นขึ้นงานและแรงกดยึดของแผ่นเปล่าในการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมอะลูมิเนียมและได้มีการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สร้างแบบจำลองการลากขึ้นรูปเพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองที่เกิดขึ้น โดยทำการทดลองด้วยการใช้อะลูมิเนียม

(2008-T4) หนา 1.016 มิลลิเมตร ลากขึ้นรูปกล่องขนาด 305 x 380 x 50 มิลลิเมตร ใช้สารหล่อลื่น (DB-4251) มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.08 มีลักษณะของแผ่นเปล่า คือ แผ่นสี่เหลี่ยม แผ่นตัดมุม แผ่นโค้งมน จากการทดลองพบว่าแผ่นเปล่าสี่เหลี่ยมสามารถขึ้นรูปได้ลึกที่สุดรองลงมาเป็นแผ่นเปล่าตัดมุมและแผ่นเปล่าโค้งมน

Toh และ Kobayashi [31] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรูปร่างแผ่นเปล่าในการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมโดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ทฤษฎีเยื่อแผ่นบาง (Membrane Theory) ในการวิเคราะห์ และคุณสมบัติของวัสดุเป็นแบบ Rigid-Plastic

2.6.4 ด้านงานขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่มุ่งแก้ปัญหาการขึ้นรูปเหล็กกลุ่ม HSS และ AHSS ดังมีงานวิจัยที่ดำเนินงานด้านการติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป การเกิดการติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปเกิดจากหลายปัจจัยเช่น ชนิดของวัสดุ ความหนาของวัสดุ และมุมของการตัดเป็นต้น [32-33] Yoshida และคณะ [34] ศึกษาถึงกลไกการเกิดการติดตัวกลับและได้ใช้เทคนิคการควบคุมรูปร่างของชิ้นงานที่ทำมาจาก HSS ด้วยการทำ Reverse Bending ในช่องว่างแม่พิมพ์หรือในระยะเคลียร์เรนซ์ (Clearance) การเพิ่มแรงดึงที่ผนังข้างของชิ้นงานขณะทำการขึ้นรูปด้วยการให้แรงจากแผ่นค้ำชิ้นงาน (Blank Holder) และสร้างรอยนูนสำหรับไหลผ่าน (Draw Bead) นอกจากนี้ Yoshida และคณะ [35] ลดการติดตัวกลับของชิ้นงาน HSS ด้วยการขึ้นรูปด้วยการกระแทก (Crash Forming) ชิ้นงานรูปตัวยู (U-Channel) Yanagimoto และคณะ [36] แสดงให้เห็นว่าชิ้นงาน HSS หลังการขึ้นรูปมีรูปร่างเป็นไปตามที่ต้องการไม่เกิดการติดตัวกลับเมื่อขึ้นรูปด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 477 °C แต่ต่ำกว่างานขึ้นรูปร้อน (Hotworking) Mori และคณะ [37] ได้ใช้เครื่องเซอร์โวเพรส (Servo Press) ในการควบคุมการเกิดการติดตัวกลับของชิ้นงานด้วยการลดความหนาของชิ้นงานในการพับขึ้นรูปตัววี (V-Bending) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอีกจำนวนหนึ่ง [38-39] ที่ทำนาย และศึกษาถึงปัจจัยการเกิดและการลดการติดตัวกลับกับวัสดุชิ้นงานชนิดอื่น ทั้งจากการทดลองและการจำลองการทำงาน

สรุปจากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้น แนวทางการทำวิจัยจะทำการเปรียบเทียบผลการทดลองการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ศึกษาผลการขึ้นรูปมีความสอดคล้องให้ผลลัพธ์ในทิศทางเดียวกันและการประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปและแผนภาพความเครียดเพื่อทราบถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงานขึ้นรูปโลหะแผ่น ศึกษาถึงผลกระทบขีดจำกัดการขึ้นรูปและแผนภาพความเครียด เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางสำหรับการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยนั้นแบ่งออกเป็นดังนี้ ส่วนแรกคือการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนที่สองคือการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริงเพื่อวัดแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป วัดความหนาและบริเวณที่เกิดความเสียหาย นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบและวิเคราะห์เพื่อทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างการทดลองจริงกับการจำลองขึ้นรูป ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีขั้นตอนการวิจัยมีดังนี้

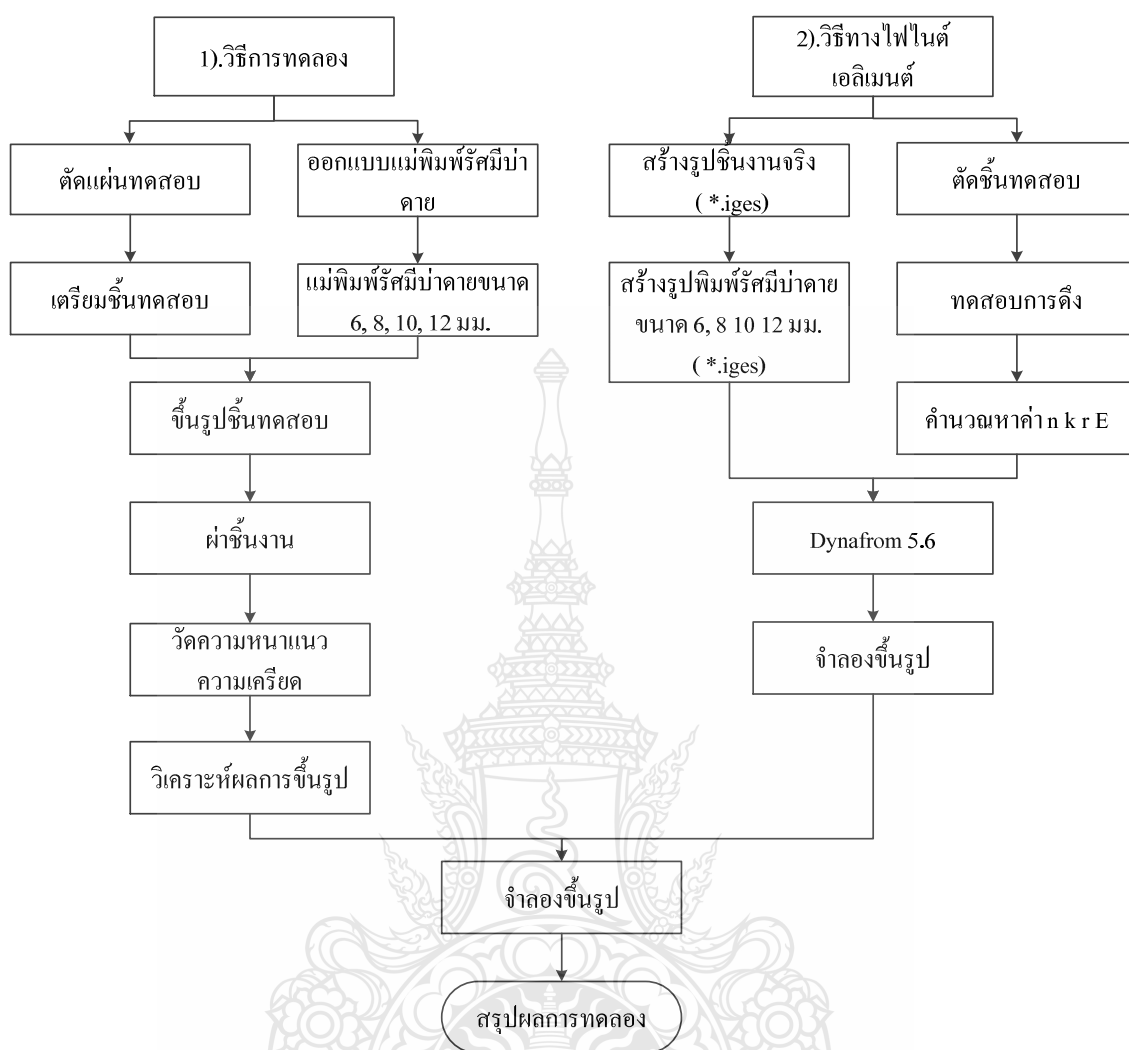
- 1) เครื่องและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินการวิจัย
- 2) ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย
- 3) การเก็บผลและเปรียบเทียบผลการทดลอง
- 4) การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินการวิจัย

- | | |
|---|-----------|
| 1) เครื่องเพรสขึ้นรูปขนาด 80 ตัน | 1 เครื่อง |
| 2) แม่พิมพ์ขึ้นรูป | 1 ชุด |
| 3) เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine, Dynamic Type) | 1 ชุด |
| 4) เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดขึ้นทดสอบ (Extensometer) | 1 ชุด |
| 5) อุปกรณ์วัดแรงกดขณะขึ้นรูป (Load Cell) | 1 ชุด |
| 6) อุปกรณ์ส่งแรงดัน (Voltage) และรับสัญญาณ (Data Rocker) | 1 ชุด |
| 7) คอมพิวเตอร์และปริ้นเตอร์ | 1 ชุด |
| 8) โปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ Dynaform 5.6 | 1 โปรแกรม |
| 9) โปรแกรมช่วยในการออกแบบ SolidWorks 2010 | 1 โปรแกรม |

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วน ในส่วนแรกดำเนินการขึ้นรูปชิ้นงานที่รูปทรงไม่สมมาตรเพื่อนำมาวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปจริง ส่วนที่สองเป็นจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



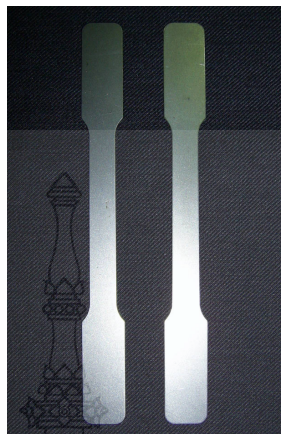
ภาพที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินการวิจัยการศึกษาอิทธิพลของรีดรีดในการลากขึ้นรูปด้วย สี่เหลี่ยมแบบมีปีกสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

จากแผนภาพการดำเนินการวิจัยทั้งสองส่วนสามารถแสดงรายละเอียดดังมีขั้นตอนดังนี้

1) ทดสอบหาสมบัติอัตราส่วนความเครียดถาวร n, r (Anisotropy) ของแผ่นเหล็กเกรดเย็น SAPH440, SPCC ความหนา 1.4 มิลลิเมตร ตามวิธีการของ ASTM E517 vol.01.03.(1993)

1.1 นำแผ่นเหล็กเกรดเย็น SAPH440, SPCC ความหนา 1.4 มิลลิเมตรมาทำการทดสอบหาค่า r (Anisotropy) ตัดขึ้นทดสอบ (Blanking) ตามแนวทิศทางการรีด (Rolling Direction) จากแผ่นเหล็กเกรดเย็นที่นำมาใช้ในการทดสอบ

1.2 วัดความกว้าง (W_0) และความหนา (T_0) ของแต่ละชิ้นทดสอบทุกแนวการรีดบันทึกข้อมูลในช่วงความยืด (Gage length)



ภาพที่ 3.2 ลักษณะชิ้นทดสอบหาสมบัติเชิงกล

1.3 นำชิ้นทดสอบที่วัดค่าความกว้างและหนา มาทดสอบการดึงตามแนวแกน

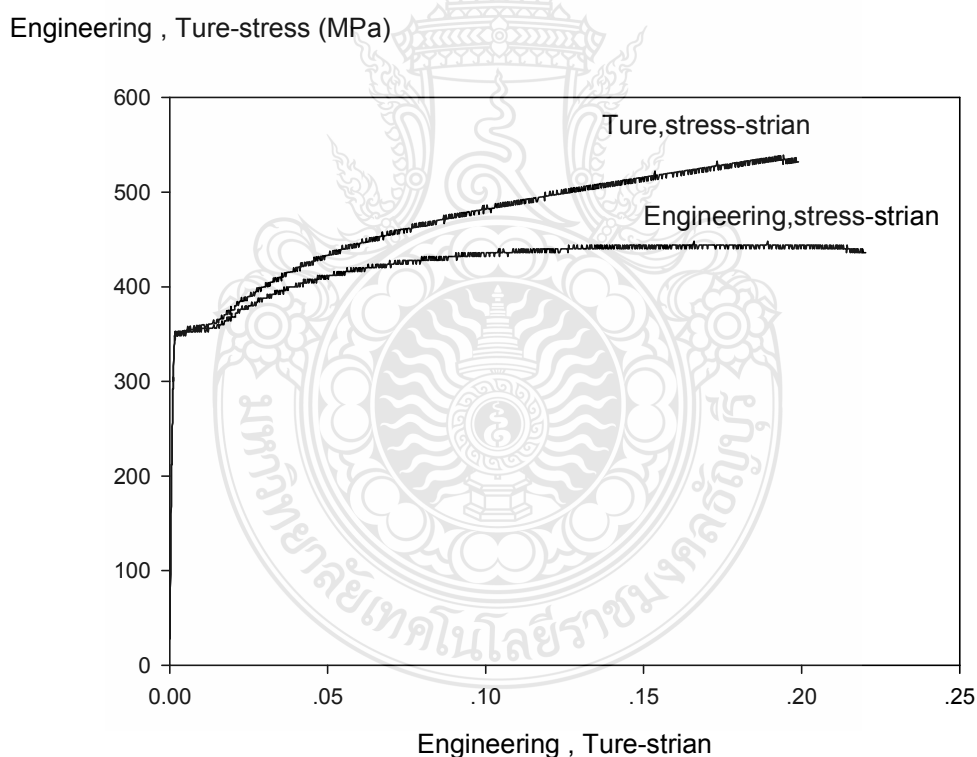
1.4 วัดความกว้าง (W_x) และความหนา (T_x) ของชิ้นทดสอบที่ดึงทดสอบแล้ว อุปกรณ์ (Extensometer) จะบันทึกการเปลี่ยนแปลงความยาวและพื้นที่หน้าตัด นำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกมาคำนวณ

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

ภาพที่ 3.3 การบันทึกข้อมูลการทดสอบการดึงจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

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

- 2.1 วัดความกว้างความหนาของชิ้นทดสอบช่วงระยะยึด (Gage Length)
- 2.2 จับชิ้นงานทดสอบแรงดึงบันทึกค่าแรงที่กระทำและระยะที่เปลี่ยนแปลงช่วงที่หนึ่ง
- 2.3 คำนวณหาความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress, S) เท่ากับแรงกระทำช่วงที่หนึ่งต่อขนาดพื้นที่หน้าตัด
- 2.4 คำนวณหาความเครียดวิศวกรรม (Engineering Strain, ϵ)
- 2.5 คำนวณหาความเค้นจริง (True Stress) = $S \times (1 + \epsilon)$
- 2.6 คำนวณหาความเครียดจริง (True Strain) = $\ln(1 + \epsilon)$
- 2.7 คำนวณหา y หรือ Log True Stress



ภาพที่ 3.4 แผนภาพความเค้น-ความเครียดวิศวกรรมและความเค้น-ความเครียดจริงของเหล็กรีดเย็นหนา 1.4 มิลลิเมตร

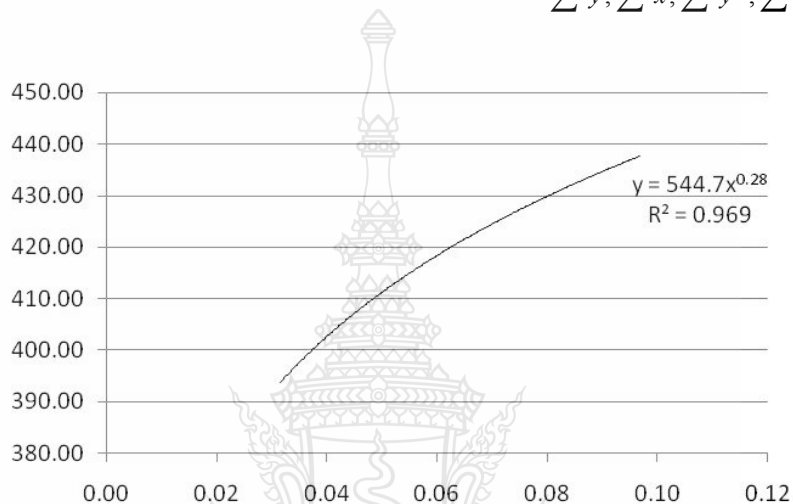
2.8 คำนวณหา x หรือ Log True Stress

2.9 คำนวณหา y^2

2.10 คำนวณหา x^2

2.11 คำนวณหา xy

2.12 คำนวณหาค่าจากการบันทึก 2.2 - 2.11 ทุกเปลี่ยนแปลงระยะยืดในช่วง Gage Length ให้จำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงระยะยืดเป็น N หาผลรวมทั้งหมด $\sum y, \sum x, \sum y^2, \sum x^2, \sum xy$



ภาพที่ 3.5 หาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรงและเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดใช้แบบสมการกำลัง (Power Function)

ตารางที่ 3.1 สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SAPH440 (JIS) ความหนา 1.4 มิลลิเมตร

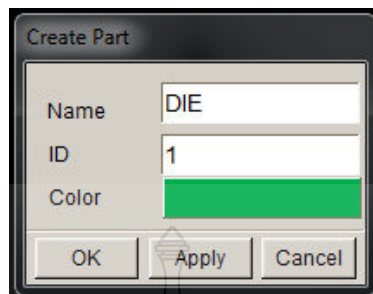
ชนิดของวัสดุ	σ_y (MPa)	สัมประสิทธิ์ความต้านแรง K (MPa)	เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด(n)	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r)			
				R_0	R_{45}	R_{90}	\bar{R}
SAPH440	357	544	0.28	1.85	2.04	2.34	2.07
SPCC	226	501	0.18	1.67	1.92	2.07	1.89

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง
เกรด SAPH440 (JIS) ความหนา 1.4 มิลลิเมตร

Symbol (JIS)	SPCC		SAPH440	
Chemical composition (%)	C	0.0267	C	0.1260
	S	0.0135	Si	0.0500
	Mn	0.1545	Mn	1.0250
	P	0.0236	P	0.0120
	Cr	0.0123	S	0.0030
	Ni	0.0112	Cr	0.0210
	Mo	0.0047	Ni	0.0180
	Cu	0.0170	Mo	0.0120
	V	0.0029	Cu	0.0200
	Co	0.0021	Nb	<0.0010
	Al	0.0290	V	0.0020
	Ti	0.0016	Co	<0.0010
	Sn	0.0035	Al	0.0210
	W	0.1255	B	<0.0010
	-	-	Ti	0.0010
	-	-	As	0.0020
	-	-	Sn	0.0080
	-	-	W	0.0010

3) การจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูป
ของงานวิจัยนี้ ใช้โปรแกรม Dyna Form 5.6 จำลองการขึ้นรูปของเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SAPH440,
SPCC มีขั้นตอนดังนี้ คือ ก่อนการประมวลผล (Pre-Processing) ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis) และ
แสดงผลลัพธ์จากการประมวลผล (Post-Processing)

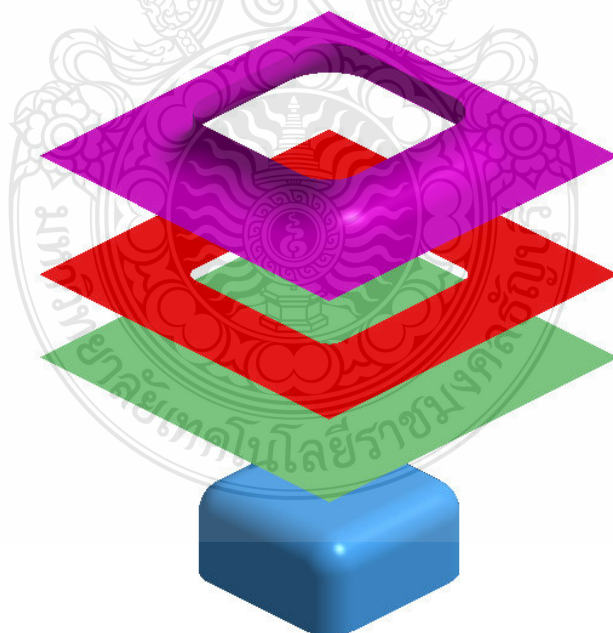
3.1.1 ก่อนการประมวลผล



ภาพที่ 3.6 กำหนดชื่อของเครื่องมือ

ขั้นตอนก่อนการประมวลผลมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ขั้นตอนการกำหนดชื่อของเครื่องมือเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 3.6 จากเมนูบาร์เลือกเมนู Part โดยเลือกฟังก์ชัน Create กำหนดชื่อ Die, Punch, Bender และ Blank จากนั้นกำหนดสีเพื่อแทนชนิดของเครื่องมือและชิ้นงาน

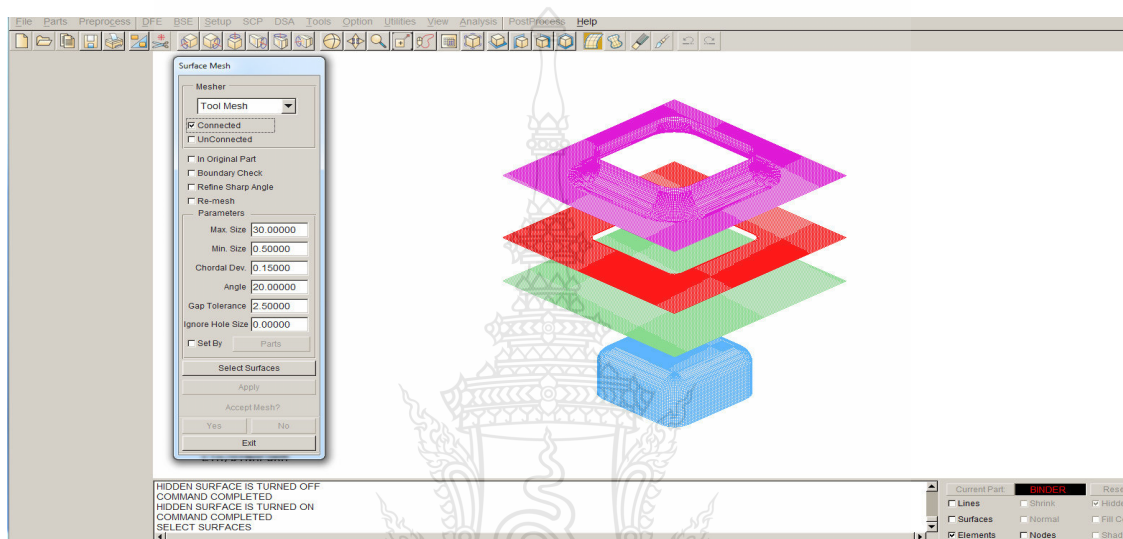


ภาพที่ 3.7 ขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนเครื่องมือและชิ้นงาน

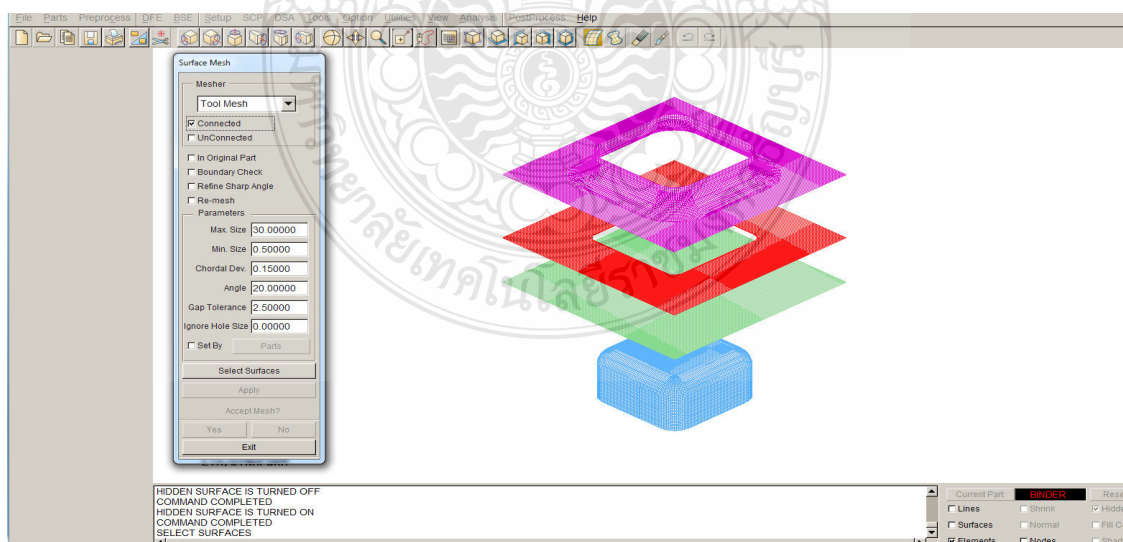
2) การสร้างเครื่องมือและชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.7 สร้างจาก CAD – file โดยใช้โปรแกรม SolidWorks 2010

3) การสร้างผิวสำหรับเครื่องมือและชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.8

4) กำหนด Part Mesh ดังภาพที่ 3.9 จากเมนูบาร์ เลือกเมนู BSE เลือกฟังก์ชัน Preparation คลิกไอคอน Part Mesh กำหนดขนาดเอลิเมนต์ เท่ากับ 1.4 มิลลิเมตร และคลิกปุ่ม Select Surface



ภาพที่ 3.8 การสร้างผิวสำหรับเครื่องมือและชิ้นงาน

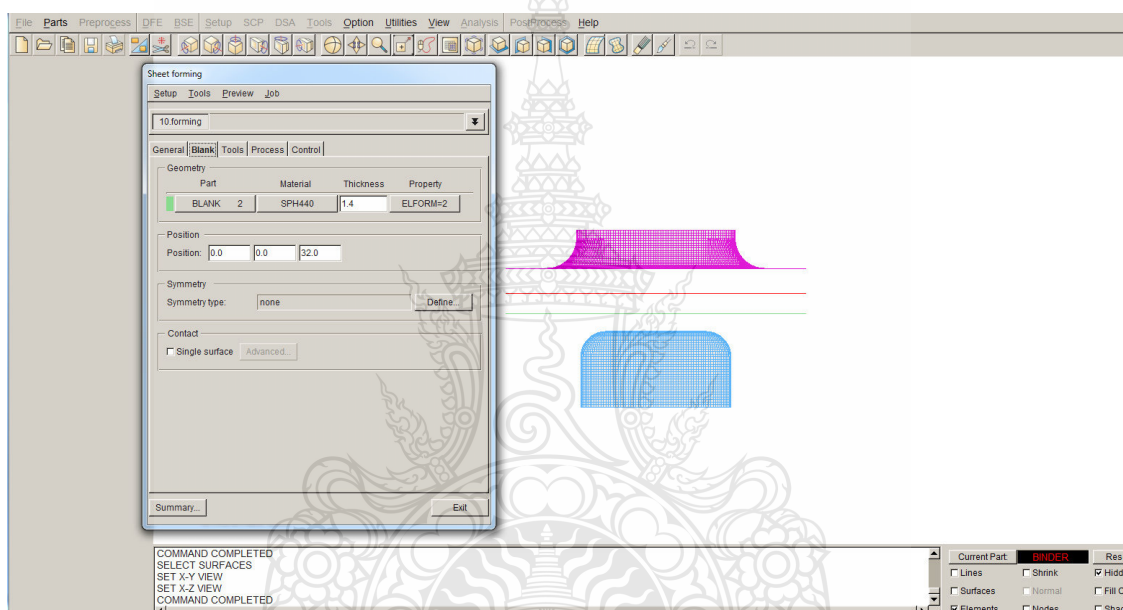


ภาพที่ 3.9 การสร้างพื้นผิวเครื่องมือและชิ้นงานโดยกำหนด Part Mesh

3.1.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์

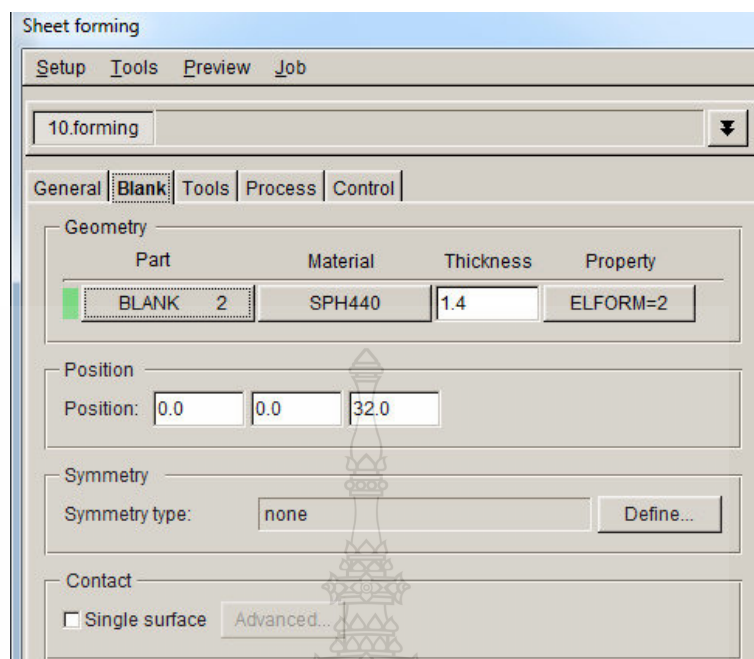
ขั้นตอนการวิเคราะห์ที่มีขั้นตอนดังนี้

1) กำหนดค่าของ Simulation Type เป็นชนิด Sheet Forming ดังภาพที่ 3.10 จากเมนูบาร์ เลือกเมนู Setup เลือกฟังก์ชัน Auto Setup กำหนดความหนาของชิ้นงาน 1.4 มิลลิเมตร กำหนดชนิดของการขึ้นรูปแบบ Crash Form กำหนด Blank Surface แบบ Top ซึ่งการกำหนดชนิดการขึ้นรูปขึ้นกับลักษณะของงานที่วิเคราะห์ โดยแบ่งได้ดังนี้ แบบ Single Action แบบ Double Action แบบ Triple Action แบบ Spring Back

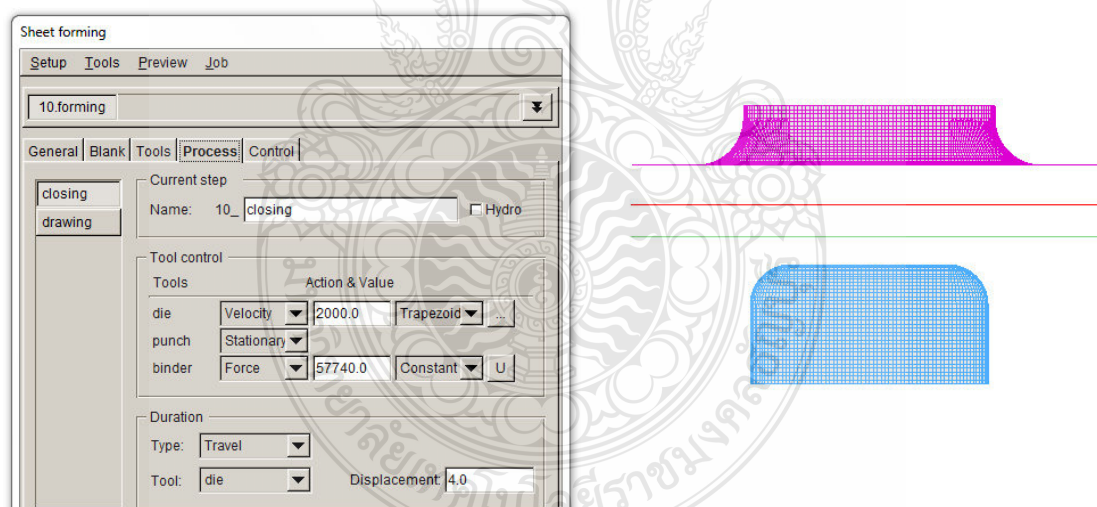


ภาพที่ 3.10 กำหนดชนิดการขึ้นรูป

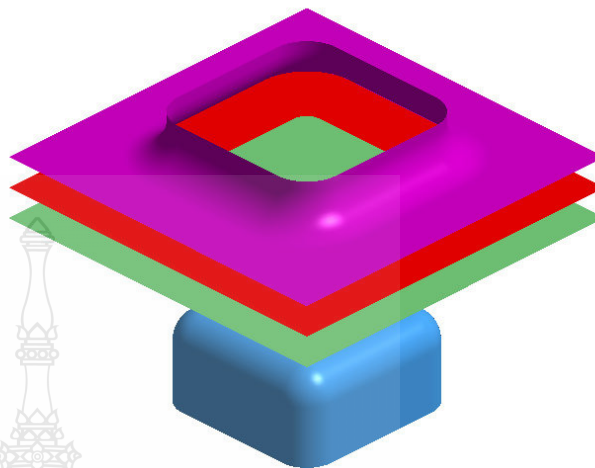
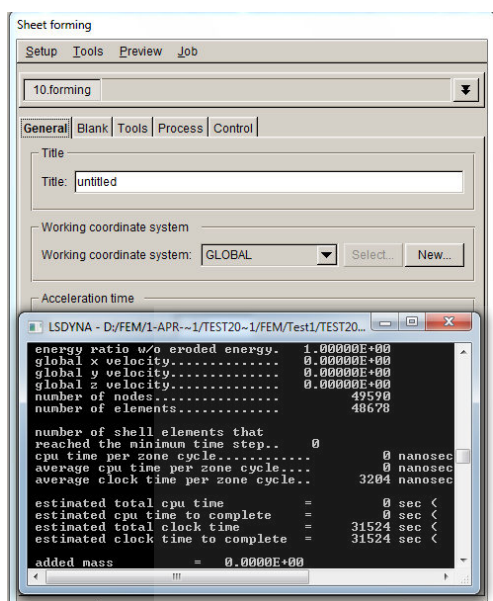
จากภาพที่ 3.11 เป็นการกำหนดชนิดของวัสดุ คลิกไอคอน Blank กำหนดวัสดุ คลิกไอคอน Material เลือกเกรดวัสดุเหล็กเกรด SAPH440 จากนั้นในภาพที่ 3.12 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตการขึ้นรูป (Boundary Condition) ประมวลผลการจำลองขึ้นรูปชิ้นงาน (Process) กำหนดระยะเคลื่อนที่ของพื้นที่เท่ากับ 32 มิลลิเมตร และความเร็วของการเคลื่อนที่ Die กับ Bender เท่ากับ 1000 มิลลิเมตรต่อวินาที กำหนด Punch ไม่เคลื่อนที่ จากนั้นภาพที่ 3.13 เป็นการประมวลผล ซึ่งก่อนการประมวลผลต้องตรวจสอบความถูกต้องของการเคลื่อนที่ ให้คลิก Preview ดูการเคลื่อนที่ จากนั้นเลือก Job Submitter



ภาพที่ 3.11 กำหนดชนิดวัสดุของชิ้นงาน



ภาพที่ 3.12 เครื่องมือและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการขึ้นรูป



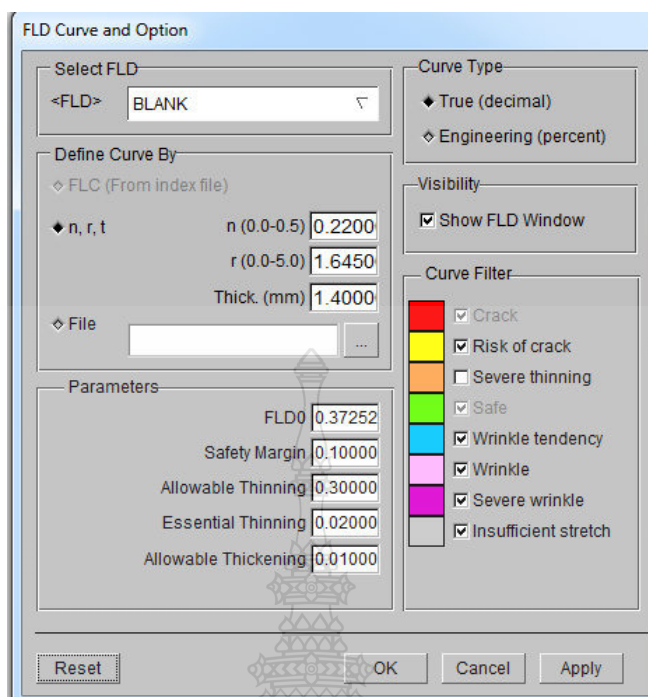
ภาพที่ 3.13 การประมวลผลของโปรแกรม Dyna Form 5.6

3.1.3 ผลลัพธ์จากการประมวลผล

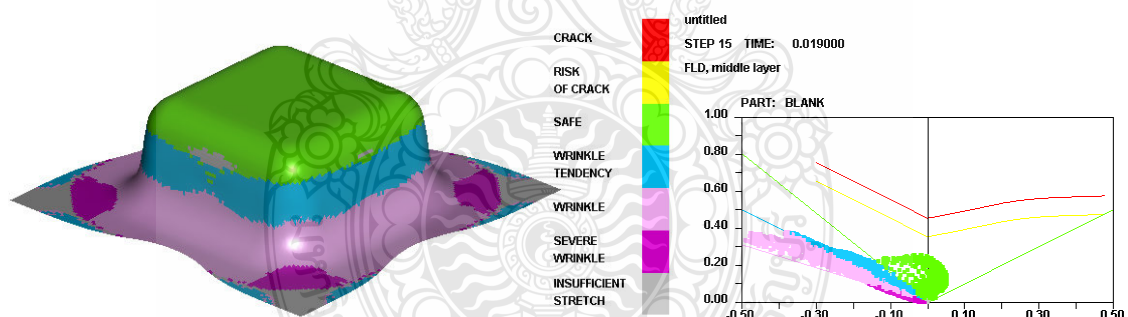
ประมวลผลการจำลองขึ้นรูปชิ้นงาน เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับ Geometry กำหนดค่าสมบัติของวัสดุ โดยกำหนดเครื่องมือ (Tools) จากนั้นจึงได้จำลองการขึ้นรูปเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง และทำการประมวลผลต่อไป

จากภาพที่ 3.14 การนำค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด และค่าอัตราส่วนความเครียดพลาสติก จากการทดสอบการดึง เพื่อให้โปรแกรม Dyna Form 5.6 สร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

จากภาพที่ 3.15 ได้แสดงผลลัพธ์การประมวลผล (Post-Process) ที่เกิดหลังจากโปรแกรม Dyna Form 5.6 ทำการวิเคราะห์ประมวลผล เพื่อนำผลลัพธ์จากค่าความหนา เพื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองขึ้นรูปจริง จากรูปภาพบริเวณพื้นที่สีเขียวคือบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นสภาวะยืดตรง สภาวะดึง และเส้นปลอดภัยในการขึ้นรูป พื้นที่สีน้ำเงิน คือบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นสภาวะดึง และสภาวะเฉือน อย่างเดียวรูป ถ้าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณใดมีค่าความเครียดหลังขึ้นรูปตกอยู่ในพื้นที่นี้ แสดงให้เห็นว่าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณนั้นมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยร่นหลังขึ้นรูป พื้นที่สีม่วงคือบริเวณที่อยู่ใต้เส้นสภาวะเฉือนอย่างเดียวนั้น ถ้าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณใดมีค่าความเครียดหลังขึ้นรูปตกอยู่ในพื้นที่นี้ แสดงให้เห็นว่าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณนั้นจะเกิดรอยร่นหลังขึ้นรูป

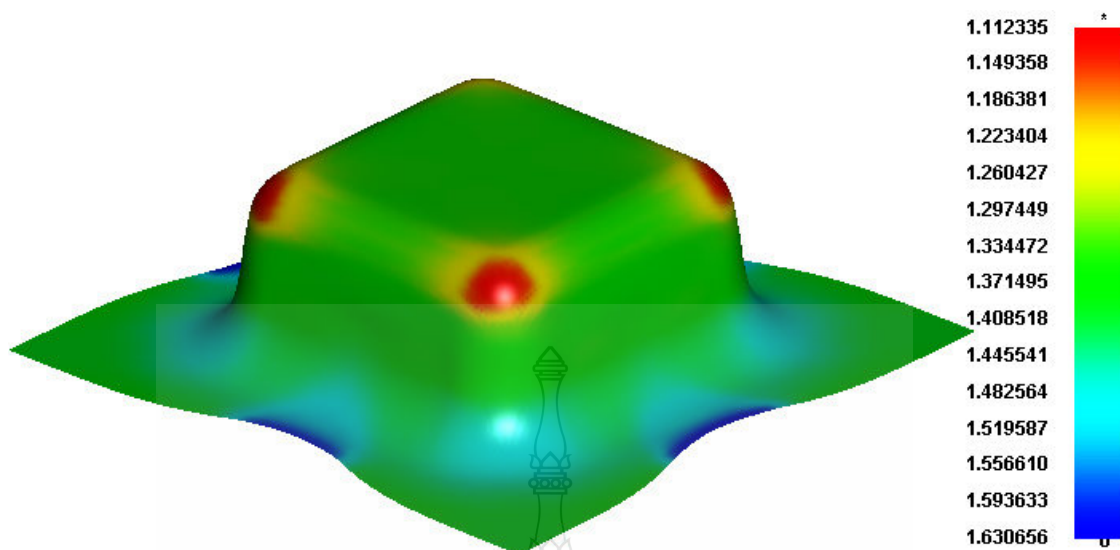


ภาพที่ 3.14 การกำหนดค่าสมบัติของวัสดุใน โปรแกรม Dyna Form 5.6



ภาพที่ 3.15 ค่าความเครียดวิเคราะห์จากโปรแกรม Dyna Form 5.6

จากภาพที่ 3.16 แสดงถึงตำแหน่งของความหนาของชิ้นงาน (Thickness) โดยแสดงค่าความหนาตามสีที่ปรากฏบนชิ้นงาน เพื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองชิ้นรูปจริง



ภาพที่ 3.16 ค่าความหนาวิเคราะห์จากโปรแกรม Dyna Form 5.6

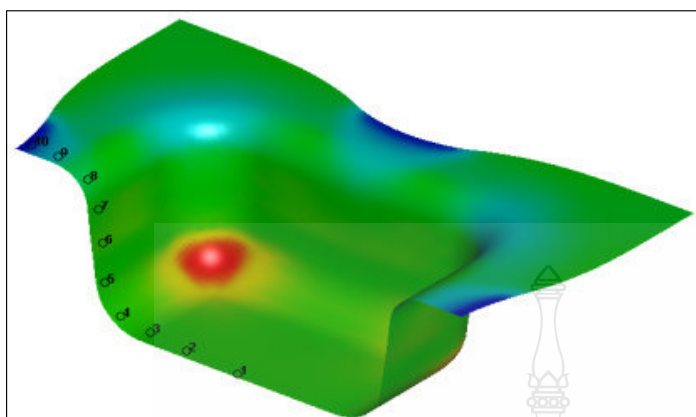
3.3 การเก็บผลและเปรียบเทียบผลการทดลอง

เมื่อทำการจำลองการลากขึ้นรูปโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับการทดลองจริง บันทึกลงในตารางบันทึกผลการทดลอง เพื่อนำไปวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองต่อไป

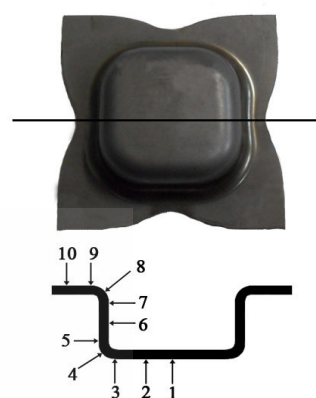
ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างใบบันทึกผลการทดลองแรงสูงสุดที่ใช้ลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

ชั้นที่	แรง (kN)		คุณภาพชิ้นงาน
	F	F _{BH}	
1			
2			
3			
4			
5			

หลังจากนั้นทำการวัดความหนาของชิ้นงาน 10 ตำแหน่ง โดยได้กำหนดจุดสำหรับวัดความหนาของชิ้นงานดังภาพที่ 3.17 และทำการบันทึกผลการทดลองในที่ได้จากการวัดลงในตารางที่ 3.4



(ก) จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์



(ข) จากการทดลองจริง

ภาพที่ 3.17 ตำแหน่งในการวัดความหนาของของถ้วยสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 3.4 ค่าความหนาและความเครียดในแนวความหนาของชิ้นงานในแต่ละจุดตรวจวัด

จุดตรวจวัดความหนา	SAPH440		SPCC	
	ความหนาชิ้นงาน	ค่าความเครียด	ความหนาชิ้นงาน	ค่าความเครียด
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

3.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์และสรุปผลจากข้อมูลในงานวิศวกรรมเป็นงานที่ต้องอาศัยวิธีทางสถิติเข้าไปช่วยในการวิเคราะห์และสรุปผล ปัจจุบันการใช้วิธีทางสถิติเป็นที่แพร่หลายในงานวิศวกรรมทุกสาขาดังนั้นเพื่อความถูกต้องและเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง จึงนำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 3.5

3.4.1 การหาขนาดสิ่งตัวอย่าง

ในการตัดสินใจโดยทดสอบสมมติฐานนั้นจะต้องคำนึงถึงความเสี่ยงในการตัดสินใจทั้ง α และ β ในการทดสอบสมมติฐานนั้น ต้องทำการควบคุมความเสี่ยงในการตัดสินใจด้วยการกำหนดให้ α คงที่ แล้วพยายามออกแบบให้ β มีค่าต่ำที่สุด ในทางด้านวิศวกรรมจะใช้ที่ค่า β เท่ากับ 0.1 ในการพิจารณา β จะต้องเริ่มจากการใช้ความรู้ทางด้านวิศวกรรม กำหนดค่าพารามิเตอร์จากนั้นจะทำการพิจารณาขนาดจากตัวอย่างที่เหมาะสมด้วยผลจากเส้นโค้งไอซีที่ $v_1 = 3$ ในภาคผนวก ค การหาขนาดสิ่งตัวอย่างสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 เพื่อทำการหาจำนวนทำซ้ำที่เหมาะสมในการออกแบบการทดลอง

$$\Phi^2 = \frac{nD^2}{2a\sigma^2} \quad (3.1)$$

- เมื่อ a คือ ระดับของตัวแปรของรัศมีด้ามมี 4 ระดับ
 D คือ ระดับการปฏิเสธสมมติฐานกำหนดให้มีค่า $\pm 3\sigma$
 n คือ จำนวนการทำซ้ำ (ขนาดตัวอย่าง)
 σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกำหนดให้ $\sigma \leq 1.5$

ตารางที่ 3.5 การหาขนาดสิ่งตัวอย่างที่เหมาะสม

n	Φ^2	Φ	$v = a-1$	$v_2 = a(n-1)$	β
3	3.36	1.83	3	8	0.350
4	4.5	2.12	3	12	0.130
5	5.63	2.37	3	16	0.080
6	6.75	2.59	3	20	0.015

ในการกำหนดขนาดของตัวอย่างจะได้มาจากการลองผิดลองถูกแล้วนำค่าที่ได้จากการคำนวณในสมการไปเปิดตารางเส้นโค้งโอซี ค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 3.5 จากตารางจะได้ขนาดของสิ่งตัวอย่างที่เหมาะสมคือ $n = 5$ โดยจะมีค่าความเสี่ยงในการยอมรับสมมติฐาน ทั้งที่สมมติฐานเป็นเท็จ (β) ประมาณ 0.08 มีความใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการคือ 0.10 โดยที่ $\alpha = 0.05$

3.4.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลของการทดลองจะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) วิเคราะห์ความแปรปรวนของผลที่ได้จากการทดลอง เพื่อหาสาเหตุที่ทำให้เกิดความแปรผันของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ว่าเกิดสาเหตุที่เป็นไปโดยธรรมชาติ หรือเกิดจากอิทธิของปัจจัยที่ได้ทำการศึกษา การวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ตัวอย่างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง

แหล่งความแปรผัน	ดีกรีของ ความอิสระ	ผลบวก กำลังสอง	ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง	F
ปัจจัย	v_{Tr}	SS_{Tr}	MS_{Tr}	MS_{Tr}/MS_E
ความผิดพลาดแบบสุ่ม	v_E	SS_E	MS_E	
รวม	v_T	SS_T		

บทที่ 4

ผลการทดลอง

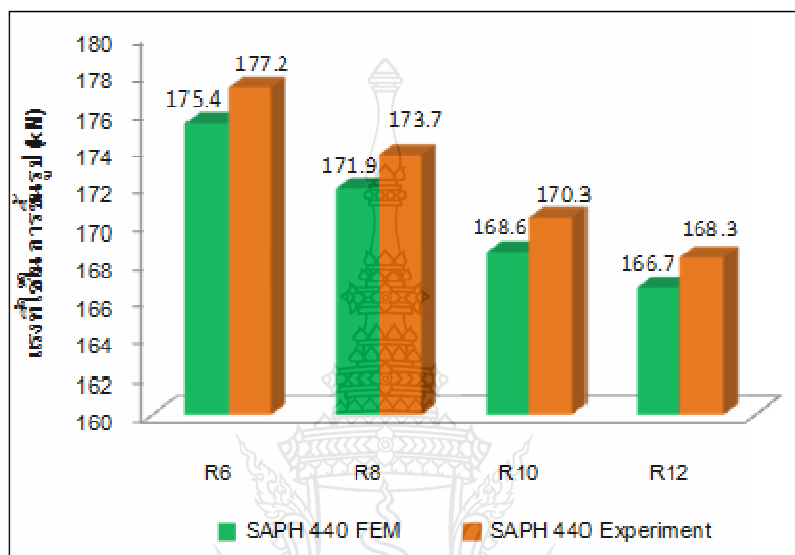
งานวิจัยฉบับนี้ มุ่งเน้นเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของรัศมีบาคายในการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมแบบมีปีกสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ [40] ผู้ศึกษาได้ใช้รัศมีบาคายขนาด 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตร ได้ใช้วัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SAPH440 (JIS) กับวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) ในการจำลองการลากขึ้นรูป และนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานจริงเพื่อนำไปหาค่าความเครียดของชิ้นงานที่เกิดขึ้น เมื่อทำการจำลองในแต่ละรัศมีบาคาย แรงในการขึ้นรูป และการกระจายตัวของความหนาชิ้นงาน เปรียบเทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram; FLD) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่จะเกิดรอยร้าวกับชิ้นงานในแต่ละรัศมีบาคาย มีผลการวิจัยดังนี้

4.1 อิทธิพลของรัศมีบาคายที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป

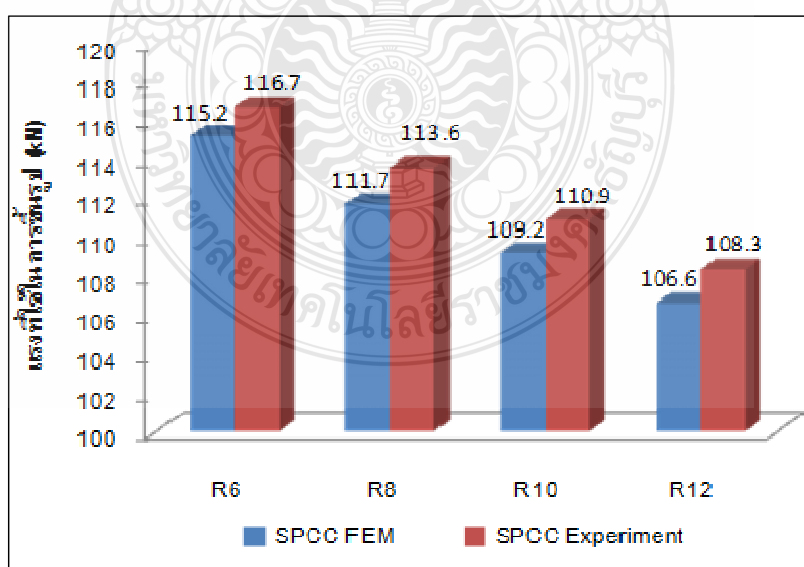
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลจากการจำลองการลากขึ้นรูป โดยการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองอิทธิพลของรัศมีบาคายในการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก [41] ซึ่งจากการทดลองโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการลากขึ้นรูปชิ้นงานด้วยสี่เหลี่ยมแบบมีปีก ด้วยวัสดุเหล็ก SAPH440 โดยได้ใช้แรงกดแผ่นยึดชิ้นงานเท่ากับ 56 kN และวัสดุเหล็ก SPCC ใช้แรงกดแผ่นยึดชิ้นงานเท่ากับ 37 kN ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการคำนวณทางทฤษฎีได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ไม่เกิดรอยแตกและรอยร้าว ทำการขึ้นรูปเพื่อหาค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปของเหล็ก SAPH440 เทียบกับเหล็ก SPCC แสดงดังภาพที่ 4.1 และ 4.2

หลังจากที่ใช้การจำลองการลากขึ้นรูปโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบการทดลองจริงของเหล็ก SAPH440 และ SPCC ในการทดลองพบว่ามีความแม่นยำ 98% มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 2% และเมื่อชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วมีความสมบูรณ์ไม่เกิดรอยแตกและรอยร้าวในทุกระดับของตัวแปรทดสอบ จึงทำการเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงของแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ระหว่างเหล็ก SAPH440 เทียบกับ เหล็ก SPCC จากภาพที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นว่าวัสดุทั้งสองชนิดมีแนวโน้มเหมือนกันคือ รัศมีบาคายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะใช้แรงในการลากขึ้นรูปชิ้นงานน้อยกว่ารัศมีบาคายที่มีขนาดเล็กเนื่องจากการไหลตัวของแผ่นชิ้นงานนั้นเข้าไปยังปากคายที่เป็นไปได้สะดวก สำหรับเหล็ก SAPH440 จะใช้แรงลากขึ้นรูปสูงกว่าเหล็ก SPCC ในทุกระดับของรัศมีบาคายที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากคุณสมบัติทางกลของเหล็ก SAPH440 และเหล็ก SPCC ที่ใช้ในการทดลองมีความ

แตกต่างกัน โดยเหล็ก SAPH440 นั้นเป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็ก SPCC จึงใช้แรงกดของพันธ์เพื่อที่จะทำให้แผ่นชิ้นงานเปลี่ยนรูป ไหลเข้าสู่ช่องคานจนกระทั่งไปถึงความลึกที่ต้องการคือ 30 มิลลิเมตร ซึ่งมากกว่าเหล็ก SPCC และเหล็ก SAPH440 ต้องใช้แรงที่กดแผ่นยึดชิ้นงานมากกว่าเหล็ก SPCC เพื่อป้องกันการเกิดรอยยับบริเวณปีกของด้ายสี่เหลี่ยม



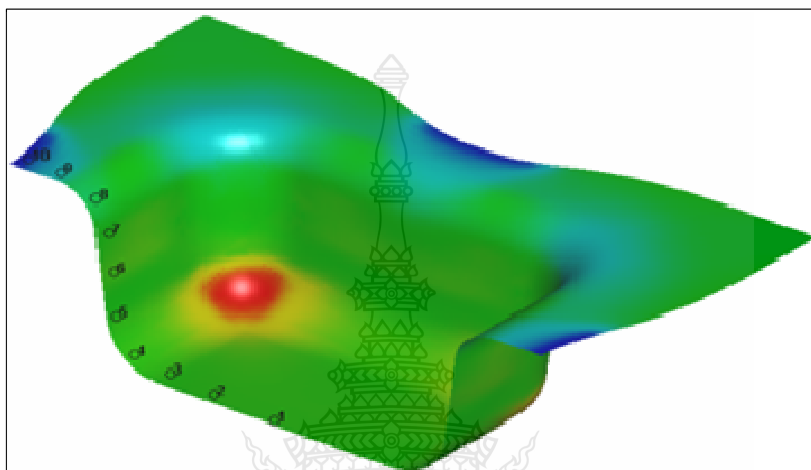
ภาพที่ 4.1 เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SAPH440



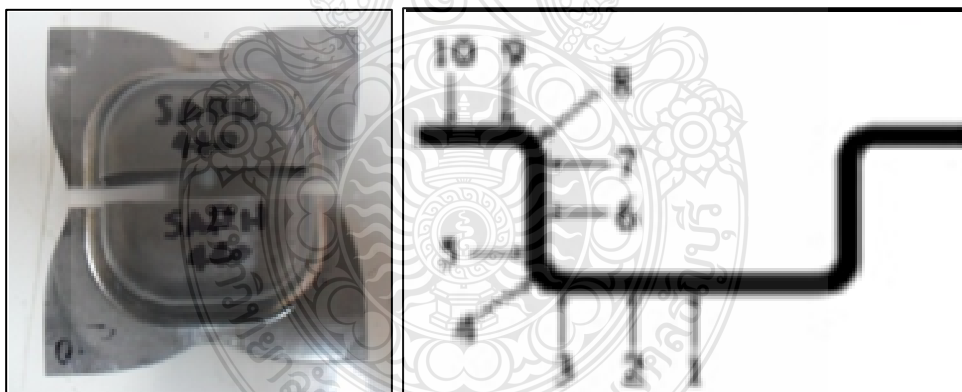
ภาพที่ 4.2 เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPCC

4.2 อิทธิพลของรัศมีป่าตายที่มีผลต่อที่มีความหนาด้วย

จากผลการจำลองการตกชั้นรูปโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ผลแสดงการขึ้นรูปได้สำเร็จคือถ้วยสี่เหลี่ยมมีความสมบูรณ์ไม่เกิดรอยแตกและรอยย่นมาทำการวัดความหนาของผนังชิ้นงานตั้งแต่กันด้วยไปจนถึงปีกถ้วยด้วยโปรแกรม ดังภาพที่ 4.3



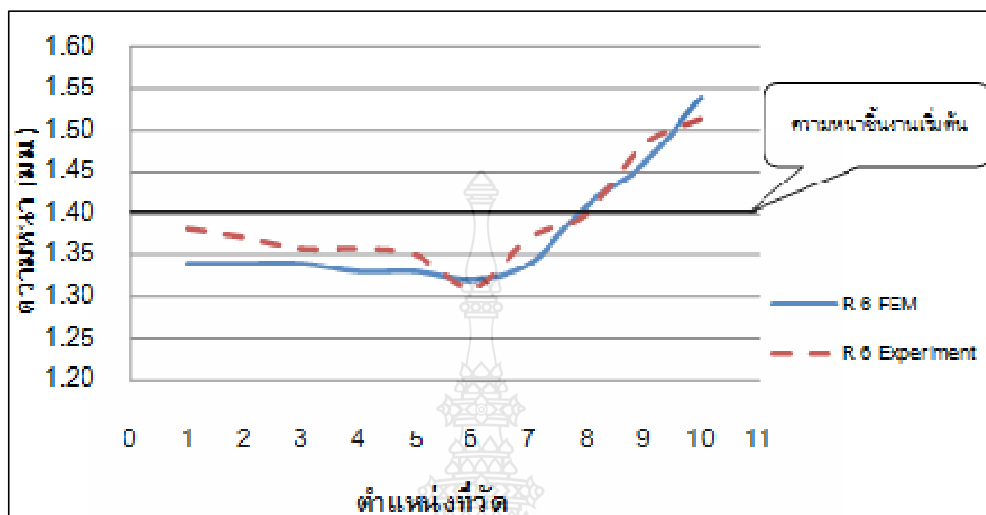
(ก) การวัดความหนาของชิ้นงานจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์



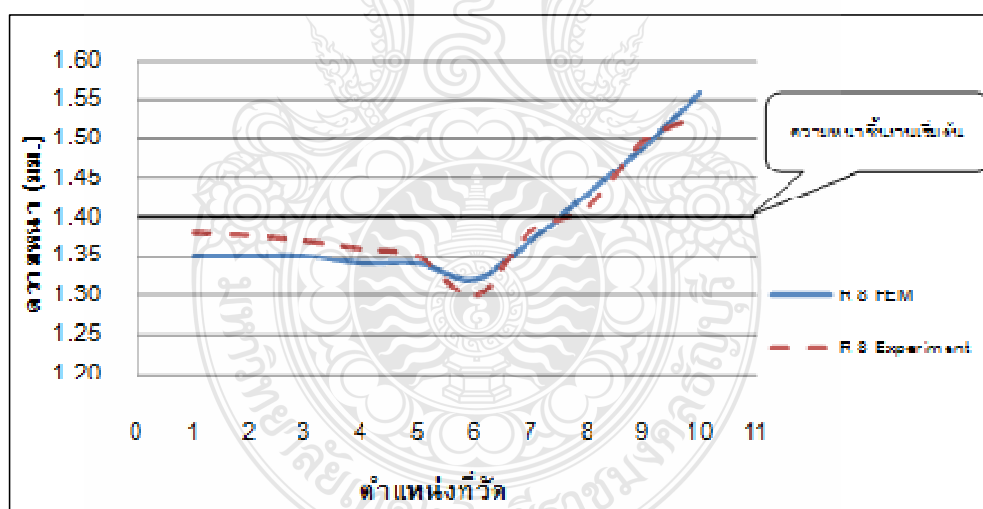
(ข) การวัดความหนาของชิ้นงานจากจากการทดลองจริง

ภาพที่ 4.3 ตำแหน่งการวัดความหนาของชิ้นงาน

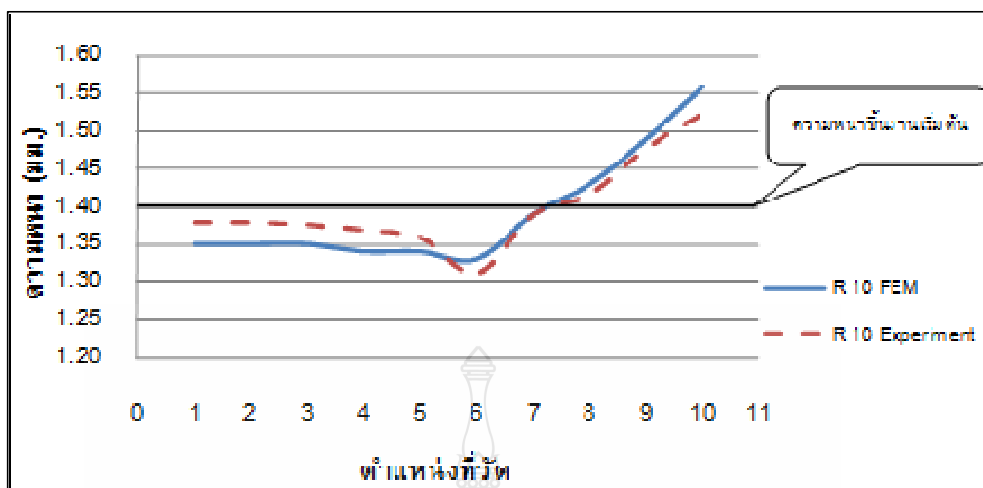
4.2.1 เปรียบเทียบความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SAPH440



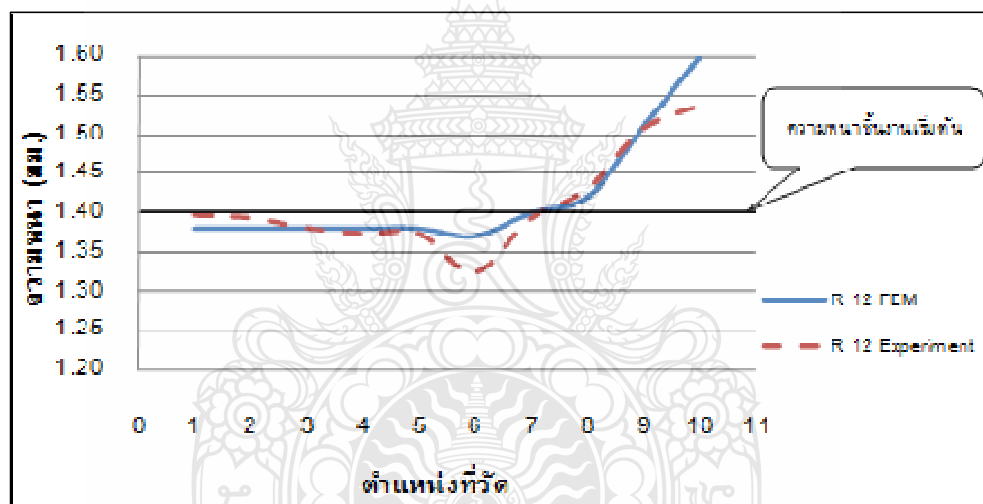
(ก) ความหนาถ้วยของรีซีมีบ่าคายเท่ากับ 6 มิลลิเมตร



(ข) ความหนาถ้วยของรีซีมีบ่าคายเท่ากับ 8 มิลลิเมตร



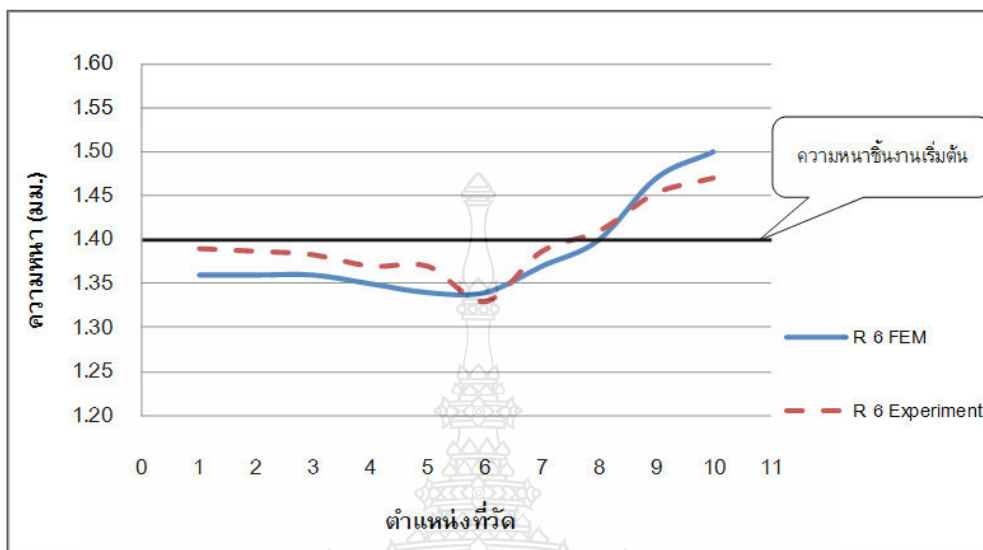
(ค) ความหนาด้วยของรัศมีบ่าดายเท่ากับ 10 มิลลิเมตร



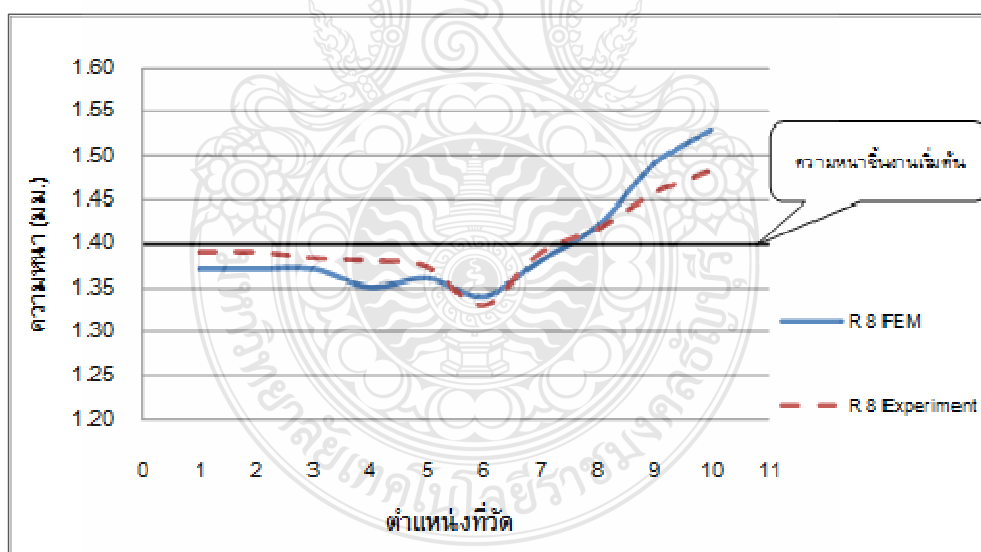
(ง) ความหนาด้วยของรัศมีบ่าดายเท่ากับ 12 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4.4 ความหนาของชั้นงาน SAPH440 แต่ละรัศมีบ่าดาย

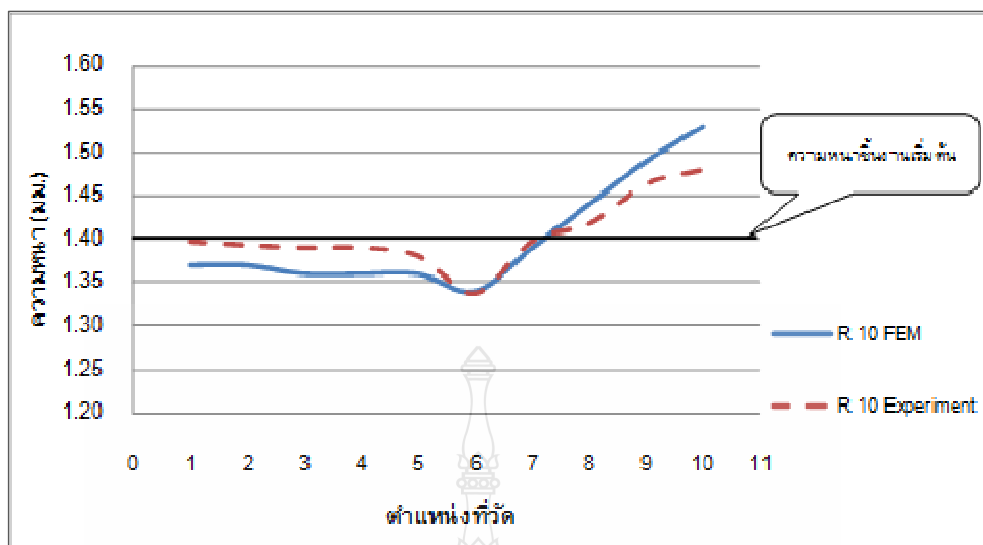
4.2.2 เปรียบเทียบความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPCC



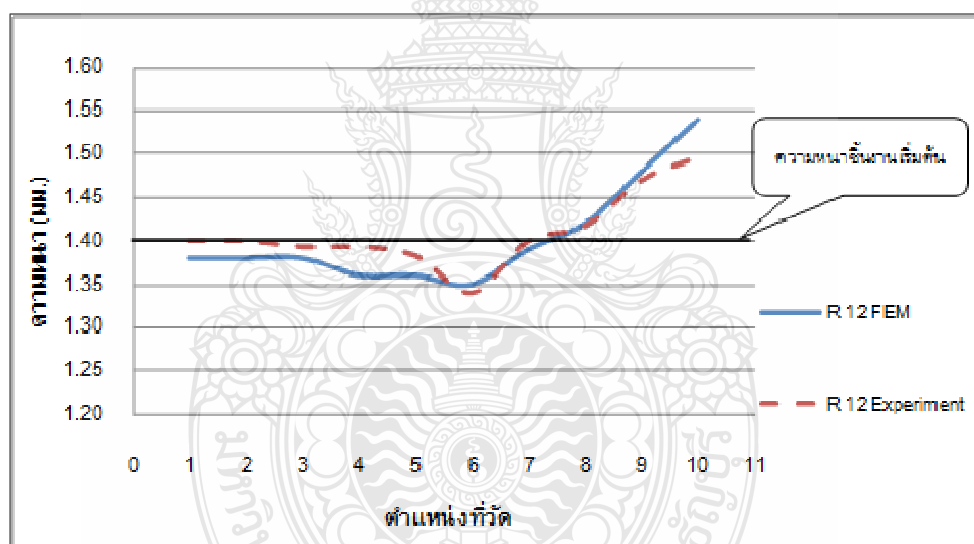
(ก) ความหนาถ้วยของรัศมีบ่าคายเท่ากับ 6 มิลลิเมตร



(ข) ความหนาถ้วยของรัศมีบ่าคายเท่ากับ 8 มิลลิเมตร



(ค) ความหนาแน่นของรัศมีบ่อดายเท่ากับ 10 มิลลิเมตร



(ง) ความหนาแน่นของรัศมีบ่อดายเท่ากับ 12 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4.5 ความหนาแน่นของชิ้นงาน SPCC แต่ละรัศมีบ่อดาย

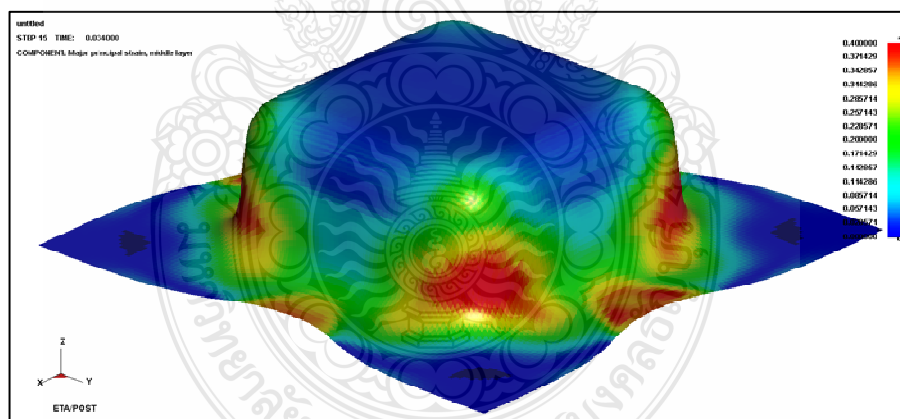
จากภาพที่ 4.4 และ 4.5 แสดงผลความแตกต่างของความหนาแน่นชิ้นงาน โดยใช้รัศมีบ่อดายในการจำลองการลากขึ้นภาพที่แตกต่างกันของเหล็ก SPCC และ SAPH440 จากผลในการวัดความหนาแน่นชิ้นงานด้วยการจำลองโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดของรัศมีบ่อดายเท่ากับ 6 - 10 มิลลิเมตร มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นชิ้นงาน

ถ้วยเนื่องจากขนาดรัศมีดังกล่าวทำให้เนื้อชิ้นงานไหลตัวลงมาได้ยากทำให้เนื้อชิ้นงานบริเวณผนังถ้วยมีความเค้นแรงดึงสูงจึงมีการดึงเนื้อชิ้นงานบริเวณก้นถ้วยให้มีการเปลี่ยนรูปด้วย แต่ที่ขนาดรัศมีปากถ้วยเท่ากับ 12 มิลลิเมตร ชิ้นงานมีการไหลตัวได้ดีขึ้น ความหนาชิ้นงานบริเวณก้นถ้วยมีความเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

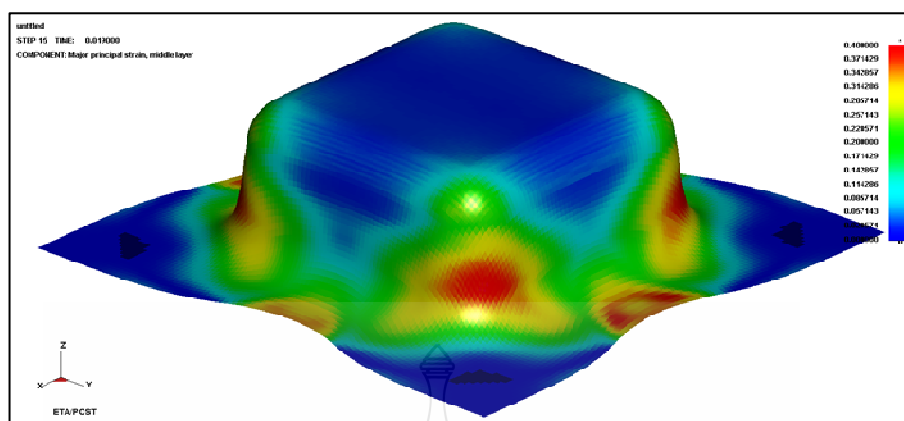
นอกจากนี้ผลการวัดความหนาชิ้นงานของแต่ละตำแหน่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ทุกระศมีปากถ้วย กล่าวคือตรงบริเวณตำแหน่งที่ 6 จะเป็นตำแหน่งที่มีความหนาของถ้วยน้อยที่สุดเพราะเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นดึงในแนวแกนสูงสุดของการลากขึ้นรูป ส่วนบริเวณปีกถ้วยในตำแหน่งที่ 10 ชิ้นงานจะมีความหนามากกว่าความหนาเริ่มต้นของชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงบริเวณปีกถ้วยและจากเปรียบเทียบการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับการขึ้นรูปจริงพบว่าการเปลี่ยนแปลงความหนามีค่าใกล้เคียงกันทุกตำแหน่งซึ่งมีความแตกต่างกันเฉลี่ย 3%

4.3 อิทธิพลของรัศมีปากถ้วยที่มีผลต่อความเครียดของชิ้นงาน

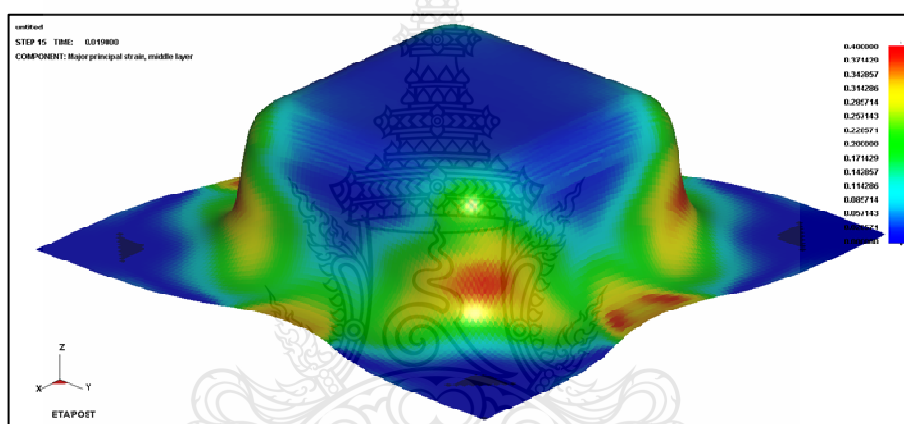
4.3.1 เปรียบเทียบความเครียดของการขึ้นรูปจริงกับการขึ้นรูปจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SAPH440



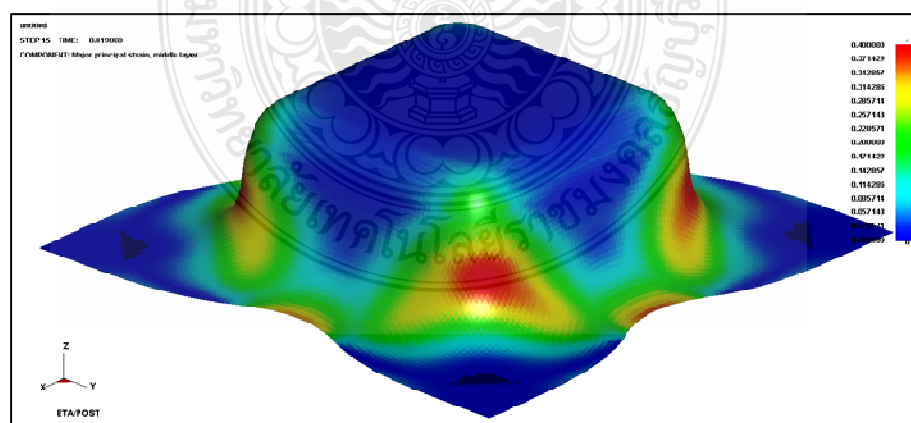
(ก) ความเครียดของชิ้นงานที่รัศมีปากถ้วยเท่ากับ 6 มิลลิเมตร



(ข) ความเครียดของชั้นงานที่รัศมีบ่าดายเท่ากับ 8 มิลลิเมตร



(ค) ความเครียดของชั้นงานที่รัศมีบ่าดายเท่ากับ 10 มิลลิเมตร

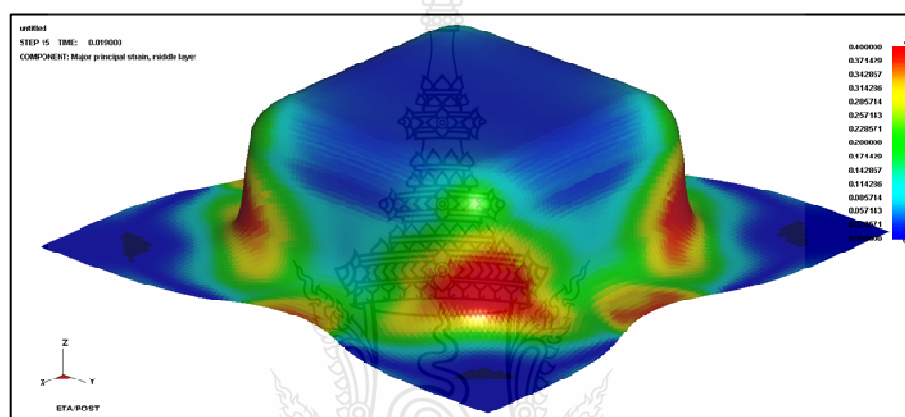


(ง) ความเครียดของชั้นงานที่รัศมีบ่าดายเท่ากับ 12 มิลลิเมตร

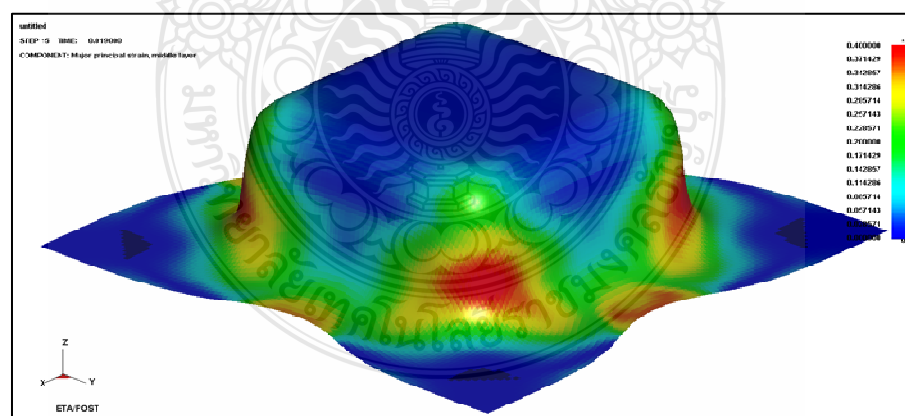
ภาพที่ 4.6 ความเครียดของชั้นงานของเหล็ก SAPH440 แต่ละระดับรัศมีบ่าดาย

จากการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์จะพบว่าอิทธิพลของรัศมีบ่าคายนที่มีผลต่อความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 4.6 พบว่ารัศมีบ่าคายนที่มีขนาดใหญ่ในภาพที่ (ง) เกิดความเครียดบริเวณมุมด้วยและผนังด้วยน้อยกว่ารัศมีบ่าคายนที่มีขนาดเล็กในภาพที่ 4.6 (ก) โดยที่รัศมีบ่าคายนที่มีขนาดใหญ่เกิดการไหลตัวของชิ้นงานเข้าสู่ช่องคายนได้ดี ใช้แรงในการขึ้นรูปน้อยและมีการเปลี่ยนแปลงความหนาบริเวณก้นด้วยน้อยที่สุด

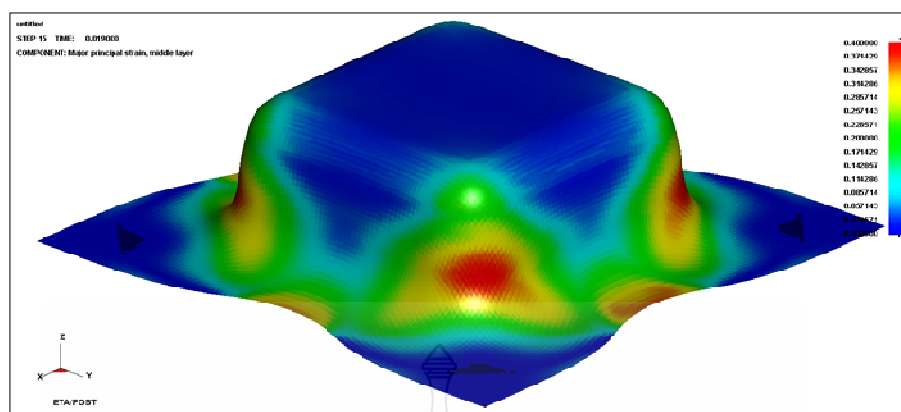
4.3.2 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการขึ้นรูปจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPCC



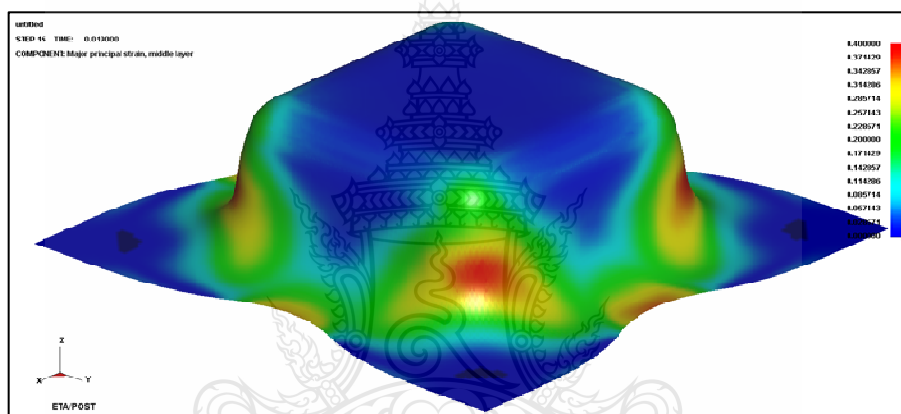
(ก) ความเครียดแนวความหนาที่รัศมีบ่าคายนเท่ากับ 6 มิลลิเมตร



(ข) ความเครียดแนวความหนาที่รัศมีบ่าคายนเท่ากับ 8 มิลลิเมตร



(ค) ความเครียดแนวความหนาที่รัศมีบ่าคายนเท่ากับ 10 มิลลิเมตร



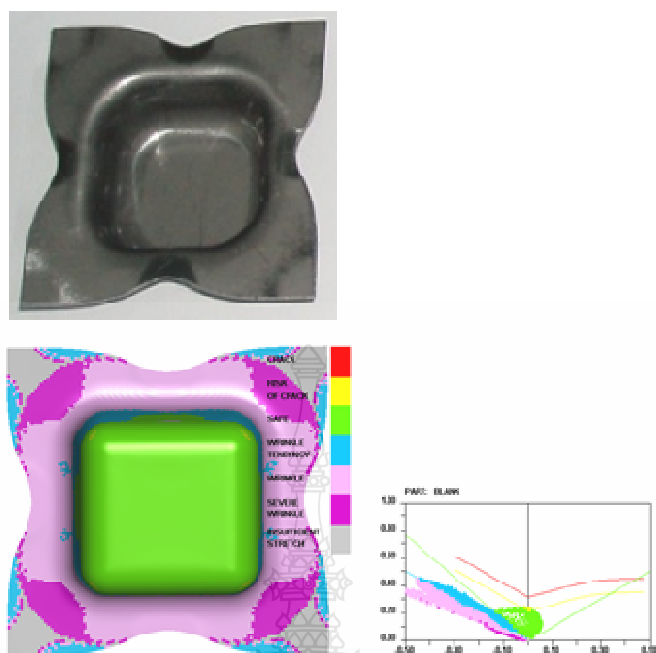
(ง) ความเครียดแนวความหนาที่รัศมีบ่าคายนเท่ากับ 12 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4.7 ความเครียดแนวความหนาของเหล็ก SPCC แต่ละระดับรัศมีบ่าคายน

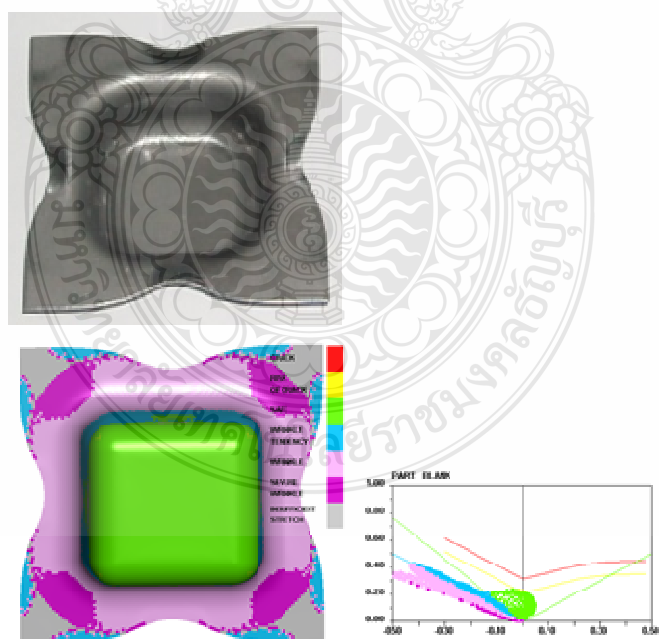
จากการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์จะพบว่า อิทธิพลของรัศมีบ่าคายนที่มีผลต่อความเครียดแนวความหนาของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 4.7 พบว่ารัศมีบ่าคายนที่มีขนาดใหญ่ในภาพที่ 4.7 (ง) เกิดความเครียดบริเวณมุมด้วยและผนังด้วยน้อยกว่ารัศมีบ่าคายนที่มีขนาดเล็กในภาพที่ 4.7 (ค) โดยที่รัศมีบ่าคายนที่มีขนาดใหญ่เกิดการไหลตัวของชิ้นงานเข้าสู่ช่องคายนได้ดี ใช้แรงในการขึ้นรูปน้อยและมีการเปลี่ยนแปลงความหนาบริเวณกันด้วยน้อยที่สุด

4.4 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

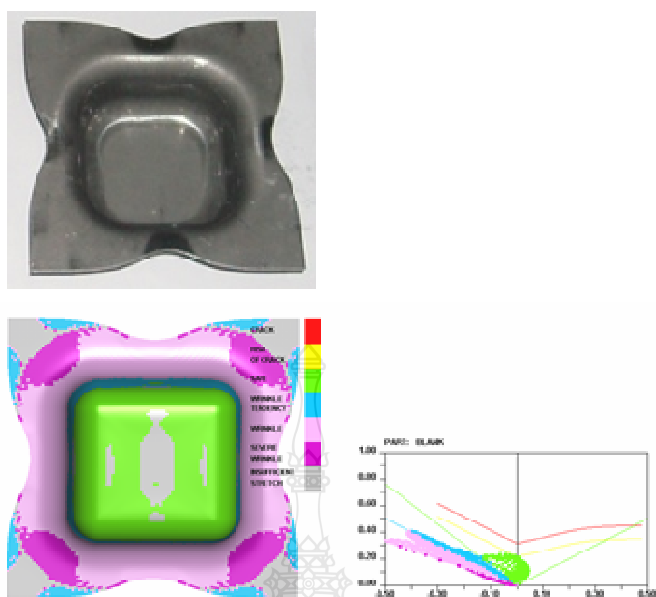
4.4.1 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram; FLD) ของการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปจริงของเหล็ก SPCC



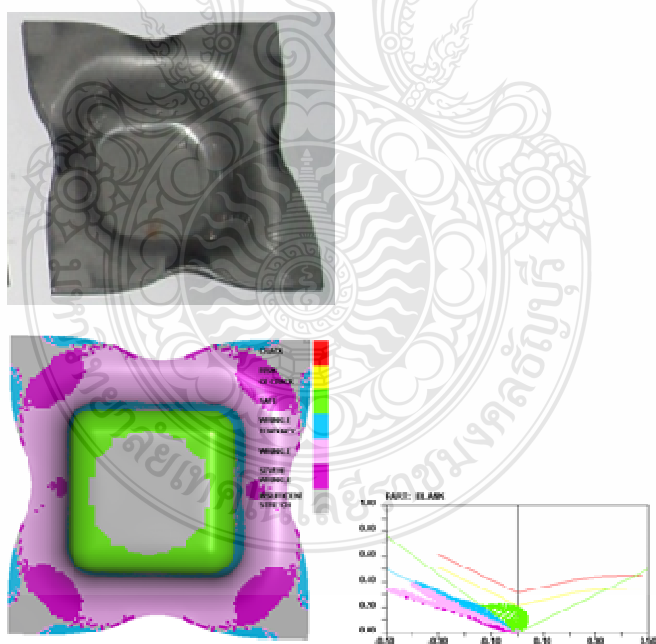
ภาพที่ 4.8 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการลากขึ้นรูปจริงของ เหล็ก SPCC ที่ระดับรัศมีปาดาย 6 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.9 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการลากขึ้นรูปจริงของ เหล็ก SPCC ที่ระดับรัศมีปาดาย 8 มิลลิเมตร



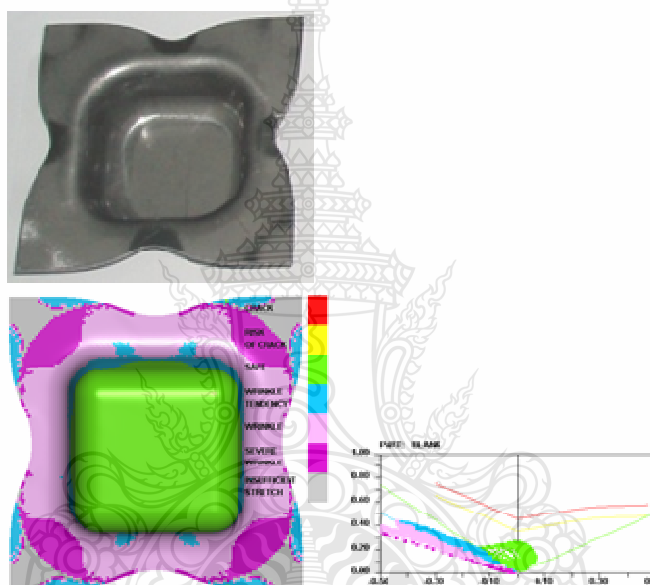
ภาพที่ 4.10 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการลากขึ้นรูปจริงของ เหล็ก SPCC ที่ระดับรัศมีปาดाय 10 มิลลิเมตร



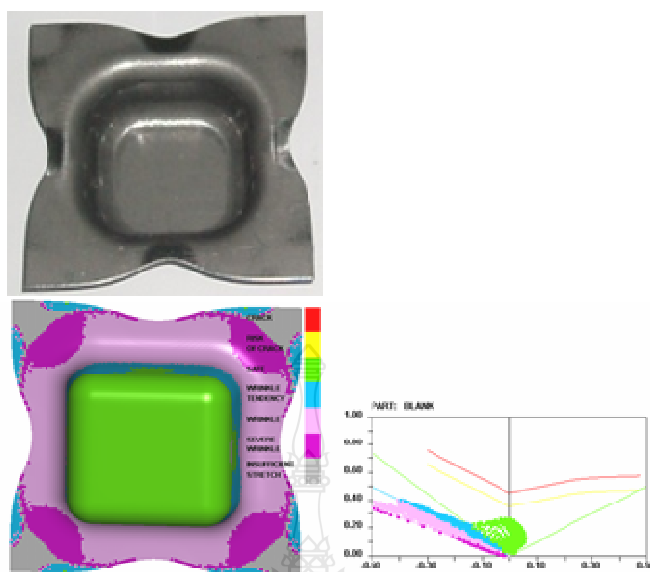
ภาพที่ 4.11 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการลากขึ้นรูปจริงของ เหล็ก SPCC ที่ระดับรัศมีปาดाय 12 มิลลิเมตร

ผลการทดลองของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการลากขึ้นรูปจริงของเหล็ก SPCC ภาพที่ 4.8 - 4.11 พบว่าสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้สมบูรณ์ไม่พบรอยแตกและรอยย่นทั้ง 4 ระดับของรัศมีบ่าคาย โดยที่รัศมีบ่าคายที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จะขึ้นรูปชิ้นงานได้ดีกว่ารัศมีบ่าคายที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากรัศมีบ่าคายใหญ่จะช่วยให้การไหลตัวของแผ่นขึ้นงานเข้าไปยังปากคายได้อย่างสะดวก

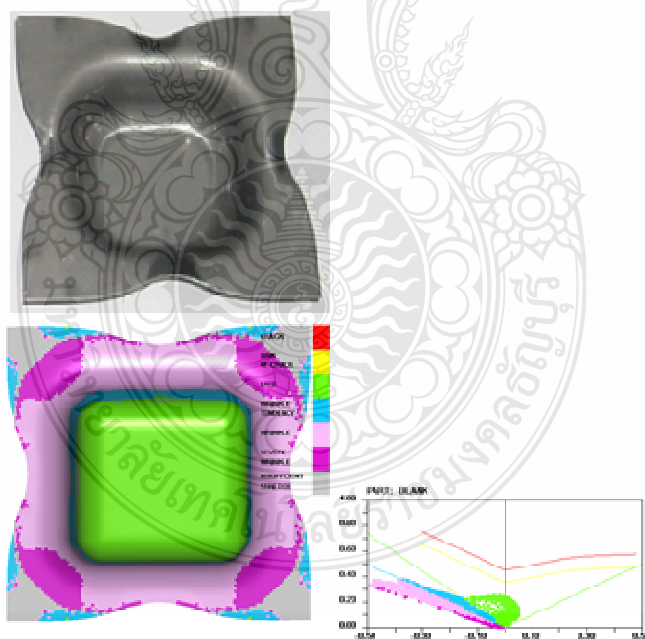
4.4.2 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(Forming Limit Diagram: FLD) ของการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปจริงของเหล็ก SAPH440



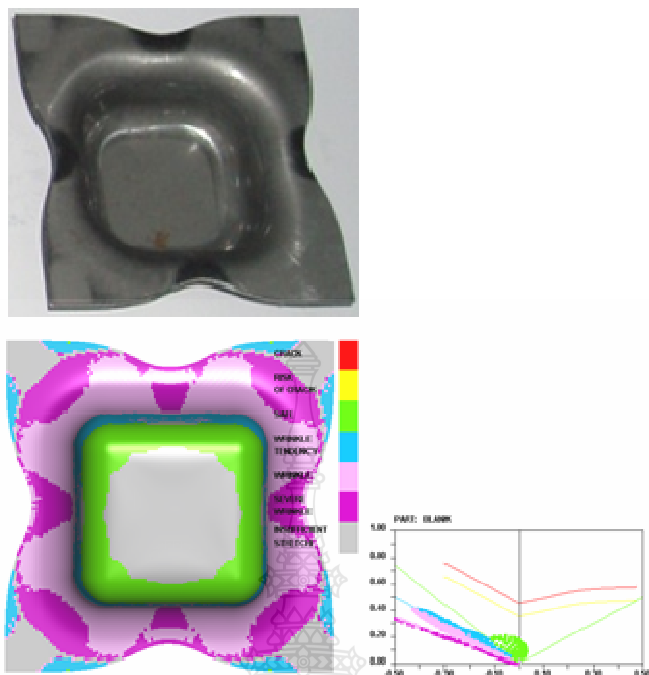
ภาพที่ 4.12 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการลากขึ้นรูปจริงของเหล็ก SAPH440 ที่ระดับรัศมีบ่าคาย 6 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.13 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการลากขึ้นรูปจริงของ เหล็ก SAPH440 ที่ระดับรัศมีปาดาย 8 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.14 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการลากขึ้นรูปจริงของ เหล็ก SAPH440 ที่ระดับรัศมีปาดาย 10 มิลลิเมตร

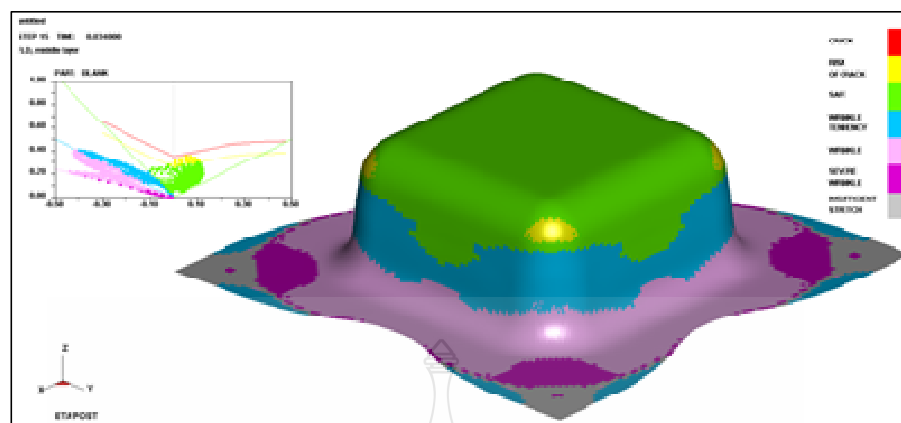


ภาพที่ 4.15 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการลากขึ้นรูปจริงของ เหล็ก SAPH440 ที่ระดับรัศมีบาคาย 12 มิลลิเมตร

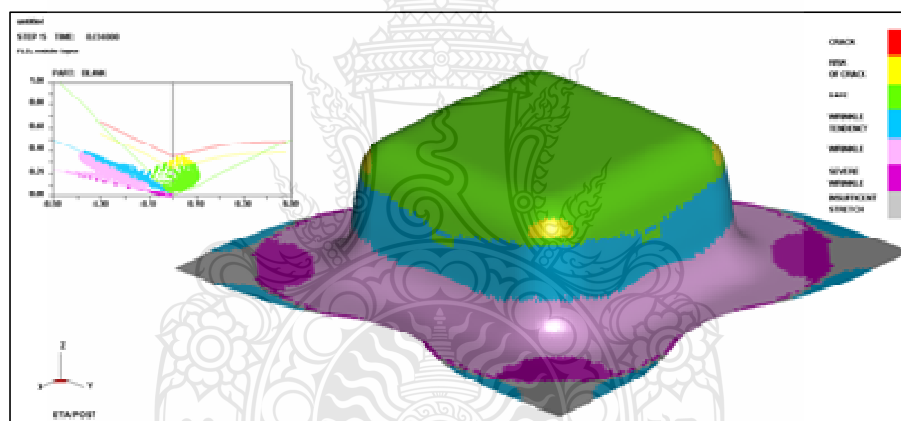
ผลการทดลองของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการลากขึ้นรูปจริงของเหล็ก SAPH440 ภาพที่ 4.12 - 4.15 พบว่า สามารถขึ้นรูปชิ้นงาน ได้สมบูรณ์ไม่พบรอยแตก และรอยย่นทั้ง 4 ระดับของรัศมีบาคาย โดยที่รัศมีบาคายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะขึ้นรูปชิ้นงานได้ดีกว่า รัศมีบาคายที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากรัศมีบาคายใหญ่จะช่วยให้การไหลตัวของแผ่นชิ้นงานเข้าไปยังปาก คายได้อย่างสะดวก อีกทั้งยังใช้แรงในการขึ้นรูปน้อยลงเมื่อรัศมีบาคายมีขนาดใหญ่ขึ้น

4.5 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SPFC590

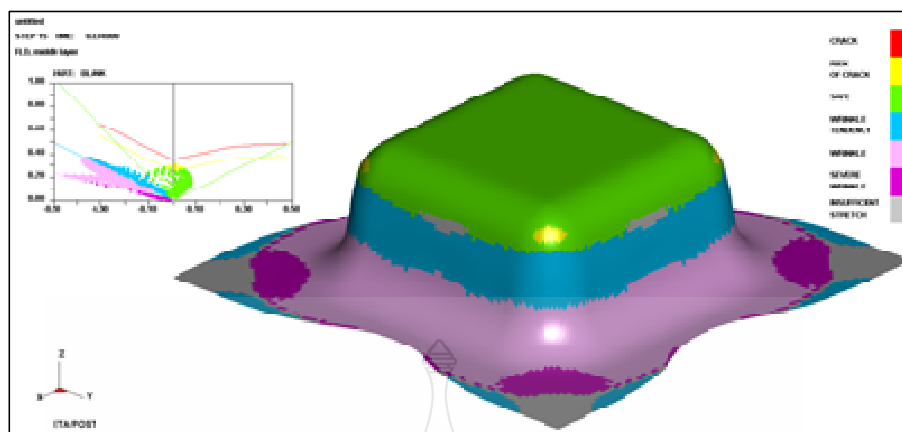
จากนั้นได้ทดลองเปลี่ยนวัสดุเป็นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SPFC590 เพื่อศึกษา ความสามารถในการลากขึ้นรูปสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่มีความแข็งแรงสูงขึ้น ซึ่งได้ผลการ ทดลองดังนี้



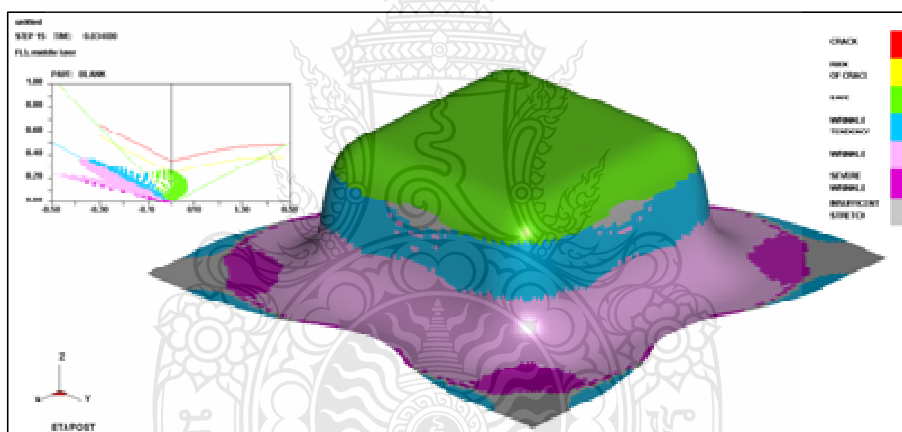
ภาพที่ 4.16 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPFC590 ที่ระดับรัศมีป่าตาย 6 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.17 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPFC590 ที่ระดับรัศมีป่าตาย 8 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.18 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPFC590 ที่ระดับรัศมีปาดาย 10 มิลลิเมตร

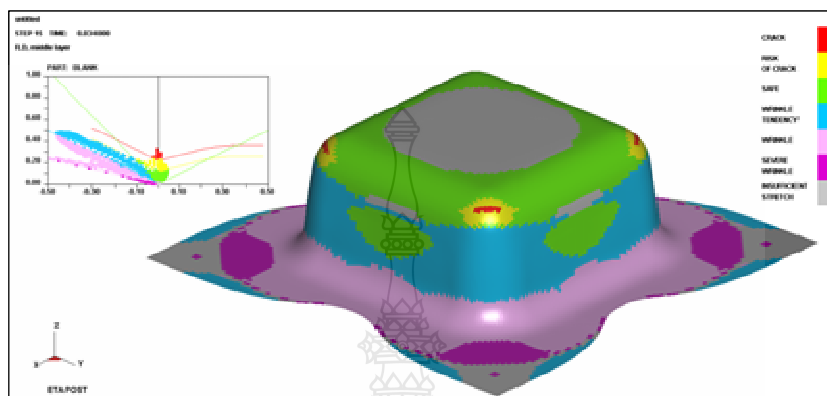


ภาพที่ 4.19 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPFC590 ที่ระดับรัศมีปาดาย 12 มิลลิเมตร

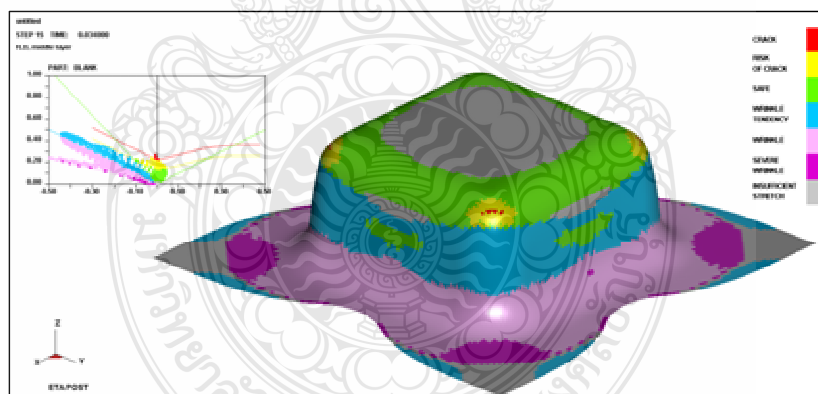
จากผลการจำลองของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก SPFC590 ภาพที่ 4.16 - 4.19 พบว่า เหล็ก SPFC590 สามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้ทั้ง 4 ระดับของรัศมีปาดายมีแนวโน้มเดียวกับวัสดุเหล็ก SAPH440 โดยที่รัศมีปาดายที่ 6, 8, 10 มิลลิเมตร มีความเสี่ยงที่จะเกิดการฉีกขาดบริเวณกันดัวย และที่รัศมีปาดาย 12 มิลลิเมตร ขึ้นรูปได้สมบูรณ์ไม่พบรอยแตกและรอยย่น เนื่องจากรัศมีปาดายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะขึ้นรูปขึ้นงานได้ดีกว่ารัศมีปาดายที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากรัศมีปาดายใหญ่จะช่วยให้การไหลตัวของแผ่นขึ้นงานเข้าไปยังปากคายได้อย่างสะดวก

4.6 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด JSC980Y

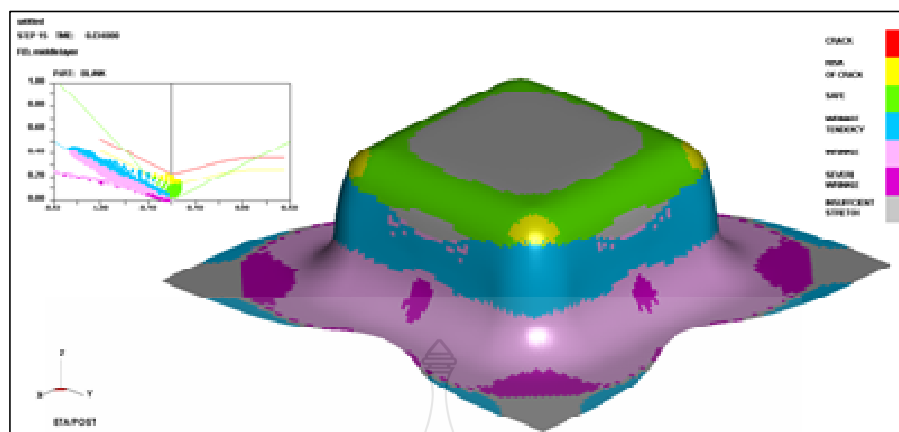
หลังจากนั้นได้เปลี่ยนความแข็งของวัสดุเพิ่มมากขึ้น เป็นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด JSC980Y ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้



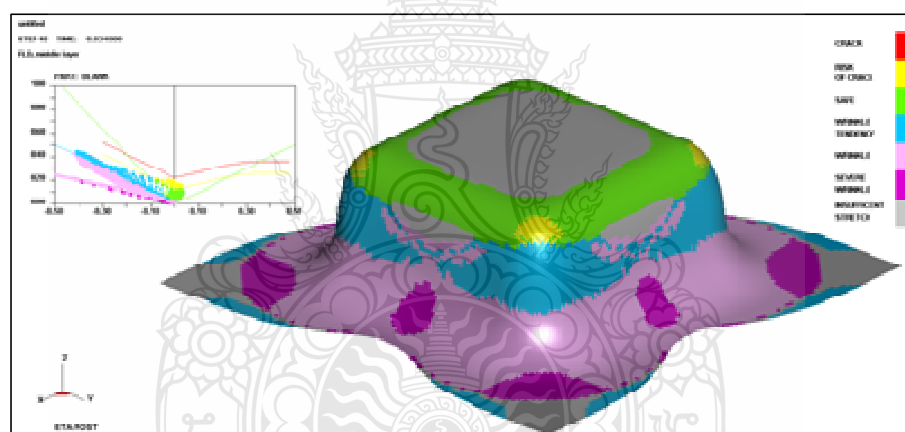
ภาพที่ 4.20 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก JSC980Y ที่ระดับรัศมีปากตาย 6 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.21 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก JSC980Y ที่ระดับรัศมีปากตาย 8 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.22 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก JSC980Y ที่ระดับรัศมีป่าคาย 10 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.23 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก JSC980Y ที่ระดับรัศมีป่าคาย 12 มิลลิเมตร

จากผลการจำลองของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็ก JSC980Y ภาพที่ 4.20 - 4.23 พบว่าในการขึ้นรูปสำหรับเหล็ก JSC980 ที่ระดับรัศมีป่าคาย 6 และ 8 มิลลิเมตร เกิดการฉีกขาดบริเวณก้นถ้วย เนื่องจากการไหลตัวของวัสดุผ่านรัศมีป่าคายได้ยากแต่ระดับรัศมีป่าคายที่ 10 มิลลิเมตร ขึ้นไปสามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้ เนื่องจากรัศมีป่าคายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะขึ้นรูปขึ้นงานได้ดีกว่ารัศมีป่าคายที่มีขนาดเล็กและช่วยให้การไหลตัวของแผ่นขึ้นงานเข้าไปยังปากคายได้อย่างสะดวก

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์ห้กรรมวิธีการลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อนำความรู้ทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาทางขึ้นรูปโลหะแผ่น ในการทดลองผลเฉลยจะมีความแม่นยำหรือไม่ขึ้นอยู่กับความครบถ้วนและความถูกต้องของข้อมูลที่ป้อนเข้าโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นหลัก จากการทดลองพบว่าการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถให้ผลเฉลยสอดคล้องกับผลลัพธ์จากการขึ้นรูปชิ้นงานจริงค่อนข้างมาก สามารถทำนายผลลัพธ์ก่อนการทำงานจริงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถจำลองกรรมวิธีการขึ้นรูปเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและสามารถหาแนวทางในการแก้ไขได้ค่อนข้างง่าย ซึ่งในกรรมวิธีการทำงานจริงจะไม่สามารถกระทำได้หรือกระทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นการประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์จึงสามารถลดเวลาจากการลองแม่พิมพ์และการแก้ไขแม่พิมพ์ได้อย่างมาก ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน สามารถทำการผลิตชิ้นงานได้ออกมาอย่างรวดเร็วผลการจำลองในการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถที่จะแยกสรุปผลที่ได้ ออกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลของแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปการจำลองการลากขึ้นรูปโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบการทดลองจริง ของเหล็ก SAPH440 และ SPCC พบว่ามีความแม่นยำ 98% ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 2% และเมื่อรัศมีปาดายมีขนาดใหญ่สามารถขึ้นรูปได้ง่ายกว่ารัศมีปาดายที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากเกิดการไหลตัวได้ดีของชิ้นงานเข้าสู่ช่องคาย โดยที่รัศมีปาดายที่มีขนาดใหญ่ใช้แรงในการขึ้นรูปน้อยกว่ารัศมีปาดายที่มีขนาดเล็กและเหล็ก SAPH440 จะใช้แรงลากขึ้นรูปสูงกว่าเหล็ก SPCC ในทุกระดับของรัศมีปาดายที่เปลี่ยนไปเนื่องจากคุณสมบัติทางกลของเหล็ก SAPH440 และเหล็ก SPCC ที่ใช้ในการทดลองมีความแตกต่างกัน โดยเหล็ก SAPH440 เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็ก SPCC จึงใช้แรงกดของพันธเพื่อที่จะทำให้แผ่นขึ้นรูปเปลี่ยนรูป ไหลเข้าสู่ช่องคายจนกระทั่งถึงความลึกที่ต้องการคือ 30 มิลลิเมตร มากกว่าเหล็ก SPCC และ เหล็ก SAPH440 ต้องใช้แรงกดแผ่นยึดชิ้นงานมากกว่าเหล็ก SPCC เพื่อป้องกันการเกิดรอยยับบริเวณปีกของด้วยสี่เหลี่ยม.

5.1.2 การขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมแบบมีปีกของเหล็ก SPCC และ SAPH440 สามารถทำการขึ้นรูปได้ทุกระดับของรัศมีปาดายและรัศมีปาดายเท่ากับ 12 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงของความหนาชิ้นงานและความเครียดของชิ้นงานน้อยที่สุด และสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC590 สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ทั้ง 4 ระดับของรัศมีปาดาย โดยที่รัศมีปาดายที่ 6, 8, 10 มิลลิเมตร มีแนวโน้มเดียวกับวัสดุ

SAPH440 แต่จะมีความเสี่ยงที่จะเกิดการล้าความแข็งแรงสูงและที่รัศมีบาคาย 12 มิลลิเมตร ขึ้นรูปได้สมบูรณ์และสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง JSC980Y นั้น สามารถขึ้นรูปได้สมบูรณ์ที่รัศมีบาคายเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ขึ้นไป เนื่องจากสมบัติทางกลที่เพิ่มมากขึ้นของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงทั้งสองชนิด

5.1.3 การไหลตัวของวัสดุจะเกิดการไหลตัวได้ดีขึ้นเมื่อรัศมีบาคายมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยที่รัศมีบาคายเท่ากับ 12 มิลลิเมตร เกิดการไหลตัวของวัสดุดีที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้ผู้ดำเนินการมีข้อเสนอแนะในการใช้โปรแกรม Dyna Form V5.6 ในการจำลองขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมเพื่อให้ได้ผลจากโปรแกรมให้มีความถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น เตรียมข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ในคอมพิวเตอร์กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ทำการทดสอบแรงดึง กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการขึ้นรูป ทำการจำลองการขึ้นรูป วิเคราะห์ผลการลากขึ้นรูปด้วยแต่เงื่อนไขในการลากขึ้นรูปโลหะให้ประสบความสำเร็จยังมีอีกหลายเงื่อนไข เช่น ความเที่ยงตรงของเครื่องจักร ความเที่ยงตรงของแม่พิมพ์ คุณสมบัติวัสดุ ช่างผู้ชำนาญการทดสอบแม่พิมพ์ ฯลฯ ดังนั้นความเหมาะสมในการหาผลเฉลยจะแม่นยำเพียงไรและใช้เวลาในมากหรือน้อยเพียงใดจึงขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ได้อาจจากการทดสอบและประสบการณ์ของผู้ที่ชำนาญการในการกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลองให้สอดคล้องกับการผลิตจริง อย่างไรก็ตามผลเฉลยที่ได้จากการจำลองการลากขึ้นรูปในคอมพิวเตอร์นี้เป็นแนวทางในการทำงานที่สามารถสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้ออกแบบและลูกค้าได้เป็นอย่างดี

การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในงานลากขึ้นรูปโลหะยังมีขีดจำกัดอยู่ โดยจะไม่สามารถทำนายหรือวิเคราะห์แนวโน้มผลได้ในบางกรณี เนื่องจากการกำหนดสถานะของตัวแปรต่างๆ เช่น คุณสมบัติของวัสดุ ขอบเขต อุณหภูมิ สารหล่อลื่น รูปทรงของแม่พิมพ์ ดายและผิวของแม่พิมพ์ย่อมมีความแตกต่างจากธรรมชาติจริง โดยในสถานะจริงจะมีตัวแปรต่างๆซึ่งเกิดขึ้นร่วมกันและมีอิทธิพลต่อการลากขึ้นรูปโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งส่วนมากจะมีสิ่งปลอมปนอยู่ ดังนั้นการพัฒนาโปรแกรมโดยการใช้สมการในการคำนวณที่เหมาะสม การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่เหมาะสม และการกำหนดสถานะขอบเขตที่เหมาะสม ย่อมทำให้การวิเคราะห์ผลโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถได้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงมากที่สุด ซึ่งจะเป็นประโยชน์มากในการพัฒนาการออกแบบผลิตภัณฑ์ การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตและการลดต้นทุน ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมนั้นได้ให้การยอมรับการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กันเป็นที่แพร่หลาย เช่น อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมผลิตปั๊มแรงดัน อุตสาหกรรม

ผลิกระบบระบายความร้อนและอุตสาหกรรมอื่นๆ ซึ่งใช้ในการรับรองผลการออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อ
สร้างความเชื่อมั่นแก่ลูกค้าและมีแนวโน้มที่จะใช้กันอย่างเป็นระบบและมีมาตรฐานมากขึ้น



รายการอ้างอิง

- [1] มาโนช กรอบเงิน, การออกแบบแม่พิมพ์และการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในกาวิเคราะห์การลากขึ้นรูปชิ้นงานขอบสันผาข้างท้ายรถกระบะ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [2] Kobayashi, S, Oh, S. and Altan, T., **Metal Forming and Finite Element Method**, New York: Oxford University, 1989. pp. 58-109.
- [3] พนา แซ่มสวัสดิ์, การแก้ปัญหารอยย่นในงานขึ้นรูปด้วยที่ทำได้ด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2541.
- [4] สุบิน ขันดี, การศึกษาความไวต่อรอยร้าวของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [5] ชาญ ถนัดงาน, เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะและพื้นฐานการขึ้นรูปโลหะ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2541.
- [6] Manfred Jasner and Meinhard Hecht, Wolfgang Beckmann, Heat Exchangers and Piping Systems from Copper Alloys - Commissioning, Operating and Shutdown, 2009.
- [7] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550. หน้า 3-18.
- [8] R. W. Clough, "The Finite Element Method in Plane Stress Analysis," **Proc. 2nd ASCE Conf. on Electronic Computation**, 1960. pp. 8-9.
- [9] Tai Hun Kwon, **In Production To Finite Element Method**, Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology, 2005. pp. 2.
- [10] Daryl L. Logan, **Finite Element Method Fourth Edition**, University of Wisconsin-Platteville, 2006.

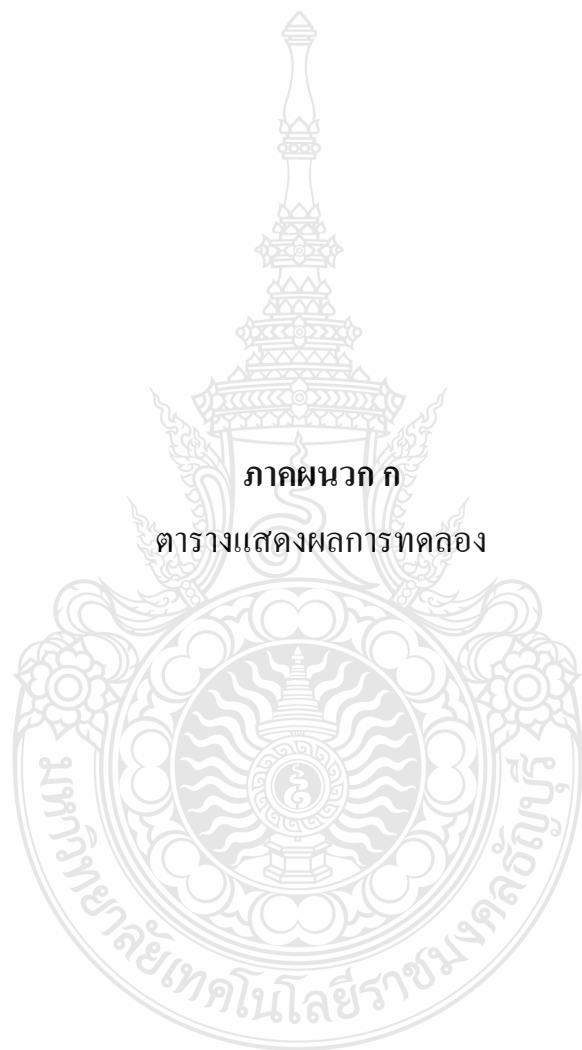
- [11] MSC.Software Corporation, **Introduction To Msc Marc And Mental** (Online), 2007. Available: http://web.mssoftware.com/support/prod_support/marc/hw_specs/release_guide.pdf (22 October 2011).
- [12] T. H. Kwon, **Fem Modelling Introduction**, Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado at Boulder, 2005.
- [13] MSC.Software Corporation, **MSC. Marc User Guide Version 2008 R1 Volume B** (Online), 2008. Available: http://web.mssoftware.com/support/prod_support/marc/downloads/marc_2008r1_doc_release.pdf (22 October 2011).
- [14] MSC.Software, **MSC Marc Mentat** (Online), 2003. Available: <http://www.mssoftware.com/product/marc> (22 October 2011).
- [15] D.A. Anderson, J.C. Tannehill and R.H. Pletcher, **Computational Fluid Mechanics And Heat Transfer**. Washington, DC: Hemisphere Publishing Corp, 1984.
- [16] GK Lal SK Chhouchury, **Fundamentals Of Manufacturing Processes**. Harrow: Alpha Science International Ltd., 2005.
- [17] วิทยา สงวนวรรณ และทีมงานวิชาการ, **การวิเคราะห์โครงสร้างด้วย NX CAE = The Finite Element (FEA) Analysis**. สมุทรปราการ: สำนักพิมพ์ เอนจินีเยอร์ แอนด์ อคิเดค พลัส, 2542.
- [18] รศ.ดร.เดช พุทธเจริญทอง, **ทฤษฎีพลาสติกตีและการเปลี่ยนรูปถาวร**, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [19] Frank J. Vecchio, **Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Membranes**, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Ontario Canada, 1989.
- [20] Kurt Lage, **HANDBOOK OF METAL FORMING**. Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2006.
- [21] Bill Smith and Mark King, **Bending Square and Rectangular Tubing** (Online), 2002. Available: <http://www.thefabricator.com/article/tubepipefabrication/bending-square-and-rectangular-tubing> (22 October 2011).
- [22] J D Square Inc, **Model 3 Tube Bender Assembly & Operating Instructions** (Online), 2009. Available: <http://www.race-dezert.com/forum/attachment.php?attachmentid=52265&d=1232411009> (22 October 2011).

- [23] จุลศิริ ศรีงามพ่อง, 2541, *วิศวกรรมงานแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่นเบื้องต้น*, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2530. หน้า 9.1-9.16.
- [24] ทวีภัทร์ บูรณชาติ, “การออกแบบการขึ้นรูปขึ้นส่วนขวางยึดเครื่องยนต์โดยการวิเคราะห์การึงขาดและรอยย่น,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 17, ฉบับที่ 2, 2550. หน้า 52-60.
- [25] บุญส่ง จงกลณี, *การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรต่อสมบัติการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC*, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [26] นฤทธิ์ คชฤทธิ์, *การตีปรอว์เปลือกทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้แรงกดยึดชิ้นงานที่เป็นลัดส่วนกับแรงที่ใช้พันซ์*, วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2539.
- [27] ไพฑูรย์ โกวิทยะวงศ์, *การศึกษาอิทธิพลของรัศมีภายในการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส*, วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544. หน้า 1-207.
- [28] ชาญศักดิ์ ภัทรพรนนท์, *การศึกษาการลากขึ้นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยวิธีไฟในต์เอลิเมนต์*, วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2545.
- [29] สวัสดิ์ โสตามุก, *การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป*, วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2550.
- [30] Chandorkar, K., “Deep Drawing of Rectangular Pans from Aluminum Alloy 2008-T4,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 63, 1997. pp. 27-34.
- [31] Toh and Kobayashi, “Deformation Analysis and Blank Design in Square Cup Drawing,” *Journal Mechanic Science*, Vol 25, No. 1, 1984. pp. 15-32.
- [32] Lange K., *Handbook of Metal Forming 2nd ed.* New York: McGraw-Hill, 1958. pp. 2.1-20.66
- [33] Schuler, *Metal Forming Handbook, 2nd ed.* Berlin Heidelberg: Springer, 1998. pp. 156-388.

- [34] Yoshida, T., Katayama, T., Hashimoto, K. and Kuriyama, Y., **Shape Control Techniques for High Strength Steel in Sheet Metal Forming** [Online], 2006. Available: <http://www.nsc.co.jp> (22 October 2011).
- [35] Yoshida, T., Isogai, E., Hashimoto, K., Katayama, T. and Kuriyama, Y., “Reduction of Springback for High-Strength Steel Sheets by Crash Forming,” **Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity**, Vol 46, No. 534, 2005. pp. 656-660.
- [36] Yanagimoto, J. and Oyamada, K., “Springback of High-strength Steel After Hot and Warm Sheet Formings,” **Annals of the CIRP**, Vol 54 (1), 2005. pp. 213–216.
- [37] Mori, K., Akita, K. and Abe, Y., “Springback Behavior in Bending of Ultra-High-Strength Sheets Using CNC Servo Press,” **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol 47, 2007. pp. 321-325.
- [38] Huang, Y. M. and Leu, D. K., “An Elastoplastic Finite Element Analysis of Sheet Metal U-bending Process,” **Journal of Materials Processing Technology**, Vol 48, 1995. pp. 151-157.
- [39] Cho, J. R., Moon, S. J., Moon, Y. H. and Kang, S. S., “Finite Element Investigation on Springback Characteristics in Sheet Metal U-bending Process,” **Journal of Materials Processing Technology**, Vol 141, 2003. pp. 109-116.
- [40] ชวัชชัย แก้วสีใส และ คณະ, “การศึกษาอิทธิพลของรัศมีบ่าด้ายในการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์,” การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 2555. หน้า 1547-1552.
- [41] ไพศาล เอี่ยมมิ และ คณະ, “อิทธิพลของรัศมีบ่าด้ายในการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก,” การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 2554. หน้า 218.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลการทดลอง

ก.1 ตารางบันทึกผลการทดลองแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองแรงขึ้นรูปเหล็ก SPCC

รัศมีบ่าตาย	แรง (kN)		คุณภาพชิ้นงาน
	F	F _{BH}	
6 mm.	116.70	37.32	สมบูรณ์
8 mm.	113.58	37.21	สมบูรณ์
10 mm.	110.91	36.91	สมบูรณ์
12 mm.	108.34	37.24	สมบูรณ์

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองแรงขึ้นรูปเหล็ก SAPH440

รัศมีบ่าตาย	แรง (kN)		คุณภาพชิ้นงาน
	F	F _{BH}	
6 mm.	177.20	55.79	สมบูรณ์
8 mm.	173.70	55.81	สมบูรณ์
10 mm.	170.34	55.62	สมบูรณ์
12 mm.	168.31	55.74	สมบูรณ์

ก.2 ตารางบันทึกผลการทดลองค่าความหนาของชิ้นงาน

ตารางที่ ก.3 ค่าความหนาของเหล็ก SPCC

ตำแหน่งที่วัด	วัสดุ SPCC			
	ระดับรัศมีบ่าตาย			
	6 มม.	8 มม.	10 มม.	12 มม.
1	1.39	1.39	1.39	1.40
2	1.38	1.39	1.39	1.40
3	1.38	1.38	1.39	1.39
4	1.37	1.38	1.39	1.39
5	1.37	1.37	1.38	1.38
6	1.33	1.33	1.33	1.34
7	1.38	1.39	1.39	1.40
8	1.41	1.41	1.41	1.41
9	1.45	1.45	1.46	1.47
10	1.47	1.48	1.48	1.49

ตารางที่ ก.4 ค่าความหนาของเหล็ก SAPH440

ตำแหน่งที่วัด	วัสดุ SAPH440			
	ระดับรัศมีป่าตาย			
	6 มม.	8 มม.	10 มม.	12 มม.
1	1.38	1.38	1.39	1.39
2	1.37	1.37	1.38	1.39
3	1.35	1.35	1.37	1.38
4	1.35	1.36	1.37	1.37
5	1.35	1.35	1.36	1.37
6	1.31	1.30	1.31	1.32
7	1.38	1.38	1.39	1.39
8	1.40	1.41	1.41	1.43
9	1.48	1.49	1.47	1.50
10	1.51	1.53	1.52	1.53

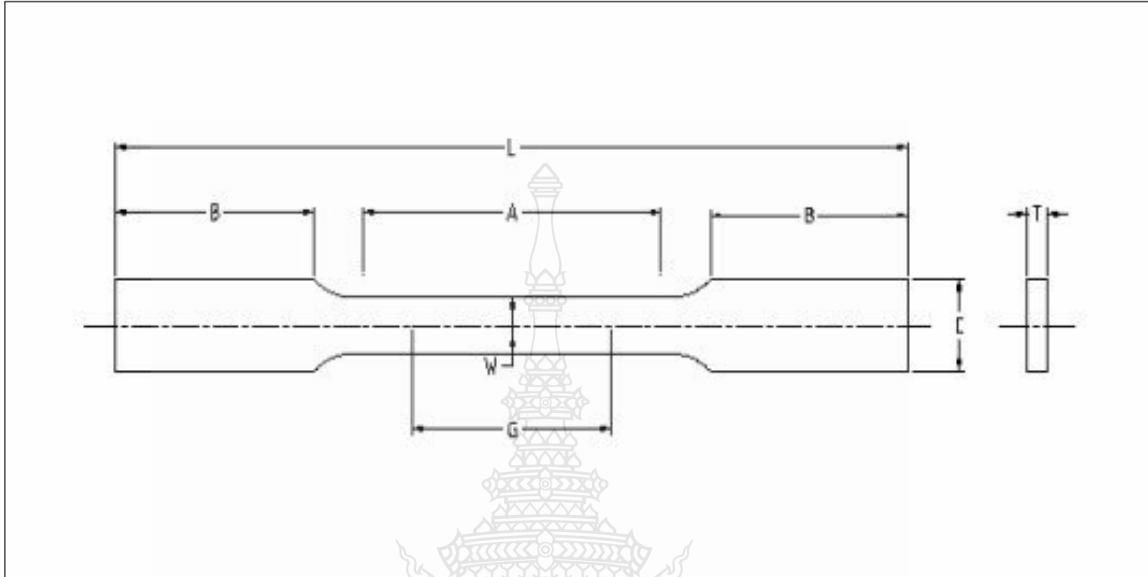




ภาคผนวก ข

คุณสมบัติทางกลของเหล็ก

ชิ้นทดสอบการดึง (Plain-End Specimen) เพื่อหาค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (n) ของวัสดุโลหะแผ่นตามมาตรฐาน ASTM E 646-91 ดังภาพที่ ข.1



ภาพที่ ข.1 ชิ้นทดสอบการดึง

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองแรงขึ้นรูปเหล็ก SPCC

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

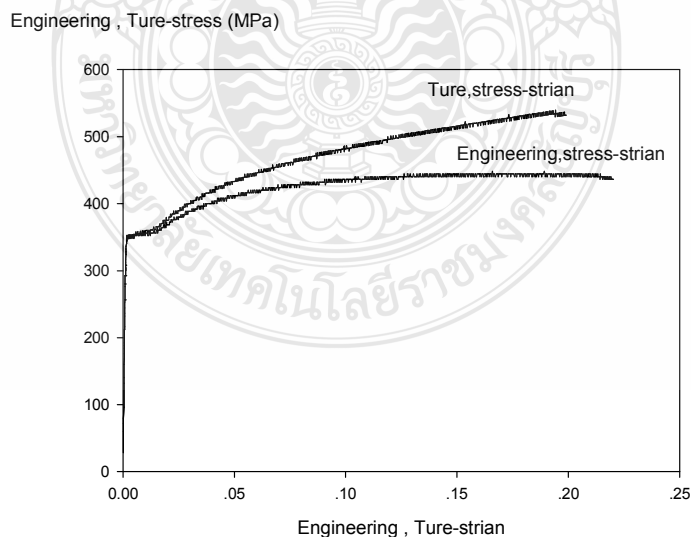
ข.1 ทดสอบหาสมบัติทางกลของเหล็ก SAPH440 หน้า 1.4 mm.

ข.1.1 นำค่าการทดสอบการดึง (Tensile Test) มาลงจุดสร้างแผนภาพความเค้นจริง (True Stress) ความเครียดจริง (True Strain)

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

ภาพที่ ข.2 การบันทึกข้อมูลจากการทดสอบการดึง

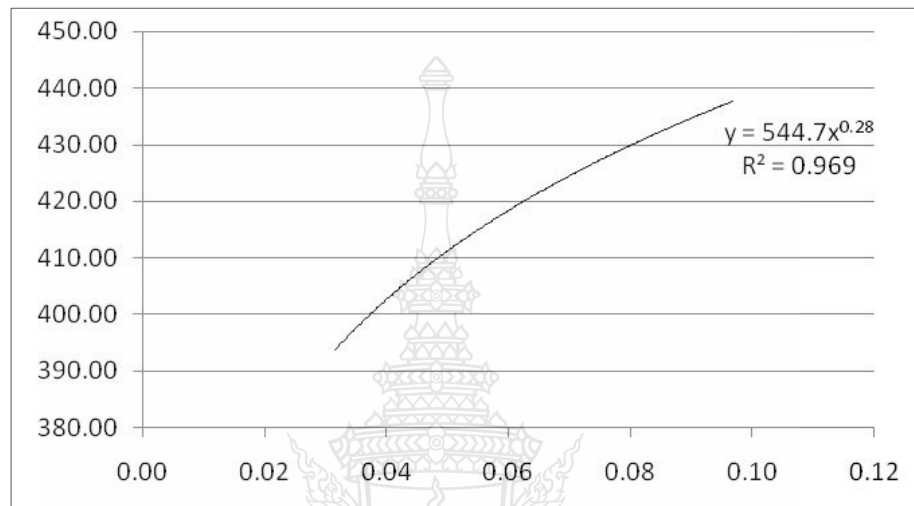
ข.1.2 การบันทึกข้อมูลในช่วงความยืด (Gage Length) 50 mm. เครื่องบันทึกข้อมูลนั้นจะสามารถบันทึกได้ประมาณ 30,500 ค่า และคำนวณโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Microsoft Excel) จะได้ค่าความเค้นความเครียดวิศวกรรม



ภาพที่ ข.3 แผนภาพความเค้น-ความเครียดวิศวกรรมและ ความเค้น-ความเครียดจริงของเหล็ก SAPH440 หน้า 1.4 mm.

ข.1.3 จากการลงจุดสร้างแผนภาพ ความเค้นจริง ความเครียดจริง หาค่า K, n จากพฤติกรรมช่วงพลาสติกซีดี (Plasticity) โดยใช้สมการตามแบบ กำลัง (Power Function) จำนวนห้าชิ้นทดสอบ

จากภาพที่ ข.4 ชิ้นทดสอบชิ้นทดสอบที่ 1 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 544.7$ และ ค่า $n = 0.28$



ภาพที่ ข.4 แผนภาพชิ้นทดสอบชิ้นทดสอบที่ 1

ข.1.4 ทำการหาค่าแอนไอโซทรอปีคของ SAPH440 หนา 1.4 mm. ตามแนวทิศทางการรีด (Rolling Direction) หนา 1.4 mm. ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ของความเครียด

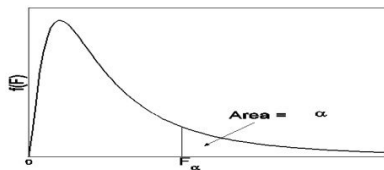
ตารางที่ ข.2 คุณสมบัติของเหล็ก SAPH440 หนา 1.4 mm.

ชนิดของวัสดุ	σ_y (MPa)	K (MPa)	n	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r)			
				R_0	R_{45}	R_{90}	\bar{R}
SAPH440	357	544	0.28	1.85	2.04	2.34	2.07



ภาคผนวก ค
ตารางสถิติ

ตารางที่ ค.1 ค่าวิกฤตการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบ F ที่ $\alpha = 0.05$

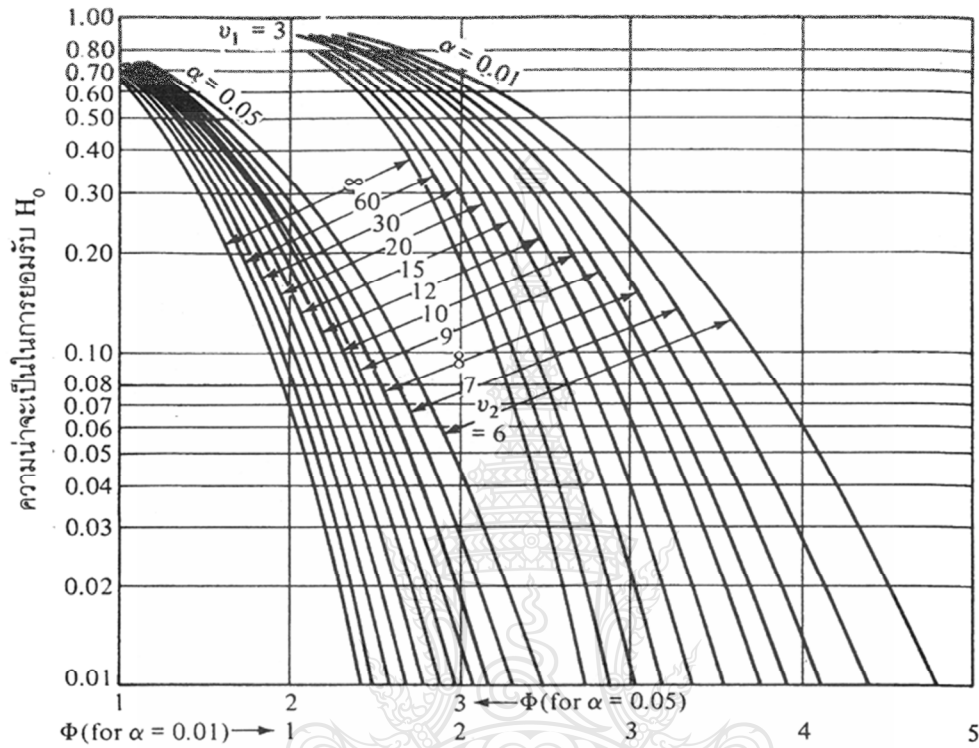


v2	v1																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161.4476	199.5000	215.7074	224.5832	230.1619	233.9860	236.7684	238.8827	240.5433	241.8818	243.9060	245.9499	248.0131	249.0518	250.0952	251.1432	252.1957	253.2529	254.3144
2	18.5128	19.0000	19.1643	19.2468	19.2964	19.3295	19.3532	19.3710	19.3848	19.3959	19.4125	19.4291	19.4458	19.4541	19.4624	19.4707	19.4791	19.4874	19.4957
3	10.1280	9.5521	9.2766	9.1172	9.0135	8.9406	8.8867	8.8452	8.8123	8.7855	8.7446	8.7029	8.6602	8.6385	8.6166	8.5944	8.5720	8.5494	8.5264
4	7.7086	6.9443	6.5914	6.3882	6.2561	6.1631	6.0942	6.0410	5.9988	5.9644	5.9117	5.8578	5.8025	5.7744	5.7459	5.7170	5.6877	5.6581	5.6281
5	6.6079	5.7861	5.4095	5.1922	5.0503	4.9503	4.8759	4.8183	4.7725	4.7351	4.6777	4.6188	4.5581	4.5272	4.4957	4.4638	4.4314	4.3985	4.3650
6	5.9874	5.1433	4.7571	4.5337	4.3874	4.2839	4.2067	4.1468	4.0990	4.0600	3.9999	3.9381	3.8742	3.8415	3.8082	3.7743	3.7398	3.7047	3.6689
7	5.5914	4.7374	4.3468	4.1203	3.9715	3.8660	3.7870	3.7257	3.6767	3.6365	3.5747	3.5107	3.4445	3.4105	3.3758	3.3404	3.3043	3.2674	3.2298
8	5.3177	4.4590	4.0662	3.8379	3.6875	3.5806	3.5005	3.4381	3.3881	3.3472	3.2839	3.2184	3.1503	3.1152	3.0794	3.0428	3.0053	2.9669	2.9276
9	5.1174	4.2565	3.8625	3.6331	3.4817	3.3738	3.2927	3.2296	3.1789	3.1373	3.0729	3.0061	2.9365	2.9005	2.8637	2.8259	2.7872	2.7475	2.7067
10	4.9646	4.1028	3.7083	3.4780	3.3258	3.2172	3.1355	3.0717	3.0204	2.9782	2.9130	2.8450	2.7740	2.7372	2.6996	2.6609	2.6211	2.5801	2.5379
11	4.8443	3.9823	3.5874	3.3567	3.2039	3.0946	3.0123	2.9480	2.8962	2.8536	2.7876	2.7186	2.6464	2.6090	2.5705	2.5309	2.4901	2.4480	2.4045
12	4.7472	3.8853	3.4903	3.2592	3.1059	2.9961	2.9134	2.8486	2.7964	2.7534	2.6866	2.6169	2.5436	2.5055	2.4663	2.4259	2.3842	2.3410	2.2962
13	4.6672	3.8056	3.4105	3.1791	3.0254	2.9153	2.8321	2.7669	2.7144	2.6710	2.6037	2.5331	2.4589	2.4202	2.3803	2.3382	2.2966	2.2524	2.2064
14	4.6001	3.7389	3.3439	3.1122	2.9582	2.8477	2.7642	2.6987	2.6458	2.6022	2.5342	2.4630	2.3879	2.3487	2.3062	2.2644	2.2229	2.1778	2.1307
15	4.5431	3.6823	3.2874	3.0556	2.9013	2.7905	2.7066	2.6408	2.5876	2.5437	2.4753	2.4034	2.3275	2.2878	2.2468	2.2043	2.1601	2.1141	2.0658
16	4.4940	3.6337	3.2389	3.0069	2.8524	2.7413	2.6572	2.5911	2.5377	2.4935	2.4247	2.3522	2.2756	2.2354	2.1938	2.1507	2.1058	2.0589	2.0096
17	4.4513	3.5915	3.1968	2.9647	2.8100	2.6987	2.6143	2.5480	2.4943	2.4499	2.3807	2.3077	2.2304	2.1898	2.1477	2.1040	2.0584	2.0107	1.9604
18	4.4139	3.5546	3.1599	2.9277	2.7729	2.6613	2.5767	2.5102	2.4563	2.4117	2.3421	2.2686	2.1906	2.1497	2.1071	2.0629	2.0166	1.9681	1.9168
19	4.3807	3.5219	3.1274	2.8951	2.7401	2.6283	2.5435	2.4768	2.4227	2.3779	2.3080	2.2341	2.1555	2.1141	2.0712	2.0264	1.9795	1.9302	1.8780
20	4.3512	3.4928	3.0984	2.8661	2.7109	2.5990	2.5140	2.4471	2.3928	2.3479	2.2776	2.2033	2.1242	2.0825	2.0391	1.9938	1.9464	1.8963	1.8432
21	4.3248	3.4668	3.0725	2.8401	2.6848	2.5727	2.4876	2.4205	2.3660	2.3210	2.2504	2.1757	2.0960	2.0540	2.0102	1.9645	1.9165	1.8657	1.8117
22	4.3009	3.4434	3.0491	2.8167	2.6613	2.5491	2.4638	2.3965	2.3419	2.2967	2.2258	2.1508	2.0707	2.0283	1.9842	1.9380	1.8894	1.8380	1.7831
23	4.2793	3.4221	3.0280	2.7955	2.6400	2.5277	2.4422	2.3748	2.3201	2.2747	2.2036	2.1282	2.0476	2.0050	1.9605	1.9139	1.8648	1.8128	1.7570
24	4.2597	3.4028	3.0088	2.7763	2.6207	2.5082	2.4226	2.3551	2.3002	2.2547	2.1834	2.1077	2.0267	1.9838	1.9390	1.8920	1.8424	1.7896	1.7330
25	4.2417	3.3852	2.9912	2.7587	2.6030	2.4904	2.4047	2.3371	2.2821	2.2365	2.1649	2.0889	2.0075	1.9643	1.9192	1.8718	1.8217	1.7684	1.7110
26	4.2252	3.3690	2.9752	2.7426	2.5868	2.4741	2.3883	2.3205	2.2655	2.2197	2.1479	2.0716	1.9898	1.9464	1.9010	1.8533	1.8027	1.7488	1.6906
27	4.2100	3.3541	2.9604	2.7278	2.5719	2.4591	2.3732	2.3053	2.2501	2.2043	2.1323	2.0558	1.9736	1.9299	1.8842	1.8361	1.7851	1.7306	1.6717
28	4.1960	3.3404	2.9467	2.7141	2.5581	2.4453	2.3593	2.2913	2.2360	2.1900	2.1179	2.0411	1.9586	1.9147	1.8687	1.8203	1.7689	1.7138	1.6541
29	4.1830	3.3277	2.9340	2.7014	2.5454	2.4324	2.3463	2.2783	2.2229	2.1768	2.1045	2.0275	1.9446	1.9005	1.8543	1.8055	1.7537	1.6981	1.6376
30	4.1709	3.3158	2.9223	2.6896	2.5336	2.4205	2.3343	2.2662	2.2107	2.1646	2.0921	2.0148	1.9317	1.8874	1.8409	1.7918	1.7396	1.6835	1.6223
40	4.0847	3.2317	2.8387	2.6060	2.4495	2.3359	2.2490	2.1802	2.1240	2.0772	2.0035	1.9245	1.8389	1.7929	1.7444	1.6928	1.6373	1.5766	1.5089
60	4.0012	3.1504	2.7581	2.5252	2.3683	2.2541	2.1665	2.0970	2.0401	1.9926	1.9174	1.8364	1.7480	1.7001	1.6491	1.5943	1.5343	1.4673	1.3893
120	3.9201	3.0718	2.6802	2.4472	2.2899	2.1750	2.0868	2.0164	1.9588	1.9105	1.8337	1.7505	1.6587	1.6084	1.5543	1.4952	1.4290	1.3519	1.2539
∞	3.8415	2.9957	2.6049	2.3719	2.2141	2.0986	2.0096	1.9384	1.8799	1.8307	1.7522	1.6664	1.5705	1.5173	1.4591	1.3940	1.3180	1.2214	1.0000

ภาคผนวก ง
กราฟเส้นโค้งไอซี



จากภาพที่ ง.1 จะแสดงกราฟเส้นโค้งโอซี (O-C Curve) สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบอติพหุคูณที่เมื่อ $\nu_1 = 3$



ภาพที่ ง.1 เส้นโค้งโอซีสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบอติพหุคูณที่เมื่อ $\nu_1 = 3$



ภาคผนวก จ

ผลงานตีพิมพ์และเผยแพร่



สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศรีปทุม
 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
 ขอเรียนเชิญเข้าร่วมการสัมมนา

IE Network Conference 2012

การประชุมวิชาการรายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2555
 17 - 19 ตุลาคม 2555 ณ โรงแรมเมอริเดียน รัชดา อำเภอดุสิต จังหวัดพระนคร

สาขาวิชาในการประชุม

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

กำหนดการสำคัญ

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



มหาวิทยาลัยศรีปทุม
 SRIPATUM
 สอนภาษาของชื่อเพิ่มเติม
 ผศ.ดร.สุจิตมพร เกษมทรัพย์, ผศ.ดร.ลัดดา นนทิศรี
 สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศรีปทุม
 โทรศัพท์: 0-2579-1111#315 และ #2177 โทรสาร: 0-2579-1111#2147
 เว็บไซต์: <http://ienetwork2012.spu.ac.th> อีเมล: ienetwork2012@spu.ac.th



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

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2555

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา

รองศาสตราจารย์จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดาริชา สุธีวงศ์.

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสวงศ์ โอสถิตศิลป์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ เรียวเดชะ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญญ

อาจารย์สุรพงษ์ ศิริกุลวัฒนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล สุธีจารุวัฒน์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริง ปรีชานนท์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประเสริฐ อัครประดมพงศ์

อาจารย์ ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย

อาจารย์ ดร.ไพโรจน์ ลดาวิจิตรกุล

อาจารย์ภูมิ เหลืองจามีกร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อาจารย์ ดร.ปุดณมี สังข์มงคล

อาจารย์ ดร.พัชรี ไตแก้ว ทองรัตน์ะ

อาจารย์ ดร.รมิตายู อยู่สุข

อาจารย์ ดร.สุรัตน์ วงศ์วีระเกียรติ

อาจารย์ ดร.สุวิกรมน์ วิชกุล

อาจารย์ ดร.ไอลดา ตริรัตน์ตระกูล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

อาจารย์อดจ ชัยมณี

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

อาจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง

อาจารย์ ดร.นงฐวิภา จันทร์ศรี

อาจารย์ ดร.เพ็ญสุดา พันธุ์ดำ

อาจารย์นันท์ทูลิ ศรีอริยวัฒน์

อาจารย์ ดร.ศิริรัตน์ หมื่นนินชกุล

อาจารย์ ดร.สิริรงค์ กลิ่นคำสอน

อาจารย์จักรินทร์ กลิ่นเงิน

อาจารย์ประภาพรณ เกษราพงศ์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ สายแก้ว

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพัฒน์ เศรษฐ์สมบูรณ์

อาจารย์ ดร.จุมพล วรสายัณห์

รองศาสตราจารย์ ดร.दनัยพงศ์ เชษฐโชติศักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวรินทร์ สุขโต

อาจารย์ ดร.ธนา ราษฎร์ภักดิ์



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

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนนาค กฤตวรภาณุจณ์
รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิท เจริญใจ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งนดร ชมภูอินไหว
อาจารย์ ดร.วรพจน์ เสรีรัฐ

รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภางค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมกฤต เล็กสกุล
อาจารย์ ดร.กรกฎ ไบบัวเทศ ทิพย์วางค์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์
รองศาสตราจารย์ ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญชัย โขมพัตราภรณ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยา คำคำ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พจมาน เตยวัฒนรัฐติกาล
อาจารย์ ดร.ช่อแก้ว จตุรานนท์
อาจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข
อาจารย์ ดร.พิเนษฐ์ ศรีโยธา
อาจารย์มงคล สีนะวัฒน์

รองศาสตราจารย์ ดร.อาษา ประทีปเสน
รองศาสตราจารย์วชิระ มีทอง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ พรหมบุญพงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ อุดมศักดิ์กุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจริญ สุทธรวาณิชย์
อาจารย์ ดร.ไพบูลย์ ช่วงทอง
อาจารย์ ดร.ศุภฤกษ์ บุญเทียบ
อาจารย์ ดร.อุษณีย์ คำพูล
อาจารย์เจษฎา จันทร์พงษ์โส
อาจารย์สุจินต์ ธงดาวสุวรรณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองศาสตราจารย์ ดร.อรรณกร เก่งพล
รองศาสตราจารย์วันชัย แผลมหลักสกุล
อาจารย์ ดร.กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์
อาจารย์ ดร.กฤษดา อัศวรุ่งแสงกุล
อาจารย์ ดร.กฤษดา พิมาพันธุ์ศรี
อาจารย์ ดร.ชยรัชต์ เผือกสามัญญ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรเดช วุฒิพรพันธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นราธิป แสงชัย
อาจารย์ ดร.ธนสาร อินทกรำชัย
อาจารย์ ดร.นันทกฤษณ์ ยอดพิจิต
อาจารย์ ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์
อาจารย์สงกรานต์ บางศรีณย์ทิพย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

อาจารย์ ดร.วิจิตรสวัสดิ์ สุขสวัสดิ์ ณ อยุธยา
อาจารย์ธรรมา สุนารักษ์
อาจารย์พัฒนพงษ์ แสงหัตถพัฒนา

อาจารย์วรินทร์ เกียรติคุณกุล
อาจารย์อรุณิชา อนุชิตชาญชัย
อาจารย์พรเทพ แก้วเชื้อ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทรหมณี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชาญ ช่วยพันธ์



การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555
17-19 ตุลาคม 2555 ซะอำ เพชรบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณฐา คุปต์เขี้ยว
อาจารย์ ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง
อาจารย์ศุภเอก ประมูลมาก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรพันธ์ ตรีวนพงษ์
อาจารย์ ดร.ระพี กาญจนะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พายัพ เชียงใหม่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนวิภา อววิพันธ์
อาจารย์ ดร.นเรศ อินตริวงศ์

อาจารย์ ดร.บรรเจิด แสงจันทร์พิสา
อาจารย์ ดร.ภาคภูมิ จารูภูมิ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พายัพ เชียงใหม่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนวิภา อววิพันธ์
อาจารย์ ดร.นเรศ อินตริวงศ์

อาจารย์ ดร.บรรเจิด แสงจันทร์พิสา
อาจารย์ ดร.ภาคภูมิ จารูภูมิ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์เดช เหมือนขาว
อาจารย์ ดร.มาตามะสุโฮมี มะแซ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

อาจารย์สัญญา คำจริง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล
อาจารย์ ดร.ปวีร์ ศิริรักษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยงยุทธ เสริมสุขอ่อนวัฒน์
อาจารย์ ดร.ปภากร ทิพย์ชวาล
อาจารย์ ดร.วีระชัย มโนพิเชฐวัฒนา

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รองศาสตราจารย์ ดร.จิรวัฒน์ ชีระวาพฤกษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ตรีทศ เหล่าศิริพงษ์ทอง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสมอจิตร์ หอมรสสุคนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.จิรศิริพงศ์ เจริญภัณฑารักษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ



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

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญา พิทักษ์กุล
อาจารย์ ดร.ณัฐพัชร์ อารีรัชกุลกานต์
อาจารย์ ดร.สันต์ รั้ววิบูลย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภรัชชัย วรรณรัตน์
อาจารย์ ดร.สมหญิง งามพรประเสริฐ

มหาวิทยาลัยนเรศวร

รองศาสตราจารย์ ดร.กวิณ สนนธิ์เพิ่มพูน
อาจารย์ ดร.ขวัญณิธิ คำเมือง
อาจารย์วิสาข์ เจ้าสกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์ พงษ์เจริญ
อาจารย์ ดร.ภาณุ บุรณจารุกร
อาจารย์ศรีสัจจา วิทยศักดิ์

มหาวิทยาลัยบูรพา

รองศาสตราจารย์เกษม พิพัฒน์ปัญญาคุณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทร์ทา นาควชิระตระกูล
อาจารย์ ดร.จักรวาล คุณะดิกลง
อาจารย์ ดร.ฤกษ์วัลย์ จันทร์สา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรหาญ ลิลา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรวัฒน์ สมสิริกาญจนคุณ
อาจารย์ ดร.กฤษดา ประสพชัยชนะ

มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

รองศาสตราจารย์สุคนธ์ อาจฤทธิ์

มหาวิทยาลัยรังสิต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวรรณ อัครไพบูลย์
อาจารย์ ดร.พิษณุ มนัสปิติ
อาจารย์พรรคพงษ์ แก่นณรงค์
อาจารย์สมพร พรหมดวง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญจันทร์ จริงจิตร
อาจารย์ต่อศักดิ์ อุทัยไขฟ้า
อาจารย์ศิลปชัย วัฒนเสย
อาจารย์สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา พิศลยมบุตร
อาจารย์ ดร.เลิศเลขา ธนะชัยพันธ์
อาจารย์นุกุล อุบลมาน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชณี ภูวพัฒนพันธ์
อาจารย์นันทวรรณ อำเอี่ยม
อาจารย์มารีสา แก้วสุวรรณ



การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555
17-19 ตุลาคม 2555 ชะอำ เพชรบุรี

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รองศาสตราจารย์ธนรัตน์ แต้วัฒนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์นลวรรณ ชุ่มฤทธิ์

อาจารย์ ดร.พิลดา หวังพานิช

อาจารย์พงษ์เพ็ญ จันทนะ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์มิตรมาณี ตีร์วัฒนางค์

อาจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ

อาจารย์สิริเดช ชาตินิยม

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รองศาสตราจารย์ ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล

รองศาสตราจารย์สมชาย ชูโณม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชเนศ รัตนวิไล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชชานา สิ้นธวัลย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจริญ เจตวิจิตร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พีเชษฐ ตระการชัยศิริ

รองศาสตราจารย์วันดา รัตนมณี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กลางเดือน โพนนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพรพรน ไชยประพิทธิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุจน์ สังขพงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ยอดดวง พันธุ์นรา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สงวน ตั้งโพธิธรรม

มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร อมรสวัสดิ์วัฒนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา กาญจนสุนทร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนะ เยี่ยงกมลสิงห์

อาจารย์ ดร.วิวัฒน์ชัย พุกกานนท์

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

อาจารย์จิตลดา ชัมเจริญ

อาจารย์นิตการ สมสุข

อาจารย์วรลักษณ์ เสถียรรังษะฎี

อาจารย์อรอุมา กอสนาน

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิศร ภูนิคม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชสรุา เกรัมย์กรกฎ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขอังคณา ลี

อาจารย์ ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์

อาจารย์ ดร.ธารชุตตา พันธุ์นิกุล

อาจารย์ไท แสงเทียน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นลิน เพียรทอง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา เกรัมย์กรกฎ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ สินธุเขาวน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุริยา โชคสวัสดิ์

อาจารย์ ดร.สันห์ โอพาพิริยกุล

อาจารย์ตะวันฉาย โพธิ์หอม

อาจารย์สุรเชษฐ์ ก้อนจันทร์



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

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดชา พวงดาวเรือง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภาภรณ์ สุวรรณรังษี

โรงเรียนนายเรืออากาศ

รองศาสตราจารย์สุทธิ ศรีบูรพา

อาจารย์อมฤต ศรีบูรพา

อาจารย์อวยชัย วิดต์เอื้อ

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยพฤกษ์ อภาภาเวท

อาจารย์เจษฎา วงษ์อ่อน

อาจารย์สุนทร มุลทา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประยูร สุรินทร์

อาจารย์พิทักษ์ พนาวัน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

รองศาสตราจารย์ ดร.สกนธ์ คล่องบุญจิต

อาจารย์ ดร.วิภู ศรีสืบสาน

รองศาสตราจารย์ ดร.ฤดี มาสุขจันทร์

อาจารย์ ดร.ชุมพล ยวงโย

อาจารย์ ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทร์เพ็ญ อนุรัตน์านนท์

อาจารย์ ดร.สิทธิชัย แซ่เหลิม

อาจารย์ ดร.คณศ พลอยคณัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ลีลาวิวงศ์

อาจารย์ ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์

อาจารย์กวินธร สัยเจริญ

มหาวิทยาลัยมหิดล

รองศาสตราจารย์ศุภชัย นาทะพันธ์

อาจารย์ ดร.มงคล เทียนวิบูลย์

อาจารย์ ดร.รณชัย ศิริเวธนูกุล

อาจารย์ศุภชัย ราษฎร์ศิริ

อาจารย์สิทธิพันธ์ ตันหาวิรุพท์

อาจารย์ ดร.กนกวรรณ กิ่งผดุง

อาจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย

อาจารย์ดวงยศ สุกีเกียรติ

อาจารย์ธนา สาตรา



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

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

รองศาสตราจารย์ ดร.กীরติ ชยะกุลคีรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรีณี มณีศรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมตะ ทศนภักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนภัทร พรหมวัฒน์ภักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัศวีร์ ศรีโหมด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิจิต เกรือสุข

อาจารย์ ดร.เทพฤทธิ์ ทองซุบ

อาจารย์ ดร.วิวิสา เลิศไพฑูรย์พันธ์

อาจารย์จักรพันธ์ กันหา

อาจารย์ธันญ เรือนคง

อาจารย์อศวิน วงศ์วิวัฒน์

อาจารย์ศิระ สัตยไพศาล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลธิศ เอี่ยมวรวิบูล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒนรา เกษราพงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ถาวร อมตกิตติ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัฒนพงศ์ อริยสิทธิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชวลิต มณีศรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ

อาจารย์ ดร.อัครมเดช วานิชชินชัย

อาจารย์ก้องศักดิ์ อาชวากร

อาจารย์ธนิน ศรีระรัมย์

อาจารย์ธีรินทร์ นฤนาท

อาจารย์วันวิสา ต่วนตระกูลศิลป์





การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555
17-19 ตุลาคม 2555 ศาลา เพชรบุรี

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

MPM061	<p>การเตรียมและสมบัติการผลิต H₂ ของท่อนาโนจากผง TiO₂ สีขาวราคาถูก ด้วยชุดถังปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นเองในประเทศ สรพงษ์ ภาสุปรีย์* สมหมาย ผิวสอาด ณรงค์ชัย โอเจริญ สิงห์โต สกฤตเมธทัช ณัฐพร โทณานนท์ สุวภูมิ ช่างโชติ</p>	1515
MPM062	<p>อิทธิพลความเร็วเดินแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อความแข็งแรงดึงรอยต่อชน แผ่นเทอร์แบลิ่งอัลลูมิเนียมผสม 6063 เจษฎา แก้ววิชิต* กิตติพงษ์ กิมะพงษ์</p>	1521
MPM063	<p>การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกระเบื้องหลังคาจากเส้นใยเลือกข้าวโพด ผสมเส้นใยชานอ้อย ประยูร สุรินทร์* กิตติศักดิ์ บัวศรี</p>	1527
MPM064	<p>การเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น AISI D2 ด้วยกระบวนการบอโรดิงแบบแพ็ค โดยให้ไฟฟ้ากระแสตรง ยศพงศ์ บุญปลูก ปฏิภาณ จัยเจิม*</p>	1536
MPM065	<p>การศึกษาพารามิเตอร์การขึ้นรูปผิวแข็งเหล็กกล้า SCM 415 ที่มีผลต่อค่าพลังงานความต้านแรงกระแทก พิพิกนธ์ พูลสวัสดิ์</p>	1541
MPM066	<p>การศึกษาอิทธิพลของรัศมีปาดายในการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ธวัชชัย แก้วสีใส* กุลชาติ จุลเพ็ญ บัญชา วงศ์ศรีทา บุญเรือง เย็นศิริ ไพศาล เอี่ยมมี ชวลลา วรณสิทธิ์</p>	1547
MPM067	<p>ศึกษาอิทธิพลรูปทรงของตัวกวน และอุณหภูมิการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ที่มีผลต่อสมบัติทางกลรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ณัฐ แก้วสกุล* เรืองศักดิ์ ภูธรราช กิตติพงษ์ กิมะพงษ์</p>	1553
MPM068	<p>การทำผิวสำเร็จของไททานเนียม และ สมบัติการต้านทานการกัดกร่อน นพรัตน์ กาญจนประยูร* ศิริพร ดาวพิเศษ กิตติคุณรัตน์เคลา นพพล ประชุมชน ณัฐพงศ์ เกียรติเสรีกุล</p>	1559
MPM069	<p>การศึกษาพารามิเตอร์การเชื่อมแผ่นโพลีเอสเตอร์ด้วยอัลตราโซนิคส์กำลังงานสูง พลากร หอมสวัสดิ์* เฉลิมเกียรติ จิระรุ่งเสถียร หนูจันทร์ ภูวิลวงษ์</p>	1564



การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555
17-19 ตุลาคม 2555 ศาลา เพชรบุรี

การศึกษาอิทธิพลของรัศมีบ่าตายในการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก
สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

**A Study of Influence Die Radius on Rectangular Cup Deep Drawing
for High Strength Steel with Finite Element Method**

ธวัชชัย แก้วสีใส¹ กุลชาติ จุลเพ็ญ² บัญชา วงศ์ศรีทา³ บุญเรือง เย็นศิริ⁴ ไพศาล เอี่ยมมี⁵ ชวลา วรรณสิทธิ์⁶
^{1,2,3,4,5,6} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12110
E-mail: Kaewseesai2010@hotmail.com*

Thawatchai kaewseesai¹ kunlachart junlapen² Boonruang yensin³ Paisam aemmi⁴
Banch wongsriha⁵ Chawala wannasit⁶

^{1,2} Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University
of Technology Thanyaburi, Pathumthani 12110
E-mail: Kaewseesai2010@hotmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของรัศมีบ่าตายในการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมแบบมีปีกสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวของวัสดุและอิทธิพลของรัศมีบ่าตายที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลากขึ้นรูป ด้วยโปรแกรม Dynaform Version 5.6 จำลองการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก โดยกำหนดมีขนาดถ้วยมีความกว้างด้านละ 60 มิลลิเมตร และมีความลึก 30 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้เป็นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง เกรด SAPH440 (JIS) เปรียบเทียบกับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) วัสดุทั้ง 2 ชนิด มีความหนาเท่ากันคือ 1.4 มิลลิเมตร กำหนดรัศมีบ่าตายขนาดเท่ากับ 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตร รัศมีมุมพื้นซ์เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และรัศมีของปากพื้นซ์เท่ากับ 10 มิลลิเมตร จากผลการจำลองโดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการทดลองจริงพบว่าขนาดของรัศมีบ่าตายทั้ง 4 ระดับ สามารถทำการลากขึ้นรูปวัสดุสองชนิดได้สำเร็จทั้งหมด ความความแข็งแรงของวัสดุที่เพิ่มขึ้นทำให้ต้องใช้แรงในการขึ้นรูปสูงขึ้น โดยที่รัศมีบ่าตายเท่ากับ 12 มิลลิเมตร จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อยและความหนาของถ้วยมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด วัสดุมีการไหลตัวของแผ่นชิ้นงานสม่ำเสมอที่สุด โดยปราศจากการฉีกขาด รัศมีบ่าตายที่มีขนาดเล็กจะใช้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีพฤติกรรมการไหลตัวของชิ้นงานที่ยากขึ้น ซึ่งผลการจำลองโดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการทดลองจริงมีความแม่นยำ 97% ดังนั้นผลการจำลองจึงมีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะสามารถนำมาวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองก่อนทำการทดลองจริงได้

คำหลัก การลากขึ้นรูป ไฟไนต์เอลิเมนต์ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

Abstract

This research was to study the influence of die radius on the deep drawing square cup for high strength steel focusing on the flowing behavior of the material and the influence of die radius affecting the

effectiveness of the deep drawing. In this simulation, Dynaform version 5.6 Finite element software was use to form deep drawing square cup with at the dimension of 60 mm. in width, 60 mm. in length and 30 mm. in depth and 120x120 mm. thickness 1.4 mm of high strength steel grade SAPH440 (JIS) compare with carbon steel blank sheet grade SPCC (JIS) at 6, 8, 10, and 12 mm. die radius and 10 mm. punch angle radius and 10 mm. punch shoulder radius were also used in order to study the influence of die radius affecting the punch force of deep drawing and the quality of square cup ,and compare the experimental results. It was found that the 4 sizes of die radius were able to form the deep drawing. The punch force using in deep drawing was at the low level and the thickness of the work pieces was changed at the low level at the 12mm. die radius and offered the best result in forming the work piece to the mold without crack. The punch force using in deep drawing reduced when using bigger die radius and it was likely to form deep drawing of the work piece well and the work piece could flow well without wrinkle while the punch force in deep drawing was used more at the small size of die radius. The accuracy 97% of finite element method simulation compare with the actual experiment. Therefore, the results of the simulation were accurate and reliable enough to be used for analyzing the experimental results of the simulation before the actual experiment.

Keywords: Deep drawing, Finite Element, High strength steel.

1. บทนำ

ในปัจจุบันธุรกิจมีการแข่งขันทางการค้าสูงมากในประเทศไทยมีผู้ประกอบการอุตสาหกรรมหลายสาขาได้มีการปรับปรุงคุณภาพการผลิตสินค้าและขยายตัวไปอย่างรวดเร็วมีการแข่งขันทางธุรกิจอุตสาหกรรมเกิดขึ้นตลอดเวลาทั้งทางการตลาด รูปแบบของผลิตภัณฑ์และเงินทุนผู้ประกอบการอุตสาหกรรมแต่ละแห่งต้องเร่งพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีต่างๆ การลากขึ้นรูป[1]. [2] มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมยานยนต์ การพัฒนากระบวนการขึ้นรูปโลหะจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพื่อลดต้นทุนการผลิต เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength steel; HSS) เป็นเหล็กที่มีค่า Yield Strength มากกว่า 270 MPa โดยส่วนมากแล้วจะใช้เหล็กชนิดนี้ในการผลิตชิ้นส่วนของรถยนต์ ซึ่งวัสดุชนิดนี้จะมี ความแข็งแรงทนแรงดึงสูง เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงถูกพัฒนาเพื่อใช้เป็นวัสดุในการผลิตชิ้นส่วนที่ต้องการความสามารถในการรับแรงกระแทก โดยในอุตสาหกรรมยานยนต์ใช้เหล็กดังกล่าวเป็นวัสดุในการผลิต กันชน คานกันกระแทก และชิ้นส่วนรับแรงต่างๆ ด้วยค่าความแข็งแรงที่เพิ่มสูงขึ้นนี้ ทำให้ขึ้นรูปยาก มีการตีตัวกลับสูง และเกิดการยึดติดกับผิวแม่พิมพ์ได้ง่าย ทำให้เกิดรอยบนชิ้นงานที่ไม่สามารถยอมรับได้ และยังส่งผลทำให้

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตเกิดการสึกหรอ และหมดอายุการใช้งานได้เร็วขึ้น ดังนั้นการขึ้นรูปโลหะแผ่นให้ได้ชิ้นงานออกมาดีจะขึ้นอยู่กับรูปร่างลักษณะของแม่พิมพ์ และเงื่อนไขในการผลิต เช่น ขนาดของรัศมีตาย, แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป, แรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน และการหล่อลื่น เป็นต้น การออกแบบแม่พิมพ์และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการผลิตในทางปฏิบัติมักจะทำได้ยาก ต้องอาศัยการลองผิดลองถูกหลายๆ ครั้ง จนกว่าจะได้รูปร่างแม่พิมพ์และค่าเงื่อนไขในการผลิตที่เหมาะสม ทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก การนำคอมพิวเตอร์มาช่วยจำลองพฤติกรรมการขึ้นรูปโลหะมีประโยชน์ในการลดเวลาและค่าใช้จ่ายจากการลองผิดลองถูก เนื่องจากการจำลองพฤติกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นทำให้ทราบถึงลักษณะการไหล การเสียรูปของโลหะแผ่น และช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบแม่พิมพ์ที่เหมาะสม ตลอดจนสามารถคาดการณ์จุดเสียหายที่จะเกิดขึ้นหลังจากการลากขึ้นรูปได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ [3] ในการวิเคราะห์การลากขึ้นรูปด้วยสลิเลียมแบบมีปีก มาช่วยในการวิเคราะห์หาเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมในการลากขึ้นรูปด้วยสลิเลียมแบบมีปีก โดยมุ่งเน้นไปที่พฤติกรรมการไหลตัวและอิทธิพลของตาย ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลากขึ้นรูป



effectiveness of the deep drawing. In this simulation, Dynaform version 5.6 Finite element software was use to form deep drawing square cup with at the dimension of 60 mm. in width, 60 mm. in length and 30 mm. in depth and 120x120 mm. thickness 1.4 mm of high strength steel grade SAPH440 (JIS) compare with carbon steel blank sheet grade SPCC (JIS) at 6, 8, 10, and 12 mm. die radius and 10 mm. punch angle radius and 10 mm. punch shoulder radius were also used in order to study the influence of die radius affecting the punch force of deep drawing and the quality of square cup ,and compare the experimental results. It was found that the 4 sizes of die radius were able to form the deep drawing. The punch force using in deep drawing was at the low level and the thickness of the work pieces was changed at the low level at the 12mm. die radius and offered the best result in forming the work piece to the mold without crack. The punch force using in deep drawing reduced when using bigger die radius and it was likely to form deep drawing of the work piece well and the work piece could flow well without wrinkle while the punch force in deep drawing was used more at the small size of die radius. The accuracy 97% of finite element method simulation compare with the actual experiment. Therefore, the results of the simulation were accurate and reliable enough to be used for analyzing the experimental results of the simulation before the actual experiment.

Keywords: Deep drawing, Finite Element, High strength steel.

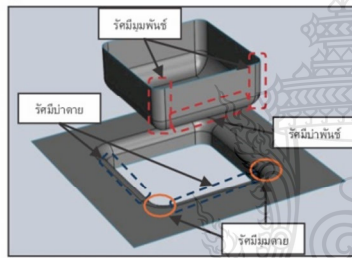
1. บทนำ

ในปัจจุบันธุรกิจมีการแข่งขันทางการค้าสูงมากในประเทศไทยมีผู้ประกอบการอุตสาหกรรมหลายสาขาได้มีการปรับปรุงคุณภาพการผลิตสินค้าและขยายตัวไปอย่างรวดเร็วมีการแข่งขันทางธุรกิจอุตสาหกรรมเกิดขึ้นตลอดเวลาทั้งทางด้านการตลาด รูปแบบของผลิตภัณฑ์และเงินทุนผู้ประกอบการอุตสาหกรรมแต่ละแห่งต้องเร่งพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีต่างๆ การลากขึ้นรูป[1]. [2] มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมยานยนต์ การพัฒนากระบวนการขึ้นรูปโลหะจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพื่อลดต้นทุนการผลิต เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength steel; HSS) เป็นเหล็กที่มีค่า Yield Strength มากกว่า 270 MPa โดยส่วนมากแล้วจะใช้เหล็กชนิดนี้ในการผลิตชิ้นส่วนของรถยนต์ ซึ่งวัสดุชนิดนี้จะมี ความแข็งแรงทนแรงดึงสูง เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงถูกพัฒนาเพื่อใช้เป็นวัสดุในการผลิตชิ้นส่วนที่ต้องการความสามารถในการรับแรงกระแทก โดยในอุตสาหกรรมยานยนต์ใช้เหล็กดังกล่าวเป็นวัสดุในการผลิต กันชน คานกันกระแทก และชิ้นส่วนรับแรงต่างๆ ด้วยค่าความแข็งแรงที่เพิ่มสูงขึ้นนี้ ทำให้ขึ้นรูปยาก มีการตีตัวกลับสูง และเกิดการยึดติดกับผิวแม่พิมพ์ได้ง่าย ทำให้เกิดรอยบนชิ้นงานที่ไม่สามารถยอมรับได้ และยังส่งผลทำให้

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตเกิดการสึกหรอ และหมดอายุการใช้งานได้เร็วขึ้น ดังนั้นการขึ้นรูปโลหะแผ่นให้ได้ชิ้นงานออกมาดีจะขึ้นอยู่กับรูปร่างลักษณะของแม่พิมพ์ และเงื่อนไขในการผลิต เช่น ขนาดของรัศมีตาย, แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป, แรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน และการหล่อลื่น เป็นต้น การออกแบบแม่พิมพ์และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการผลิตในทางปฏิบัติมักจะทำได้ยาก ต้องอาศัยการลองผิดลองถูกหลายๆ ครั้ง จนกว่าจะได้รูปร่างแม่พิมพ์และค่าเงื่อนไขในการผลิตที่เหมาะสม ทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก การนำคอมพิวเตอร์มาช่วยจำลองพฤติกรรมการขึ้นรูปโลหะมีประโยชน์ในการลดเวลาและค่าใช้จ่ายจากการลองผิดลองถูก เนื่องจากการจำลองพฤติกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นทำให้ทราบถึงลักษณะการไหล การเสียรูปของโลหะแผ่น และช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบแม่พิมพ์ที่เหมาะสม ตลอดจนสามารถคาดการณ์จุดเสียหายที่จะเกิดขึ้นหลังจากการลากขึ้นรูปได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ [3] ในการวิเคราะห์การลากขึ้นรูปด้วยสลิเลียมแบบมีปีก มาช่วยในการวิเคราะห์หาเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมในการลากขึ้นรูปด้วยสลิเลียมแบบมีปีก โดยมุ่งเน้นไปที่พฤติกรรมการไหลตัวและอิทธิพลของตาย ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลากขึ้นรูป



การลากขึ้นรูปลดลงเมื่อใช้รัศมีบ่าตายขนาดใหญ่ขึ้น และรัศมีบ่าตายเท่ากับ 12 มม. มีการเปลี่ยนแปลงของความหนาชิ้นงานน้อยที่สุด และในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Dynaform Version 5.6 ทำการวิเคราะห์การลากขึ้นรูปด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกหลังการขึ้นรูปมีขนาดความกว้างด้านละ 60 มม. และมีความลึก 30 มม. รัศมีพินซ์ดิ่งที่ 10 มม. ระดับรัศมีบ่าตาย 6, 8, 10, 12 มม. โดยจำลองพฤติกรรมของการลากขึ้นรูปดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง โดยนำผลที่ได้จากการจำลองการลากขึ้นรูปโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ มาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการลากขึ้นรูปจริงในเรื่องพฤติกรรมการไหลตัวและอิทธิพลของตายที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลากขึ้นรูป



รูปที่ 2 แสดงรูปแบบการจำลองของการลากขึ้นรูป

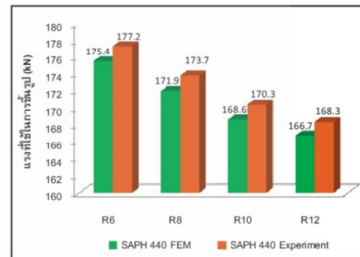
การสร้างแบบจำลองเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองตาข่าย (Mesh Model) เพื่อการแบ่งเอลิเมนต์ (Elements) ของแม่พิมพ์แต่ละชุดและแม่เหล็ก โดย Mesh ของ Die, Binder, Punch และ Blank ถูกสร้างในโปรแกรม Dynaform [5] ถูกนำมาประมวลผลด้วย Explicit Nonlinear FEM โดยใช้โปรแกรม Dynaform เพื่อประเมินความสามารถในการขึ้นรูปในแต่ละแบบได้อย่างสม่ำเสมอ การคำนวณทั้งหมดทำบน PC workstation ที่มีตัวประมวลผล Intel Core i3 2.26 GHz และ RAM ที่ 4 GB

4. ผลการทดลอง

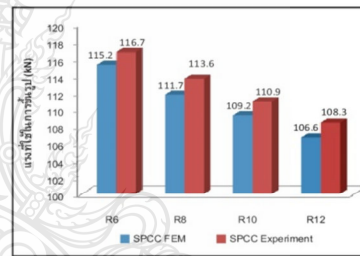
4.1 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป

จากการทดลองโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการลากขึ้นรูปชิ้นงานด้วยสี่เหลี่ยมแบบมีปีก ด้วย

วัสดุเหล็ก SAPH440 โดยใช้แรงกดแผ่นยึดชิ้นงานเท่ากับ 55.74 kN และวัสดุเหล็ก SPCC ใช้แรงกดแผ่นยึดชิ้นงานเท่ากับ 37.17 kN. ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการคำนวณทางทฤษฎี ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ไม่เกิดรอยแตกและรอยย่น ทำการขึ้นรูปเพื่อหาค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูปของเหล็ก SAPH440 เทียบกับเหล็ก SPCC แสดงดังรูปที่ 3



(ก) แสดงแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปของเหล็ก SAPH440



(ข) แสดงแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC

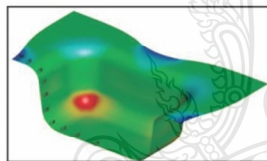
รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบแรงขึ้นรูปชิ้นงานระหว่างเหล็ก SAPH440 กับเหล็ก SPCC

หลังจากที่ใช้การจำลองการลากขึ้นรูปโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบการทดลองจริงของเหล็ก SAPH440 และ SPCC และ เมื่อชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วมีความสมบูรณ์ไม่เกิดรอยแตกและรอยย่นในทุกระดับของตัวแปรทดสอบ จึงทำการเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลง ของแรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูประหว่างเหล็ก SAPH440 เทียบกับ เหล็ก SPCC จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าวัสดุทั้งสองชนิดมีแนวโน้มเหมือนกันคือรัศมีบ่าตายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะใช้แรงในการลากขึ้นรูปชิ้นงานน้อยกว่ารัศมีบ่าตายที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากการไหลตัวของแผ่นชิ้นงานเข้าไปยังปากตายที่เป็นไปได้

สะดวก สำหรับเหล็ก SAPH440 จะใช้แรงลากขึ้นรูปสูงกว่าเหล็ก SPCC ในทุกระดับของรัศมีบ่าตายที่เปลี่ยนไป เนื่องจากคุณสมบัติทางกลของเหล็ก SAPH440 และเหล็ก SPCC ที่ใช้ในการทดลองมีความแตกต่างกัน โดยเหล็ก SAPH440 เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็ก SPCC จึงใช้แรงกดของพินซ์เพื่อที่จะทำให้แผ่นขึ้นงานเปลี่ยนรูป ไหลเข้าสู่ช่องตายจนกระทั่งถึงความลึกที่ต้องการคือ 30 มม. มากกว่าเหล็ก SPCC และ เหล็ก SAPH440 ต้องใช้แรงกดแผ่นยึดขึ้นงานมากกว่าเหล็ก SPCC เพื่อป้องกันการเกิดรอยยับบริเวณปีกของถ้วยสี่เหลี่ยม.

4.2 อิทธิพลของรัศมีบ่าตายที่มีผลต่อความหนาถ้วย

จากผลการจำลองการลากขึ้นรูปโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ได้ผลแสดงการขึ้นรูปได้สำเร็จคือถ้วยสี่เหลี่ยมมีความสมบูรณ์ไม่เกิดรอยแตกและรอยยับ มาทำการวัดความหนาของผนังขึ้นงานตั้งแต่กันถ้วยไปจนถึงปีกถ้วยด้วยโปรแกรมดังรูปที่ 4



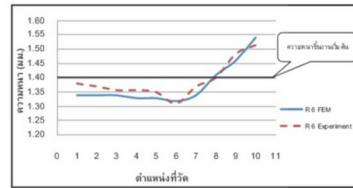
(ก) การวัดความหนาของขึ้นงานจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์



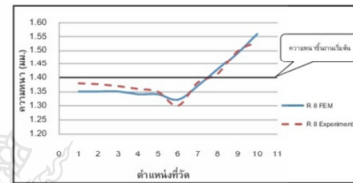
(ข) การวัดความหนาของขึ้นงานจากการทดลองจริง รูปที่ 4 แสดงตำแหน่งการวัดความหนาของขึ้นงาน SAPH440

จากรูปที่ 5 แสดงผลความแตกต่างของความหนาขึ้นงาน โดยใช้รัศมีบ่าตายในการจำลองการลากขึ้นรูปที่แตกต่างกันของเหล็ก SAPH440 จากผลการวัดความหนาขึ้นงานด้วยการจำลองโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับทดลองจริงจะเห็นได้ว่าการขนาดของรัศมีบ่าตายเท่ากับ 6-10 มม. มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของขึ้นงานกันถ้วยเนื่องจากขนาดรัศมีดังกล่าวทำให้เนื้อขึ้นงานไหลตัวลงมาได้ยากทำให้

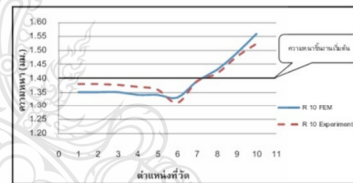
เนื้อขึ้นงานบริเวณกันถ้วยมีความเค้นแรงดึงสูงจึงมีการดึงเนื้อขึ้นงานบริเวณกันถ้วยให้มีการเปลี่ยนรูปด้วย แต่ที่ขนาดรัศมีบ่าตายเท่ากับ 12 มม. ขึ้นงานมีการไหลตัวได้ดีขึ้น ความหนาขึ้นงานบริเวณกันถ้วยมีความเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย



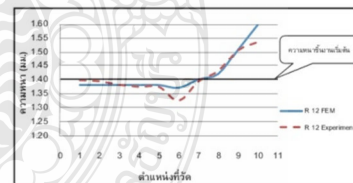
(ก) แสดงความหนาถ้วยของรัศมีบ่าตายเท่ากับ 6 มม.



(ข) แสดงความหนาถ้วยของรัศมีบ่าตายเท่ากับ 8 มม.



(ค) แสดงความหนาถ้วยของรัศมีบ่าตายเท่ากับ 10 มม.



(ง) แสดงความหนาถ้วยของรัศมีบ่าตายเท่ากับ 12 มม.

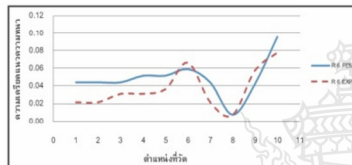
รูปที่ 5 แสดงความหนาของขึ้นงาน SAPH440 แต่ละรัศมีบ่าตาย

นอกจากนี้ผลการวัดความหนาขึ้นงานของแต่ละตำแหน่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ทุกรัศมีบ่าตายกล่าวคือตรงบริเวณตำแหน่งที่ 6 จะเป็นตำแหน่งที่มีความหนาของถ้วยน้อยที่สุด เพราะเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นดึงในแนวแกนสูงสุดของการลากขึ้นรูป ส่วน

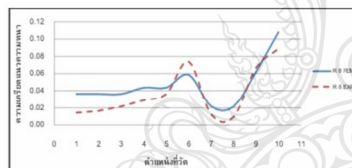
บริเวณปีกถ้วยในตำแหน่งที่ 10 ชิ้นงานจะมีความหนา มากกว่าความหนาเริ่มต้นของชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลมาจาก ความเค้นอัด ในแนวเส้นรอบวงบริเวณปีกถ้วย

4.3 อิทธิพลของรัศมีบ่าตายที่มีผลต่อความเครียด แนวความหนาของชิ้นงาน

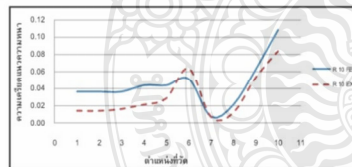
อิทธิพลของรัศมีบ่าตายที่มีผลต่อความเครียดแนว ความหนาของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 6 รัศมีบ่าตายที่ ขนาดใหญ่ในรูป 6(ง) เกิดความเครียดบริเวณผนังถ้วย น้อยกว่ารัศมีบ่าตายที่ขนาดเล็กในรูป 6(ก) โดยที่รัศมีบ่า ตายที่มีขนาดใหญ่เกิดการไหลตัวของชิ้นงานเข้าสู่ช่อง ดายได้ดี ใช้แรงในการขึ้นรูปน้อยและมีการเปลี่ยนแปลง ความหนาบริเวณก้นถ้วยน้อยที่สุด



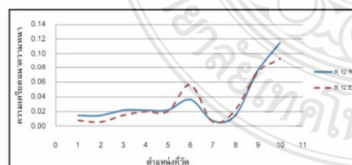
(ก) แสดงความเครียดแนวความหนาที่รัศมีบ่าตายเท่ากับ 6 มม.



(ข) แสดงความเครียดแนวความหนาที่รัศมีบ่าตายเท่ากับ 8 มม.



(ค) แสดงความเครียดแนวความหนาที่รัศมีบ่าตายเท่ากับ 10 มม.



(ง) แสดงความเครียดแนวความหนาที่รัศมีบ่าตายเท่ากับ 12 มม.

รูปที่ 6 แสดงความเครียดแนวความหนาของเหล็ก SAPH440
แต่ละระดับรัศมีบ่าตาย

5.สรุปผลการทดลอง

5.1 อิทธิพลของรัศมีบ่าตายที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการ ลากขึ้นรูปผลของการทดลองพบว่าเมื่อรัศมีบ่าตายที่มี ขนาดใหญ่สามารถขึ้นรูปได้ง่ายกว่ารัศมีบ่าตายที่มี ขนาดเล็ก เนื่องจากเกิดการไหลตัวได้ดีของชิ้นงานเข้าสู่ ช่องตาย โดยที่รัศมีบ่าตายที่มีขนาดใหญ่ใช้แรงในการ ขึ้นรูปน้อยกว่ารัศมีบ่าตายที่มีขนาดเล็ก

5.2 การขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกสามารถ ทำการขึ้นรูปได้ทุกรัศมีบ่าตาย และรัศมีบ่าตายเท่ากับ 12 มม. มีการเปลี่ยนแปลงของความหนาชิ้นงานและ ความเครียดของชิ้นงานน้อยที่สุด

5.3 การไหลตัวของวัสดุจะเกิดการไหลตัวได้ดีขึ้น เมื่อรัศมีบ่าตายมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยที่รัศมีบ่าตายเท่ากับ 12 มม. เกิดการไหลตัวของวัสดุดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยี โลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำหรับโปรแกรมไฟไนต์ อิลิเมนต์ Dynaform Version 5.6 ที่ใช้ในการจำลองการ ลากขึ้นรูปนี้ และ อาจารย์รยามีล เกศวรกุล จาก มหาวิทยาลัยปทุมธานี ในการแนะนำการใช้โปรแกรมไฟ ไนต์อิลิเมนต์ Dynaform Version 5.6

เอกสารอ้างอิง

- [1] วารุณี เปรมานนท์, 2552, แม่พิมพ์โลหะแผ่น, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), หน้า 2-4
- [2] ไพฑูรย์ โกวิทยะวงศ์, 2544, การศึกษาอิทธิพลของ รัศมีตายในการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [3] เดช พุทธเจริญทอง, 2541, การวิเคราะห์ด้วยวิธี ไฟไนต์อิลิเมนต์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม กเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 4-30.
- [4] ไพศาล เอี่ยมมิ และ คณะ, 2554 อิทธิพลของรัศมีบ่า ตายในการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก, หน้า 1-6
- [5] ETA, *Dynaform: User's Manual Version 5.6*, 2010.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายรัชชัย แก้วสีใส
วัน เดือน ปีเกิด	11 กันยายน 2525
ที่อยู่	51/10 หมู่ที่ 3 ต. บ้านใหม่ อ. ปากเกร็ด จ. นนทบุรี 11120
การศึกษา	ระดับ ปวส. ช่างอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคราชบุรี ระดับปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2547 -2550	ตำแหน่งวิศวกรคุณภาพในกระบวนการผลิต บริษัท DRACO PCB จำกัด
พ.ศ. 2551 -2553	ตำแหน่งวิศวกรปรับปรุงคุณภาพรถยนต์รุ่นใหม่ บริษัท ไทยยามาฮ่ามอเตอร์ จำกัด
พ.ศ. 2554 -2555	ตำแหน่งหัวหน้าหน่วยงานอบยาง บริษัท สยามมิชลิน จำกัด
พ.ศ. 2556 – ปัจจุบัน	ตำแหน่งผู้จัดการแผนกประกันคุณภาพ บริษัท ไทย-เยอรมัน สเปเชียลตี้ กลาส จำกัด

