

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง

An investigation of V-bending for High Strength Steel

คณะผู้วิจัย

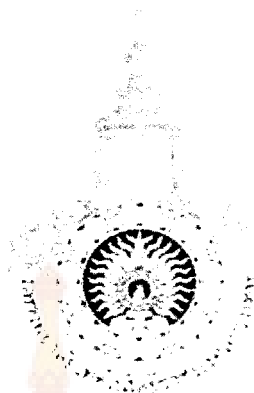
นายสุเทพ เยี่ยมชัยภูมิ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โอริส มณีสาย

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2554

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง

An investigation of V-bending for High Strength Steel

คณะผู้วิจัย

นายสุเทพ เขี่ยมชัยภูมิ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โอริส มณีสาย

โครงการวิทยุสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2554

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กิตติกรรมประกาศ

การทำงานวิจัยนี้สำเร็จด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่ได้
เื้อออำนาจสถานที่ เครื่องจักร ตลอดจนวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ ในการทดลองสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้
และขอกราบขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาที่ได้ช่วยเหลือในด้านงบประมาณ ประโยชน์อันใด
ที่เกิดจากการทำงานวิจัยครั้งนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านที่กล่าวไว้ข้างต้น ผู้วิจัยจึงใคร่
ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้



บทคัดย่อ

การดัดขึ้นรูปโลหะประเภทเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงเป็นกลุ่มเหล็กอีกกลุ่มที่ไม่มีข้อมูลการติดตัวกลับของชิ้นงานหลังดัดขึ้นรูปทำให้เกิดความยุ่งยากในการออกแบบมุมพันซ์ ดายส่งผลให้สูญเสียต่อความเสียหายและยืดเวลาในการทำงานขึ้นในองค์กรอุตสาหกรรม ดังนั้นโครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรและแรงที่ส่งผลต่อการติดตัวกลับในกระบวนการดัดขึ้นรูปวัสดุที่ใช้ในการจำลองและการทดลองเป็นวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงผ่านการดัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปตัววีด้วยรัศมีพันซ์และดายเท่ากับ 10, 12.5, 15, 17.5, 20 และ 22.5 mm ตามลำดับ โดยมีมุมพันซ์ 30, 60, 90 และ 120° ตามลำดับ ผลลัพธ์จากการวิจัยพบว่า ตัวแปรที่ส่งผลต่อแรงและการติดตัวกลับคือ รัศมีพันซ์ – ดาย มุมพันซ์ และค่าความเค้นคราก กล่าวคือ เมื่อรัศมีพันซ์ – ดาย มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การติดตัวกลับจะเพิ่มขึ้นตามในทำนองเดียวกันค่าความเค้นครากของวัสดุที่มีค่ามาก ยิ่งส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การติดตัวกลับเปลี่ยนแปลงค่ามากขึ้นและมากกว่าปัจจัยอื่น ๆ ในขณะเดียวกันมุมพันซ์ – ดายกลับ ไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การติดตัวกลับ จากผลการวิจัยทำให้ทราบว่าผลลัพธ์การจำลองกระบวนการดัดขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง

สำคัญ : กระบวนการดัดขึ้นรูปโลหะ/ แม่พิมพ์โลหะ

Abstract

The bending of high strength steel is not enough of spring back factor data after bending process. Therefore, it was difficult to design of the punch-die angles and increased of the time to making and manufacture in industrial. Therefore, this project aimed to study of the parameters and forces are effect to the spring back in bending in bending process, The material was used in this research is high strength steel forming by used the v-bending dies with punch-die radius are 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5 mm respectively and used punch angles are 30°, 60°, 90° and 120° respectively. The results was found that the parameter are effect to the force and spring back are punch-die radius, punch angle, and yield stress, as the punch-die radius increase the spring back factor was increase. In addition, the increasing of yield stress was increased the spring back factor more than the other parameters. Meanwhile, the punch-die angles are not effect to the spring back factor. The results from the finite element simulation were agreement with the experiment results.

Keyword : Bending Process/ Finite Element Method



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
รายการสัญลักษณ์	ญ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงาน	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
3. การดำเนินงานวิจัย	21
3.1 บทนำ	21
3.2 การวางแผนการวิจัย	21
3.3 สรุปการดำเนินงาน	46
4. ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย	47
4.1 ผลลัพธ์การทดสอบการตั้ง	47
4.2 การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการติดตัวกลับ	49
4.3 วิเคราะห์ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป	61
4.4 สรุป	67
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	68
5.1 สรุปผล	68

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
5.3 ประโยชน์ของการวิจัย	69
เอกสารอ้างอิง	70
ภาคผนวก ก	72
ภาคผนวก ข	81



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการติดตัวกลับ	9
3.1 การวางแผนการวิจัย	21
3.3 เนื้อหาของการวิเคราะห์	45
4.1 ผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุเหล็กทนแรงดึงสูง	47
4.2 แสดงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การติดตัวกลับจากการจำลอง	51
4.3 แสดงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การติดตัวกลับจากการทดลอง	53
4.4 แสดงการคำนวณความเค้นครากที่ส่งผลต่อการติดตัวกลับ	55
4.5 แสดงค่ารัศมีพื้นที่มุมของแม่พิมพ์หลังการตัด	57
ก.1 ผลการจำลองการตัดขึ้นรูปตัววีวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงที่ความเค้นคราก 300	73
ก.2 ผลการจำลองการตัดขึ้นรูปตัววีวัสดุเหล็กทนแรงดึงสูงที่ความเค้นคราก 350	74
ก.3 ผลการจำลองการตัดขึ้นรูปตัววีวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงที่ความเค้นคราก 400	75
ก.4 ผลการจำลองการตัดขึ้นรูปตัววีวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงที่ความเค้นคราก 450	76
ก.5 ผลการจำลองการตัดขึ้นรูปตัววีวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงที่ความเค้นคราก 500	77
ก.6 ผลการจำลองการตัดขึ้นรูปตัววีวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงที่ความเค้นคราก 550	78
ก.7 แสดงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การติดตัวกลับจากการจำลอง	79
ก.8 แสดงการคำนวณความเค้นครากที่ส่งผลต่อการติดตัวกลับ	80
ก.9 แสดงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การติดตัวกลับของมุมแม่พิมพ์	75
ข.1 แสดงข้อมูลการวัดชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูป	82
ข.2 คำนวณค่าเฉลี่ยรวมของการวัดมุมหลังการตัด	83

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงตัวอย่างการค้ำงอชิ้นงานบนแม่พิมพ์ค้ำงขึ้นรูปปีกงาน	4
2.2 ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ของการงอ	5
2.3 ลักษณะความเค้นและการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานจากการค้ำง	6
2.4 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการค้ำงตัวกลับและรัศมีการค้ำงต่อความหนาของชิ้นงานของวัสดุต่างชนิดกัน	10
2.5 การค้ำงอให้มุมมากกว่าที่ต้องการ	12
2.6 ดायรูปตัววีที่มีรอยนูน สำหรับการกดอัดกระแทก (Bottoming)	12
2.7 การยี้ดชิ้นงานก่อนค้ำงอ (Stretch bending)	13
2.8 ลักษณะเส้นโค้งของแรงค้ำงอ (Bending force curve)	14
2.9 ภาพหน้าตัดของคาน	16
2.10 ภาพหน้าตัดของโลหะแผ่น	16
2.11 ดायค้ำงอรูปตัววี	17
2.12 ดायค้ำงอรูปตัววีที่ทำเป็นเส้นนูน และดાયรูปตัววีที่ทำเส้นนูน 2 ด้าน	18
3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาค้ำงขึ้นรูปตัววี	22
3.2 มาตรฐานขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM	24
3.3 ชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงค้ำง (Specimens)	24
3.4 เครื่องทดสอบ Universal Tensile Testing Machine	25
3.5 ลักษณะลิ่มยี้ดที่ใช้ยี้ดชิ้นงานทดสอบโดยการค้ำง	26
3.6 ลักษณะการประกอบลิ่มยี้ดชิ้นงานทดสอบกับเครื่องทดสอบ	27
3.7 แสดงลักษณะของชิ้นงานทดสอบที่เริ่มทำการทดสอบ	28
3.8 แสดงชิ้นงานขณะเริ่มทำการทดสอบ	29
3.9 ชิ้นงานทดสอบเกิดคอคอด	29
3.10 ชิ้นงานทดสอบขาด	30
3.11 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทดสอบแรงค้ำงเรียบร้อยแล้ว	30
3.12 แสดงชุดแม่พิมพ์สำหรับการทดลอง 1 ชุด	32
3.13 แสดงพื้นที่และปากคายรัศมี 10 mm	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
การดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง	57
4.8 แสดงอิทธิพลของมุมพั่นซ์ 12.5 mm ที่ส่งผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับของ การดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง	58
4.9 แสดงอิทธิพลของมุมพั่นซ์ 15 mm ที่ส่งผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับของ การดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง	58
4.10 แสดงอิทธิพลของมุมพั่นซ์ 17.5 mm ที่ส่งผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับของ การดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง	59
4.11 แสดงอิทธิพลของมุมพั่นซ์ 20 mm ที่ส่งผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับของ การดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง	59
4.12 แสดงอิทธิพลของมุมพั่นซ์ 22.5 mm ที่ส่งผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับของ การดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง	60
4.13 แสดงอิทธิพลของมุมพั่นซ์ที่ส่งผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับของ การดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงที่รัศมีพั่นซ์ค่าต่าง ๆ	61
4.14 แสดงอิทธิพลของรัศมีปากคายที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป ที่มุมพั่นซ์ และคายเท่ากับ 90 องศาและความเค้นครากเท่ากับ 400 N/mm^2 จากการจำลอง	62
4.15 แสดงอิทธิพลของรัศมีปากคายที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป ที่มุมพั่นซ์ และคายเท่ากับ 90 องศาและความเค้นครากเท่ากับ 350 N/mm^2	63
4.16 แสดงอิทธิพลของรัศมีปากคายที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับ วัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง จากการทดลอง	64
4.17 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดลองอิทธิพลของรัศมีปากคาย ที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง	65
4.18 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและค่าทางทฤษฎีที่ความเค้นคราก ที่ส่งผลต่อแรง	66
ก.1 แสดงรัศมีค่าต่าง ๆ สำหรับการวิเคราะห์การจำลอง	79

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

σ	=	ความเค้นหลักสูงสุด (N/mm^2)
$\bar{\sigma}$	=	ความเค้นสมมูล (N/mm^2)



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

กระบวนการผลิตชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์ด้านต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมการบิน ผู้ผลิตต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าและประสิทธิภาพของชิ้นงานนั้นให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการกับการใช้งานและความพึงพอใจของลูกค้า ผู้ผลิตจึงจะได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคเหล่านั้น กระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมหรืออุปกรณ์เครื่องใช้ในชีวิตประจำวันของมนุษย์นั้น มีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับรูปร่างและลักษณะการใช้งานของอุปกรณ์นั้น เช่น การผลิตล้อแม็ก เนื่องจากการใช้งานและมีความซับซ้อนในรูปร่าง ผู้ผลิตจึงต้องเลือกวัสดุที่มีความแข็งแรง น้ำหนักเบาโดยการขึ้นรูปโดยการหล่อ (Casting) ใช้อลูมิเนียม (Aluminium) เป็นวัสดุในการผลิต การผลิตชิ้น ผู้ผลิตนิยมเลือกใช้วัสดุเหล็กทนแรงดึงสูง (Stainless steel) เนื่องจากมีสมบัติที่แข็งแรงและทนต่ออุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิสูงมาต่ำหรืออุณหภูมิต่ำไปสูงอย่างรวดเร็ว และทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั๊มขึ้นรูป (Pressing Process) เป็นต้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่า สมบัติของวัสดุ กรรมวิธีการผลิตและลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการวางแผนกระบวนการผลิตของผู้ผลิตให้เกิดความคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพตอบสนองความพึงพอใจของลูกค้าได้ ในปัจจุบันกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะสามารถแบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ออกเป็น 2 ประเภทคือ การขึ้นรูปแบบเฉื่อย (Cutting process) เช่น การกลึง การไส การกัด การเจียรไน เป็นต้น และการขึ้นรูปแบบไม่เฉื่อย (Forming process) เช่น การหล่อ การดัด การทุบขึ้นรูป เป็นต้น ข้อดีของกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบไม่เฉื่อยมีเหนือกว่าแบบเฉื่อย คือ หลังจากขึ้นงานผ่านการขึ้นรูปแล้วไม่มีเศษเหลือตกค้าง ซึ่งเป็นการลดค่าวัสดุที่เสียไปโดยเปล่าประโยชน์ สามารถลดค่าใช้จ่ายและขั้นตอนในการกำจัดเศษอีกด้วย กรรมวิธีนี้จึงเป็นที่นิยมในการขึ้นรูปโดยทั่วไป หนึ่งในกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบไม่เฉื่อยที่ได้รับความนิยมจากผู้ผลิตในปัจจุบันคือ การดัดขึ้นรูป (Bending) ในที่นี้จะได้กล่าวถึงการดัดขึ้นรูปตัววี (V-Bending) การดัดขึ้นรูปตัววีเป็นกรรมวิธีที่สามารถกำหนดมุมดัดของแม่พิมพ์และแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปให้ได้ชิ้นงานตามต้องการ โดยการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ผลิตชิ้นงาน แรงที่ใช้ในการดัด เพื่อให้ได้มุมที่ต้องการและไม่เกิดการเสียหายหรือแตกหักของชิ้นงานและแม่พิมพ์ การเกิดการคิดตัวกลับเนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุและขนาดของแม่พิมพ์ จึงต้องมีการศึกษาการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กทนแรงดึงสูง ในเรื่องของแรงที่ใช้ในการดัดและการเกิดการคิดตัวกลับ

ของชิ้นงานหลังจากการตัด เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบแม่พิมพ์ให้มีความเหมาะสมและสอดคล้องกับขนาดของชิ้นงานที่ผู้ออกแบบต้องการ การออกแบบแม่พิมพ์ที่ถูกต้องสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายของผู้ผลิตเอง ซึ่งการลดค่าใช้จ่ายที่สูญเปล่านั้นสามารถตอบสนองความต้องการและสร้างความพึงพอใจให้แก่ผู้ผลิต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการเกิดการติดตัวกลับของชิ้นงานดัดขึ้นรูปสำหรับวัสดุเหล็กทนแรงดึงสูง

1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรและแรงที่มีผลต่อการดัดขึ้นรูปสำหรับวัสดุเหล็กทนแรงดึงสูง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 วัสดุสำหรับการวิจัย วัสดุเหล็กทนแรงดึงสูง ตามมาตรฐาน JIS 420

1.3.2 ใช้แม่พิมพ์รูปตัววี โดยใช้รัศมีพันธุ์คายเท่ากับ 10, 12.5, 15, 17.5, 20 และ 22.5 mm

1.3.3 ใช้แม่พิมพ์รูปตัววี โดยใช้มุมพันธุ์คายเท่ากับ 30, 60, 90 และ 120 องศา

1.3.4 จำลองการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MSC. Marc 2008

1.3.5 การจำลองตั้งอยู่บนสมมติฐาน พันธุ์คาย เป็นวัสดุแข็งเกร็ง พฤติกรรมของวัสดุเป็นแบบยืดหยุ่นพลาสติก

1.3.6 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของรัศมีพันธุ์และรัศมีปากคายที่ส่งผลต่อแรงและการเกิดการติดตัวกลับจากการจำลองและการทดลอง

1.3.7 วิเคราะห์ผลของความเค้นครากและมุมพันธุ์คาย ที่ส่งผลต่อแรงและการเกิดการติดตัวกลับจากการจำลอง

1.3.8 สรุปผลการวิจัย

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

เพื่อให้วิธีการดำเนินการวิจัยเป็นไปตามขอบเขตของโครงการวิจัย จะต้องออกแบบวิธีการดำเนินการวิจัยให้สอดคล้องกับขอบเขตของโครงการวิจัยโดยได้กำหนดแผนการดำเนินงานตั้งแต่การเตรียมพร้อมสำหรับการทดลองและจำลอง การดำเนินการจำลองและทดลอง การเปรียบเทียบผลการทดลองและการทดลองจนถึงขั้นตอนสุดท้ายคือการสรุปผลการวิจัย ไว้ดังต่อไปนี้ คือ

1.4.1 ทำการศึกษาเนื้อหา ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของวัสดุและกระบวนการดัดขึ้นรูปตัววี

1.4.2 ออกแบบชิ้นงานสำหรับการทดลองและออกแบบการประยุกต์ใช้กับกระบวนการคัด
ขึ้นรูปโดยไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4.3 วางแผนการทดลอง (Experiments)

1.4.4 วางแผนการจำลอง (Simulations)

1.4.5 จัดซื้อวัสดุและอุปกรณ์เพื่อผลิตชิ้นงานทดสอบ

1.4.6 สร้างชิ้นงานทดสอบและชิ้นส่วนต่าง ๆ เพื่อทำการทดลอง (Experiments) การศึกษา
แรงที่ใช้ในการคัดขึ้นรูป การเกิดการคืบตัวกลับ (spring-back) หลังจากการคัดขึ้นรูปตัววีสำหรับ
วัสดุเหล็กทนแรงดึงสูง

1.4.7 ทำการทดลอง (Experiments) ตามแผนการทดลองที่วางแผนไว้

1.4.8 สร้างชิ้นส่วนสำหรับการจำลอง (Simulations) การทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้
โปรแกรม MSC. Marc 2008 ตามแผนการจำลองที่วางแผนไว้

1.4.9 จัดเก็บข้อมูลการทดลองและการจำลอง

1.4.10 เปรียบเทียบผลของรัศมีพ้นซ์และรัศมีปากคายที่ได้จากการทดลอง (Experiments)
และการจำลอง (Simulations) ที่ส่งผลต่อแรงและการเกิดการคืบตัวกลับของวัสดุชิ้นงานหลังการคัด
ขึ้นรูปตัววี

1.4.11 วิเคราะห์ผลของมุมพ้นซ์คายและความเค้นครากจากการจำลอง (Simulations) ที่ส่งผล
ต่อแรงและการเกิดการคืบตัวกลับของวัสดุชิ้นงานหลังการคัดขึ้นรูปตัววี

1.4.12 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ช่วยลดขั้นตอนในการออกแบบกระบวนการผลิต อันเนื่องมาจากการออกแบบแม่พิมพ์
ที่ไม่ถูกต้อง

1.5.2 ช่วยประหยัดต้นทุนในการผลิต อันเนื่องมาจากการลดผลลัพท์ของการออกแบบ
แม่พิมพ์

1.5.3 ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อแรงที่มีผลต่อการคัดขึ้นรูปสำหรับวัสดุ
เหล็กทนแรงดึงสูง

1.5.4 ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดการคืบตัวกลับของชิ้นงานคัดขึ้น
รูปสำหรับวัสดุเหล็กทนแรงดึงสูง

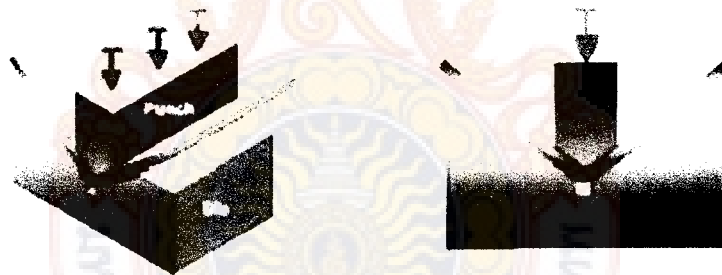
1.5.5 ใช้เป็นฐานข้อมูลประกอบการศึกษาในภาครัฐและเอกชน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การดัดขึ้นรูป (Bending) คือ การดัดตัวของโลหะรูปแบบหนึ่ง โดยส่วนมากจะงอโลหะแผ่น (Strip) หรือชิ้นงานแบน (Flat Sheet) ในการดัดขึ้นรูปโดยจะกระทำการดัดงอรอบแกนกลางซึ่งอยู่ในระนาบทิศทางตามแนวยาวของแผ่นโลหะ โลหะจะเกิดการไหลตัวอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรเนื่องจากแรงที่ใช้ในการดัดงอแผ่นโลหะทำให้เกิดความเค้นมากกว่าจุดคราก (Yield Point) ของชิ้นงานนั้นชิ้นงานจึงสามารถคงสภาพอยู่ได้แม้จะเอาแรงที่กระทำออกก็ตาม แต่ความเค้นที่เกิดขึ้นจะต้องต่ำกว่าความเค้นทางดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของชิ้นงานนั้นเพื่อป้องกันการฉีกขาด ซึ่งรูปที่ 2.1 แสดงชุดแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปซึ่งแสดงตัวอย่างการทำงานของแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปปีกงาน (ไม่ระบุขนาด)



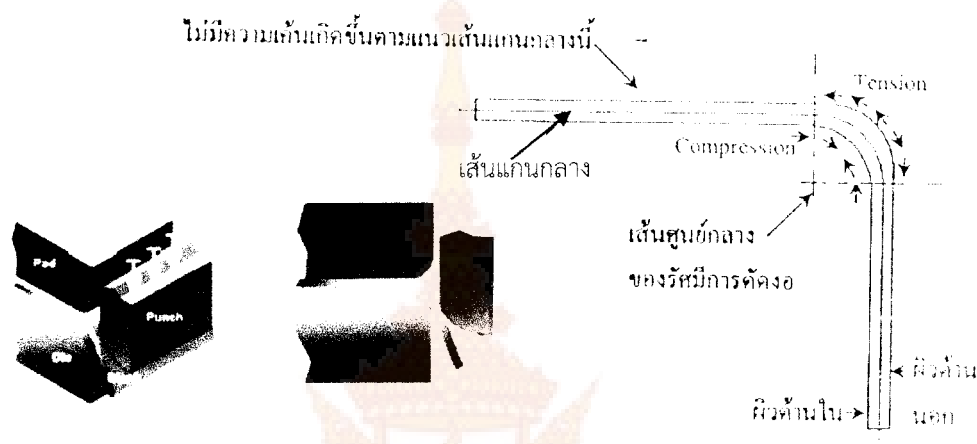
รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างการดัดงอชิ้นงานบนแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปปีกงาน

ในระหว่างการดัดงอ พื้นที่ส่วนหนึ่งของชิ้นงานจะถูกยึดด้วยแผ่นกดชิ้นงาน (Pressure Plate) ซึ่งเรียกว่า Pad พื้นที่ส่วนที่เหลือจะเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงตามรูปร่างที่ต้องการ การที่ชิ้นงานเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างของคานนี้ เรียกว่า การเหวี่ยงตัวของชิ้นงาน (Swinging)

2.1.1 เส้นแกนกลาง (Neutral Axis)

ความเค้นที่เกิดขึ้นจากการดัดงอชิ้นงานจะเป็นความเค้นของโลหะเฉพาะที่ กล่าวคือความเค้นจะเกิดขึ้นตรงบริเวณรัศมีของการดัดงอเท่านั้น โดยที่ผิวด้านในของรัศมีการดัดงอจะเกิดการอัดตัว (Compression) ส่วนที่ผิวด้านนอกจะเกิดการดึงตัว (Tension) ซึ่งจากการกระจายตัว

ของความเค้นจะเกิดความเค้นมากที่สุดบริเวณขอบด้านนอกทั้งสองข้างของความหนาชิ้นงาน แล้วค่อย ๆ ลดลงเมื่อเข้าใกล้แกนกลางของความหนาชิ้นงาน จนเกิดความเค้นเป็นศูนย์เรียกบริเวณที่ไม่มีความเค้นเกิดขึ้นนี้ว่า “เส้นแกนกลาง” (Neutral Axis) ซึ่งเป็นเส้นที่แสดงความยาวที่แท้จริงของชิ้นงาน โดยจะใช้ความยาวส่วนนี้มาหาขนาดของชิ้นงานก่อนนำมาทำการดัดงอ ดูรูปที่ 2.2

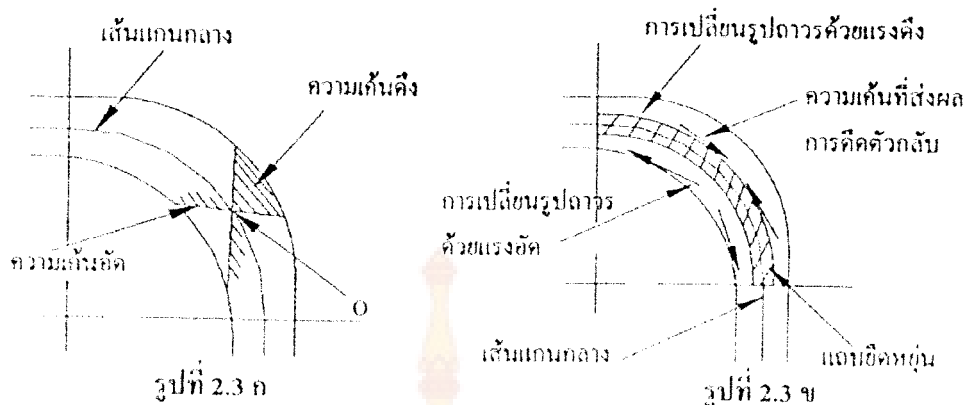


รูปที่ 2.2 ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ของการดัดงอ

ลักษณะของเส้นแกนกลางจะเป็น ไปดังต่อไปนี้

1. มีความเค้นเป็นศูนย์ (Zero Stress) และอยู่ที่จุดกึ่งกลางของความหนาของแผ่นโลหะ
2. ถ้าความหนาของแผ่นโลหะคงที่และรัศมีการดัดงอเพิ่มขึ้น เส้นแกนกลางจะเลื่อนตัวเข้าไปใกล้ด้านที่เกิดการดึงตัว (Tension Side)
3. ถ้าความหนาของแผ่นโลหะคงที่และรัศมีการดัดงอลดลง เส้นแกนกลางจะเลื่อนตัวเข้าไปใกล้ด้านที่เกิดการอัดตัว (Compression Side)

จะเห็นได้ว่าบริเวณผิวด้านในจะถูกอัดตัว ในทางกลับกันที่ผิวด้านนอกจะยืดตัวออก โดยระหว่างผิว 2 ด้านนี้จะเกิดระนาบที่ไม่มีการอัดหรือดึงตัวเกิดขึ้น เรียกว่า เส้นแกนกลาง โดยเมื่อมีการดัดงอ ความเค้นในผิวทั้งด้านนอกและด้านในจะเกิดการต้านทานกันขึ้น โดยปกติความแข็งแรงในบริเวณที่ได้รับแรงอัดจะมากกว่าบริเวณที่รับแรงดึงเค้นในผิวทั้งด้านนอกและด้านในจะเกิดการต้านทานกันขึ้น โดยปกติความแข็งแรงในบริเวณที่ได้รับแรงอัดจะมากกว่าบริเวณที่รับแรงดึง แต่ความเค้นบริเวณด้านในของชิ้นงานนั้นจะไม่ถึงจุดยืดหยุ่นจำกัด ดังนั้น บริเวณด้านในของชิ้นงานจะพยายามกลับคืนสู่สภาพเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะความเค้นและการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานจากการดัด
 (ก) แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในงานดัดขึ้นรูป
 (ข) แสดงการเปลี่ยนรูปของการดัด

สำหรับตำแหน่งของเส้นแกนกลางจะอยู่ในตำแหน่งที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน โดยคิดจากเปอร์เซ็นต์ความหนาของแผ่นชิ้นงาน ดังนี้

1. สำหรับโลหะแผ่นบางหรือวัสดุที่มีการดัดงอกว้าง เส้นแกนกลางจะอยู่ที่ตำแหน่ง 50% ของความหนาชิ้นงาน
2. สำหรับโลหะแผ่นที่มีความหนา 0.8-2.3 มิลลิเมตร เส้นแกนกลางจะอยู่ที่ตำแหน่ง 40% ของความหนาชิ้นงาน
3. สำหรับโลหะแท่งหรือโลหะหนา เส้นแกนกลางจะอยู่ที่ตำแหน่ง 35% ของความหนาชิ้นงาน

2.1.2 การไหลของโลหะในการดัดงอขึ้นรูป (Metal Flow for Bending)

เนื่องจากบริเวณการดัดงอมีความเค้น (Stress) เกิดขึ้นและทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะ โดยเมื่อความเค้นดึง (Tensile Stress) เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาของชิ้นงานบริเวณการดัดงอลดลง ส่วนความเค้นอัดจะทำให้เกิดการไหลตัวของวัสดุไปเพิ่มความกว้างของชิ้นงานในบริเวณที่เกิดการดัดงอ ซึ่งผลจากการไหลตัวเช่นนี้ทำให้เกิดการบิดงอทางพื้นที่หน้าตัดมาก แต่ในการดัดงอโลหะแผ่นจะไม่เกิดการบิดงอมากนัก และความกว้างของชิ้นงานจะไม่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความกว้างของชิ้นงานมากกว่าความหนาหลายเท่าทำให้เกิดการต้านทานการเพิ่มตัวของโลหะจากแรงอัด ทำให้ความเค้นอัดไปเพิ่มทางด้านการดึงตัว ซึ่งทำให้ความหนาของชิ้นงานเกือบจะไม่เปลี่ยนแปลง

ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความหนาของชิ้นงานโลหะแผ่นได้ดังนี้

- อัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความหนามาก จะเกิดการฉีกขาดได้ง่าย
- อัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความหนาน้อย จะเกิดรอยย่น นอกจากนี้ขนาดของการไหลตัวของโลหะจะมีความสัมพันธ์กับสิ่งต่างๆ ต่อไปนี้อีกด้วย คือ มุมของการดัดงอ (Degree of Bending)
- การดัดงอช่วงแคบ (Narrow Bend) จะทำให้การไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงดึงมีน้อย แต่การไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงอัดมีมาก และในทางกลับกันการดัดงอช่วงกว้าง (Wide Bend) จะทำให้การไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงดึงมีมาก แต่การไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงอัดมีน้อย
- โลหะแข็งจะมีการไหลตัวของโลหะทางด้านการดึงตัวมาก และทำให้เกิดการฉีกขาดได้ง่าย ส่วนโลหะอ่อนจะมีการไหลตัวของโลหะทางด้านการอัดตัวมากและจะเกิดรอยย่นได้ง่าย

2.1.3 ความเครียดในการดัดงอ (Strain in Bending)

การทำนายความเครียด (Strain) เนื่องมาจากการดัดงอเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบขั้นตอนการดัดงอและการปฏิบัติงาน เราจึงต้องผลิตชิ้นงานให้มีความเครียดอยู่ในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร แต่ความเครียดจะต้องน้อยกว่าความเครียดสูงสุด (Ultimate Tensile Stress) ซึ่งถ้าตัดชิ้นงานจนทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปเกินความเค้นสูงสุดจะทำให้วัสดุนั้นขาด และความเครียดของแต่ละวัสดุนั้นจะมีผลต่อการคืนตัวกลับ โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง $\frac{R}{t}$ เมื่อ R คือรัศมีดัดของ Punch และ t คือความหนาของแผ่นงานมาอธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในการดัดงอโลหะแผ่นได้

ค่าความเครียดได้จากความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนี้

$$\epsilon = \frac{(l_f - l_o)}{l_o} = \frac{l_f}{l_o} - 1 \quad (2.1)$$

เนื่องจากความยาวของเส้นแกนกลางมีค่าคงที่ ดังนั้นจะใช้เส้นแกนกลางในการคำนวณ โดย

$$l_o = (R + \frac{t}{2})a \quad (2.2)$$

$$l_f = (R+t)a \quad (2.3)$$

เมื่อ l_f คือ ความยาวหลังการดัดงอ
 l_0 คือ ความยาวก่อนการดัดงอ
 R คือ รัศมีการดัดงอ
 t คือ ความหนาชิ้นงาน
 a คือ มุมของการดัดงอ

ดังนั้น
$$\epsilon = \frac{[(R+t)a]}{\left[\left(R + \frac{t}{2}\right)a\right]} - 1 = \frac{1}{\left(\frac{2R}{t}\right) + 1} \quad (2.4)$$

ถ้าเส้นแกนกลางเลื่อนไป การยืดตัวที่ผิวนอกผิวในจะแตกต่างกันตามค่านี้ ความแตกต่างระหว่างการยืดตัวของผิวนอกและผิวในจะเพิ่มขึ้นถ้าหากลดลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างในการดัดงอ

2.1.4 การดัดตัวกลับ (Spring back)

หลังจากดัดงอชิ้นงานและทำการปล่อยแรง (Unload) ออกจากแผ่นงานแล้ว จะเกิดความเค้นขึ้นที่บริเวณการดัดงอ โดยความเค้นที่เกิดขึ้นจะไม่เท่ากันทุกจุด เป็นผลทำให้เกิดการดัดตัวกลับของชิ้นงาน (Spring back) โดยการดัดตัวกลับจะมีค่าน้อยแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับตัวแปรและค่ากำหนดต่าง ๆ ดังนี้

- ช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ (Clearance)
- รัศมีแม่พิมพ์ที่ใช้ดัดชิ้นงาน (Punch Radius, Die Radius)
- ความหนาของแผ่นงาน (Thickness)
- คุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties) ประกอบด้วย

E	-	Young's Modulus
σ_y	-	Yield Stress
σ_u	-	Ultimate Stress
ν	-	Poisson's Ratio

โดยได้มีการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อการดัดตัวกลับของโลหะแผ่นเดียวและผลการศึกษาได้แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการดัดตัวกลับ

ตัวแปรที่ส่งผลต่อการดัดตัวกลับ	การดัดตัวกลับ
วัสดุที่มีความแข็งแรงสูง (Higher Material Strength)	มาก
วัสดุบาง (Thinner Material)	มาก
มอดูลัสยืดหยุ่นต่ำ (Lower Young's Modulus)	มาก
ดัดวัสดุที่มุมดัดมาก ๆ (Larger Die Radius)	มาก
ใช้ช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ในการดัดมาก (Greater Wipe Steel Clearance)	มาก
ความเรียบผิวหรือแรงเสียดทาน (μ) มาก (flatter part surface)	มาก

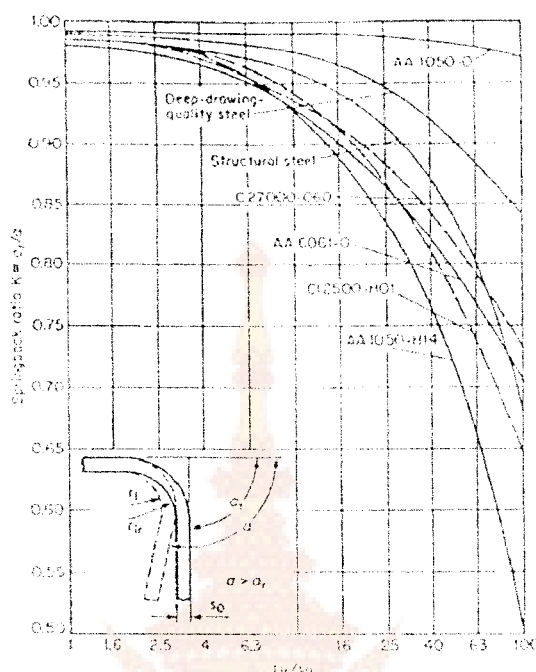
นอกจากนี้ยังสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการดัดตัวกลับในรูปของ Spring back Factor กับอัตราส่วนของรัศมีการดัดของ Punch (r_r) ต่อความหนาของแผ่นดัด (S_0) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

โดยสมการคำนวณหาอัตราส่วนการดัดตัวกลับในชิ้นงานโลหะแผ่น คือ

$$k_R = \frac{\alpha_r}{\alpha} = \frac{r_i + S_0/2}{r_{i,r} + S_0/2} \quad (2.5)$$

เมื่อ

- k_R - Springback Factor
- α_r - มุมดัดของแม่พิมพ์ (องศา)
- α - มุมดัดของชิ้นงานที่ได้หลังจากเกิดการดัดตัวกลับ (องศา)
- r_i - รัศมีการดัดที่ได้ของชิ้นงานเมื่อเกิดการดัดตัวกลับ (mm)
- $r_{i,r}$ - รัศมีการดัดของพUNCH (mm)
- S_0 - ความหนาของแผ่นเปล่า (mm)



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการดัดตัวกลับและรัศมีการดัดต่อความหนาของชิ้นงานของวัสดุต่างชนิดกัน

ในการศึกษาพฤติกรรมของการดัดตัวกลับในกรรมวิธีการดัดขึ้นรูปโลหะนั้น ค่าหรือตัวบ่งชี้ที่ใช้บอกการดัดตัวกลับในวัสดุคือ ค่าอัตราส่วนการดัดตัวกลับ ซึ่งสามารถคำนวณการดัดตัวกลับได้ตามสมการข้างบน โดยค่าอัตราส่วนการดัดตัวกลับจะเป็นค่าที่แสดงถึงความแตกต่างระหว่างมุมดัดที่ได้กับมุมดัดที่ต้องการ

นอกจากวิธีการคำนวณแล้วยังสามารถทำนายการดัดตัวกลับที่จะเกิดขึ้นได้จากการใช้รูปที่ 2.4 มาใช้เพื่อศึกษาถึงผลของการดัดตัวกลับที่จะเกิดขึ้นได้อีกด้วยเพียงแต่ว่าจากรูปที่ 2.4 จะเป็นกราฟการดัดตัวกลับของโลหะแผ่นเดียวซึ่งถึงแม้ว่าแนวโน้มการดัดตัวกลับอาจจะมีความสอดคล้องกันอยู่บ้างคือ ถ้าใช้อัตราส่วนของรัศมีการดัดต่อความหนาแผ่นเปล่า ($\frac{r_1}{S_0}$) สูง ๆ จะส่งผลให้การดัดตัวกลับเกิดขึ้นมาก

แต่ก็ยังมีข้อแตกต่างกันอยู่คือในกรณีที่ต้องการทำนายผลการดัดตัวกลับของโลหะแผ่นในของโลหะแผ่นซ้อนโดยเทียบจากการดัดตัวกลับของแผ่นเดียวที่มีความหนาแผ่นเท่ากัน โดยจากการทดสอบดัดขึ้นรูปจริงพบว่าการดัดตัวกลับของโลหะแผ่นเดียวเมื่อเทียบกับโลหะแผ่นในที่นำมาซ้อนแผ่นกัน โลหะแผ่นเดียวจะเกิดการดัดตัวกลับมากกว่าโลหะแผ่นในที่นำมาซ้อนแผ่นกันเนื่องจากเกิดความเค้นในช่วงการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก (Plastic Deformation) ต่ำกว่า ทั้งนี้เพราะโลหะแผ่นเดียวใช้แรงในการดัดต่ำกว่าโลหะแผ่นในที่นำมาซ้อนแผ่นกับโลหะแผ่นนอกซึ่ง

หนากว่า เช่น ในการตัดโลหะแผ่นซ้อนที่อัตราส่วนความหนาแน่นใน 1 มิลลิเมตรต่อแผ่นนอกหนา 2 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับการตัดโลหะแผ่นเดียวความหนา 1 มิลลิเมตร ส่งผลให้โลหะแผ่นซ้อนด้านในรับแรงจากการคดมากจึงเกิดการเปลี่ยนรูปสูงกว่าโลหะแผ่นเดียว

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการคดตัวกลับของโลหะแผ่นนอกซึ่งนำมาซ้อนแผ่นกับโลหะแผ่นเดียวพบว่าการคดตัวกลับของแผ่นโลหะแตกต่างกัน โดยโลหะแผ่นนอกซึ่งนำมาซ้อนแผ่นจะเกิดการคดตัวกลับต่ำกว่าโลหะแผ่นเดียวที่นำมาคด ทั้งนี้เพราะถึงแม้ว่าจะเพื่อรักษามัดของโลหะแผ่นเดียวโดยในกรณีที่ตัดโลหะแผ่นซ้อน (แผ่นนอก 2 มิลลิเมตร ต่อ แผ่นใน 1 มิลลิเมตร) ด้วยรัศมีการคดของพื้นที่ 6 มิลลิเมตร จะเพื่อรัศมีพื้นที่ใช้ทดสอบวัสดุโลหะแผ่นเดียวเข้าไปอีกตามความหนาของโลหะแผ่นซ้อนแผ่นใน คือ 7 มิลลิเมตรเพื่อให้มีพฤติกรรมการคดเหมือนกับการเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นนอกซึ่งนำมาซ้อนแผ่นแล้วทำการคด แต่ในระหว่างการตัดโลหะแผ่นซ้อนนอกจะถูกคดด้วยรัศมีคดที่ลดลงทั้งนี้เนื่องมาจากโลหะแผ่นในเมื่อถูกคดความหนาของแผ่นโลหะบริเวณรัศมีการคดจะลดลงจึงทำให้อัตราส่วนของรัศมีการคดต่อความหนาแน่นเปล่า ($\frac{r_i}{S_0}$) ลดต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4 จึงพบว่าการคดตัวกลับจะลดลงและมีค่าน้อยกว่าการคดตัวกลับของโลหะแผ่นเดียวซึ่งถูกคดโดยตรงจากรัศมีพื้นที่คด ดังนั้นในการทำผลการคดตัวกลับในงานคดโลหะแผ่นซ้อนของโลหะทั้งแผ่นนอกและแผ่นในสำหรับการคดขึ้นรูปงานแผ่นซ้อนต่อไป

2.1.5 การป้องกันการคดตัวกลับของโลหะ (Counteracting spring back)

การป้องกันการคดตัวกลับมีหลายวิธีขอยกตัวอย่าง 3 วิธี คือ

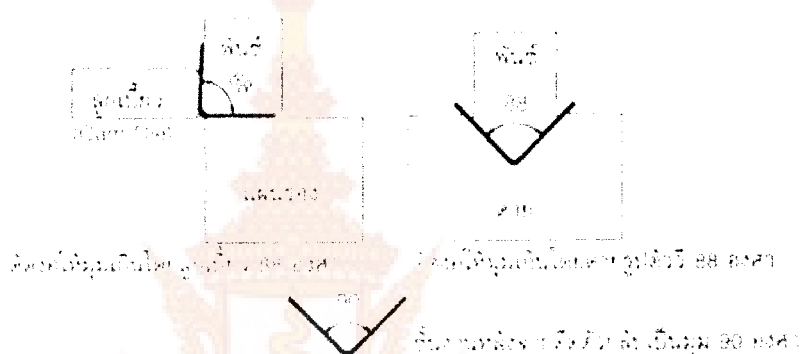
- การคดงอให้มากกว่าที่ต้องการ (Overbending)
- การกดอัดกระทก (Bottoming)
- การยืดขึ้นงานก่อนคดงอ (Stretch bending)

1. การคดงอให้มากกว่าที่ต้องการ (Over bending) เป็นการคดงอโลหะให้มูมมากกว่าที่ต้องการเมื่อพื้นที่เคลื่อนที่กลับ จะทำให้โลหะขึ้นงานคดกลับเล็กน้อยได้เท่ามูมที่ต้องการพอดี ซึ่งการคดงอมูมให้มากอาจจะทำได้โดยลูกเบี้ยว (Cam) โดยการสร้างแม่พิมพ์ให้มีมูมเล็กกว่าที่ต้องการเล็กน้อยก็ได้

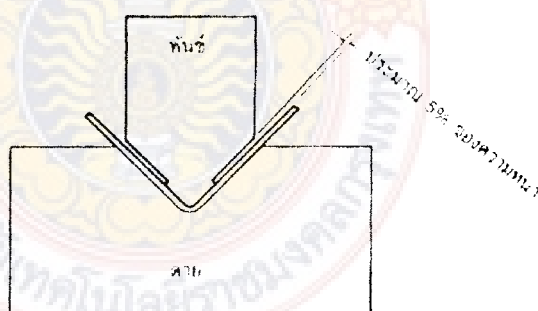
2. การกดอัดกระทก (Bottoming) เป็นวิธีการใช้พื้นที่กดอัดกระทกอย่างแรงที่บริเวณพื้นที่ของรัศมีการคดงอ ทำให้พื้นที่บริเวณนี้ได้รับความเค้นกดมากกว่าจุดครากตัว เป็นผลทำให้

โลหะบริเวณนี้เปลี่ยนรูอย่างถาวร ป้องกันมิให้เกิดการดีดตัวกลับ แต่ไม่สามารถป้องกันการดีดตัวกลับได้หมด 100% จะยังคงมีการดีดตัวกลับเหลืออยู่เหลืออยู่เล็กน้อย

สำหรับการดัดงอด้วยดายรูปตัววี (V-Die) จะทำรอยนูน (Bend) ขึ้นมาที่พื้นซ์เพื่อช่วยให้การดีดตัวกลับหมดไปในกรณีแม่พิมพ์ดัดงอที่มีแผ่นรอง (Pad) จะต้องกดอัดกระแทกให้แผ่นรองกดอัดกระแทกจนติดกับแผ่นรองหลัง (Back plate) เพื่อให้โลหะถูกอัดให้เข้ารูป ถ้าไม่มีการกดอัดกระแทกก็จะไม่มีความเค้นเกิดขึ้นโลหะที่นำมาดัดงอก็จะเกิดการดีดตัวกลับมาก



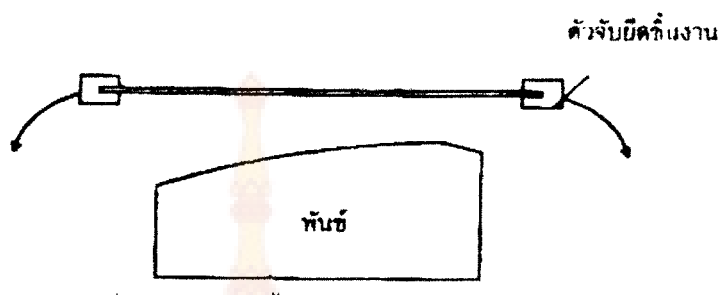
รูปที่ 2.5 การดัดงอให้มุมมากกว่าที่ต้องการ



รูปที่ 2.6 ดายรูปตัววีที่มีรอยนูน สำหรับการกดอัดกระแทก (Bottoming)

การปั๊มกดอัดกระแทกจะต้องควบคุมแรงอย่างระมัดระวัง เพราะแรงจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ถ้าไม่ระมัดระวังไล่ขึ้นงาน 2 ชั้น ซ้อนกันเข้าไปในแม่พิมพ์ก็จะทำให้แม่พิมพ์อัดติดกัน หรือแม่พิมพ์แตกเสียหาย ในการปั๊มกดอัดกระแทกพื้นที่ใหญ่จะต้องใช้เครื่องปั๊ม (Press) ที่มีกำลังอัดสูง

3. การยืดชิ้นงานก่อนดัดงอ (Stretch bending) เป็นการยืดชิ้นงานให้ชิ้นงานเกิดความเค้นจนผ่านขีดยืดหยุ่น (Elastic limit) จากนั้นใช้แรงกดชิ้นงานลงบนพื้นซ์ให้ได้ชิ้นงาน ออกมาตามรูปร่างของพื้นซ์ วิธีนี้ช่วยลดการคืนตัวกลับ (Spring back)



รูปที่ 2.7 การยืดชิ้นงานก่อนดัดงอ (Stretch bending)

เหมาะกับการขึ้นรูปชิ้นงานต้นๆ และงานที่ผลิตจำนวนน้อย (Low volume production) การขึ้นรูปวิธีนี้ไม่ควรสร้างความเค้น ให้เกิดที่โลหะแผ่นเกินค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดโลหะแผ่นเกินค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดโลหะแผ่นจะต้องมีความแข็งแรงสม่ำเสมอ (Uniform strength) ไม่มีจุดอ่อนแอเสียหายอันจะเป็นเหตุให้เกิดการร้าวขาด การขึ้นรูปวิธีนี้จะประหยัดเพราะจะใช้แต่พื้นซ์เท่านั้นไม่จำเป็นต้องสร้างคาย

2.1.6 ความแข็งแรงดึงและแรงกดอัดกระแทก (Tensile strength and Bottoming pressure)

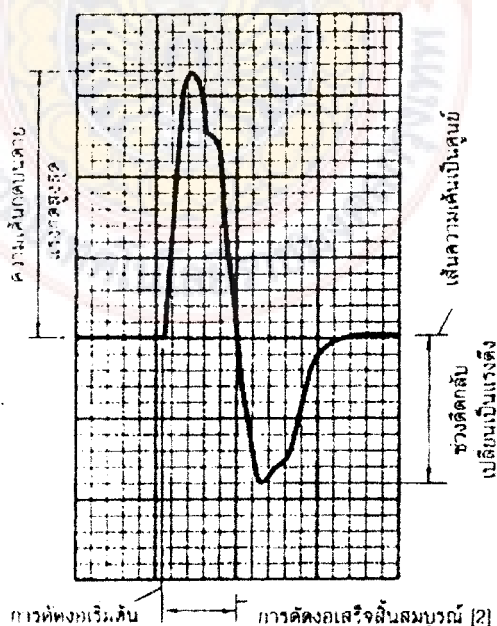
การขึ้นรูปโลหะ (Forming) จะมีความเค้นเกิดที่โลหะ 2 ชนิด คือ ความเค้นดึงและความเค้นอัดจึงมีความจำเป็นที่จะต้องรู้ความแข็งแรงดึงของโลหะชนิดต่างๆ ซึ่งตารางต่อไปนี้ จะแสดงค่าความแข็งแรงดึงของโลหะชนิดต่างๆ โดยประมาณ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการคำนวณแรงต่างๆ

2.1.7 ลักษณะเส้นโค้งของแรงดัดงอ (Characteristic bending force curve)

ในการวัดแรงที่จำเป็นในการดัดงอทำได้โดยใช้เกจวัดจากความเครียด (Strain gages) ติดตั้งเข้าไปที่คาย โดยไม่ให้แรงของแผ่นกดชิ้นงาน (Pad) เข้ามาเกี่ยวข้อง ให้เหลือแต่เพียงแรงดัดงอ (Bending force) เพียงอย่างเดียว ถ้าติดเกจโดยตรงที่พื้นซ์ เมื่อมีการวัดแรงจะรวมเอาแรงของแผ่นรองเข้าไปด้วยจึงต้องระวังให้ดี ลักษณะเส้นโค้งของแรงดัดงอแสดงในรูปที่ 10

แรงดัดจะเพิ่มขึ้นมากที่สุดทันทีที่พ้นโคภายหลังก่อพันธสัมพัทธ์โลหะแผ่น แรงนี้เปรียบเหมือนความเค้นกดที่เกิดขึ้นในคาน เมื่อพันธเคลื่อนที่ต่อไปจนผ่านคานกลับไปแสดงว่าการดัดอเสร็จสิ้นสมบูรณ์ ณ จุดนี้ความเค้นกดก็จะสลายไปโดยทันที แผ่นคาน ก็จะดีดตัวกลับ (Snap back) โดยทันทีเช่นกันจนความเค้นอัดมีค่าเป็นศูนย์แล้วเปลี่ยนเป็นความเค้นดึง การย้อนกลับของความเค้นอัดโดยทันทีทันใด ทำให้อายุการใช้งานของคานสั้นลง อันเนื่องมาจากความล้า (Fatigue) เช่นเดียวกับความเค้นที่ย้อนกลับที่ปรากฏขึ้นระหว่างแม่พิมพ์กำลังดัดโลหะและเกิดการฉีกขาดสมบูรณ์โดยทันทีทันใดการปลดชิ้นงานออกจากพันธก็เป็นการสร้างความเค้นดึงให้เกิดขึ้นที่พันธ การย้อนกลับของความเค้นจะไม่ปรากฏในแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป (Draw die) ธรรมชาติของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปการสลายตัวของความเค้นอัดจะเป็นไปอย่างช้า ๆ จึงไม่มีความเค้นอัดย้อน กลับจนเป็นความเค้นดึง เพราะฉะนั้นแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปจะมีการแตกร้าอันเนื่องมาจากความล้าน้อยกว่าแม่พิมพ์ตัด (Cutting die) และแม่พิมพ์ขึ้นรูป (Forming die)

ในแม่พิมพ์ที่มีช่องว่างมากกว่าความหนาของโลหะจะไม่มีแรงรีดโลหะ (Ironing force) รวมเข้าไปกับแรงในเส้นโค้งนี้ ด้วยการขึ้นรูปมีหลากหลายกรรมวิธี เส้นโค้งตามรูปข้างล่างของแรงนี้มีได้เป็นเส้นโค้งของแรงการขึ้นรูปทุกชนิด อันนี้เป็นเส้นโค้งแรงของการดัดงอที่ได้ทำการวัดแรง ลักษณะของเส้นโค้งแรงนี้ควรจะเป็นเส้นโค้งแรงของกรรมวิธีดังต่อไปนี้คือ การดัด การดัดแบบปีกตรง การพับ การอัด



รูปที่ 2.8 ลักษณะเส้นโค้งของแรงดัดงอ (Bending force curve)

ในรูปที่ 2.8 เส้นโค้งของแรง ไม่รวมแรงกดอัดกระแทก (Bottoming force) ไว้ด้วย ดังนั้น ควรจะต้องพิจารณาเพิ่มแรงมากขึ้น สำหรับ แรงรีดและแรงกดอัดกระแทก แต่แรงทั้งหมดเหล่านี้ มิได้เกิดขึ้น ในเวลาเดียวกัน อย่างไรก็ตามถ้าแม่พิมพ์มีการใช้แรงกดอัดกระแทก เราสามารถใช้ แรงกดอัดกระแทกเป็นตัวเลือกกำลังอัดของเครื่องปั๊มโลหะมาใช้กับแม่พิมพ์นี้ได้เลย ดังนั้น ใน การพิจารณาเลือกเครื่องปั๊มโลหะสำหรับงานดัดงอและขึ้นรูปจะต้องรวมแรงทั้งหมดของแรง เหล่านี้

- 1 แรงดัดงอ (Bending force)
- 2 แรงดันแผ่นกดขึ้นงาน (Pad force)
- 3 แรงรีดโลหะ (Ironing force)
- 4 แรงกดอัดกระแทก (Bottoming force)

2.1.8 สูตรที่ใช้คำนวณสำหรับการขึ้นรูปโลหะแผ่น

สูตรหลายสูตรได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาตัวประกอบที่เกี่ยวข้องในแม่พิมพ์ขึ้นรูป สูตรที่ใช้คำนวณประกอบด้วย

- แรงดัดงอ (Bending force)
- แรงดันแผ่นกดขึ้นงาน (Pad force)
- แรงกดอัดกระแทก (Bottoming force)
- ขนาดความยาวของแผ่นเปล่า (Blank development)

แรงดัดงอ (Bending force) การดัดโลหะแผ่น จะคล้ายกับความเค้นที่เกิดขึ้นในคาน เพราะฉะนั้นสูตรทั่ว ๆ ไปที่ใช้คำนวณเกี่ยวกับคาน จึงถูกนำมาใช้ให้เป็นประโยชน์ ในการคำนวณเกี่ยวกับงานขึ้นรูปโลหะ ความเค้นที่เกิดขึ้นในคานเกี่ยวข้องกับตัวประกอบ ดังต่อไปนี้

เมื่อ	S	ความเค้น (Stress)	kgf/mm^2
	M	โมเมนต์ดัด (Bending moment)	kgf-mm
	I	โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia)	mm^4
	c	ระยะจากจุดเซนทรอยด์ (Centroidal distance)	mm
	F_b	แรงดัดงอ (Bending force)	kgf
	L	ระยะช่องอย่าง (Span) ระหว่างจุดรองรับ	mm
	b	ความกว้างของคาน (Base of beam)	mm
	h	ความสูงของคาน (Height of beam)	mm

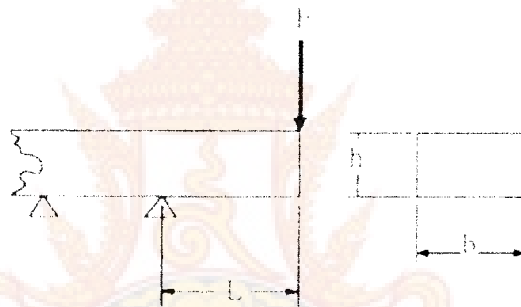
โดยที่

$$S = \frac{Mc}{I}, \quad I = \frac{bh^3}{12}, \quad c = \frac{h}{2}, \quad M = \frac{FL}{2}$$

$$S = \frac{\frac{FL}{2} \times \frac{FL}{2}}{\frac{bh^3}{12}} \quad (2.6)$$

$$F_b = \frac{12}{L} \frac{Sbh^3}{2 \times 2} \quad (2.7)$$

$$F_b = (0.333) \frac{Sbh^2}{L} \quad (2.8)$$



ภาพหน้าตัดของคาน (Cantilever Beam)

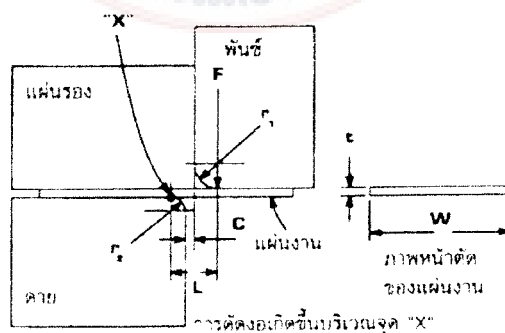
ภาพหน้าตัดของคาน

รูปที่ 2.9 ภาพหน้าตัดของคาน

จากสูตรพื้นฐานถูกแปลงเพื่อนำไปใช้งาน สำหรับการตัดโลหะแผ่น ดังนี้

$$L = r_1 + C + r_2 \quad (2.9)$$

$$F_b = (0.333) \frac{SWt^2}{L}$$



รูปที่ 2.10 ภาพหน้าตัดของโลหะแผ่น

เมื่อ	t	ความหนาของโลหะแผ่น	mm
	W	ความกว้างของโลหะแผ่นที่ต้องการดัดงอ	mm
	L	ระยะช่องว่างจากรัศมีพunch ถึงรัศมีคาย	mm
	r_1	รัศมีพunch (Punch radius)	mm
	r_2	รัศมีคาย (Die radius)	mm
	C	ระยะช่องว่างระหว่างพunch กับคาย (Die clearance)	mm
	S	ความแข็งแรงดึงของวัสดุ (Ultimate tensile strength)	kgf/mm^2

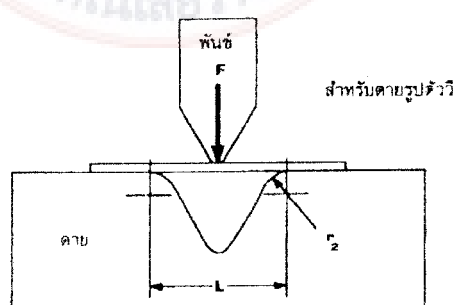
ค่าคงที่ 0.333 ถูกทำให้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.67 เพื่อชดเชย กรณีที่ระยะช่องว่าง (L) ที่มีค่าน้อยและความเค้นที่เกิดจากการทำงานเมื่อมีการเปลี่ยนรูปเป็นแบบถาวร (Plastic deformation) ดังนี้

$$F_b = (0.67) \frac{SWt^2}{L} \quad (2.10)$$

หมายเหตุ สูตรที่ผ่านมาใช้กับแม่พิมพ์แบบดัด 2 ด้าน (U-Bend) สำหรับแม่พิมพ์ที่ทำงานเป็นแบบดัดด้านเดียว (L-Bend) สูตรจะเปลี่ยนเป็น

$$F_b = (0.333) \frac{SWt^2}{L}$$

ค่าคงที่ในสูตรที่ใช้คำนวณหาแรงดัดงอสำหรับแม่พิมพ์ดัดรูปตัววี (V-Bend) จะมีค่าต่างไปคือมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าคงที่ของแม่พิมพ์ดัดรูปตัววี จะมีค่าเป็น 2 เท่า ของแม่พิมพ์แบบดัด 2 ด้าน ดังนี้



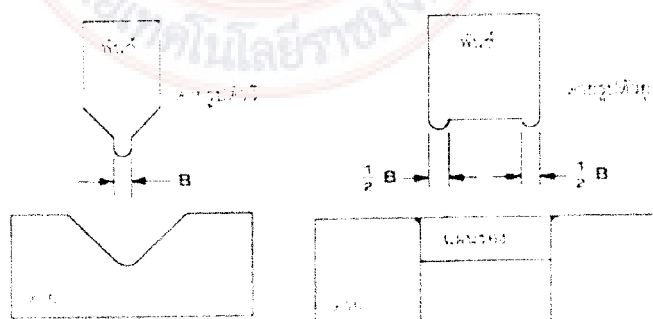
รูปที่ 2.11 คายดัดงอรูปตัววี

$$F_b = (1.33) \frac{SWt^2}{L} \quad (2.11)$$

แม่พิมพ์คักรูปตัววี จะมีระยะช่องว่าง (L) มากกว่าแม่พิมพ์แบบคัสด้านเดียวหรือแบบคัสด้าน 2 ด้าน โลหะแผ่นจะไม่ถูกรองรับตลอดทั้งความยาว แต่จะมีช่องว่างอยู่ในทุก ๆ กรณี โลหะแผ่นจะถูกรองรับที่จุดที่สัมผัสกับรัศมีคายนั่น ดังนั้น ระยะช่องว่างนี้จะวัดจากจุดศูนย์กลางรัศมีคายนึงไปยังจุดศูนย์กลางรัศมีคายนีกด้านหนึ่ง ถ้าระยะช่องว่างมีขนาดเพิ่มขึ้น แรงที่ใช้ในการคัาก็จะมีค่าลดลง การเพิ่มกำลังงัด (Leverage) ในขณะที่ทำการคัจะทำให้แรงที่ใช้ในการคัมีค่าลดลงเมื่อนำเกจวัดความเครียด (Strain gages) ซึ่งเป็นแบบตัวต้านทานทางไฟฟ้า มาติดบนแม่พิมพ์แบบคั 2 ด้าน เพื่อวัดแรงที่ทำให้เกิดการล้าตัวของวัสดุ ซึ่งก็จะได้อัตราตรงกับแรงที่ได้จากการคำนวณแรงที่ใช้ในการคัควรจะแปลงให้มีหน่วยเป็นตัน (Tons) เพื่อให้เหมาะสมกับขนาดของเครื่องปั๊มที่เลือกใช้

แรงดันแผ่นรอง (Pad force) ในการจัดยึดโลหะแผ่นในพื้นที่ที่ถัดออกไปจากบริเวณที่คั จะต้องออกแรงดันให้มีขนาดที่เหมาะสม โลหะแผ่น ที่มีความแข็งแรงความเค้นแรงดึงก็จะมีค่ามากแรงดันแผ่นรองก็ควรจะมีค่ามากด้วย ส่วนโลหะที่มีความอ่อน แรงดันแผ่นรองก็ควรจะมีค่าน้อย โลหะที่มีความหนามากก็ต้องการแรงดันแผ่นรองที่มีค่ามากสูตรที่ใช้สำหรับหาค่าแรงดันแผ่นรอง คือ

$$F_p = (0.67) SWt \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.12 คายคัคองรูปตัววีที่ทำเป็นเส้นนูน และคายรูปตัววีทำสันนูน 2 ด้าน

แผ่นเปล่าหลายชนิดที่นำมาทำการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบดัด 2 ด้าน แรงดันแผ่นรองจะมีค่าเปลี่ยนแปลงจากศูนย์ไปจนถึงจำนวนที่มีค่ามาก การวัดจะกระทำในบริเวณส่วนที่มีผิวแบนราบ ผลที่ได้คือแรงที่มีค่าต่ำสุดจะอยู่ในบริเวณที่มีผิวแบนราบ ซึ่งตรงกับผลที่ได้รับจากการคำนวณด้วยสูตร

แรงกดอัดกระแทก (Bottoming force) เพื่อให้การติดตัวกลับ (Spring back) ของวัสดุลดลงหลังจากทำการดัด โดยทำให้วัสดุบริเวณส่วนที่ต้องการดัดอยู่ภายใต้ความเค้นแรงกดที่มีค่ามาก การทำแบบนี้ถูกเรียกว่า “การกดอัดกระแทก” โดยการทำสนุนที่บริเวณส่วนล่างของพินซ์ แรงกดอัดกระแทกคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$\text{แรง} = \text{แรงดัน} \times \text{พื้นที่}$$

$$F_{bm} = S_c WB \quad (2.13)$$

เมื่อ	S_c	แรงกด หรือ Setting pressure	kg/mm^2
	W	ความกว้างของโลหะแผ่นที่ต้องการดัดงอ	mm
	B	ความกว้างของสนุน (Beads) โดยมองด้วยภาพฉาย	mm

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อภิชาติ เชื้อเมืองพาน และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการติดกลับในการดัดขึ้นรูปตัววีของโลหะแผ่นที่มีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิกโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้วัสดุ AISI 304 ขนาด 40 x 80 x 2 mm. ในแนวทิศทางทำมุม 0, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา กับแนวการรีด ที่ขนาดรัศมีพินซ์ 2, 3, 4, 5, 6, 7 8, 9 และ 10 mm การวิเคราะห์เป็นแบบความเครียดในระนาบ พฤติกรรมของวัสดุชิ้นงานเป็นแบบยืดหยุ่น-พลาสติก ไม่คำนึงถึงผลของแรงเสียดทาน จากการจำลองการดัดขึ้นรูปตัววีโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า มุมติดกลับที่ได้จากการจำลองการดัด โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าสอดคล้องกับผลการทดลองจริง ดังนั้น สามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองการดัดขึ้นรูปตัววี โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมานั้น สามารถจำลองการดัดขึ้นรูปตัววีได้ถูกต้อง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับการดัดขึ้นรูปตัววีของวัสดุอื่นๆ ได้ จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ทิศทางทำมุมกับแนวการรีดมีผลต่อการติดกลับ ซึ่งการติดกลับจะมีค่ามากที่สุด ในแนวทิศทางทำมุม 45 องศา กับแนวการรีด การติดกลับจะแปรผันกับค่าแอนไอโซทรอปิก (R-value) โดยที่ค่าแอนไอโซทรอปิกมาก การติดกลับจะมีค่ามาก และในทางตรงกันข้าม ค่าแอนไอโซทรอปิกน้อย การติดกลับจะมีค่าน้อย ในขณะเดียวกัน การติดกลับจะมีค่ามาก เมื่อรัศมีพินซ์มีขนาดใหญ่ และการติดกลับจะมีค่าน้อย เมื่อรัศมีพินซ์มีขนาดเล็ก

ภาสพิรุฬห์ ศรีสำโรง และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของช่องว่างแม่พิมพ์ที่มีผลต่อการติดกลับในการดัดงอรูปยูเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงขนาดความหนา 2 มิลลิเมตร สองเกรดคือ JIS 440 และ JIS 590 ซึ่งเป็นเกรดที่นิยมใช้ในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ในขณะนี้ โดยกำหนดค่าช่องว่างแม่พิมพ์ 3 ระยะ คือ 2, 1.9 และ 1.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ การทดลองทำการเก็บผลการติดตัวกลับของชิ้นงาน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทางในการดัดและนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์(DEFORM-2D) ผลการวิจัยพบว่าแรงที่ใช้ในการดัดจะเพิ่มขึ้นในวัสดุมีค่าความแข็งแรงสูงถึงสูงกว่า และค่าช่องว่างแม่พิมพ์น้อย วัสดุที่มีค่าความแข็งแรงสูงถึงจะเกิดการติดตัวกลับมากกว่า ในกรณีที่ใช้ค่าช่องว่างแม่พิมพ์มีขนาดน้อยกว่าความหนาของชิ้นงานสามารถลดการเกิดการติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการดัดงอได้

ชาญ ถนัดงาน และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการติดกลับของโลหะในการดัดท่อกลมเรียบโดยวิเคราะห์และออกแบบสร้างแม่พิมพ์ที่มีรัศมีการดัด 20-29 mm เพื่อทดลองหาการติดกลับของอะลูมิเนียม A1100-H14, เหล็กกล้าโครงสร้าง SS330 หนา 4.5 mm และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 หนา 2 mm พร้อมทั้งแรงดัด ผลการทดลองพบว่า สมการที่ได้จากการวิเคราะห์การติดกลับให้ผลแตกต่างจากการทดลองน้อยกว่า 3% และแรงดันแตกต่างจากการทดลองน้อยกว่า 12%

เทอดศักดิ์ อยู่ฤทธิ์ และคณะ [6] ได้ทำการศึกษา การลดการติดตัวกลับของโลหะแผ่นในการดัดแบบตัวยู เพื่อลดปัญหาการติดตัวกลับ โดยออกแบบแม่พิมพ์เป็นแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปตัวยู ซึ่งได้ใช้แม่พิมพ์แบบ Bottoming และ Corner Setting โดยแม่พิมพ์ได้ออกแบบให้กดย้ำเพื่อลดความหนาที่มุมดัดลง 5, 10, 15 และ 20% ของความหนา และออกแบบแม่พิมพ์ดัดตัวยูเพื่อศึกษาอิทธิพลของช่องว่างระหว่างพื้นซ์ด้ายที่ 0.9 และ 1 เท่าของความหนา ในการวิเคราะห์การดัดขึ้นรูปใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงพาณิชย์ DEFORM_2D ช่วยวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณมุมดัด และแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป ชิ้นงานที่ใช้ทดลองเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนเคลือบสังกะสี เกรด SECC มาตรฐาน JIS G 3142 หนา 1.2 มิลลิเมตร จากการทดลองทำให้พบว่าค่าของปริมาณการกดย้ำที่เหมาะสมที่ทำให้ไม่เกิดการติดตัวกลับของชิ้นงานดังนี้ สำหรับแม่พิมพ์แบบ Bottoming ปริมาณการลดความหนาอยู่ในช่วง 12-16% และแม่พิมพ์แบบ Corner setting ปริมาณการกดย้ำที่อยู่ในช่วง 9-12% และยังพบว่าแม่พิมพ์แบบ Corner setting มีแนวโน้มต้องการใช้แรงในการกดย้ำมากกว่าแม่พิมพ์แบบ Bottoming นอกจากนี้ช่องว่างระหว่างพื้นซ์ด้ายที่น้อยกว่าความหนาชิ้นงานที่ดัดตามแนวรีดและขวางแนวรีดให้ปริมาณการติดตัวกลับไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

ในการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อแรงในการคัดขึ้นรูปตัววี สำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง และการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการเกิดการคืบตัวกลับของชิ้นงานทดสอบหลังการคัดขึ้นรูปตัววี สำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง นั้น หลังจากที่ได้รู้ถึงคุณสมบัติในด้านต่างๆของวัสดุชิ้นงานทดสอบ วิธีการคัดขึ้นรูปตัววีและการคำนวณค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการคัดขึ้นรูปตัววี สำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง ดังได้กล่าวในบทที่ 2 แล้ว ในการดำเนินงานจะต้องวางแผนดำเนินงานสำหรับการจำลองและการทดลองให้ผลที่ได้มานั้นมีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ การศึกษาดังกล่าวนั้นมีตัวแปรที่ต้องศึกษาตามขอบเขตของการวิจัยคือ ค่ารัศมีพินซ์คาย มุมพินซ์คาย ค่ารัศมีปากคายและความเค้นคราก ตัวแปรตามคือ แรงในการคัดขึ้นรูป และมุมของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปหลังการคัดขึ้นรูปตัววี

3.2 การวางแผนการวิจัย

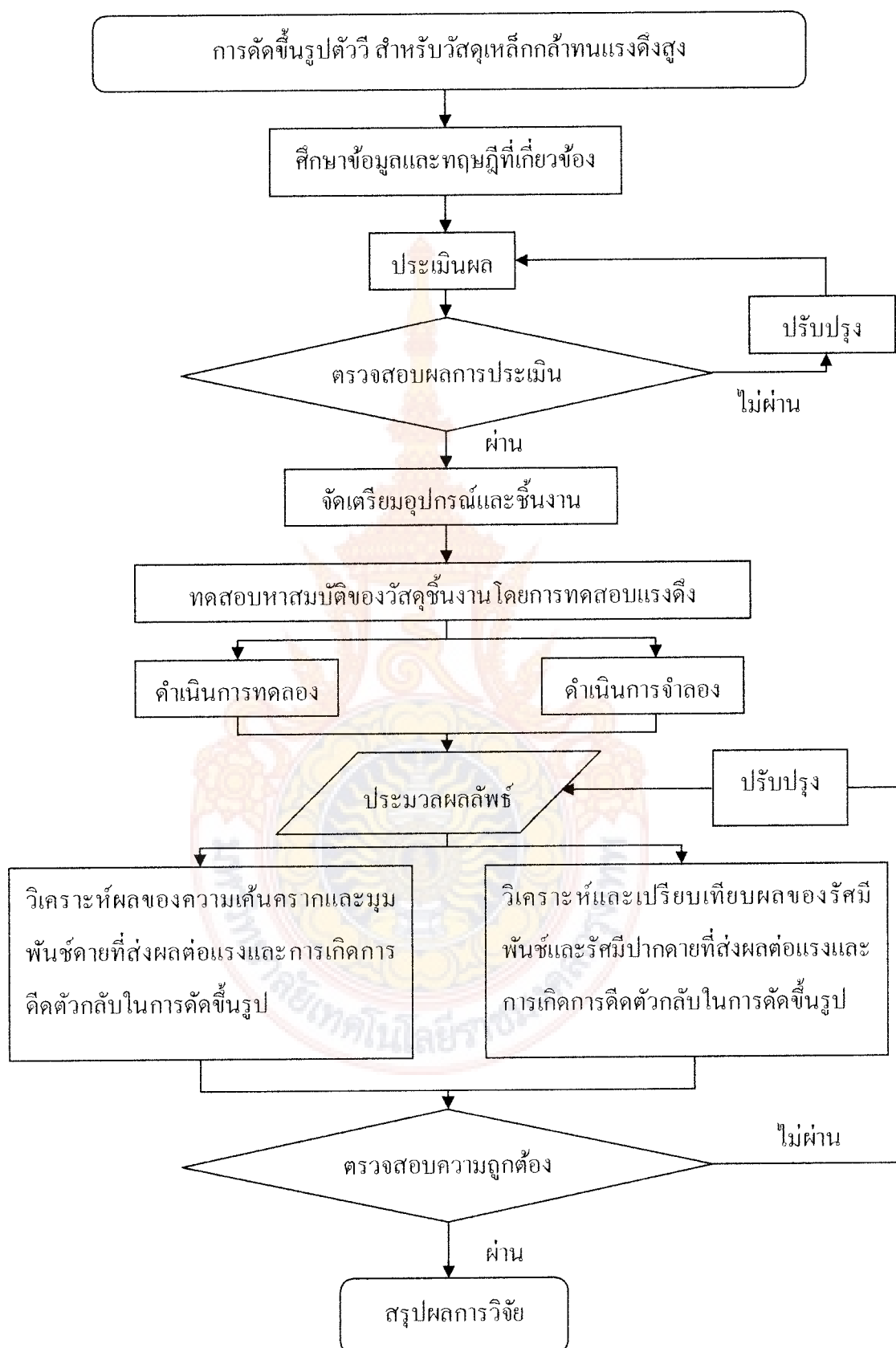
ในการศึกษาโครงการดังกล่าวนี้ต้องมีการวางแผนขั้นตอนการศึกษาไว้ล่วงหน้า โดยผู้วิจัยได้วางแผนขั้นตอนและระยะเวลาของการทำวิจัยไว้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงแผนการทำวิจัย

รายการ	เดือน								
	0-2	2-3	4-6	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12
1. ศึกษาข้อมูลการคัดขึ้นรูปวัสดุ	↔								
2. กำหนดรูปแบบการจำลองและทดลอง			↔						
3. จัดเก็บข้อมูลการทดลอง						↔			
4. วิเคราะห์ผลการวิจัย							↔		
5. ถ่ายทอดผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย									↔
6. สรุปและจัดทำรายงาน									↔

หมายเหตุ : ↔ แผนการดำเนินงานวิจัยที่กำหนด

แผนการดำเนินงานปัจจุบัน



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาดัดขึ้นรูปตัววี

3.2.1 การศึกษาปัญหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาปัญหาและทฤษฎีที่สำคัญเกี่ยวกับการดัดขึ้นรูปตัววี สำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง คือ คุณสมบัติเชิงกล ของเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของเหล็กทำเครื่องมือและมีการนำมาใช้ในกระบวนการดัดขึ้นรูปในกรณีพิเศษซึ่งจัดเป็นกระบวนการขึ้นรูปเย็นแบบไม่เสียเศษ โดยผู้วิจัยได้รวบรวมไว้ในบทที่ 2 ซึ่งผู้ที่ทำการวิจัยเรื่องเหล่านี้จะต้องศึกษาเนื้อหาดังกล่าวให้มีความเข้าใจก่อน จึงจะนำมาซึ่งการได้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือเป็นขั้นตอนมีระเบียบแบบแผนและมีทฤษฎีอ้างอิงไว้ หากข้อมูลที่ได้มามีความคลาดเคลื่อนหรือไม่สอดคล้องกับทฤษฎีอาจเกิดมาจากความชำนาญหรือประสบการณ์ของผู้ทดลองเอง การไม่ใส่ใจในรายละเอียดของการทดลองหรือความไม่พร้อมของวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นต้น

3.2.2 การออกแบบการจำลองและการทดลอง

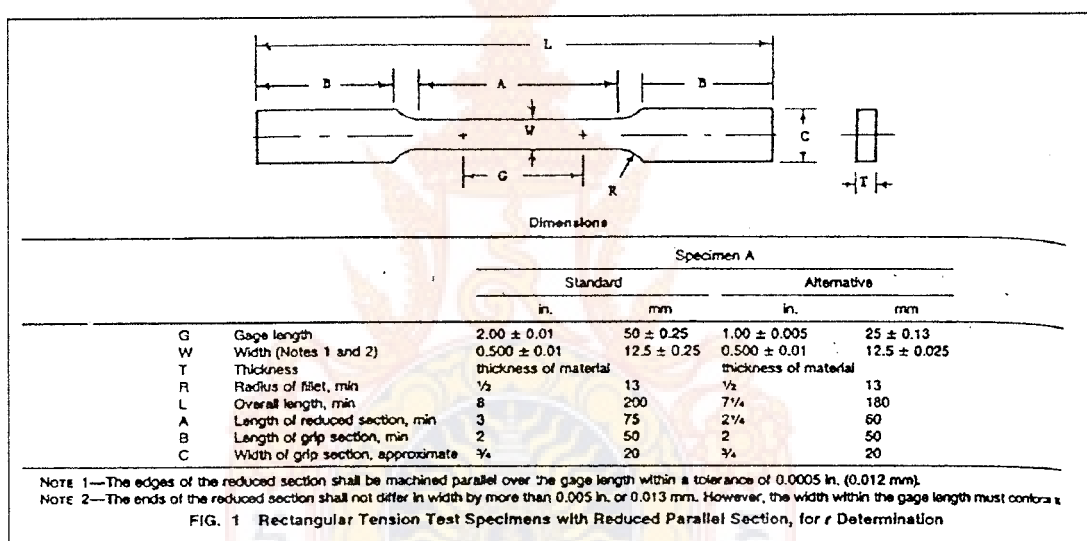
สมบัติเชิงกลของวัสดุต่างชนิดกันย่อมมีความแตกต่างกันในกระบวนการดัดขึ้นรูปตัววี ดังนั้นผู้ออกแบบต้องทราบถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุนั้นก่อน เพื่อให้การออกแบบนั้นสอดคล้องกับการใช้งานจริงและสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สมบัตินี้กล่าวเช่น ความแข็งแรง (Strength) ความเหนียว (Ductility) ความแข็ง (Hardness) และความแข็งดิ่ง (Stiffness) หรือความสามารถในการคงรูป เป็นต้น การได้มาซึ่งคุณสมบัติทางกลเหล่านั้นทำได้โดยการทดสอบด้วยอุปกรณ์ที่สามารถจำลองสภาวะให้ใกล้เคียงกับสภาพการรับแรงกระทำในระหว่างการใช้งานจริง แทนการลองผิดลองถูกที่อาจส่งผลเสียอย่างมาก เช่น งบประมาณค่าใช้จ่ายในการสร้างและการออกแบบที่ผิดพลาด เป็นต้น ปัจจัยที่ต้องพิจารณาได้แก่ ลักษณะของแรงกระทำนั้น ระยะเวลาและสภาพแวดล้อมในการทดสอบต้องใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากที่สุด

3.2.2.1 การทดสอบแรงดึง

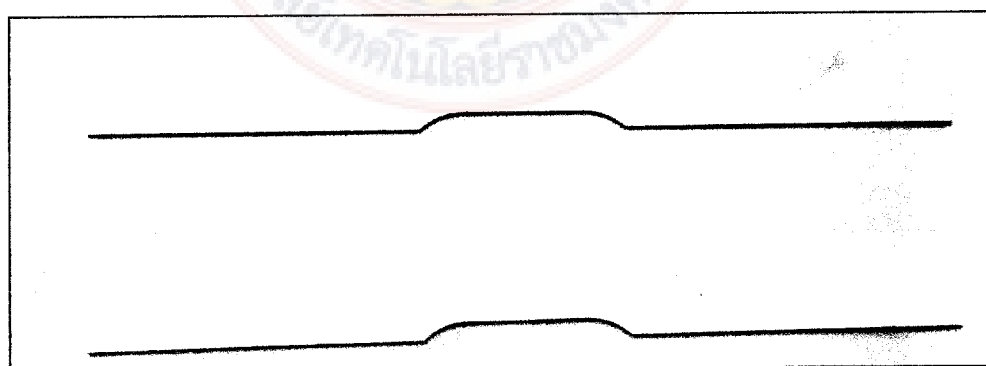
การศึกษาพฤติกรรมทางกลของวัสดุนั้นจากการทดสอบความเค้น-ความเครียดแบบง่าย ๆ ซึ่งมักเป็นวิธีที่ใช้กับการทดสอบโลหะที่อุณหภูมิห้อง โดยทั่วไป มีรูปแบบที่แรงกระทำจะกระทำบนวัสดุได้ 3 รูปแบบ คือ แรงดึง แรงอัดหรือแรงกดและแรงเฉือน รูปแบบการทดสอบความเค้น-ความเครียดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายแบบหนึ่ง คือการทดสอบแบบใช้แรงดึง ซึ่งสามารถหาค่าสมบัติเชิงกลได้หลายค่า ในการทดสอบครั้งนี้ชิ้นงานทดสอบจะถูกดึง (โดยปกติจะดึงจนขาด) ตามแนวยาวของชิ้นงาน โดยแรงดึงมีลักษณะเป็นแรงดึงตามแนวแกนเพียงแนวเดียว โดยปกติแล้วภาคตัดที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นวงกลมหรือหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม สำหรับในการทดสอบแรงดึงในการหาค่าสมบัติเชิงกลเพื่อใช้ในการศึกษากระบวนการดัดขึ้นรูปตัววีนี้ ใช้ขนาดมาตรฐานชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM แสดงดังรูปที่ 3.2 ชิ้นงานทดสอบจะถูกจับยึดปลายทั้งสองข้างด้วย

หัวจับภายในเครื่องทดสอบ โดยเครื่องทดสอบแรงดึงได้ถูกออกแบบมาให้สามารถดึงชิ้นงานด้วยความเร็วในการดึงคงที่พร้อมวัดขนาดของแรงกระทำ (โหลดเซลล์) และการยืดตัวที่เกิดขึ้น (ด้วยอุปกรณ์วัดระยะยืด Extensometer) การทดสอบหาค่าความเค้น-ความเครียด มักใช้เวลาไม่ก่นาที และเป็นการทดสอบแบบทำลาย นั่นคือชิ้นงานทดสอบถูกดึงจนเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรและขาดจากกันที่สุดในที่สุด

ผลลัพธ์ของการทดสอบแรงดึง ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (Load) กับระยะยืด (Elongation) จะถูกบันทึกบนแผ่นชาร์ตหรือในคอมพิวเตอร์ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะยืดนี้จะมีค่ามากขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.2 มาตรฐานขนาดชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM



รูปที่ 3.3 ชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดึง (Specimens)

1) ชิ้นทดสอบ

จากรูปที่ 3.2 แสดงขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) และรูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง สำหรับเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาการดัดขึ้นรูปตัววี ซึ่งเป็นวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง ขนาดความหนา 2 มิลลิเมตร กว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร

2) การเตรียมการทดสอบแรงดึง

ในปฏิบัติการทดสอบแข็งแรงของวัสดุ ส่วนมากจะเป็นเครื่องทดสอบชนิดที่ถูกออกแบบให้สามารถทดสอบได้หลายอย่างภายในเครื่องเดียวกัน โดยใช้การทดสอบการดึง การอัด การเฉือน และการดัดโค้ง เครื่องดังกล่าวนี้จะเรียกว่า Universal Testing Machine (UTM) ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบ Universal Tensile Testing Machine

ระบบการทำงานของเครื่องทดสอบเป็นแบบอัตโนมัติสมบูรณ์ในตัว สามารถควบคุมได้ทั้ง Manual และ Computer โดยการปรับเปลี่ยนระบบการทำงานได้ตามความต้องการ กรณีการควบคุมแบบ Manual สามารถทำให้ผู้ที่เริ่มต้นศึกษามีความรู้และเข้าใจพื้นฐานสามารถจดจำค่าต่างๆที่ได้จากการทดลองเพื่อนำไปคำนวณและวิเคราะห์ผลด้วยตนเอง ส่วนกรณีที่ควบคุมด้วย Computer สามารถทำงานและวิเคราะห์ผลได้โดยอัตโนมัติเพื่อให้ผู้ใช้ซึ่งมีความรู้พื้นฐานการทดสอบวัสดุมาแล้วเป็นอย่างดีได้วิเคราะห์ผลเร็วขึ้น

เครื่องทดสอบวัสดุนี้ใช้ระบบไฮดรอลิกโดยอาศัยแรงทดสอบจากการอัดของน้ำมันไฮดรอลิกไปยังกระบอกสูบ สามารถควบคุมขนาดแรงทดสอบได้ถูกต้อง รวดเร็วและง่าย ไม่เกิดเสียงดังและการสั่นสะเทือนขณะทำการทดสอบ ปัจจุบันเครื่องทดสอบนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นมามาก คือ ใช้ระบบการควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาช่วยทำให้ผลการตรวจสอบมีความถูกต้องมากขึ้น

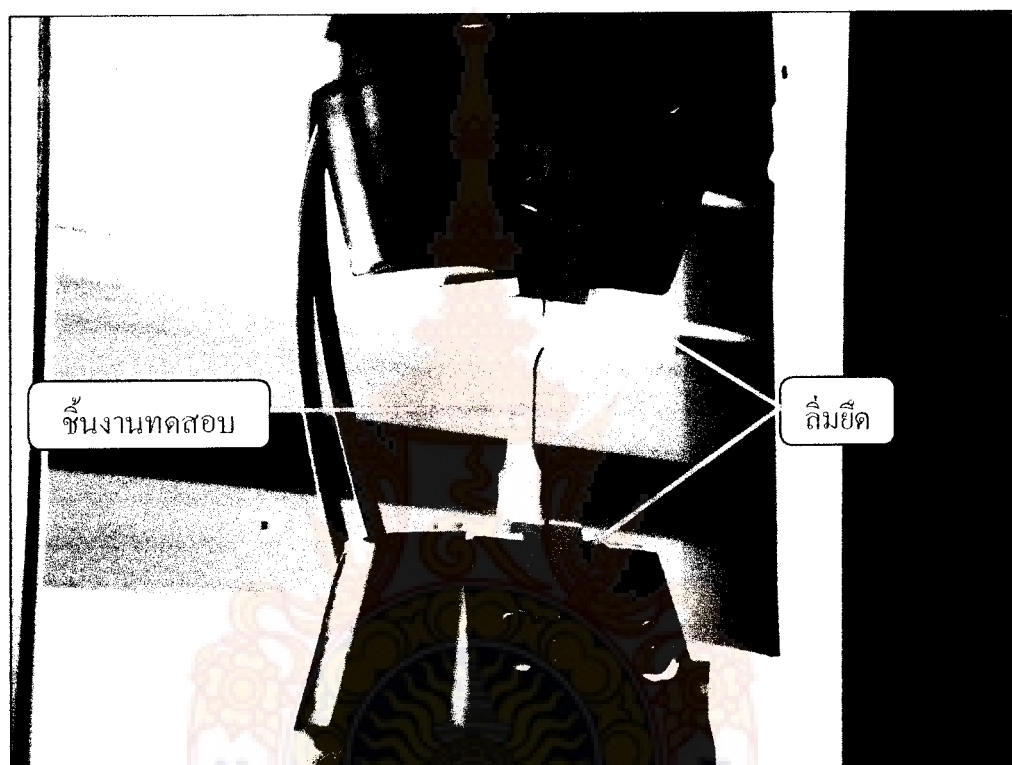
4) ลักษณะการยึดชิ้นงานทดสอบ

การยึดชิ้นงานทดสอบโดยการดึงนั้น จะต้องยึดด้วยวิธีที่เหมาะสมว่าจะใช้อุปกรณ์ใดยึดชิ้นงานทดสอบและวิธีไหนจึงสะดวก ข้อสำคัญในการยึดชิ้นงานทดสอบ ก็คือต้องพยายามอย่างดีที่สุดที่จะให้แรงทดสอบกระทำอยู่ในแนวแกนของชิ้นงานทดสอบและจะต้องมีความแน่ใจด้วยว่าอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานทดสอบมีความแข็งแรงเพียงพอต่อแรงกระทำจนชิ้นทดสอบขาด สำหรับวิธียึดชิ้นงานทดสอบมีอยู่หลายวิธี เช่น ใช้ลิ่มยึด เกลียวยึด บ่อยึด โดยแต่ละวิธีการยึดนั้นจะต้องไม่เกิดการบิดแกว่ง หรือเกิดการคดโค้งขณะทำการทดสอบ



รูปที่ 3.5 ลักษณะลิ่มยึดที่ใช้ยึดชิ้นงานทดสอบโดยการดึง

จากรูปที่ 3.5 ลิ่มยึดชิ้นงานทดสอบ ใช้ในการจับยึดชิ้นงานทดสอบของการทดสอบแรงดึง ครั้งนี้ เพราะลักษณะของชิ้นงานทดสอบเป็นแผ่น มีหน้าสัมผัสที่สามารถยึดชิ้นงานทดสอบได้เต็ม หน้าและด้วยตัวผิวสัมผัสของลิ่ม ได้ผ่านการพิมพ์ลายส่งผลให้การจับยึดนั้นมีความมั่นคงและ ถูกต้องตามหลักการทดสอบแรงดึงที่ได้กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 3.6 ลักษณะการประกอบลิ่มยึดชิ้นงานทดสอบกับเครื่องทดสอบ

การประกอบอุปกรณ์ทดสอบโดยการดึงและปรับเครื่องทดสอบ UTM ที่ใช้สำหรับการทดสอบ โดยนำชิ้นงานทดสอบที่เตรียมไว้เข้ายึดโดยใช้ลิ่มยึดตามรูปที่ 3.6 ขณะยึดควรจะยึดปลาย ชิ้นทดสอบด้านบนก่อน จึงค่อย ๆ ยกชิ้นงานทดสอบให้เคลื่อนที่ขึ้น แล้วจึงนำลิ่มยึดประกบยึด ปลายชิ้นทดสอบด้านล่าง การทำเช่นนี้จะทำให้ยึดได้แน่นป้องกันการลื่นขณะดึง เพราะการจับยึด ชิ้นงานทดสอบด้วยลิ่มยึดนั้นอาศัยเพียงความฝืดระหว่างผิวของลิ่มที่ขึ้นสายกับผิวชิ้นงานทดสอบ เท่านั้น

5) วิธีการทดสอบ

หลักการทดสอบโดยการดึงทั่วไปนั้น ต้องใช้แรงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ดึงชิ้นงาน ทดสอบให้เกิดความเครียดยืดออกและขาดในที่สุด การยึดชิ้นงานทดสอบต้องพยายามอย่างดีที่สุด

ที่จะให้แรงที่กระทำอยู่ในแนวแกนขึ้นทดสอบ ขณะทดสอบต้องสังเกตและบันทึกแรงดึงสูงสุด ชิ้นงานเริ่มต้นเกิดคอคอดและแรงดึงที่ชิ้นงานทดสอบขาดเพราะบางครั้ง ถ้าทดสอบโลหะที่แข็งแรงนั้นจะมีการยืดออกมากแล้วจึงขาด ซึ่งจะทำให้แรงดึงที่จุดขาดมีค่าน้อยกว่าแรงดึงสูงสุด

ในขณะที่ทำการทดสอบโดยการดึงกับเครื่องทดสอบที่มีการทำงานแบบอัตโนมัติก็จะสะดวกต่อการบันทึกข้อมูลได้ถูกต้อง แต่ถ้าทำการทดสอบกับเครื่องมือแบบง่าย ๆ ธรรมดา จะต้องใช้ข้อสังเกตหลายอย่าง เช่น ความเร็วในการทดสอบความเค้น ความเครียด ค่าความยืด การลดลงของพื้นที่หน้าตัด ความแข็งแรงดึงสูงสุดและรอยแตกหักหรือขาดของชิ้นงานทดสอบ เป็นต้น



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของชิ้นงานทดสอบที่เริ่มทำการทดสอบ

จากรูปที่ 3.7 ชิ้นงานทดสอบถูกจับยึดบนเครื่องทดสอบแรงดึงอย่างถูกต้องตามหลักการทดสอบแรงดึง โดยหัวจับด้านบนจะอยู่กับที่ ส่วนหัวจับด้านล่างจะเป็นตัวเคลื่อนที่ในแนวแกน -Y ดึงจนกว่าชิ้นงานทดสอบขาด



รูปที่ 3.8 แสดงชิ้นงานขณะเริ่มทำการทดสอบ

จากรูปที่ 3.8 เมื่อออกแรงดึงชิ้นงานทดสอบ ชิ้นงานทดสอบจะถูกแรงมากระทำจึงเกิดการต้านแรงนั้นที่มากหรือน้อย หรือเรียกว่า ความเค้น วัสดุจะยืดออกตามแรงที่มากระทำ ช่วงนี้คือช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) เมื่อเอาแรงออกชิ้นงานทดสอบจะกลับคืนสู่สภาพเดิม



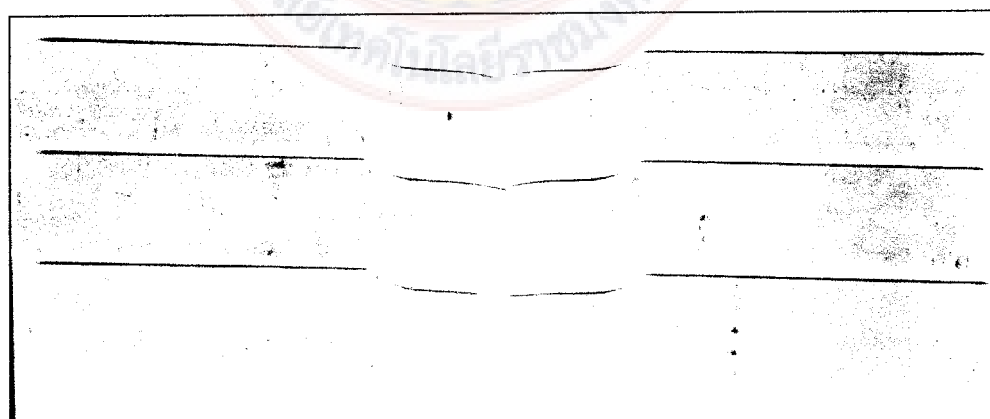
รูปที่ 3.9 ชิ้นงานทดสอบเกิดคอคอด

จากรูปที่ 3.9 ช่วงนี้ชิ้นงานทดสอบเกิดการคอด (Necking) เมื่อเอาแรงออกชิ้นงานทดสอบที่เกิดคอดคอดนั้นไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างกลับคืนสู่สภาพเดิมได้หรือเรียกการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation)



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานทดสอบขาด

จากรูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบแรงดึง ดึงชิ้นงานทดสอบไม่สามารถต้านแรงที่มากกระทำได้จึงเกิดความเสียหายหรือขาดและเป็นการสิ้นสุดการทดสอบแรงดึง ระบบคอมพิวเตอร์ของเครื่องทดสอบจะบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ไว้ เราสามารถดึงเอาข้อมูลต่าง ๆ เหล่านั้นไปทำการวิเคราะห์หาผลของการทดสอบแรงดึงเพื่อหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุต่อไป



รูปที่ 3.11 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทดสอบแรงดึงเรียบร้อยแล้ว

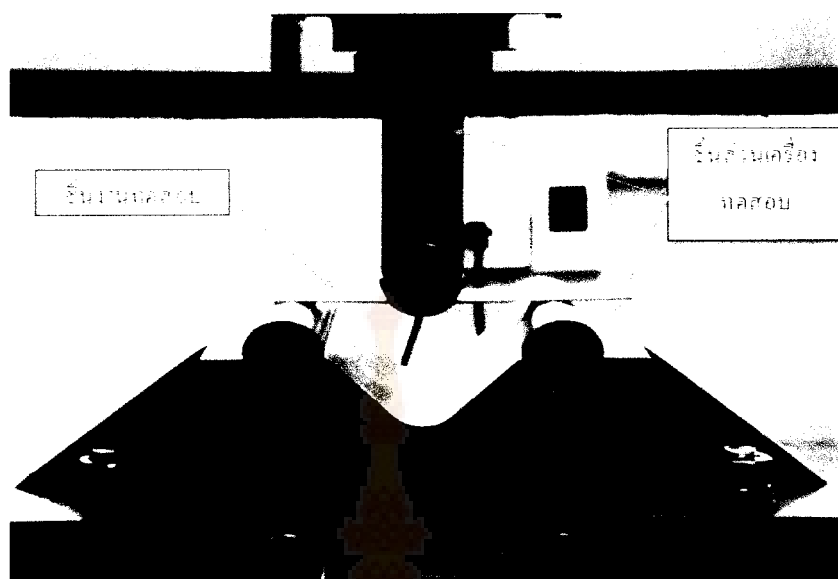
หลังจากการทดสอบแรงดึงของวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงเสร็จเรียบร้อยแล้วแสดงดังรูปที่ 3.10 จะต้องบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ไว้เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์หาคุณสมบัติของวัสดุชิ้นงานต่อไป โดยจุดประสงค์ของการทดสอบโดยการดึง ก็เพื่อต้องการทราบผลการทดสอบซึ่งแสดงคุณสมบัติของวัสดุ แต่ในบางครั้งผลทดสอบที่ได้อาจจะเปลี่ยนแปลงไป ทั้ง ๆ ที่วัสดุนั้นมีคุณภาพหรือมีเนื้อเดียวสม่ำเสมอจนตลอดทั้งชิ้นงานทดสอบ การเป็นเช่นนั้นก็อาจมีสาเหตุมาจากผลกระทบอื่น ๆ เช่น เปลี่ยนแปลงขนาดรูปร่างชิ้นงานทดสอบ หรือเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการทดสอบ หรืออุณหภูมิที่ขณะทำการทดสอบ เป็นต้น

2. เครื่องทดสอบการดัดขึ้นรูป

เครื่องที่ใช้ในการทดลองการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงนี้ใช้เครื่องทดสอบ Universal Tensile Testing Machine ซึ่งเป็นเครื่องตัวเดียวกันกับเครื่องที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง โดยเป็นเครื่องมือทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ สามารถทดสอบวัสดุได้หลายวิธี เช่น การดึง การกดและอื่นๆ ในเครื่องเดียวกัน โดยสามารถใช้ทดสอบกับวัสดุได้หลากหลายชนิด ระบบการทำงานเป็นแบบอัตโนมัติสมบูรณ์ในตัว สามารถควบคุมได้ทั้ง Manual และ Computer โดยการปรับเปลี่ยนระบบการทำงานได้ตามความต้องการ กรณีการควบคุมแบบ Manual สามารถทำให้ผู้ที่เริ่มต้นศึกษามีความรู้และเข้าใจพื้นฐานสามารถจดค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองเพื่อนำไปคำนวณและวิเคราะห์ผลด้วยตนเอง ส่วนกรณีที่ควบคุมด้วย Computer สามารถทำงานและวิเคราะห์ผลได้โดยอัตโนมัติเพื่อให้ผู้ใช้ซึ่งมีความรู้พื้นฐานการทดสอบวัสดุมาแล้วเป็นอย่างดีได้วิเคราะห์ผลเร็วขึ้น

3.2.3.3 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง

ในชุดแม่พิมพ์สำหรับการทดลองที่ได้ออกแบบให้ตรงกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง คือ หาตัวแปรที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปและตัวแปรที่ส่งผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับของการดัดขึ้นรูปตัววี สำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงซึ่งใน 1 ชุดแม่พิมพ์สำหรับการทดลองจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงดังรูป



รูปที่ 3.12 แสดงชุดแม่พิมพ์สำหรับการทดสอบ 1 ชุด

จากรูปที่ 3.12 ชุดแม่พิมพ์สำหรับการทดสอบ ประกอบด้วย พันช์ คายและปากคายนทั้งสองข้างอุปกรณ์ทั้ง 3 ชิ้นนี้ สามารถถอดเปลี่ยนได้สะดวกและรวดเร็ว ซึ่งในการทดสอบการคั่นนี้จะต้องเปลี่ยนชุดแม่พิมพ์ทั้งหมดคือ คาร์ซีมีพันช์คายนและคาร์ซีมีที่ปากคายนเท่ากับ 10, 12.5, 15, 17.5, 20 และ 22.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ อุปกรณ์พันช์และคายนที่ต้องเปลี่ยนทั้งหมดนั้น แสดงไว้ดังรูปที่ 3.13-3.17



รูปที่ 3.13 แสดงพันช์และปากคายน 10 mm

จากรูปที่ 3.13 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์สำหรับการทดลอง ประกอบด้วย พันช์ 1 ชิ้น ขนาดรัศมีเท่ากับ 10 มิลลิเมตรและปากคาย 2 ชิ้น ขนาดรัศมีเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีขนาดเล็กที่สุดสำหรับการทดลองนี้



รูปที่ 3.14 แสดงพินซ์และปากคายรัศมี 12.5 mm

จากรูปที่ 3.14 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์สำหรับการทดลอง ประกอบด้วย พันช์ 1 ชิ้น ขนาดรัศมีเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตรและปากคาย 2 ชิ้น ขนาดรัศมีเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นหนึ่งในตัวแปรสำหรับการทดลองนี้



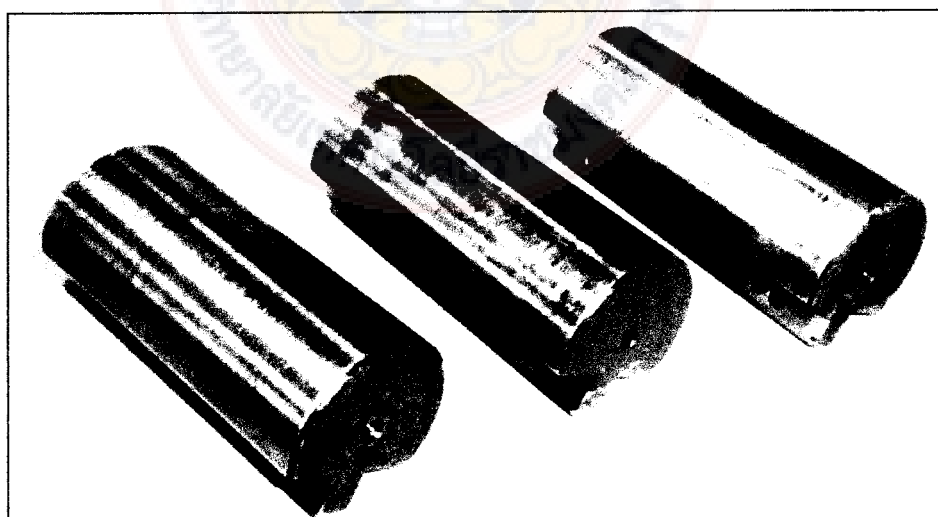
รูปที่ 3.15 แสดงพินซ์และปากคายรัศมี 15 mm

จากรูปที่ 3.15 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์สำหรับการทดลอง ประกอบด้วย พันช์ 1 ชิ้น ขนาดรัศมีเท่ากับ 15 มิลลิเมตรและปากคาย 2 ชิ้น ขนาดรัศมีเท่ากับ 15 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นหนึ่งในตัวแปรสำหรับการทดลองนี้



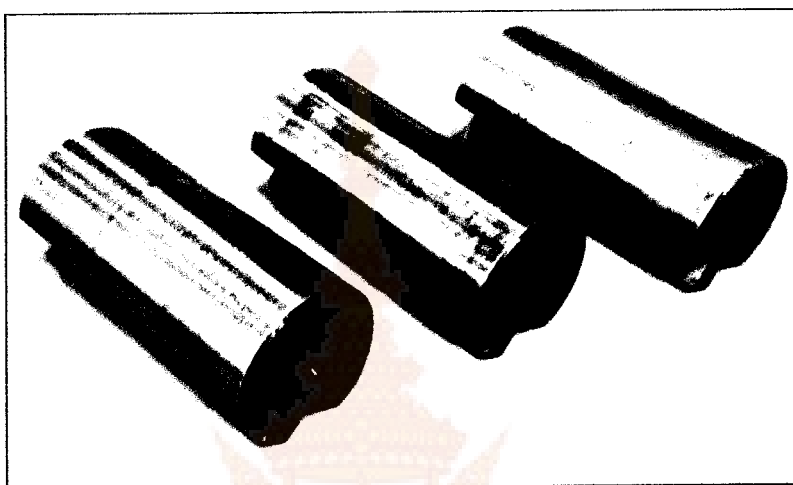
รูปที่ 3.16 แสดงพินซ์และปากคายรัศมี 17 mm

จากรูปที่ 3.16 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์สำหรับการทดลอง ประกอบด้วย พันช์ 1 ชิ้น ขนาดรัศมีเท่ากับ 17.5 มิลลิเมตรและปากคาย 2 ชิ้น ขนาดรัศมีเท่ากับ 17.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นหนึ่งในตัวแปรสำหรับการทดลองนี้



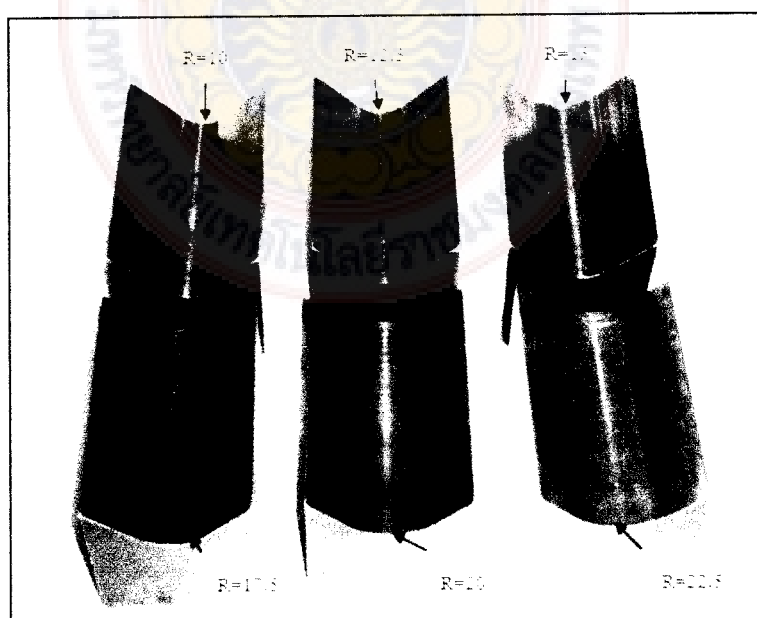
รูปที่ 3.17 แสดงพินซ์และปากคายรัศมี 20 mm

จากรูปที่ 3.17 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์สำหรับการทดลอง ประกอบด้วย พันช์ 1 ชิ้น ขนาดรัศมีเท่ากับ 20 มิลลิเมตรและปากคายน 2 ชิ้น ขนาดรัศมีเท่ากับ 20 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นหนึ่งในตัวแปรสำหรับการทดลองนี้



รูปที่ 3.18 แสดงพันช์และปากคายนรัศมี 22.5 mm

จากรูปที่ 3.18 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์สำหรับการทดลอง ประกอบด้วย พันช์ 1 ชิ้น ขนาดรัศมีเท่ากับ 22.5 มิลลิเมตรและปากคายน 2 ชิ้น ขนาดรัศมีเท่ากับ 22.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีขนาดใหญ่ที่สุดสำหรับการทดลองนี้



รูปที่ 3.19 แสดงชิ้นส่วนแม่พิมพ์ คายน มุม 90 องศา

คายที่ใช้ในการทดลองจะมีรัศมีคายทั้งหมด 6 ค่า เช่นเดียวกัน คือ 10, 12.5, 15, 17.5, 20 และ 22.5 มิลลิเมตร ทั้งหมดนี้จะถูกประกอบเข้ากับอุปกรณ์ของเครื่องทดสอบ Universal Tensile Testing Machine ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้ในการทดสอบการดัดขึ้นรูปตัววินั่นเอง



รูปที่ 3.20 แสดงชิ้นส่วนของชุดแม่พิมพ์รูปตัววินี่ที่พร้อมสำหรับการทดสอบ

ชิ้นส่วนของชุดแม่พิมพ์ทั้งหมดนี้จะถูกประกอบเข้ากับเครื่องทดสอบ Universal Tensile Testing Machine ในเครื่องทดสอบนี้มีชิ้นส่วนที่เป็นมาตรฐานไว้สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่จะนำมาประกอบเข้ากับเครื่องทดสอบนั้นสามารถเปลี่ยนชุดแม่พิมพ์ได้ โดยไม่ต้องเปลี่ยนชุดทดสอบที่เครื่อง ทำให้การติดตั้งชุดแม่พิมพ์นั้นเป็นไปได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง

วิธีการประกอบชุดแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องทดสอบ ก่อนการติดตั้งต้องตรวจสอบให้แน่ใจก่อนว่าไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าเครื่องทดสอบเพื่อความปลอดภัยของผู้ติดตั้งเอง อันเนื่องมาจากชุดแม่พิมพ์ที่จะนำมาประกอบนั้นได้ถูกออกแบบมาให้สวมเข้ากับชุดมาตรฐานของเครื่องทดสอบพอดีแล้วใช้อุปกรณ์จับยึดของเครื่อง เช่น นัท สกรูหัวจมทกเหลี่ยม สกรูหัวจมเทเปอร์ เป็นต้น ยึดให้ครบทุกตำแหน่งและตรวจสอบความถูกต้องก่อนการทดสอบอีกครั้ง ดังรูปที่ 3.20

4. วิธีการทดลอง

หลังจากการเตรียมวัสดุอุปกรณ์และชุดแม่พิมพ์ที่พร้อมสำหรับการทดสอบการดัดขึ้นรูปตัววินี่ สำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงบนเครื่องทดสอบ Universal Tensile Testing

Machine ระบบไฮดรอลิก การทำงานของระบบนี้ อาศัยแรงทดสอบจากการอัดของน้ำมันไฮดรอลิก ไปยังกระบอกสูบ โดยที่น้ำมันจะถูกบีบด้วยมอเตอร์ปั๊ม เครื่องทดสอบนี้สามารถควบคุมแรงทดสอบได้อย่างถูกต้อง รวดเร็วและสะดวก ไม่เกิดเสียงดังและการสั่นสะเทือนขณะทำการทดสอบ การทดสอบนี้จะเริ่มจากการนำชิ้นงานวางบนคานแล้วปล่อยแรงกดผ่านคันคัน คันคันจะค้ำชิ้นงานลงมาประกบกับคานพอดีและคานจะเป็นตัวควบคุมรูปร่างหลังจากการค้ำ ตำแหน่งการวางชิ้นงานบนคานก่อนเริ่มทำการทดลองสำหรับการค้ำชิ้นรูปร่างนั้น จะต้องวางชิ้นงานให้อยู่บริเวณกึ่งกลางของความยาวคานพอดีและต้องมาร์คตำแหน่งการวางในการทดลองชิ้นงานชิ้นแรกนี้ไว้ เพื่อให้ตำแหน่งการวางชิ้นงานทดลองในครั้งต่อไป จะต้องวางให้ตรงกับตำแหน่งแรกทุกชิ้นงานการทดลองเพราะ ตำแหน่งการวางของชิ้นงานที่แตกต่างกันอาจส่งผลให้ผลที่ได้จากการทดลองนี้ผิดพลาดได้ จากนั้นปล่อยแรงให้คันคันค้ำชิ้นงานลงมาแตะที่คาน โดยมีปากคานเป็นตัวรองรับในขั้นแรกของการค้ำ หลังจากนั้นคานจะเป็นตัวควบคุมมุมของชิ้นงานทดลอง

เมื่อคันคันค้ำชิ้นงานลงมาแตะที่คันคัน โดยความเร็วในการเคลื่อนที่สม่ำเสมอตลอดการทดลอง ในระหว่างการทดลองควรสังเกตการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานและการเปลี่ยนแปลงของแรงที่แสดงออกมาทางหน้าจอแสดงผลของคอมพิวเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อกันของเครื่องทดสอบนี้ ระบบคอมพิวเตอร์จะบันทึกข้อมูลของการทดสอบนี้ไว้ในหน่วยความจำซึ่งผู้ทดสอบสามารถนำข้อมูลเหล่านั้นมาศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดลองนี้ได้ด้วยความแม่นยำและถูกต้อง



รูปที่ 3.21 แสดงชิ้นงานและแม่พิมพ์ที่พร้อมสำหรับการทดลอง

จากรูปที่ 3.22 ชิ้นงานทดสอบถูกวางลงตรงตำแหน่งที่ถูกต้องบนชุดแม่พิมพ์ที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้วสำหรับการเริ่มทดสอบการดัดขึ้นรูป



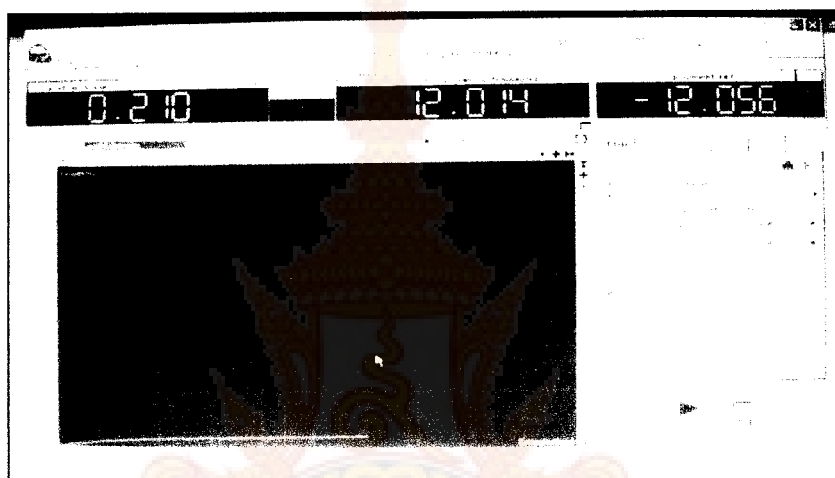
รูปที่ 3.22 การทดลองการดัดขึ้นรูปตัววี

จากรูปที่ 3.22 เริ่มทำการทดลองโดยให้แรงกดจากเครื่อง Universal Tensile Testing ผ่านแผ่น โดยให้แผ่นเคลื่อนที่ลงในแกน -Y มากที่สุดชิ้นงานทดสอบ จากนั้นวัสดุทดสอบเริ่มถูกดัดลงโดยปากคดทั้ง 2 ข้างเป็นตัวควบคุมรูปร่างของชิ้นงานทดสอบในขั้นต้น ในช่วงนี้ชิ้นงานยังไม่แตะกับแผ่น จึงยังไม่สามารถควบคุมมุมของชิ้นงานได้และระบบคอมพิวเตอร์ของเครื่องทดสอบเริ่มเก็บข้อมูลต่างๆของการทดลองนี้ตั้งแต่เริ่มการให้แรงในการดัดขึ้นงาน



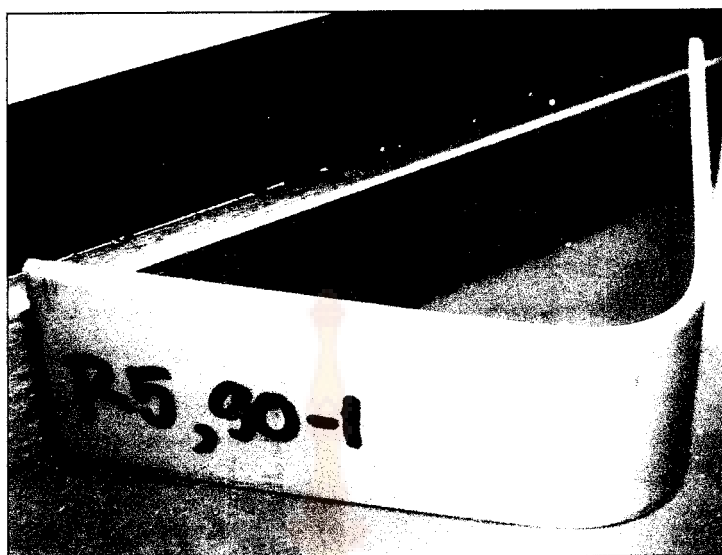
รูปที่ 3.23 การทดลองการดัดขึ้นรูป

จากรูปที่ 3.23 พันซ์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากันมาแตะกับคายพอดีและจะต้องหยุดการให้แรงด้วยระบบ Manual และยกพันธ์ออกจากคาย จากนั้นคอมพิวเตอร์จะบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ในรูปของกราฟและจะต้องทำการทดลองชิ้นงานทุกชิ้นให้ครบตามเงื่อนไขการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ ตั้งแต่เริ่มต้นของการัดจนถึงค่า Maximum Load โดยในระหว่างการทดลองนั้นหน้าจอคอมพิวเตอร์จะแสดงผลออกมา (รูปที่ 3.24) จากนั้นจะได้ข้อมูลต่างๆที่เครื่องบันทึกไว้ในรูปแบบของไฟล์



รูปที่ 3.24 หน้าจอแสดงผลระหว่างการทดสอบการัดขึ้นรูป

ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลของระบบคอมพิวเตอร์ในเครื่องทดสอบ Universal Tensile Testing จะถูกนำไปวิเคราะห์แรงที่ใช้ในการัดขึ้นรูป ส่วนชิ้นงานที่ได้หลังจากการัดขึ้นรูป (รูปที่ 3.25) จะต้องนำไปวัดมุมเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การดัดตัวกลับของวัสดุต่อไป



รูปที่ 3.25 ตัวอย่างชิ้นงานที่ทดสอบการดัดขึ้นรูปตัววีเสร็จแล้ว

5.วิธีการวัดงานของชิ้นงานทดสอบ

วิธีการวัดมุมของชิ้นงานทดสอบหลังการดัดเพื่อให้ได้ค่าการวัดที่มีความน่าเชื่อถือ ต้องใช้เครื่องมือวัดมุมตัวเดียวกันในการวัดมุมทั้งหมดของชิ้นงานทดสอบ อันเนื่องมาจากเครื่องมือวัดมุมที่ไม่ใช่ตัวเดียวกันอาจมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย เนื่องจากความถี่ของการใช้งานหรืออายุการใช้งานนั่นเอง การวัดมุมของชิ้นงานหลังการดัดขึ้นรูปตัววีมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

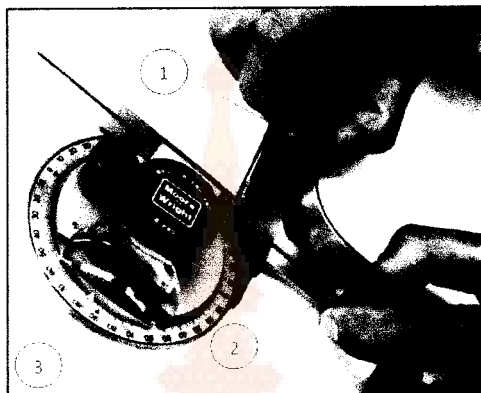
- อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดมุม



รูปที่ 3.26 360° Bevel Dial Protector

360° Bevel Dial Protector เป็นเครื่องมือวัดมุมที่ผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความแข็งแรงสูง สามารถวัดมุมได้ 360 องศา มีความแม่นยำในการวัดสูง มีแผ่นขยายช่วยให้อ่านค่ามุมได้อย่างถูกต้องและเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวาง

- วิธีการวัดมุม



รูปที่ 3.27 วิธีการวัดมุมชิ้นงานด้วย 360° Bevel Dial Protector

จากรูปที่ 3.27 แสดงวิธีการวัดมุมชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูปตัววี ในการวัดนั้น จะต้องปรับใบวัดมุมให้แนบสนิทกับชิ้นงานทั้ง 2 ตำแหน่ง คือตำแหน่งที่ 1 และ 2 ซึ่งข้อดีของเครื่องมือวัดมุมชนิดนี้ได้ออกแบบมาให้อ่านค่ามุมได้ตั้งแต่ 0-360 องศา แขนของใบวัดมุมทั้งสองนี้สามารถปรับตำแหน่งเลื่อนให้มุมเปลี่ยนไปได้จาก 0-360 องศาอยู่แล้ว หากชิ้นงานกับแขนของใบวัดมุมไม่แนบสนิทกัน จะทำให้การอ่านค่ามุมมีความผิดพลาดได้

- วิธีการอ่านค่ามุม

จากรูปที่ 3.27 ในตำแหน่งที่ 3 นั้นแสดงหน้าปัดที่มีแผ่นขยายสำหรับให้อ่านค่ามุมจากหน้าปัดได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของใบวัดมุมสามารถใช้วัดมุมได้ทั้งสองด้านดังภาพที่ 3.27, 3.28 โดยองศาที่อ่านได้จากขีดสเกลบอกองศาที่แตกต่างกัน คือ ภาพที่ 3.27 การใช้ใบวัดมุม วัดมุมของชิ้นงานซึ่งอยู่ทางขวาของแขนวัดมุม ค่าวัดมุมองศาของชิ้นงานมีค่าเท่ากับค่าวัดองศาที่อ่านได้



รูปที่ 3.28 การวัดมุมด้านขวา

การใช้ใบวัดมุม วัดมุมของชิ้นงานซึ่งอยู่ทางซ้ายมือของแขนวัดมุมค่าวัดองศาของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 180° – ค่าวัดองศาที่อ่านได้ วิธีการวางชิ้นงานดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.29 การวัดมุมด้านซ้าย

นอกจากเครื่องมือและความชำนาญของผู้วัดเองแล้ว วิธีการวัดยังส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนเช่นเดียวกัน ซึ่งผู้ทำการวัดเองสามารถหลีกเลี่ยงได้ โดยสิ่งที่ผู้วัดต้องพึงระวังและสังเกตในการวัดมุมชิ้นงานทดสอบมีดังต่อไปนี้ คือ

- แนวเส้นของสายตาคงต้องอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง
- ปลายเข็มชี้จุดสเกลจะต้องแหลมพอ
- ชีตสเกลบอกองศาจะต้องชัดเจน
- ชิ้นงานจะต้องลบคมให้เรียบร้อย
- ควรยึดหรือวางชิ้นงานให้มั่นคงขณะวัด
- ขณะใช้ใบวัดมุมวัดมุมชิ้นงานจะต้องกดใบบอกองศาและแขนวัดมุม ให้แนบสนิทกับผิวงานจริง ๆ

การทดสอบการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงทั้งหมดตามเงื่อนไขการทดลองแล้ว เนื่องจากการศึกษาการเกิดการดัดตัวกลับ (Spring Back) จึงต้องนำชิ้นงานทั้งหมดนี้ไปวัดมุมที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่ามุมของคาน เมื่อได้ค่ามุมที่เปลี่ยนไปแล้วนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การเกิดการดัดตัวกลับ ตามทฤษฎีในบทที่ 2 แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปจะถูกบันทึกไว้ในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์แล้ว สามารถนำข้อมูลเหล่านั้นไปใช้ในการวิเคราะห์แรงต่อไป

3.2.2.3 การจำลองกระบวนการดัดขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งในกระบวนการดัดขึ้นรูปโลหะแผ่น เช่น โลหะแผ่นเกิดการดัดตัวกลับ หลังจากการคลายแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปออกจากชิ้นงานแล้ว ทำให้รูปทรงของชิ้นงานเปลี่ยนไปและไม่ได้ลักษณะรูปทรงตามต้องการ ในปัจจุบันการแก้ปัญหาดังกล่าว ควรจะหาเทคโนโลยีที่เหมาะสม เช่น ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาใช้ในการวิเคราะห์หาความเหมาะสมในการขึ้นรูปและสามารถนำไปออกแบบแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูป เพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ตลอดจนนำไปประยุกต์ใช้กับลักษณะงานอื่นๆ ที่ใกล้เคียงกัน และยังสามารถทำนายปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้นในกระบวนการดัดขึ้นรูปได้อย่างรวดเร็วและดีพอที่จะได้ทราบถึงสิ่งที่จะเกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูปตลอดกระบวนการดัดขึ้นรูปได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำเอาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการศึกษาแรงและพฤติกรรมของการเกิดการดัดตัวกลับในการดัดขึ้นรูปตัววี สำหรับเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง

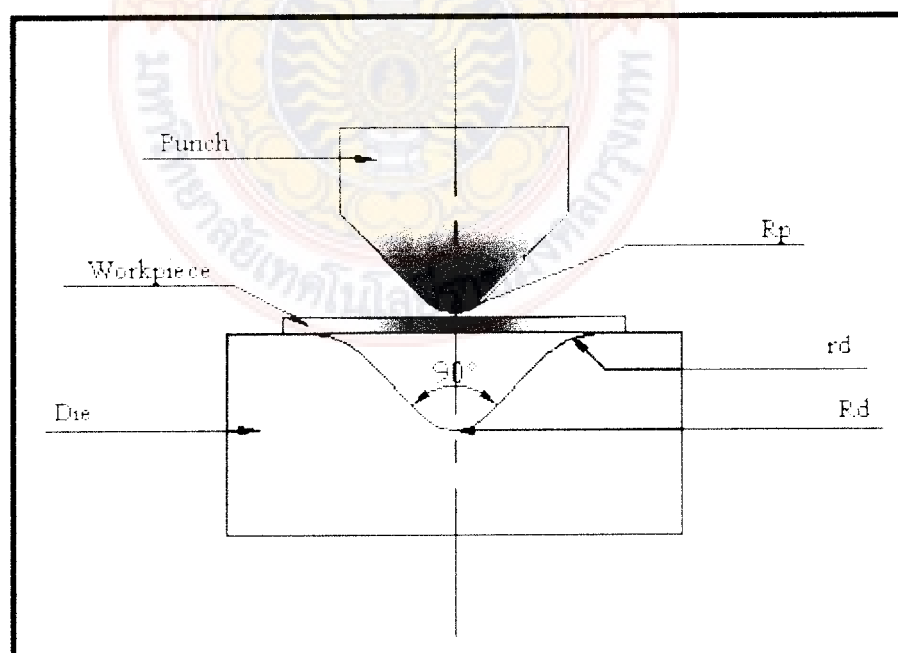
1. โปรแกรมสำเร็จรูปช่วยวิเคราะห์ด้านไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์กรรมวิธีการดัดขึ้นรูปตัวด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยซอฟต์แวร์สำเร็จรูปที่มีชื่อเรียกว่า Marc เวอร์ชัน 2008 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้วิเคราะห์งาน 2 มิติ สาเหตุของการเลือกใช้โปรแกรม Marc เข้ามาใช้ในการศึกษานี้เนื่องจากโปรแกรมดังกล่าวมีข้อดีคือ มีฟังก์ชันที่เรียกว่า Automatic Adaptive Remeshing ซึ่งจะทำให้การสร้างเอลิเมนต์ขึ้นมาใหม่โดยอัตโนมัติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปมาก (Large Deformation) จึงทำให้สามารถวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปที่มีการเปลี่ยนรูปร่างมาก ๆ เช่นการตีขึ้นรูป (Forging) และการตัดเฉือน (Blanking and Shearing) ได้โดยมีความคลาดเคลื่อนน้อย หลังจากการจำลองเราสามารถวัดขนาดชิ้นงานที่ต้องการได้โดยไม่ต้องอาศัยกระบวนการวัดจากกระบวนการอื่น

2. เงื่อนไขในการวิเคราะห์

แบบการวิเคราะห์เป็นแบบ Plane Strain แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Analysis Model) แสดงในภาพที่ 3.30 และเงื่อนไขในการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.3

การวิเคราะห์จะกำหนดให้เครื่องมือ ซึ่งประกอบด้วย พันช์-ดาย เป็น Rigid Body คือสมมติให้มีการเปลี่ยนรูปในขณะที่ทำการเปลี่ยนรูปเมื่อจำลองการทำงานและชิ้นงานถูกกำหนดให้เป็น Elasto-Plastic



รูปที่ 3.30 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

สมบัติทางกลของชิ้นงานและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริง (Flow Curve) หาได้จากการทดสอบการดึง โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงของ Power Law แสดงพฤติกรรมของวัสดุที่ใช้ทดลอง เนื่องจากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายพฤติกรรมของวัสดุเหนียวจากจุดครากตัวจนถึงภาระแรงสูงสุดได้เหมาะสม

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขของการวิเคราะห์

สมบัติทางกลของชิ้นงาน	เหล็กกล้าทนแรงดึงสูง ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 738 N/mm ²
ความเค้นสมมูล(Flow Curve)	$\bar{\sigma} = 651\varepsilon^{0.375}$
เส้นผ่าศูนย์กลางคาน	30 mm
เส้นผ่าศูนย์กลางพันธ	30 mm
ช่องว่างระหว่างพันธกับคาน	60 mm
รัศมีที่ปลายพันธ	10,12.5,15,17.5,20 และ 22.5 mm
รัศมีที่ปลายคาน	10,12.5,15,17.5,20 และ 22.5 mm
ชนิดของการวิเคราะห์	Plane Strain
สัมประสิทธิ์ความเสียหาย	0.1

โปรแกรม Mach สามารถวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุได้ แต่ต้องกำหนดเกณฑ์ความเสียหาย (Fracture criterion) ที่เหมาะสม เกณฑ์ของความเสียหายที่เลือกใช้งานโครงการนี้คือ Normalized Cockcroft & Latham เนื่องจากสามารถทำนายความเสียหายของวัสดุในกระบวนการดัดขึ้นรูปตัววีได้อย่างแม่นยำ สามารถแสดงให้เห็นในรูปของสมการข้างล่างนี้

$$c = \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon} \quad \dots(3.1)$$

เมื่อ σ = ค่าความเค้นหลักสูงสุด(Maximum Principle Stress)

$\bar{\sigma}$ = ค่าความเค้นสมมูล (Equivalent Stress)

$\bar{\varepsilon}$ = ความเครียดสมมูล

$\bar{\varepsilon}_f$ = ความเครียดสมมูลขณะเกิดความเสียหาย

โดยที่ค่าที่ได้จากการอินทิเกรตตามสมการที่ 3.1 มากกว่าค่าวิกฤต C ซึ่งเป็นค่าคงที่เฉพาะของวัสดุ แสดงว่าจะเกิดความเสียหายกับวัสดุชิ้นงานขึ้น การกำหนดค่า C สามารถทำได้สองวิธี คือ เปรียบเทียบตำแหน่งที่เริ่มเกิดความเสียหาย (Crack Initiation) ของชิ้นงานในกระบวนการตัดจริง กับตำแหน่งที่เกิดขึ้นในการจำลองการทำงานและอีกวิธี คือ การทำการทดสอบแรงดึงหรือการอัดวัสดุแล้วจึงคำนวณหาค่า C จาก สมการที่ 3.1

ในการศึกษานี้หาค่า C โดยวิธีการเปรียบเทียบตำแหน่งที่เริ่มเกิดความเสียหายของชิ้นงานในกระบวนการตัดจริงกับตำแหน่งที่เกิดขึ้นในการจำลองการทำงานดังรูปที่ 3.30 จากการศึกษาครั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบผลจากการทดลองและการจำลองการทำงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่แล้ว โดยเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เริ่มเกิดความเสียหายเร็วที่สุด สำหรับเหล็กที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีค่า $C=0.662$

3.3 สรุปการดำเนินงาน

การศึกษาคัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง นี้ เพื่อให้ได้ผลออกมาตรงกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย ผู้ทำการศึกษาได้ออกแบบขั้นตอนการศึกษาไว้ โดยเริ่มจากการศึกษาเนื้อหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เมื่อเข้าใจทฤษฎีแล้วจึงเริ่มทำการออกแบบการจำลองและการทดลอง ก่อนการทดลองและจำลองนั้นต้องมีความสมบัติทางกลของวัสดุก่อนโดยการนำชิ้นงานทดสอบมาทดสอบแรงดึง เมื่อได้สมบัติทางกลของวัสดุทดสอบแล้วสามารถทำการทดลองและจำลอง และวิเคราะห์ผลจากการจำลองและการทดลอง ในการวิเคราะห์นั้นมีผลที่ต้องนำมาเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดลองด้วย ซึ่งผลของการทดลองและการจำลองนั้นได้แสดงไว้ในบทที่ 4 รวมถึงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลของการจำลอง หากผลลัพธ์เหล่านั้นมีความสอดคล้องกันแสดงว่าผลลัพธ์การทดลองและผลลัพธ์จำลองนี้มีความน่าเชื่อถือ สามารถนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้และเป็นฐานข้อมูลในออกแบบแม่พิมพ์สำหรับเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงได้

บทที่ 4

ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย

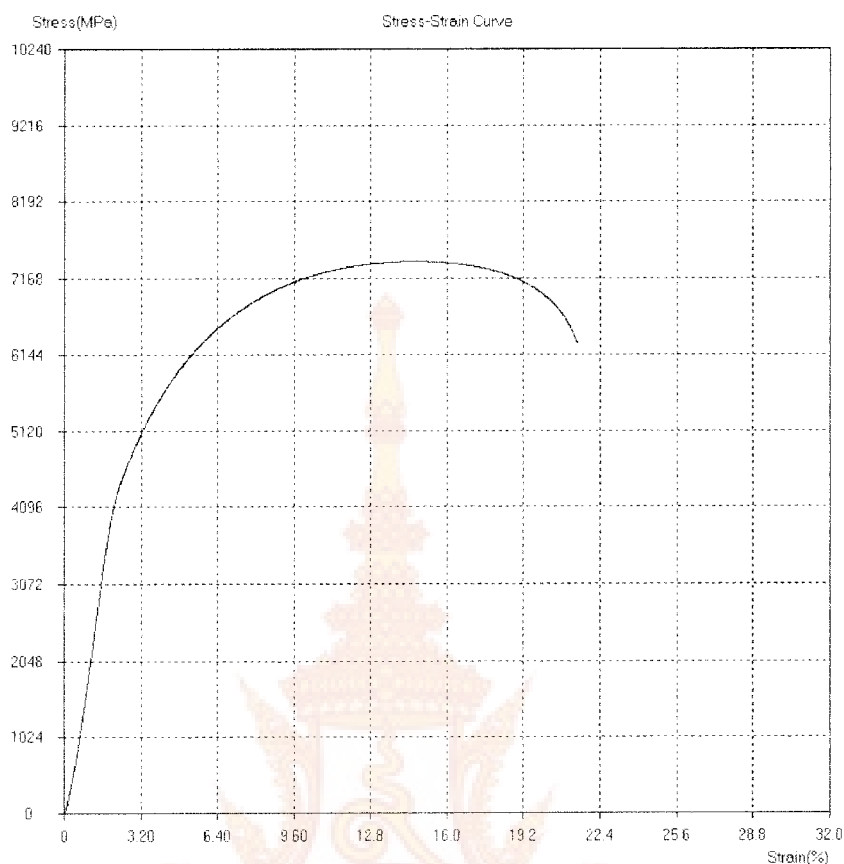
ผลลัพธ์การดำเนินการวิจัยและจำลองตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยเริ่มจากผลลัพธ์การทดสอบการดึง การทดสอบและจำลองการดัดขึ้นรูปตัววีและการคีดตัวกลับ (Spring-back) ของการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง ได้วิเคราะห์สรุปผลและเปรียบเทียบตัวแปรต่างๆระหว่างการจำลองกับการทดลองเพื่อทำนายพฤติกรรมของการดัดขึ้นรูปและการประยุกต์ใช้ข้อมูลเหล่านี้ในการออกแบบแม่พิมพ์หลังจากการดัดขึ้นรูป

4.1 ผลลัพธ์การทดสอบการดึง

การทดสอบโดยการดึง เป็นวิธีการทดสอบที่ง่ายที่สุดในทุกวิธีของการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ และนิยมทดสอบกันมาก เพราะสามารถที่จะให้ผลที่เป็นคุณสมบัติทางกลพื้นฐานพอสมควร เช่น ให้ผลเกี่ยวกับความต้านทานแรงดึง ความยืดตัว ความเหนียว ความเปราะและลักษณะการแตกหักของวัสดุ ซึ่งนับว่าเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป โดยทั่วไปการทดสอบก็ต้องใช้แรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอถึงขั้นงานทดสอบให้ยืดออกและขาดในที่สุด ก่อนที่จะนำวัสดุชนิดใดมาทำการทดลอง สิ่งที่ต้องดำเนินการสิ่งแรกคือ การนำเอาวัสดุที่จะใช้ในการทดลองและจำลอง มาทำการทดสอบหาสมบัติของวัสดุเพื่อหาค่าอ้างอิงไปใช้ในการทดลองและการจำลองการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการดึงของวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง

ผลลัพธ์การทดสอบการดึง วัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง จากกราฟความเค้น-ความเครียด			
Size(mm)	2	Fp(kN)	11.375
So(mm ²)	2*16.25	Rp(MPa)	350
Lo(mm)	25	Ft(kN)	20.22
Fm(kN)	24	Rt(MPa)	622
Rm(MPa)	738	E(GPa)	210



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

จากการทดสอบการดึงวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง ได้ผลออกมาดังต่อไปนี้

ค่าแรงดึงสูงสุดที่วัดได้จากเครื่องทดสอบ (F_m) = 23.985 kN

ค่าแรงดึงที่จุด Yield Point โดย Offset 0.2 % Strain (F_p) = 11.375 kN

ขนาดพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานทดสอบ = 16.25 mm x 2 mm

- คำนวณหาค่าความเค้นสูงสุด (Ultimate Stress) ของวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง

$$\text{Ultimate Stress } (\sigma_U) = \frac{F}{A}$$

$$\text{เมื่อ } F_m = 23.985 \text{ kN}$$

$$A \text{ พื้นที่หน้าตัด} = 32.5 \text{ mm}^2$$

$$\text{Ultimate Stress } (\sigma_u) = \frac{23.985 \times 1000 \text{ N}}{32.5 \text{ mm}^2}$$

$$\text{Ultimate Stress } (\sigma_u) = 738 \text{ N / mm}^2$$

- คำนวณหาค่า Yield Stress (σ_y) ของวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง

$$\text{Yield Stress } (\sigma_y) = \frac{\text{แรงที่จุด Yield}}{\text{พื้นที่ก่อนดึง}}$$

$$\text{เมื่อ } F_p \text{ แรงที่จุด Yield} = 11.375 \text{ kN}$$

$$A \text{ พื้นที่หน้าตัด} = 32.5 \text{ mm}^2$$

$$\text{Yield Stress } (\sigma_y) = \frac{11.375 \times 1000 \text{ N}}{32.5 \text{ mm}^2}$$

$$\text{Yield Stress } (\sigma_y) = 350 \text{ N/mm}^2$$

ค่า Ultimate Tensile Strength (σ_u) เป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ ก่อนที่วัสดุนั้นจะขาดออกจากกัน แต่ไม่ใช่ค่าที่จะนำไปใช้ในการคำนวณการออกแบบทางวิศวกรรม หรือทางงานโครงสร้างของวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง มีค่า Ultimate Tensile Strength = 738 N/mm^2

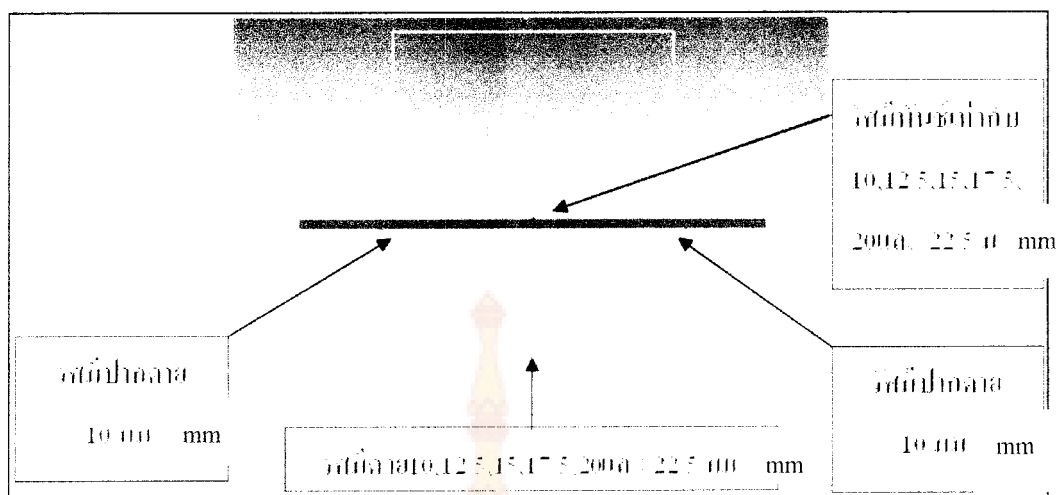
ค่า Yield Strength (σ_y) ไม่ใช่เป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ แต่เป็นค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณทางด้านงานวิศวกรรม ซึ่งจะเป็นค่าที่ให้ความปลอดภัยแก่ผู้คำนวณไปใช้งาน สำหรับงานต่าง ๆ จากการทดสอบนี้วัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง มีค่า Yield Point = 350 N/mm^2

4.2 การวิเคราะห์ผลตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการคดตัวกลับ

พฤติกรรมของการคดตัวกลับของวัสดุ อธิบายได้จากการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นหลังการการเคลื่อนที่พ้นข้อออกจากภายในแนวแกนการคดขึ้นรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานขึ้นรูปโลหะแผ่น เนื่องจากเนื้อวัสดุตรงบริเวณเส้นแกนกลางของแผ่น มีความเค้นเกิดขึ้นไม่สูงมากอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Elastic deformation) เมื่อยกพ้นข้อออกจากคด เนื้อวัสดุส่วนนี้จะพยายามคดตัวกลับสู่รูปร่างเดิม แต่เนื้อวัสดุที่อยู่ห่างแนวเส้นแกนกลางจะมีความเค้นเกิดขึ้นเกินจุดครากเป็นตัวยกให้พยายามด้านการกลับสู่รูปร่างเดิม โดยปกติแล้วแนวโน้มเกิดการเกิดการคดตัวกลับในเนื้อวัสดุเกิดจากหลายปัจจัย แต่ในการศึกษานี้ได้ศึกษาตัวแปรต่อไปนี้เป็นคือ รัศมีพันซ์คด มุมพันซ์คดและความเค้นครากของชิ้นงานทดสอบที่อาจมีอิทธิพลต่อการเกิดการคดตัวกลับหลังจากการคดขึ้นรูป

4.2.1 อิทธิพลของรัศมีพันซ์ที่ส่งผลต่อการเกิดการคดตัวกลับ(Spring-back)

เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของรัศมีพันซ์ ที่ส่งผลต่อการเกิดการคดตัวกลับของวัสดุในการคดขึ้นรูปตัวสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงโดยกำหนดให้มุมพันซ์คด เท่ากับ 90° ผู้ศึกษาได้วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลจากการทดลองและการจำลอง



รูปที่ 4.2 แสดงรัศมีค่าต่างๆสำหรับการวิเคราะห์การจำลอง

จากรูปที่ 4.2 การจำลองการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงเพื่อเปรียบเทียบค่ารัศมีพันซ์ต่อไปนี้คือ รัศมีพันซ์เท่ากับ 10, 12.5, 15, 17.5, 20 และ 22.5 mm ที่ส่งผลต่อการเกิดการดัดตัวกลับ ที่ความเค้นคราก เท่ากับ 350 N/mm^2 รัศมีปากดาบเท่ากับ 10 มิลลิเมตรและมุมของแม่พิมพ์เท่ากับ 90°

$$k_R = \frac{\alpha_r}{\alpha} = \frac{r_i + S_0/2}{r_{i,r} + S_0/2} \quad \dots(4.1)$$

- เมื่อ
- k_R = Spring back Factor
 - α_r = มุมดัดของแม่พิมพ์ (องศา)
 - α = มุมดัดของชิ้นงานที่ได้หลังจากเกิดการดัดตัวกลับ (องศา)
 - r_i = รัศมีดัดที่ได้ของชิ้นงานเมื่อเกิดการดัดตัวกลับ (mm)
 - $r_{i,r}$ = รัศมีดัดของพันซ์ (mm)
 - S_0 = ความหนาของแผ่นเปล่า (mm)

การจำลองที่รัศมีพันซ์ 10 mm $k_R = \frac{\alpha_r}{\alpha} \text{ แทนค่า } = \frac{9.87 + (0.5)(2)}{10 + (0.5)(2)}$

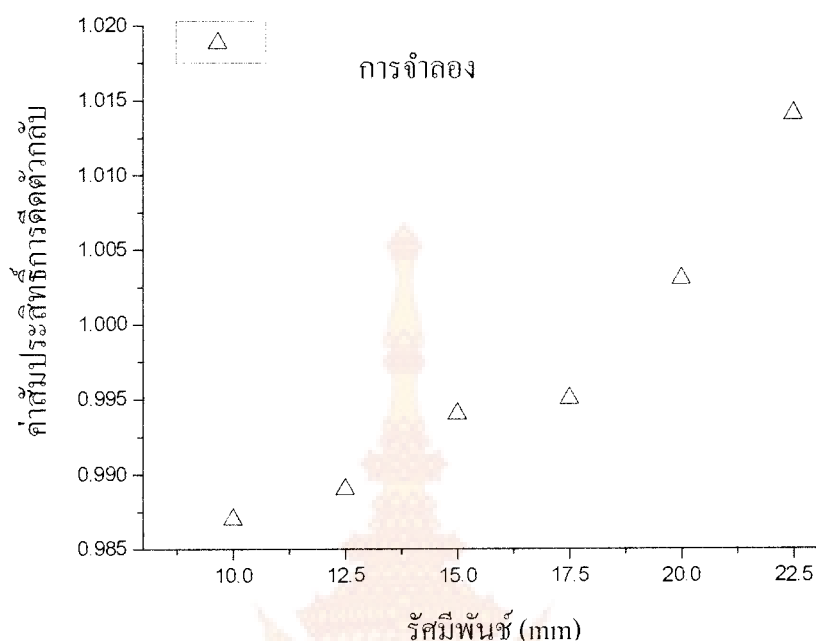
$$k_R = 0.987$$

การจำลองที่รัศมีพื้นที่ 12.5 mm	$k_R = \frac{\alpha_r}{\alpha}$ แทนค่า $= \frac{12.38 + (0.5)(2)}{12.5 + (0.5)(2)}$ $k_R = 0.989$
การจำลองที่รัศมีพื้นที่ 15 mm	$k_R = \frac{\alpha_r}{\alpha}$ แทนค่า $= \frac{14.9 + (0.5)(2)}{15 + (0.5)(2)}$ $k_R = 0.993$
การจำลองที่รัศมีพื้นที่ 17.5 mm	$k_R = \frac{\alpha_r}{\alpha}$ แทนค่า $= \frac{17.41 + (0.5)(2)}{17.5 + (0.5)(2)}$ $k_R = 0.994$
การจำลองที่รัศมีพื้นที่ 20 mm	$k_R = \frac{\alpha_r}{\alpha}$ แทนค่า $= \frac{20.07 + (0.5)(2)}{20 + (0.5)(2)}$ $k_R = 1.003$
การจำลองที่รัศมีพื้นที่ 22.5 mm	$k_R = \frac{\alpha_r}{\alpha}$ แทนค่า $= \frac{22.8 + (0.5)(2)}{22.5 + (0.5)(2)}$ $k_R = 1.013$

ตารางที่ 4.2 แสดงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การติดตัวกลับจากการจำลอง

ลำดับที่	รัศมีพื้นที่ (mm) (r1)	รัศมีชิ้นงานหลังตัด (mm) (r2)	ค่าสัมประสิทธิ์การติดตัวกลับ (kR)
1	10	9.870	0.987
2	12.5	12.368	0.989
3	15	14.909	0.994
4	17.5	17.412	0.995
5	20	20.074	1.003
6	22.5	22.808	1.014

จากตาราง 4.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การติดตัวกลับจะเห็นค่าสัมประสิทธิ์การติดตัวกลับจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อค่าของรัศมีพื้นที่เพิ่มมากขึ้นและ ค่าสัมประสิทธิ์การติดตัวกลับมีค่าน้อยแสดงว่ารัศมีพื้นที่มีค่าน้อยลงเรื่อย ๆ



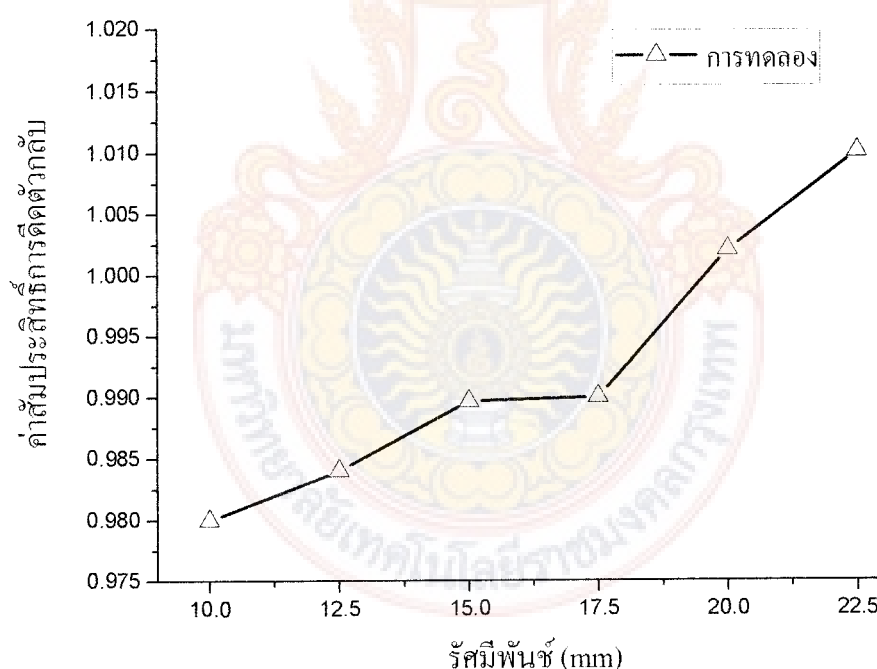
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงอิทธิพลของรัศมีพันซ์ที่ส่งผลต่อการเกิดการดีดตัวกลับของการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง จากการจำลอง

จากรูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารัศมีพันซ์ค่าต่างๆกับค่าสัมประสิทธิ์การเกิดการดีดตัวกลับของชิ้นงานหลังการดัดขึ้นรูป พบว่าที่รัศมีพันซ์ เท่ากับ 10 mm มีการเกิดการดีดตัวกลับน้อยที่สุด โดยค่าสัมประสิทธิ์การดีดตัวกลับ (Spring-back Factor) เท่ากับ 0.987 จากนั้นเมื่อรัศมีของพันซ์เพิ่มขึ้นแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การเกิดการดีดตัวกลับจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ที่มุมของแม่พิมพ์ รัศมีปากตายและความเค้นครากไม่เปลี่ยนแปลงในทางตรงกันข้าม เมื่อรัศมีพันซ์ลดลงแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์จะลดลงเรื่อยๆเช่นเดียวกัน

การดัดขึ้นรูปตัววี เพื่อเป็นการยืนยันข้อมูลแนวโน้มการเกิดการดีดตัวกลับที่ได้จากการจำลอง โดยไฟในเอลิเมนต์กับสภาพการทำงานจริง จึงจำเป็นต้องมีการนำเอาผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อดูว่าแนวโน้มในค่าสัมประสิทธิ์การดีดตัวกลับมีความแตกต่างกันมากหรือน้อยเพียงใดจากการจำลองและทดลอง

ตารางที่ 4.3 แสดงการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การบิดตัวกลับจากการทดลอง

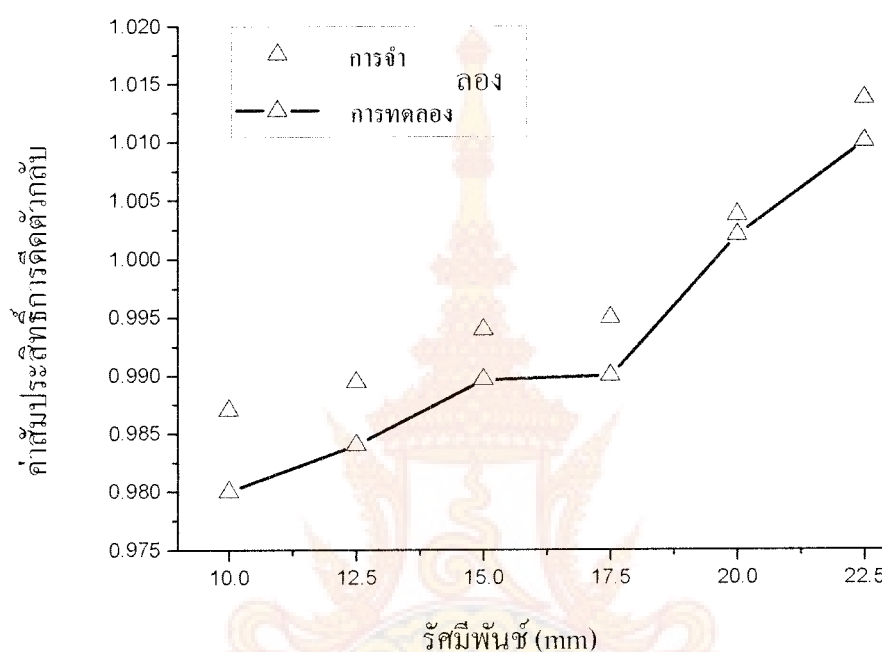
พินช์ (mm)	คาย (mm)	รัศมีปากคาย (mm)	ค่าสัมประสิทธิ์การบิดตัวกลับ (kR)
10	10	10	0.980
12.5	12.5	12.5	0.984
15	15	15	0.989
17.5	17.5	17.5	0.990
20	20	20	1.002
22.5	22.5	22.5	1.010



รูปที่ 4.4 แสดงอิทธิพลของรัศมีพินช์ที่ส่งผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับของการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงจากการทดลอง

จากรูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีพินช์ค่าต่าง ๆ กับค่าสัมประสิทธิ์การเกิดการบิดตัวกลับของชิ้นงานหลังการทดลองการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง ที่มุมพินช์ด้านเท่ากับ 90° รัศมีปากคายเท่ากับ 10 mm และความเค้นครากเท่ากับ 350 N/mm^2

กำหนดให้ค่ารัศมีพันธ์ 10, 12.5, 15, 17.5, 20 และ 22.5 mm พบว่าแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การเกิดการดีดตัวกลับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และเมื่อค่ารัศมีพันธ์เพิ่มขึ้นในทางตรงกันข้าม เมื่อค่ารัศมีพันธ์ลดลงค่าสัมประสิทธิ์การเกิดการดีดตัวกลับลดลงเช่นเดียวกับการจำลองที่ผ่านมา



รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดการดีดตัวกลับของชิ้นงานระหว่างการจำลอง และการทดลอง

จากรูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอิทธิพลของรัศมีพันธ์ค่าต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดการดีดตัวกลับของชิ้นงานระหว่างการจำลองและการทดลอง สามารถบ่งบอกได้ว่าการเกิดการดีดตัวกลับจากการทดลองให้ผลที่ใกล้เคียงกับการจำลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การหาค่าการเกิดการดีดตัวกลับของวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงจากการดัดขึ้นรูปตัววี โดยมีมุมพันธ์ดัดเท่ากับ 90° สามารถหาได้จากการจำลองการดัดขึ้นรูปโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ได้โดยไม่ต้องทดลอง ซึ่งมีจุดที่แตกต่างบ้างเล็กน้อย โดยเกิดจากค่าความเค้นครากของวัสดุที่แตกต่างกันและการเก็บข้อมูลอย่างละเอียดของตัวโปรแกรมจึงทำให้การพล็อตกราฟได้ละเอียดขึ้น

4.2.2 อิทธิพลของความเค้นครากที่ส่งผลต่อการเกิดการดีดตัวกลับ (Spring-back)

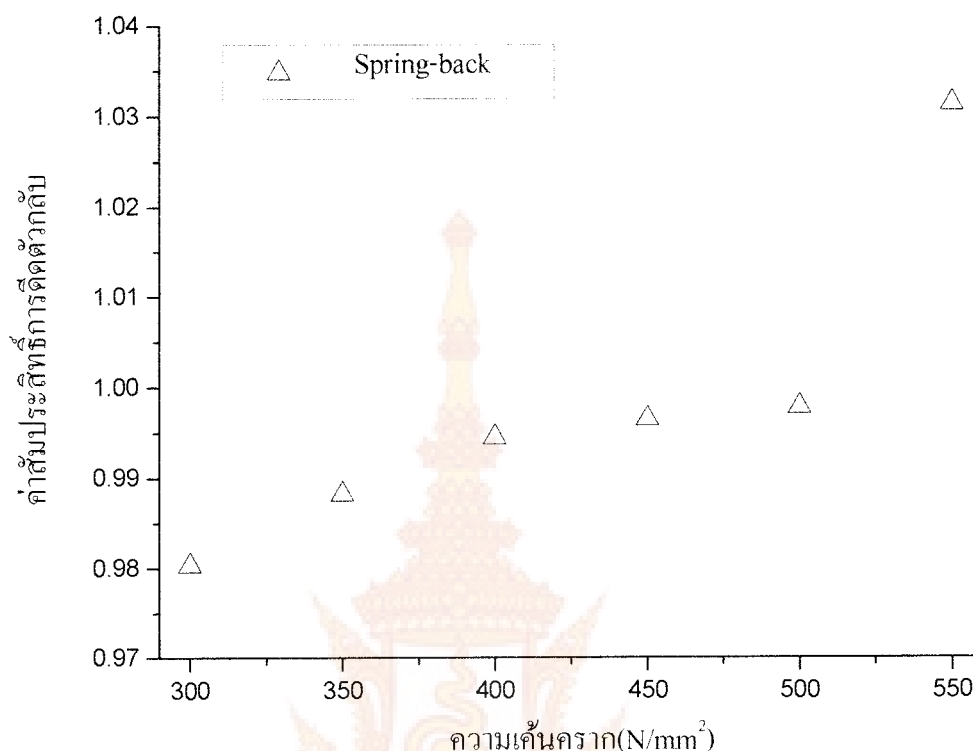
โดยธรรมชาติ วัสดุทุกชนิดจะมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนรูปในลักษณะทั้งแบบยืดหยุ่นได้ (Elastic) และแบบถาวร (Plastic) ซึ่งการเปลี่ยนรูปดังกล่าวจะเป็นแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับแรงที่มา

กระทำกับวัสดุ โดยที่ถ้าแรงที่กระทำกับวัสดุมากกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุ การเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic) ก็จะเกิดขึ้น แต่ถ้าแรงที่กระทำกับวัสดุไม่มากเกินไปค่าความเค้นครากของวัสดุ วัสดุก็จะกลับคืนสู่รูปร่างเดิม

การวิเคราะห์หัตถิทธิพลของความเค้นครากที่ส่งผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับของชิ้นงาน หลังจากการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงจากการจำลองโดยการเปรียบเทียบผลของการเกิดการบิดตัวกลับที่ค่าความเค้นครากเท่ากับ 300 ,350 ,400 ,450 ,500 และ 550 N/mm² ที่ค่ารัศมีพันซ์เท่ากับ 10 ,12.5 ,15 ,17.5 ,20 และ 22.5 mm โดยมีเงื่อนไข รัศมีปากด้ายเท่ากับ 15 มิลลิเมตรและมุมของพันซ์ด้ายเท่ากับ 90°

ตารางที่ 4.4 แสดงการคำนวณความเค้นครากที่ส่งผลต่อการบิดตัวกลับ

ความเค้น คราก	รัศมีด้าย	รัศมีพันซ์	รัศมีปากด้าย	มุมแม่พิมพ์ α_1	มุมชิ้นงาน α_2	สัมประสิทธิ์การ ดัดตัวกลับ(kR)
300	10	8	10	90	88.23	0.980
350	10	8	10	90	88.94	0.988
400	10	8	10	90	89.5	0.994
450	10	8	10	90	89.68	0.996
500	10	8	10	90	89.8	0.998
550	10	8	10	90	92.82	1.031



รูปที่ 4.6 แสดงอิทธิพลของความเค้นครากที่ส่งผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับในการดัดขึ้นรูปตัววี

จากรูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นครากค่าต่างๆกับค่าสัมประสิทธิ์การเกิดการบิดตัวกลับของวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงพบว่าที่ความเค้นครากเท่ากับ 300 รัศมีพันซ์คายเท่ากับ 10 mm ค่าสัมประสิทธิ์การบิดตัวกลับจะมีค่าน้อยที่สุดและเมื่อความเค้นครากเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การบิดตัวกลับจะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

แนวโน้มของการเกิดการบิดตัวกลับหลังจากการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงเมื่อความเค้นครากเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การบิดตัวกลับ (Spring-back Factor) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเมื่อค่าความเค้นครากลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การบิดตัวกลับจะเริ่มลดลงเช่นเดียวกัน

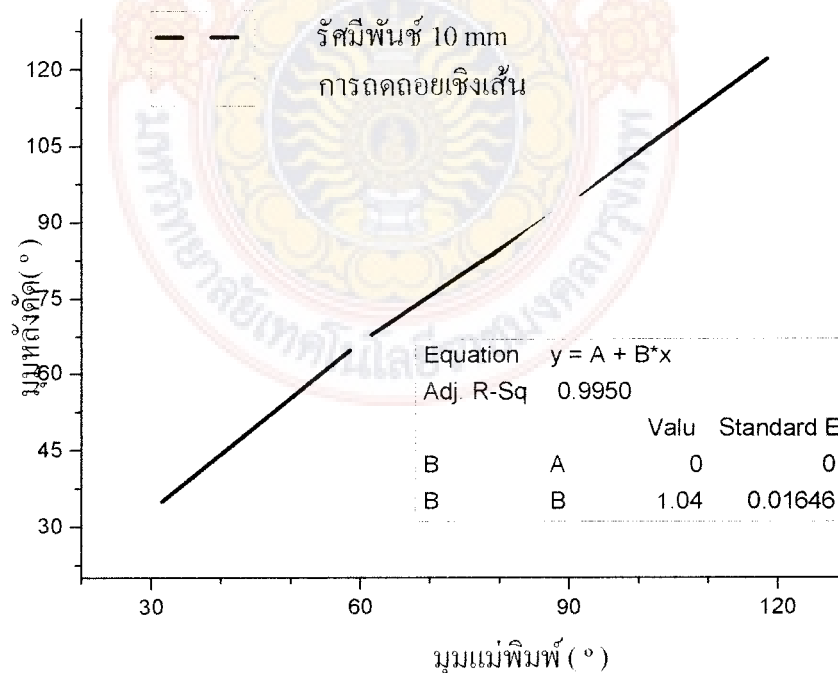
4.2.3 อิทธิพลของมุมพันซ์และคายที่ส่งผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับ (Spring-back)

การศึกษาอิทธิพลของมุมพันซ์และคายที่ส่งผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับของชิ้นงานทดสอบหลังกระบวนการดัดขึ้นรูปสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงโดยการจำลองและมีเงื่อนไขคือ ค่าความเค้นครากเท่ากับ 350 N/mm² รัศมีพันซ์คายเท่ากับ 10 mm เปรียบเทียบมุมพันซ์และคายเท่ากับ 30, 60, 90 และ 120° วิเคราะห์ความแตกต่างของมุมพันซ์คายค่าต่าง ๆ

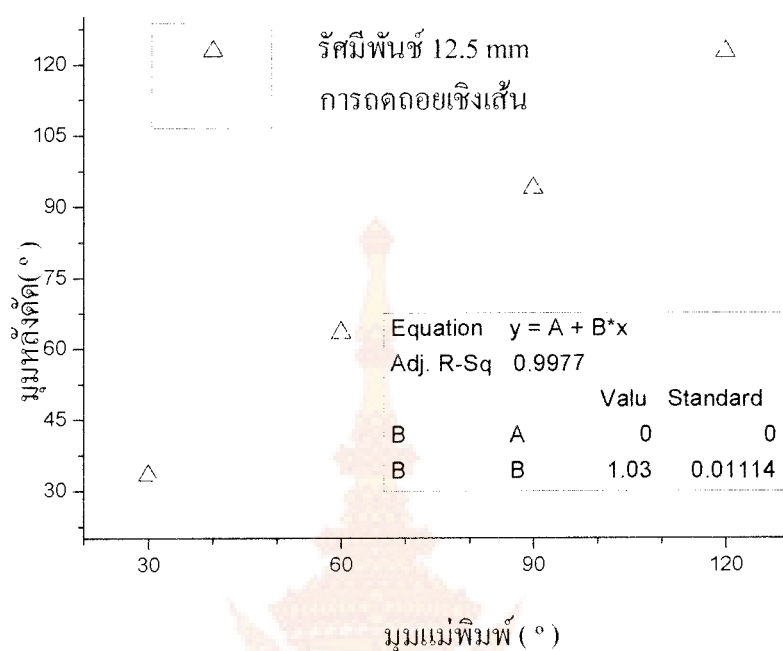
ตารางที่ 4.5 แสดงค่ารัศมีพื้นที่มุมของแม่พิมพ์หลังการตัด

รัศมีพื้นที่(mm)	มุมของแม่พิมพ์(°)			
	30°	60°	90°	120°
10	33.370	66.371	93.750	123.456
12.5	33.296	63.357	92.975	122.448
15	32.119	63.157	85.551	113.314
17.5	30.549	60.790	84.190	111.731
20	30.211	60.060	83.643	110.905
22.5	30.030	59.405	82.796	109.589

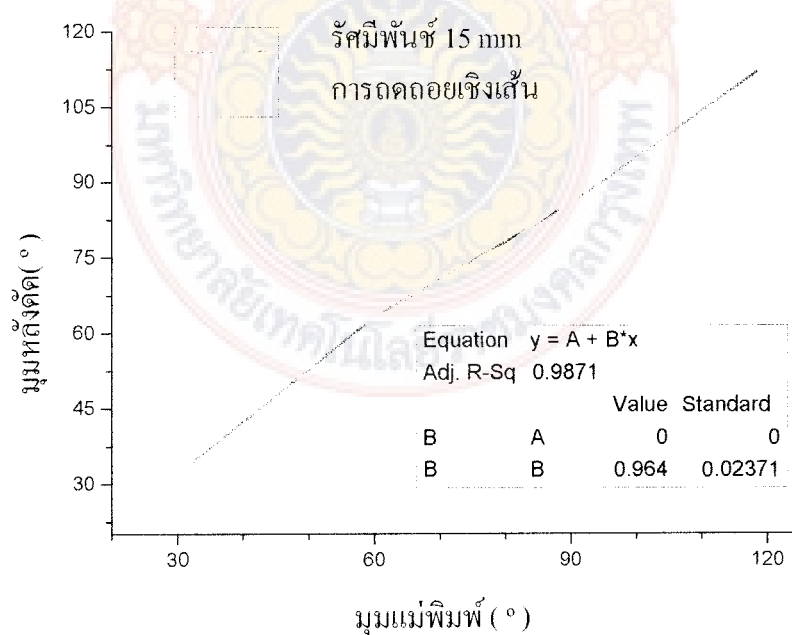
จากตารางที่ 4.5 พบว่ารัศมีของพื้นที่น้อยการตัดตัวกลับของวัสดุน้อยและรัศมีของพื้นที่มากการตัดตัวกลับก็มากขึ้นตามไปด้วย แสดงว่ารัศมีของพื้นที่มีผลต่อการตัดตัวกลับของวัสดุ มุมของแม่พิมพ์ 30, 60, 90, 120° มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดตัวกลับ ที่ใกล้เคียงกับมุมของแม่พิมพ์ค่าจะไม่แตกต่างกันมากนัก



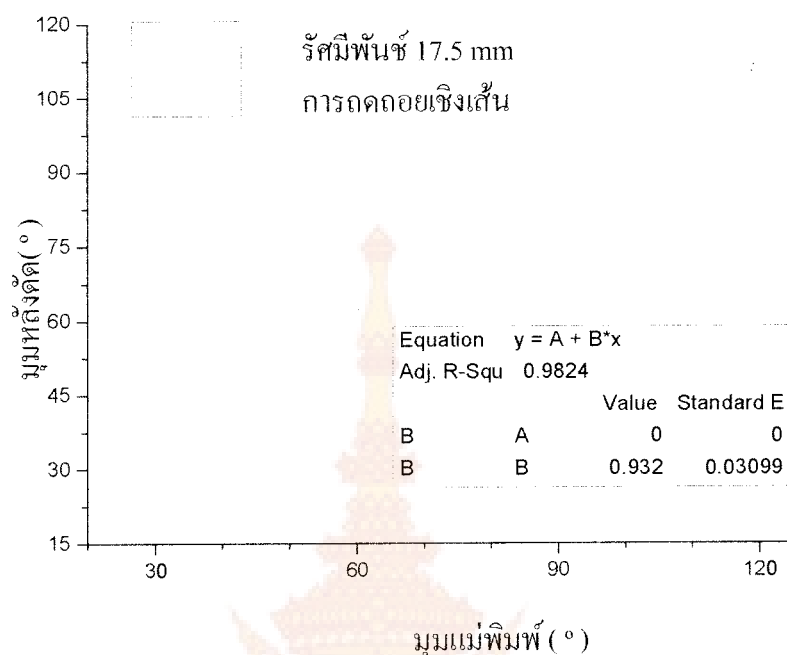
รูปที่ 4.7 แสดงอิทธิพลของมุมพื้นที่ 10 mm ที่ส่งผลต่อการเกิดการตัดตัวกลับของการตัดขึ้นรูปตัววี สำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง



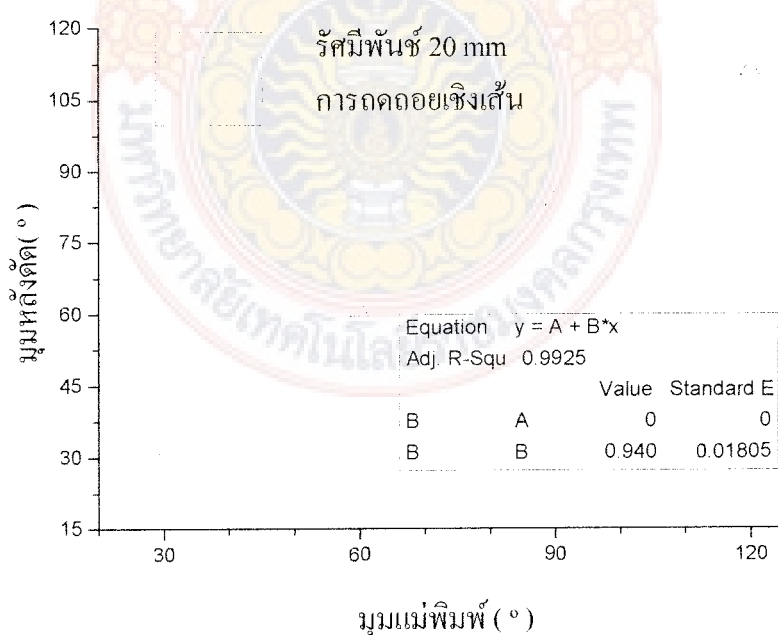
รูปที่ 4.8 แสดงอิทธิพลของมุมพื้นที่ 12.5 mm ที่ส่งผลต่อการเกิดการติดตัวกลับของการคั่วขึ้นรูปตัววี
สำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง



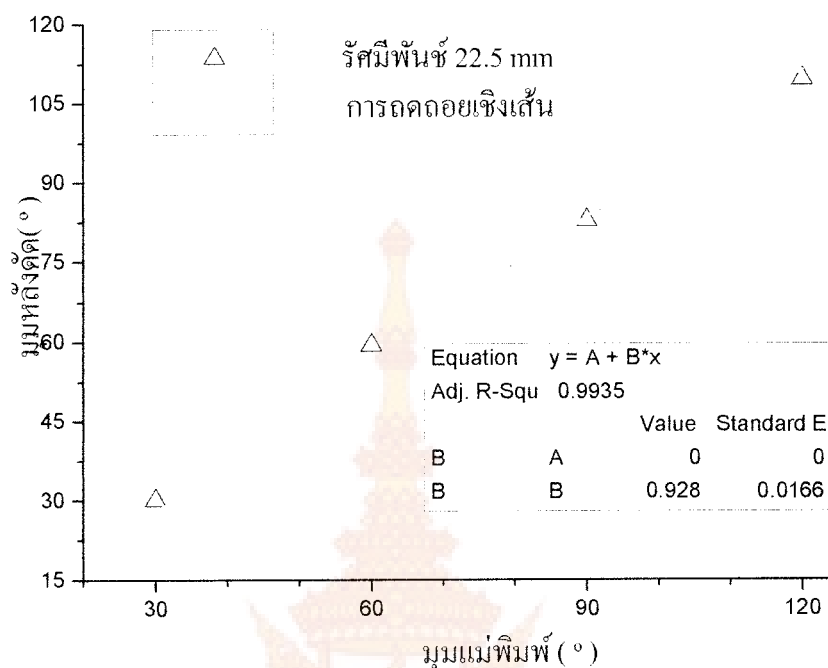
รูปที่ 4.9 แสดงอิทธิพลของมุมพื้นที่ 15 mm ที่ส่งผลต่อการเกิดการติดตัวกลับของการคั่วขึ้นรูปตัววี
สำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง



รูปที่ 4.10 แสดงอิทธิพลของมุมพื้นที่ 17.5 mm ที่ส่งผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับของการดัดขึ้นรูป
ตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง



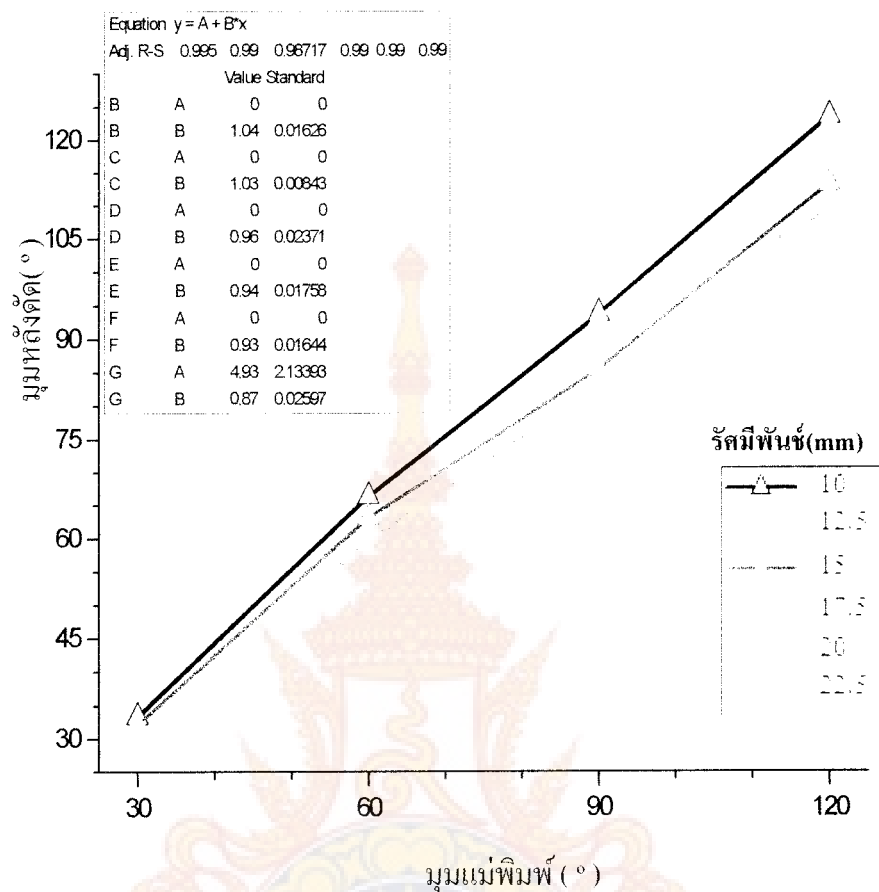
รูปที่ 4.11 แสดงอิทธิพลของมุมพื้นที่ 20 mm ที่ส่งผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับของการดัดขึ้นรูปตัววี
สำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง



รูปที่ 4.12 แสดงอิทธิพลของมุมพังก์ 22.5 mm ที่ส่งผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับของการดัดขึ้นรูป
ตัวสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง

จากการทดลองจะพบว่า ที่รัศมีพังก์และคายมีผลต่อการบิดตัวกลับของชิ้นงาน ซึ่งเมื่อมุมพังก์และคายเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การเกิดการบิดตัวกลับก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ค่ารัศมี 10 mm มีค่าสัมประสิทธิ์การบิดตัวกลับที่มีค่าน้อยที่สุด แต่เมื่อค่ารัศมีพังก์และคายเท่ากันนี้แต่มุมของพังก์คายเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การบิดตัวกลับมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตรงกันข้ามเมื่อมุมของพังก์คายลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การเกิดการบิดตัวกลับจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เช่นกัน

เมื่อทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของมุมพังก์คายทั้งหมด คือ 30 , 60 , 90 และ 120° ที่ค่ารัศมีพังก์ 10, 12.5, 15, 17.5, 20 และ 22.5 mm ความเค้นครากเท่ากับ 350 N/mm² จากการจำลองพบว่า เมื่อมุมพังก์คายและรัศมีพังก์เพิ่มขึ้น แนวโน้มของการเกิดการบิดตัวกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ผลที่ได้จากการจำลองนี้มีความน่าเชื่อถือและสอดคล้องกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การเกิดการบิดตัวกลับ



รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบอิทธิพลของมุมพื้นซ์และคายที่ส่งผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับของการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงที่รัศมีพื้นซ์คายค่าต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.13 จะพบว่าที่รัศมีพื้นซ์และคายค่าต่าง ๆ เมื่อมุมของพื้นซ์และคายเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การเกิดการบิดตัวกลับจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและเมื่อมุมของพื้นซ์และคายลดลงค่าสัมประสิทธิ์การเกิดการบิดตัวกลับมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ ทุกค่ารัศมีพื้นซ์คายเช่นกัน

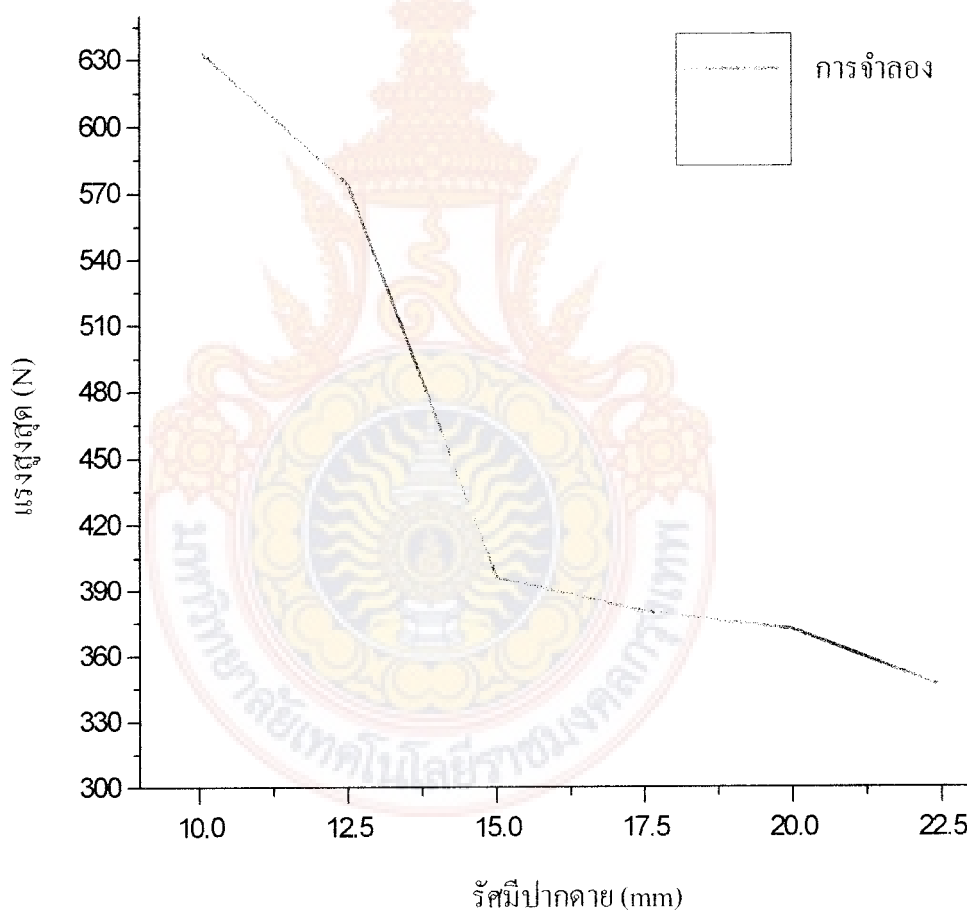
4.3 การวิเคราะห์ตัวแปรที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป

เพื่อให้ทราบถึงตัวแปรที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงโดยมีมุมพื้นซ์และคายเท่ากับ 90° ผู้ศึกษาได้วิเคราะห์ผลการจำลองการทำงานโดยการเปรียบเทียบ 3 ตัวแปรหลักคือ รัศมีพื้นซ์และคาย เท่ากับ 10, 12.5, 15, 17.5, 20 และ 22 mm รัศมีปากคาย เท่ากับ 10, 12.5, 15, 17.5, 20 และ 22 mm และความเค้นคราก เท่ากับ 300, 350, 400, 450.

500 และ 550 N/mm² ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้ที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปตัววี สำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง

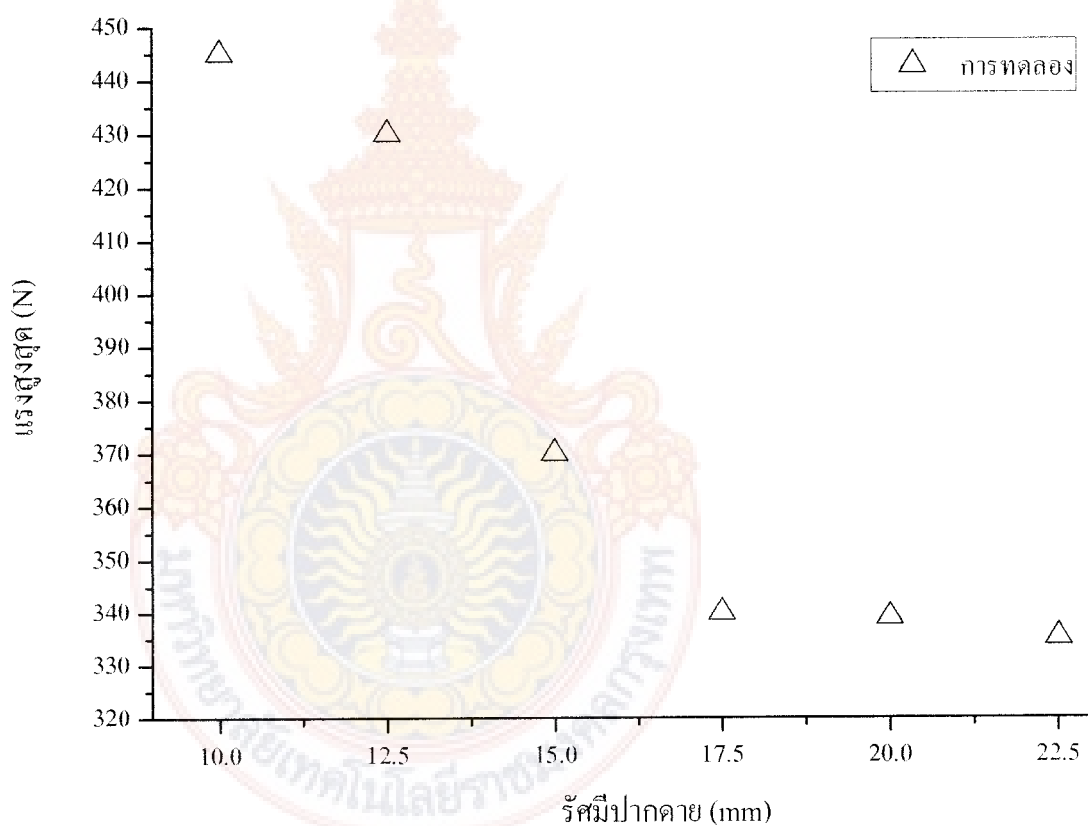
4.3.1 อิทธิพลของรัศมีปากคายนีที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป

การศึกษาอิทธิพลของรัศมีปากคายนีที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงจากรูปที่ 4.14 การจำลองที่มุมพันธและคายเท่ากับ 90° และความเค้นครากเท่ากับ 400 จะเห็นว่า ค่ารัศมีปากคายนีที่ใช้แรงในการดัดขึ้นรูปมากที่สุด คือ 10 mm แรงที่ใช้คือ 340.923 N เมื่อค่ารัศมีปากคายนีเพิ่มขึ้น แนวโน้มของแรงที่ใช้ในการดัดจะมีลดลงเรื่อยๆ



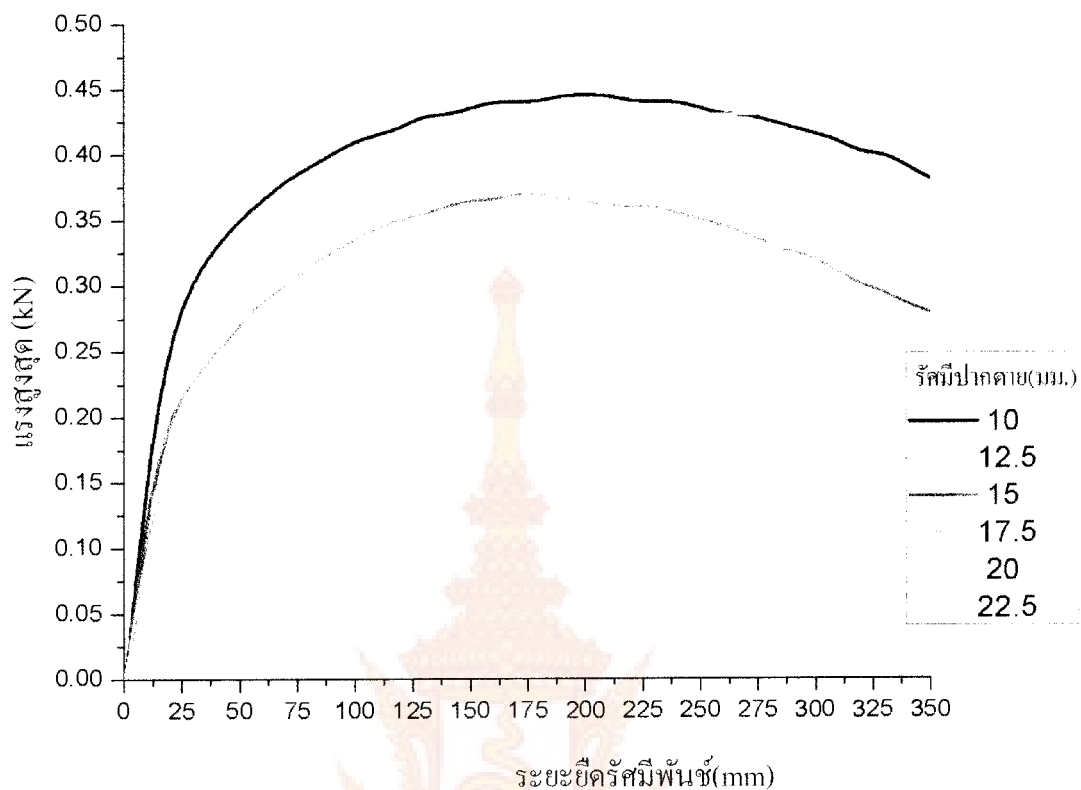
รูปที่ 4.14 แสดงอิทธิพลของรัศมีปากคายนีที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป ที่มุมพันธและคายเท่ากับ 90 องศาและความเค้นครากเท่ากับ 400 N/mm² จากการจำลอง

เพื่อให้เห็นถึงอิทธิพลของรัศมีปากคายที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปตัววี สำหรับวัสดุ เหล็กกล้าทนแรงดึงสูง ที่มีความใกล้เคียงกับการจำลองจากรูปที่ 4.10 ผู้ศึกษาได้ทำการทดลอง โดยมีเงื่อนไขคือ มุมของฟันซ์และคายเท่ากับ 90° และความเค้นครากเท่ากับ 204 N/mm^2 เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปกับรัศมีปากคายค่าต่างๆ จะพบว่า ที่รัศมีปากคายเท่ากับ 10 mm แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปเท่ากับ 445 N และเมื่อค่ารัศมีปากคายเพิ่มขึ้น แนวโน้มของแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปจะลดลงเรื่อยๆเช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุต่างกันจึงส่งผลให้แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปที่รัศมีปากคายค่าเท่ากัน มีค่าแตกต่างกัน



รูปที่ 4.15 แสดงอิทธิพลของรัศมีปากคายที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป ที่มุมฟันซ์และคายเท่ากับ 90° และความเค้นครากเท่ากับ 350 N/mm^2

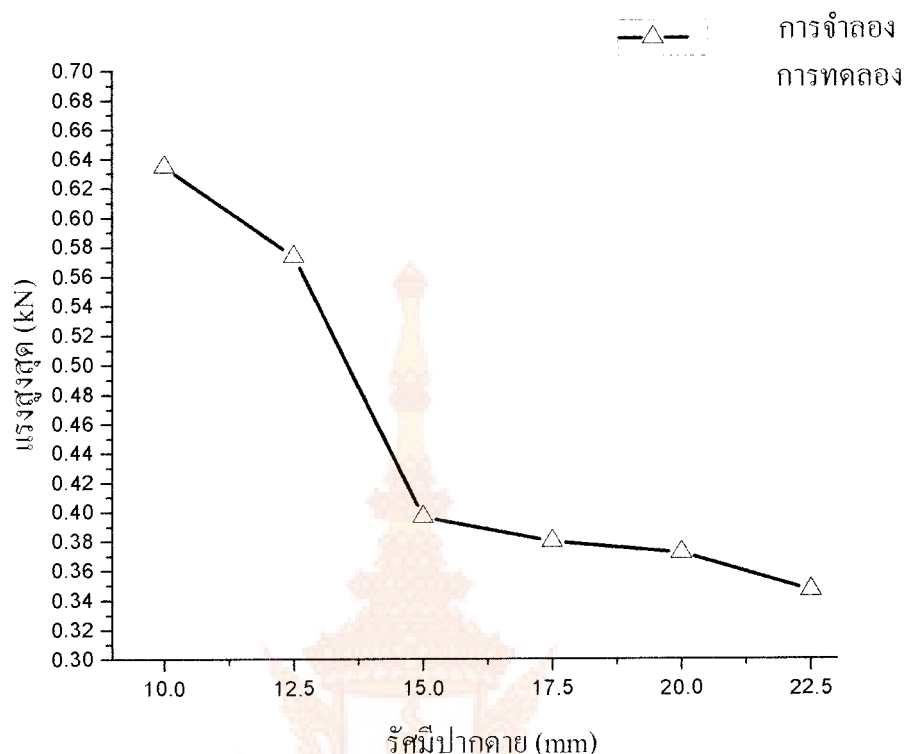
จากการทดลองจะเห็นว่ารัศมีปากคายน้อยแรงที่ใช้ในการกดก็มากแต่รัศมีปากคายมากแรงที่ใช้กดจะมีค่าน้อยซึ่งรัศมีของปากคายส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการกดวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง



รูปที่ 4.16 แสดงอิทธิพลของรัศมีปากคายที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุ เหล็กกล้าทนแรงดึงสูง จากการทดลอง

จากรูปที่ 4.15 จะพบว่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield stress) นั้นแสดงถึงจุดที่วัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงการแปรรูปจากการแปรรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic) เป็นการแปรรูปแบบถาวร (Plastic) ซึ่งช่วงการแปรรูปแบบยืดหยุ่นนั้นค่าของแรงกระทำจะสัมพันธ์กับค่าการยืดตัว หรือค่าความชันคงที่ ทั้งนี้หากทำการปล่อยแรงที่กระทำต่อชิ้นงานในช่วงดังกล่าว วัสดุจะเกิดการหดตัวกลับไปยังรูปเดิมของชิ้นงาน แต่เมื่อพ้นจุดครากไปเมื่อปล่อยแรงวัสดุจะไม่กลับสู่ความรูปเดิม นั่นคือช่วงการแปรรูปแบบถาวร (Plastic) แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปจะมีค่ามากที่สุดที่จุดความเค้นแรงดึงสูงสุดนั่นเอง

เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องตรงกันและน่าเชื่อถือมากที่สุด ผู้ศึกษาจึงได้ทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของรัศมีปากคายที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูประหว่างการจำลองและการทดลอง (รูปที่ 4.16) จะพบว่า จากการทดลอง เมื่อรัศมีปากคายมีค่าน้อย แนวโน้มของแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปจะมีค่ามากและเมื่อรัศมีปากคายมีค่ามาก แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปจะลดลงเรื่อย ๆ เช่นเดียวกับการจำลอง



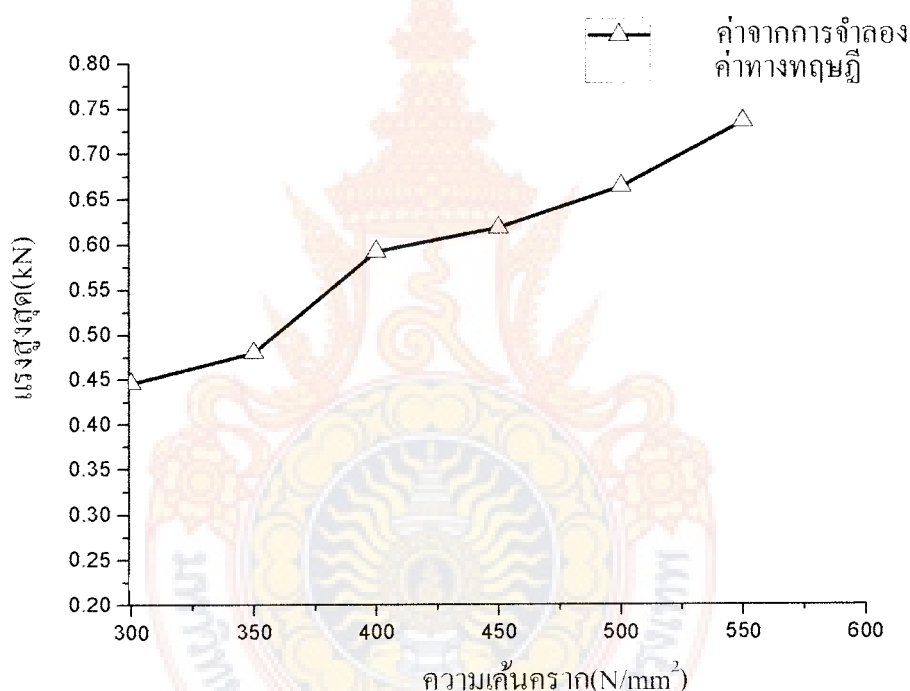
รูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดลองอิทธิพลของรัศมีปากคายที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง

ศูนย์กลางรัศมีด้านหนึ่งไปยังจุดศูนย์กลางรัศมีคายอีกด้านหนึ่ง นั่นคือ เมื่อค่ารัศมีปากคายเพิ่มขึ้น ระยะช่องว่างจากรัศมีพันซ์ถึงรัศมีคาย (L) จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ส่งผลให้แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปมีค่าน้อยลงตามระยะช่องว่างจากรัศมีพันซ์ถึงรัศมีคาย (L) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การหาแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง โดยมีมุมพันซ์และคายเท่ากับ 90 องศา สามารถหาได้จากการจำลองการดัดขึ้นรูปโดยไฟไนต์เอลิเมนต์โดยไม่ต้องทดลอง ซึ่งอาจมีจุดที่แตกต่างบ้างเล็กน้อย โดยเกิดจากการเก็บข้อมูลอย่างละเอียดของตัวโปรแกรมจึงทำให้การพล็อตกราฟได้ละเอียดขึ้น

4.3.2 อิทธิพลของความเค้นครากที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป

การศึกษาอิทธิพลของความเค้นครากกับแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปตัววี สำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงผู้ศึกษาได้ทำการจำลองโดยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์โดยมีเงื่อนไขคือ รัศมีพันซ์และคายเท่ากับ 22.5 mm รัศมีปากคายเท่ากับ 20 mm มุมพันซ์และคายเท่ากับ 90° โดยศึกษาค่าความเค้นครากเท่ากับ 300, 350, 400, 450, 500 และ 550 N/mm^2 ตามลำดับ

กราฟแสดงอิทธิพลของความเค้นครากค่าต่างๆ ที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปตัววี สำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง จากการจำลอง (รูปที่ 4.13) พบว่า ที่ความเค้นคราก 300 แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปเท่ากับ 445.51 N ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเค้นครากทั้งหมด เมื่อค่าความเค้นครากเพิ่มขึ้น แนวโน้มของแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปจะมากขึ้นไปด้วย ในทางกลับกันเมื่อค่าความเค้นครากลดลง แนวโน้มแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เช่นเดียวกัน ซึ่งผลการจำลองนี้มีความสอดคล้องกับ 4.3 เมื่อความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength : σ_u) มีความสัมพันธ์กับความเค้นคราก (Yield stress : σ_y) โดยเมื่อความเค้นครากมีค่ามาก แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปจะมีค่ามากตามไปด้วย



รูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและค่าทางทฤษฎี
ที่ความเค้นครากที่ส่งผลต่อแรง

ในการขึ้นรูปโลหะ โดยการดัดนั้น เราต้องให้แรงแก่ชิ้นงานทั้งนี้เพื่อให้ชิ้นงานนั้นเปลี่ยนรูปร่างถาวร ซึ่งแรงที่ให้แก่ชิ้นงานนั้นจะต้องไม่ทำให้ความเค้นเกิดขึ้นบนชิ้นงานมากกว่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานนั้น และจะต้องไม่น้อยกว่าจุดยืดหยุ่นจำกัของชิ้นงานนั้น

4.4 สรุป

ตัวแปรที่มีผลต่อการคิดตัวกลับของวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง คือ รัศมีของพันธทั้งจากการจำลองและการทดลองทางผู้จัดทำและการคำนวณเมื่อรัศมีของพันธมีค่าน้อยค่าสัมประสิทธิ์การคิดตัวกลับก็จะมีแนวโน้มที่น้อย ในทางตรงกันข้ามรัศมีพันธมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การคิดตัวกลับก็มากขึ้นตามไปด้วย อิทธิพลของความเค้นครากก็ส่งผลต่อการคิดตัวกลับของวัสดุด้วยเช่นกัน รวมถึงอิทธิพลของมุมพันธและคายก็มีผลต่อการคิดตัวกลับของวัสดุด้วย และการวิเคราะห์ตัวแปรที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป ตัวแปรที่มีผลคือรัศมีปากคายและความเค้นคราก เมื่อค่ารัศมีปากคายเล็กแรงที่ใช้ในการดัดก็จะมีค่ามาก แต่หากรัศมีปากคายมากแรงที่ใช้ดัดก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้นจึงมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การคิดตัวกลับของวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

การศึกษาการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Marc เวอร์ชัน 2008 สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 อิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับหลังการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง

- รัศมีพันซ์มีผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับของชิ้นงานหลังการดัดขึ้นรูป รัศมีพันซ์เท่ากับ 10 มิลลิเมตรเกิดการบิดตัวกลับน้อยที่สุดและเมื่อค่ารัศมีพันซ์เพิ่มขึ้น การเกิดการบิดตัวกลับมีค่ามากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

- ความเค้นครากมีผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับของชิ้นงานหลังการดัดขึ้นรูป ความเค้นครากเท่ากับ 300 N/mm^2 เกิดการบิดตัวกลับน้อยที่สุดและเมื่อความเค้นครากเพิ่มขึ้น การเกิดการบิดตัวกลับมีค่ามากขึ้นตามไปด้วยเช่นเดียวกัน

- มุมพันซ์และคายมีผลต่อการเกิดการบิดตัวกลับของชิ้นงานหลังการดัดขึ้นรูป มุมพันซ์และคายเท่ากับ 30 องศา เกิดการบิดตัวกลับน้อยที่สุดและเมื่อมุมของพันซ์และคายเพิ่มขึ้น การเกิดการบิดตัวกลับมีค่ามากขึ้นตามไปด้วยเช่นเดียวกัน

5.1.2 อิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง

- รัศมีปากคาย มีผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป รัศมีปากคายเท่ากับ 10 mm ต้องใช้แรงในการดัดขึ้นรูปมากที่สุดและเมื่อค่ารัศมีปากคายเพิ่มขึ้น แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปจะมีค่าน้อยตามไปด้วยเช่นเดียวกัน

- ความเค้นครากมีผลต่อแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปตัววี ค่าความเค้นคราก 300 N/mm^2 แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปมีค่าน้อยที่สุดและเมื่อค่าความเค้นครากเพิ่มขึ้นแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปมีค่ามากขึ้นตามไปด้วยเช่นเดียวกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทำงานโครงงานนี้ผู้ศึกษาสรุปข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้กับภาคอุตสาหกรรมในเรื่องกรรมวิธีการดัดขึ้นรูปตัววี เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ดังนี้

5.2.1 ควรมีการกำหนดเงื่อนไขของตัวแปรที่ทำการศึกษาให้ละเอียด เพื่อที่จะศึกษาแนวโน้มผลการทดลองที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

5.2.2 ในการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกรรมวิธีการดัดขึ้นรูปตัววี ควรมีค่าที่แตกต่างกันมากๆ เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้สามารถเปรียบเทียบผลกันได้ง่ายและมีความชัดเจน

5.3 ประโยชน์ของการวิจัย

จากการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อแรงและการเกิดการติดตัวกลับของชิ้นงาน หลังจากการดัดขึ้นรูปตัววี สำหรับวัสดุเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงนั้น ก่อให้เกิดประโยชน์มากมายทั้งในด้านการศึกษา องค์กร สังคม ภาคอุตสาหกรรมและด้านอื่นๆ สามารถนำผลที่ได้จากการวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ตามความเหมาะสม ซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งทางตรงและทางอ้อม ระยะสั้นและระยะยาว ดังต่อไปนี้

5.3.1 การออกแบบกระบวนการดัดวัสดุชิ้นงานให้ได้ขนาดและมุมตามที่ต้องการโดยไม่ต้องลองผิดลองถูก

5.3.2 การลองผิดลองถูกนั้นจะส่งผลให้เกิดการสูญเสีย เช่น ค่าวัสดุชิ้นงาน วัสดุแม่พิมพ์ เวลาที่เสียไป ค่าแรงงาน พลังงาน เป็นต้น ทั้งหลายเหล่านี้ล้วนแต่เป็นต้นทุนการผลิตทั้งนั้น ผู้ผลิตสามารถใช้ข้อมูลจากการวิจัยนี้ช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์และลดค่าใช้จ่ายลงได้

5.3.3 ใช้เป็นข้อมูลประกอบการศึกษาสำหรับผู้สนใจและช่วยส่งเสริมเอกสาร ตำรา เกี่ยวกับกระบวนการดัดขึ้นรูป

5.3.4 ส่งผลต่อความเจริญก้าวหน้าขององค์จากการการออกแบบแม่พิมพ์และกระบวนการผลิตที่ถูกต้อง ไม่ซ้ำซ้อน

5.3.5 จากกระบวนการผลิตที่ถูกต้องนั้น องค์กรจึงได้รับความน่าเชื่อถือและไว้วางใจจากลูกค้า โดยลูกค้ามอบหมายงานให้ผลิตมากยิ่งขึ้น

5.3.6 พนักงานและผู้ประกอบการมีรายได้เพิ่มขึ้นเนื่องจากการผลิตที่เพิ่มจำนวนขึ้น ส่งผลดีต่อรายได้ครอบครัวของพนักงานและเศรษฐกิจของประเทศ

5.3.7 ช่วยลดการใช้วัสดุและพลังงานที่สิ้นเปลืองขององค์กรและประเทศชาติ

5.3.8 ภาคอุตสาหกรรมของประเทศได้รับการยอมรับและเชื่อถือต่อนานาชาติ ส่งผลให้ประเทศไทยมีประสิทธิภาพในการแข่งขันกับนานาชาติประเทศทั่วโลกมากยิ่งขึ้น

ภาคผนวก ก

ข้อมูลบันทึกผลการจำลอง



ตารางที่ ก.1 ผลการจำลองการคัดขึ้นรูปตัววีวัสดุเหล็กทนแรงดึงสูงที่ความเค้นคราก 30

ชั้น ที่	รัศมี ตาย	รัศมี พ้นซ์	รัศมีปาก ตาย	ความเค้น คราก	มุมขึ้นงาน	kR	รัศมีพ้นซ์
1	5	3	10	300	84.6	0.940	2.760
2	5	3	12.5	300	90.55	1.006	3.024
3	5	3	15	300	84.61	0.940	2.760
4	5	3	17.5	300	90.96	1.011	3.043
5	5	3	20	300	92.34	1.026	3.104
6	5	3	22.5	300	88.07	0.979	2.914
7	10	8	10	300	86.79	0.964	7.679
8	10	8	12.5	300	88.27	0.981	7.827
9	10	8	15	300	86.79	0.964	7.679
10	10	8	17.5	300	87.54	0.973	7.754
11	10	8	20	300	90	1.000	8.000
12	10	8	22.5	300	90	1.000	8.000
13	15	13	10	300	94.41	1.049	13.686
14	15	13	12.5	300	95.62	1.062	13.874
15	15	13	15	300	94.41	1.049	13.686
16	15	13	17.5	300	91.46	1.016	13.227
17	15	13	20	300	94.1	1.046	13.638
18	15	13	22.5	300	92.83	1.031	13.440
19	20	18	10	300	95.99	1.067	19.265
20	20	18	12.5	300	92.53	1.028	18.534
21	20	18	15	300	95.99	1.067	19.265
22	20	18	17.5	300	95.22	1.058	19.102
23	20	18	20	300	96.8	1.076	19.436
24	20	18	22.5	300	91.54	1.017	18.325
25	25	23	10	300	96.69	1.074	24.784
26	25	23	12.5	300	95.23	1.058	24.395
27	25	23	15	300	96.7	1.074	24.787
28	25	23	17.5	300	98.32	1.092	25.219
29	25	23	20	300	99.21	1.102	25.456
30	25	23	22.5	300	100.33	1.115	25.755
31	30	28	10	300	97.49	1.083	30.413
32	30	28	12.5	300	99.65	1.107	31.109
33	30	28	15	300	100.74	1.119	31.461
34	30	28	17.5	300	103.3	1.148	32.286
35	30	28	20	300	100.02	1.111	31.229
36	30	28	22.5	300	103.65	1.152	32.398

ตารางที่ ก.2 ผลการจำลองการตัดขึ้นรูปตัววัสดุเหล็กทนแรงดึงสูงที่ความเค้นคราก 350

ชั้น ที่	รัศมี ด้าย	รัศมี พันธ	รัศมีปาก ด้าย	ความเค้น คราก	มุมขึ้นงาน	kR	รัศมีพันธ
1	5	3	10	350	86.48	0.961	2.844
2	5	3	12.5	350	88.16	0.980	2.918
3	5	3	15	350	90.68	1.008	3.030
4	5	3	17.5	350	83.61	0.929	2.716
5	5	3	20	350	89.56	0.995	2.980
6	5	3	22.5	350	89.13	0.990	2.961
7	10	8	10	350	87.12	0.968	7.712
8	10	8	12.5	350	87.72	0.975	7.772
9	10	8	15	350	86.48	0.961	7.648
10	10	8	17.5	350	88.83	0.987	7.883
11	10	8	20	350	90.52	1.006	8.052
12	10	8	22.5	350	88.7	0.986	7.870
13	15	13	10	350	94.73	1.053	13.736
14	15	13	12.5	350	93.95	1.044	13.614
15	15	13	15	350	94.73	1.053	13.736
16	15	13	17.5	350	95.34	1.059	13.831
17	15	13	20	350	89.81	0.998	12.970
18	15	13	22.5	350	96.26	1.070	13.974
19	20	18	10	350	96.26	1.070	19.322
20	20	18	12.5	350	96.01	1.067	19.269
21	20	18	15	350	96.26	1.070	19.322
22	20	18	17.5	350	93.63	1.040	18.766
23	20	18	20	350	94.95	1.055	19.045
24	20	18	22.5	350	92.56	1.028	18.540
25	25	23	10	350	96.9	1.077	24.840
26	25	23	12.5	350	97.01	1.078	24.869
27	25	23	15	350	97.26	1.081	24.936
28	25	23	17.5	350	94.21	1.047	24.123
29	25	23	20	350	95.3	1.059	24.413
30	25	23	22.5	350	95.96	1.066	24.589
31	30	28	10	350	97.87	1.087	30.536
32	30	28	12.5	350	100.74	1.119	31.461
33	30	28	15	350	97.87	1.087	30.536
34	30	28	17.5	350	99.42	1.105	31.035
35	30	28	20	350	106.2	1.180	33.220
36	30	28	22.5	350	111.38	1.238	34.889

ตารางที่ ก.3 ผลการจำลองการตัดขึ้นรูปตัววัสดุเหล็กทนแรงดึงสูงที่ความเค้นคราก 400

ชั้น ที่	รัศมี ดาย	รัศมี พื้นที่	รัศมีปาก ดาย	ความเค้น คราก	มุม ขึ้นงาน	มุม พื้นที่	รัศมีพื้นที่
1	5	3	10	400	86.16	0.957	2.829
2	5	3	12.5	400	90.93	1.010	3.041
3	5	3	15	400	86.16	0.957	2.829
4	5	3	17.5	400	88.27	0.981	2.923
5	5	3	20	400	88.09	0.979	2.915
6	5	3	22.5	400	84.63	0.940	2.761
7	10	8	10	400	88.37	0.982	7.837
8	10	8	12.5	400	88.34	0.982	7.834
9	10	8	15	400	88.37	0.982	7.837
10	10	8	17.5	400	89.21	0.991	7.921
11	10	8	20	400	93.08	1.034	8.308
12	10	8	22.5	400	93.2	1.036	8.320
13	15	13	10	400	94.77	1.053	13.742
14	15	13	12.5	400	94.79	1.053	13.745
15	15	13	15	400	94.77	1.053	13.742
16	15	13	17.5	400	95	1.056	13.778
17	15	13	20	400	96.16	1.068	13.958
18	15	13	22.5	400	96.46	1.072	14.005
19	20	18	10	400	97	1.078	19.478
20	20	18	12.5	400	95.69	1.063	19.201
21	20	18	15	400	95.77	1.064	19.218
22	20	18	17.5	400	94.98	1.055	19.051
23	20	18	20	400	97.16	1.080	19.512
24	20	18	22.5	400	97.46	1.083	19.575
25	25	23	10	400	97.16	1.080	24.909
26	25	23	12.5	400	95.71	1.063	24.523
27	25	23	15	400	95.32	1.059	24.419
28	25	23	17.5	400	97.63	1.085	25.035
29	25	23	20	400	97.26	1.081	24.936
30	25	23	22.5	400	96.53	1.073	24.741
31	30	28	10	400	97.16	1.080	30.307
32	30	28	12.5	400	92.73	1.030	28.880
33	30	28	15	400	97.16	1.080	30.307
34	30	28	17.5	400	99.42	1.105	31.035
35	30	28	20	400	102.75	1.142	32.108
36	30	28	22.5	400	96.63	1.074	30.136

ตารางที่ ก.4 ผลการจำลองการดัดขึ้นรูปตัววัสดุเหล็กทนแรงดึงสูงที่ความเค้นคราก 450

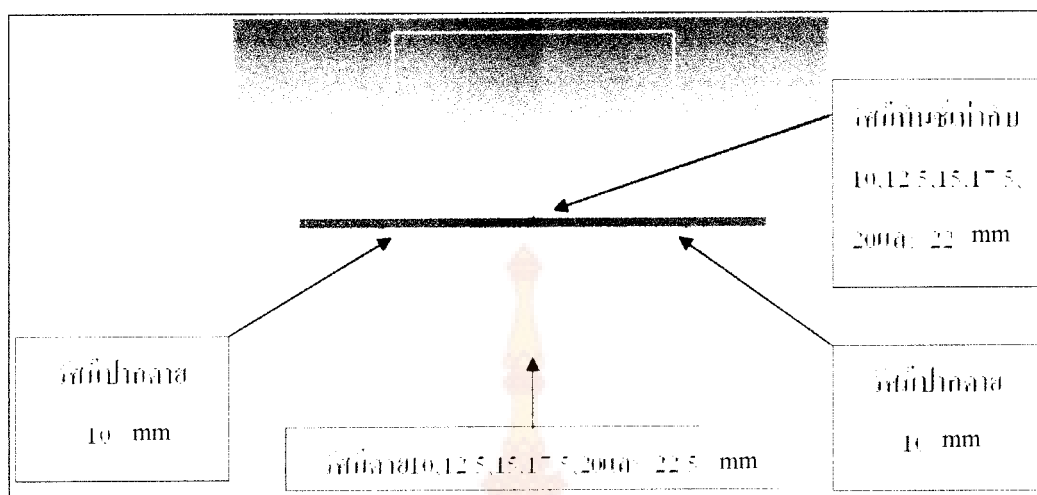
ชั้น ที่	รัศมี ตาย	รัศมี พันธ	รัศมีปาก ตาย	ความเค้น คราก	มุมขึ้นงาน	kR	รัศมีพันธ
1	5	3	10	450	87.47	0.972	2.888
2	5	3	12.5	450	92.76	1.031	3.123
3	5	3	15	450	87.47	0.972	2.888
4	5	3	17.5	450	86.18	0.958	2.830
5	5	3	20	450	88.09	0.979	2.915
6	5	3	22.5	450	85.9	0.954	2.818
7	10	8	10	450	89.43	0.994	7.943
8	10	8	12.5	450	89.3	0.992	7.930
9	10	8	15	450	89.44	0.994	7.944
10	10	8	17.5	450	87.87	0.976	7.787
11	10	8	20	450	91.46	1.016	8.146
12	10	8	22.5	450	90	1.000	8.000
13	15	13	10	450	94.95	1.055	13.770
14	15	13	12.5	450	95.88	1.065	13.915
15	15	13	15	450	94.95	1.055	13.770
16	15	13	17.5	450	94.36	1.048	13.678
17	15	13	20	450	89.25	0.992	12.883
18	15	13	22.5	450	97.49	1.083	14.165
19	20	18	10	450	96.49	1.072	19.370
20	20	18	12.5	450	96.79	1.075	19.433
21	20	18	15	450	96.77	1.075	19.429
22	20	18	17.5	450	95.21	1.058	19.100
23	20	18	20	450	97.63	1.085	19.611
24	20	18	22.5	450	97.56	1.084	19.596
25	25	23	10	450	97.29	1.081	24.944
26	25	23	12.5	450	96.03	1.067	24.608
27	25	23	15	450	96.46	1.072	24.723
28	25	23	17.5	450	97.65	1.085	25.040
29	25	23	20	450	95.09	1.057	24.357
30	25	23	22.5	450	97.53	1.084	25.008
31	30	28	10	450	97.43	1.083	30.394
32	30	28	12.5	450	98.8	1.098	30.836
33	30	28	15	450	97.43	1.083	30.394
34	30	28	17.5	450	105.05	1.167	32.849
35	30	28	20	450	112.23	1.247	35.163
36	30	28	22.5	450	99.93	1.110	31.200

ตารางที่ ก.5 ผลการจำลองการคัดเลือกรูปตัววีวัสดุเหล็กทนแรงดึงสูงที่ความเค้นคราก 500

ชั้น ที่	รัศมี ตาย	รัศมี พื้นซ์	รัศมีปาก ตาย	ความเค้น คราก	มุมชิ้นงาน	kR	รัศมีพื้นซ์
1	5	3	10	500	87.52	0.972	2.890
2	5	3	12.5	500	86.05	0.956	2.824
3	5	3	15	500	87.22	0.969	2.876
4	5	3	17.5	500	90	1.000	3.000
5	5	3	20	500	89.58	0.995	2.981
6	5	3	22.5	500	90	1.000	3.000
7	10	8	10	500	91.33	1.015	8.133
8	10	8	12.5	500	91.45	1.016	8.145
9	10	8	15	500	91.33	1.015	8.133
10	10	8	17.5	500	93.96	1.044	8.396
11	10	8	20	500	88.77	0.986	7.877
12	10	8	22.5	500	93.57	1.040	8.357
13	15	13	10	500	95.81	1.065	13.904
14	15	13	12.5	500	89.61	0.996	12.939
15	15	13	15	500	95.81	1.065	13.904
16	15	13	17.5	500	96.17	1.069	13.960
17	15	13	20	500	96.85	1.076	14.066
18	15	13	22.5	500	89.97	1.000	12.995
19	20	18	10	500	96.69	1.074	19.412
20	20	18	12.5	500	96.02	1.067	19.271
21	20	18	15	500	97.4	1.082	19.562
22	20	18	17.5	500	97.61	1.085	19.607
23	20	18	20	500	95.8	1.064	19.224
24	20	18	22.5	500	97.73	1.086	19.632
25	25	23	10	500	97.8	1.087	25.080
26	25	23	12.5	500	97.82	1.087	25.085
27	25	23	15	500	98.6	1.096	25.293
28	25	23	17.5	500	98.26	1.092	25.203
29	25	23	20	500	98.64	1.096	25.304
30	25	23	22.5	500	97.98	1.089	25.128
31	30	28	10	500	98.58	1.095	30.765
32	30	28	12.5	500	99.18	1.102	30.958
33	30	28	15	500	105.79	1.175	33.088
34	30	28	17.5	500	109.64	1.218	34.328
35	30	28	20	500	113.71	1.263	35.640
36	30	28	22.5	500	107.1	1.190	33.510

ตารางที่ ก.6 ผลการจำลองการดัดขึ้นรูปตัววีวัสดุเหล็กทนแรงดึงสูงที่ความเค้นคราก 550

ชั้น ที่	รัศมี ตาย	รัศมี พื่นซ์	รัศมีปาก ตาย	ความเค้น คราก	มุมขึ้นงาน	kR	รัศมีพื่นซ์
1	5	3	10	550	87.72	0.975	2.899
2	5	3	12.5	550	84.23	0.936	2.744
3	5	3	15	550	84.61	0.940	2.760
4	5	3	17.5	550	85.7	0.952	2.809
5	5	3	20	550	83.39	0.927	2.706
6	5	3	22.5	550	86.39	0.960	2.840
7	10	8	10	550	93.64	1.040	8.364
8	10	8	12.5	550	91.39	1.015	8.139
9	10	8	15	550	93.64	1.040	8.364
10	10	8	17.5	550	97.91	1.088	8.791
11	10	8	20	550	88.2	0.980	7.820
12	10	8	22.5	550	89.04	0.989	7.904
13	15	13	10	550	96.6	1.073	14.027
14	15	13	12.5	550	96.41	1.071	13.997
15	15	13	15	550	96.61	1.073	14.028
16	15	13	17.5	550	88.93	0.988	12.834
17	15	13	20	550	92.69	1.030	13.418
18	15	13	22.5	550	89.98	1.000	12.997
19	20	18	10	550	97.01	1.078	19.480
20	20	18	12.5	550	98.31	1.092	19.754
21	20	18	15	550	98.28	1.092	19.748
22	20	18	17.5	550	96.25	1.069	19.319
23	20	18	20	550	97.04	1.078	19.486
24	20	18	22.5	550	97.21	1.080	19.522
25	25	23	10	550	98.01	1.089	25.136
26	25	23	12.5	550	98.64	1.096	25.304
27	25	23	15	550	98	1.089	25.133
28	25	23	17.5	550	98.97	1.100	25.392
29	25	23	20	550	99.27	1.103	25.472
30	25	23	22.5	550	99.98	1.111	25.661
31	30	28	10	550	100.08	1.112	31.248
32	30	28	12.5	550	108.54	1.206	33.974
33	30	28	15	550	108	1.200	33.800
34	30	28	17.5	550	100.32	1.115	31.325
35	30	28	20	550	96.86	1.076	30.210
36	30	28	22.5	550	112.47	1.250	35.240



รูปที่ ก.1 แสดงรัศมีค่าต่างๆสำหรับการวิเคราะห์การจำลอง

การจำลองการคัดขึ้นรูปตัววีสำหรับวัสดุเหล็กทนแรงดึงสูงเพื่อเปรียบเทียบค่ารัศมีพันซ์ต่อไปนี้เป็นรัศมีพันซ์เท่ากับ 10, 12.5, 15, 17.5, 20 และ 22.5 mm ที่ส่งผลต่อการเกิดการคีดตัวกลับที่ความเค้นครากเท่ากับ 350 N/mm^2 รัศมีปากคดเท่ากับ 10 mm และมุมของแม่พิมพ์เท่ากับ 90°

ตารางที่ ก.7 แสดงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การคีดตัวกลับจากการจำลอง

ลำดับที่	รัศมีพันซ์(มม.)(r1)	รัศมีขึ้นงานหลังคัด(มม.)(r2)	ค่าสัมประสิทธิ์การคีดตัวกลับ(kR)
1	10	9.870	0.987
2	12.5	12.368	0.989
3	15	14.909	0.993
4	17.5	17.411	0.994
5	20	20.074	1.003
6	22.5	22.808	1.013

ตารางที่ ก.8 แสดงการคำนวณความเค้นครากที่ส่งผลต่อการกัดตัวกลับ

ความเค้น คราก	รศมีคาย	รศมีพันซ์	รศมีปากคาย	มุมแม่พิมพ์ α_1	มุมชันงาน α_2	สัมประสิทธิ์การ กัดตัวกลับ(kR)
300	10	8	10	90	88.23	0.980
350	10	8	10	90	88.94	0.988
400	10	8	10	90	89.5	0.994
450	10	8	10	90	89.68	0.996
500	10	8	10	90	89.8	0.998
550	10	8	10	90	92.82	1.031

ตารางที่ ก.9 แสดงค่าการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกัดตัวกลับของมุมแม่พิมพ์

รศมีคาย	รศมีพันซ์	ความเค้นคราก	รศมีปาก คาย	มุม แม่พิมพ์	มุม ชันงาน	ค่าสัมประสิทธิ์การ กัดตัวกลับ
10	8	350	10	30	29.534	0.984
10	8	350	10	60	58.090	0.985
10	8	350	10	90	88.940	0.988
10	8	350	10	120	118.750	0.989

ภาคผนวก ข

ข้อมูลบันทึกผลการทดลอง



ตารางที่ ข.1 แสดงข้อมูลการวัดชิ้นงานหลังการดัดขึ้นรูป

ข้อมูลการวัดมุมชิ้นงานหลังการทดลองการดัดขึ้นรูป

แนวการรีด		45			90			180		
รัศมี	ชิ้นที่	หนา1.5	หนา2		หนา	หนา		หนา	หนา	
พื้นที่	พื้นที่	mm	mm	kR	1.5mm	2mm	kR	1.5mm	2mm	kR
R10	1		82.2	0.913		85.2	0.947		86.4	0.960
	2	81		0.900	84.45		0.938	84.25		0.936
	3		83.35	0.926		83.2	0.924	84.5		0.939
	4		77	0.856		84.2	0.936	84.25		0.936
	5		83	0.922		83.25	0.925		86.15	0.957
R12.5	1	76.35		0.848	87.45		0.972		81.4	0.904
	2		79.4	0.882		80.3	0.892		81.35	0.904
	3	80		0.889		80.45	0.894	81.45		0.905
	4	80		0.889		81	0.900	81.45		0.905
	5	79.3		0.881	80.55		0.895	82		0.911
R15	1		91.15	1.013		93.25	1.036		94	1.044
	2		92.5	1.028	93.3		1.037		94.1	1.046
	3		91.2	1.013		92.35	1.026	93.55		1.039
	4	92		1.022		92.45	1.027	94.3		1.048
	5	92.3		1.026	92.5		1.028	94		1.044
R17.5	1		90	1.000	92		1.022	92.3		1.026
	2		91	1.011	92.5		1.028	93.1		1.034
	3	91.2		1.013	93		1.033	92.35		1.026
	4	91.4		1.016		90.4	1.004		90.45	1.005
	5	86.3		0.959		91	1.011		91.45	1.016

R20	1	94.45		1.049	93.55		1.039		94.45	1.049
	2	94.25		1.047	93.3		1.037		95	1.056
	3		93.3	1.037	93.1		1.034		94.2	1.047
	4		93.5	1.039		96	1.067	96		1.067
	5		93.1	1.034		96	1.067	96		1.067
R22.5	1		94	1.044	96.15		1.068		96.3	1.070
	2		94	1.044	96.25		1.069	92.55		1.028
	3	96.5		1.072	96.15		1.068	92.1		1.023
	4	96		1.067		95	1.056		96	1.067
	5	96.5		1.072		95.5	1.061		96.3	1.070

ตารางที่ ข.2 คำนวณค่าเฉลี่ยรวมของการวัดมุมหลังการตัด

	45		90		180	
	1.5	2	1.5	2	1.5	2
10	0.900	0.913	0.938	0.924	0.936	0.960
12.5	0.889	0.882	0.972	0.900	0.911	0.904
15	1.022	1.013	1.028	1.026	1.039	1.044
17.5	1.013	1.011	1.033	1.011	1.034	1.016
20	1.047	1.037	1.039	1.007	1.067	1.049