



เทคโนโลยีใหม่ในการกำจัดปัญหาผนังโค้งกระบวนการ  
Draw-bending บนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

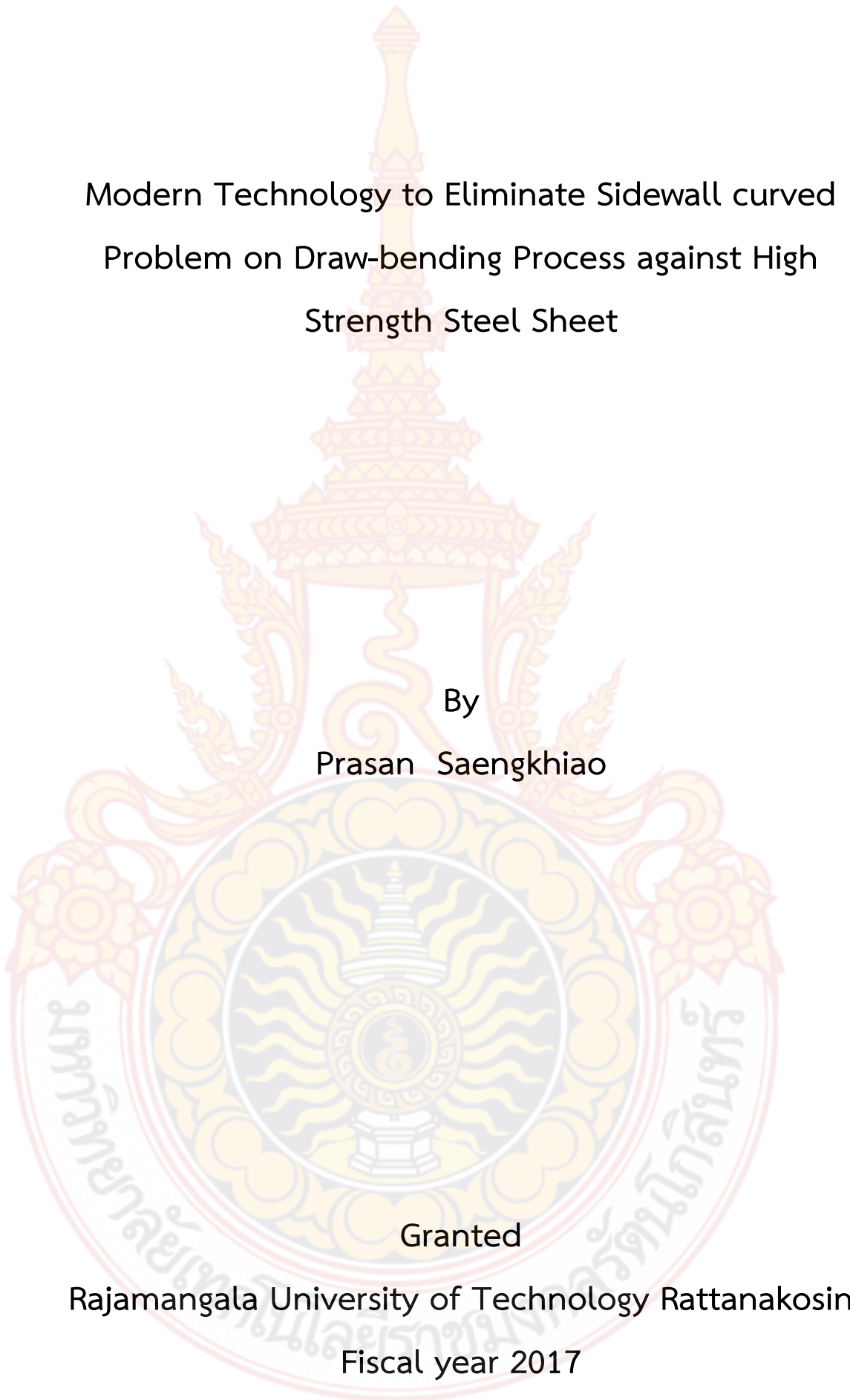
โดย

นายประสาน แสงเขียว

สนับสนุนงบประมาณโดย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ประจำปีงบประมาณ 2560



Modern Technology to Eliminate Sidewall curved  
Problem on Draw-bending Process against High  
Strength Steel Sheet

By

Prasan Saengkhaio

Granted

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2017

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสภาวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๐ ในแผนงานบูรณาการส่งเสริมการวิจัยและพัฒนา ภายใต้โครงการวิจัยเพื่อสร้าง สะสมองค์ความรู้ที่มี ศักยภาพ กิจกรรม วิจัยประยุกต์ ในโครงการวิจัย เรื่อง “เทคโนโลยีใหม่ในการกำจัดปัญหาน้ำค้าง กระทบวงการ Draw-bending บนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง” เลขที่สัญญารับทุน /2560

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในการ สนับสนุนและดูแลโครงการวิจัยนี้ตลอดมา

ประสาน แสงเขียว  
กรกฎาคม 2560



## บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : /2560

ชื่อโครงการ : เทคโนโลยีใหม่ในการกำจัดปัญหาผนังโค้งกระบวนการ Draw-bending บน  
เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

ชื่อนักวิจัย : นายประสาน แสงเขียว

ปัจจุบันปัญหาผนังโค้งในกระบวนการดัดขึ้นรูปเป็นปัญหาใหญ่ที่สุดประการหนึ่งในการขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง โดยทั่วไปการดัดตัวกลับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายลดการเกิดปัญหาผนังโค้งของชิ้นงานในกระบวนการดัดรูปด้วย

ในกระบวนการดัดประกอบด้วยส่วนสำคัญสามขั้นตอนคือการหนีบแผ่นระหว่างพันธ์และแผ่นรอง, ดัดขึ้นรูปและสุดท้ายกดปีกของชิ้นงาน

ผลกระทบของแรงจับยึดถูกตรวจสอบด้วยการทดลองบนแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง จากการทดสอบการรวมกันของแรงหนีบที่เหมาะสมสามารถลดสปริงกลับและปรับปรุงคุณภาพความเรียบที่ด้านล่างของแผ่น และการลดความเค้นที่ผนังของชิ้นงานสามารถลดปัญหาผนังโค้งได้ ในการศึกษากลไกการลดสปริงเบรคในขั้นตอนการดัดรูปด้วย ในสามขั้นตอนข้างต้นการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์

จากการจำลองพบว่ากลไกสำคัญของการแก้ปัญหาผนังโค้งคือการลดโมเมนต์ดัดในขั้นตอนสุดท้ายของการขึ้นรูป

---

คำสำคัญ : เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง, ปัญหาผนังโค้ง, กระบวนการดัดขึ้นรูปด้วย

E-mail Address : [Prasan.san@rmutr.ac.th](mailto:Prasan.san@rmutr.ac.th)

ระยะเวลาโครงการ : ๑ ตุลาคม ๒๕๕๙ – ๓๐ กันยายน ๒๕๖๐

## Abstract

**Code of project :** /2560

**Project name :** Modern Technology to Eliminate Sidewall curved Problem on Draw-bending Process against High Strength Steel Sheet

**Researcher name :** PRASAN SANKHLEO

Nowadays, side wall curved is one of the most serious problems in bending process of HSS sheest; in general, springback angle increases as the strength of material increases. The aim of this paper is to reduce wall curved problem of workpiece in U bending process.

The U-bending consisted of three steps starting with clamping of a sheet between a punch and a counter punch, then U-bending, and finally press flange by using pad pressure. The effect of clamping force was investigated by performing experiments on high strength steel sheets.

From the experiment, an appropriate combination of the clamping force can be reduced springback and improve flatness quality of bottom of the sheets. The decreasing of stress at the wall of the sheet can reduced the side wall curved problem of the sheet. To investigate the mechanism of the reduction of springback in the above three-step U-bending process, FE simulation of the bending was also conducted where the FE-simulation was employed.

From the result of simulation, it was found that the major mechanism of the side wall curved problem in this process is the decrease of bending moment during the bending.

---

**Keywords:** High strength steel, Side wall curved, U-bending process

**E-mail Address :** [Prasan.san@mutr.ac.th](mailto:Prasan.san@mutr.ac.th)

**Period of project :** 1 October 2016 – 31 September 201

## สารบัญ

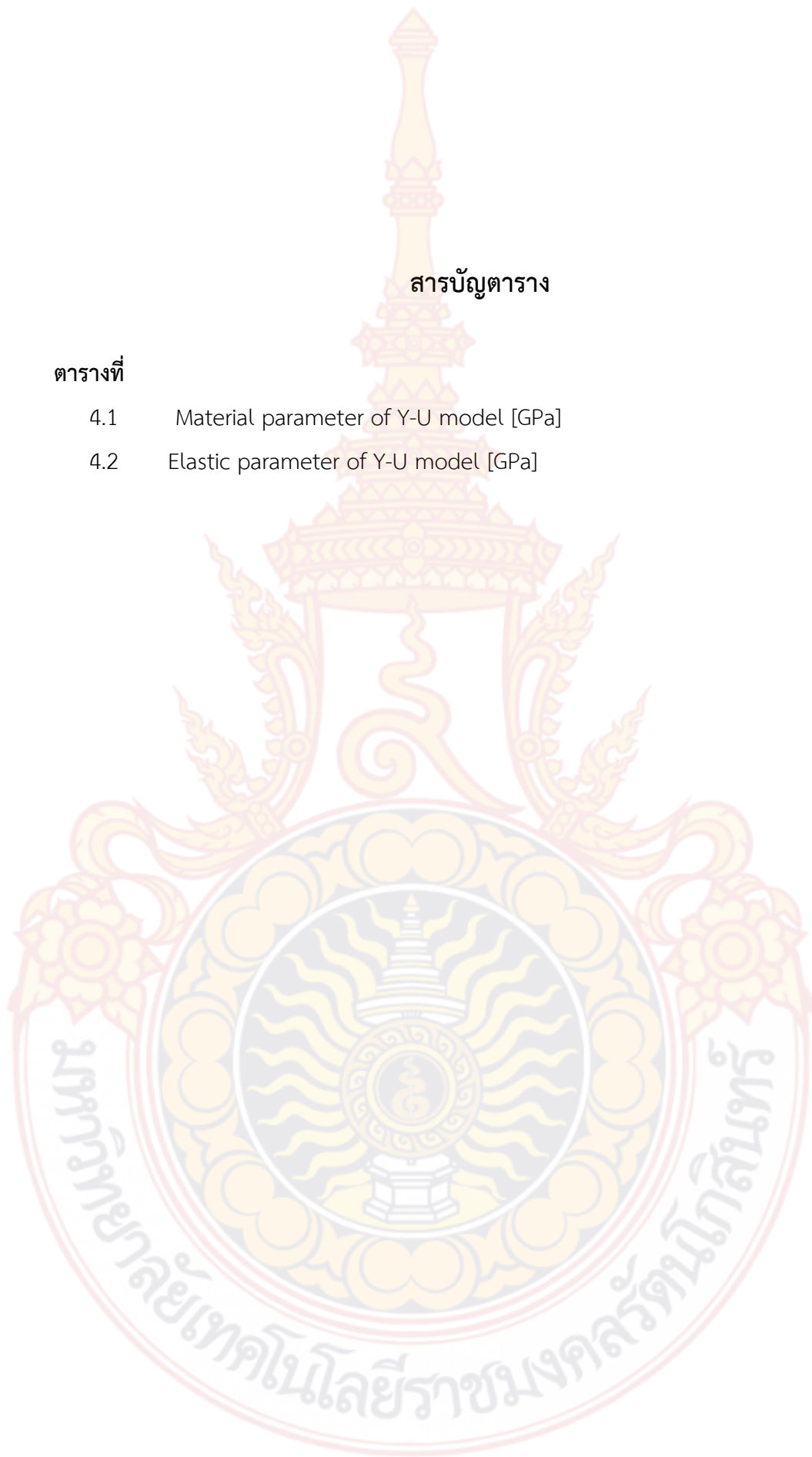
	หน้า	
กิตติกรรมประกาศ	ก	
บทคัดย่อภาษาไทย	ข	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค	
สารบัญ	ง	
สารบัญตาราง	ฉ	
สารบัญภาพ	ช	
<b>บทที่ 1</b>	<b>บทนำ</b>	<b>1</b>
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
	1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
<b>บทที่ 2</b>	<b>ทฤษฎี และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย</b>	<b>3</b>
	2.1 ทฤษฎีการตัดโลหะแผ่น	7
	2.2 การเคลื่อนตัวของโลหะ	9
	2.3 การตัดตัวกลับ	10
	2.4 คุณสมบัติทางกลของวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ	15
	2.5 กรอบแนวคิดการวิจัย	23
	2.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง	24
<b>บทที่ 3</b>	<b>ระเบียบวิธีการวิจัย</b>	<b>29</b>
	3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	30
	3.2 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัย	30
	3.3 เครื่องจักรกลที่ใช้สนับสนุนงานวิจัย	31
	3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล	36

## สารบัญ (ต่อ)

<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการวิจัยและผลการวิเคราะห์</b>	<b>31</b>
	4.1 ผลการทดสอบการตัดขึ้นรูปแบบไม่มีแผ่นรอง	31
	4.2 ผลการทดสอบการตัดขึ้นรูปแบบมีแผ่นรองและต้นกลับ	32
	4.3 แรงดันที่ส่งผลต่อการติดตัวกลับ	33
	4.4 ความแข็งแรงของวัสดุที่ส่งผลต่อการติดตัวกลับ	35
	4.5 การนำผลการทดสอบสมบัติแรงดึง-แรงอัดไปใช้ในการจำลองการขึ้นรูป เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์	35
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ</b>	<b>39</b>
	5.1 สรุปผลการวิจัย	39
	5.2 ข้อเสนอแนะ	40
<b>บรรณานุกรม</b>		<b>41</b>
ภาคผนวก ก	รูปร่างชิ้นงาน	44
ภาคผนวก ข	ส่วนผสมทางเคมี	46
ภาคผนวก ค	ผลการทดสอบแรงดึง	48
ประวัติผู้วิจัย		55

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	Material parameter of Y-U model [GPa]	35
4.2	Elastic parameter of Y-U model [GPa]	35





## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ประเภทของเหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ แบ่งตามความสัมพันธ์ของความแข็งแรงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว	3
2	ความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ตัด	6
3	การเคลื่อนตัวของโลหะ	8
4	กลไกการเกิดการติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป	8
5	การตัดให้มุมมากกว่าที่ต้องการ	9
6	การยืดชิ้นงานก่อนการตัด	10
7	มุมมองของชิ้นงานที่ต้องการตัดและที่ได้หลังจากการตัด	11
8	เครื่องทดสอบแรงดึง	11
9	ตัวอย่างชิ้นทดสอบแรงดึง	12
10	การจับยึดชิ้นงาน	12
11	กราฟความเค้น – ความเครียดของโลหะที่มีคุณสมบัติเหนียว	13
12	คุณสมบัติทางกลของโลหะแบบเหนียวภายใต้แรงในแนวแกน	14
13	การเกิดคอคอดของโลหะขณะรับแรงดึง	14
14	รอยขาดของชิ้นงานแบบเหนียว	15
15	การหาค่า yield strength บน stress-strain curve	16
16	Stress – strain curve ของวัสดุทองเหลือง	17
17	กลไกการเกิดการปัญหาผนังโค้ง	18
18	การกระจายความเค้นที่ผนังชิ้นงาน	18
19	ชิ้นงานจากการใช้กระบวนการแม่เหล็กไฟฟ้าในการแก้ปัญหาผนังโค้ง	19
20	arc bottoming process	20
21	pinching die process	20
22	การติดตั้งแม่พิมพ์บน CNC servo press	21

23	sided coined-bead process	21
24	พันธึ่และตายในการทดลอง	24
25	ชั้นส่วนแม่พิมพ์	25

### สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	เครื่องปั้โลหะแบบไฮดรอลิกส์ขนาด 50 ตัน	
27	ประเภทของเหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์แบ่งตาม ความสัมพันธ์ของความแข็งแรงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว	26
28	แบบจำลอง	27
29	ชุดกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	
30	เครื่อง CNC CMM	27
31	วิธีการวัดการตีตัวกลับ	28
32	ทดสอบการตัดขึ้นรูปแบบไม่มีแผ่นรอง	28
33	ผลการทดสอบการตัดขึ้นรูปแบบไม่มีการดันกลับ	29
34	การตัดขึ้นรูปแบบมีแผ่นรอง	31
35	การตัดขึ้นรูปแบบมีแผ่นรองและดันกลับ	31
36	ผลการทดสอบการตัดขึ้นรูปใช้แรงแผ่นรอง 2 kN	32
37	ผลการทดสอบการตัดขึ้นรูปใช้แรงแผ่นรอง 4 kN	32
38	ผลการทดสอบการตัดขึ้นรูปใช้แรงแผ่นรอง 6 kN	33
39	การกระจายตัวของความเค้นเหล็กกล้าเกรดความแข็งแรงสูง 980	34
40	การกระจายตัวของความเค้นเหล็กกล้าเกรดความแข็งแรงสูง 980 เมื่อใช้แรงดันด้านล่าง	34 36
41	ตัวอย่างชิ้นงานเหล็กกล้าเกรดความแข็งแรงสูง 980	36
		37



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นได้มีการพัฒนาและขยายตัวอย่างต่อเนื่อง เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมก่อสร้างและ อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น ซึ่งในแต่ละแห่งนั้นล้วนเป็นภาคส่วนที่ต้องการผลิตภัณฑ์คุณภาพสูง ทั้งสิ้น ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นอีกอุตสาหกรรมการผลิตภายในประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยเป็นฐานการผลิตหลักในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ทั้งค่ายเอเชียและยุโรป ทำให้มี โรงงานอุตสาหกรรมด้านยานยนต์อยู่มากมายซึ่งหนึ่งในชิ้นส่วนรถยนต์ที่สำคัญมากคือ ชิ้นส่วนตัวยุ แบบมีปีกหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Draw-bending (Hat shape) เป็นหนึ่งในชิ้นส่วนที่ถูกผลิตเพื่อใช้ใน รถยนต์มากเป็นอันดับต้นๆ อาทิเช่น beam และ center pillar [1-2] ซึ่งปัญหาหลักที่พบบนชิ้นงาน ในกระบวนการนี้คือ ปัญหาผนังโค้ง (side wall curved) โดยเฉพาะเมื่อใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเป็น วัสดุดิบ เนื่องจากต้องการการลดน้ำหนักโดยรวมของรถยนต์ลง เหล็กกล้าความแข็งแรง จึงถูก พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการผลิตโครงสร้างหรือชิ้นส่วนยานยนต์ที่ต้องการความสามารถในด้านของการ รับแรงกระแทกได้เป็นอย่างดี และด้วยความที่เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรง ชิ้นรูปยาก มีคุณสมบัติ เฉพาะตัวมาก การดัดตัวกลับสูง 8-10 องศา ในขณะที่อุตสาหกรรมรถยนต์ต้องการการค่าพิถีพิถัน ความ เพื่อในการประกอบร่วมกับชิ้นงานอื่นน้อยมากเมื่อเกิดปัญหาผนังโค้งและดัดตัวกลับ ทำให้เกิดการ สูญเสียเวลาและค่าใช้จ่ายกับการทดลองพิมพ์เป็นจำนวนมาก หลายๆแห่งต้องประสบปัญหาจากการ รับทำแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงนี้ ซึ่งปัญหาผนังโค้งเกิดจากกลไกการเปลี่ยนรูปที่ ซับซ้อน กล่าวคือพบทั้งความเค้นดึง และความเค้นอัดสูงมากในบริเวณเดียวกัน ทำให้เกิดการบิดเบี้ยว เสียรูปงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างประโยชน์ให้กับอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นมากที่สุด ซึ่งผู้วิจัยเล็งเห็นการแก้ไขปัญหาผนังโค้งในกระบวนการดัดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการออกแบบ แม่พิมพ์สมัยใหม่เพื่อลดความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป ทำให้ได้ชิ้นงานที่ปราศจากผนังโค้ง ซึ่ง ถือว่าเป็นสิ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากเทคโนโลยีนี้สามารถสร้างชิ้นงานที่มีขนาดถูกต้องเพื่อ รองรับอุตสาหกรรมขึ้นรูปโลหะแผ่น

นอกจากนี้จุดเด่นของเทคโนโลยีนี้ยังสามารถใช้งานขึ้นรูปได้กับทุกชนิดวัสดุ ทำให้งานวิจัยนี้ ตอบโจทย์ของภาคการผลิตได้เป็นอย่างดีในด้านการเพิ่มคุณภาพและลดต้นทุนการผลิต ภายหลังจาก การเผยแพร่ข้อมูลสู่ภาคอุตสาหกรรม จะช่วยลดขั้นตอนในการลองพิมพ์ ซึ่งเป็นการยกระดับ เทคโนโลยีการผลิตในภาพรวมได้

## 2. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 2.1 เพื่อกำจัดปัญหาผนังโค้งในกระบวนการ Draw-bending
- 2.2 สร้างเทคโนโลยีใหม่โดยการใช้แม่พิมพ์เพียง 1 ชุดสามารถกำจัดปัญหาผนังโค้งได้กับโลหะทุกประเภท
- 2.3 สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของโลหะภายใต้กลไกการเปลี่ยนรูปที่ซับซ้อนด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์
- 2.4 สามารถกำจัดปัญหาผนังโค้งอย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้ตัวแปรในการทำงานน้อยที่สุด

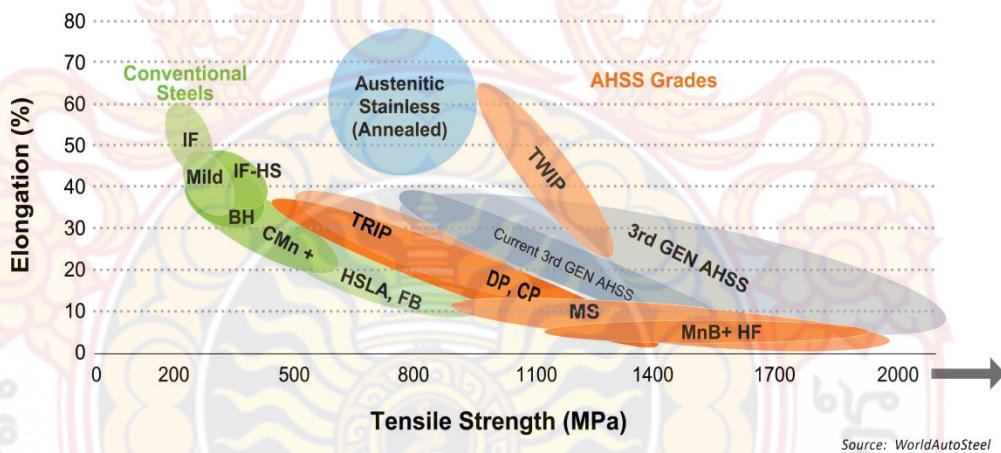
## 3. ขอบเขตการวิจัย

- 3.1 ศึกษาสมบัติทางกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด TRIP 780 MPa, DP 980 และ Stainless steel 430 หนา 1.2 มิลลิเมตร
- 3.2 ใช้วิธีการทาง Finite element คำนวณรายละเอียดชิ้นส่วนของแม่พิมพ์เพื่อให้ได้แม่พิมพ์ Draw-bending ที่สมบูรณ์ที่สุด
- 3.3 ออกแบบแม่พิมพ์เพื่อรองรับกระบวนการ Draw-bending มุ่งเน้นการสลายปัญหาผนังโค้ง โดยกำหนดให้ใช้เพียงแม่พิมพ์ 1 ตัว สามารถใช้ขึ้นรูปได้กับโลหะทุกประเภท
- 3.4 ทดสอบดัดชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ Draw-bending ใช้ความเร็วคงที่คือ 30 มิลลิเมตร/นาทีและปราศจากสารหล่อลื่น
- 3.5 ศึกษาอิทธิพลของแรงกดชิ้นงานในระดับต่างกันสามระดับ คือ 20kN, 30kN และ 40 kN ว่าส่งผลต่อความถูกต้องของรูปร่างชิ้นงานสำเร็จอย่างไร
- 3.6 จำนวนการทำซ้ำเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่างานวิจัยนี้สามารถควบคุมการติดตัวกลับได้จริงจะคำนวณจากการติดตัวกลับของ Sample เริ่มต้น
- 3.7 สร้างแบบจำลองด้วย FEM เพื่ออธิบายถึงกลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างการดัดว่าการที่ปัญหาผนังโค้งนั้นเกิดจากปัจจัยใดบ้าง
- 3.8 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการทำงานสำหรับภาคอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน
- 3.9 ระหว่างทดสอบการดัดขึ้นรูปทำการเก็บข้อมูลโดยวิเคราะห์ผลจาก
  - รัศมีของผนังโค้ง
  - ค่าความเรียบผิวบริเวณผนังด้านนอกของชิ้นงาน
  - มุมการติดตัวกลับ
  - Flatness ของกันชิ้นงาน
  - ค่าความเรียบผิวของแม่พิมพ์ (ตาย) ภายหลังการใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

เหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานนั้นสามารถแบ่งได้สามประเภทใหญ่ๆคือ เหล็กกล้าคาร์บอน (Mild steel or Low strength steel) เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (HSS) และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเป็นพิเศษ (AHSS) โดยเหล็กที่มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) น้อยกว่า 270 MPa จะจัดอยู่ในประเภทเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กที่มีค่าความแข็งแรงดึงระหว่าง 270 ถึง 700 MPa จะเป็นเหล็ก HSS และถ้าค่าความแข็งแรงดึงกล่าวมีค่ามากกว่า 700 MPa ก็จะจัดอยู่ในกลุ่มเหล็ก AHSS ซึ่งโดยปกติเหล็ก HSS จะมีโครงสร้างแบบเฟสเดียว (Single phase) ที่เป็นเฟอร์ไรท์ (Ferrite) ส่วนเหล็ก AHSS จะมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นแบบหลายเฟส (Multi phase) ซึ่งอาจประกอบด้วย เฟอร์ไรท์ มาร์เทนไซต์ (Martensite) เบนไนท์ (Bainite) และ/หรือ มีส่วนผสมของออสเทนไนท์ (Austenite) รวมอยู่ด้วย [1]



ภาพที่ 1 ประเภทของเหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ แบ่งตามความสัมพันธ์ของความแข็งแรงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว [1]

ภาพที่ 1 พบว่าเมื่อค่าความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation (%)) ของวัสดุจะ การใช้งานของเหล็กกลุ่มดังกล่าวจะพิจารณาถึงลักษณะการใช้งานของชิ้นส่วนยานยนต์นั้น เช่น ชิ้นส่วนเสริมแรงของประตูรถ กันชนรถ และในอีกหลายชิ้นส่วน จะใช้เหล็กที่มีค่าความแข็งแรงไม่เกิน 590 MPa ส่วนกรณีเหล็กที่มีค่าความแข็งแรงเกินนี้จะใช้สำหรับผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างง่าย ไม่ซับซ้อน เพื่อป้องกันการติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปอันเนื่องมาจากค่าความแข็งแรงที่เพิ่มสูงขึ้น

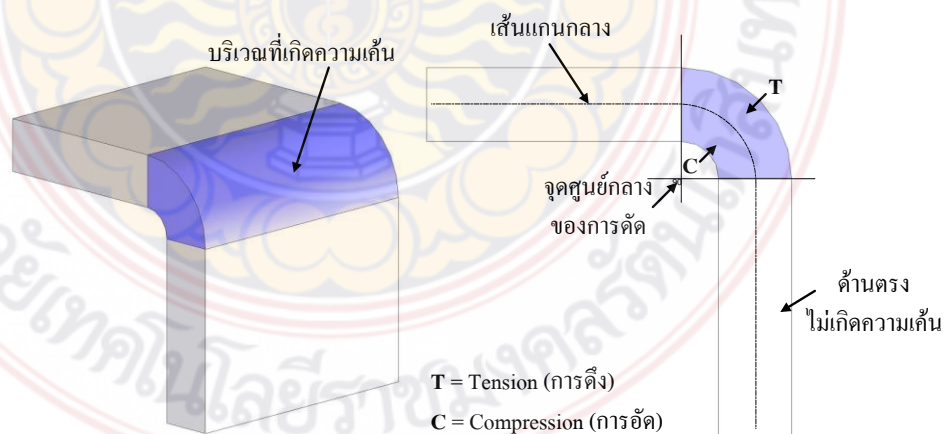
ทฤษฎีการเปลี่ยนรูปร่างของโลหะขึ้นงานอย่างถาวรนั้นเกิดจากมีค่าความเค้นที่เกิดจากการขึ้นรูปมีค่ามากกว่าจุดคราก (Yield point) ของโลหะขึ้นงาน ดังนั้นกระบวนการขึ้นรูปโลหะสามารถแบ่งตามลักษณะความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุขึ้นงานได้ 5 กลุ่ม [2] คือ

1. การขึ้นรูปภายใต้สภาวะความเค้นอัด (Compressive forming) เช่น การรีด (Rolling)
  2. การขึ้นรูปภายใต้สภาวะความเค้นดึง และสภาวะความเค้นอัด (Combined tensile and compressive forming) เช่น การลากขึ้นรูป (Deep drawing)
  3. การขึ้นรูปภายใต้สภาวะความเค้นดึง (Tensile forming) เช่น การยืด (Stretching)
  4. การขึ้นรูปภายใต้สภาวะความเค้นดัด (Forming by bending) เช่น การดัด (Bending)
  5. การขึ้นรูปภายใต้สภาวะความเค้นเฉือน (Forming by shearing) เช่น การตัดเฉือน (Shearing)
- เป็นต้น

จากขอบเขตของงานวิจัยฉบับนี้กำหนดกระบวนการตัดดังนั้นจะขอกล่าวถึงทฤษฎีการตัดโลหะแผ่น

## 2.1 ทฤษฎีการตัดโลหะแผ่น [2]

กรรมวิธีการตัด ความเค้นจะเกิดขึ้นที่รัศมีของการตัด (Bend radius) เท่านั้น บริเวณอื่นจะไม่มี ความเค้นเกิดขึ้นเลย จากภาพที่ 2 แสดงรูปตัดขวางของโลหะแผ่นหลังจากผ่านการตัด ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานจะสังเกตได้ดังนี้ โลหะที่ผิวนอกของรัศมีการตัดจะถูกดึงยืดออก แสดงว่าเกิดความเค้นดึง (Tensile stress) ส่วนโลหะที่อยู่ผิวด้านในของรัศมีการตัดจะเกิดการอัดตัวภายใต้ความเค้นอัด (Compressive stress) ดังนั้นถ้ามีการฉีกขาดจะเกิดขึ้นที่ผิวด้านนอกของรัศมีการตัด แต่ถ้ามีรอยย่น (Wrinkle) จะปรากฏขึ้นที่ผิวด้านในของรัศมีการตัด



ภาพที่ 2 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ดัด [2]

เส้นแกนกลาง (Neutral axis) อย่างที่ทราบแล้วว่าการตัดโลหะแผ่นจะเกิดความเค้นที่บริเวณรัศมีการตัดเท่านั้น โดยผิวด้านในของรัศมีการตัดจะเกิดการอัดตัว ส่วนผิวด้านนอกจะเกิดการยืดตัว ความเค้นจะเกิดมากที่สุดที่ผิวด้านนอกสุดทั้งสองด้านของความหนาของโลหะแผ่น แล้วค่อยๆลดลงเมื่อเข้าไปใกล้เส้นแกนกลางของความหนาชิ้นงานจนความเค้นเป็นศูนย์ที่เส้นแกนกลาง เราเรียกบริเวณที่ไม่มีความเค้นเกิดขึ้นเลยว่า “เส้นแกนกลาง (Neutral axis)” ซึ่งเป็นเส้นที่แสดงความยาวของชิ้นงานที่แท้จริงของชิ้นงานก่อนนำมาตัด ดังนั้นจึงหาความยาวของชิ้นงานก่อนตัดจากความยาวของเส้นแกนกลางได้

เมื่อเริ่มตัดโลหะแผ่นซึ่งยังเป็นมุมตัดเล็กๆ เส้นแกนกลางจะอยู่ใกล้เส้นศูนย์กลางของความหนาชิ้นงาน เมื่อตัดต่อไปมุมตัดใหญ่ขึ้นเส้นแกนกลางจะเลื่อนเข้ามาทางด้านในของรัศมีการตัด หรือด้านความเค้นอัด ตามปกติเราจะวัดระยะห่างของเส้นแกนกลางจากผิวรัศมีการตัดด้านในออกไปหาเส้นแกนกลางตรงบริเวณที่มีการตัด

ลักษณะตำแหน่งของเส้นแกนกลางอธิบายได้ดังต่อไปนี้

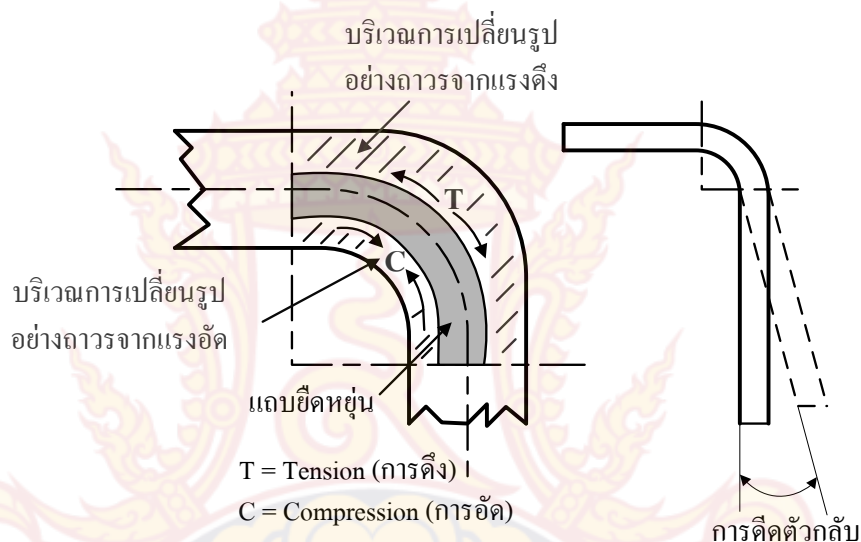
- ถ้าความหนาของโลหะแผ่นคงที่ ขณะที่รัศมีการตัดเพิ่มขึ้น เส้นแกนกลางจะเคลื่อนที่ออกไปทางด้านผิวด้านนอกของรัศมีการตัด หรือด้านที่ยืดตัวออก
- ถ้ารัศมีการตัดคงที่ ขณะที่ความหนาของโลหะแผ่นลดลงเส้นแกนกลางจะเคลื่อนที่ออกไปทางผิวด้านนอกของรัศมีการตัด หรือด้านที่ยืดตัวออก
- ถ้ารัศมีการตัดและความหนาของโลหะแผ่นคงที่ ขณะที่มุมของการตัดเพิ่มขึ้น เส้นแกนกลางจะเคลื่อนที่เข้าไปทางผิวด้านในของการตัด หรือด้านอัดตัว
- เมื่อไม่มีความเค้นเกิดขึ้นที่โลหะแผ่น เส้นแกนกลางจะอยู่ตรงกลางความหนาของโลหะแผ่น

## 2.2 การตีตัวกลับ (Spring back)

ในการตัดโลหะ เนื้อโลหะตรงบริเวณเส้นแกนกลางมีความเค้นเกิดขึ้นไม่สูงมากหรืออยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Elastic limits) เมื่อยกพันธ์ออกจากตายโลหะส่วนนี้จะพยายามตีตัวกลับสู่รูปร่างเดิม แต่โลหะส่วนที่อยู่ห่างจากเส้นแกนกลางจะมีความเค้นเกิดขึ้นเกินจุดครากตัวทำให้ดำเนินการกลับสู่รูปร่างเดิม ดังนั้นเมื่อตัดโลหะจนเปลี่ยนรูปร่างแล้ว จะยังคงมีเนื้อโลหะบางส่วนยังอยู่ในสภาวะยืดหยุ่นปนอยู่บ้างดังแสดงในภาพที่ 3 จึงเป็นผลให้เกิดการตีตัวกลับของโลหะชิ้นงานไม่เป็นไปตามองศาของการตัดซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการตีตัวกลับมีดังนี้



- โลหะแข็งจะมีมุมของการดัดตัวกลับมาก
- โลหะอ่อนจะมีมุมของการดัดตัวกลับน้อย
- รัศมีของมุมดัดเล็กจะมีมุมของการดัดตัวกลับน้อย
- มุมของการดัดมากจะมีมุมของการดัดตัวกลับน้อย
- โลหะที่หนากว่าจะมีมุมของการดัดตัวกลับน้อย

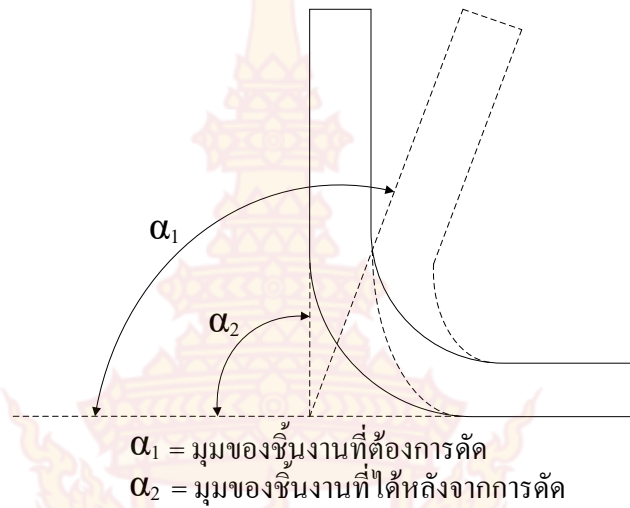


ภาพที่ 3 กลไกการเกิดการดัดตัวกลับของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป [2]

#### 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การดัดตัวกลับ (Spring back factor; $k_R$ ) [8]

ในการพิจารณาปริมาณการดัดตัวกลับของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปนั้น เราสามารถพิจารณาจากอัตราส่วนปริมาณมุมองศาของชิ้นงานหลังการดัด ต่อปริมาณมุมองศาของแม่พิมพ์ (ภาพที่ 4) ซึ่งเป็นมุมที่ต้องการให้ชิ้นงานมีค่าเท่ากับค่าดังกล่าว เราเรียกอัตราส่วนนี้ว่า “ค่าสัมประสิทธิ์การดัดตัวกลับ” ดังสมการที่ (1) หากวัสดุใดมีค่าดังกล่าวน้อยกว่าหนึ่ง ‘1’ มากก็จะเกิดการดัดตัวกลับของชิ้นงานมาก แต่ถ้าหากค่าสัมประสิทธิ์ของชิ้นงานมีค่ามากกว่าหนึ่ง ‘1’ ชิ้นงานดังกล่าวจะเกิดการหุบเข้า (Spring go) โดยถ้าวัสดุมีค่าสัมประสิทธิ์การดัดตัวกลับมากกว่าหนึ่ง ‘1’ ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปก็จะเกิดการหุบเข้ามากเช่นกัน

$$k_R = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad (1)$$



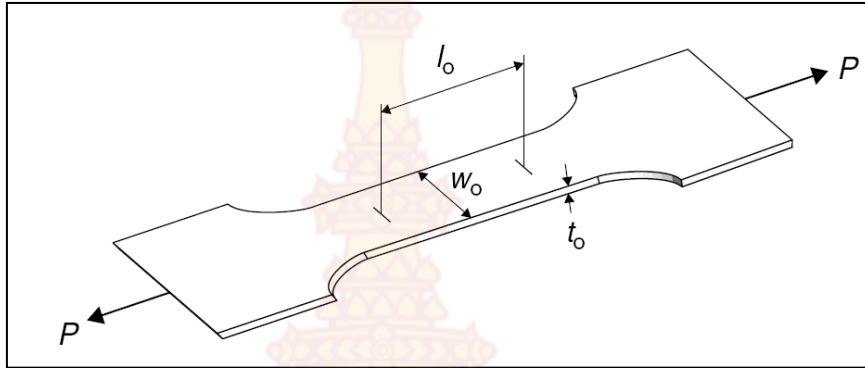
ภาพที่ 4 มุมองศาของชิ้นงานที่ต้องการตัดและที่ได้หลังจากการตัด [3]

### 2.3 การทดสอบแรงดึงและแผนภาพความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรม

การทดสอบแรงดึง (Tensile test) เป็นการทดสอบคุณสมบัติทางกลที่นิยมมากในปัจจุบันโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) ดังภาพที่ 5 ทำการดึงชิ้นงานจากนั้นทำการทดสอบโดยนำชิ้นทดสอบที่เตรียมไว้ตามมาตรฐานดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 เครื่องทดสอบแรงดึง [4]



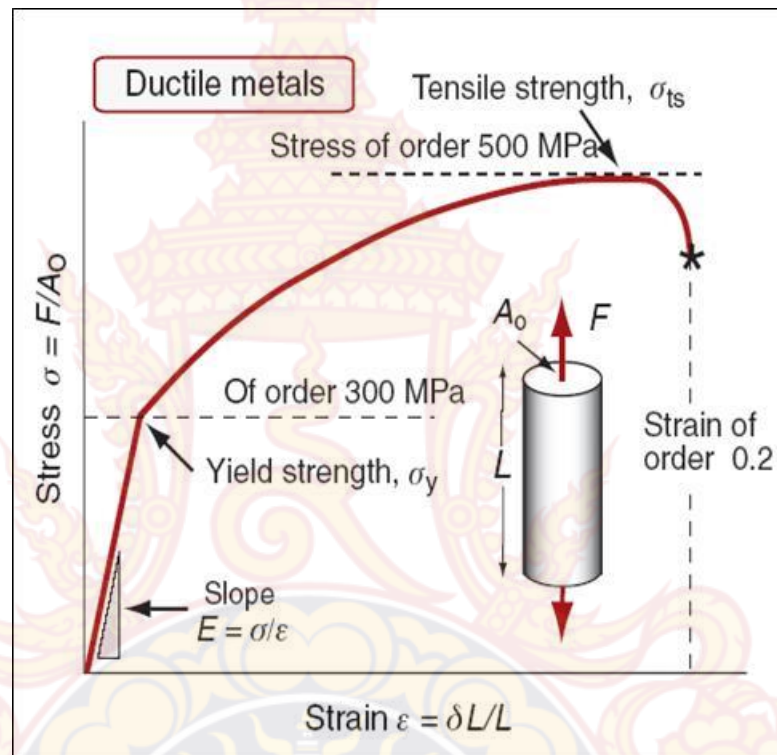
ภาพที่ 6 ตัวอย่างชิ้นทดสอบแรงดึง [4]

ในการทดสอบแรงดึงนั้นเครื่องทดสอบจะมีหัวจับด้านบนและล่างสำหรับจับยึดชิ้นงาน ที่ปลายทั้งสองข้างของชิ้นงานเข้าด้วยกันดังภาพที่ 7 จากนั้นชิ้นงานจะถูกดึงในแนวแกนจนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน ในขณะที่ทำการทดสอบจะทำการเก็บข้อมูลแรงในการดึงและพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนไปด้วยอุปกรณ์วัดแรงประกอบด้วย Load cell, Extensometer และ Width sensor จากนั้นข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปพล็อตเป็นกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve)



ภาพที่ 7 การจับยึดชิ้นงาน

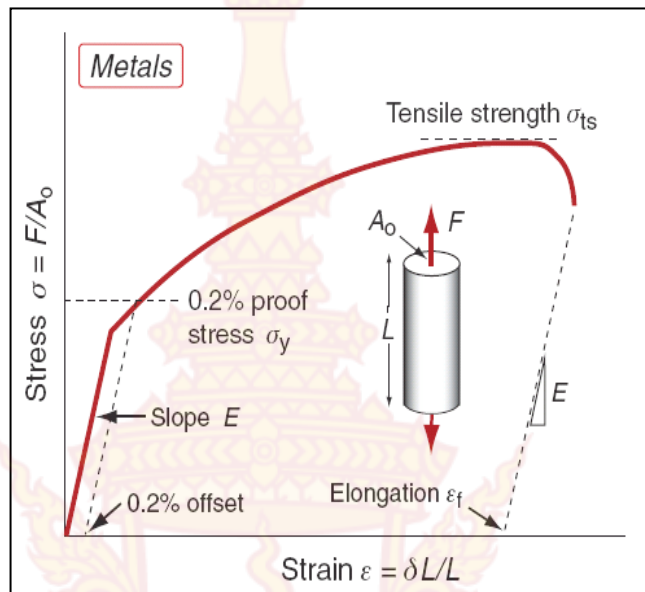
วัสดุเหนียวประกอบไปด้วยเหล็กเหนียว และ อลลอยด์ของโลหะต่างๆซึ่งมีหลายชนิดด้วยกัน คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุเหนียวคือจะเกิดการคราก (Yield) หรือ การยืดตัวเมื่อรับแรงที่ อุณหภูมิห้อง ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 กราฟความเค้น - ความเครียดของโลหะที่มีคุณสมบัติเหนียว [4]

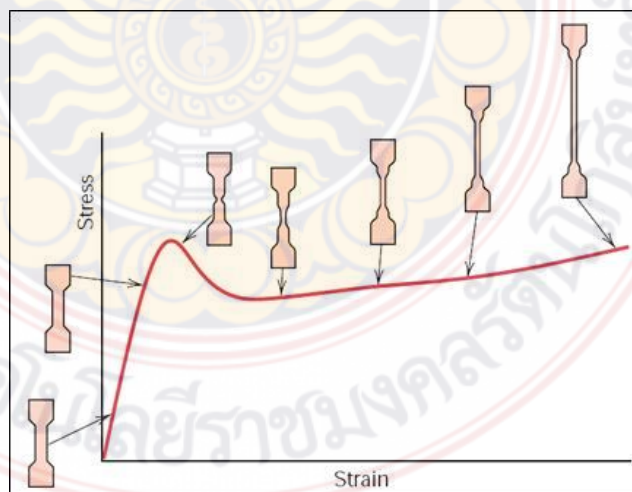
#### 2.4 สมบัติทางกลที่สำคัญที่ได้จากการทดสอบ

ข้อมูลที่สำคัญสำหรับการออกแบบทางวิศวกรรมมีอยู่หลายค่าซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสมบัติหลักที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ลักษณะของกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดดังภาพที่ 9 ในงานชิ้นรูปโลหะนั้นการพิจารณาถึงความเค้น-ความเครียดของโลหะนั้นเป็นสิ่งสำคัญมาก เมื่อสามารถเข้าใจถึงกลไกของการเปลี่ยนรูปของโลหะได้นั้นจะทำให้สามารถเลือกใช้วัสดุในการทำงานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม ในเนื้อหาบทนี้ยังได้มีการรวบรวมข้อมูลที่สำคัญจากการทดสอบจากเหล็กชนิดต่างๆเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของคุณสมบัติทางกลของเหล็กแต่ละชนิด ซึ่งนำไปสู่การเลือกใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



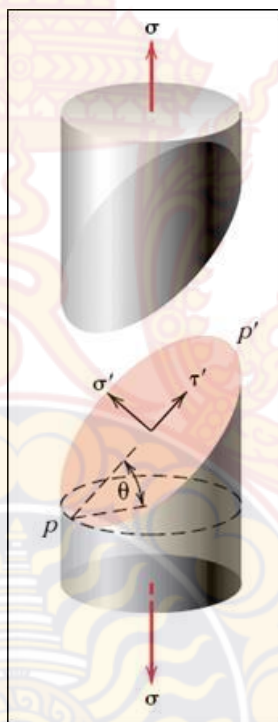
ภาพที่ 9 คุณสมบัติทางกลของโลหะแบบเหนียวภายใต้แรงในแนวแกน [4]

จากภาพที่ 9 ในช่วงแรกการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นช้าๆและจะเป็นแปรผันตรงกับแรงกระทำที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นช่วงแรกของแผนภาพ ความเค้น - ความเครียด จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตาม เมื่อความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุมีค่าสูงจนถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งหรือเท่ากับจุดคราก การเปลี่ยนรูปจะเกิดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากแรงที่กระทำต่อชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง เส้นผ่านศูนย์กลางหรือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานจะเล็กลงหรือเกิดสภาวะคอคอดขึ้นในชิ้นงาน (Necking) ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 การเกิดคอคอดของโลหะขณะรับแรงดึง [4]

หลังจากเกิดคอคอดขึ้น แรงที่จำเป็นสำหรับที่ทำให้ชิ้นงานยืดตัวจะมีค่าลดลงจนกระทั่งชิ้นงานขาดออกจากกัน รอยขาดของชิ้นงานแบบเหนียวจะเป็นรูปร่างคล้ายกรวยที่มีมุมเอียงประมาณ 45 องศา ดังภาพที่ 11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเค้นเฉือน (Shearing stress) เป็นสาเหตุของความเสียหายของวัสดุแบบเหนียวและแสดงให้เห็นว่า เมื่อวัสดุรับแรงในแนวแกน ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงสุดบนระนาบที่ทำมุม 45 องศา กับแนวแรงที่กระทำกับวัสดุ จากนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุจะเริ่มเกิดการครากและเข้าสู่สภาวะของค่าทนแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) เมื่อวัสดุขาดออกจากกันจะเรียกว่า ค่าความเค้นนี้ว่า breaking strength หรือ fracture strength

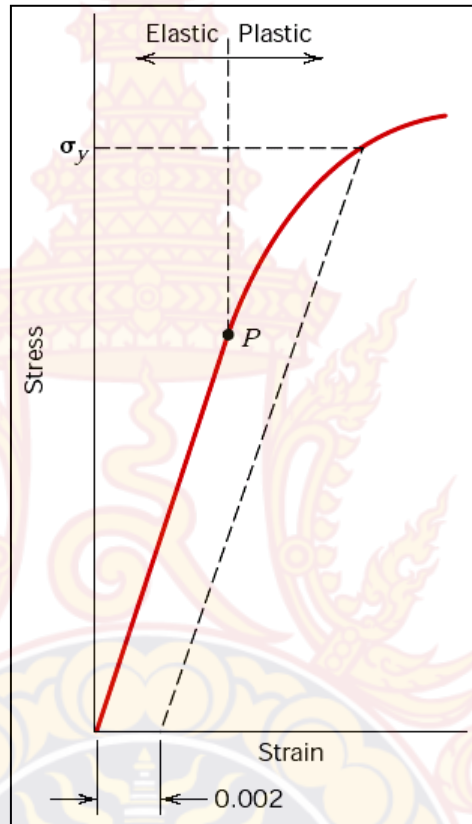


ภาพที่ 11 รอยขาดของชิ้นงานแบบเหนียว [4]

## 2.5 ความเค้นคราก (Yield strength)

จุดครากหรือเรียกว่า yield strength ของโลหะมีความสำคัญในการใช้ออกแบบโครงสร้างในมุมมองของงานแม่พิมพ์นั้น ค่า yield strength จะเป็นตัวกำหนดกระบวนการผลิตเช่นวัสดุที่มีค่า yield Strength สูงๆการขึ้นรูปก็จะต้องใช้แรงในการขึ้นรูปสูงไปด้วย ส่งผลให้ในกระบวนการผลิตต้องเลือกเครื่องปั๊มโลหะที่มีความสามารถสูง ซึ่งค่า yield strength ไม่มีจุดที่แน่นอน และด้วยการแสดงถึงคุณสมบัติของค่าดังกล่าวไม่ชัดเจน ในประเทศสหรัฐอเมริกาจึงได้กำหนด 0.2% ของค่า strain ในขณะเดียวกันในประเทศอังกฤษใช้ 0.1% strain โดยทั่วไปเราเรียกว่า 0.2% off set yield

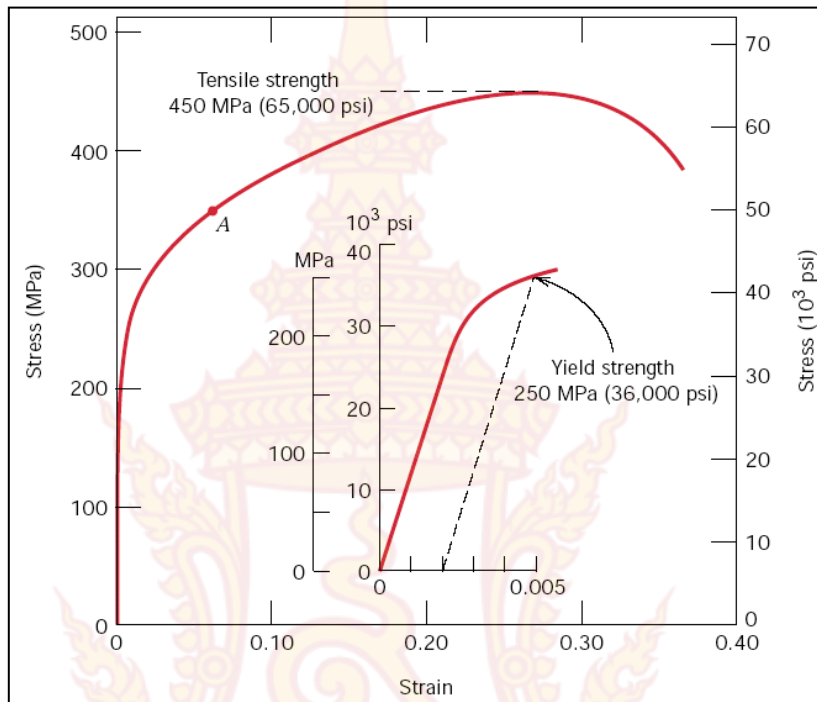
strength ซึ่งการหาจุด yield นั้นสามารถทำได้โดยลากเส้นตรงขนานกับเส้น stress-strain curve ตรงจุด 0.002 นิ้ว/นิ้ว ไปตัด โค้งบนจะได้ค่า yield strength ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การหาค่า yield strength บน stress-strain curve [4]

## 2.6 ค่าทนแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength)

ค่าทนแรงดึงสูงสุดของวัสดุ เมื่อพิจารณาจาก stress-strain curve ดังภาพที่ 13 ในขณะที่วัสดุใกล้ขาดวัสดุจะเกิดคอคอดตรงกลางและขาดออกจากกัน โดยปกติแล้วค่าทนแรงดึงสูงสุดจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าวัสดุนั้นมีโครงสร้างที่สมบูรณ์หรือไม่ เช่น ถ้ามีรูพรุนในเนื้อวัสดุ ค่าทนแรงดึงสูงสุดอาจต่ำกว่าปกติ โดยปกติแล้วค่าทนแรงดึงสูงสุดนั้นมักไม่นิยมใช้งานวิศวกรรมการออกแบบ เนื่องจากในขณะที่มีแรงกระทำวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรขึ้นอย่างมาก อย่างไรก็ตามในงานขึ้นรูปโลหะนั้นค่าทนแรงดึงสูงสุดมักจะถูกพิจารณาเป็นเนื่องจากจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณแรงในการขึ้นรูป และการทำนายความเสียหายของชิ้นงาน



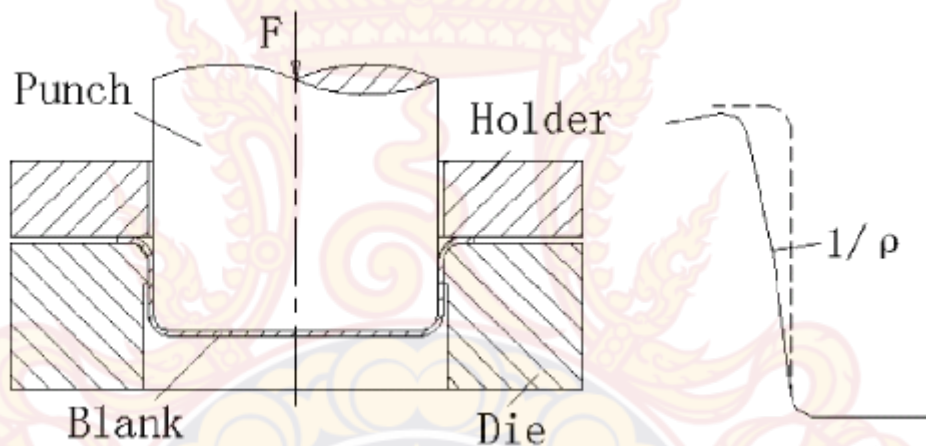
ภาพที่ 13 Stress – strain curve ของวัสดุทองเหลือง [4]

นอกเหนือจากการทดสอบแรงดึงแล้วการหาคุณสมบัติของวัสดุสามารถหาได้โดยการทำการทดสอบแรงอัดได้อีกด้วยซึ่ง stress – strain curve ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงการทดสอบแรงอัดจะเหมือนกันตั้งแต่เริ่มให้แรงจนกระทั่งถึงจุดครากซึ่งหลังจากจุดครากแล้ว กราฟที่ได้จากการทดสอบจะแตกต่างกันออกไป เนื่องจากในการทดสอบแรงอัด จะไม่เกิดคอคอดสำหรับวัสดุเปราะการทดสอบแรงอัดจะมีค่าสูงกว่า ultimate strength ในการทดสอบแรงดึงมาก เช่น วัสดุเปราะ เช่น คอนกรีต จะรับแรงอัดได้ดีแต่รับแรงดึงได้ไม่ดี



## 2.7 ปัญหาผนังโค้งในงานดัดขึ้นรูป Draw bending

สำหรับปัญหาผนังโค้งถือว่าเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับกระบวนการขึ้นรูปแบบ Draw bending เนื่องจากเกิดปีกของชิ้นงานจะถูกแผ่นกดชิ้นงานรีดก่อนที่เนื้อโลหะจะถูกดัดอีกครั้งปรากฏการณ์ผนังโค้งจึงเกิดขึ้นดังภาพที่ 14 เมื่อวิเคราะห์ความเค้นว่าเกิดความเค้นใดบ้างในขณะขึ้นรูปพบว่า บริเวณผนังเมื่อถูกรีดจะมีปริมาณความเค้นดึงและความเค้นอัดเป็นสาเหตุให้เกิด โมเมนต์ดัด สูงมากที่ผนัง ถ้าหากเราสามารถหากลดความซับซ้อนของความเค้น ให้เหลือแค่ความเค้นดึงเพียงอย่างเดียว จะทำให้ผนังชิ้นงานมีลักษณะตรงดังภาพ 15



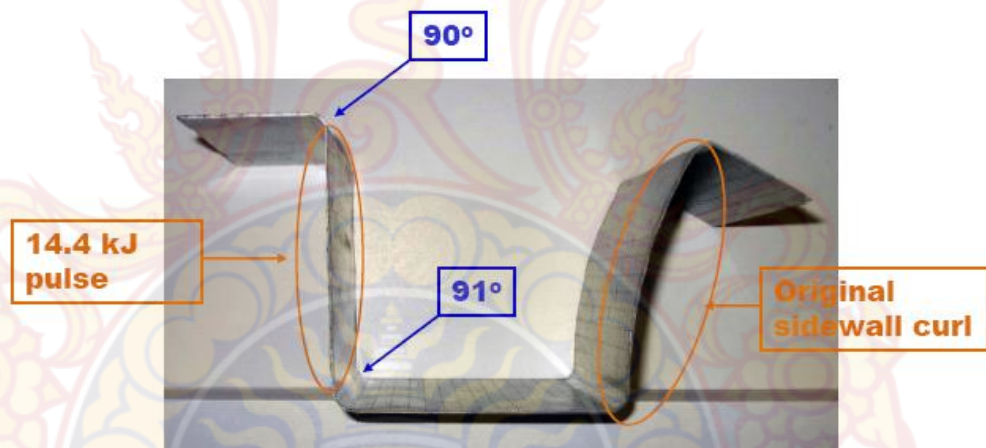
ภาพที่ 14 กลไกการเกิดการปัญหาผนังโค้ง [5]



ภาพที่ 15 การกระจายความเค้นที่ผนังชิ้นงาน [5]

## 2.8 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

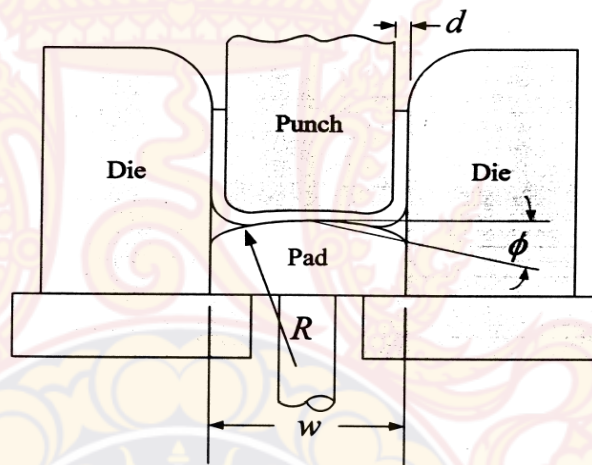
จากทฤษฎีและกลไกของการตัดขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Draw bending พบว่ามีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลต่อปัญหาผนังโค้ง อาทิเช่น ชนิดของวัสดุชิ้นงาน คาร์ซีมีพันซ์หรือตายที่ใช้ในการตัดขึ้นรูป แรงกดของแผ่นกดชิ้นงาน รวมทั้งทิศทางการรีดของวัสดุเป็นต้น ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะส่งผลต่อคุณภาพและค่าความสามารถในการตัดขึ้นรูปของโลหะแผ่นทั้งสิ้น ภาพที่ 6 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการแก้ไขปัญหาผนังโค้งด้วยทางแม่เหล็กไฟฟ้า แต่เนื่องจากต้องสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมากไม่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมในประเทศไทย ด้วยเหตุนี้เองผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะสร้างเทคโนโลยีใหม่ที่ไม่เพียงแต่จะสามารถแก้ปัญหาผนังโค้งตัวกลับได้อย่างสมบูรณ์ แต่ยังสามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ได้กับโลหะทุกชนิดที่เกิดปัญหาผนังโค้งอีกด้วย ผู้วิจัยมีความมั่นใจว่าภายหลังเสร็จสิ้นงานวิจัยและได้เผยแพร่ผลงานให้กับภาคอุตสาหกรรม เทคโนโลยีนี้จะสามารถตอบสนองอุตสาหกรรมการผลิตขึ้นส่วนยานยนต์ได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 16 ชิ้นงานจากการใช้กระบวนการแม่เหล็กไฟฟ้าในการแก้ปัญหาผนังโค้ง [6]

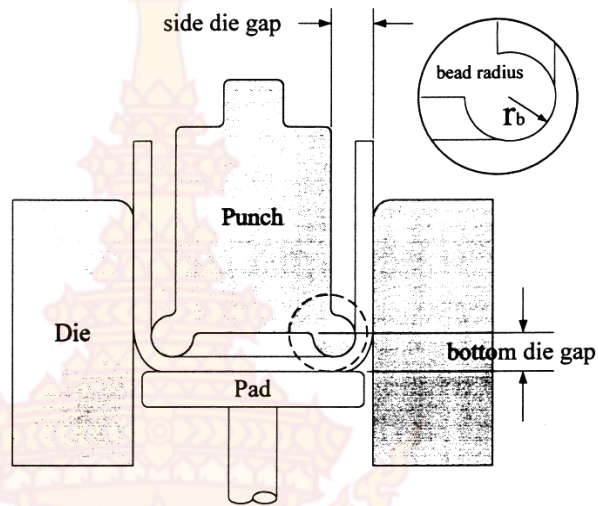
## 2.9 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

เป็นระยะเวลาที่ยาวนานมากกว่า 15 ปี ที่นักวิจัยหลายท่านพยายามเอาชนะการติดตัวกลับ (Springback) โดยใช้วิธีต่าง ๆ มากมายซึ่งผู้วิจัยได้เรียบเรียงพัฒนาการของเทคโนโลยีที่โดดเด่นเพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัยซึ่งทางผู้วิจัยเน้นการสร้างนวัตกรรมใหม่เป็นหลักจึงมิได้แสดงถึงงานวิจัยในรูปแบบของการคำนวณโดยใช้วิธีการทาง FEM เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงพัฒนาการในการแก้ไขการติดตัวกลับ และเห็นถึงความแตกต่างของแนวคิด ผู้วิจัยจึงอธิบายกลไกของแต่ละวิธีการโดยแนบรูปภาพของแต่ละงานวิจัยดังต่อไปนี้ ในปี 1956 G.Saches [7] ได้นำเสนอวิธีการลงการติดตัวกลับ เรียกว่า arc bottoming ดังภาพที่ 17



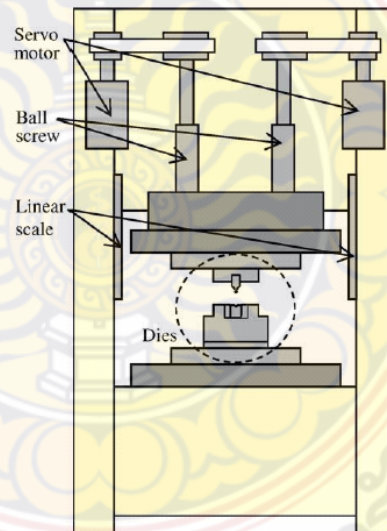
ภาพที่ 17 arc bottoming process [7]

ซึ่งก็สามารถลดการติดตัวกลับได้ แต่พบว่าบริเวณด้านล่างของชิ้นงานนั้นเกิดส่วนโค้งขึ้น ถัดมาในปี 1984 Y.C. Liu [8] ได้นำเสนอกระบวนการเรียกว่า pinching die เพื่อสร้างแรงกดบริเวณมุมและให้วัสดุขูดเซยการเกิดการติดตัวกลับ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ใช้ได้ผลดีกับอลูมิเนียมเท่านั้นเนื่องจากมีความแข็งแรงต่ำสามารถให้แรงกดได้อย่างง่ายดาย



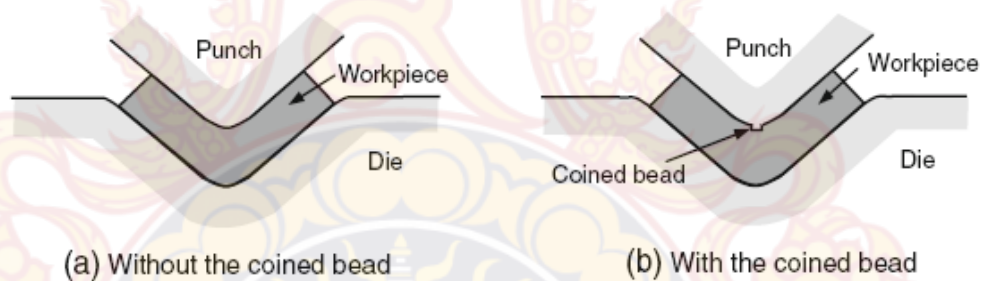
รูปที่ 18 pinching die process [8]

Mori et al. [9] ได้ประยุกต์ใช้ความร้อนจากฮีทเตอร์เข้ามาช่วยปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปเพื่อลดการติดตัวกลับ ต่อมา ปี 2007 Mori [10] ได้มีการใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงมาทำการทดลองเพื่อลดการเกิด การติดตัวกลับด้วยเครื่อง CNC servo press เนื่องจากเครื่องดังกล่าวสามารถควบคุมระยะ ส่งผ่านแรงได้ทุกจังหวะการทำงาน แต่ในประเทศไทยนั้นยังมิได้มีการใช้เนื่องจากราคาสูงมาก



รูปที่ 18 การติดตั้งแม่พิมพ์บน CNC servo press [9]

ในปี 2010 หนึ่งในผู้ร่วมวิจัย คมกริช [10] ทำการลดการติดตัวกลับบนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยเทคนิคการออกแบบแม่พิมพ์ให้พันซ์กดย้ำบริเวณมุมชิ้นงานซึ่งพบว่าสามารถลดการติดตัวกลับได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่กระบวนการดังกล่าวต้องการแรงในการขึ้นรูปสูงมากเช่นกัน ต่อมาปี 2011 ผู้ร่วมวิจัย [11] ยังได้อธิบายผลกระทบของความเค้นตกค้างว่าส่งผลต่อการติดตัวกลับอย่างไรในปีเดียวกันนั้นเอง วารุณีและคณะ [12] จาก ม.พระจอมเกล้าธนบุรี ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบจากแนวรีดที่ส่งผลต่อการติดตัวกลับและพบว่าแนวรีดส่งผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในปีเดียวกันนั้น ศาสตราจารย์ F.Yoshida and T.Ogawa [13] แห่งมหาวิทยาลัยฮิโรชิมาได้ทำการทำนายการเกิดการติดตัวกลับด้วยเทคนิค FEM โดยใช้ Yoshida-Uemori model มาอธิบายการเกิดและทำนายการขาดเซยการติดตัวกลับได้อย่างแม่นยำ และในปี 2012 Sutasn [14] ได้นำเสนอการสร้างแรงกดบริเวณมุมตัดของพับขึ้นรูปตัว วี ซึ่งกระบวนการนี้จะสร้างแรงกดอัดให้กับวัสดุแล้วดำเนินการเกิดการติดตัวกลับ แต่จะเกิดรอยขึ้นกับผนังชิ้นงานด้านในเนื่องจากรับแรงกดนั่นเอง



รูปที่ 19 sided coined-bead process [14]

Zhang and Lee [15] นำเสนองานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของ blank holder force, elastic modulus, strain hardening exponent ที่ส่งผลต่อความรุนแรงของการติดตัวกลับในงานขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Drawing bending Jeong-Yeon Lee [16] สร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อทำการทำนายการติดตัวกลับ ในงาน Drawing bending โดยให้ความสำคัญกับคุณสมบัติ anisotropic และ hardening โดยในงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบความแม่นยำของสมการที่ใช้สมบัติแบบ isotropic และ combined isotropic-kinematic hardening models โดยการสร้างตัวแบบนี้เพื่อรองรับ สมบัติที่ซับซ้อนของวัสดุ N. Nanu n, G.Brabie [17] ได้สร้างโมเดลเพื่อทำนายการติดตัวกลับ ในกระบวนการ Drawing bending โดยทำการวิเคราะห์ การกระจายความเค้นในชิ้นงาน โดยวิเคราะห์ทั้งตัวแปรในการทดลองคือ Blank holder force, Friction coefficient และ Papeleux, Ponthot [18] ได้ศึกษาการติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการพับเปรียบเทียบ วัสดุ 3 ชนิด คือ เหล็กกล้าละมุน (Mild steel) เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength steel) และอลูมิเนียม

พบว่าวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Strength to modulus ratios) สูง จะมีการติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการพับสูง และจากการทดลองพบว่าคุณมึเนียมมีการติดตัวกลับหลังการพับมากที่สุดรองลงมา คือ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงและเหล็กกล้าอะลูมิเนียม ซึ่งมีอัตราส่วนของความแข็งแรงต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ต่ำที่สุดก็จะมี การติดตัวกลับหลังจากการพับน้อยที่สุด จากที่ได้กล่าวมาแสดงให้เห็นถึงพัฒนาการของการแก้ไขปัญหาการความผิดพลาดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากกระบวนการตัด ซึ่งในปัจจุบันปัญหาดังกล่าวได้เกิดสูงขึ้น เนื่องจากเหล็กกล้ามีความแข็งแรงสูงขึ้นมากกว่าในอดีต 2-3 เท่า ส่งผลให้ความต้องการอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนในประเทศไทยนั้นต้องการวิธีการส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแปลงแม่พิมพ์มากที่สุด ผู้วิจัยจึงได้คิดค้นเทคโนโลยีใหม่ในการกำจัดปัญหานี้ และด้วยเทคโนโลยีนี้ผู้วิจัยมีความมั่นใจว่าสามารถกำจัดปัญหานี้ได้ ออกไปได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่กระทบกับระบบการผลิตโดยรวมเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน แต่ให้ผลที่ดีเยี่ยม

### บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะกำจัดปัญหาผนังโค้ง (Side wall curved) ที่เกิดขึ้นกับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงในกระบวนการ Draw bending ซึ่งประเด็นหลักของการวิจัยในครั้งนี้จะใช้ตัวแปรในการทดลองน้อยที่สุด โดยจะไปมุ่งเน้นที่เทคโนโลยีการออกแบบแม่พิมพ์และปรับแรงดันในแม่พิมพ์เพื่อสลายความเค้นที่บริเวณผนังชิ้นงาน เมื่อใช้วัสดุต่างชนิดกันเพียงแค่ปรับแรงดันก็จะสามารถสร้างชิ้นงานที่มีคุณภาพได้ เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัยนี้ จำเป็นจะต้องทำการศึกษา เก็บข้อมูลและทำการทดลองเพื่อนำข้อมูลมาสรุปผลงานวิจัย โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

- ศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- ใช้ Finite element คำนวณรายละเอียดชิ้นส่วนของแม่พิมพ์
- ออกแบบแม่พิมพ์สำหรับทำการตัดชิ้นงานโดยมุ่งเน้นแม่พิมพ์ตัดด้วยแบบมีปีกที่ไม่มี การลดความหนาของผนังชิ้นงาน
- วัสดุที่ใช้คือเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง TRIP 780 MPa, DP 980 MPa และ Stainless steel 430 ความหนา 1.2 มิลลิเมตร
- ค้นหาแรงกดแผ่นชิ้นงานที่เหมาะสมของแต่ละวัสดุ
- บันทึกผลการทดลอง
- สร้างแบบจำลองด้วย FEM ด้วย Shell element เพื่อสร้างฐานข้อมูลในการใช้งานให้กับภาคอุตสาหกรรม
- เปรียบเทียบผลการตัดตัวกลับระหว่าง FEM กับ Experiment
- สรุปผลการวิจัย
- เผยแพร่งานวิจัย
- ISO/T16630 โดยกำหนดให้คงที่ แรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blank holder force) 65kN ความเร็วในการขึ้นรูป ประมาณ นาที่/มิลลิเมตร 28-27
- ตรวจสอบรอยแตกในระดับจุลภาคด้วยกล้องขยายกำลังสูงเช่น Micro scope หรือ SEM
- วิเคราะห์สาเหตุการเกิดรอยแตกในระดับจุลภาคด้วย FEM

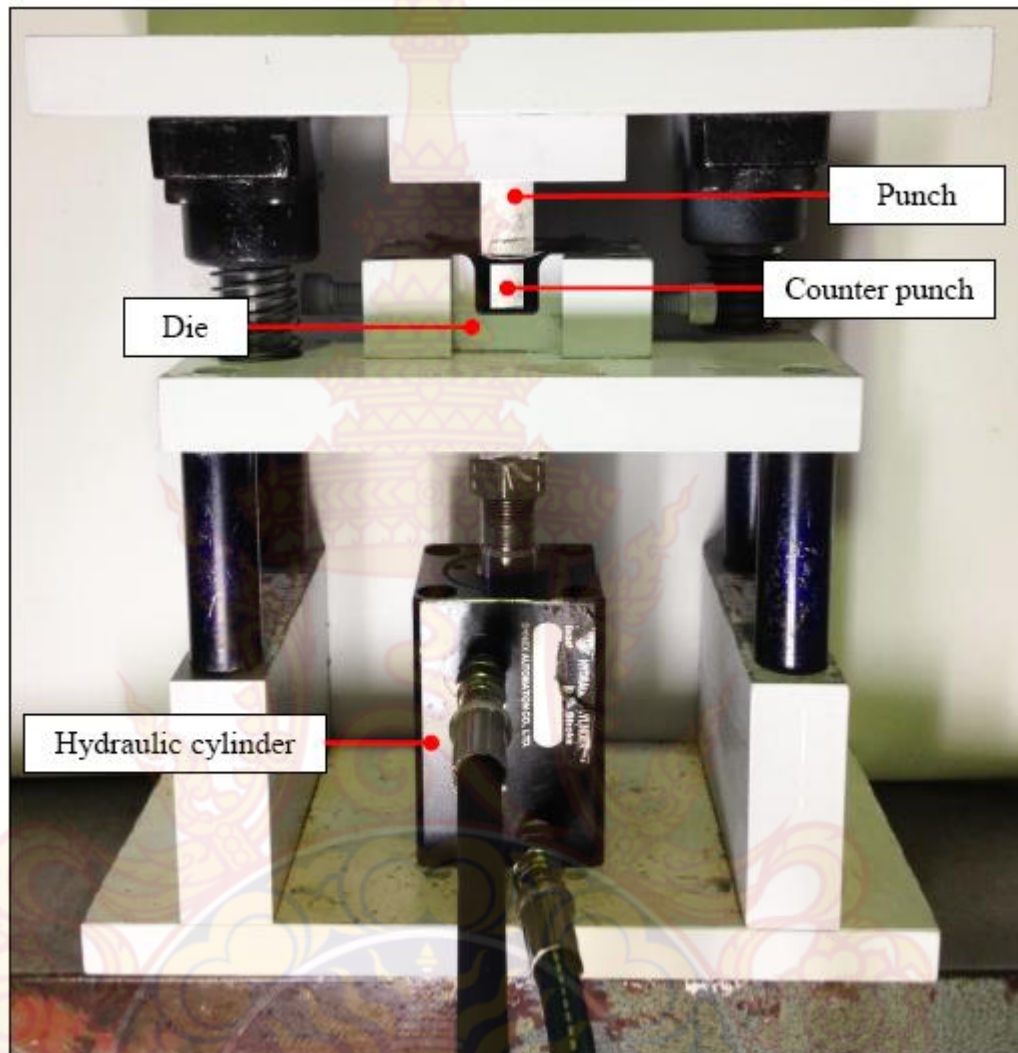
### 3.2 วัสดุและแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เหล็กกล้าเครื่องมือ คือ เหล็กกล้าที่ใช้สำหรับทำเครื่องมือขึ้นรูปโลหะเป็นส่วนใหญ่ เช่น แบบหล่อโลหะในขบวนการอัดฉีดโลหะร้อน (Die casting) แม่พิมพ์สำหรับตีขึ้นรูป หรือตัดวัสดุต่างๆ ซึ่งรวมถึงเหล็ก โลหะนอกกลุ่มเหล็ก และพลาสติก เหล็กกล้าเครื่องมือจัดเป็นเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนและธาตุผสมอื่นๆ ในปริมาณสูง เพื่อให้มีความสามารถในการชุบแข็งสูง และเพื่อสร้างคาร์ไบด์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านทานการสึกหรอสำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาวัสดุแม่พิมพ์ที่ทำจาก SKD11 ซึ่งนิยมใช้กันทั่วไปในงานแม่พิมพ์ เป็นเหล็กชุบน้ำมันที่มีธาตุคาร์บอน (C) และธาตุโครเมียม (Cr) ผสมในอัตราสูง ทำให้มีความแข็งและทนการเสียดสีดี ทำการชุบแข็งเพื่อให้มีความแข็ง 60 HRC



ภาพที่ 3.1 แม่พิมพ์เจาะรูที่ได้จากการออกแบบ





รูปที่ 3.2 ชุดแม่พิมพ์

### 3.3 เครื่องปั๊ม hydraulic press

เครื่องปั๊ม hydraulic press ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งการส่งผ่านแรงจะถูกส่งผ่านโดยใช้แรงดันผ่านของเหลว สามารถให้แรงที่ตำแหน่งใดๆของ stroke ก็ได้ เครื่องปั๊มประเภทนี้จะได้รับกำลังจากลูกสูบของกระบอกไฮดรอลิกส์เพื่อส่งกำลังให้กับแกนเลื่อน ถังน้ำมันและปั๊มน้ำมันไฮดรอลิกส์นั้นมักจะติดตั้งอยู่ด้านบนเครื่อง กำลังอัดของเครื่องนั้นจะขึ้นอยู่กับความโตของลูกสูบกระบอกไฮดรอลิกส์กับอัตราแรงดันของน้ำมันไฮดรอลิกส์ เครื่องปั๊มโลหะแบบไฮดรอลิกส์จะมีช่วงชักที่ยาวกว่าระบบกลไกและให้แรงสม่ำเสมอที่ และยัง สามารถปรับความเร็วของ ram ได้ การใช้งานของเครื่องปั๊มโลหะแบบไฮดรอลิกส์ไม่นิยมใช้ในงานปั๊มตัด เนื่องจาก การสั่นสะเทือนและการกระแทกหลังจากเกิดเบรคทुरु ในขณะที่ตัดชิ้นงาน เมื่อใช้เครื่องปั๊มโลหะแบบไฮดรอลิกส์การทำงานจะอาศัยการอัดน้ำมัน การเชื่อมต่อ ระยะเวลาและการแอนตัวของเครื่องสูง

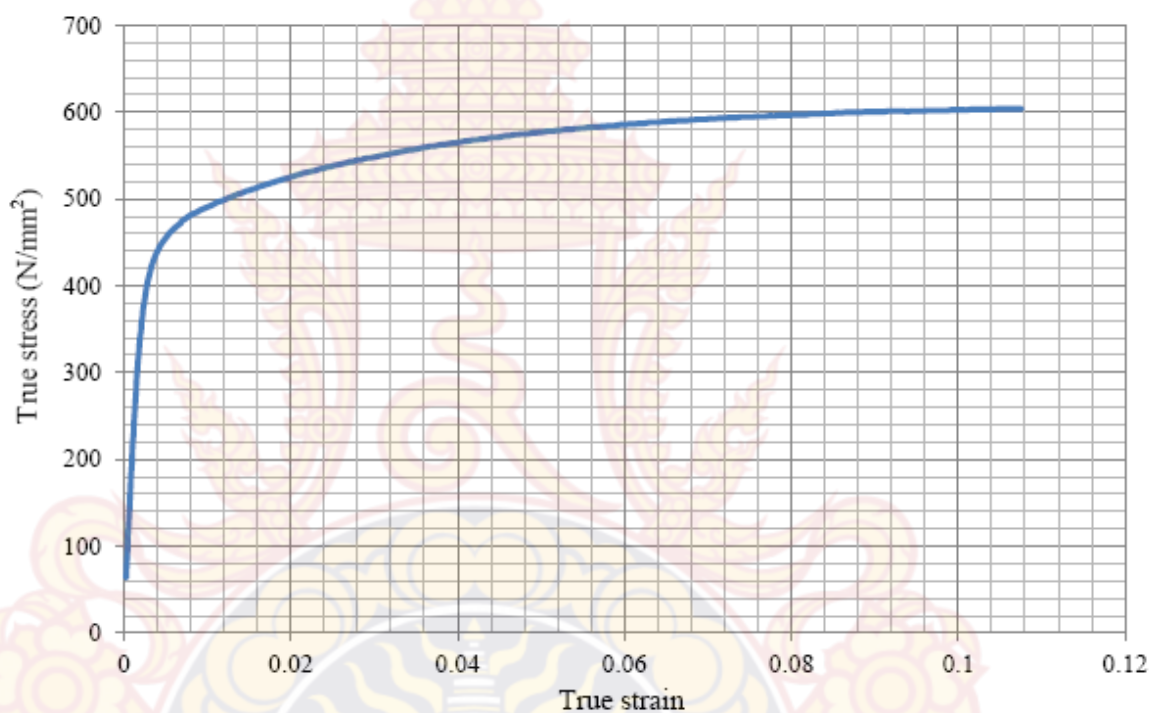


รูปที่ 3.3 เครื่องปั๊มโลหะแบบไฮดรอลิกส์ขนาด 50 ตัน

### 3.4 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัย

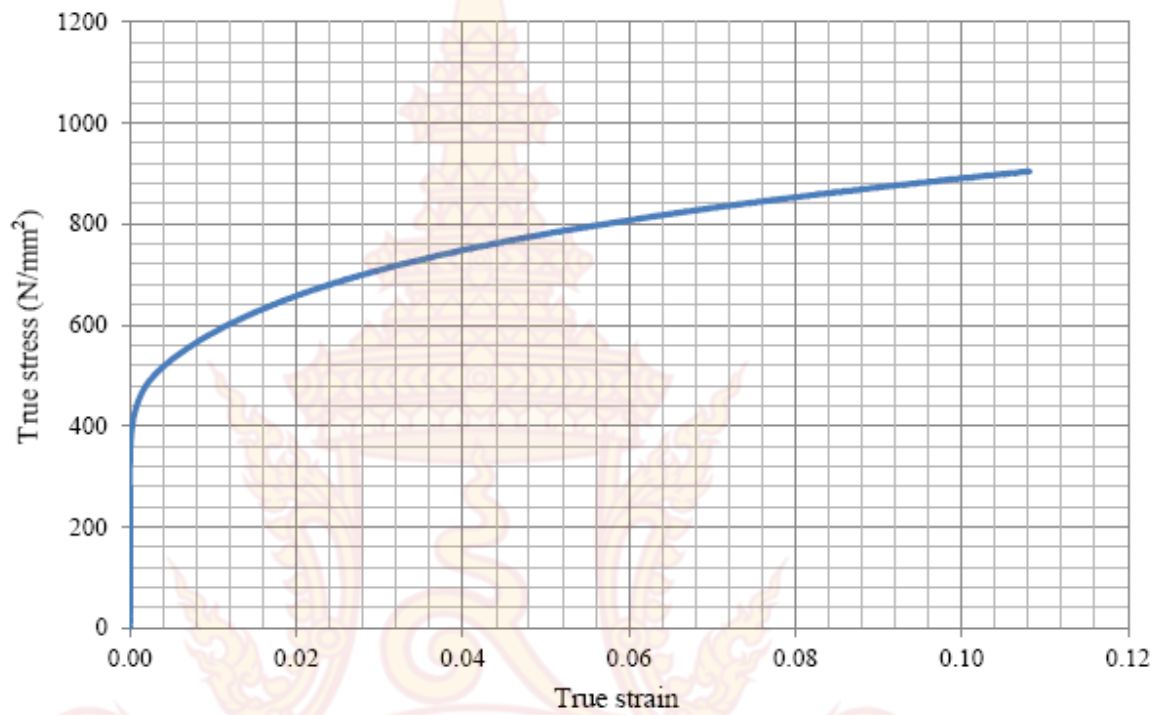
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาวัสดุชิ้นงาน คือวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 2 เกรด คือ TRIP 780 MPa, DP 980 และ Stainless steel 430 หนา 1.2 มิลลิเมตร

ผลการทดสอบ Uniaxial Tensile test SUS 430



รูปที่ 3.4 Uniaxial Tensile test SUS 430

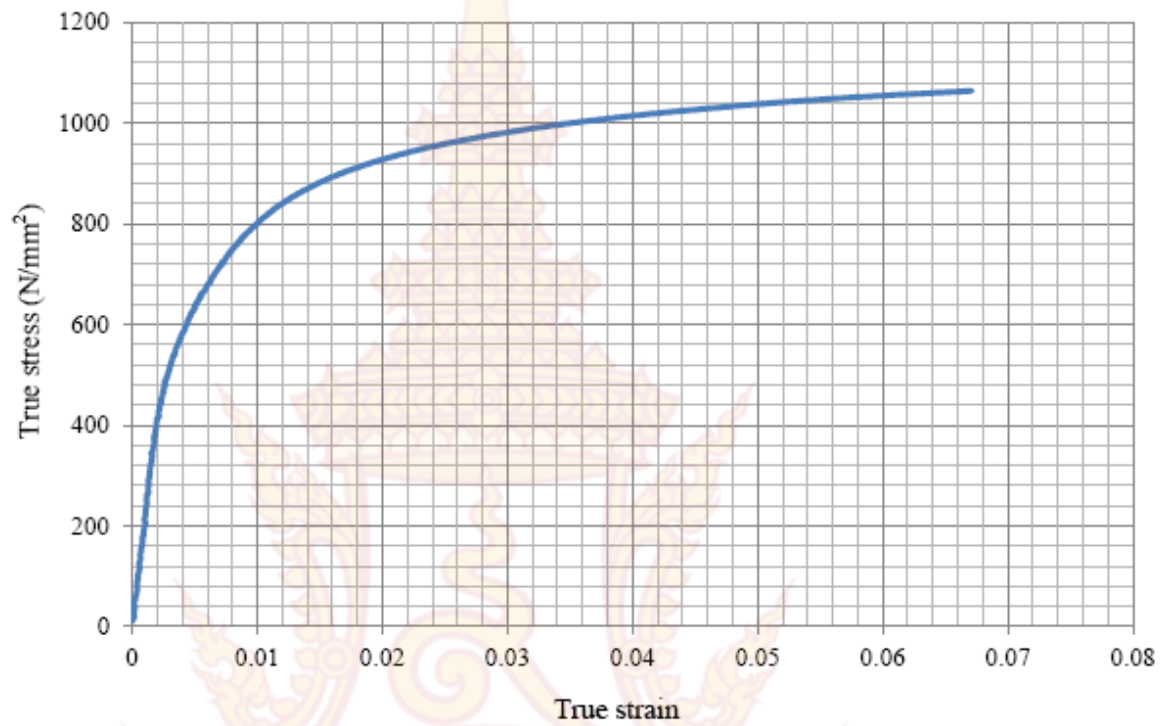
ผลการทดสอบ Uniaxial Tensile test HSS 780 MPa



รูปที่ 3.5 Uniaxial Tensile test HSS 780 MPa



ผลการทดสอบ Uniaxial Tensile test HSS 980 MPa



รูปที่ 3.6 Uniaxial Tensile test HSS 980 MPa

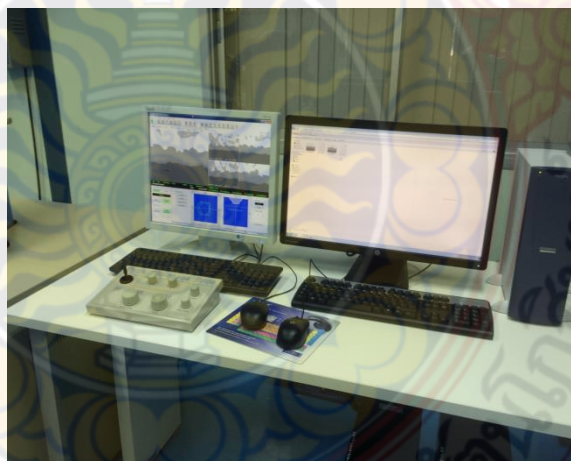


เครื่อง CNC CMM ใช้วัดปริมาณการติดตั้งตัวกลับของชิ้นงานจากการทดลองเป็นองศา



ภาพที่ 3.8 เครื่อง CNC CMM

ชุดกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



ภาพที่ 3.9 ชุดกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

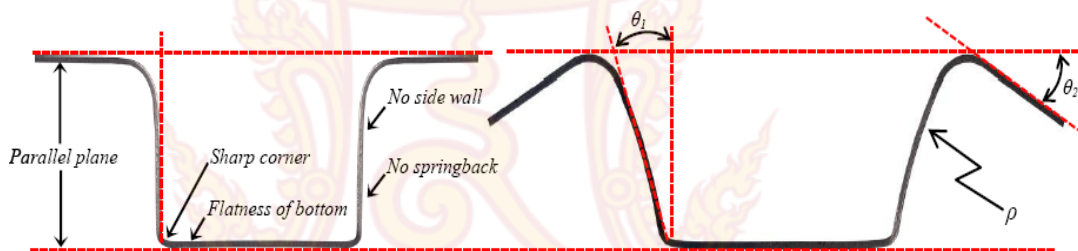
### 3.4 เงื่อนไขการจำลองด้วย FE simulation

Analytical	Detail
Type of simulation model	2D element with plain strain model
Type of tool and workpiece	Punch, Die and Counter: rigid Workpiece: elastic-plastic with thickness 1.22 mm IH-Swift model
Analysis material equation	KM-The Yoshida-Uemori model
Punch corner radius	1.2 mm
Die shoulder corner radius	6.0 mm
Friction coefficient	0.10
Level of clamping force; $F_1$	Corresponding with experiments
Levels of bottoming force; $P_b$	Corresponding with experiments
Levels of bottoming force; $F_2$	Corresponding with experiments

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างประโยชน์ให้กับอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นมากที่สุดซึ่งผู้วิจัยเล็งถึงเห็นการแก้ไขปัญหาผนังโค้งในกระบวนการตัดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการออกแบบแม่พิมพ์สมัยใหม่เพื่อลดความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป ทำให้ได้ชิ้นงานที่ปราศจากผนังโค้งดังรูปที่ 4.1 ซึ่งถือว่าเป็นสิ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากเทคโนโลยีนี้สามารถสร้างชิ้นงานที่มีขนาดถูกต้องเพื่อรองรับอุตสาหกรรมขึ้นรูปโลหะแผ่น ภายหลังทดลองใช้แม่พิมพ์ที่สามารถลดความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูปสามารถสรุปผลได้เป็นหัวข้อหลักๆดังนี้



(ก) ชิ้นงานที่ต้องการ (เที่ยงตรง)

(ข) การตีตัวกลับและผนังโค้ง

ภาพที่ 4.1 ชิ้นงาน Hat shape HSS 980

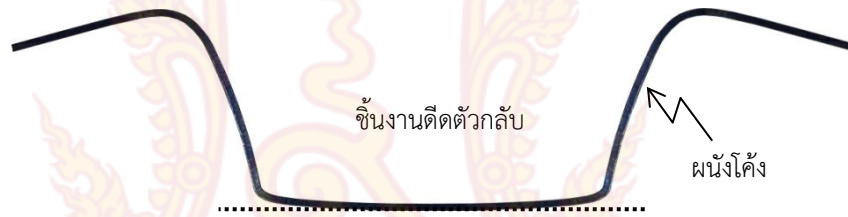
#### 4.1 ผลการทดสอบการตัดขึ้นรูปแบบไม่มีแผ่นรอง

ภาพที่ 4.2 แสดงการตัดขึ้นรูป Hat shape โดยไม่ใช้แผ่นรอง (Pad pressure) พบว่าในขณะที่พื้นที่เคลื่อนที่ลงมาผนังด้านล่างของชิ้นงานพบส่วนโค้งขนาดใหญ่ และเมื่อ Unloading พบการตีตัวกลับสูงมากดังภาพที่ 4.3 ในภาพที่ 4.4 แสดงผลการทดลองด้วยการตัดแบบไม่มีแผ่นรอง ชิ้นงานโดยใช้ วัสดุชิ้นงานคือเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงสองชนิดคือ 780, 980 และสแตนเลส 430 การตีตัวกลับสูงมากเมื่อไม่ใช้แผ่นรองเนื่องจากส่วนโค้งด้านล่างที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นการตัดขึ้นงาน และเมื่อ Unloading จะนำไปสู่การตีตัวกลับสูงมาก

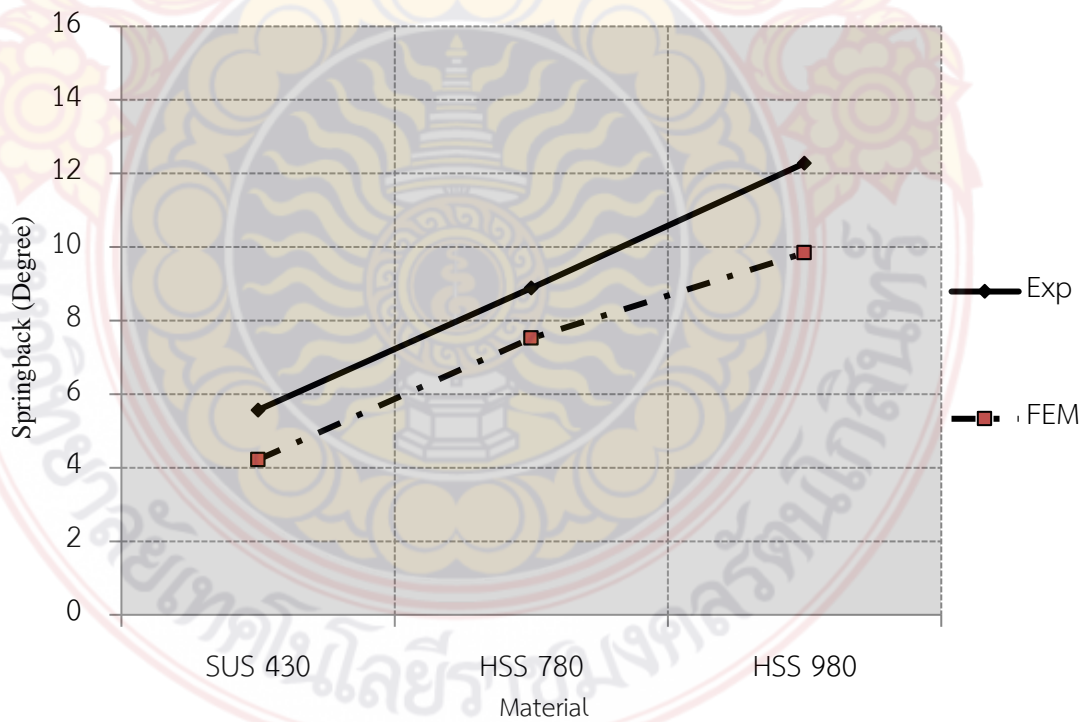




ภาพที่ 4.2 การดัดขึ้นรูปแบบ Hat shape แบบไม่ใช่แผ่นรอง (HSS 980 MPa)



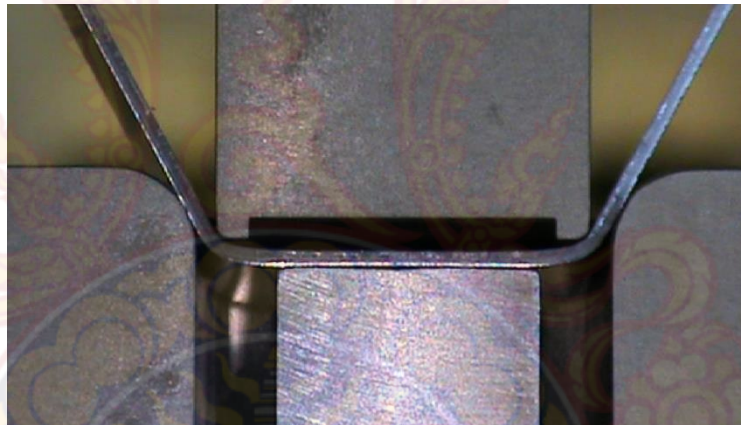
ภาพที่ 4.3 ตัวอย่างรูปร่างขึ้นงานหลังการทดสอบดัดขึ้นรูปแบบไม่ใช่แผ่นรอง (HSS 980 MPa)



ภาพที่ 4.4 การดัดตัวกลับภายหลังการดัดขึ้นรูปแบบไม่มีแผ่นรอง

## 4.2 ผลการทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบมีแผ่นรองและต้นกลับ

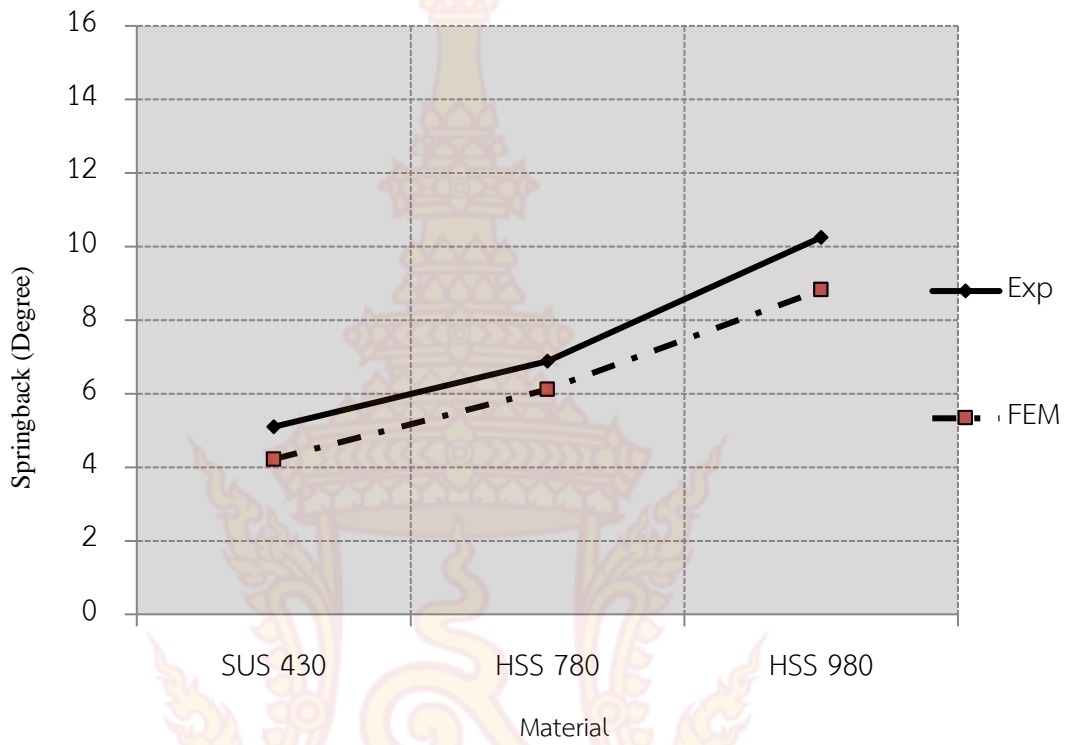
ภาพที่ 4.5 แสดงการดัดขึ้นรูปโดยใช้แผ่นรอง (Pad pressure) ที่ 2 kN จากการสังเกตพบว่า ในขณะที่พื้นที่เคลื่อนที่ลงมาผนังด้านล่างของชิ้นงานเรียบตรงและภายหลังเมื่อ Unloading การดัดตัวกลับลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับไม่ใช้แผ่นรองดังภาพที่ 4.6 สำหรับผลการทดลองการดัดตัวกลับ ภายหลังการดัดขึ้นรูปแบบมีแผ่นรองแสดงในภาพที่ 4.7 พบว่าการดัดตัวกลับลดลงทุกวัสดุอย่างไรก็ตามแม้ว่าจะสามารถลดการดัดตัวกลับได้ด้วย Pad pressure แต่ยังไม่สามารถลดปัญหาผนังโค้งได้ในการใช้แรงดันจากแผ่นรองจะต้องไม่มากเกินไปจนทำให้แรงในการขึ้นรูปสูงขึ้นทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน



ภาพที่ 4.5 การดัดขึ้นรูปแบบ Hat shape แบบใช้แผ่นรอง (HSS 980 MPa)



ภาพที่ 4.6 ตัวอย่างรูปร่างชิ้นงานหลังการทดสอบดัดขึ้นรูปแบบใช้แผ่นรอง (HSS 980 MPa)



ภาพที่ 4.7 การตีตัวกลับภายหลังการตัดขึ้นรูปแบบมีแผ่นรอง

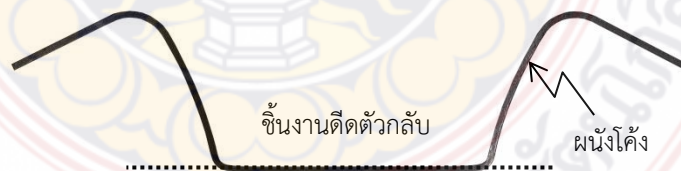


#### 4.3 ประสิทธิภาพของการตัดด้วยแม่พิมพ์ที่สลายความเค้นที่ผนังเพื่อกำจัดปัญหาผนังโค้ง

การแก้ไขปัญหามันโค้งในกระบวนการตัดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการออกแบบแม่พิมพ์แบบใหม่เพื่อลดความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูปทำให้ได้ชิ้นงานที่ปราศจากมันโค้งซึ่งภายหลังที่ได้ทำการทดลองกับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงสองชนิดและสแตนเลสพบว่าสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี และต่อจากนี้คือผลการทดลองกับวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 980 ที่มีความแข็งแรงมากที่สุด ในภาพที่ 4.8 แสดงการตัดขึ้นรูปและเกิดปัญหามันโค้งที่ชิ้นงาน เมื่อนำพันข้อออกจากชิ้นงานพบมันโค้งและเกิดการตีตัวกลับที่ปีกชิ้นงานดังภาพที่ 4.9

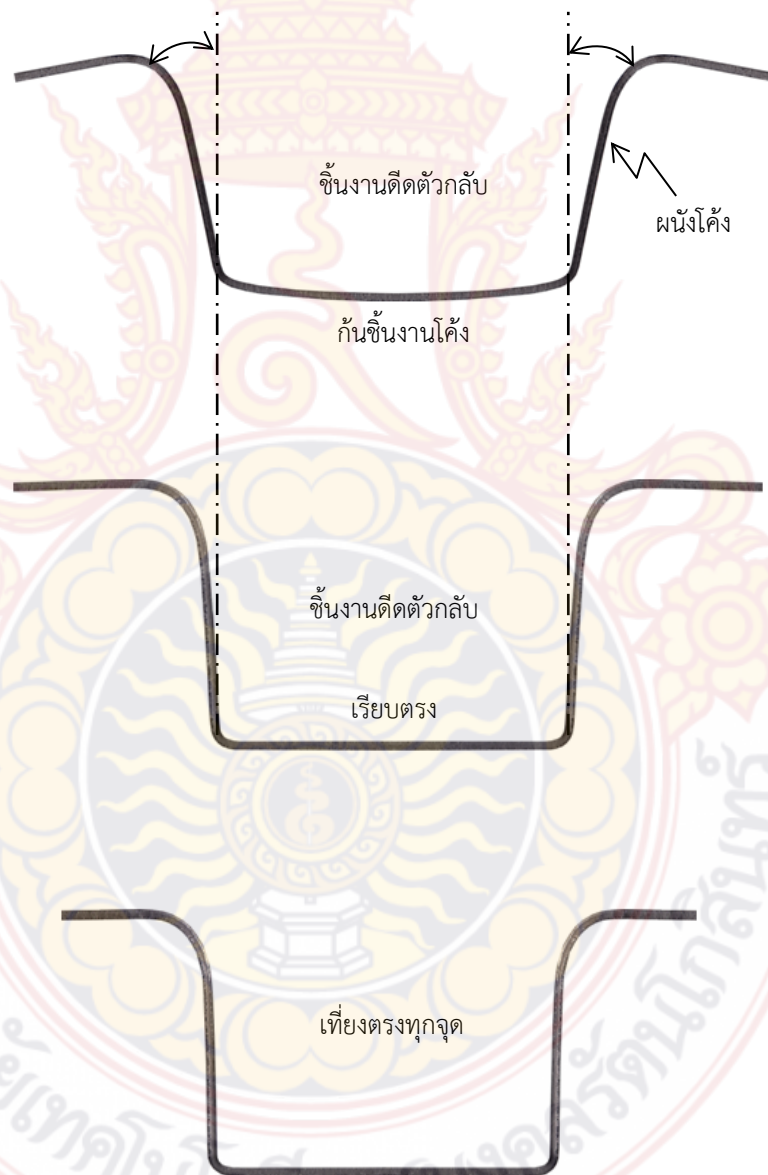


ภาพที่ 4.8 ปัญหามันโค้งที่ชิ้นงานที่เกิดขึ้นกับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 980 MPa



ภาพที่ 4.9 รูปร่างชิ้นงานหลังการทดสอบตัดขึ้นรูปแบบ Hat shape (HSS 980 MPa)

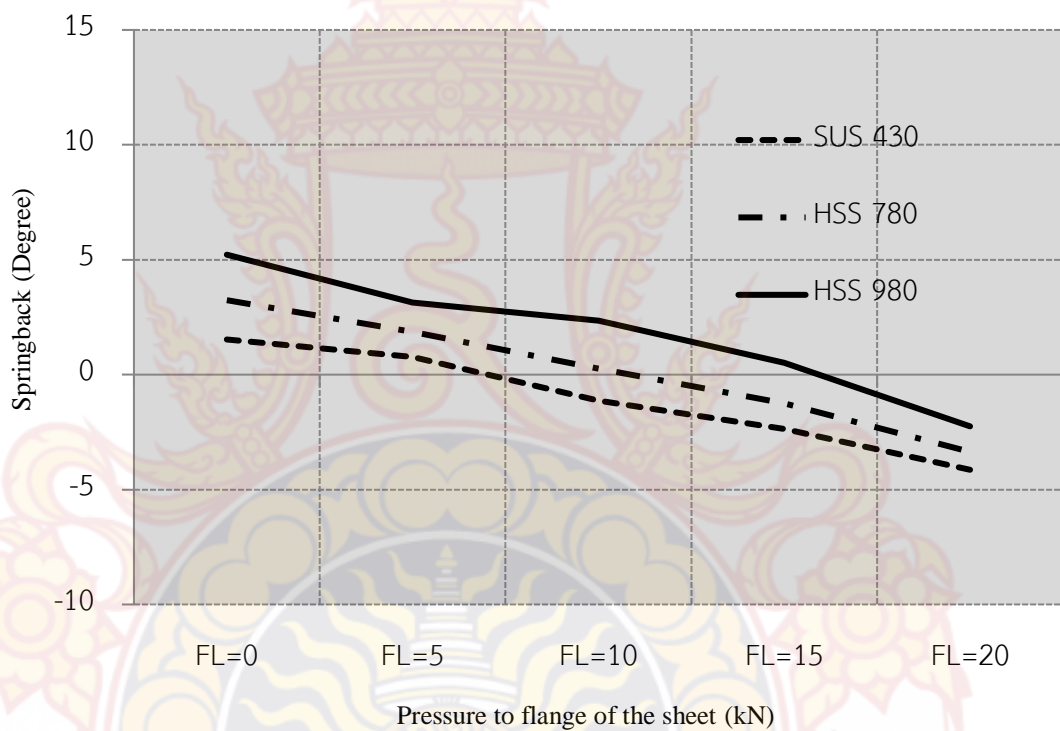
ในการดัดขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นการควบคุมความเค้นที่เกิดจากการขึ้นรูปให้เกิดบนพื้นที่บางส่วนของพื้นที่ขึ้นงานทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อควบคุมความเค้นบางจุดเพื่อนำไปสู่การควบคุมการดีดตัวกลับเป็นสิ่งที่น่าสนใจมากกับอุตสาหกรรม ในภาพที่ 4.10 แสดงรูปร่างขึ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 980 หลังการทดสอบดัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สลายความเค้นพบว่าสามารถแก้ไขปัญหามันโค้งได้เป็นอย่างดี ซึ่งในหัวข้อต่อไปจะได้อธิบายถึงสาเหตุของการลดความโค้งที่มันด้วยการคำนวณด้วย FE-simulation และการชดเชยการดีดตัวกลับของปีกขึ้นงาน



ภาพที่ 4.10 รูปร่างขึ้นงานหลังการทดสอบดัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สลายความเค้น (HSS 980 MPa)

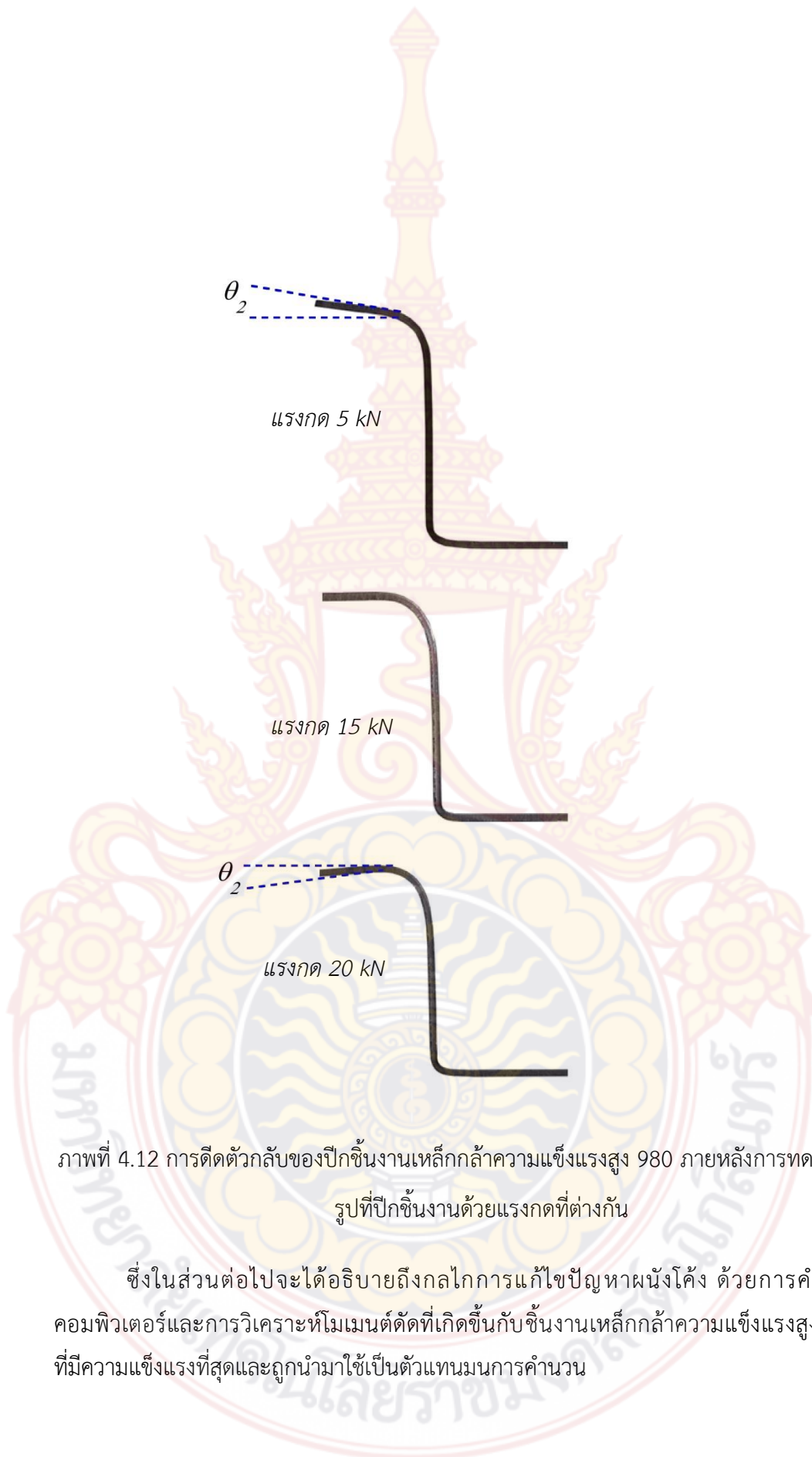
#### 4.4 แรงพับปีกส่งผลต่อการดัดตัวกลับของปีกชิ้นงาน

สิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการคือการดัดตัวกลับของปีกชิ้นงานในส่วนนี้เราได้ทำการชดเชยปีกของชิ้นงานด้วยการให้แรงกดในงานวิจัยนี้ใช้แรงของแผ่นรองสี่ระดับคือ 5kN, 10kN, 15kN และ 20kN เพื่อสร้างปีกที่เที่ยงตรง ในภาพที่ 36 แสดงผลการทดสอบการควบคุมการดัดตัวกลับของปีกชิ้นงาน ผลการทดลองพบว่าการควบคุมแรงดัดปีกที่เหมาะสมสามารถสร้างความเที่ยงตรงให้กับปีกชิ้นงานได้



ภาพที่ 4.11 การดัดตัวกลับของปีกชิ้นงาน

ภาพที่ 4.12 แสดงชิ้นงานวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 980 ภายหลังจากทดสอบดัดขึ้นรูปที่ปีกชิ้นงานด้วยแรงกดที่ต่างกัน จากการสังเกตพบว่า การเลือกใช้แรงกดที่ปีกชิ้นงานนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงค่าความแข็งแรงของวัสดุเป็นหลักในกราฟที่ 4.11 เมื่อสังเกตผลการทดลองของสแตนเลส 430 หากใช้แรงในการกดมากเกินไปปีกของชิ้นงานจะถูกกดมากเกินไป และในภาพที่ 4.12 คือเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด 980 ซึ่งมีความแข็งแรงมากทำให้ค่าแรงกดปีกที่เหมาะสมอยู่ที่ 15 kN ซึ่งจะสามารถทำให้ปีกของชิ้นงานเที่ยงตรงได้



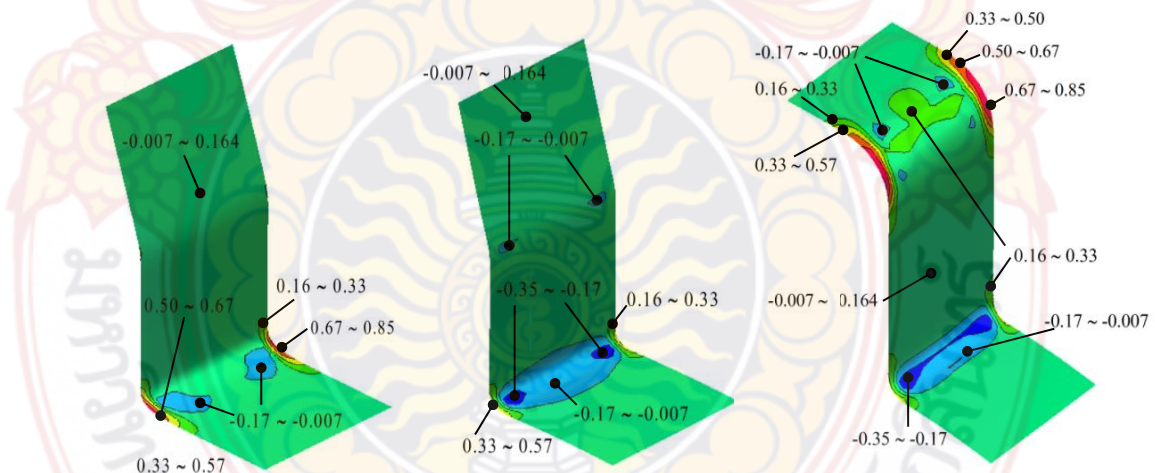
ภาพที่ 4.12 การตีตัวกลับของปีกชิ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 980 ภายหลังจากทดสอบดัดขึ้นรูปที่ปีกชิ้นงานด้วยแรงกดที่ต่างกัน

ซึ่งในส่วนต่อไปจะได้อธิบายถึงกลไกการแก้ไขปัญหานี้ด้วยคอมพิวเตอร์และการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด 980 ที่มีความแข็งแรงที่สุดและถูกนำมาใช้เป็นตัวแทนในการคำนวณ

#### 4.5 การจำลองการขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงในการตัดงอโลหะ ในเนื้อโลหะใกล้บริเวณเส้น

งานตัดขึ้นรูปแกนกลางของชิ้นงานมักมีความเค้นเกิดขึ้นน้อยมากหรือบางครั้งอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Elastic limits) ดังนั้นเมื่อยกพ้นออกจากตาย (Unloading) โลหะส่วนนี้จะพยายามติดตัวกลับสู่รูปร่างเดิม ในขณะที่เนื้อโลหะส่วนที่อยู่ห่างจากเส้นแกนกลางออกไปจะมีความเค้นเกิดขึ้นเกินจุดครากตัวซึ่งทำให้ต้านการกลับสู่รูปร่างเดิม ดังนั้นเมื่อตัดงอโลหะจนเปลี่ยนรูปร่างแล้ว จะยังคงมีเนื้อโลหะบางส่วนยังอยู่ในสภาวะยืดหยุ่นปนอยู่ จึงเป็นผลให้เกิดการติดตัวกลับของโลหะชิ้นงานไม่เป็นที่ตามองศาของของการตัดงอ และปัญหาผนังโค้งจะเกิดจากการตัดงอที่บริเวณผนังชิ้นงานซึ่งถ้าหากลดการตัดงอได้ก็จะสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้

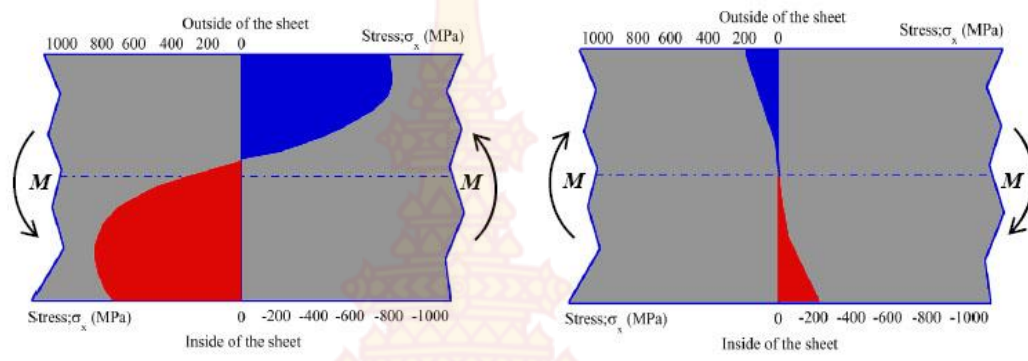
จากที่ได้กล่าวมาแล้วถึงสาเหตุหลักของการเกิดการติดตัวกลับในงานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์ถึงความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุโดยใช้วิธีการทาง FEM ในขณะที่ขึ้นรูปพบว่า มีความเค้นชนิดใดเกิดขึ้นบ้างจากภาพที่ 4.13 แสดงการกระจายตัวของความเค้นเหล็กกล้าเกรดความแข็งแรงสูง 980 พบว่าการใช้แม่พิมพ์ที่ออกแบบขึ้นมาใหม่สามารถคลายความเค้นที่ผนังได้ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดผนังโค้ง อย่างไรก็ตามที่ปีกชิ้นงาน พบความเค้นดึงซึ่งสภาวะของความเค้นเช่นนี้เองที่เป็นสาเหตุให้เกิดการติดตัวกลับของปีก



ภาพที่ 4.13 การกระจายตัวของความเค้นบนเหล็กกล้าเกรดความแข็งแรงสูง 980

และในภาพที่ 4.14 แสดงการคำนวณโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบริเวณผนังชิ้นงานเหล็กกล้าเกรดความแข็งแรงสูง 980 พบว่าโมเมนต์ดัดนั้นลดลงมากซึ่งสัมพันธ์กับความเค้นที่เกิดขึ้น และเมื่อความเค้นไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมากโมเมนต์ดัดก็จะมีค่าน้อยตามไปด้วยส่งผลให้ผนังโค้งลดลง





ภาพที่ 4.14 โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบริเวณผนังชิ้นงานเหล็กกล้าเกรดความแข็งแรงสูง 980



## บทที่ 5

### สรุปผล และข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้มีแนวคิดแก้ไขปัญหามันโค้งในกระบวนการตัดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการออกแบบแม่พิมพ์สมัยใหม่เพื่อลดความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป ทำให้ได้ชิ้นงานที่ปราศจากมันโค้ง ซึ่งถือว่าเป็นสิ่งที่น่าสนใจเนื่องจากสามารถสร้างชิ้นงานที่มีขนาดถูกต้องเพื่อรองรับอุตสาหกรรมขึ้นรูปโลหะแผ่น ภายหลังจากการวิจัยสามารถสรุปผลได้เป็นหัวข้อหลักๆดังนี้

#### 5.1 แรงของแผ่นรองชิ้นงานที่ส่งผลต่อการติดตัวกลับ

การตัดขึ้นรูปแบบไม่มีแรงจากแผ่นรองพบว่ากันชิ้นงานมีส่วนโค้งขนาดใหญ่เกิดขึ้นดังนั้นเมื่อ Unloading จึงพบการติดตัวกลับสูงมากและเมื่อเปลี่ยนมาใช้แรงรองส่วนโค้งไม่เกิดขึ้น การติดตัวกลับจึงลดลง

#### 5.3 ความสำคัญการลดลงของความเค้นที่ผนังที่ส่งผลต่อความโค้งของผนัง

การลดความเค้นบริเวณผนังชิ้นงานจากความเค้นดึงด้วยแม่พิมพ์ที่สลายความเค้นจะทำให้ได้ชิ้นงานที่ไม่เกิดปัญหามันโค้งได้

#### 5.3 แรงพับปีกส่งผลต่อการติดตัวกลับของปีกชิ้นงาน

การกำหนดค่าแรงกดปีกที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าความแข็งแรงของวัสดุเป็นหลักจะสามารถควบคุมทำให้ปีกของชิ้นงานเที่ยงตรงได้

#### ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากปัจจุบันมีเหล็กกล้าถูกพัฒนาค่าความแข็งแรงสูงมาก ทำให้เมื่อเปลี่ยนวัสดุก็ต้องปรับเปลี่ยนการทดสอบให้เหมาะสม จึงจำเป็นต้องใช้การคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ก่อนการออกแบบแม่พิมพ์จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทำงานได้

## บรรณานุกรม

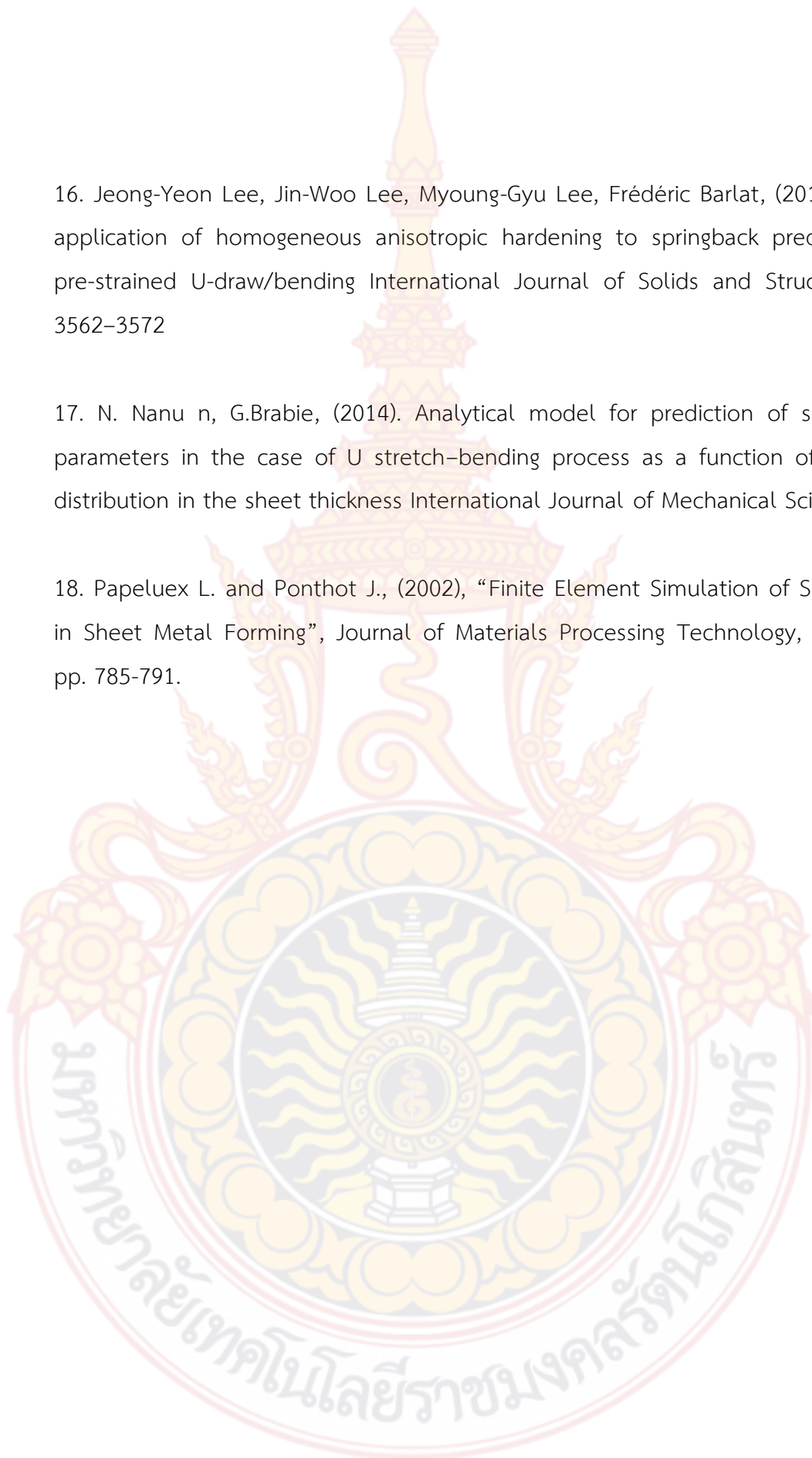
1. <http://www.worldautosteel.org>
2. Schuler, (1998), Metal Forming Handbook, 2nded., Springer, Berlin Heidelberg, pp. 156-388.
3. Lange, K (1985), Handbook of Metal Forming, 2nded., McGraw-Hill, New York, pp. 2.1-20.66.
4. W. F. Smith, Principles of Materials Science and Engineering, 3rd Edition, McGraw-Hill, ISBN 0-07-059241-1
5. Gang Liu, Zhongqin Lin, Weili Xu, Youxia Bao, (2002). Variable blankholder force in U-shaped part forming for eliminating springback error. Journal of Materials Processing Technology, Volume 120, Issues 1-3, 259-264.
6. <http://www.autosteel.org>
7. G. Sachs., (1956). Principles and methods of sheet-metal fabricating. Reinhold Publishing Co., USA.
8. Y.C. Liu, (1984). Springback reduction in u-channel—"double-bend" technique, J. Appl. Metalworking 3 148-156.
9. K. Mori, K. Akita, Y. Abe, (2005). Warm and Hot Stamping of Ultra High Tensile Strength Steel Sheets Using Resistance Heating. The International Journal of Machine Tools and Manufacture (54), 209-212.

10. Komgrit LAWANWONG, Varunee PREMANOND ", (2010). The Study of Reduction of Spring-back in U Bending Die Process", ICMEE 1-3 August, Japan
11. Komgrit LAWANWONG , (2011) "An Investigation on Effect of Residual Stress on Springback behavior of High strength Steel in U-bending Process", International journal Advanced Materials Research, Manufacturing process technology p.2864
10. K. Mori, K. Akita, Y. Abe, (2007). Springback behaviour in bending of ultra-high-strength steel sheets using CNC servo press, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47, 321-325
12. Varunee Premanond, Pongpan Kaewtatip, Nutthanun Moolsradoo, Anak Khantachawana, Komgrit Lawanwong, (20012). "Effect of Bending Direction on Springback of High Strength Steel Sheet", International journal Advanced Materials Research, Manufacturing process technology p 1103
13. Ogawa, T., Yoshida, F., (2011). Springback analysis on U-bending with bottoming. In: Chung K. (Ed.), Proceedings of the 8th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (NUMISHEET) 1129–1136. (2011)
14. Sutasn Thipprakmas., (2013). Finite element analysis of sided coined-bead technique in precision V-bending process. The International Journal Advance Manufacturing Technology (65), 679-688.
15. Zhang ZT, LeeD, (2013). Effects of process variables and material properties on the springback behavior of 2D-draw bending parts. In:Automotive stamping technology, SAE,1995.p.11–8.

16. Jeong-Yeon Lee, Jin-Woo Lee, Myoung-Gyu Lee, Frédéric Barlat, (2012) . An application of homogeneous anisotropic hardening to springback prediction in pre-strained U-draw/bending International Journal of Solids and Structures 49 3562–3572

17. N. Nanu n, G.Brabie, (2014). Analytical model for prediction of springback parameters in the case of U stretch–bending process as a function of stresses distribution in the sheet thickness International Journal of Mechanical Sciences

18. Papeluex L. and Ponthot J., (2002), “Finite Element Simulation of Springback in Sheet Metal Forming”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 125, pp. 785-791.

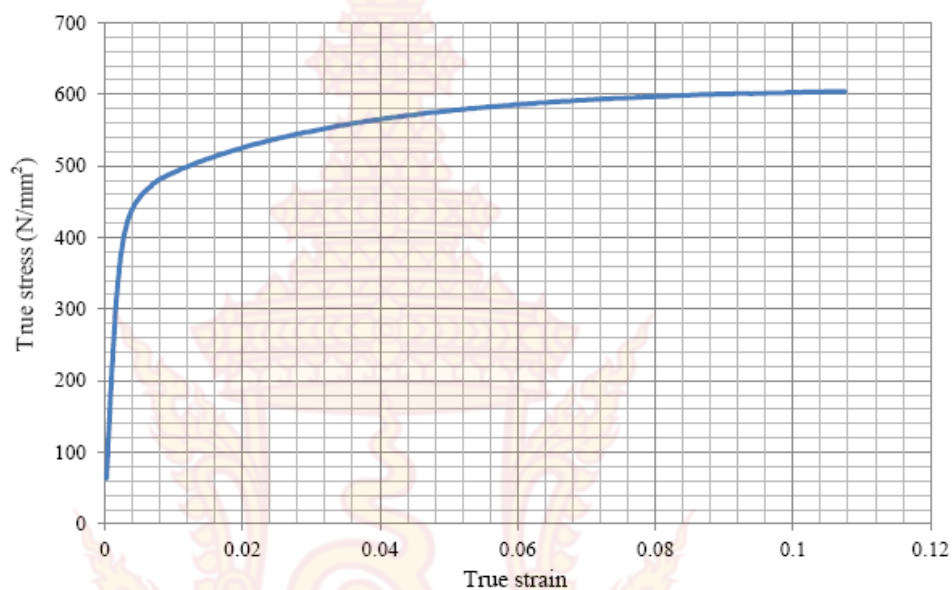




ภาคผนวก ก

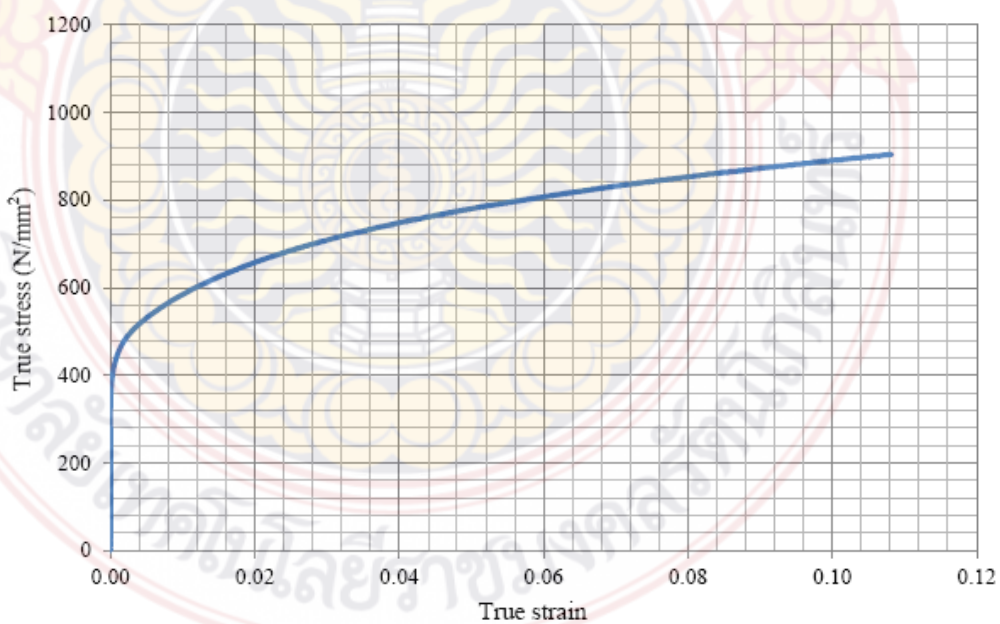
สมบัติทางกล

### Uniaxial Tensile test SUS 430



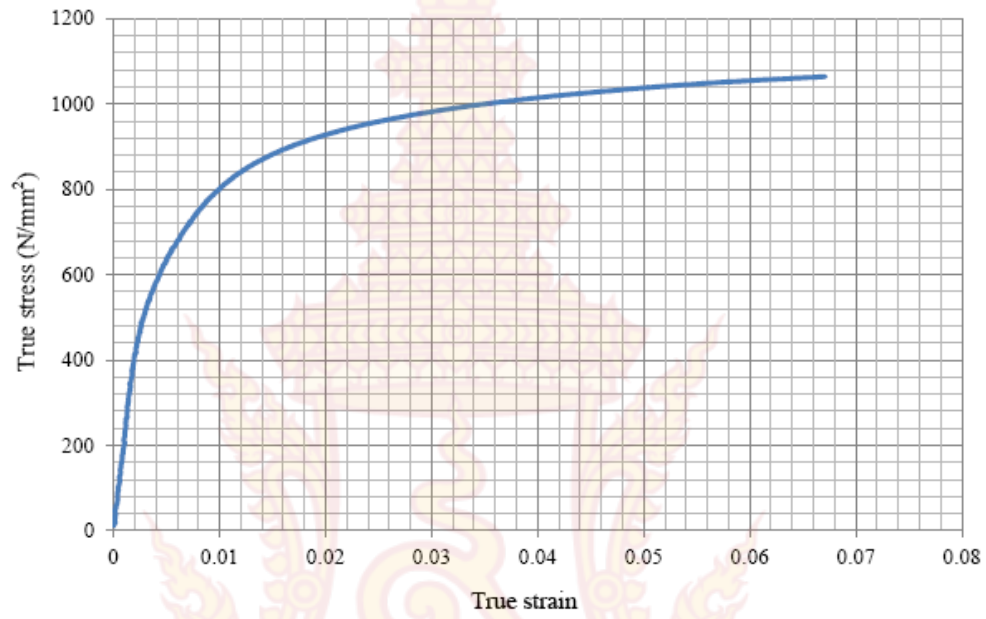
ความเค้นและความเครียดจริง (True stress – true strain) ของ SUS 430

### Uniaxial Tensile test HSS 780 MPa



ความเค้นและความเครียดจริง (True stress – true strain) ของ HSS 780

Uniaxial Tensile test HSS 980 MPa



ความเค้นและความเครียดจริง (True stress – true strain) ของ HSS 980







ภาคผนวก ข

ส่วนผสมทางเคมี

ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ SUS 430

Contents (%)
--------------

C	Si	Mn	P	S	Cr	V	B	Cu
Max %	Max %	Max %	Max %	Max %	Max %	Max %	Max %	Max %
0.12	0.75	1.0	0.040	0.010	16-18			

**ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ 780**

Contents (%)								
C	Si	Mn	P	S	Al	V	B	Cu
Max %	Max %	Max %	Max %	Max %	Max %	Max %	Max %	Max %
0.16	0.40	1.80	0.020	0.010	0.015	-	0.005	0.2

**ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ 980**

Contents (%)								
C	Si	Mn	P	S	Al	V	B	Cu
Max %	Max %	Max %	Max %	Max %	Max %	Max %	Max %	Max %
0.18	0.60	1.80	0.020	0.010	0.015	-	0.005	0.2

**ประวัติผู้วิจัย**

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายประสาน แสงเขียว

- ชื่อ - นามสกุล(ภาษาอังกฤษ) MR.PRASAN SANKHLEO
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 9301 00724 44 9
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
4. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก  
สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มทร.รัตนโกสินทร์  
โทร.032-618500 ต่อ 4047 E-Mail :Prasan.san@hotmail.com
5. ประวัติการศึกษา  
ปีที่จบการศึกษา ระดับปริญญา ชื่อปริญญา สาขาวิชา ชื่อ สถาบันการศึกษา ประเทศ  
2548 ตรี อส.บ. เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มทร.รัตนโกสินทร์ ไทย  
2553 โท วศ.ม. วิศวกรรมอุตสาหกรรม มทร.ธัญบุรี ไทย
6. สาขาที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ  
CNC, CAD/CAM, Manufacturing Process, ปฏิบัติงานทำแม่พิมพ์โลหะ
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุ  
สถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วม  
วิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย
- 7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : ชื่อแผนงานวิจัย
- 7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย
- 7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน (อาจ มากกว่า  
1 เรื่อง)
- (1) ประสาน แสงเขียว,ศิริชัย ต่อสกุล,ศิวกร อ่างทอง. 2553. “การศึกษาตัวแปรที่เหมาะสม  
ในการตัดเฉือนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304”. การประชุมวิชาการ มอบ.วิจัย ครั้งที่ 4. อุบลราชธานี,  
ประเทศไทย, 9-10 สิงหาคม 2553
- (2) Sirichai Torsakul and Prasan Sankhleo, 2011, “Investigation of the  
Efficiency and Cost of the Cutting Tool for Turning Stainless Steel AISI 304” The 9th

PSU-Engineering Conference, Prince of Songkla University, May 2-3, 2011 : Merlin Beach Resort Hotel, Phuket, pp: 65.



ประวัติผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ สกุล                      คมกริช ละวรรณวงษ์

2. ตำแหน่งปัจจุบัน            อาจารย์

### 3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มทร.รัตนโกสินทร์ วังไกลกังวล โทร.094-821 5727 E-Mail Komgrit.law@kmutt.ac.th

### 4. ประวัติการศึกษา

ปี ที่ จบ การศึกษา	ระดับ ปริญญา	ปริญญา	สาขาวิชา	สถาบันการศึกษา	ประเทศ
2544	ตรี	อส.บ.	วิศวกรรมอุตสาหกรรม	ม.เซนต์จอห์น	ไทย
2547	โท	วศ.ม.	เทคโนโลยีการขึ้นรูป โลหะ	พระจอมเกล้าธนบุรี	ไทย
2558	เอก	วศ.ด.	Mechanical Engineering (Elasto-Plastic)	Hiroshima University	Japan

### 5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

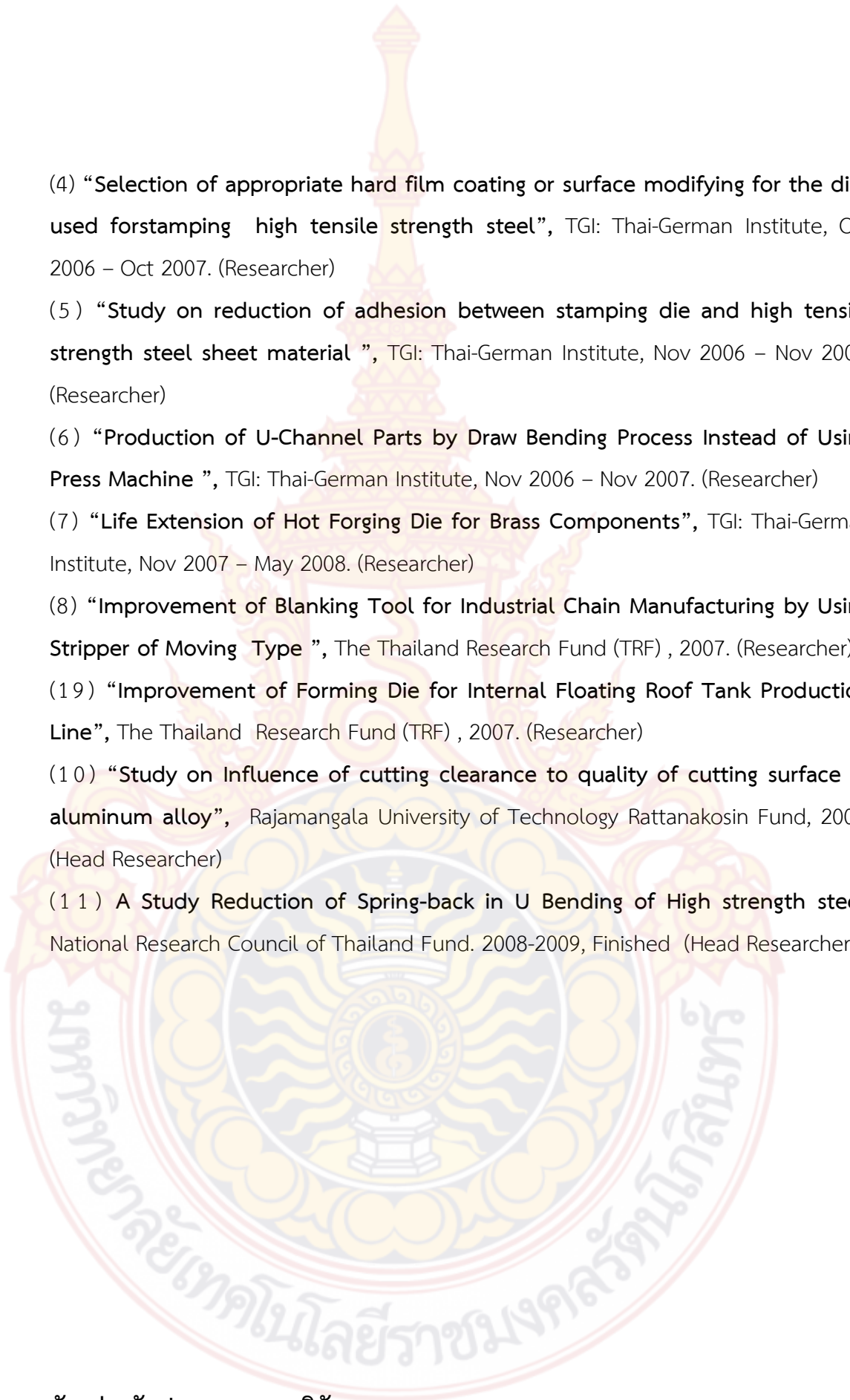
Wear in metal forming, Tool Engineering, แม่พิมพ์โลหะ, FEM in metal forming

### 6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

(1) “Development in Metal Forming Die Design on Tribological Aspect”, MTEC: National Metal and Materials Technology Center, July 2002 – July 2005. (Assistant Researcher)

(2) “Research on Performance of Hard Film Coating of Metal Stamping Dies”, TGI: Thai-German Institute, May 2005 – May 2006. (Researcher)

(3) “Forming Behavior of High Tensile Strength Steels”, TGI: Thai-German Institute, May 2006 – May 2007. (Researcher)

- 
- (4) “Selection of appropriate hard film coating or surface modifying for the dies used for stamping high tensile strength steel”, TGI: Thai-German Institute, Oct 2006 – Oct 2007. (Researcher)
- (5) “Study on reduction of adhesion between stamping die and high tensile strength steel sheet material”, TGI: Thai-German Institute, Nov 2006 – Nov 2007. (Researcher)
- (6) “Production of U-Channel Parts by Draw Bending Process Instead of Using Press Machine”, TGI: Thai-German Institute, Nov 2006 – Nov 2007. (Researcher)
- (7) “Life Extension of Hot Forging Die for Brass Components”, TGI: Thai-German Institute, Nov 2007 – May 2008. (Researcher)
- (8) “Improvement of Blanking Tool for Industrial Chain Manufacturing by Using Stripper of Moving Type”, The Thailand Research Fund (TRF), 2007. (Researcher)
- (19) “Improvement of Forming Die for Internal Floating Roof Tank Production Line”, The Thailand Research Fund (TRF), 2007. (Researcher)
- (10) “Study on Influence of cutting clearance to quality of cutting surface of aluminum alloy”, Rajamangala University of Technology Rattanakosin Fund, 2009. (Head Researcher)
- (11) A Study Reduction of Spring-back in U Bending of High strength steel, National Research Council of Thailand Fund. 2008-2009, Finished (Head Researcher)

#### ตัวอย่างสั้นปกรายงานการวิจัย

ตัวอย่างที่ 1 กรณีที่มีนักวิจัย 1 คน

เครื่องย่อยคอนกรีตเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่	เฉลิมพล ไชยแก้ว	2552
--	-----------------	------

ตัวอย่างที่ 2 กรณีที่มีนักวิจัยมากกว่า 1 คน

เครื่องย่อยคอนกรีตเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่	เฉลิมพล ไชยแก้ว และคณะ	2552
--	------------------------	------

ตัวอย่างที่ 3

การสร้างบทเรียนผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต วิชาหลักการบัญชี 1	เกษรา คำเปียง	2552
เรื่อง บัญชีของกิจการให้บริการ		

## ข้อกำหนดการจัดทำรูปเล่มรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

1. พิมพ์ด้วย MS office 2010 ขึ้นไปเท่านั้น
2. ตัวอักษรที่ใช้พิมพ์ต้องเป็น TH Sarabun New ขนาดตัวอักษรตามรูปแบบที่มีให้ดาวน์โหลดข้อมูลใน Website ของสถาบันวิจัยและพัฒนา
3. การจัดเก็บข้อมูลลงในแผ่น CD ให้จัดเก็บเป็นไฟล์ Word นามสกุล .docx 1 ไฟล์ และเป็นไฟล์ Pdf 1 ไฟล์
  - 3.1 กำหนดการย่อหน้าในเล่มต้องเป็นการตั้ง Tab เท่านั้น
  - 3.2 การเว้นวรรคในประโยค ใช้การเว้นวรรค 1 ตัวอักษร
  - 3.3 กั้นหน้า – กั้นหลัง ด้วยการกระจายแบบไทย (Thai distribution)
  - 3.4 จัดรูปแบบการพิมพ์เล่มรายงานฉบับสมบูรณ์ตามแบบตัวอย่างที่ให้ดาวน์โหลดใน Website ของสถาบันวิจัยและพัฒนา