การทำนายค่าการดีดตัวกลับในการพับขึ้นรูปแบบอุ่นและร้อน ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

โดย
เฉลิมพล คล้ายนิล

สนับสนุนงบประมาณโดย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ประจำปีงบประมาณ 2561

Prediction of Spring-back in Warm and Hot Forming of High Strength Steels by Back Propagation Neural Network Model

by

Chalermpol Klaynil

Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal Year 2018

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยเรื่อง “การทำนายค่าการดีดตัวกลับในการพับขึ้นรูปแบบอุ่นและร้อนของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม” ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณประจำปี พ.ศ. 2561 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ได้ให้การส่งเสริมและสนับสนุนในการทำวิจัย เนื่องจากงานวิจัยเป็นภารกิจหลักสำคัญของอาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษา

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์แก่บุคลากรทางการศึกษาและผู้สนใจทั่วไป ตลอดจนจะเป็นประโยชน์ในการสร้างองค์ความรู้ทางวิศวกรรมต่อไป

เฉลิมพล คล้ายนิล
กุมภาพันธ์ 2562

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : A62/2561

ชื่อโครงการ : การทำนายค่าการดีดตัวกลับในการพับขึ้นรูปแบบอุ่นและร้อนของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

ชื่อนักวิจัย : ผู้ช่วยศาสตราจารย์เฉลิมพล คล้ายนิล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการดีดตัวกลับโดยกระบวนการพับขึ้นรูปแบบอุ่นและร้อน ตัวแปรที่ศึกษาคือรัศมีพันช์และวัสดุทดลองเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 3 เกรด คือมาตรฐาน JIS G3135: SPFC440 SPFC590 และ SPFC780 ความหนา 1.0 มิลลิเมตร วัดมุมการดีดตัวกลับของวัสดุภายหลังกระบวนการพับขึ้นรูปและคำนวณค่าอัตราส่วนการดีดตัวกลับ และงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองในการทำนายค่าการดีดตัวกลับด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ ผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ทำการพับขึ้นรูปชิ้นงานสูงขึ้น มีผลทำให้มุมการดีดตัวกลับมีแนวโน้มลดลง และมุมการดีดตัวกลับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุที่ใช้ทดลองมีค่าความแข็งแรงสูงขึ้น มุมการดีดตัวกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของรัศมีพันช์ใหญ่ขึ้น และค่าอัตราส่วนการดีดกลับของวัสดุมีค่าลดลงเมื่อมุมดีดตัวกลับของชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนผลการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าการดีดตัวกลับ พบว่าสามารถทำนายค่าได้อย่างแม่นยำเป็นที่น่าพอใจ

คำสำคัญ: เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง, การพับขึ้นรูปแบบอุ่นและร้อน, การดีดตัวกลับ, โครงข่ายประสาทเทียม

E-mail Address: chalermpol.kla@rmutr.ac.th และ chalermpol1@hotmail.com

ระยะเวลาโครงการ : ตุลาคม 2560 ถึง กันยายน 2561

Abstract

Code of project: A62/2561

Project name: Prediction of Spring-back in Warm and Hot Forming of High Strength Steels by Back Propagation Neural Network Model

Researcher name: Asst. Prof. Chalermpol Klaynil

This research aimed to study the spring-back behavior in warm and hot bending process. From the studied parameters, such as punch radius, the materials are JIS G3135: SPFC440, SPFC590 and SPFC780 high strength steels 1.0 mm. of thickness. Spring-back angles after bending process are measured and calculated to spring-back factor (K_R). The study proposed the model to predict the spring-back values in U-bending by back propagation neural network model**.** The results showed that the effect of temperature increase can make the spring-back decrease and spring-back angle will increase as the material which has higher tensile strength and the increasing punch radius will increase the spring-back angle and the spring-back factor value of the calculation will decrease when the spring-back angle increase**.** The result from using artificial neural network to predict spring-back that can be predicted accurately

Keyword: High Strength Steel, Warm and Hot Forming, Spring-back, Neural Network

E-mail Address: chalermpol.kla@rmutr.ac.th and chalermpol1@hotmail.com

Period of project: September 2017 to October 2018

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	**1**
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับงานพับโลหะ 3

2.2 การดีดตัวกลับ 5

2.3 เหล็กกล้าสำหรับผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ 7

2.4 ทฤษฎีแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม 11

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 12

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 15

3.1 ขั้นตอนการทดลอง 15

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง 15

3.3 เครื่องมือและการทดลอง 16

3.4 การออกแบบการทดลอง 20

3.5 การฝึกหัดด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิดการแพร่ค่าย้อนกลับ 23

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล 24

4.1 อิทธิพลของรัศมีพันช์ต่อการดีดตัวกลับ 24

4.2 อิทธิพลของกระบวนการพับขึ้นรูปแบบอุ่นและแบบร้อนต่อการดีดตัวกลับ 26

4.3 อัตราส่วนการดีดตัวกลับของวัสดุ (Spring-back factor, K_R) 28

4.4 การทำนายผลการดีดตัวกลับด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม 30

บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย 37

สรุปผลงานวิจัย 37

เอกสารอ้างอิง 38

ภาคผนวก

ก. ตารางบันทึกผลการทดลอง 40

ประวัติผู้วิจัย 44

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

3.1 เงื่อนไขการทดลอง 15
3.2 เปรียบเทียบมาตรฐานของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 16
3.3 เปรียบเทียบสมบัติทางกลของวัสดุ มาตรฐาน JIS G3135 16
3.4 ตัวอย่างการออกแบบการทดลอง 20
3.5 บันทึกผลการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม 21
4.1 แสดงค่าเฉลี่ยผลจากการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 24
4.2 แสดงอัตราส่วนการดีดตัวกลับของวัสดุที่อุณหภูมิห้อง 29
4.3 ผลการทดลองและการทำนายค่าด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม SPFC440 31
4.4 ผลการทดลองและการทำนายค่าด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม SPFC590 33
4.5 ผลการทดลองและการทำนายค่าด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม SPFC780 34
ก.1 ผลการทดลองเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC440 41
ก.2 ผลการทดลองเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC590 42
ก.3 ผลการทดลองเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC780 43

สารบัญรูปประกอบ

หน้า

รูปที่

2.1 กระบวนการพับ 4
2.2 ความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่พับ 5
2.3 ลักษณะการดีดตัวกลับ 6
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับความเหนียวของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 8
2.5 เหล็กกล้าเกรดต่างๆ ที่ใช้ในชิ้นส่วนโครงสร้างตังถังรถยนต์ 9
2.6 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าสองเฟส 9
2.7 แบบจำลองแบคโพรพาเกชัน 12
3.1 แสดงรัศมีพันช์ที่ใช้ทดลองมีค่าแตกต่างกัน 17
3.2 แสดงแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปตัวยู 17
3.3 แสดงวิธีการวัดค่าการดีดตัวกลับ 19
3.4 การดีดตัวกลับของชิ้นงานหลังการพับ 19
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการดีดตัวกลับกับรัศมีพันช์ จากการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 25
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการดีดตัวกลับกับอุณหภูมิในการพับขึ้นรูป SPFC440 26
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการดีดตัวกลับกับอุณหภูมิในการพับขึ้นรูป SPFC590 27
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการดีดตัวกลับกับอุณหภูมิในการพับขึ้นรูป SPFC780 27
4.5 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการพับขึ้นรูปตัวยูขนาดรัศมีพันช์ 5.0 มิลลิเมตร 28
4.6 เปรียบเทียบอัตราส่วนการดีดกลับของวัสดุกับรัศมีพันช์ที่อุณหภูมิห้อง 29
4.7 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการฝึกหัด 31
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองและการทำนายค่าดีดตัวกลับ SPFC440 32
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองและการทำนายค่าดีดตัวกลับ SPFC590 34
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองและการทำนายค่าดีดตัวกลับ SPFC780 35

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High Strength Steel) มีแนวโน้มถูกนำมาใช้เป็นชิ้นส่วนยานยนต์เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะมีการพัฒนาคุณสมบัติให้สามารถรองรับแรงดึงและแรงกระแทกได้สูง เพื่อใช้เสริมในโครงสร้างตัวถัง ลดการยุบตัวจากแรงกระแทกที่เกิดจากการชน รวมทั้งเสริมความแข็งแกร่งของโครงสร้างตัวถัง เช่นกันชน คานประตู สำหรับการผลิตชิ้นส่วนมีน้ำหนักเบาลง แต่มีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้น ตอบสนองในด้านการประหยัดพลังงาน และเพิ่มความปลอดภัยของผู้โดยสาร โดยเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงนี้มีทั้งกลุ่มที่ใช้สำหรับขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง และกลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่ต้องให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนมีอุณหภูมิสูงตามที่ต้องการ เหล็กกล้าที่ใช้สำหรับขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง อาจทำให้แม่พิมพ์สึกหรอหรือเสียหายได้ง่ายและต้องคำนึงถึงการดีดตัวกลับหรือ Spring back ของชิ้นงานค่อนข้างมาก และการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนทำได้ยาก ส่งผลให้การขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องมีขีดจำกัด ส่วนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่ต้องให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนมีอุณหภูมิสูงตามต้องการนั้นเป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูปและลดปัญหาการดีดกลับของชิ้นงาน

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาถึงกระบวนการพับขึ้นรูปแบบอุ่นและแบบร้อน (Warm and Hot Forming) เข้ามาช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปและลดปริมาณการดีดตัวกลับของชิ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 3 เกรด ความหนา 1.0 มิลลิเมตร โดยในขั้นตอนการทดลองจะทำการทดสอบการพับขึ้นรูปแบบตัวยู (U-bending) 2 โค้ง มุมพับ 90 องศา อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปคืออุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และนำชิ้นงานที่ได้หลังจากการพับขึ้นรูปมาทำการตรวจสอบปริมาณการดีดตัวกลับ แล้วนำข้อมูลไปทำนายค่าการดีดตัวกลับด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมชนิดการแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-Propagation Neural Network Model) ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งมีปัจจัยนำเข้า (Input) ในการทำนายค่าการดีดตัวกลับประกอบด้วย 3 ค่า คือ อุณหภูมิในการพับขึ้นรูป, รัศมีของพันช์ และชนิดของวัสดุ ส่วนผลลัพธ์ (Output) มีทั้งหมด 1 ค่า คือ ค่าการดีดตัวกลับ (Spring-back) ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ Multilayer Perceptron Network โดยวิธีการฝึกสอนชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ กฎการเรียนรู้ Levenberg-Marquardt Algorithm เนื่องจากมีเสถียรภาพสูง การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทดลองแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือชุดแรกใช้เพื่อการฝึกหัดโครงข่ายประสาทเทียม และชุดที่สองใช้เพื่อทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมว่าสามารถทำนายได้อย่างแม่นยำมากเท่าไร เพื่อจะได้ปรับเปลี่ยนค่าของการฝึกหัดทำให้การทำนายผลมีความแม่นยำมากขึ้นหรืออยู่ในช่วงความผิดพลาดที่ยอมรับได้ โดยการทำนายผลของโครงข่ายประสาทเทียมในการทดลองมีวัตถุประสงค์หลักๆ คือเป็นเครื่องมือช่วยวางแผนในการผลิตชิ้นส่วน ลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายลงจากขั้นตอนการลองผิดลองถูกหรือการปรับแต่งแม่พิมพ์ใหม่ ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการผลิต และสามารถทำนายค่าการดีดกลับที่ยังไม่ได้มีการทดลองได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการพับขึ้นรูปแบบอุ่นและร้อนที่มีผลต่อการดีดตัวกลับของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

2. เพื่อทำนายค่าการดีดตัวกลับของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมชนิดการแพร่ค่าย้อนกลับ

3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ผลต่อค่าการดีดตัวกลับของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ชิ้นงานทดสอบคือเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดรีดเย็น 3 เกรด คือมาตรฐาน JIS G3135 เกรด SPFC440 เกรด SPFC590 และเกรด SPFC780

2. ทำการทดลองการพับขึ้นรูปแบบตัว U (U-bending) 2 โค้ง มุมพับ 90 องศา วัสดุทำพันช์และดายคือเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน JIS SKD61 ผ่านการชุบแข็งและอบคืนตัวทั้งชิ้น

3. ตัวแปรปัจจัยนำเข้า (Input) ประกอบด้วย 3 ค่า

3.1 อุณหภูมิในการพับขึ้นรูป มี 6 ระดับคือ 25 ^{o}C, 100 ^{o}C, 300 ^{o}C, 500 ^{o}C, 700 ^{o}C และ 900 ^{o}C

3.2 รัศมีของพันช์ (r_p) มี 4 ขนาดคือ 2.0 5.0 8.0 และ 11.0 มิลลิเมตร

3.3 ความหนาของวัสดุมีขนาด 1.0 มิลลิเมตร

4. การตรวจสอบอุณหภูมิของชิ้นงานในเตาอบไฟฟ้าด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K

5. การฝึกหัดด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิดการแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation neural network models) ด้วยโปรแกรม MATLAB

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทราบถึงอิทธิพลของกระบวนการพับขึ้นรูปแบบอุ่นและร้อนที่มีผลต่อการดีดตัวกลับของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

2. สามารถทำนายค่าการดีดตัวกลับของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SPFC780 ด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมชนิดการแพร่ค่าย้อนกลับ

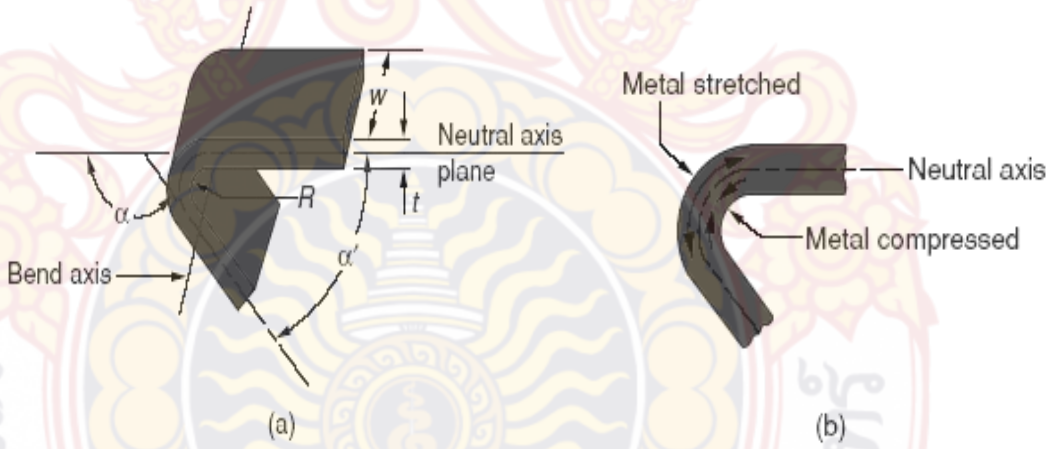
3. สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์พับขึ้นรูปอย่างเหมาะสม

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับงานพับโลหะ (Bending)

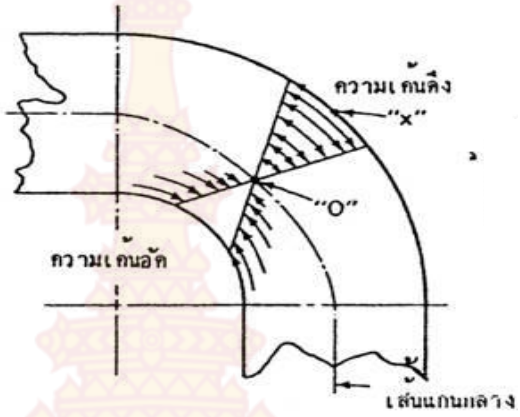
เป็นการออกแรงเพื่อทำให้โลหะซึ่งส่วนมากจะเป็นแผ่นเรียบ หมุนรอบแนวแกนอยู่ในระนาบที่ขนานกับแผ่นโลหะ โลหะจะเกิดการไหลตัวจนอยู่ในช่วงของ Plastic range และคงสภาพอยู่เช่นนั้น แม้จะเอาแรงที่มากระทำออกไปแล้วก็ตาม ในการออกแบบแม่พิมพ์พับโลหะนั้น ผู้ออกแบบจะต้องทราบถึงค่าจำกัดของรัศมีของการพับโลหะด้วย เพราะโลหะแต่ละชนิดมีค่าจำกัดของรัศมีของการพับที่น้อยที่สุดต่างกัน หากไม่คำนึงถึงค่าเหล่านี้แล้ว อาจทำให้เกิดปัญหาในการพับโลหะได้ ค่ารัศมีของการพับนี้จะบอกเป็นค่ารัศมีทางด้านในของส่วนโค้ง โดยทั่วไปรัศมีของการพับไม่ควรต่ำกว่า 1 เท่าของความหนาของโลหะที่จะพับ ในการพับผิวด้านในจะได้รับแรงกด (Compression) จึงหดตัว ส่วนผิวด้านนอกได้รับแรงดึง (Tension) จึงยืดตัวออก [1] ดังรูปที่ 2.1 สำหรับการทำการพับหรือดัดโลหะแผ่นนั้นจะมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- เพื่อเพิ่มความแข็งแรง (Strength) และความแข็งแกร่ง (Rigidity) ให้กับชิ้นงานให้มีมากขึ้น
- เพื่อทำให้ขอบที่ผ่านการตัดมามีความสวยงามและลดรอยคมจากครีบ (Burr) ที่เกิดจากการตัด
- เพื่อทำให้สามารถประกอบงานเข้าด้วยกันได้สะดวกขึ้นและเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน



รูปที่ 2.1 กระบวนการพับ [2]

กระบวนการพับขึ้นรูปชิ้นงานความเค้นจะเกิดที่รัศมีของการดัด (Bend radius) เท่านั้น บริเวณอื่นจะไม่เกิดขึ้นเลย (จากรูปที่ 2.2 แสดงรูปตัดขวางของโลหะแผ่นหลังจากผ่านการดัด) ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานสังเกตได้ดังนี้ โลหะที่ผิวนอกนอกรัศมีการดัดจะถูกดึงยืดออก แสดงว่าเกิดความเค้นดึง (Tensile stress) ส่วนโลหะที่อยู่ด้านในของรัศมีจะเกิดการอัดตัวภายใต้ความเค้นอัด (Compressive stress) ดังนั้นถ้ามีการฉีกขาดจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกของรัศมีของการดัดแต่ถ้ามีรอยย่นจะปรากฏขึ้นที่ผิวด้านในของรัศมีการดัด

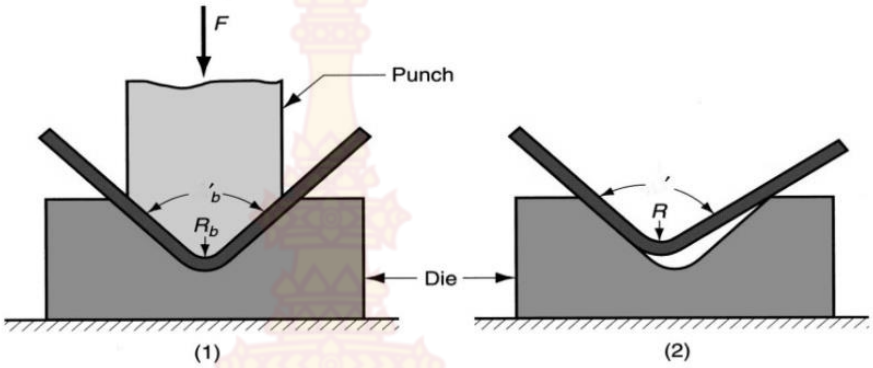


รูปที่ 2.2 ความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่พับ [3]

จากรูปที่ 2.2 ความเค้นจะเกิดมากที่สุดที่ผิวด้านนอกของทั้งสองด้านของความหนาของโลหะแผ่น แล้วค่อยลดลงเมื่อเข้าใกล้เส้นแกนกลางของความหนาชิ้นงานจนความเค้นเป็นศูนย์ที่แกนกลางเราเรียกบริเวณที่ไม่เกิดความเค้นขึ้นเลยว่า เส้นแกนกลาง (Neutral axis) ซึ่งเป็นเส้นแสดงความยาวของชิ้นงานโดยแท้จริงของชิ้นงานก่อนนำมาดัด ดังนั้นจึงหาความยาวของชิ้นงานก่อนดัดจากความยาวของเส้นแกนกลางได้ เมื่อเริ่มดัดโลหะแผ่นซึ่งยังดัดเป็นมุมเล็กๆ เส้นกลางจะอยู่ใกล้เส้นศูนย์กลางของความหนาชิ้นงานเมื่อดัดต่อไปมุมดัดใหญ่ขึ้นเส้นแกนกลางจะเลื่อนเข้ามาด้านในของรัศมีการดัด หรือด้านความเค้นอัดตามปกติเราจะวัดระยะห่างของเส้นแกนกลางจากผิวรัศมีด้านในออกไปหาเส้นแกนกลางตรงบริเวณที่มีการดัด

2.2 การดีดตัวกลับ (Spring back)

จากหลักการการพับที่กล่าวข้างต้น จะพบว่าในการพับหรือดัดงอโลหะทั่วไป เนื้อโลหะฝั่งด้านในจะเกิดการอัดตัวในขณะที่ฝั่งด้านนอกจะเกิดการยืดตัว ซึ่งจากการเกิดลักษณะดังกล่าวจะทำบริเวณเส้นแนวกลาง (Neutral axis) มีความเค้นอยู่ในช่วงยืดหยุ่นของวัสดุ (Elastic region) ในขณะที่เนื้อโลหะที่อยู่ห่างออกมาทั้งที่ผิวด้านนอกและด้านในจะเกิดความเค้นในช่วงเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic region) ดังนั้นพฤติกรรมของวัสดุช่วงยืดหยุ่นนี้จะพยายามดีดตัวกลับสู่สภาพเริ่มต้นในขณะที่ผิวด้านนอกและด้านในจะพยายามรักษาสภาพหลังการพับ ดังนั้นจึงส่งผลทำให้เกิดการดีดตัวกลับ [1] ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะการดีดตัวกลับ [2]

2.2.1 ปัจจัยทีมีผลต่อปริมาณการดีดตัวกลับ

2.2.1.1 โลหะแข็งจะมีมุมของการดีดตัวกลับมากกว่า เนื่องจากมีจุดครากตัวของวัสดุสูงกว่าซึ่งเป็นผลทำให้เกิดแถบยืดหยุ่นเล็กๆ บริเวณเส้นแกนกลางใหญ่กว่า

2.2.1.2 รัศมีการดัดเล็กจะลดการเกิดการดีดตัวกลับ โดยการสร้างช่วงการอยู่ตัวของโลหะที่ใหญ่กว่าแต่จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการฉีกขาดได้ง่าย เนื่องจากมีความเค้นดึงที่ผิวนอกของการดัดมากกว่า

2.2.1.3 เมื่อโลหะถูกดัดด้วยมุมที่มากกว่ามุมที่ต้องการดัด จะมีผลทำให้ช่วงของการอยู่ตัวของโลหะนั้นขยายตัวใหญ่ขึ้น ซึ่งจะเป็นการลดการดีดตัวกลับของชิ้นงานให้น้อยลง แต่อย่างไรก็ตามผลรวมของการดีดตัวกลับจะยังคงเพิ่มขึ้น

2.2.1.4 โลหะที่หนากว่าจะมีปริมาณการดีดกลับน้อย เนื่องจากช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรของโลหะมีมาก ซึ่งในการพิจารณาเปรียบเทียบค่ารัศมีการดัดจะต้องไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อโลหะมีค่าความหนาต่างกัน

2.2.2 การออกแบบเพื่อแก้ปัญหาการดีดตัวกลับ

การแก้ปัญหาการดีดตัวกลับของชิ้นงานหลังการดัดขึ้นรูป สามารถทำได้หลายวิธี บทนี้ขอกล่าวถึงเฉพาะวิธีที่ภาคอุตสาหกรรมนิยมใช้ซึ่งประกอบด้วย

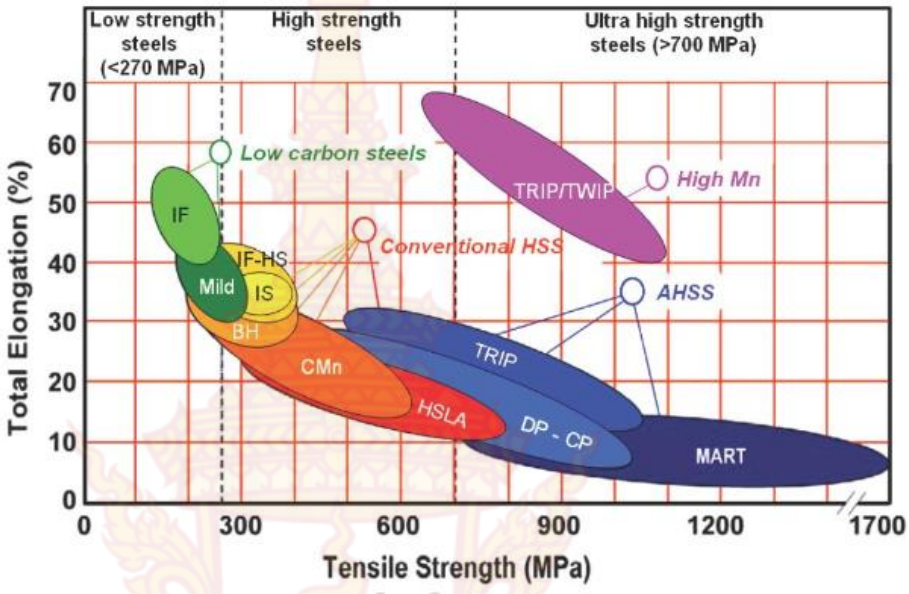
2.2.2.1 การดัดให้มุมมากกว่าที่ต้องการ (Over bending) หากรู้ปริมาณการดีดตัวกลับของชิ้นงานที่จะทำการดัดว่าประมาณเท่าไหร่เราสามารถชดเชยมุมดัดโดยการออกแบบมุมดัดของดายให้มีค่ามากกว่ามุมที่ต้องการเล็กน้อย เมื่อทำการดัดแล้วชิ้นงานที่ผ่านการดัดจะดีดตัวกลับมาในช่วงมุมดัดที่ต้องการ

2.2.2.2 การกดอัดกระแทก (Bottoming) เป็นวิธีการใช้พันช์กดอัดกระแทกอย่างแรงที่บริเวณพื้นที่ของรัศมีการดัด ทำให้พื้นทีบริเวณนี้ได้รับความเค้นกดมากกว่าจุดครากตัว เป็นผลทำให้เนื้อโลหะบริเวณนี้เปลี่ยนรูปอย่างถาวร ลดแถบยืดหยุ่นที่บริเวณเส้นแกนกลาง วิธีการไม่สามารถป้องกันการดีดตัวกลับได้หมด100% จะยังคงมีการดีดตัวกลับเหลืออยู่เล็กน้อย และความหนาของชิ้นงานบริเวณที่ถูกกดอัดกระแทกจะลดลง

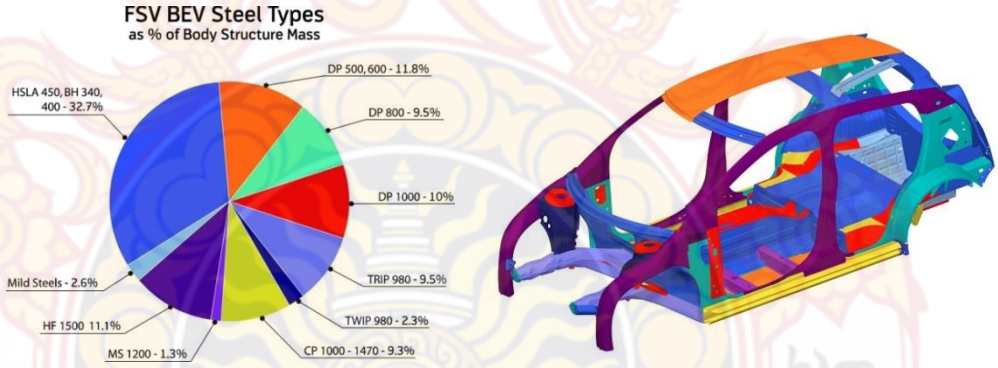
2.2.2.3 การรีดลดความหนาชิ้นงาน วิธีการนี้เป็นการลดเคลียแรนซ์ของแม่พิมพ์ให้มีค่าน้อยกว่าความหนาของวัสดุ เพื่อช่วยให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปในช่วงถาวรมากที่สุด อย่างไรก็ดีวิธีการนี้อาจส่งผลให้แม่พิมพ์สึกหรอเร็วขึ้น และต้องใช้แรงในการขึ้นรูปสูงกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ

2.3 เหล็กกล้าสำหรับผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High Strength Steel: HSS) เป็นเหล็กกลุ่มที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นและนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์และโครงสร้างของรถยนต์อย่างแพร่หลาย ซึ่งการแบ่งกลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงตามความแข็งแรงกับความเหนียว ดังรูปที่ 2.4 เหล็กในกลุ่ม HSS ได้ถูกนำมาผลิตเป็นโครงสร้างตัวถังรถยนต์มากกว่า 80% ของเหล็กทั้งหมด เหล็กกล้ากลุ่มนี้หลังจากเกิดการชนจะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงรูปหรือการเสียรูปของโครงสร้างได้ดี เนื่องจากเหล็กกลุ่ม HSS นั้นมีน้ำหนักเบา (คิดต่อค่าความแข็งแรงที่เท่ากัน) มีความแข็งแกร่งสูง มีความแข็งแรงสูง มีค่าความเครียดที่จุดแตกหักที่สูง (High fracture strain) มีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูง (High energy absorption) และมีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี (Good formability) เหล็กกล้าสองเฟส (Dual Phase steels: DP steels) เป็นเหล็กในกลุ่ม HSS ที่มีความสำคัญที่สุด และได้ถูกนำมาใช้ในชิ้นส่วนยานยนต์ประมาณ 31.3% ของน้ำหนักตัวถังรถ ดังรูปที่ 2.5 ตัวอย่างของชิ้นส่วนที่ผลิตจากเหล็กกล้าสองเฟส เช่น Dash cross member, B-pillar, Front rail closeout, Front-side members ซึ่งชิ้นส่วนเหล่านี้จะมีน้ำหนักลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นส่วนที่ผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอนที่ความแข็งแรงเดียวกัน เนื่องจากเหล็กกล้าสองเฟสมีพฤติกรรมจุดครากแบบต่อเนื่อง (Continuous yield behavior) มีอัตราการเพิ่มความแข็งแรงที่สูง (High strain hardening rate) มีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงที่จุดครากและความแข็งแรงสูงสุดที่ต่ำ ซึ่งสมบัติทั้งหมดนี้เป็นผลมาจากลักษณะเฉพาะของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าสองเฟส โดยโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าสองเฟสนั้นจะประกอบด้วยกลุ่มของเฟส martensite ซึ่งเป็นเฟสที่แข็งกระจายตัวอยู่ในเฟส ferrite ซึ่งเป็นเฟสพื้นที่มีความอ่อน จึงทำให้เหล็กกล้าสองเฟสนั้นมีความแข็งแรงและความเหนียวสูง ความแข็งแรงของเหล็กกล้าสองเฟสมีอิทธิพลมาจากปริมาณสัดส่วนของเฟส martensite และปริมาณคาร์บอนในเฟส martensite แต่สำหรับความเหนียวและพฤติกรรมทางกลอื่นๆ ของเหล็กกล้าสองเฟสนั้นจะถูกควบคุมโดยขนาดเกรนของ ferrite และ martensite การกระจายตัวของเฟส martensite สัดส่วนของเฟส martensite และรูปร่างของเฟส martensite โดยทั่วไปเหล็กกล้าสองเฟสจะมีสัดส่วนของเฟส martensite อยู่ที่ประมาณ 5-30% จะเห็นได้ว่าสมบัติทางกลของเหล็กกล้าสองเฟสนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างจุลภาคโดยตรง การปรับปรุงสมบัติทางกลของเหล็กจึงสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของทั้งเฟส ferrite และ martensite ตัวอย่างเช่นการเพิ่มความแข็งแรงของเหล็กกล้าสองเฟสนั้นสามารถทำได้โดยทำให้ขนาดเกรนของ ferrite เล็กลง เพิ่มสัดส่วนของเฟส martensite และเพิ่มปริมาณคาร์บอนในเฟส martensite แต่อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้งานของเหล็กกล้าสองเฟสนั้นยังมีข้อจำกัด เนื่องจากเหล็กกล้าสองเฟสนั้นมีพฤติกรรมของความเสียหายค่อนข้างซับซ้อน



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับความเหนียวของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

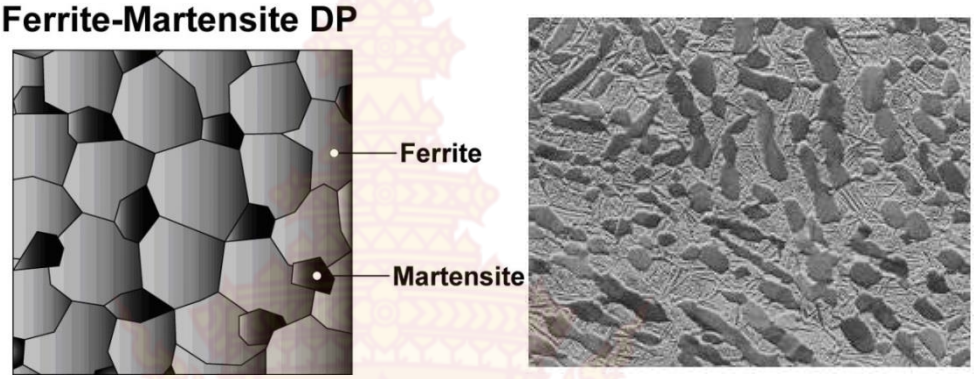


รูปที่ 2.5 เหล็กกล้าเกรดต่างๆ ที่ใช้ในชิ้นส่วนโครงสร้างตังถังรถยนต์ [4]

2.3.1 สมบัติของเหล็กกล้าสองเฟส (Dual Phase steels: DP steels)

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าสองเฟสประกอบด้วยเฟส ferrite ซึ่งเป็นเนื้อพื้น ferrite มีสมบัติเด่นคือมีความเหนียวสูง โดยทั่วไป ferrite จะมีประมาณ 70-90% โครงสร้างส่วนที่เหลือ จะเป็น martensite ซึ่งมีความแข็งแรงสูงแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างเนื้อพื้นที่มีความเหนียวบางครั้ง เนื่องจากอัตราการเย็นตัวที่ไม่มากพอหรือมีธาตุผสมอื่นที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนเฟสทำให้โครงสร้างที่เหลืออาจจะเป็นเบไนต์หรือออสเตไนต์เหลือค้างได้ การมีโครงสร้างเนื้อพื้นเป็น ferrite จะทำให้เหล็กกล้าสองเฟสมีความเหนียวสูงและการมีโครงสร้างที่มีความแข็งสูงอย่าง martensite จะทำให้เหล็กกล้ามีความแข็งแรงสูงขึ้น

เนื่องจาก martensite จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันในโครงสร้างเนื้อพื้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เป็นตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคทั่วไปของเหล็กกล้าสองเฟส จะพบว่าเนื้อพื้นเป็นเฟส ferrite และจะมีเฟส martensite การกระจายตัวอยู่



รูปที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าสองเฟส [5]

2.3.2 สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าสองเฟส (DP steels)

1) ความเค้นจุดครากต่ำ เหล็กกล้าสองเฟสจะมีความเค้นจุดครากที่ต่ำ เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ ซึ่งส่งผลทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปดีและมีความต่อเนื่องของจุดครากทำให้การแปรรูปชิ้นงานเป็นไปได้อย่างราบเรียบ

2) อัตราส่วนความแข็งแรงจุดครากต่อความแข็งแรงดึงต่ำ อัตราส่วนดังกล่าวแสดงถึงความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็กกล้าสองเฟสที่สูง โดยทั่วไปเหล็กกล้าสองเฟสจะมีอัตราส่วนดังกล่าวประมาณ 0.5 เท่า

3) ความสามารถต้านทานความล้าสูง เหล็กกล้าสองเฟสจะมีค่าความต้านทานความล้าสูงกว่าเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ เนื่องจากการมีโครงสร้างพื้นที่มีความเหนียวทำให้การโตต่อของรอยแตกของ martensite เป็นไปอย่างยากลำบาก ส่งผลให้ความต้านทานความล้าสูงกว่า

4) ความสามารถในการงอสูง (bendability) เหล็กกล้าสองเฟสมีความสามารถในการงอสูง สามารถดัดงอได้ดีโดยไม่เกิดรอยแตก สามารถดัดงอชิ้นงานให้มุมภายในใกล้ 0 องศา และดัดงอให้มุมภายในมีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของความหนาชิ้นงาน

5) เพิ่มความแข็งแรงจากการอบภายหลังการขึ้นรูปแล้ว (bake hardening) เมื่อนำชิ้นงานมาพ่นสีจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นเสมือนเป็นการอบชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์คาร์บอนไปจับตัวกับดีสโลเคชันทำให้ความแข็งแรงของเหล็กกล้าสองเฟสเพิ่มขึ้นประมาณ 35-70 MPa เมื่อนำชิ้นงานมาทดสอบแรงดึง พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปและถูกทำสีจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

6) อัตราส่วนความแข็งแรงต่อมวลสูง เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนความแข็งแรงกับมวลของเหล็กกล้าสองเฟสกับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ พบว่าเหล็กกล้าสองเฟสมีอัตราส่วนที่สูงกว่าซึ่งแสดงให้เห็นว่าเหล็กกล้าสองเฟสมีน้ำหนักเบากว่าทำให้ช่วยลดน้ำหนักของชิ้นส่วนยานยนต์

7) ความสามารถดูดซับการชนดี (absorb crash energy) เนื่องจากการมีอัตราส่วนความแข็งแรงจุดครากต่อความแข็งแรงดึงต่ำ ทำให้เมื่อเกิดการชนเหล็กกล้าสองเฟสจะสามารถดูดซับแรงได้ดี จากสมบัติดังกล่าวจึงได้มีการนำเหล็กกล้าสองเฟสไปผลิตเป็นชิ้นส่วนกันชนหน้าเพื่อช่วยดูดซับพลังงานจากการชน

8) ความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี (good formability) ความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีจะสัมพันธ์กับความเหนียว เหล็กกล้าสองเฟสที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ค่าสูงสุดในการขึ้นรูปโดยไม่ทำให้ชิ้นงานแตกจะมีค่าลดต่ำลง

2.4 ทฤษฎีแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network model) [6]

กระบวนการในการคิดคำนวณทางคอมพิวเตอร์แบบใหม่ด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligent: AI) ที่กำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบันคือแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งเป็นกระบวนการและวิธีการคำนวณที่พยายามสร้างแบบจำลองโครงสร้าง และหน้าที่การทำงานของสมอง และระบบประสาทมนุษย์เพื่อที่จะให้คอมพิวเตอร์ทำงานในสิ่งที่ทำไม่ได้หรือทำยังไม่ดีพอ เช่นการอ่านหนังสือ การจัดหมวดหมู่สิ่งของ เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ทางสาขาชีววิทยา และสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องกับการศึกษารูปแบบการทำงานของสมองและระบบประสาทของมนุษย์ ก็ยังไม่สามารถระบุรายละเอียดได้ทั้งหมดของกลไกการทำงานของสมองและระบบประสาทของมนุษย์ได้ ส่งผลให้นักวิชาการทางด้านวิทยาการคอมพิวเตอร์เสนอรูปแบบและวิธีการจำลองการทำงานของสมองและระบบประสาทของมนุษย์มากมาย โดยมีเป้าหมายที่จะทำให้ความสามารถของแบบจำลองเหมือนการทำงานโดยใช้มนุษย์มากที่สุด

2.4.1 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

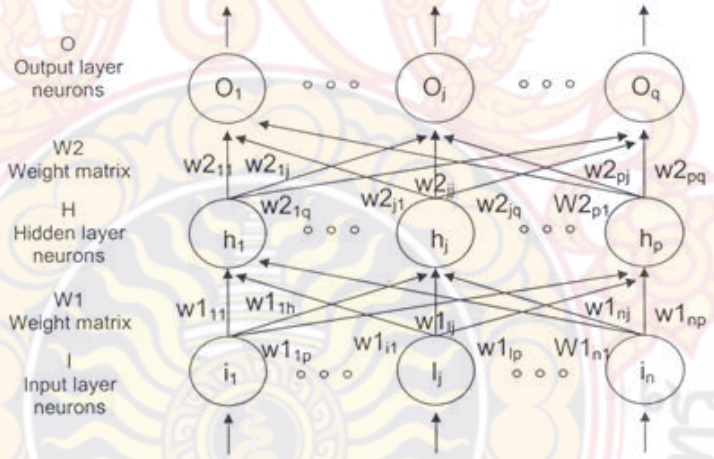
แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมนั้นประกอบด้วยโนดหรือหน่วยจำนวนหนึ่งเปรียบเทียบได้กับตัวเซลล์แต่ละหน่วยจะมีการเชื่อมโยงต่อกันและแต่ละการเชื่อมต่อจะมีค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยมูลฐานในการเก็บข้อมูลของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม และจะต้องมีการเรียนรู้เพื่อจะปรับเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักใหม่ บางหน่วยจะมีการเชื่อมต่อกับสิ่งแวดล้อมภายนอก ซึ่งเป็นส่วนกำหนดข้อมูลในหน่วยของอินพุทหรือหน่วยของเอาท์พุท ค่าถ่วงน้ำหนักจะมีการเปลี่ยนแปลงโดยพยายามที่จะนำค่าอินพุท และค่าเอาท์พุทมาทำการหาความสัมพันธ์กันเพื่อให้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมปรับเข้าสู่ทิศทางเดียวกันกับสภาพแวดล้อมของปัญหา

แต่ละหน่วยของประสาทเทียมของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบด้วย อินพุทชุดหนึ่งที่จะเชื่อมต่อไปยังหน่วยอื่น เอาท์พุทชุดหนึ่งที่เชื่อมโยงมาจากหน่วยประสาทอื่น ระดับการกระตุ้น ณ สภาวะปัจจุบัน และค่าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณระดับกระตุ้นที่ช่วงเวลาถัดไปจากค่าอินพุท และค่าถ่วงน้ำหนัก แนวคิดในการสร้างโครงข่ายประสาทเทียมอยู่ที่ว่าในแต่ละหน่วยประสาทจะทำการคำนวณโดยอาศัยค่าอินพุทจากหน่วยที่อยู่ข้างเคียง ในทางปฏิบัติแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมส่วนใหญ่ถูกสร้างขึ้นมาโดยซอฟต์แวร์ และการควบคุมตามเวลาในการปรับเปลี่ยนทุกหน่วยประสาทเทียม ให้เป็น

ลำดับที่แน่นอน การสร้างโครงข่ายประสาทเทียมประยุกต์ใช้ในงานอย่างหนึ่งอย่างใด ขั้นแรกต้องตัดสอนให้ได้ว่าจะต้องมีหน่วยประสาททั้งหมดเท่าไร หน่วยประสาทที่เหมาะสมนั้นเป็นอย่างไร และทำอย่างไรหน่วยประสาททั้งหมดจึงสามารถเชื่อมต่อกันในรูปของโครงข่ายได้ ชุดตัวอย่างในการฝึกหัดเหล่านั้น ใช้อัลกอริทึมในการเรียนรู้เพื่อปรับเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักให้กับงานนั้นๆ แล้วจึงใช้ชุดตัวอย่างนำมาตัดสินใจว่าจะเข้ารหัสในชุดของอินพุท และเอาท์พุทของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอย่างไร

2.4.2 แบบจำลองแบคโพรพาเกชัน (Backpropagation model)

เป็นแบบจำลองที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตัดสินใจแก้ปัญหาได้อย่างกว้างขวาง เป็นแบบจำลองที่ใช้หลักการเรียนรู้แบบมีการสอนเป็นสำคัญ โดยต้องมีชุดข้อมูลที่ดีพอและเหมาะสมในการนำไปใช้ในการฝึกหัดให้กับแบบจำลอง ดังรูปที่ 2.7 แบ่งออกเป็น 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นอินพุทชั้นที่ซ่อนไว้ และชั้นเอาท์พุท แต่ละชั้นจะรับอินพุทจากเอาท์พุทของชั้นที่อยู่ก่อนหน้า ชั้นที่ถูกซ่อนไว้จะไม่สามารถสังเกตเห็นอินพุทและเอาท์พุทได้โดยตรง เนื่องจากอินพุทของชั้นนี้ไม่ได้รับมาจากภายนอก แต่ได้มาจากการเอาค่าเอาท์พุทของชั้นที่อยู่ก่อนหน้า และเอาท์พุทของชั้นนี้ก็ไม่ได้เป็นเอาท์พุทจริงๆ ที่ต้องการ แต่จะเป็นเอาท์พุทที่จะส่งอินพุทให้กับชั้นถัดไป ชั้นที่ถูกซ่อนไว้นี้จะมีมากกว่า 1 ชั้นก็ได้ขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของปัญหา



รูปที่ 2.7 แบบจำลองแบคโพรพาเกชัน (Backpropagation model) [6]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

F. Ozturk, และคณะ [7] ได้ศึกษาเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง Dual Phase (DP600) ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์มากขึ้น เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง อย่างไรก็ตามความแข็งแรงที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เกิดพฤติกรรมการดีดตัวกลับในวัสดุทำให้เกิดปัญหาระหว่างการประกอบชิ้นส่วน ดังนั้นพฤติกรรมการดีดตัวกลับของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง DP600 จะแตกต่างกัน นั้นคือการพับขึ้นรูปจะศึกษาถึงทิศทางของแนวรีดทำมุม 0° 45° และ 90°, อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ต่างกัน

ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 300 °C ใช้ความเร็วในการขึ้นรูป 25 mm/min และแม่พิมพ์พับขึ้นรูปตัววี มุม 60° ผลการทดลองพบว่าความสามารถในการขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้นและปริมาณการดีดตัวกลับของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากอุณหภูมิในการพับขึ้นรูปสูงขึ้น

Yanagimoto J. และคณะ [8] ศึกษาการดีดตัวกลับของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด HSS-1 540 MPa, เกรด HSS-2 340 MPa และเหล็กกล้า SPCC หลังจากผ่านการขึ้นรูปอุ่นและร้อน ในปัจจุบันเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงมีการใช้งานเพิ่มมากขึ้น แต่จะเกิดปัญหาการดีดตัวกลับภายหลังจากการขึ้นรูป ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญมาก ดังนั้นจึงมีการศึกษาและทดลองการขึ้นรูปแบบอุ่นและร้อนโดยใช้แม่พิมพ์พับขึ้นรูปแบบตัววีและตัวยู ความเร็วของพันช์ 1 mm/s และการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการพับขึ้นรูป ผลจากการทดลองพบว่าการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงส่งผลทำให้ปริมาณการดีดตัวกลับมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 750K ซึ่งเป็นอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของโครงสร้าง Ferrite

Joonhang Lee และคณะ [9] ศึกษาพฤติกรรมการดีดตัวกลับและการบีบตัวเข้า ในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความหนามากๆ ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (Nb 0.05% Ti 0.01% -V 0.07%) มีค่าความแข็งแรง 580 MPa โดยการพับขึ้นรูปชิ้นงานแบบตัวยู ที่อุณหภูมิสูงคือตั้งแต่ 650 °C 750 °C 850 °C และ 950 °C วัสดุทำพันช์และดายคือเหล็กล้า AISI H13 รัศมีของดายเท่ากับ 5 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 1.0 mm และใช้ความเร็วของพันช์ 6 mm/s ผลจากการทดลองพบว่าผลกระทบจากการพับขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง ความแตกต่างของมุมรัศมีพันช์ และความหนาของชิ้นงานมีผลต่อพฤติกรรมการดีดตัวกลับและการบีบตัวเข้า ซึ่งผลจากการจำลองและการทำนายรูปแบบของการดีดตัวกลับจะเป็นเครื่องมือช่วยให้การพับขึ้นรูปมีขนาดที่เที่ยงตรงมากขึ้น

Guoliang Ji และคณะ [10] การทำนายพฤติกรรมในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ Aermet 100 ด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองสำหรับการอัดขึ้นรูปแบบร้อน ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 800 °C -1200 °C ค่าของความเครียด 0.05-0.09 และช่วงของอัตราความเครียด 0.01-50 s^{-1} โดย Input ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมคือความเครียด อัตราความเครียดและอุณหภูมิในการขึ้นรูป ส่วน Output คือ Flow stress ซึ่งในการทดลองใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ กฎการเรียนรู้แบบ Levenberg–Marquardt Algorithm ผลการทดลองพบว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายค่าได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความถูกต้องแม่นยำสูง

Hong Seok Kimb และคณะ [11] ศึกษาลักษณะการดีดตัวกลับของอลูมิเนียมผสม AA5754-O ในการพับขึ้นรูปตัวยูแบบอุ่น อุณหภูมิของพันช์และดายคือ 25 °C, 150 °C, 200 °C และ 250 °C โดยการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis: FEA) เป็นการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์พับขึ้นรูปและชิ้นงาน ซึ่งการเปรียบเทียบด้วย FEA ระหว่างแบบจำลอง 2D และ 3D จากผลการทดสอบการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีความถูกต้องแม่นยำและน่าเชื่อถือสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง โดยการวัดปริมาณการดีดกลับมี

K. Mori และคณะ [12] ได้ศึกษาการพับขึ้นรูปตัวยูแบบอุ่นและร้อน ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 800 °C ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SPFC440, SPFC590Y, 780Y และ 980Y ที่ความหนา 1.2 mm โดยการศึกษาการขึ้นรูปแบบร้อนเพื่อลดปริมาณการดีดตัวกลับและเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป ผลการทดลองพบว่าเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SPFC980Y เกิดการดีดตัวกลับน้อยที่สุด ที่อุณหภูมิ 600 °C แต่มีการเกิด Oxidation และความแข็งเพิ่มขึ้น

Gawade Sharad และคณะ [13] ได้ศึกษาการดีดตัวกลับในการพับขึ้นรูปตัวยู (U-bending) ของโลหะแผ่นวัสดุเป็น IS513D และ DP600-HDG ซึ่งกระบวนการพับหรือการดัดขึ้นรูปมีการผลิตอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอุตสาหกรรมยานยนต์ โลหะส่วนใหญ่มีแนวโน้มเกิดการดีดตัวกลับทำให้ชิ้นงานไม่ได้รูปทรงตามแบบ ในการทดลองได้วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีมุมดาย ความหนาของโลหะ อัตราส่วนของ R/t และการเปรียบเทียบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทำนายค่าด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ซึ่งผลการทดลองพบว่าสามารถทำนายค่าได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความถูกต้องแม่นยำสูง สามารถยอมรับได้ในระดับดีมาก

Wenjuan Liu และคณะ [14] ได้ศึกษาการทำนายค่าการดีดตัวกลับในการพับขึ้นรูปตัวยู (U-bending) เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ด้วย genetic algorithm (GA) ซึ่งการดีดตัวกลับเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นส่วน ดังนั้นการทำนายผลที่ถูกต้องและการควบคุมการดีดตัวกลับจึงเป็นสิ่งจำเป็นมากสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ โดยงานวิจัยนี้ได้เสนอการแก้ปัญหาดังกล่าว ด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม-genetic algorithm ผลการทำนายการดีดตัวกลับมีความถูกต้องแม่นยำ สามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการพับขึ้นรูปตัวยู U (U-bending) และการออกแบบแม่พิมพ์

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษากระบวนการพับขึ้นรูปแบบอุ่นและแบบร้อน (Warm and Hot Forming) ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการดีดตัวกลับ (Spring-back) ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 3 เกรด โดยกระบวนการพับด้วยแม่พิมพ์รูปตัวยู ตัวแปรในการทดลองคืออุณหภูมิในการพับขึ้นรูป มี 6 ระดับ และรัศมีของพันช์ (r_p) มี 4 ขนาด และนำข้อมูลไปทำนายค่าการดีดตัวกลับด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมชนิดการแพร่ค่าย้อนกลับ ดังตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขการทดลอง

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขการทดลอง						
อุณหภูมิในการพับขึ้นรูป	25 °C	100 °C	300 °C	500 °C	700 °C	900 °C
รัศมีพันช์ (r_p) มิลลิเมตร	2.0	5.0	8.0	11.0		
วัสดุทดลอง : JIS G3135	SPFC440	SPFC590	SPFC780			
รัศมีดาย (r_p) มิลลิเมตร	5.0					
วัสดุทำพันช์และดาย	JIS SKD61 Hot Work Tool Steel					
เตาไฟฟ้าอบโลหะ	รุ่น LH-18 EF-V-P และการตรวจสอบอุณหภูมิของชิ้นงานในเตาด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K					
เครื่องพับขึ้นรูป	แบบเพลาข้อเหวี่ยง ขนาด 60 ตัน ความเร็ว 35 มิลลิเมตร/วินาที					
โครงข่ายประสาทเทียม	ชนิด Back Propagation Neural Network Model โปรแกรม MATLAB					

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดรีดเย็น (High Strength Steel) 3 เกรด คือมาตรฐาน JIS G3135 เกรด SPFC440 เกรด SPFC590 และเกรด SPFC780 ความหนา 1 มิลลิเมตร ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองคือ มีความยาว (L) =105 มิลลิเมตร ความกว้าง (W) =15 มิลลิเมตร โดยสามารถเปรียบเทียบมาตรฐานต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

JIS G3135	ASTM A607	JFS A2001	MES MM106
SPFC440	Grade 45	JSC440W	SPCN440W

SPFC590	Grade 60	JSC590R	SPCN590R
SPFC780	Grade 70	JSC780Y	SPCN780Y

สมบัติทางกลของวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงในตารางที่ 3.3 และกำหนดให้ทิศทางการรีดของวัสดุมีทิศทางเดียวกับความยาวของแผ่นชิ้นทดลองเพื่อกำหนดผลกระทบของสมบัติแอนไอโซโทรปีให้เป็นไปในทิศทางเดียว การเสียรูปร่างของชิ้นงานหลังจากการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมของการดีดกลับภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบสมบัติทางกลของวัสดุ มาตรฐาน JIS G3135

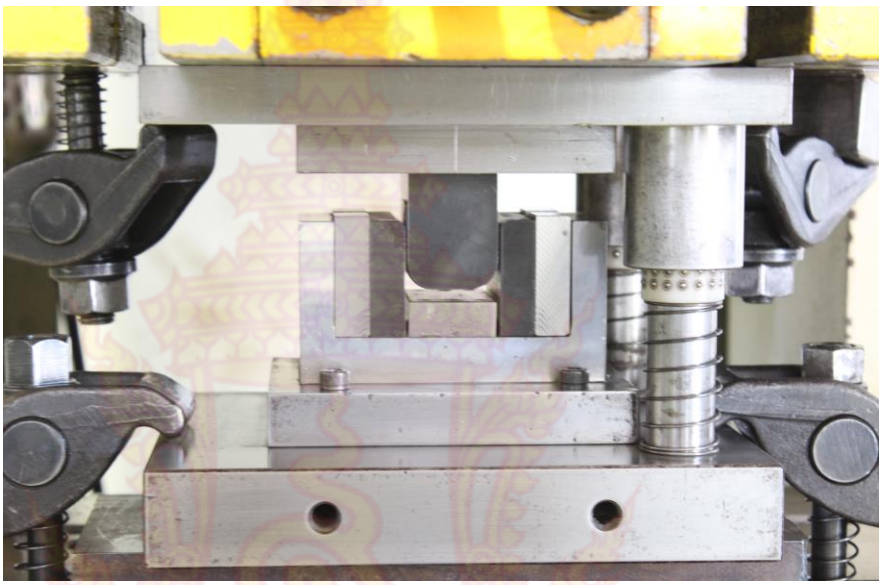
มาตรฐานอื่นๆ	**มาตรฐาน JIS**	**สมบัติทางกลของวัสดุ**		
		YS (MPa)	**TS (MPa)**	**%E**
JSC440W	SPFC440	265	440	27
SPCN590R	SPFC590	355	590	18
JSC780Y	SPFC780	530	790	16

3.3 เครื่องมือและการทดลอง

3.3.1 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองดัดรูปตัวยู ถูกออกแบบให้ง่ายต่อการถอดเปลี่ยนพันช์ระหว่างการทดลองพับรูปตัวยูชิ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง เพื่อศึกษาอิทธิพลของรัศมีพันช์ที่มีค่าแตกต่างกัน 4 ขนาด คือ 2.0, 5.0, 8.0 และ 11.0 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของพันช์ที่ใช้ทดลอง โดยมีขนาดความยาว 70 ความกว้าง 38 ความสูง 50 มิลลิเมตร ซึ่งรัศมีพันช์เป็นตัวแปรที่สนใจศึกษา เพราะมีผลต่อมุมการดีดตัวกลับของชิ้นงาน ชุดแม่พิมพ์พับขึ้นรูปตัวยูที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยแม่พิมพ์ติดตั้งกับเครื่องปั๊มโลหะแบบเพลาข้อเหวี่ยงรุ่น OCP-60 กำลังของเครื่องทดสอบเท่ากับ 60 ตัน หลักการทำงานแบบหนึ่งจังหวะ (Single action)

R_p 2 mm | R_p 5 mm | R_p 8 mm | R_p 11 mm

รูปที่ 3.1 แสดงรัศมีพันช์ที่ใช้ทดลองมีค่าแตกต่างกัน



รูปที่ 3.2 แสดงแม่พิมพ์พับขึ้นรูปตัวยู

แม่พิมพ์พับขึ้นรูปตัวยูที่ใช้ในการทดลองมีส่วนประกอบหลัก เช่น ชุดพันช์ ชุดดาย เพลทบน และเพลทล่าง การประกอบแม่พิมพ์เป็นการประกอบแบบสวมพอดีในชิ้นส่วนที่ต้องประกอบกันและมีการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนไกด์บูช เสาประคองสปริง ทั้งหมดมีจำนวน 2 เสาถูกยึดติดไว้ที่เพลทล่าง อุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบแม่พิมพ์เลือกใช้เป็นชิ้นส่วนมาตรฐาน วัสดุที่ใช้ผลิตแม่พิมพ์พับขึ้นรูปตัวยู ชิ้นส่วนเพลททั้ง 2 ได้แก่ แผ่นเพลทบน แผ่นเพลทล่างผลิตจากเหล็กกล้าเครื่องมือ S50C ชิ้นส่วนของพันช์และดายผลิตจากเหล็กกล้า SKD61 และผ่านกรรมวิธีชุบแข็งทั้งชิ้น (Full hardening) มีค่าความแข็ง 58 ±2 HRC

3.3.2 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการพับขึ้นรูป มี 6 ระดับคือ 25 °C, 100 °C, 300 °C, 500 °C, 700 °C และ 900 °C ด้วยเตาไฟฟ้าอบโลหะรุ่น LH-18 EF-V-P และการตรวจสอบอุณหภูมิของชิ้นทดสอบในเตาด้วย Thermocouple ชนิด K เริ่มให้ความร้อนกับชิ้นงานจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิทดสอบ ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิคงที่ 20 °C/min เมื่อความร้อนของชิ้นงานถึงอุณหภูมิทดสอบก็จะทำการอบแช่ (Holding time) ไว้นาน 8 นาที เพื่อให้ความร้อนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงาน ก่อนทำการทดลองการพับขึ้นรูปตัวยู

3.3.3 อธิบายหลักการทำงานของแม่พิมพ์ เริ่มต้นเมื่อนำชิ้นงานมาวางบนผิวดายที่ได้ทำร่องบ่าไว้เพื่อบังคับชิ้นงานให้อยู่กับที่ พันช์เคลื่อนที่ลงมากดชิ้นงานเพื่อทดลองพับขึ้นรูป เมื่อพันช์เริ่มเคลื่อนตัวกด

ชิ้นงานให้ลงในช่องดาย ผนังของชิ้นงานดัดด้านนอกจะสัมผัสกับรัศมีของดาย ทำให้ชิ้นงานมีการบีบตัวเข้าหาผนังด้านข้างของพันช์ ระยะทางของพันช์ในการทดลองเริ่มต้นเมื่อสัมผัสกับผิวของชิ้นงานจนสิ้นสุดระยะทางที่ความยาว 50.0 มิลลิเมตร แล้วเคลื่อนที่กลับด้วยความเร็วในการทดลองพับคงที่เท่ากับ 35 มิลลิเมตร/วินาที

3.3.4 การบันทึกข้อมูล การวัดค่าการดีดตัวกลับ (Spring back)

ทำการสแกนชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลอง และวัดค่ามุมชิ้นงานด้วยโปรแกรม Solid work โดยการสร้างเส้นอ้างอิงตามแนวขอบชิ้นทดสอบและวัดขนาดของมุมชิ้นงานด้วยคำสั่ง Smart dimension เพื่อหาค่ามุมการดีดตัวกลับของชิ้นทดสอบ วิธีการคำนวณขนาดมุมดีดตัวกลับแสดงดังสมการที่ 3.1 สามารถแบ่งชิ้นงานภายหลังจากกระบวนการพับขึ้นรูปได้ 2 แบบ คือชิ้นงานที่ไม่เกิดการดีดตัวกลับหรือเกิดการหุบตัวเข้า (Spring-go) วัดขนาดมุมได้น้อยกว่า 90 องศา และชิ้นงานเกิดการดีดตัวกลับ (Spring-back) วัดขนาดมุมได้มากกว่า 90 องศา ดังรูปที่ 3.3

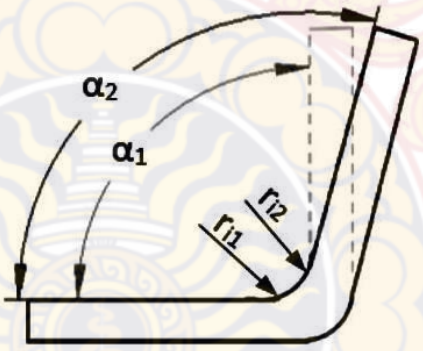
$$\Delta\theta = \alpha_2 - \alpha_1 \qquad (3.1)$$

เมื่อ

$\Delta\theta$ คือ มุมดีดตัวกลับ

α_2 คือ ขนาดมุมของชิ้นงาน

α_1 คือ ขนาดมุมการดัดหรือมุมของแม่พิมพ์

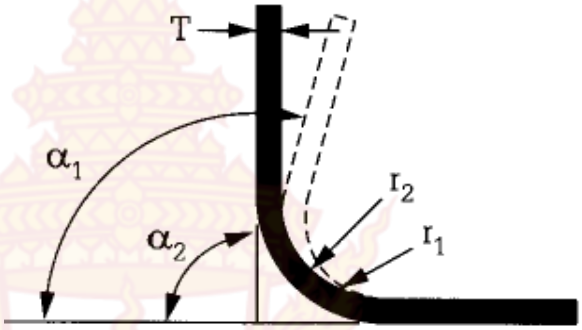


รูปที่ 3.3 แสดงวิธีการวัดค่าการดีดตัวกลับ

3.3.5 การดีดตัวกลับของชิ้นงานหลังการพับ (Spring-back after bending)

การดีดตัวกลับของชิ้นงานหลังการพับ หมายถึงการพยายามคืนรูปของโลหะหลังการพับซึ่งเกิดขึ้นหลังจากพ้นภาวะการรับแรง ความเค้นในเนื้อโลหะตรงบริเวณเส้นแกนกลางจะเป็นศูนย์ และยังอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Elastic limits) เมื่อยกพันช์ออกจากดายโลหะส่วนนี้จะพยายามดีดตัวกลับสู่รูปร่างเดิม แต่โลหะส่วนที่อยู่ห่างจากเส้นแกนกลางจะมีความเค้นเกิดขึ้นเกินจุดครากตัว ทำให้ต้านการกลับสู่รูปร่างเดิม ดังนั้น

เมื่อโลหะดัดงอไปจนเปลี่ยนรูปร่างแล้ว จะยังคงมีเนื้อโลหะบางส่วนยังอยู่ในสภาวะยืดหยุ่นและทำให้เกิดการดีดตัวกลับขึ้น ดังรูปที่ 3.4 ปริมาณการดีดตัวกลับของชิ้นงานหลังการพับ คำนวณได้จากอัตราส่วนมุมของชิ้นงานหลังการพับต่อมุมของดาย โดยเรียกค่าดังกล่าวว่าอัตราส่วนของการดีดตัวกลับ (Spring back factor; K_R) และวัสดุชิ้นงานพับแต่ละชนิดจะมีค่าอัตราส่วนของการดีดตัวกลับแตกต่างกัน ซึ่งสามารถคำนวณการดีดตัวกลับหลังการพับได้จากสมการที่ 3.2



รูปที่ 3.4 การดีดตัวกลับของชิ้นงานหลังการพับ

$$k_R = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{r_1 + 0.5t}{r_2 + 0.5t} \qquad (3.2)$$

α_1 คือมุมของดาย (องศา)

α_2 คือมุมของชิ้นงานที่วัดได้หลังการพับขึ้นรูป (องศา)

T คือความหนาของวัสดุชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

r_1 คือรัศมีด้านในของดาย (มิลลิเมตร)

r_2 คือรัศมีด้านในของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

3.4 การออกแบบการทดลอง

กระบวนการพับขึ้นรูปแบบอุ่นและแบบร้อนกับชิ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 3 เกรด ความหนา 1.0 มิลลิเมตร โดยจะทำการทดสอบพับขึ้นรูปแบบตัวยู (U-bending) 2 โค้ง มุมพับ 90 องศา อุณหภูมิในการพับขึ้นรูป มี 6 ระดับ และรัศมีของพันช์ (r_p) มี 4 ขนาด ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ยมุมการดีดตัวกลับของชิ้นทดสอบ ดังตารางที่ 3.4 แสดงตัวอย่างการออกแบบการทดลอง

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างการออกแบบการทดลอง

Punch radius, *Rp* (mm)	Temperature (°C)					
	25 °C	100 °C	300 °C	500 °C	700 °C	900 °C
Rp 2 mm						
Rp 5 mm						
Rp 8 mm						
Rp 11 mm						

จำนวนชิ้นทดสอบในการพับขึ้นรูปของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงแต่ละเกรดมีจำนวน 48 ตัวอย่าง และนำข้อมูลจากการทดลอง (Experiment) ไปทำนายค่า (Prediction) การดีดตัวกลับด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมชนิดการแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation neural network model) ด้วยโปรแกรม MATLAB มีปัจจัยนำเข้า (Input) ในการทำนายค่า คืออุณหภูมิในการพับขึ้นรูป รัศมีของพันช์ (r_p) และเกรดของวัสดุ ส่วนผลลัพธ์ (Output) คือค่าการดีดตัวกลับ (Spring-back) ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 บันทึกผลการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

No.	Punch radius (mm)	Temp (°C)	Spring-back experimental	Spring-back ANN	% Error
1	2	25			
2	2	25			
3	2	100			
4	2	100			
5	2	300			
6	2	300			
7	2	500			
8	2	500			
9	2	700			
10	2	700			
11	2	900			
12	2	900			
13	5	25			
14	5	25			

15	5	100			
16	5	100			
17	5	300			
18	5	300			
19	5	500			
20	5	500			
21	5	700			
22	5	700			
23	5	900			
24	5	900			
25	8	25			
26	8	25			
27	8	100			
28	8	100			
29	8	300			
30	8	300			
31	8	500			
32	8	500			
33	8	700			
34	8	700			
35	8	900			
36	8	900			
37	11	25			
38	11	25			
39	11	100			
40	11	100			
41	11	300			
42	11	300			
43	11	500			
44	11	500			
45	11	700			
46	11	700			
47	11	900			

48	11	900			

3.5 การฝึกหัดด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิดการแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation neural network models) ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้สำหรับทำการศึกษา ด้วยการสร้างแบบจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นไม่มีการกำหนดรูปแบบ และค่าพารามิเตอร์ในการศึกษาแบบตายตัว ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการพยากรณ์ ซึ่งการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทดลองแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือชุดแรกใช้เพื่อการฝึกหัดโครงข่ายประสาทเทียม และชุดที่สองใช้เพื่อทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมว่าสามารถทำนายได้อย่างแม่นยำมากเท่าไร เพื่อจะได้ปรับเปลี่ยนค่าของการฝึกหัด ซึ่งทำให้การทำนายผลมีความแม่นยำมากขึ้นหรืออยู่ในช่วงความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ผลที่ได้จากการทดลองแบ่งตามชั้นการทำงานประกอบด้วย

1 ชั้น 1 ได้แก่ ชั้นนำเข้าข้อมูล (Input Layer) ประกอบด้วยตัวแปรนำเข้า ได้แก่อุณหภูมิในการพับขึ้นรูป รัศมีพันช์ (R_p) และชนิดของวัสดุ

2 ชั้น 2 ได้แก่ ชั้นซ่อน (Hidden Layer) กำหนดให้มีหนึ่งชั้นซ่อน จำนวน 6 นิวรอน

3. ชั้น 3 ได้แก่ ชั้นผลพัทธ์ (Output Layer) กำหนดให้มีเพียง 1 นิวรอน คือ ค่าการดีดตัวกลับ โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนแบบเส้นตรง

โครงข่ายประสาทเทียมกำหนดให้มีกระบวนการสอนและเรียนรู้แบบย้อนกลับ โดยกำหนดค่า Learning Rate = 0.2 และ Error Rate =0.01 ซึ่งผลที่ได้จากการเรียนรู้และย้อนกลับเพื่อปรับค่าน้ำหนักในชั้นซ่อนจนค่าผลลัพธ์ได้ มีค่า Error Rate เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่กำหนด

- ทำการ SIMULINK เพื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดระหว่าง Output และ Output ที่ได้จากการ SIMULINK
- ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายผลค่าการดีดตัวกลับ ด้วยการป้อน Input เข้าไปใหม่ ที่ไม่ได้ทำทดลอง
- ทำการ SIMULINK เพื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดระหว่าง Output ที่ไม่ได้ทำการทดลองและ Output ที่ได้จากการ SIMULINK
- การเปรียบเทียบผลจากการทดลอง (Experiment) กับการทำนายค่า (Prediction) โดยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมชนิดการแพร่ค่าย้อนกลับ

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษากระบวนการพับขึ้นรูปแบบอุ่นและแบบร้อน (Warm and Hot Forming) ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการดีดตัวกลับ (Spring-back) ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 3 เกรด คือมาตรฐาน JIS G3135 เกรด SPFC440 เกรด SPFC590 และเกรด SPFC780 โดยกระบวนการพับด้วยแม่พิมพ์รูปตัวยู (U-bending) 2 โค้ง มุมพับ 90 องศา ตัวแปรในการทดลองคืออุณหภูมิในการพับขึ้นรูป มี 6 ระดับ คือ 25 °C, 100 °C, 300 °C, 500 °C, 700 °C และ 900 °C รัศมีของพันช์ (r_p) มี 4 ขนาด คือ 2.0, 5.0, 8.0 และ 11.0 มิลลิเมตร และรัศมีดายคงที่เท่ากับขนาด 5 มิลลิเมตร วัดค่ามุมการดีดตัวกลับของวัสดุภายหลังกระบวนการพับขึ้นรูป และคำนวณค่าอัตราส่วนการดีดกลับของวัสดุ (Spring-back factor, K_R) เพื่อใช้เปรียบเทียบและแสดงแนวโน้มพฤติกรรมการดีดตัวกลับของวัสดุแต่ละชนิด และนำข้อมูลไปทำนายค่าการดีดตัวกลับด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมชนิดการแพร่ค่าย้อนกลับ ด้วยโปรแกรม MATLAB

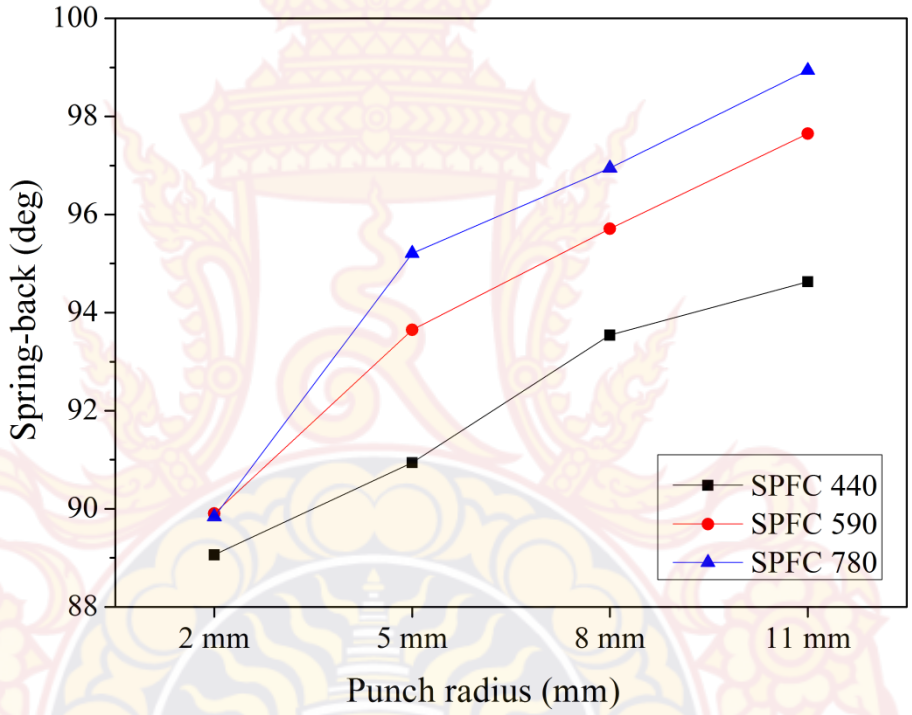
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ยผลจากการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

Punch radius (mm)	Spring-back (deg)		
	SPFC440	SPFC590	SPFC780
2	89.06	89.9	89.84
5	90.94	93.65	95.21
8	93.54	95.71	96.95
11	94.63	97.65	98.94

4.1 อิทธิพลของรัศมีพันช์ต่อการดีดตัวกลับ

ผลการทดลองวัดมุมดีดตัวกลับของวัสดุชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง ดังตารางที่ 4.1 พบว่าอิทธิพลของรัศมีพันช์มีผลต่อการดีดตัวกลับของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงทั้ง 3 เกรด จากการทดลองพับขึ้นรูปด้วยรัศมีพันช์ที่แตกต่างกัน 4 ขนาด คือเริ่มต้นทดลองที่รัศมีพันช์ 2.0 มิลลิเมตร พบว่าชิ้นงานไม่เกิดการดีดตัวกลับหรือเกิดการหุบตัวเข้า (Spring-go) มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 89.06 องศา (SPFC440) เมื่อเพิ่มขนาดรัศมีพันช์เป็น 5.0 มิลลิเมตร มีแนวโน้มเกิดการดีดตัวกลับเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดมุมการพับหรือมุมของแม่พิมพ์ และเมื่อทำการทดลองด้วยรัศมีพันช์ที่เพิ่มขึ้นคือ 8.0 มิลลิเมตร จนถึงขนาดรัศมีพันช์ 11.0 มิลลิเมตร มุมดีดตัวกลับมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการดีดตัวกลับสูงสุดเท่ากับ 98.94 องศา (SPFC780) จึงสามารถสรุปได้ว่าชิ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่ผ่านกระบวนการพับขึ้นรูปตัวยู มุมดีดตัวกลับจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของรัศมีพันช์ใหญ่ขึ้น และมุมดีดกลับจะมีค่าน้อยเมื่อรัศมีพันช์มีขนาดเล็กลง เพราะว่าที่รัศมีพันช์มีค่าน้อยจะใช้แรงกดดัดมาก ทำให้ความเค้นและความเครียดกระจายสม่ำเสมอ ส่งผลให้วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงรูปถาวร (Plastic deformation) มากกว่า จึงส่งผลให้มุมการตัวดีดกลับลดลง [15] และสอดคล้องกับ

ผลงานวิจัยของ Inamdar [16] และเมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ผ่านการทดลองพับขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SPFC780 มีมุมการดีดตัวกลับมากที่สุด รองลงมาคือ เกรด SPFC590 และเกรด SPFC440 มีมุมการดีดกลับน้อยที่สุด ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากการทดลองพับขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องผลการทดลองพบว่ามุมการดีดตัวกลับของชิ้นงานมีค่าสูง ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุมีอัตราการเพิ่มความแข็งแรงที่สูง (Strain hardening rate) โดยความแข็งแรงที่มีค่าสูงมีผลมาจากเฟส Martensite หรือการเกิด Strain hardening ที่สูง [17, 18] เมื่อทดลองที่อุณหภูมิห้องจะทำให้ชิ้นงานมีมุมการดีดตัวกลับสูงสุด เพราะว่าปริมาณดิสโลเคชัน (Dislocation) มีค่าสูงนั่นเอง

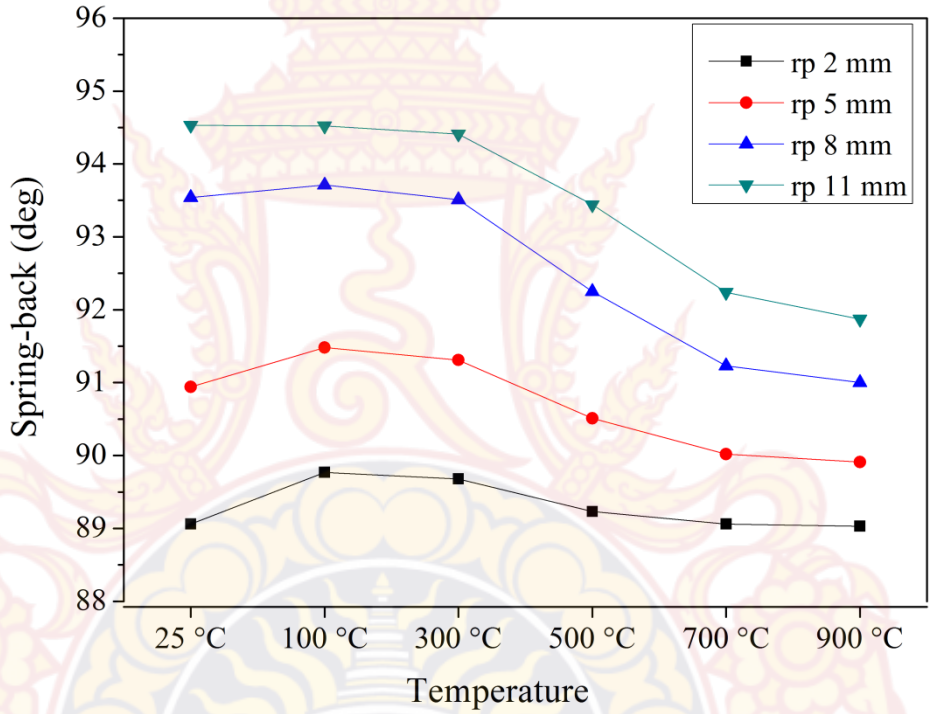


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการดีดตัวกลับกับรัศมีพันช์ จากการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

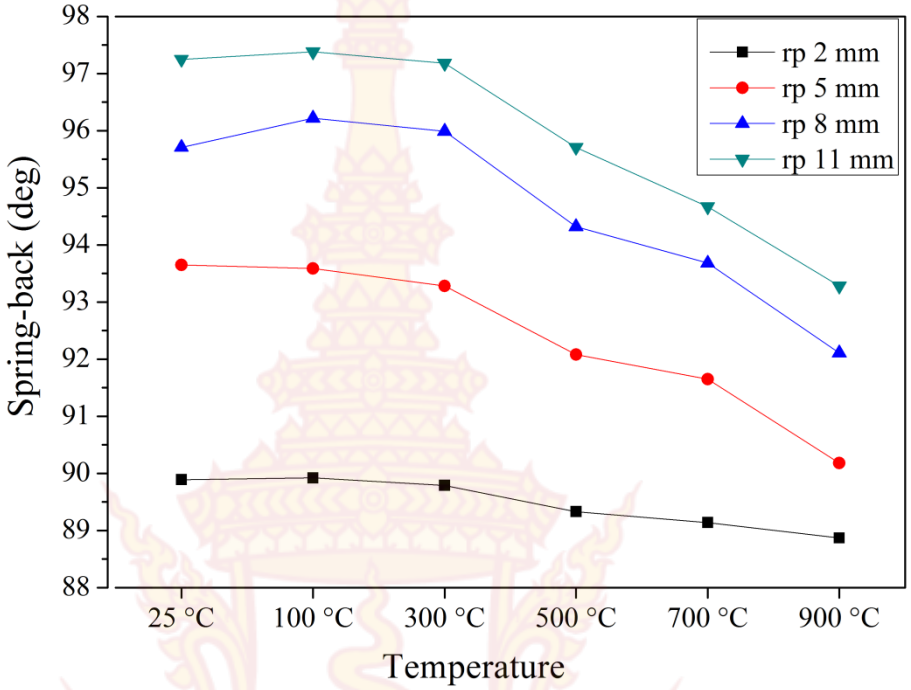
4.2 อิทธิพลของกระบวนการพับขึ้นรูปแบบอุ่นและแบบร้อนต่อการดีดตัวกลับ

จากรูป 4.2 ถึง 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมการดีดตัวกลับกับอุณหภูมิที่ใช้พับขึ้นรูป จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิขึ้นรูปมีค่าสูงขึ้น มุมการดีดตัวกลับของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง จากผลการทดลองพับขึ้นรูปวัสดุแต่ละชนิด พบว่าเมื่อทดลองที่อุณหภูมิห้องถึง 300 องศาเซลเซียส จะส่งผลต่อมุมการดีดตัวกลับไม่มากนัก แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิพับขึ้นรูปสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส มุมการดีดตัวกลับจะลดลงอย่างชัดเจน เพราะว่าอุณหภูมิจะช่วยให้โครงสร้างของดิสโลเคชันคลายตัวออกจากกันและทำให้ปริมาณของดิสโลเคชันลดลง จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มลดต่ำลงตามอุณหภูมิทดสอบที่เพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิพับขึ้นรูปชิ้นงาน 900 องศาเซลเซียส ขนาดรัศมีพันช์ 5.0 มิลลิเมตร

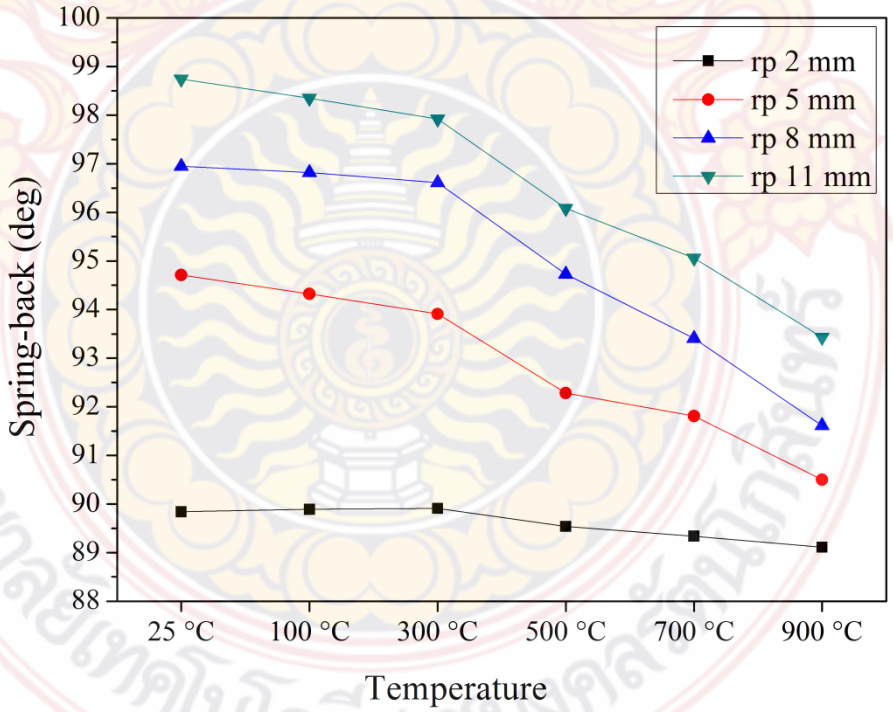
พบว่าค่ามุมการดีดตัวกลับของชิ้นงานลดลงมีค่าใกล้เคียงขนาดมุมการพับหรือมุมของแม่พิมพ์มากที่สุด จากการทดลองวัสดุทั้ง 3 เกรด อุณหภูมิในการพับขึ้นรูปเพื่อลดมุมการดีดตัวกลับนั้น เป็นผลมาจากความแข็งแรงของวัสดุที่ลดลง ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้จะเป็นประโยชน์ในการเลือกใช้อุณหภูมิที่เหมาะสม ส่วนมุมการดีดตัวกลับของชิ้นงานจะแปรผันตรงกับขนาดรัศมีพันช์ โดยรัศมีพันช์ขนาดใหญ่มุมการดีดตัวกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และรัศมีพันช์ขนาดเล็กส่งผลให้มุมการดีดตัวกลับมีค่าน้อยลง โดยรัศมีพันช์ขนาด 2.0 มิลลิเมตร ชิ้นงานไม่เกิดการดีดตัวกลับหรือเกิดการหุบตัวเข้า (Spring-go) ทุกช่วงอุณหภูมิ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการดีดตัวกลับกับอุณหภูมิในการพับขึ้นรูป SPFC440

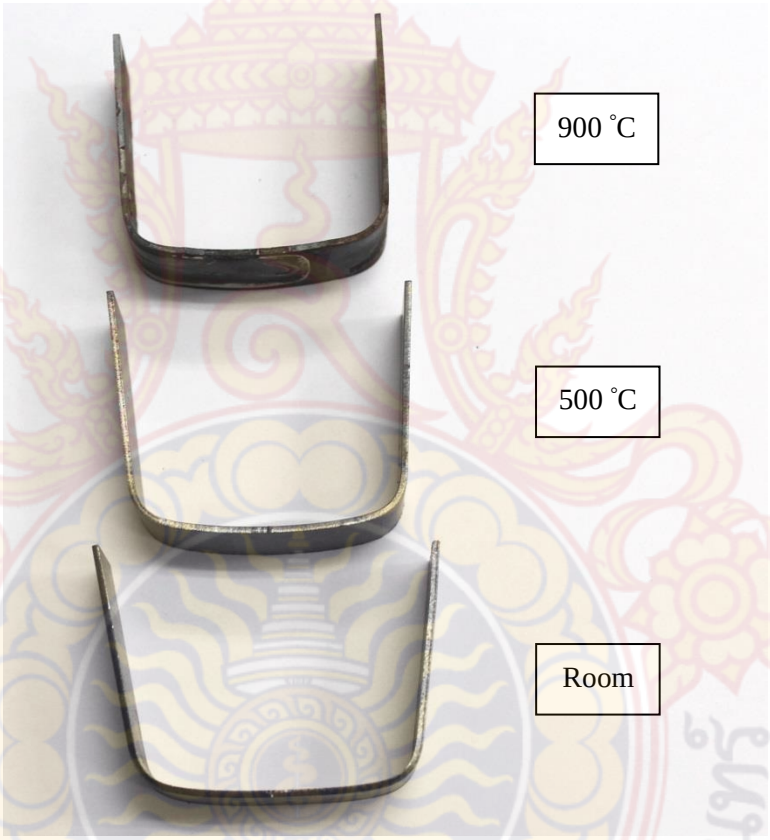


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการดีดตัวกลับกับอุณหภูมิในการพับขึ้นรูป SPFC590



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการดีดตัวกลับกับอุณหภูมิในการพับขึ้นรูป SPFC780

ชิ้นงานที่ได้หลังจากกระบวนการพับขึ้นรูปแบบอุ่นและแบบร้อน ของเหล็กกล้าแผ่นความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.5 จากรูปจะเห็นว่าชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องมุมการดีดตัวกลับของชิ้นงานจะเกิดขึ้นมากอย่างเห็นได้ชัด และเมื่ออุณหภูมิที่ทำการพับขึ้นรูปชิ้นงานสูงขึ้น พบว่ามุมการดีดตัวกลับของชิ้นงานค่อยๆ ลดลง และรูปร่างของชิ้นงานที่ได้จะมีความเที่ยงตรงมากขึ้น และผลของอุณหภูมิกับปริมาณออกไซด์ (Oxide scale) ที่เกิดบนผิวของชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูป เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ทำการขึ้นรูปชิ้นงานสูงขึ้นพบว่าปริมาณออกไซด์ เริ่มปรากฏชัดที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขึ้นไป และปริมาณออกไซด์ที่เกิดจะสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป โดยปริมาณออกไซด์ที่เกิดมากสุดที่พบในการทดลองอยู่ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.5 ชิ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC590 ที่ผ่านกระบวนการพับขึ้นรูปตัวยู

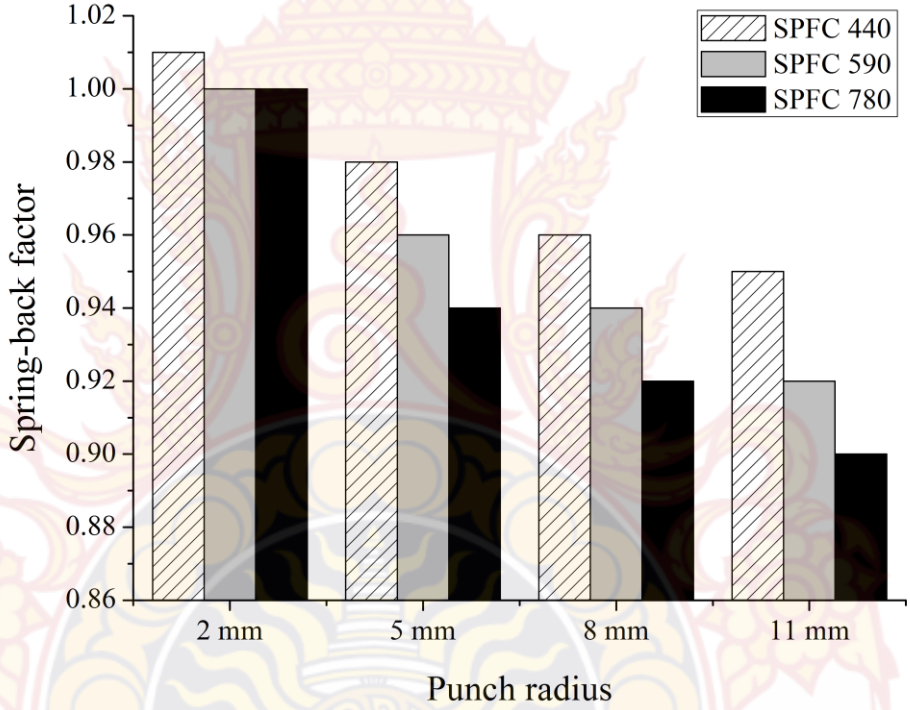
4.3 อัตราส่วนการดีดตัวกลับของวัสดุ (Spring-back factor, K_R)

วัดมุมการดีดตัวกลับของวัสดุภายหลังกระบวนการพับขึ้นรูปและคำนวณค่าอัตราส่วนการดีดตัวกลับ (K_R) ของวัสดุ ดังตารางที่ 4.2 เพื่อใช้เปรียบเทียบและแสดงแนวโน้มพฤติกรรมการดีดกลับของวัสดุแต่ละชนิด ดังสมการที่ 4.1

$$K_R = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{r_1 + 0.5t}{r_2 + 0.5t} \qquad (4.1)$$

ตารางที่ 4.2 แสดงอัตราส่วนการดีดตัวกลับของวัสดุที่อุณหภูมิห้อง

Punch radius (mm)	Spring-back factor		
	SPFC440	SPFC590	SPFC780
2	1.01	1.00	1.00
5	0.98	0.96	0.94
8	0.96	0.94	0.92
11	0.95	0.92	0.90



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบอัตราส่วนการดีดกลับของวัสดุกับรัศมีพันช์ที่อุณหภูมิห้อง

ผลจากการทดลองพบว่าเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SPFC780 มีอัตราส่วนการดีดกลับต่ำสุด รองลงมาคือเกรด SPFC590 และเกรด SPFC440 มีอัตราส่วนการดีดกลับสูงสุด ซึ่งวัสดุที่มีมุมการดีดตัวกลับสูง เมื่อคำนวณหาค่าอัตราส่วนการดีดกลับ (K_R) จะได้ค่าน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ในการพิจารณาคุณภาพรูปทรงของชิ้นงาน หากค่าอัตราส่วนการดีดกลับมีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการพับขึ้นรูปมีมุมองศาหลังการพับเท่ากับองศาของพันช์หรือมุมของแม่พิมพ์ หากมีค่าอัตราส่วนการดีดกลับน้อยกว่า 1 ชิ้นงานจะเกิดการดีดตัวกลับ (Spring-back) แต่หากค่าดังกล่าวมากกว่า 1 แสดงว่าชิ้นงานที่ผ่านการพับเกิดการหุบเข้า (Spring-go)

จากการทดลองเมื่อเพิ่มขนาดของรัศมีพันช์พบว่าค่าอัตราส่วนการดีดกลับของวัสดุมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากมุมการดีดกลับของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น จากการทดลองขนาดของรัศมีพันช์ 2.0 มิลลิเมตร พบว่าค่าอัตราส่วนการดีดกลับมีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด จึงสามารถสรุปได้ว่าชิ้นงานมีความเที่ยงตรงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับรัศมีของพันช์ขนาดอื่นๆ

4.3 การทำนายผลการดีดตัวกลับด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation neural network model) เริ่มต้นที่ชั้นซ่อน 1 ชั้น จำนวนนิวรอนตั้งแต่ 2 นิวรอน ไปจนถึง 60 นิวรอน ดูผลการฝึกสอน ถ้าการฝึกสอนไม่สำเร็จจะเพิ่มชั้นซ่อนเป็น 2 ชั้น โดยกำหนดให้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 มากกว่าจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 อยู่ 1 นิวรอน และเพิ่มไปทีละ 1 นิวรอน ไปจนถึงการฝึกสอนสำเร็จ และนำโครงสร้างต่ำสุดไปใช้งาน ค่าความผิดพลาดที่ใช้ฝึกหัด (Error Rate) เท่ากับ 0.01 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมนั้นมีด้วยกันหลายแบบจำลอง และแบบจำลองที่ดีที่สุดเหมาะสมและได้รับความนิยมมากที่สุด คือแบบจำลองแบคโพรพาเกชัน (Backpropagation Model) เนื่องจากว่าแบบจำลองแบคโพรพาเกชันไม่มีการเชื่อมโยงกันแบบย้อนกลับ (Feedback Connection) แต่อาศัยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างการฝึกหัดโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งค่าความผิดพลาดนั้นคำนวณโดยใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองต่ำสุด (Mean Squared Error: MSE) ค่าความผิดพลาดเกิดจากการปรับค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างชั้นของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งทำการปรับค่าจนกว่าค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ในงานวิจัยได้กำหนด Input และ Output ที่ใช้ฝึกหัดโครงข่ายประสาทเทียมดังนี้ Input ได้แก่ อุณหภูมิในการพับขึ้นรูป รัศมีของพันช์ เกรดของวัสดุชิ้นงาน ส่วน Output ซึ่งเป็นผลกระทบของค่าตัวแปรในการทดลองมีทั้งหมด 1 ค่า คือการดีดตัวกลับ (Spring-back) เมื่อป้อนข้อมูลลงไปในส่วนของแบบจำลองแบคโพรพาเกชัน กำหนดหน่วยประสาทแต่ละชั้น กำหนดค่าความผิดพลาดและค่าการเรียนรู้ จากนั้นแบบจำลองแบคโพรพาเกชันจะทำการฝึกหัดโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมและถูกต้อง และแสดงผลของ Output ที่ได้รับการฝึกหัด ค่าน้ำหนักที่เหมาะสมและถูกต้องที่สุดนั้น เมื่อเสร็จสิ้นการฝึกหัดโปรแกรมจะทำการเก็บค่าถ่วงน้ำหนักไว้ใช้ต่อไป ส่วนระยะเวลาในการฝึกหัดจะขึ้นอยู่กับการตั้งค่าความผิดพลาด ค่าการเรียนรู้และขึ้นอยู่กับปริมาณของข้อมูลที่ทำการฝึกหัด ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการฝึกหัด ดังรูปที่ 4.7

รูปที่ 4.7 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการฝึกหัด

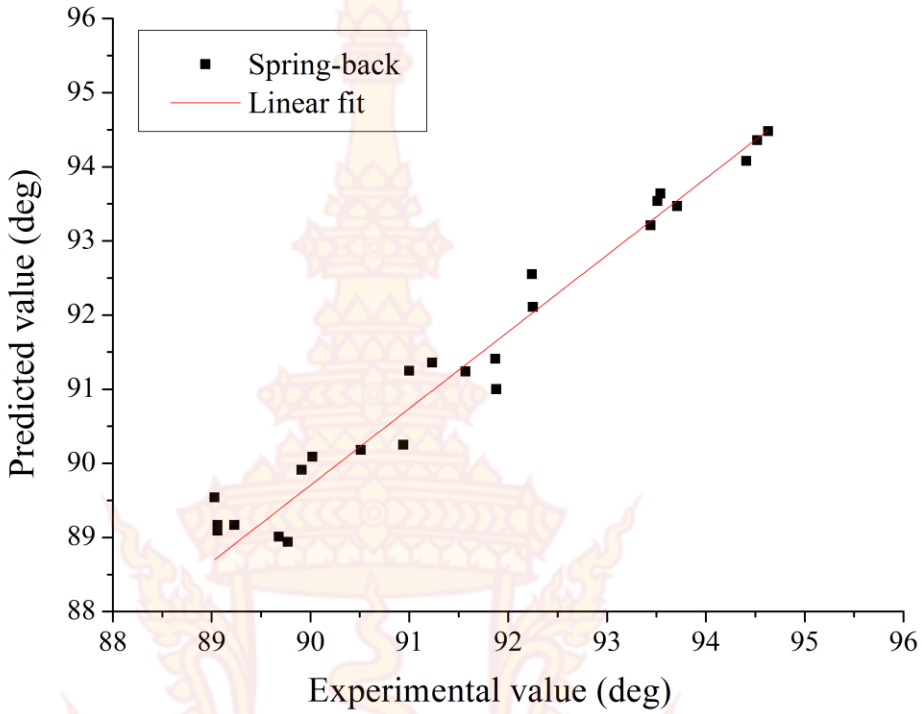
4.3.1 การทำนายผลค่าการดีดตัวกลับ (Spring-back)

งานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Multilayer Perceptron Network โดยวิธีการฝึกสอนแบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-Propagation Neural Networks) กฎการเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquardt การทำนายค่าการดีดตัวกลับด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลปรากฏ

ว่าสามารถทำนายค่าได้อย่างแม่นยำเป็นที่น่าพอใจ มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 0.31% (เหล็กกล้า SPFC440) ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 0.76% (เหล็กกล้า SPFC590) และค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 0.95% (เหล็กกล้า SPFC780) ดังตารางที่ 4.3-4.5 แสดงผลการทดลองและการทำนายค่า

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองและการทำนายค่าด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม SPFC440

No.	Punch radius (mm)	Temp (°C)	Spring-back experimental	Spring-back ANN	% Error
1	2	25	89.06	89.09	0.03
2	2	100	89.77	88.94	0.92
3	2	300	89.68	89.01	0.74
4	2	500	89.23	89.17	0.06
5	2	700	89.06	89.17	0.12
6	2	900	89.03	89.54	0.57
7	5	25	90.94	90.25	0.75
8	5	100	91.88	91.00	**0.95**
9	5	300	91.57	91.24	0.36
10	5	500	90.51	90.18	0.36
11	5	700	90.02	90.09	0.07
12	5	900	89.91	89.91	0
13	8	25	93.54	93.64	0.10
14	8	100	93.71	93.47	0.25
15	8	300	93.51	93.54	0.03
16	8	500	92.25	92.11	0.15
17	8	700	91.23	91.36	0.14
18	8	900	91.00	91.25	0.27
19	11	25	94.63	94.48	0.16
20	11	100	94.52	94.36	0.17
21	11	300	94.41	94.08	0.34
22	11	500	93.44	93.21	0.25
23	11	700	92.24	92.55	0.34
24	11	900	91.87	91.41	0.50
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย					**0.31**

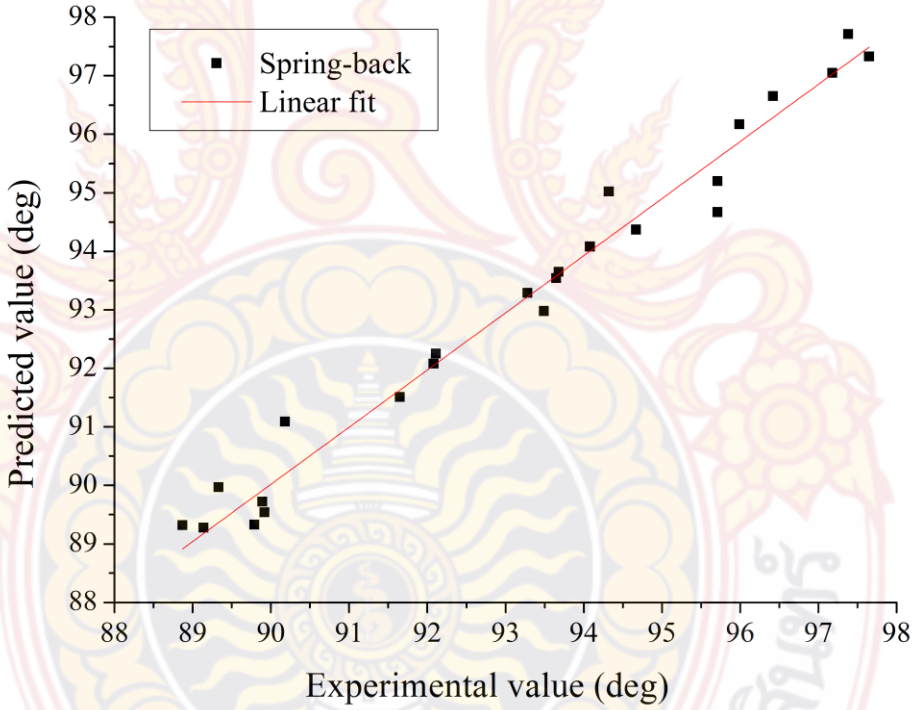


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองและการทำนายค่าดีดตัวกลับ SPFC440

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองและการทำนายค่าด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม SPFC590

No.	Punch radius (mm)	Temp (°C)	Spring-back experimental	Spring-back ANN	% Error
1	2	25	89.89	89.72	0.19
2	2	100	89.92	88.54	1.53
3	2	300	89.79	89.33	0.51
4	2	500	89.33	89.97	0.71
5	2	700	89.14	88.28	0.96
6	2	900	88.87	89.72	0.95
7	5	25	93.65	93.54	0.11
8	5	100	93.49	92.18	1.40
9	5	300	93.28	93.99	0.76
10	5	500	92.08	93.71	1.77
11	5	700	91.65	91.51	0.15
12	5	900	90.18	91.09	1.00
13	8	25	95.71	94.67	1.08
14	8	100	96.42	96.65	0.24

15	8	300	95.99	96.67	0.71
16	8	500	94.32	95.41	1.16
17	8	700	93.68	93.65	0.03
18	8	900	92.11	93.85	1.88
19	11	25	97.65	97.33	0.32
20	11	100	97.38	96.01	1.40
21	11	300	97.18	97.05	0.13
22	11	500	95.71	96.20	0.51
23	11	700	94.07	94.97	0.96
24	11	900	94.08	94.08	0
				ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	**0.76**

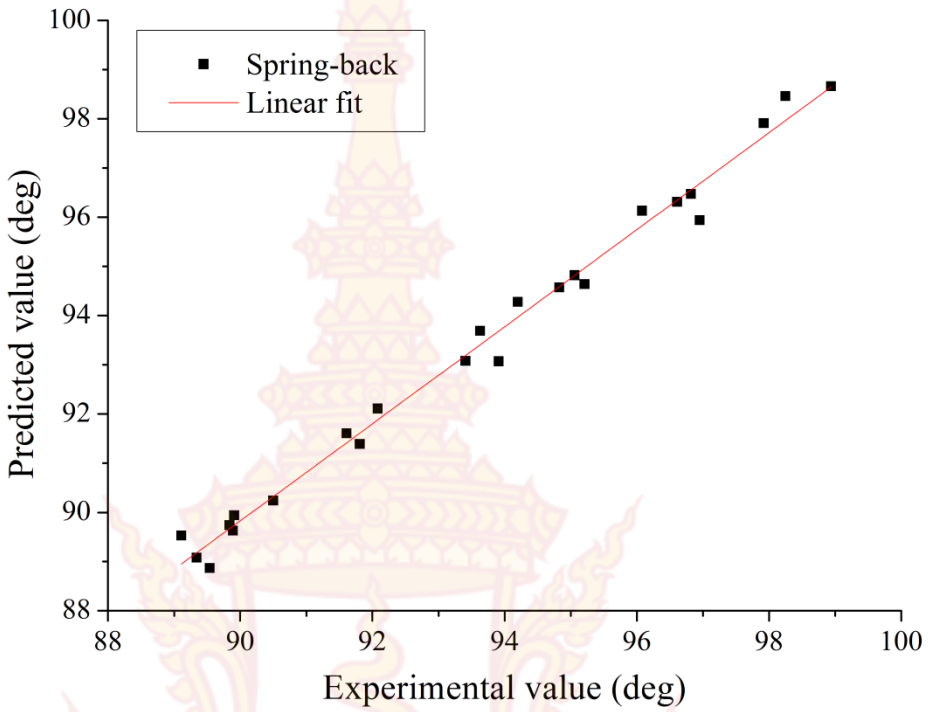


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองและการทำนายค่าดีดตัวกลับ SPFC590

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองและการทำนายค่าด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม SPFC780

No.	Punch radius (mm)	Temp (°C)	Spring-back experimental	Spring-back ANN	% Error
1	2	25	89.84	89.21	0.70
2	2	100	89.89	88.63	1.40

3	2	300	89.91	89.04	0.96
4	2	500	89.54	88.07	1.64
5	2	700	89.34	88.08	1.41
6	2	900	89.11	89.53	0.47
7	5	25	95.21	94.74	0.49
8	5	100	94.20	93.28	0.97
9	5	300	93.91	93.07	0.89
10	5	500	92.08	92.71	0.68
11	5	700	91.81	90.39	1.54
12	5	900	90.50	91.24	0.81
13	8	25	96.95	95.94	1.04
14	8	100	96.82	96.47	0.36
15	8	300	96.61	95.31	1.34
16	8	500	94.83	94.57	0.27
17	8	700	93.41	92.08	1.42
18	8	900	91.61	91.11	0.54
19	11	25	98.94	96.66	2.30
20	11	100	98.25	98.46	0.21
21	11	300	97.92	96.91	1.03
22	11	500	96.08	96.13	0.05
23	11	700	95.06	94.22	0.88
24	11	900	93.63	92.19	1.53
				ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	**0.95**



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองและการทำนายค่าดีดตัวกลับ SPFC780

จากรูปที่ 4.8-4.10 แสดงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลอง (Experiment) กับการทำนายค่า (Prediction) ซึ่งผลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกัน เพราะค่าความสัมพันธ์ที่ถูกต้องระหว่างค่าตัวแปรนำเข้า (Input) ได้แก่อุณหภูมิในการพับขึ้นรูป รัศมีของพันช์ เกรดของวัสดุ มีความสัมพันธ์กับค่าการดีดตัวกลับ จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายค่าการดีดตัวกลับได้อย่างแม่นยำเป็นที่น่าพอใจ

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษากระบวนการพับขึ้นรูปแบบอุ่นและแบบร้อน (Warm and Hot Forming) ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการดีดตัวกลับ (Spring-back) ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 3 เกรด สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. อุณหภูมิในการพับขึ้นรูปชิ้นงานสูงขึ้น ส่งผลทำให้มุมการดีดตัวกลับมีแนวโน้มลดลง โดยที่อุณหภูมิพับขึ้นรูปชิ้นงาน 900 องศาเซลเซียส ขนาดรัศมีพันช์ 5.0 มิลลิเมตร พบว่าค่ามุมการดีดตัวกลับของชิ้นงานลดลงมีค่าใกล้เคียงขนาดมุมการพับหรือมุมของแม่พิมพ์มากที่สุด

2. มุมการดีดตัวกลับของชิ้นงานจะแปรผันตรงกับขนาดรัศมีพันช์ โดยรัศมีพันช์ขนาดใหญ่มุมการดีดตัวกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และรัศมีพันช์ขนาดเล็กส่งผลให้มุมการดีดตัวกลับมีค่าน้อยลง

3. เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC780 มีอัตราส่วนการดีดกลับ (K_R) ต่ำสุด รองลงมาคือ SPFC590 และ SPFC440 มีอัตราส่วนการดีดกลับสูงสุด ซึ่งวัสดุที่มีมุมการดีดตัวกลับสูง เมื่อคำนวณหาค่าอัตราส่วนการดีดกลับจะได้ค่าน้อย สามารถแสดงแนวโน้มพฤติกรรมการดีดตัวกลับของวัสดุแต่ละชนิด

4. งานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Multilayer Perceptron Network โดยวิธีการฝึกสอนแบบแพร่ค่าย้อนกลับ กฎการเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquardt Algorithm เนื่องจากมีเสถียรภาพ มีอัตราการฝึกสอนที่สั้นและใช้เวลาการฝึกสอนน้อย

5. จากผลการทดลองที่ได้นำเสนอ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Multilayer Perceptron Network สามารถทำนายค่าที่ยังไม่ได้มีการทดลองได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจะทำให้สามารถวางแผนการผลิตได้อย่างเหมาะสม ช่วยลดระยะเวลาในการทดลอง มีความถูกต้องส่วนของกระบวนการฝึกสอน และการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม แสดงให้เห็นว่าถ้าทำการฝึกสอนข้อมูลทุกชุดจะได้คำตอบที่มีความถูกต้องแม่นยำ

เอกสารอ้างอิง

[1] ชาญชัย ทรัพยากร และคณะ. การออกแบบแม่พิมพ์, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, 2552.

[2] Mikell P. Groover. Fundamentals of Modern Manufacturing, (4^{th} ed). New York: John Wiley & Sons, Inc. 2010.

[3] Donald F. Eary, and Edward A. Reed., Techniques of Press working Sheet Metal 2^{nd} edition, New Jersey, Prentice-Hall, 1974, pp.60-62.

[4] The Future Of Steel In The Automotive Industry - An Interview with Cees ten Broek, January 18, 2014, “Body Structure” [Online], Available from:http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=10538 [November14, 2014]

[5] World Auto Steel, "Dual Phase (DP) Steels" [Online], Available from: http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/dual-phase-dp-steels/ [April 19, 2013]

[6] นนทวัฒน์ ศรีหาคลัง. การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ในการกัดงานด้วยเครื่องอีดีเอ็ม. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2545.

[7] F. Ozturk, S. Toros , S. Kilic. Tensile and Spring-Back Behavior of DP600 Advanced High Strength Steel at Warm Temperatures, Journal of Iron and Steel Research International, 2009; 16 (6): 41-46.

[8] Yanagimoto J., Oyamada K. Spring-back of High Strength Steel after Hot and Warm Sheet Formings, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005; 54: 213–216.

[9] Joonhang Lee, Kwangmin Lee, Dongok Kim, Hongseok Choi, Byungmin Kim. Spring-back and spring-go behaviors in bending of thick plates of high-strength steel at elevated temperature, Computational Materials Science, 2015; 100: 76–79.

[10] Guoliang Ji, Fuguo Li, Qinghua Li, Huiqu Li and Zhi Li. Prediction of the hot deformation behavior for Aermet100 steel using an artificial neural network, Computational Materials Science, 2010; 48: 626–632.

[11] Hong Seok Kimb, Muammer Koc. Numerical investigations on spring-back characteristics of aluminum sheet metal alloys in warm forming conditions, journal of materials processing technology, 2008; 204: 370–383.

[12] Mori K, Maki S. and Tanaka Y. Warm and Hot Stamping of Ultra High Tensile Strength Steel Sheets Using Resistance Heating, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005; 541: 209–212.

[13] Gawade Sharad, M. Nandedkar. Springback in Sheet Metal U Bending-Fea and Neural Network Approach, Procedia Materials Science, 2014; 6: 835-839.

[14] Wenjuan Liu, Qiang Liu, Feng Ruana, Zhiyong Liang, Hongyang Qiu. Springback prediction for sheet metal forming based on GA-ANN technology, Journal of Materials Processing Technology, 2007; 187-188: 227-231.

[15] S.Y. Kim, W.J. Choi and S.Y. Park, “Spring-back characteristics of fiber metal laminate (GLARE) in brake forming process” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007; pp. 445-451.

[16] M.V. Inamdar, P.P. Date and S.V. Sabnis, “On the effects of geometric parameters on springback in sheets of five materials subjected to air vee bending”, Journal of Materials Processing Technology, 2002; 459-463.

[17] Cheng-ning Li, Guo Yuan, Feng-qin Ji. Effects of auto-tempering on microstructure and mechanical properties in hot rolled plain C-Mn dual phase steels. Materials Science & Engineering, 2016; 665: 98-107.

[18] Zhengzhi Zhao, TingtingTong, JuhuaLiang, HongxiangYin, Aimin Zhao, DiTang Microstructure, mechanical properties and fracture behavior of ultra-high strength dual-phase steel, Materials Science & Engineering, 2014; 618: 182-188.

ภาคผนวก ก

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC440

No.	Punch radius (mm)	Temp (°C)	Spring-back experimental	Spring-back ANN	% Error
1	2	25	89.06	89.09	0.03

2	2	100	89.77	88.94	0.92
3	2	300	89.68	89.01	0.74
4	2	500	89.23	89.17	0.06
5	2	700	89.06	89.17	0.12
6	2	900	89.03	89.54	0.57
7	5	25	90.94	90.25	0.75
8	5	100	91.88	91.00	**0.95**
9	5	300	91.57	91.24	0.36
10	5	500	90.51	90.18	0.36
11	5	700	90.02	90.09	0.07
12	5	900	89.91	89.91	0
13	8	25	93.54	93.64	0.10
14	8	100	93.71	93.47	0.25
15	8	300	93.51	93.54	0.03
16	8	500	92.25	92.11	0.15
17	8	700	91.23	91.36	0.14
18	8	900	91.00	91.25	0.27
19	11	25	94.63	94.48	0.16
20	11	100	94.52	94.36	0.17
21	11	300	94.41	94.08	0.34
22	11	500	93.44	93.21	0.25
23	11	700	92.24	92.55	0.34
24	11	900	91.87	91.41	0.50
				ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	**0.31**

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC590

No.	Punch radius (mm)	Temp (°C)	Spring-back experimental	Spring-back ANN	% Error
1	2	25	89.89	89.72	0.19
2	2	100	89.92	88.54	1.53
3	2	300	89.79	89.33	0.51
4	2	500	89.33	89.97	0.71
5	2	700	89.14	88.28	0.96

6	2	900	88.87	89.72	0.95
7	5	25	93.65	93.54	0.11
8	5	100	93.49	92.18	1.40
9	5	300	93.28	93.99	0.76
10	5	500	92.08	93.71	1.77
11	5	700	91.65	91.51	0.15
12	5	900	90.18	91.09	1.00
13	8	25	95.71	94.67	1.08
14	8	100	96.42	96.65	0.24
15	8	300	95.99	96.67	0.71
16	8	500	94.32	95.41	1.16
17	8	700	93.68	93.65	0.03
18	8	900	92.11	93.85	1.88
19	11	25	97.65	97.33	0.32
20	11	100	97.38	96.01	1.40
21	11	300	97.18	97.05	0.13
22	11	500	95.71	96.20	0.51
23	11	700	94.07	94.97	0.96
24	11	900	94.08	94.08	0
				ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	**0.76**

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC780

No.	Punch radius (mm)	Temp (°C)	Spring-back experimental	Spring-back ANN	% Error
1	2	25	89.84	89.21	0.70
2	2	100	89.89	88.63	1.40
3	2	300	89.91	89.04	0.96
4	2	500	89.54	88.07	1.64
5	2	700	89.34	88.08	1.41
6	2	900	89.11	89.53	0.47
7	5	25	95.21	94.74	0.49
8	5	100	94.20	93.28	0.97
9	5	300	93.91	93.07	0.89

10	5	500	92.08	92.71	0.68
11	5	700	91.81	90.39	1.54
12	5	900	90.50	91.24	0.81
13	8	25	96.95	95.94	1.04
14	8	100	96.82	96.47	0.36
15	8	300	96.61	95.31	1.34
16	8	500	94.83	94.57	0.27
17	8	700	93.41	92.08	1.42
18	8	900	91.61	91.11	0.54
19	11	25	98.94	96.66	2.30
20	11	100	98.25	98.46	0.21
21	11	300	97.92	96.91	1.03
22	11	500	96.08	96.13	0.05
23	11	700	95.06	94.22	0.88
24	11	900	93.63	92.19	1.53
				ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	**0.95**

ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ-สกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์เฉลิมพล คล้ายนิล

2. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต

3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ถ.เพชรเกษม ต.หนองแก อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77110

4. ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถานศึกษา	ปีที่จบ
โท	วิศวกรรมโลหการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2549
ตรี	วิศวกรรมอุตสาหการ	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล	2540

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Manufacturing Process, Machining and Advanced Metal Cutting

6. รายงานการเผยแพร่ตีพิมพ์ทางวิชาการ

Luijan J; Klaynil C; Mookam N; and Muangnoy P; 2019, *Microstructure and Mechanical Properties of Recycled Al-7%Si-1%Fe Cast Alloy with Part Addition of Beverage Cans*, The 10th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM 2019), January, 21-23, Bangkok, Thailand.

เฉลิมพล คล้ายนิล และพงศกร หลีตระกูล, 2562, *อิทธิพลของศูนย์รวมความเค้นและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง*, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ปีที่ 26 เล่มที่ 1, มกราคม-เมษายน.

เฉลิมพล คล้ายนิล จิณกมล ลุยจันทร์ และพงศกร หลีตระกูล, 2560, *การศึกษาอิทธิพลของระยะช่องว่างคมตัดที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของแม่พิมพ์สำหรับการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง*, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ปีที่ 24 เล่มที่ 3, กันยายน-ธันวาคม.

เฉลิมพล คล้ายนิล และณัฐศักดิ์ พรพุฒิศิริ, 2558, *การศึกษาชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของแม่พิมพ์สำหรับการปั๊มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง*, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ปีที่ 22 เล่มที่ 2, พฤษภาคม-สิงหาคม.

เฉลิมพล คล้ายนิล, 2558, *การจำลองการสึกหรอของมีดกลึงคาร์ไบด์โดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม*, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ปีที่ 22 เล่มที่ 3, กันยายน-ธันวาคม.

พิสิทธิ์ เมืองน้อย เฉลิมพล คล้ายนิล และจิณกมล ลุยจันทร์, 2558, *การพัฒนาโลหะแม่ Al-4% B-2%Sr สำหรับการปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนในโลหะผสมหล่ออลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียม*, วิศวสารลาดกระบัง, ปีที่ 32 เล่มที่ 4, ธันวาคม.

เฉลิมพล คล้ายนิล พิมพ์มาศ กาละวงศ์ และจิณกมล ลุยจันทร์, 2556, *การศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของแม่พิมพ์และคุณภาพขอบตัดชิ้นงาน*, การประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ, 17 พฤษภาคม, ณ โรงแรมรามา การ์เด้นส์ กรุงเทพฯ

เฉลิมพล คล้ายนิล จิณกมล ลุยจันทร์ และพิมพ์มาศ กาละวงศ์, 2555, *การศึกษาชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของแม่พิมพ์ตัด*, การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ, 17-19 ตุลาคม, โรงแรมเมธาวลัย ชะอำ จ.เพชรบุรี

เฉลิมพล คล้ายนิล พงศกร หลีตระกูล และพงษ์พันธ์ ราชภักดี, 2555, *การประมาณการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงด้วยโครงข่ายประสาทเทียม,* การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ, 17-19 ตุลาคม, โรงแรมเมธาวลัย ชะอำ จ.เพชรบุรี

เฉลิมพล คล้ายนิล ณัฐศักดิ์ พรพุฒิศิริ และพงษ์พันธ์ ราชภักดี, 2554, *ผลกระทบของศูนย์รวมความเค้นในแนวเชื่อมเหล็กกล้า SS400 ภายใต้แรงดึง*, การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ, 20-21 ตุลาคม, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี้ จอมเทียน พัทยา จ.ชลบุรี

ณัฐศักดิ์ พรพุฒิศิริ เฉลิมพล คล้ายนิล และกุลชาติ จุลเพ็ญ, 2554, *การศึกษาอิทธิพลของรัศมีลูกกลิ้งหัวกดที่มีผลต่อการขึ้นรูปถ้วยอลูมิเนียมโดยกระบวนการหมุนรีดขึ้นรูป*, การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ, 20-21 ตุลาคม, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี้ จอมเทียน พัทยา จ.ชลบุรี

เฉลิมพล คล้ายนิล ณัฐศักดิ์ พรพุฒิศิริ และทศพร เงินเนตร, 2554, *ผลกระทบของการชุบผิวแข็งเหล็กกล้า AISI1020 ที่มีผลต่ออายุของความล้า*, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์, ครั้งที่ 9, 2-3 พฤษภาคม, โรงแรมเมอร์ลินบิช รีสอร์ท จ.ภูเก็ต

เฉลิมพล คล้ายนิล และพงษ์พันธ์ ราชภักดี, 2550, *อิทธิพลของสภาวะการกลึงเหล็กกล้าสเตนเลส AISI 316*, การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ, 24-26 ตุลาคม, โรงแรม Royal Phuket City, จ.ภูเก็ต

เฉลิมพล คล้ายนิล และไชยา ดำคำ, 2549, *การศึกษาอิทธิพลของสภาวะการกลึงเหล็กกล้าสเตนเลสด้วยใบมีดคาร์ไบด์ที่มีผลต่อการสึกหรอใบมีดตัดและความขรุขระของพื้นผิว*, การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ, 17-19 ธันวาคม, โรงแรมอินเตอร์คอนติเนนตัล, กรุงเทพฯ