



การหาค่าที่เหมาะสมสปริงกลับของเครื่องซีเอ็นซีตัดท่อนพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนครสวรรค์  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ  
ปีการศึกษา 2566  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนครสวรรค์



การหาค่าที่เหมาะสมสปริงกลับของเครื่องซีเอ็นซีตัดท่อนบนพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ  
ปีการศึกษา 2566  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การหาค่าที่เหมาะสมสปริงกลับของเครื่องซีเอ็นซีติดต่อบนพื้นฐานโครงข่าย  
ประสาทเทียม"

ของ สมชาย คงหนู

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ

### คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กวิณ สนธิเพิ่มพูน)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมลักษณ์ วรรณฤมล กิเยลาโรว่า)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีสัจจา วิหยศักดิ์)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน  
(ดร.ชัยธำรง พงศ์พัฒน์ศิริ)

### อนุมัติ

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรองกาญจน์ ชูทิพย์)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

<b>ชื่อเรื่อง</b>	การหาค่าที่เหมาะสมสปริงกลับของเครื่องซีเอ็นซีตัดท่อบนพื้นฐาน โครงข่ายประสาทเทียม
<b>ผู้วิจัย</b>	สมชาย คงหนู
<b>ประธานที่ปรึกษา</b>	รองศาสตราจารย์ ดร.กวิน สนธิเพิ่มพูน
<b>กรรมการที่ปรึกษา</b>	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมลักษณ์ วรรณฤมล กิเยลาโรว่า
<b>ประเภทสารนิพนธ์</b>	วิทยานิพนธ์ ปร.ด. วิศวกรรมการจัดการ, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2566
<b>คำสำคัญ</b>	ตัดท่อ, มุมสปริงกลับ

### บทคัดย่อ

NC Mandrel-Less Rotary Draw Bending (MLRDB) เป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการตัดท่อโลหะที่นิยมใช้กันทั่วไปในปัจจุบัน เมื่อชิ้นส่วนจับยึดในเครื่องจักรเพื่อการตัดถอยออก รูปร่างของท่อจะคืนสภาพและการสปริงกลับ (Springback) จะเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ รูปทรงที่แท้จริงทางเรขาคณิตของการตัดท่อจะเบี่ยงเบนไปจากข้อกำหนดการออกแบบ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำในการขึ้นรูปและคุณภาพของท่อโลหะ ดังนั้น การทำนายสปริงกลับที่แม่นยำของการตัดท่อโลหะจึงเป็นกุญแจสำคัญในการชดเชยและควบคุมสปริงแบ็ค หลายงานวิจัยได้พยายามศึกษาปัจจัยนำเข้าที่มีผลกระทบต่อเกิดการสปริงกลับจากการตัดท่อ และจนถึงขณะนี้ยังไม่มีการศึกษาเชิงประจักษ์ที่น่าเชื่อถือในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและปัจจัยส่งออกระหว่างตัวแปรของกระบวนการตัดท่อที่มีต่อการสปริงกลับ ทั้งนี้เพื่อการทำนายค่ามุมสปริงกลับล่วงหน้า เพื่อการลดเวลาการตั้งเครื่องและความสูญเสียอื่น ๆ ที่อาจเกิดขึ้นตามมาหากค่าทำนายขาดความแม่นยำ

งานวิจัยนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับโดยวิธีทากูชิในการตัดท่อไร้ตะเข็บ ASTM A-210 Gr. A1 ขนาดความโตภายนอก 44.45 มิลลิเมตร เป็นท่อที่ใช้กับงาน Steam Boiler ชนิดท่อไร้ตะเข็บคาร์บอนปานกลาง โดยใช้ปัจจัย 4 ปัจจัย คือ ความหนาของท่อ (Wall Thickness), รัศมีดัด (Bending Radial), เวลาหยุด (Dwell Time) และมุมองศาการดัด (Bending Angle) ผลการวิจัยพบว่า ทั้ง 4 ปัจจัย มีอิทธิพลต่อค่ามุมสปริงกลับในกระบวนการตัดท่ออย่างมีนัยสำคัญ และแต่ละปัจจัยให้ผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับที่แตกต่างกัน ปัจจัยที่ส่งผลต่อมุมการสปริงกลับมากที่สุด ได้แก่ รัศมีการดัดโดยมีผล 43.01%, มุมดัด 25.16%, ความหนาของผนัง 16.05% และเวลาหยุดหนึ่ง 15.78% และพบว่า Time-dependent ในกระบวนการผลิตส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อการสปริงกลับต่อกระบวนการตัดท่อ

นอกจากนี้ งานวิจัยได้นำ Neural Network มาช่วยในการทำนายผลค่ามุมสปริงกลับ ด้วยวิธีการทำนายที่แตกต่างกันโดยการเปรียบเทียบผลการใช้ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดต่าง ๆ ผลการวิจัยพบว่า โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมคือ 4-98-1 ประกอบด้วยนิวรอนในชั้นนำเข้า (Input Layer) จำนวน 4 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) จำนวน 98 นิวรอน และนิวรอนในชั้นแสดงผล (Output Layer) จำนวน 1 นิวรอน จากการใช้ฟังก์ชันกระตุ้น Sigmoid โดยให้ค่าเฉลี่ยความคาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) ต่ำที่สุดคือ 0.001892 เมื่อทำนายผลให้ค่า  $R^2 = 99.42\%$  ลำดับถัดมาคือฟังก์ชันกระตุ้น TanH มีค่า  $R^2 = 98.99\%$  ลำดับที่ 3 คือฟังก์ชันกระตุ้น ReLU มีค่า  $R^2 = 98.53\%$  และฟังก์ชันกระตุ้นลำดับสุดท้ายที่ให้ค่า  $R^2$  ต่ำที่สุดคือ Identity Function มีค่า  $R^2 = 79.53\%$  และพบว่าการทำนายค่ามุมสปริงกลับโดยใช้สมการถดถอยนั้นกลับให้ค่า  $R^2$  ที่สูงกว่าการทำนายโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน 65 นิวรอน ด้วยฟังก์ชันกระตุ้น Identity Function ซึ่งมีค่า  $R^2 = 79.53\%$  แต่การทำนายโดยใช้สมการถดถอยมีค่า  $R^2 = 82.32\%$  มีค่ามากกว่าถึง 2.79%

เมื่อทำการทดสอบผลจากการทำนายโดยการปฏิบัติจริง ได้ทำการทดสอบการตัดต่อแล้วเปรียบเทียบระหว่างการทำนายจากการตัดแบบวิธีเดิม การทำนายจากสมการถดถอย และการทำนายจากโครงข่ายประสาทเทียม พบว่า การตัดต่อตามแบบวิธีเดิม มีค่า  $R^2 = 94.91\%$  การตัดต่อโดยสมการถดถอย มีค่า  $R^2 = 99.47\%$  การตัดต่อโดยวิธี ANN มีค่า  $R^2 = 99.97\%$  ให้ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากแบบวิธีเดิมร้อยละ 5.06

<b>Title</b>	SPRINGBACK OPTIMIZATION FOR CNC TUBE BENDING MACHINE BASE ON AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK (ANN)
<b>Author</b>	Somchai Kongnoo
<b>Advisor</b>	Associate Professor Kawin Sonthipermpoon, D.Eng.
<b>Co-Advisor</b>	Assistant Professor Somlak Wannarumon Kielarova, D.Eng.
<b>Academic Paper</b>	Ph.D. Dissertation in Management Engineering - (Type 2.1), Naresuan University, 2023
<b>Keywords</b>	Tube bending, Springback angle

### ABSTRACT

An NC Mandrel-Less Rotary Draw Bending (MLRDB) machine is used to bend metal tubes. When the clamp die takes are unloaded, the shape of the tube will be restored and springback will inevitably occur. which directly affects the forming accuracy and quality of the metal tube. Therefore, accurate springback prediction of metal tube bending is the key to springback compensation and control. Many researchers have studied the input factors affecting springback prediction in an attempt to calculate the springback angle in advance but there is no convincing empirical evidence to establish a relationship between the input and output factors of the tube bending process variables in springback problem. This would reduce setup time and prevent other losses that may occur if the predicted value is inaccurate.

In this research, the factors affecting the springback angle by the Taguchi method in bending seamless tubes ASTM A-210 Gr. A1, outside diameter 44.45 mm, were established. The Taguchi method is used for medium carbon seamless tubes for steam boilers. The four factors that were considered included wall thickness, bending radius, dwell time and bending angle. The results showed that all factors have a significant influence on the springback angle in the tube bending process, and each factor affects the springback angle differently. The factors that affect the springback angle the most are Bending Radius with an impact of 43.01%, Bending

Angle 25.16%, Wall Thickness 16.05%, and Dwell Time 15.78%. As well, the time-dependent springback principle has a significant effect on the springback response in tube bending.

In addition, this research also uses a Neural Network to help predict the springback angle. Different prediction methods were analyzed by comparing the results using different activation functions. The results showed that the optimal neural network structure is 4-98-1, consisting of an input layer of 4 neurons, a hidden layer of 98 neurons and an output layer 1 neuron. These results were achieved using the Sigmoid function, giving the lowest mean squared error (MSE) = 0.001892. The resulting coefficient of determination ( $R^2$ ) = 99.42% and the ReLU function calculated the next best  $R^2$  = 98.99%. The third best outcome was achieved from the TanH function, whose  $R^2$  = 98.53%. The lowest  $R^2$  value was calculated by the Identity function, which was 79.53%. It was also found that the best prediction of the springback angle using the best regression equation, with  $R^2$  = 82.32%, was better than the prediction using the 65 neural with the Identity function, which gave  $R^2$  = 79.53%, a 2.79% difference in favor of the regression equation.

Testing results from predictions by real experiment. The tube bending test was performed and compared between the predictions from the conventional bending method, prediction from regression equations and the prediction from the artificial neural network. It was found that tube bending using the conventional method, whose  $R^2$  = 94.91%. tube bending by regression equation, with was  $R^2$  = 99.47%. and tube bending by ANN method the best, with  $R^2$  = 99.97%, an increase of 5.06 percent from the previous method.



## ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของท่าน รองศาสตราจารย์ ดร.กวิน สนธิเพิ่มพูน ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าเพื่อเป็นที่ปรึกษาและให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ และขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมลักษณ์ วรรณฤมล ก็เยลาโรว่า กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีสัจจา วิทยศักดิ์ และ ดร.ชัยธำรง พงศ์พัฒนศิริ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแนวทางแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.สุเทพ แก่งสันเทียะ อดีตเลขาธิการคณะกรรมการการอาชีวศึกษา นายสุวัฒน์ชัย ศรีสุพัฒนะกุล อดีตผู้อำนวยการวิทยาลัยเทคนิคพิษณุโลก ที่ให้ความอนุเคราะห์พิจารณาอนุญาตให้ผู้วิจัยลาศึกษาต่อแบบเต็มเวลา ขอกราบขอบพระคุณ นายสุชาติ ชาตวิวรรณ ผู้อำนวยการวิทยาลัยเทคนิคพิษณุโลก รวมถึงคณะผู้บริหาร ครู อาจารย์ แผนกวิชาช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคพิษณุโลกทุกท่าน ที่ได้ให้ความเอื้อเฟื้อด้านวิชาการและได้ให้เวลาในการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้มอบทุนสนับสนุนการศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษา ในหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ ตลอดหลักสูตร การศึกษาให้แก่ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร รวมถึงอาจารย์ในภาควิชาทุกท่านที่ให้การสนับสนุนโดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดหาสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ สำหรับการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณเจริญ คำเงิน ผู้ช่วยผู้ว่าการผลิตไฟฟ้า 2 (ชฟฟ.2) คุณบุญทวี คำเครื่อง (วศ.9) คุณสมนึก วงศ์คช ฝ่ายช่าง (ช.8) รวมถึงผู้เกี่ยวข้องในสังกัดการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT) โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่ช่วยเหลือสำหรับการเก็บข้อมูลงานวิจัยครั้งนี้

เหนือสิ่งอื่นใด ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ของผู้วิจัยที่ให้กำเนิดและสนับสนุนในทุกด้านอย่างดีเสมอมา รวมถึงกำลังใจอันดีจากครอบครัว คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบและอุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุก ๆ ท่าน และผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวงการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องและผู้ที่เกี่ยวข้องได้บ้างไม่มากก็น้อย

สมชาย คงหนู

## สารบัญ

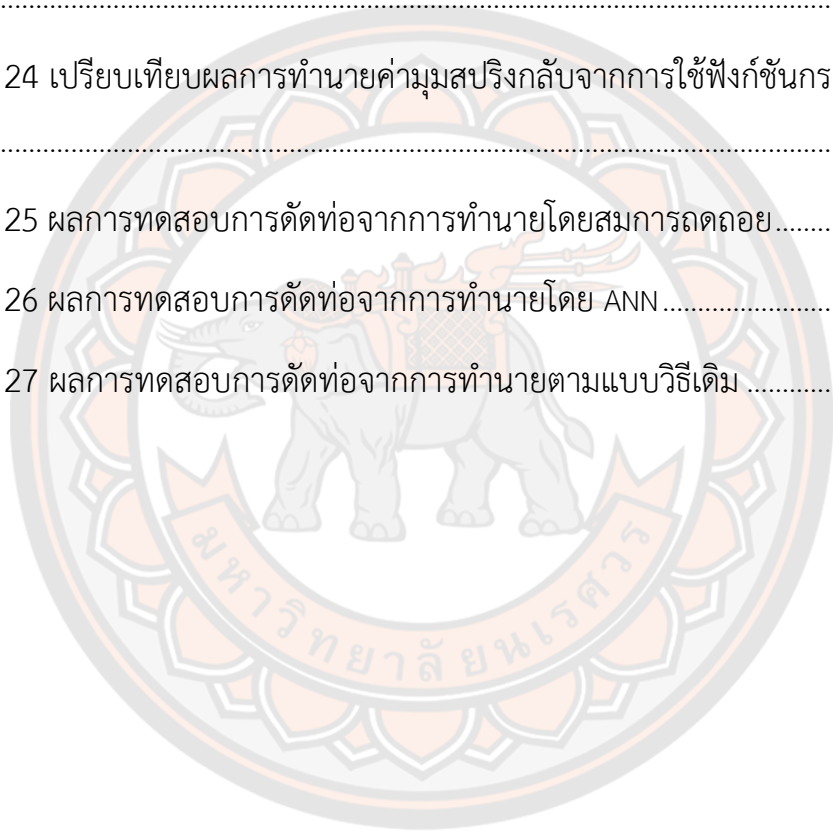
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ประกาศคุณูปการ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	15
ความเป็นมาของปัญหา.....	15
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	20
ความสำคัญของการวิจัย.....	20
ขอบเขตการวิจัย.....	20
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	20
ขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย.....	21
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า.....	22
งานท่อเหล็กกล้า.....	32
กระบวนการ เครื่องมือ และตัวแปรที่มีผลในการตัดท่อ.....	42
การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ.....	51
การวิเคราะห์ความแปรปรวน และการทดสอบสมมติฐาน.....	56

โครงข่ายประสาทเทียม .....	59
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	73
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	94
การทดลองกระบวนการตัดต่อโลหะ .....	94
วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (ANN).....	101
การทดสอบการตัดต่อจากผลจากการทำนาย.....	106
บทที่ 4 ผลการวิจัย .....	107
ผลการทดลองกระบวนการตัดต่อโลหะ .....	107
ผลจากกระบวนการวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (ANN).....	115
ผลการทดสอบการตัดต่อจากผลจากการทำนาย.....	125
บทที่ 5 บทสรุป.....	129
สรุปผลการวิจัยการทดลองกระบวนการตัดต่อโลหะ .....	130
สรุปผลกระบวนการวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (ANN).....	131
สรุปผลการทดสอบการตัดต่อจากผลจากการทำนาย.....	132
ข้อเสนอแนะ .....	132
บรรณานุกรม .....	143
ประวัติผู้วิจัย .....	179

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำความแข็งแรงสูง.....	26
ตาราง 2 ส่วนผสมทางเคมีสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางชนิดต่าง ๆ.....	28
ตาราง 3 ส่วนผสมทางเคมีและการใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือ.....	29
ตาราง 4 คุณลักษณะของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดต่าง ๆ.....	31
ตาราง 5 ตารางเปรียบเทียบการระบุขนาดท่อเหล็กกล้าของมาตรฐานต่างๆ.....	42
ตาราง 6 ชั้นส่วนแมนเดรลแบบต่าง ๆ.....	47
ตาราง 7 ขนาดและรูปร่างของเครื่องมือ.....	48
ตาราง 8 แรงที่ใช้ในการตัด.....	50
ตาราง 9 แผนการทดลองของทากูชิ.....	54
ตาราง 10 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน กรณีจำแนกทางเดียว.....	57
ตาราง 11 การทบทวนและสำรวจบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตัดท่อ.....	77
ตาราง 12 ข้อมูลทางเทคนิค Herber 76 CNC TB Booster Bending Machine.....	95
ตาราง 13 ข้อกำหนดทางกลท่อเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A210 A-1.....	95
ตาราง 14 ระดับของปัจจัยในกระบวนการตัดท่อ.....	98
ตาราง 15 ค่าการทดลองในกระบวนการตัดท่อ จำนวน 27 การทดลอง.....	99
ตาราง 16 ผลการทดลองกระบวนการตัดท่อที่มีต่อค่ามุมสปริงกลับ.....	108
ตาราง 17 ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N Ratios).....	109
ตาราง 18 ค่า S/N Ratio เฉลี่ยของระดับและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับ.....	110

ตาราง 19 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่ามุมสปริงกลับ .....	114
ตาราง 20 ข้อมูลสำหรับกระบวนการวิธีโครงข่ายประสาทเทียม.....	115
ตาราง 21 ข้อมูลสำหรับการฝึกสอน (Train set) .....	117
ตาราง 22 ข้อมูลสำหรับการทดสอบ (Test set).....	118
ตาราง 23 เปรียบเทียบฟังก์ชันกระตุ้นแต่ละชนิดกับโครงสร้างที่เหมาะสมและค่าอื่น ๆ .....	121
ตาราง 24 เปรียบเทียบผลการทำนายค่ามุมสปริงกลับจากการใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแต่ละชนิด .....	122
ตาราง 25 ผลการทดสอบการตัดต่อจากการทำนายโดยสมการถดถอย.....	126
ตาราง 26 ผลการทดสอบการตัดต่อจากการทำนายโดย ANN.....	126
ตาราง 27 ผลการทดสอบการตัดต่อจากการทำนายตามแบบวิธีเดิม .....	127



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 กระบวนการแปรรูปกลุ่มต่าง ๆ .....	17
ภาพ 2 Rotary Draw Tube Bender .....	18
ภาพ 3 แผนผังกรรมวิธีการผลิตเหล็กชั้นต่าง ๆ ยกเว้นกรรมวิธีการเคลือบผิว .....	24
ภาพ 4 ชนิดต่าง ๆ ของโลหะกลุ่มเหล็ก .....	25
ภาพ 5 กระบวนการเจาะแบบหมุน .....	33
ภาพ 6 รูปแบบการเจาะแบบหมุนสามลูกกลิ้ง .....	34
ภาพ 7 หลักการและกระบวนการ Pilger .....	35
ภาพ 8 ลูกรีดเก็บขนาด .....	36
ภาพ 9 เครื่องตัดแบบสามลูกกลิ้งและแบบสี่ลูกกลิ้ง .....	36
ภาพ 10 การอัดรีดท่อโดยใช้เครื่องอัดแบบดับเบิลแอกชั่น .....	37
ภาพ 11 เทคนิคการลากขึ้นรูปท่อ .....	38
ภาพ 12 วิธีการตัดท่อ และลักษณะของแมนเดรล .....	43
ภาพ 13 วิธีการขึ้นรูปท่อที่มีมุมแหลมโดยใช้แรงอัดตามแนวแกน .....	43
ภาพ 14 การขึ้นรูปแบบ Bulging .....	44
ภาพ 15 กระบวนการตัดท่อแบบต่าง ๆ .....	45
ภาพ 16 ชิ้นส่วนต่าง ๆ สำหรับกระบวนการตัดท่อ .....	46
ภาพ 17 Rotary Draw Tube Bender .....	47
ภาพ 18 ปัจจัยในการคำนวณหาเวลาในการตัดโค้ง .....	50
ภาพ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ .....	51

ภาพ 20 ลักษณะทางคุณภาพที่น่าสนใจ .....	52
ภาพ 21 The “All” or “Nothing” loss function.....	53
ภาพ 22 ภาพความสัมพันธ์ข้อบ่งชี้ปัญหาประดิษฐ์ .....	60
ภาพ 23 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมในการสร้างแบบจำลองข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ .63	
ภาพ 24 ลักษณะทั่วไปของเซลล์ประสาททางชีวภาพและการเชื่อมต่อ.....	64
ภาพ 25 โครงข่ายประสาทเทียม .....	65
ภาพ 26 แบบจำลองเซลล์ประสาทเทียมหนึ่งเซลล์ .....	66
ภาพ 27 Sigmoid Activation Function.....	67
ภาพ 28 ReLU Activation Function.....	68
ภาพ 29 TanH Activation Function.....	69
ภาพ 30 Identity Activation Function .....	70
ภาพ 31 การเคลื่อนตัวลงมาจุดต่ำสุดโดย Gradient Descent .....	71
ภาพ 32 จำนวนการเลือกใช้วัสดุต่อการทบทวนวรรณกรรม .....	89
ภาพ 33 จำนวนการเลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของต่อการทบทวนวรรณกรรม .....	90
ภาพ 34 จำนวนการเลือกใช้ตัวแปรนำเข้าในการตัดต่อการทบทวนวรรณกรรม .....	91
ภาพ 35 การศึกษาการสปริงกลับก่อนและหลังกระบวนการผลิต.....	92
ภาพ 36 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	94
ภาพ 37 เครื่องจักร วัสดุ และเครื่องมือวัด สำหรับการทดลอง .....	96
ภาพ 38 ขั้นตอนการตัดต่อและขนาดสำหรับใช้ในการวัดมุม .....	97
ภาพ 39 กระบวนการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม .....	102
ภาพ 40 ขั้นตอนการตัดต่อ และการวัดขนาด .....	107

ภาพ 41 ค่าร้อยละ S/N Ratio จากผลกระทบแต่ละปัจจัย .....	111
ภาพ 42 การกระจายแบบแจกแจงปกติของค่ามุมสปริงกลับ .....	112
ภาพ 43 ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย S/N Ratio จากผลกระทบแต่ละปัจจัย .....	113
ภาพ 44 ผลการทดลองหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น Sigmoid.....	119
ภาพ 45 ผลการทดลองหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น ReLU.....	120
ภาพ 46 ผลการทดลองหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น TanH.....	120
ภาพ 47 ผลการทดลองหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น Identity.....	121
ภาพ 48 เปรียบเทียบผลการทำนายค่ามุมสปริงกลับจากการใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแต่ละชนิด .....	123
ภาพ 49 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม.....	124
ภาพ 50 ความสัมพันธ์ผลลัพธ์เป้าหมายกับผลการทำนายเปรียบเทียบจากการใช้ฟังก์ชัน กระตุ้นแต่ละชนิดของค่ามุมสปริงกลับ .....	125



# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาของปัญหา

โลกทุกวันนี้มีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วและซับซ้อนมากขึ้น ปัจจัยทั้งภายในและภายนอกที่มีผลต่อการพัฒนาประเทศเปลี่ยนไปมาก เศรษฐกิจโลกที่ถูกขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยี นวัตกรรม และดิจิทัล ส่งผลให้กิจกรรมทางเศรษฐกิจหมุนไปอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังมีความเสี่ยงจากปัจจัยด้านการค้าระหว่างประเทศที่ส่งผลต่อเศรษฐกิจโลกและอุตสาหกรรมเติบโตของเศรษฐกิจไทยอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ภาคอุตสาหกรรมไทยจึงจำเป็นต้องปรับตัวเพื่อพร้อมรับมือกับความท้าทายข้างต้น (วิทย์ สิริเวศิน, 2562)

การนำเทคโนโลยีสารสนเทศและระบบอัตโนมัติเข้ามาช่วยในกระบวนการผลิตและการจัดการด้านต่าง ๆ จะทำให้เกิดความสะดวกรวดเร็วและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินธุรกิจได้เป็นอย่างมาก ยกตัวอย่างเช่น การนำเซนเซอร์มาใช้ในการติดตามและควบคุมการผลิต การนำหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติมาใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งจะส่งผลให้ธุรกิจมีประสิทธิภาพ การผลิตเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการผลิตด้วยวิธีการเดิม ๆ ทั้งนี้ในการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตที่มีปัญหาด้านแรงงาน เช่น ใช้แรงงานต่างด้าว หรือแรงงานสูงอายุ โดยนำหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติมาใช้ในกระบวนการง่าย ๆ แล้วปรับไปสู่กระบวนการที่ยากขึ้นตามลำดับ (คณะทำงานฝ่ายวิชาการ OIE Forum 2019, 2562) เทคโนโลยีต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นปัญญาประดิษฐ์หรือสมองกล (Artificial Intelligence: AI) สำหรับการช่วยคิดและวิเคราะห์อัตโนมัติ หรือ Data Visualization ที่เป็นการนำข้อมูลดิบมาทำให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นด้วยการทำเป็นภาพ กราฟ แผนภูมิ หรือวิดีโอจะเริ่มมีความสำคัญมากขึ้น เนื่องจากการลงทุน ในเทคโนโลยีจะเป็นตัวช่วยให้บริษัทมีความยืดหยุ่นในการบริหารจัดการ สำหรับเหตุการณ์ต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แรงงานคนจะถูกทดแทนด้วยเทคโนโลยีและหุ่นยนต์มากขึ้น ซึ่งจะกระทบโดยตรงกับแรงงาน และผู้เล่นในอุตสาหกรรมต่าง ๆ และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ธุรกิจเหล่านั้นปรับตัวให้ทันโลกที่หมุนเร็วขึ้น (เรวดี แก้วมณี, 2563)

ในโลกปัจจุบันกลุ่มอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้รับการพัฒนาด้านการเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพไปอย่างรวดเร็วทั้งในด้านการผลิตและบริการ โดยเครื่องมือหนึ่งที่มีส่วนร่วมในการพัฒนาครั้งนี้ คือ การนำเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ามาช่วยทำงานก่อให้เกิดการเพิ่มกำลังและปรับปรุงประสิทธิภาพในด้านการผลิตและการบริการให้เพียงพอและสอดคล้องกับความต้องการของกลุ่มอุตสาหกรรมที่เติบโตเพิ่มขึ้นตลอดเวลา ดังนั้น จึงพบว่าประเทศใดก็ตามในโลกที่มีเทคโนโลยีด้านการ

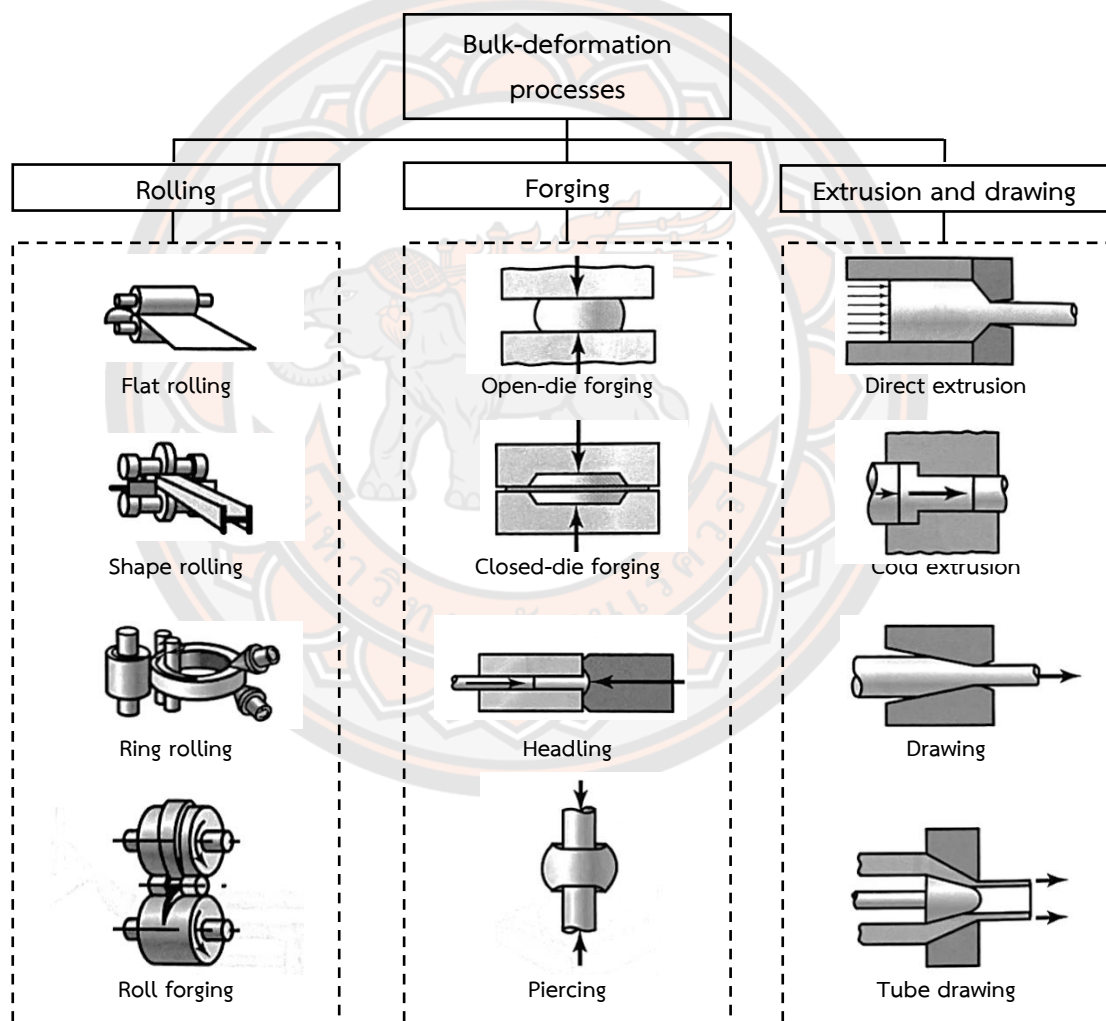
ออกแบบและสร้างเครื่องจักรและอุปกรณ์เป็นของตนเอง ประเทศนั้นก็จะมีโอกาสการพัฒนาตนเองขึ้นเป็นผู้นำโลกอุตสาหกรรมมากยิ่งขึ้น (พิเชษฐ ตระกูลชัยศิริ, 2540) ระบบการควบคุมการทำงานอัตโนมัติ เข้ามามีบทบาทต่อการใช้ชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมากเนื่องจากตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันและต่อในอนาคตมนุษย์พยายามประดิษฐ์คิดค้นและพัฒนาอุปกรณ์เครื่องมือที่สามารถทุ่นแรงและทำงานแทนมนุษย์มาตลอด แม้แต่ทุกวันนี้มนุษย์ทุกคนก็ต้องมีชีวิตประจำวันที่จะต้องอยู่ร่วมกับอุปกรณ์เครื่องทุ่นแรงเหล่านี้ตลอด ดังนั้น การทำงานในอุตสาหกรรมจึงเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้เช่นกัน ไม่ว่าจะเป็นธุรกิจประเภทใดก็ต้องมีอุปกรณ์เครื่องทุ่นแรงจนถึงระบบหรือเครื่องมือเครื่องจักรควบคุมการทำงานอัตโนมัติ (ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ, 2552)

การผลิต (Manufacturing) เป็นกิจกรรมเชิงพาณิชย์ที่มีความสำคัญ ดำเนินการโดยบริษัทฯ ที่จำหน่ายผลิตภัณฑ์ให้กับลูกค้า ประเภทของการผลิตที่ทำโดยบริษัทฯ ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ผลิต เราสามารถหาความสัมพันธ์นี้โดยตรวจสอบประเภทของอุตสาหกรรมในการผลิตก่อน จากนั้นจึงระบุผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต โดยทั่วไปอุตสาหกรรมการผลิตประกอบด้วยองค์กรและองค์กรที่ทำการผลิตหรือจัดหาสินค้าและบริการ อุตสาหกรรมสามารถจำแนกได้เป็นระดับปฐมภูมิ และตติยภูมิ อุตสาหกรรมระดับปฐมภูมิจะปลูกฝังและใช้ประโยชน์จากทรัพยากรธรรมชาติ เช่น เกษตรกรรมและเหมืองแร่ ส่วนอุตสาหกรรมระดับตติยภูมิจะนำเอาผลผลิตของอุตสาหกรรมระดับปฐมภูมิมาแปลงเป็นสินค้าอุปโภคบริโภคและสินค้าทุน การผลิตเป็นกิจกรรมหลักสำหรับหมวดหมู่นี้ แต่ต้องรวมการก่อสร้างและสาธารณูปโภคด้านไฟฟ้าเข้าไว้ด้วย (Groover M. P., 2012)

การใช้ประโยชน์จากท่อในอดีตเริ่มแรกนั้น มนุษย์ได้นำท่อไม้ไผ่ที่ต่อกันหลังจากได้นำเอาไคอะแพรมด้านในออกโดยเป็นรูทะลุยาวตลอดท่อไม้ไผ่ ชาวแอซเท็ก (Aztecs) และชาวกรีกโบราณใช้ท่อดินเพื่อขนส่งน้ำ และชาวโรมันใช้ท่อตะกั่วสำหรับวางแผนการใช้น้ำ ปัจจุบันนี้ท่อโลหะส่วนใหญ่ทำมาจากแถบแผ่นโลหะหรือแท่งโลหะที่เป็นของแข็ง เพื่อใช้สำหรับลำเลียงก๊าซ น้ำ และของเสียสำหรับในงานโครงสร้าง กระบวนการขึ้นรูปท่อนั้นมีหลายกระบวนการ ได้แก่ (Mair G., 2019)

1. กระบวนการขึ้นรูปท่อแบบ Butt Welding ขนาดของท่อจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 75 มิลลิเมตร
2. กระบวนการขึ้นรูปท่อแบบ Electric Butt Welding กระบวนการนี้ผลิตท่อได้คุณภาพดี ตำแหน่งศูนย์กลางของรูที่ดี ควบคุมความหนาของผนังอย่างแม่นยำ ได้พื้นผิวที่มีคุณภาพสูงช่วยลดโอกาสการเกิดการกัดกร่อนเมื่อใช้งาน ทำให้เหมาะสำหรับหม้อไอน้ำหรือการใช้งานแรงดัน ในกระบวนการนี้ท่อจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด 400 มิลลิเมตร มีความหนาของผนัง 3-13 มิลลิเมตร นอกจากนี้ในกระบวนการยังได้คิดค้นกรรมวิธีการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดพิเศษ และผ่านกระบวนการต่าง ๆ ทำให้สามารถผลิตท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 400 ถึง 1200 มิลลิเมตร และความหนาของผนัง 6-15 มิลลิเมตร

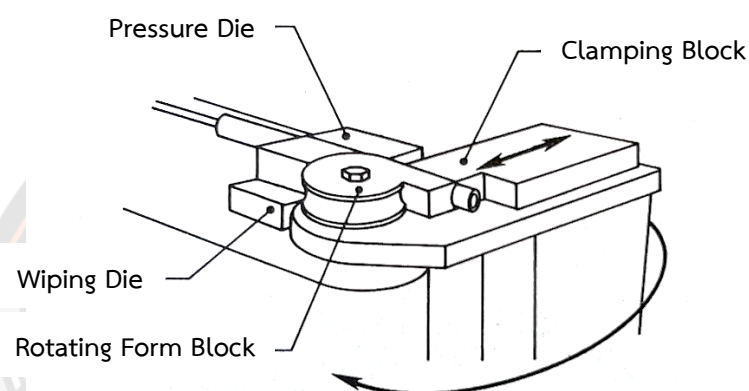
3. กระบวนการขึ้นรูปท่อแบบ Seamless หรือเรียกว่าท่อไร้รอยต่อ สามารถผลิตได้โดยการหล่อแบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal casting), การอัดรีด (Extrusion), การเจาะ (Piercing) หรือการตีขึ้นรูปด้วยการหมุน (Rotary Forging) ในการผลิตท่อจะใช้การอัดรีดโดยตรง แต่มีแมนเดรลเพื่อขึ้นรูปด้านในเข้าของแม่พิมพ์ เหล็กแท่งวางอยู่ในเข้าเพื่ออัดรีด แมนเดรลถูกดันผ่านศูนย์กลางของแท่งเหล็ก จากนั้นตัวแกนจะเคลื่อนไปข้างหน้าผลักโลหะผ่านแม่พิมพ์และรอบๆ แกนหมุน โดยอะลูมิเนียมและพลาสติกจะรีดได้ง่ายกว่าเหล็กกล้า อาจรีดได้เส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 75 มิลลิเมตร



ภาพ 1 กระบวนการแปรรูปกลุ่มต่าง ๆ

ที่มา: ปรับปรุงมาจาก Kalpakjian S., 2014

4. กระบวนการขึ้นรูปท่อแบบ Piercing วิธีนี้สามารถผลิตท่อไม่มีรอยต่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด 150 มิลลิเมตรได้ เมื่อได้พัฒนาเพิ่มเติมโดยผ่านกระบวนการนี้สามารถใช้กับท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดถึง 610 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ท่อไร้รอยต่อคุณภาพสูงยิ่งขึ้นและเหมาะสำหรับการบรรจุของเหลวที่ความดันสูงกระบวนการขึ้นรูปท่อแบบ Piercing จึงผ่านกระบวนการตีขึ้นรูปด้วยการหมุน (rotary forging process) ซึ่งจะรักษาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในในขณะที่บีบวัสดุระหว่างการตีขึ้นรูป (Groover M. P., 2012)



ภาพ 2 Rotary Draw Tube Bender

ที่มา: Todd R. H., 1994

การตัดท่อเป็นหนึ่งในวิธีการขึ้นรูปหลักสำหรับการแปลงท่อตรงรูปทรงกระบอกให้เป็นรูปร่างที่ต้องการ วิธีการตัดท่อมียหลายวิธี เช่น การตัดแบบยืด (Stretch Bending) การตัดแบบม้วน (Roll Bending) การตัดแบบผลัก (Push Bending) และการตัดแบบอัด (Compression Bending) แต่การตัดแบบโรตารี (Rotary Draw Bending) เป็นเทคโนโลยีขั้นสูงและเป็นที่ต้องการด้วยความแม่นยำและประสิทธิภาพสูงในการตัดท่อ (Safdarian R., 2019) ในช่วงแรกเราจะใช้ทรายทำหน้าที่เป็นแมนเดรลภายในหรือการเติมวัสดุภายในท่อด้วยวัสดุที่เป็นอนุภาค มีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการป้องกันการยุบตัวของท่อในระหว่างการตัด สามารถตัดโค้งงอได้ด้วยเทคนิคแรงดึง Helical Tension Spring ให้กระจายไปบนท่อ ช่องว่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อและเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อมีขนาดเล็ก จึงเกิดแรงดึงขึ้น ดังนั้น ท่อจะดัดงอได้ยากและสามารถดัดโค้งได้อย่างสม่ำเสมอ (Kalpakjian S., 2014) การใช้ทรายเป็นแมนเดรลนั้นเหมาะสำหรับการผลิตที่มีจำนวนน้อย ภายหลังจากได้นำแมนเดรลชนิดต่าง ๆ เข้ามาใช้ในการตัดท่อ เช่น แมนเดรลแบบเสียบ (Plug Mandrel) ใช้ในกรณีที่มีการดัดโค้งที่ไม่มากนัก แมนเดรลแบบฟอร์ม (Form Mandrel) มีส่วน

โค้งรัศมีที่ปลายเพื่อให้รองรับท่อได้มากขึ้นในระหว่างการตัด แมนเดรลแบบบอล (Ball Mandrel) และแมนเดรลแบบบอลที่มีสายเคเบิลเหล็ก (Ball Mandrel with Steel Cable) ใช้ในกรณีที่เน้นความสำคัญต่อการตัดโค้งเป็นพิเศษ โดยเลือกใช้ให้เหมาะกับลักษณะงานตามความเหมาะสม เครื่องตัดท่อแบบขับเคลื่อนด้วยโรตารี (Rotary Draw Tube Bender) สามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้อย่างรวดเร็วตามต้องการ มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวาง ช่วยลดความจำเป็นในการใช้พื้นที่สำหรับจัดเก็บวัตถุดิบ สำหรับงานการผลิตขนาดกลางอาจใช้เครื่องตัดท่อที่ควบคุมด้วยตัวเลข (Numerical Control; NC) และใช้เครื่องจักรควบคุมเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control; CNC) สำหรับการผลิตในระดับที่สูงขึ้น (Todd R. H., 1994)

NC Mandrel-Less Rotary Draw Bending (MLRDB) เป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการตัดท่อโลหะที่นิยมใช้กันทั่วไปในปัจจุบัน เมื่อขึ้นส่วนจับยึดในเครื่องจักรเพื่อการตัดถอยออก รูปร่างของท่อจะคืนสภาพและการสปริงกลับ (Springback) จะเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ รูปทรงที่แท้จริงทางเรขาคณิตของการตัดท่อจะเบี่ยงเบนไปจากข้อกำหนดการออกแบบ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำในการขึ้นรูปและคุณภาพของท่อโลหะ ดังนั้น การทำนายสปริงแบ็คที่แม่นยำของการตัดท่อโลหะจึงเป็นกุญแจสำคัญในการชดเชยและควบคุมสปริงแบ็คใน MLRDB ผู้เชี่ยวชาญและนักวิชาการได้ทำการวิจัยมากมายในการวิเคราะห์ปัจจัยการสปริงกลับ กลไกและกฎของสปริงกลับ และการทำนายการสปริงกลับ (Zhou H. F., Zhang S. Y., Qiu L. M., & Wang Z. L., 2021) และการสปริงกลับยังคงเป็นปัญหาหลักอย่างหนึ่งโดยเฉพาะในกลุ่มการผลิตขนาดเล็ก หรือเมื่อคุณสมบัติทางเรขาคณิตและทางกลของวัตถุดิบไม่คงที่ (Simonetto E., Ghiotti A., & Bruschi S., 2021) เพื่อให้ทราบค่าการชดเชยในการสปริงกลับจำเป็นต้องทราบค่าของมุมสปริงกลับหลังการตัด ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อการสปริงกลับ เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ รัศมีการตัด มุมตัด และความเค้นจุดครากของวัสดุท่อ (Gheorghe A., Lucian L., Mioara G. F., & Adrian C. V., 2007) หลายงานวิจัยพยายามหาค้นหาตัวแปรที่มีผลต่อการสปริงกลับจากการตัดท่อและมีความพยายามที่จะหาค่าที่เหมาะสมในการปรับตั้งเครื่องจักรเพื่อประโยชน์สูงสุดในการผลิตขึ้นงาน เช่น ลดเวลาในการตั้งค่าเครื่องจักร ลดปริมาณวัสดุทดลอง ลดปัญหาของเสียในขั้นตอนทดลอง เป็นต้น

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น นำไปสู่การศึกษาค้นหาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อสปริงกลับ รวมทั้งการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมสปริงกลับในการตัดท่อโลหะ สำหรับวัสดุท่อหม้อไอน้ำความดันต่ำและปานกลาง ASTM A-210 Gr. A1 บนพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) เพื่อนำไปใช้ในการปรับตั้งค่าตัวแปรในการตัดท่อโลหะ ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมถือว่าเป็นส่วนหนึ่งในสาขาด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) โดยเป็นแบบจำลองเพื่อการประมวลผลข้อมูลแบบหนึ่งที่อาศัยการเลียนแบบการทำงานของสมอง โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการประมวลผลข้อมูลด้วยการคำนวณแบบการเชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายที่ทำงาน

ร่วมกันของหน่วยประมวลผลย่อย ๆ หลายหน่วย ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมเป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับและถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้ในการทำนายค่าการสปริงกลับ เพื่อการปรับตั้งตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดในการตัดท่อโลหะ เพื่อเป็นการลดระยะเวลา ขั้นตอนและจำนวนชิ้นงานทดสอบสำหรับการปรับตั้งค่าตัวแปรต่าง ๆ บนเครื่องตัดท่อ (Rotary Tube Bending) เพื่อประโยชน์ต่อโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมหาค่าการทำนายที่เหมาะสมในการตัดท่อโลหะ
2. เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อค่ามุมสปริงกลับจากการตัดท่อโลหะ
3. เพื่อหาประสิทธิภาพการทำนายจากโครงข่ายประสาทเทียม

### ความสำคัญของการวิจัย

ผลการวิจัยเรื่อง การหาค่าที่เหมาะสมสปริงกลับของเครื่องซีเอ็นซีตัดท่อบนพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม สามารถนำข้อมูลค่าตัวแปรไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ควบคุมเครื่องจักรเพื่อลดเวลาในการปรับตั้งเครื่อง รวมทั้งใช้เป็นแนวทางในการสร้างเครื่องจักรกลระบบอัตโนมัติที่ทำงานได้ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ หรือ CNC (Computer Numerical Control) นอกเหนือจากเครื่องกลึง CNC, เครื่องกัด CNC ที่ได้รับความนิยมอยู่ในปัจจุบัน และสามารถนำข้อมูลเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาชิ้นงานที่เกี่ยวข้องต่อไป

### ขอบเขตการวิจัย

1. ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่ามุมสปริงกลับจากการตัดท่อโลหะ
2. ออกแบบการทดลองหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อค่ามุมสปริงกลับ ได้แก่ ความหนาของท่อ รัศมีตัด เวลาหยุด และมุมมองการตัด ด้วยวิธีทาคุชิ (Taguchi)
3. วัสดุสำหรับการทดลอง คือ ท่อเหล็ก เกรด ASTM A-210 Gr. A1 ขนาดความโตภายนอก 1 3/4 นิ้ว หรือ 44.45 มิลลิเมตร ความหนาผนังท่อ 4.57, 5.59 และ 6.10 มิลลิเมตร
4. กระบวนการตัดท่อด้วยเครื่องตัดท่อซีเอ็นซี เป็นระบบที่ทำการศึกษา
5. ใช้เครื่อง Herber 76 CNC TB Booster Bending Machine
6. ตรวจสอบค่ามุมมองการสปริงกลับของชิ้นงานท่อโลหะด้วยเครื่อง CMM

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. โมเดลสำหรับการทำนายค่ามุมสปริงกลับจากการตัดท่อโลหะ

2. ตัวแปรที่มีผลต่อค่ามุมสปริงกลับจากการตัดท่อโลหะ
3. ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อค่ามุมสปริงกลับจากการตัดท่อโลหะ
4. ค่าการทำนายมุมมองค่าในการตัดท่อโลหะที่เหมาะสม

### ขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎี ทบทวนข้อมูล เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องต่าง ๆ ดังนี้
  - 1.1 อุตสาหกรรมเหล็ก และเหล็กกล้า
  - 1.2 งานท่อเหล็กกล้า
  - 1.3 กระบวนการ เครื่องมือ และตัวแปรที่มีผลในการตัดท่อ
  - 1.4 การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม
  - 1.5 โครงข่ายประสาทเทียม
  - 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตัดท่อโลหะ
2. ขั้นตอนปฏิบัติการ
  - 2.1 ออกแบบการทดลองและปฏิบัติตามขั้นตอนระเบียบวิธีการ
  - 2.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง หาความสัมพันธ์ของปัจจัย และบันทึกผลการทดลอง
  - 2.3 พิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่ามุมสปริงกลับ นำค่าที่ได้ฝึกสอนในโครงข่ายประสาทเทียม
  - 2.4 ทำการทดสอบข้อมูลในโครงข่ายประสาทเทียม
  - 2.5 ทดสอบตัดท่อเพื่อหาประสิทธิภาพจากผลการทำนาย
3. ดำเนินการวิเคราะห์
  - 3.1 ปัจจัยการตัดท่อโลหะ และความสัมพันธ์ของปัจจัย
  - 3.2 การทำนายค่าสปริงกลับจากการตัดท่อโลหะด้วยโครงข่ายประสาทเทียม
  - 3.3 การยืนยันประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม
4. สรุปผลการทดลองและการเสนอแนะ
5. จัดทำรูปเล่มงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ รวมถึงดำเนินการเผยแพร่ผลงาน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ส่วนของเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในเรื่องการหาค่าที่เหมาะสมสปริงกลับของเครื่องซีเอ็นซี ดัดท่อบนพื้นฐานทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียม ได้มีการนำหลาย ๆ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้ เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้น ตลอดจนเพื่อวิเคราะห์และประมวลผล ก่อให้เกิดความเหมาะสมกับการวิจัย แยกเป็นทฤษฎีเรื่องต่าง ๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า, งานท่อเหล็กกล้า, กระบวนการ เครื่องมือ และตัวแปรที่มีผลในการดัดท่อ, การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ, การวิเคราะห์ความแปรปรวน และการทดสอบสมมติฐาน, โครงข่ายประสาทเทียม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า

##### 1. อุตสาหกรรมเหล็ก

เหล็กเป็นโลหะที่มีมากที่สุดในโลก มีความจำเป็นในการก่อสร้าง อุตสาหกรรม การผลิตเครื่องจักรเครื่องมือกล และอุปกรณ์ต่าง ๆ ปัจจุบันมีการใช้มากกว่าร้อยละ 90 ของโลหะทั้งหมด ที่ใช้อยู่ ดังนั้น อุตสาหกรรมเหล็กนับเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ ปริมาณการใช้เหล็กจะบ่งชี้ทางของเศรษฐกิจได้ กล่าวคือ เมื่อภาวะเศรษฐกิจโดยรวมของโลกอยู่ในช่วงเฟื่องฟู มีอัตราการขยายตัวมาก กำลังการผลิตเหล็กของโลกและความต้องการใช้เหล็กจะมากตามไปด้วย หากเศรษฐกิจโลกถดถอย อัตราการผลิตเหล็กของโลกก็ลดลงตามไปด้วย อุตสาหกรรมเหล็กแบ่งได้เป็น 3 ชั้น คือ อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น อุตสาหกรรมเหล็กชั้นกลาง และอุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลาย อุตสาหกรรมการผลิตเหล็กเป็นอุตสาหกรรมใหญ่ที่มีการผลิตมานานแล้วตั้งแต่อดีต มีอยู่ในหลายประเทศ โดยมีวิวัฒนาการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีของระบบการผลิต เพื่อให้ได้เหล็กที่มีคุณภาพสูง ประหยัดต้นทุน และตอบสนองความต้องการของตลาดตามช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป กระบวนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้าสรุปได้ 3 ขั้นตอน ได้แก่ อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น, อุตสาหกรรมเหล็กชั้นกลาง และอุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลาย (สมศักดิ์ อิทธิโสภณกุล, 2555)

##### 1.1 อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น (Raw Steel Products)

อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้นเป็นขั้นตอนในการนำแร่เหล็ก (Iron Ore) ที่อยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์มาถลุงให้เป็นโลหะเหล็ก ทำให้ได้เหล็กที่มีปริมาณสารมลทินต่ำด้วยกระบวนการถลุงแร่เหล็ก โดยมีวัตถุดิบหลัก คือ แร่เหล็ก ถ่านหิน (Coal) และหินปูน (Limestone) กระบวนการถลุงแร่เหล็กแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ การถลุงแร่เหล็กในสภาพของเหลว ได้



ผลิตภัณฑ์คือ เหล็กดิบ (Pig Iron) และการถลุงแร่เหล็กในสภาพของแข็ง จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นเหล็กพูน (Sponge Iron) ที่ใช้ในการผลิตเหล็กกล้า (Steel) และเหล็กหล่อ (Cast Iron) ชนิดต่าง ๆ อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้นนี้ จัดได้ว่าเป็นกระบวนการเริ่มต้นของอุตสาหกรรมเหล็กที่มีความสำคัญอย่างมากในการพัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กขั้นต่อ ๆ ไป รวมถึงอุตสาหกรรมที่ต่อเนื่องจากอุตสาหกรรมเหล็ก เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้นเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้เงินลงทุนสูง และจำเป็นต้องมีระบบโครงสร้างพื้นฐานและระบบสาธารณูปโภคที่เอื้ออำนวยต่อการผลิตด้วย

### 1.2 อุตสาหกรรมเหล็กชั้นกลาง (Intermediate Steel Products)

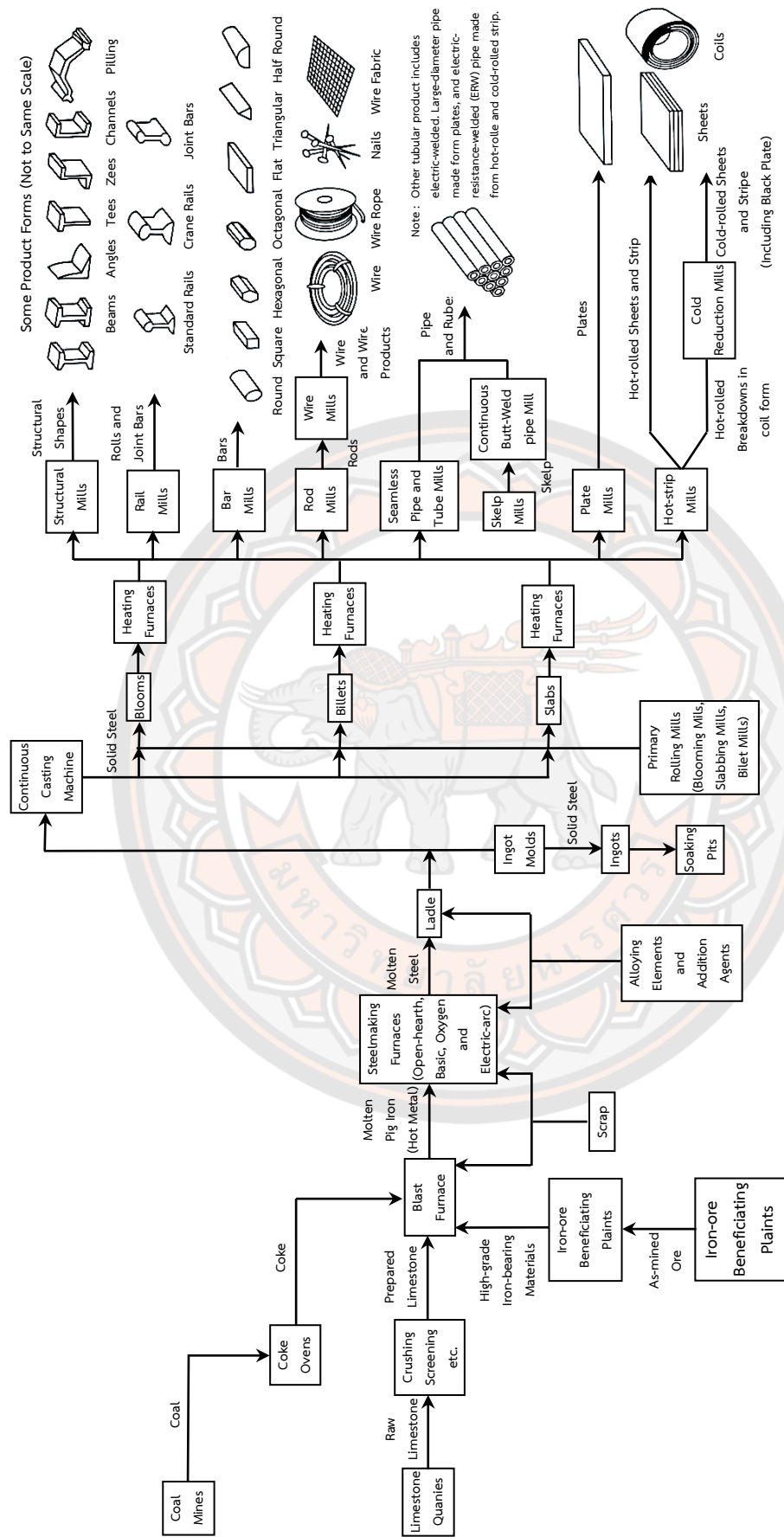
อุตสาหกรรมเหล็กชั้นกลางหรือการผลิตเหล็กกล้า เป็นการนำเอาเหล็กดิบ (Pig Iron) เหล็กพูน หรือเศษเหล็กมาหลอมในเตาหลอม เช่น เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace, EAF) เป็นต้น เพื่อให้ได้น้ำเหล็ก แล้วทำการปรับปรุงน้ำเหล็กเพื่อลดปริมาณธาตุมลทินให้ได้คุณภาพน้ำเหล็กตามที่ต้องการ จากนั้นจึงผ่านกระบวนการหล่อในเบ้าหล่อหรือหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting) ให้เป็นเหล็กแท่งชนิดต่าง ๆ ที่มีลักษณะแตกต่างกันตามการนำไปใช้งาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตเหล็ก ๆ ชั้นกลางเป็นผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูป (Semi-Finished Products) ได้แก่ เหล็กแท่งเล็กสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Billet) เหล็กแท่งแบน (Slab) และเหล็กแท่งใหญ่ (Bloom/Beam Blank) สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการ ผลิตผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูปต่อไป

### 1.3 อุตสาหกรรมเหล็กชั้นปลาย (Final Steel Products)

อุตสาหกรรมเหล็กชั้นปลาย คือ กระบวนการผลิตที่เป็นขั้นตอนการนำผลิตภัณฑ์เหล็กชั้นกลาง มาผ่านกระบวนการแปรรูป โดยนำไปผ่านกระบวนการรีด ทั้งรีดร้อน รีดเย็น รีดซ้ำ การหล่อ การอัดหรือ ทบขึ้นรูป การเคลือบชุบผิวด้วยโลหะ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการขั้นนี้ ได้แก่

1.3.1 การผลิตผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปจากเหล็กแท่งเล็ก เป็นการนำเหล็กมาผ่านกระบวนการรีดร้อนลดขนาดที่อุณหภูมิประมาณ 1,150 °C ผลิตภัณฑ์ สำเร็จรูปที่ได้ ได้แก่ เหล็กเส้น (Bar) เหล็กลวด (Wire Rod) เหล็กโครงสร้างรูปพรรณขนาดเล็ก เช่น เหล็กฉาก (Angle) เหล็กรูปร่างน้ำ (Channel) เป็นต้น

1.3.2 การผลิตผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปจากเหล็กแท่งใหญ่ เป็นการนำเหล็กแท่งใหญ่มาผ่านกระบวนการรีดร้อนเพื่อลดขนาดให้มีรูปทรงหน้าตัดต่าง ๆ ที่ อุณหภูมิประมาณ 1,150 °C ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่ได้ ได้แก่ เหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อนขนาดใหญ่ หน้าตัดต่าง ๆ เช่น หน้าตัดรูปตัว H (H-beam) รูปตัว I (I-beam) รูปตัว L หรือเหล็กฉาก (Angle) รูปตัว C หรือเหล็กรูปร่างน้ำ (Channel) เหล็กเข็มพืด (Sheet Pile) เป็นต้น



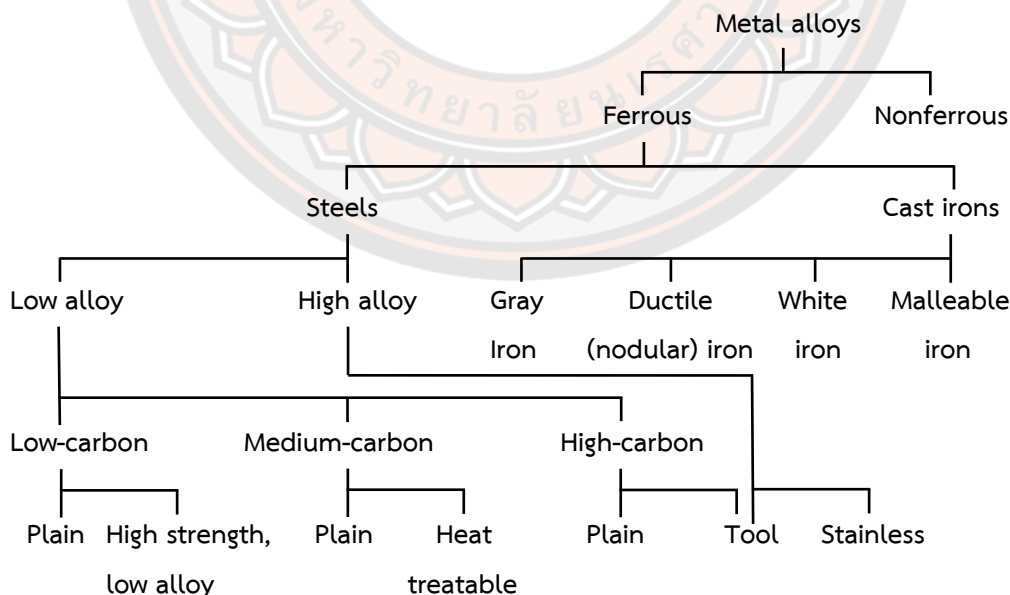
ภาพ 3 แผนผังกรรมวิธีการผลิตเหล็กชนิดต่าง ๆ ยกเว้นกรรมวิธีการเคลือบผิว

ที่มา: ปรับปรุงมาจาก สมศักดิ์ อภิธิโสภณกุล, 2555

1.3.3 การผลิตผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปจากเหล็กแท่งแบน เป็นการนำเหล็กแท่งแบนมาผ่านกระบวนการรีดร้อนเพื่อลดขนาดที่อุณหภูมิประมาณ 1,150°C ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่ได้ ได้แก่ เหล็กแผ่นรีดร้อน (Hot-Rolled Steel Sheet) โดยเหล็กแผ่นรีดร้อนเกรดคุณภาพสำหรับผลิตเป็นเหล็กแผ่นรีดเย็นสามารถนำไปผ่านกระบวนการรีดเย็นลดขนาดที่อุณหภูมิปกติ ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่ได้ ได้แก่ เหล็กแผ่นรีดเย็น (Cold-Rolled Steel Sheet) ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดเย็นที่ได้สามารถนำไปผ่านกระบวนการเคลือบต่าง ๆ เช่น เคลือบสังกะสี เคลือบดีบุก เคลือบโครเมียม เคลือบสังกะสีผสมอะลูมิเนียมเป็นเหล็กแผ่นเคลือบชนิดต่าง ๆ (Coated Steel Sheet) ได้ นอกจากนี้ เหล็กแผ่นรีดร้อนยังสามารถนำไปตัดเป็นแผ่นและผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็นเป็นรูปร่างต่าง ๆ เป็นเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็น (Profile) หรือผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยวิธีใช้ความต้านทานไฟฟ้า (Electric Resistance Welding; ERW) เป็นท่อเหล็ก (Steel Pipe) ได้เช่นเดียวกับเหล็กแผ่นรีดเย็น ซึ่งสามารถนำมาเชื่อมด้วยวิธีใช้ความต้านทานไฟฟ้า และผ่านกระบวนการชุบสังกะสีเป็นท่อเหล็กร้อยสายไฟฟ้าได้

## 2. เหล็กกล้า

เหล็กกล้า คือ โลหะผสมเหล็กกับคาร์บอน ซึ่งอาจมีส่วนผสมของธาตุอื่นบ้างพอประมาณ เหล็กกล้ามีหลายพันธุ์ชนิดที่มีส่วนผสมทางเคมี และ/หรือ กรรมวิธีทางความร้อนต่างกัน สมบัติทางกลขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนซึ่ง ปกติมีปริมาณน้อยกว่า 1.0% โดยน้ำหนัก ปกติแบ่งเหล็กกล้าออกเป็นกลุ่มหลัก ๆ ตามปริมาณคาร์บอนได้ ดังนี้ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้าคาร์บอน



ภาพ 4 ชนิดต่าง ๆ ของโลหะกลุ่มเหล็ก

ที่มา: ปรับปรุงมาจาก วิลเลียม ดี, คาลิสเตอร์. เจ อาร์., 2548.

ปานกลาง และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง นอกจากนี้ยังแบ่งกลุ่มย่อยเหล็กตามปริมาณของธาตุผสมอื่น ออกเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา (Plain Carbon Steels) ซึ่งมีธาตุอื่นที่ไม่ใช่คาร์บอนเจือปนและมีปริมาณแมงกานีสเล็กน้อย และเหล็กกล้าผสม (Alloy Steels) ซึ่งมีส่วนผสมธาตุอื่นในปริมาณที่สูง (วิลเลียม ดี, คาลิสเตอร์. เจ อาร์., 2548)

## 2.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steels)

เหล็กกล้าส่วนใหญ่ที่มีการผลิตใช้กันมากจัดอยู่ในประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ปกติมีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.25% โดยน้ำหนัก และไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อทำให้เป็นมาร์เทนไซต์ การเพิ่มความแข็งแรงทำได้โดยการรีดเย็น โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ ทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำนี้ ค่อนข้างอ่อนและไม่ค่อยแข็งแรง แต่มีความเหนียวและความแกร่งดีมาก จึงสามารถกลึงไสได้ เชื่อมได้ และผลิตได้ในราคาค่อนข้างต่ำเทียบกับเหล็กกล้าชนิดอื่น ๆ เหล็กกล้าชนิดนี้มักนำมาใช้ทำตัวรถยนต์ เหล็ก โครงสร้าง (รูปตัวไอ เหล็กกลวง

ตาราง 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำความแข็งแรงสูง

<i>Designation</i> <sup>a</sup>		<i>Composition (wt%)</i> <sup>b</sup>		
<i>AISI/SAE or ASTM Number</i>	<i>UNS Number</i>	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Other</i>
<b><i>Plain Low-Carbon Steels</i></b>				
10100	G10100	0.45	0.10	
1010	G10200	0.20	0.45	
A36	K02600	0.29	1.00	0.20 Cu (min)
A516 Grade 70	K02700	0.31	1.00	0.25 Si
<b><i>High-Strength, Low-Alloy Steels</i></b>				
A440	K12810	0.28	1.35	0.30 Si (max), 0.20 Cu (min)
A633 Grade E	K12002	0.22	1.35	0.30Si, 0.08V, 0.02N, 0.03Nb
A656 Grade 1	K11804	0.18	1.60	0.60Si, 0.1V, 0.20Al, 0.015N

<sup>a</sup> The codes used by the American Iron and Steel Institute (AISI), the Society of Automotive Engineers (SAE), and the American Society for Testing and Materials (ASTM), and in the Uniform Numbering System (UNS) are explained in the text.

<sup>b</sup> Also a maximum of 0.04 wt% P, 0.05 wt% S, and 0.30 wt% Si (unless indicated otherwise)

ที่มา: วิลเลียม ดี, คาลิสเตอร์. เจ อาร์., 2548.

เหล็กฉาก เหล็กตัวแอล (I-beam, Channel and Angle Iron) และเหล็กแผ่นบางใช้สำหรับทำท่อ ทำตัวตึก สะพาน และกระป๋องบรรจุอาหาร ตาราง 1 และ 2 แสดงส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำแบบธรรมดาตามลำดับ เหล็กชนิดนี้มีค่าความแข็งแรงจุดครากที่ 275 MPa (40,000 psi) ค่าความต้านแรงดึงระหว่าง 415-550 MPa (60,000-80,000 psi) และมีค่าความเหนียว 25%EL

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำอีกกลุ่มหนึ่ง คือ เหล็กกล้าผสมความแข็งแรงสูง (High-Strength Low alloy; HSLA) มีธาตุอื่นผสม คือ ทองแดง วาเนเดียม นิกเกิล และโมลิบดีนัม ความเข้มข้นรวมกันไม่เกิน 10% โดยน้ำหนัก และมีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำแบบธรรมดา โดยส่วนใหญ่สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ กรรมวิธีทางความร้อนทำให้มีความแข็งแรงมากกว่า 480 MPa (70,000 psi) นอกจากนี้ยังมีความเหนียวสูง สามารถขึ้นรูปและกลึงได้ ในตาราง 1 และ 2 แสดงเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูงบางชนิด สำหรับการใช้งานในบรรยากาศปกติ เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูงนี้มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำแบบธรรมดา จึงใช้งานได้หลายรูปแบบรวมทั้งงานที่ต้องการความแข็งแรงเป็นพิเศษ เช่น สะพาน หอสูง เสาเสริมตึกสูง และภาชนะทนความดัน

## 1.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steels)

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางมีส่วนผสมคาร์บอนระหว่างประมาณ 0.25 และ 0.60% โดยน้ำหนัก เหล็กกลุ่มนี้อาจผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ดังนี้ การทำให้เป็นออสเตนไนต์ (Austenitizing) การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) และการอบคืนตัว (Tempering) เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกล เหล็กชนิดนี้ส่วนมากจะต้องอบคืนตัวก่อนนำมาใช้งาน จึงมีโครงสร้างจุลภาคเป็นมาร์เทนไซต์ต่อคืนตัวแล้ว เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางมีความสามารถในการชุบแข็งต่ำ การชุบแข็งนั้น จะทำได้ก็ต่อเมื่อชิ้นส่วนต้องมีขนาดบางมากเท่านั้นเพื่อให้ได้อัตราการเย็นตัวสูงมาก นอกจากนี้การผสมโครเมียม นิกเกิล และโมลิบดีนัมช่วยเพิ่มความสามารถในการอบชุบได้ จึงมีคุณสมบัติผสมผสานระหว่างความแข็งแรงกับความเหนียวหลายแบบ เหล็กกลุ่มนี้ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแล้วมีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่ความเหนียวและความแกร่งลดลงจึงนำมาใช้ทำล้อและรางรถไฟ เกียร์ เฟลาส่งกำลังเครื่องยนต์ และส่วนอื่นของเครื่องจักรกล รวมทั้งใช้งานในส่วนโครงสร้างความแข็งแรงสูงที่ต้องการความแข็งแรง ความต้านทาน การสึกกร่อนและความแกร่งประกอบกัน

ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกลุ่มนี้บางชนิดแสดงในตาราง 2 รวมทั้งข้อแนะนำเพิ่มเติมซึ่งอธิบายไว้ใน ส่วนท้ายตาราง สมาคมวิศวกรรมยานยนต์ (The Society of Automotive Engineers; SAE) สมาคมเหล็ก และเหล็กกล้าแห่งอเมริกา (The American Iron and Steel Institute; AISI) และสมาคมทดสอบและวัสดุ แห่งอเมริกา (The American Society for

Testing and Materials; ASTM) เป็นผู้แบ่งชนิดและกำหนดคุณสมบัติเหล็กพร้อมทั้งโลหะผสมอื่น ๆ AISI และ SAE กำหนดชนิดด้วยตัวเลขสี่หลัก สองหลักแรกบอกส่วนผสมโลหะ สองหลักหลังบอกปริมาณคาร์บอน สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาเลขสองหลักแรก คือ 1 และ 0 สำหรับเหล็กกล้าผสมนั้นเลขสองหลักแรกจะเป็นเลขอื่น เช่น 13, 41, 43 ส่วนเลขหลักที่สามและสี่ คือ ปริมาณคาร์บอนในหน่วย % โดยน้ำหนักคูณด้วยร้อย ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้า 1060 คือ เหล็กกล้า คาร์บอนธรรมดาที่มีปริมาณคาร์บอน 0.60% ต่อค่าน้ำหนัก

ตาราง 2 ส่วนผสมทางเคมีสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางชนิดต่าง ๆ

AISI/SAE Designation <sup>a</sup>	UNS Designation	Composition Ranges (wt% of Alloying Elements in Addition to C) <sup>b</sup>			
		Ni	Cr	Mo	Other
10xx, Plain carbon	G10xx0				
11xx, Free machining	G11xx0				0.08-0.33S
12xx, Free machining	G12xx0				0.10-0.35S, 0.04-0.12P
13xx	G13xx0				1.60-1.90Mn
40xx	G40xx0			0.20-0.30	
41xx	G41xx0		0.80-1.10	0.15-0.25	
43xx	G43xx0	1.65-2.00	0.40-0.90	0.20-0.30	
46xx	G46xx0	0.70-2.00		0.15-0.30	
48xx	G48xx0	3.25-3.75		0.20-0.30	
51xx	G51xx0		0.70-1.10		
61xx	G61xx0		0.50-1.10		0.10-0.15V
86xx	G86xx0	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25	
92xx	G92xx0				1.80-2.20Si

<sup>a</sup> The carbon concentration, in weight percent times 100, is inserted in the place of "xx" for each specific.

<sup>b</sup> Except for 13xx alloys, manganese concentration is less than 1.00 wt%.

Except for 12xx alloys, phosphorus concentration is less than 0.35 wt%.

Except for 11xx and 12xx alloys, sulfur concentration is less than 0.04 wt%.

Except for 92xx alloys, silicon concentration varies between 0.15 and 0.35 wt%

ที่มา: วิลเลียม ดี, คาลิสเตอร์. เจ อาร์., 2548.

ระบบกำหนดชนิดโลหะแบบ UNS (Unified Numbering System) ใช้บอกชนิดทั้งโลหะผสมกลุ่มเหล็กและ โลหะผสมนอกกลุ่มเหล็ก ตัวเลข UNS ประกอบด้วยตัวอักษรตามด้วยตัวเลข 5 หลัก ตัวอักษรบอกว่าโลหะนั้นจัดอยู่กลุ่มไหน ระบบ UNS ของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางขึ้นต้นด้วยตัวอักษร G ระบบ AISI/SAE เลขหลักที่ห้าคือศูนย์ ตาราง 3 แสดงคุณลักษณะทางกลและการใช้งานเหล็กกล้าเหล่านี้หลายชนิดที่ผ่านการชุบแข็งและอบคืนตัว

ตาราง 3 ส่วนผสมทางเคมีและการใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือ

AISI Number	UNS Number	Composition (wt%) <sup>a</sup>						Typical Applications
		C	Cr	Ni	Mo	W	Y	
M1	T11301	0.85	3.75	0.30max	8.70	1.75	1.20	Drills, saws; lathe and planer tools
A2	T30102	1.00	5.15	0.30max	1.15	-	0.35	Punches, embossing dies
D2	T30402	1.50	12	0.30max	0.95	-	1.10max	Cutlery, drawing dies
	T31501	0.95	0.50	0.30max	-	0.50	0.30max	Shear blades, cutting tools
S1	T41901	0.50	1.40	0.30max	0.50max	2.25	0.25	Pipe cutters, concrete drills
W1	T72301	1.10	0.15max	0.20max	0.10max	0.15max	0.10max	Blacksmith tools, Woodworking tools

<sup>a</sup> The balance of the composition is iron. Manganese concentrations range between 0.10 and 1.4 wt%, depending on alloy; silicon concentrations between 0.20 and 1.2 wt% depending on alloy.

ที่มา: วิลเลียม ดี, คาลิสเตอร์. เจ อาร์., 2548.

### 1.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steels)

เหล็กกล้าคาร์บอนสูง โดยปกติมีปริมาณคาร์บอนระหว่าง 0.60 และ 1.4 % โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งสูงสุด ความแข็งแรงสูงสุด และค่าความเหนียวต่ำสุดในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกัน และมักใช้งานหลังจากผ่านการชุบแข็งและอบคืนตัว โดยเฉพาะการใช้งานในสภาวะที่ต้องการความต้านทานการสึกกร่อนและต้องการ ความคมเพื่อการตัดเฉือน เหล็กกล้าใช้ทำเครื่องมือและแม่พิมพ์ เป็นเหล็กกล้าผสมคาร์บอนสูงซึ่งปกติมี ส่วนผสม คือ โครเมียม วาเนเดียม ทังสเตน และ

โมลิบดีนัม ธาตุผสมเหล่านี้จะรวมตัวกับคาร์บอนกลายเป็น สารประกอบคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูงมาก และทนการสึกกร่อน เช่น โครเมียมคาร์ไบด์ (Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>), วาเนเดียมคาร์ไบด์ (V, C<sub>3</sub>) และทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) ในตาราง 3 แสดงส่วนผสมทางเคมีและการใช้งานของ เหล็กกล้าเครื่องมือบางชนิด เหล็กเหล่านี้ใช้ทำเครื่องมือตัดและแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปวัสดุ รวมทั้งใช้ทำมิด มิตโกน ใบเลื่อย สปริง และลวด เหล็กความแข็งแรงสูง

#### 1.4 เหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิมมีความทนทานการกัดกร่อน (หรือการเกิดสนิม) ในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ สูง โดยเฉพาะใน สภาพบรรยากาศ ธาตุผสมหลักที่ทำให้เหล็กทนการกัดกร่อน คือ โครเมียม โดยจะต้องมีโครเมียมอย่างน้อย 11% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ธาตุผสมอื่น เช่น นิกเกิลและโมลิบดีนัมอาจเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนได้ เหล็กกล้าไร้สนิมแบ่งตามโครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่ ในเนื้อเหล็กได้ 3 กลุ่ม คือ มาร์เทนซิติค เฟอร์ริค และออสเตนนิติก ตาราง 4 แสดงเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดต่าง ๆ พร้อมทั้งส่วนผสมทางเคมี สมบัติทางกล และการใช้งาน เหล็กกล้าไร้สนิมถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติทางกลหลากหลายและมีความต้านทานการกัดกร่อนดีเยี่ยม

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติคสามารถอบชุบได้ ทำให้เนื้อเหล็กส่วนใหญ่มีโครงสร้างจุลภาคเป็นมาร์เทนไซด์ เนื่องจากเหล็กชนิดนี้มีธาตุผสมในปริมาณมาก ทำให้แผนภูมิเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์เปลี่ยนแปลง สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติกบริเวณที่เป็นเฟสออสเตนไนต์ ( $\gamma$ ) ในแผนภูมิจะขยายจนถึงอุณหภูมิห้อง ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริคมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟส  $\alpha$  หรือ เฟอร์ไรต์ (BCC) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติกและเฟอร์ริคจะเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงด้วยการขึ้นรูปเย็น เพราะไม่สามารถทำกรรมวิธีทางความร้อนได้ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติกมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงเพราะมีโครเมียมผสมอยู่มากและมีส่วนผสมนิกเกิลสูง นอกจากนี้ยังมีปริมาณการผลิตมากที่สุดในกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิม แม่เหล็กสามารถดูดทั้งเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติคและเฟอร์ริคได้ แต่แม่เหล็กไม่สามารถดูดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติกได้

เหล็กกล้าไร้สนิมบางชนิดมักถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูงและในสภาวะแวดล้อมที่ก่อให้เกิดความเสียหายได้ง่าย เพราะสามารถทนการเกิดออกซิเดชันและรักษาสมบัติทางกลที่อุณหภูมิสูงได้ อุณหภูมิสูงสุดที่ทนได้ประมาณ 1000°C (1800°F) จึงนำมาใช้ผลิตเครื่องก๊าซเทอร์โบ เครื่องต้มไอน้ำอุณหภูมิสูง เต้าเผาอบชุบ ยานบิน จรวด และอุปกรณ์ไฟฟ้านิวเคลียร์ ในตาราง 4 มีตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมความแข็งแรงสูงชนิดหนึ่ง (17-7PH) ซึ่งปกติมีความแข็งแรงสูงและทนการกัดกร่อน เพิ่มความแข็งแรงโดยการชุบแข็งแบบตกตะกอน



ตาราง 4 คุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดต่าง ๆ

AISI Number	UNS Number	Composition (wt%) <sup>a</sup>	Condition <sup>b</sup>	Mechanical Properties			Typical Applications
				Tensile Strength [MPa (ksi)]	Yield Strength [MPa (ksi)]	Ductility [%EL in 50 mm (2 in.)]	
<b>Ferritic</b>							
409	S40900	0.08C, 11.0Cr, 1.0Mn, 0.50 Ni, 0.75Ti	Annealed	380 (55)	205 (30)	20	Automotive exhaust components, tanks for agricultural sprays
446	S44600	0.20C, 25Cr, 1.5 Mn	Annealed	515 (75)	275 (40)	20	Valves (high temperature), glass molds, combustion chambers
<b>Austenitic</b>							
304	S30400	0.08C, 19Cr,	Annealed	515 (75)	205 (30)	40	Chemical and food processing equipment, cryogenic vessels
316L	S31603	0.03C, 17Cr, 12Ni, 2.5Mo, 2.0Mn	Annealed	485 (70)	170 (25)	40	Welding construction
<b>Martensitic</b>							
410	S41000	0.15C, 12.5 Cr, 1.0Mn	Annealed Q & T	485 (70) 825 (120)	275 (40) 620 (90)	20 12	Rifle barrels, cutlery, jet engine parts
440A	S44002	0.70C, 17Cr, 0.75Mo, 1.0Mn	Annealed Q & T	725 (105) 1790(260)	415 (60) 1650(240)	20 5	Cutlery, bearings, surgical tools
<b>Precipitation Hardenable</b>							
17-7PH	S17700	0.09C, 17Cr, 7Ni, 1.0Al, , 1.0 Mn	Precipitation hardened	1450(210)	1310(190)	1-6	Springs, knives, pressure vessels

<sup>a</sup> The balance of the composition is iron.

<sup>b</sup> Q & T denotes quenched and tempered

ที่มา: วิลเลียม ดี, คาลิสเตอร์. เจ อาร์., 2548.

## งานท่อเหล็กกล้า

ท่อเหล็กกล้าที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน แบ่งตามกรรมวิธีการผลิตได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ คือ ท่อเชื่อมตะเข็บ (Welded Pipe) และท่อไร้ตะเข็บ (Seamless Pipe)

### 1. กรรมวิธีผลิตท่อเหล็กกล้า (Steel Pipes Manufacturing Process)

**1.1 ท่อเชื่อมตะเข็บ (Welded Pipe หรือ Seam Pipe)** ผลิตโดยการนำแผ่นเหล็ก ม้วน-เชื่อม ซึ่งวิธีการม้วนทำได้ทั้งม้วนตามแนวยาวและม้วนแบบก้นหอย สามารถแบ่งประเภทตามวิธีการเชื่อมตะเข็บ ดังนี้ (ประสิทธิ์ เวียงแก้ว, 2550)

Electric Resistance Welding (ERW) เป็นวิธีการเชื่อมโดยอาศัยแรงอัด (Pressing) ในขณะที่ตะเข็บหลอมละลายด้วยความร้อนที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า โดยไม่มีการอาร์ค (Arc) กรรมวิธีผลิตเริ่มต้นด้วยการคลี่เหล็กแผ่นออกจากคอยล์ จากนั้นจะค่อยๆ ม้วนเหล็กแผ่นให้เป็นรูปทรงกระบอกอย่างต่อเนื่อง ผ่านลูกรีดหลายแท่นโดยไม่ใช้ความร้อน (Cold Forming) จากนั้นผ่านกระแสไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างขอบทั้งสองของตะเข็บ ความต้านทานต่อกระแสไฟฟ้าจะทำให้ขอบของเหล็กร้อนแดงที่อุณหภูมิระหว่าง  $1200^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1400^{\circ}\text{C}$  ( $2200^{\circ}\text{F}$  ถึง  $2500^{\circ}\text{F}$ ) และกดอัดให้ตะเข็บติดกัน ท่อที่ผลิตด้วยวิธีนี้จะมีตะเข็บตรง (Longitudinal Welded Seam)

Butt Weld (BW) หรือ Continuous Butt Welding (CBW) บางครั้งเรียกว่า Furnace Butt Welding (FBW) หรือ Hot Pressure Welding เป็นวิธีการเชื่อมโดยอาศัยแรงอัด (Pressing) ในขณะที่ตะเข็บร้อนแดงด้วยความร้อนจากเตาเผา กรรมวิธีผลิตเริ่มต้นด้วยการคลี่เหล็กแผ่นออกจากคอยล์ จากนั้นป้อนแผ่นเหล็กผ่านเตาเพื่อให้ความร้อน โดยแผ่นเหล็กจะได้รับความร้อนทั่วทั้งแผ่น แต่ด้วยเทคนิคการจัดเรียงหัวเผาในเตาจัดให้บริเวณขอบแผ่นเหล็กร้อนที่สุด จากนั้นค่อยๆ ม้วนเหล็กแผ่นให้เป็นรูปทรงกระบอกอย่างต่อเนื่องโดยผ่านลูกรีดหลายแท่น (Hot Forming) แล้วกดอัดให้ตะเข็บติดกัน ท่อที่ผลิตด้วยวิธีนี้จะมีตะเข็บตรง (Longitudinal Welded Seam)

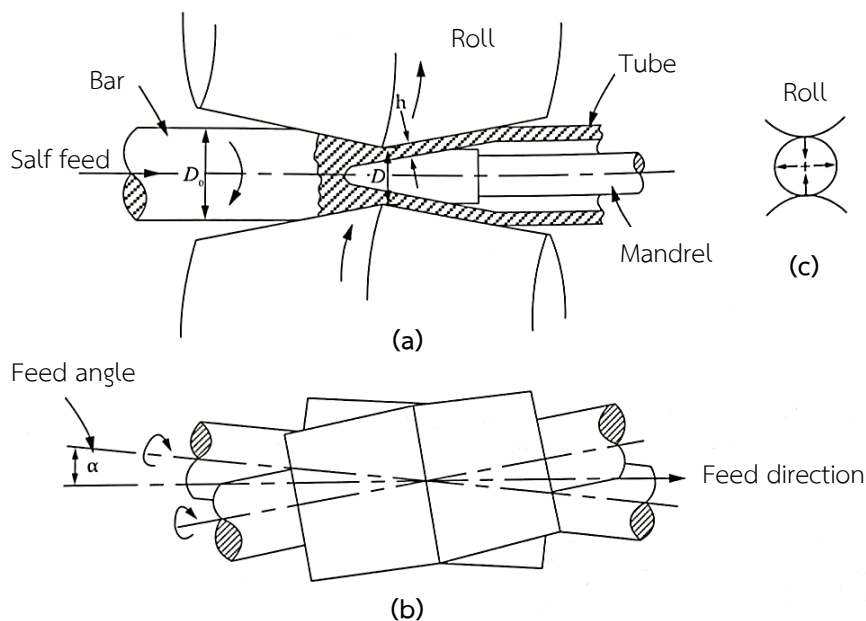
Electric Fusion Welded (EFW) เป็นกระบวนการเชื่อมที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการอาร์คบริเวณแนวเชื่อมให้หลอมละลายติดกัน โดยอาจใช้ลวดเชื่อม (Filler Metal) หรือไม่ใช้ กระบวนการเชื่อม Fusion Welded นี้มีด้วยกันหลายวิธี เช่น Submerge Arc Welding (SAW), Double Submerge Arc Welding (DSAW ซึ่งเหมือน SAW แต่เป็นการเชื่อมตะเข็บทั้งด้านนอกและด้านใน), Gas Tungsten Arc Welding (GTAW หรือ TIG) และ Gas Metal Arc Welding (GMAW หรือ MIG) เป็นต้น การผลิตท่อด้วยกระบวนการเชื่อม Fusion Welded มีทั้งแบบตะเข็บตรง (longitudinal Welded Seam) และตะเข็บแบบก้นหอย (Spiral Welded Seam) ดังนี้

- ท่อเชื่อมตะเข็บตรง ขึ้นรูปต่อเนื่อง ขั้นตอนการขึ้นรูปคล้ายกับวิธี ERW

- ท่อเชื่อมตะเข็บตรง ขึ้นรูปแบบ U-O ใช้วิธีการกดแผ่นเหล็กแต่ละชิ้น ให้เป็นรูปตัว "U" จากนั้นจึงกดต่อให้เป็นรูปตัว "O" แล้วจึงทำการเชื่อม ท่อที่ผลิตด้วยวิธี U-O นี้เรียกว่า UO Pipe หรือ UOE

- ท่อเชื่อมตะเข็บแบบก้นหอย ขึ้นรูปอย่างต่อเนื่องด้วยการคลี่แผ่นเหล็กออกจากคอยล์ แล้วม้วนเป็น Spiral แนวเชื่อมจะมีลักษณะวนคล้ายขดสปริง ซึ่งบางทีก็เรียกว่า Helical ท่อที่ผลิตด้วยวิธีนี้เรียกว่า Spiral Pipe

**1.2 ท่อไร้ตะเข็บ (Seamless Pipe)** ผลิตจากแท่งเหล็ก (Steel Billet) ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้แท่งเหล็กหน้าตัดกลม วิธีการผลิตเริ่มจากการให้ความร้อนแท่งเหล็กที่อุณหภูมิประมาณ  $1230^{\circ}\text{C}$  ( $2250^{\circ}\text{F}$ ) จากนั้นแท่งเหล็กที่ร้อนแดงจะถูกหมุนและดึงด้วยลูกรีดผ่านแท่งทะลวง (Piercing Rod หรือ Mandrel) ลูกรีดจะดึงให้เนื้อโลหะไหลผ่านแท่งทะลวงทำให้เกิดเปลือกท่อกว้าง (hollow pipe shell) ขึ้น หลังจากนั้นจะให้ความร้อนอีกครั้งแล้วจึงรีดท่อโดยมี Support Bar อยู่ด้านใน เพื่อปรับให้ได้ขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลางและความหนาของผนังที่ต้องการ



ภาพ 5 กระบวนการเจาะแบบหมุน

ที่มา: Youssef H. A., 2012

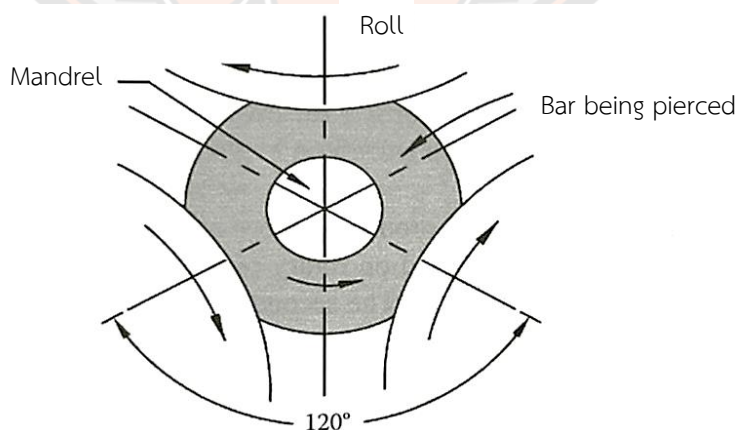
อย่างไรก็ตามในขั้นตอนสุดท้ายของการผลิตท่อเหล็กกล้า จะต้องมีการรีดท่อเพื่อปรับ แต่งขนาดและความหนาของท่อให้ตรงตามมาตรฐานหรือความต้องการของลูกค้า ซึ่งการรีดขั้นสุดท้ายมีทั้งรีดร้อนและรีดเย็น รีดทั้งท่อเชื่อมตะเข็บและท่อไร้ตะเข็บ ซึ่งก็จะมีชื่อเรียกตามวิธีการและ

ชนิดของท่อ เช่น Hot Finish Seamless (HFS), Cold Drawn Seamless (CDS), Cold Drawn Welded (CDW) เป็นต้น

### 1.2.1 การรีดท่อ (Tube Rolling)

1.2.1.1 การเจาะแบบหมุน (Rotary Piercing) ในขั้นตอนนี้ แ่งให้ความร้อนจะหมุนระหว่างม้วนรูปทรงกระบอกเรียวยาวเล็กน้อยสองม้วน ดังแสดงในภาพ 5 (a) แ่งหมุนของม้วนจะเอียงเป็นมุมเล็ก ๆ ( $\alpha$ ) ที่ด้านใดด้านหนึ่งของแ่งหมุน (b) เพื่อยืนยันการป้อนตามธรรมชาติของแ่งระหว่างม้วน ม้วนทั้งสองหมุนไปในทิศทางเดียวกัน การหมุนของลูกกลิ้งบนแถบทำให้เกิดความเค้นดึงด้านข้างที่จุดกึ่งกลาง ดังที่แสดงในภาพ 5 (c) ซึ่งนำไปสู่การก่อตัวของโพรง แมนเดรลช่วยรับประกันการก่อตัวของแ่งของรูเจาะ และควบคุมพื้นผิวภายในของมัน (Youssef H. A., 2012)

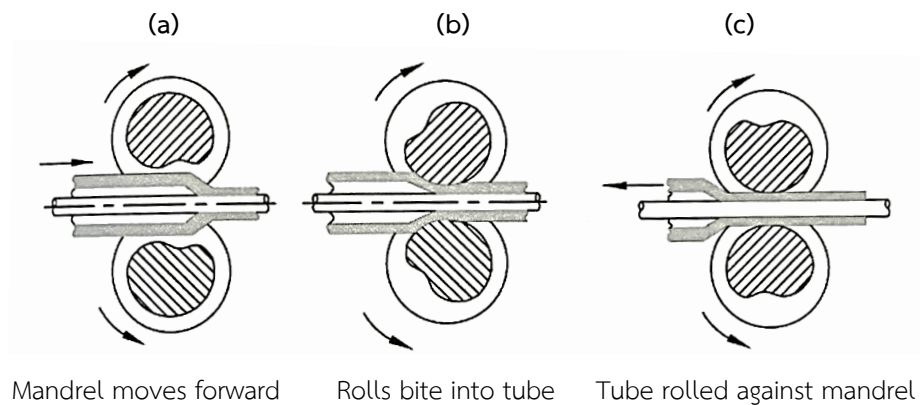
1.2.1.2 การเจาะแบบหมุนสามลูกกลิ้ง (Three-Roll Rotary Piercing) หรือเรียกว่า Mannesmann กระบวนการนี้อาจเกิดรอยแตกภายในอาจเกิดขึ้นในลักษณะที่ผิดปกติซึ่งอาจนำไปสู่การฉีกขาดออกจากกัน เครื่องเจาะแบบหมุนสามลูกกลิ้งจะให้แรงเค้นอัดด้านข้างที่สม่ำเสมอที่บาร์ตรงกลางด้านหน้าของแมนเดรล ซึ่งลดหรือขจัดข้อบกพร่องที่อยู่ภายใน อย่างไรก็ตาม แรงดันที่กระทำโดยแมนเดรลนั้นถูกถ่ายจากภายนอกเพื่อสร้างรู ลูกกลิ้งสามลูกกลิ้งวางแนวที่  $120^\circ$  รอบจุดศูนย์กลาง ดังแสดงในภาพ 6 และแ่งของลูกกลิ้งเหล่านั้นเอียงไปทางเส้นแนวนอนด้วยมุมเอียงน้อยกว่า  $15^\circ$  กระบวนการนี้ทำให้สามารถผลิตท่อไร้รอยต่อได้โดยตรงจากเหล็กแท่งยาวที่หล่ออย่างต่อเนื่อง เครื่องเจาะแบบหมุนสามลูกกลิ้งสามารถจับเหล็กแท่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด 200 มิลลิเมตร และยาว 3.8 เมตร



ภาพ 6 รูปแบบการเจาะแบบหมุนสามลูกกลิ้ง

ที่มา: Youssef H. A., 2012

1.2.1.3 กระบวนการ Pilger (The Pilger Process) เป็นลักษณะกระบวนการรีดแบบพิเศษ เพื่อลดขนาดของท่อที่ผลิตขึ้นโดยการเจาะแบบหมุน ขั้นตอน Pilger จะเป็นลูกรีดแนวตั้งสองลูกที่มีร่องรูปครึ่งวงกลมที่เรียวยาวจากเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ไปจนถึงขนาดเล็ก และคงที่ตลอดแนวเส้นรอบวงที่เหลือ ท่อที่จะปรับขนาดเชื่อมต่อกับแกนหมุนซึ่งยื่นเข้าไปในช่องม้วน และตัวแกนเองเชื่อมต่อกับลูกสูบของกระบอกสูบนิวเมติกผ่านกลไกที่หมุนท่อก  $90^\circ$  ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการ นอกเหนือจากการเคลื่อนย้าย ไปข้างหน้าและข้างหลัง ตามภาพ 7



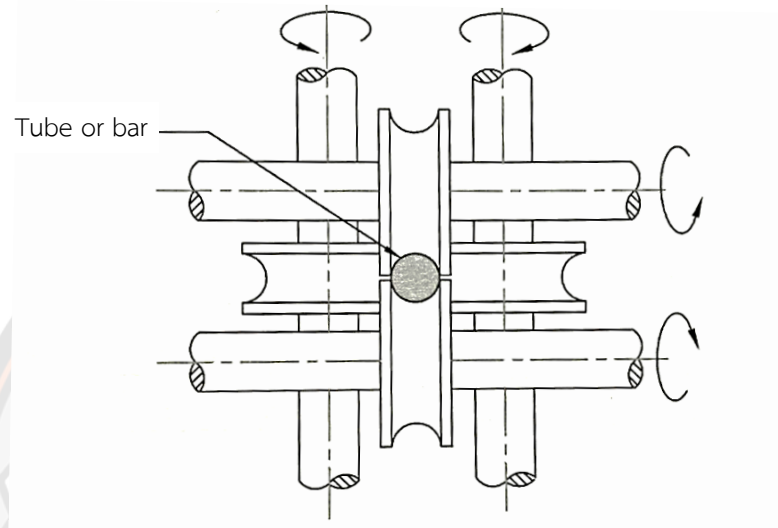
ภาพ 7 หลักการและกระบวนการ Pilger

ที่มา: Youssef H. A., 2012

เมื่อลูกกลิ้งหมุนไปที่ตำแหน่งเปิด ตามภาพ 7 (a) ลูกสูบจะถูกผลักไปข้างหน้าเพื่อให้ท่อและแกนหมุนถูกผลักเข้าไปในช่องม้วน การหมุนลูกกลิ้งอย่างต่อเนื่องเนื่องทำให้ส่วนที่แคบที่สุดสัมผัสกับท่อเพื่อให้กินเนื้อเข้าไปแยกเป็นปลอกโลหะเล็กๆ ตามที่แสดงในภาพ 7 (b) และทำให้รูปร่างบิดเบี้ยวบนแมนเดรล ชุดประกอบแมนเดรลทั้งหมดถูกบังคับถอยหลังเพื่อต้านแรงดันนิวแมติกส์ ตามภาพ 7 (c) และรีดส่วนนั้นของท่อออกไปจนถึงเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกที่เล็กกว่า ในที่สุดลูกรีดก็ถึงตำแหน่งเปิดและเริ่มรอบใหม่ เมื่อท่อที่บิดเบี้ยวยาวขึ้นทำให้เคลื่อนออกจากปลายแกนไปยังตำแหน่งของลูกกลิ้งสุดท้าย ขอบเล็ก ๆ ยังคงอยู่ที่ส่วนท้ายของท่อซึ่งถูกตัดออก และท่อจะผ่านผ่านลูกกลิ้งรีดขนาดหลายครั้ง ตามภาพ 8 โดยหมุนผ่าน  $90^\circ$  ระหว่างรอบ เป็นการทำให้เกิดความสม่ำเสมอของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ

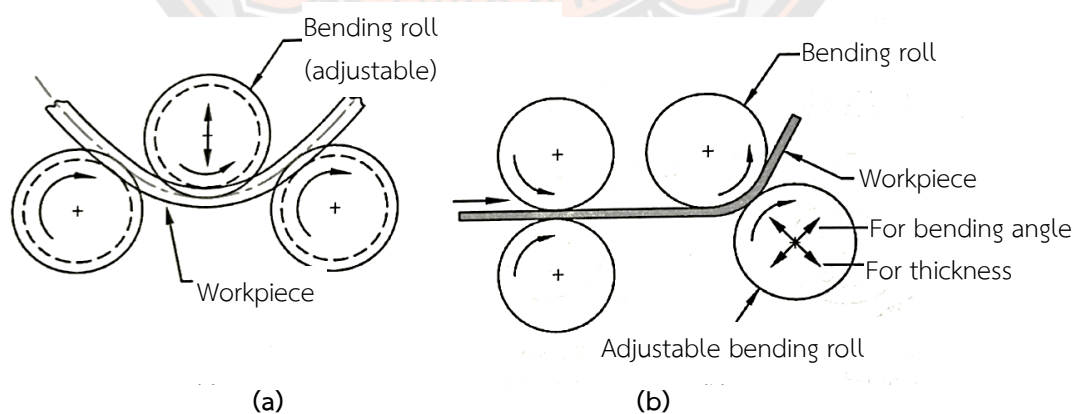
1.2.1.4 การรีดท่อตะเข็บ (Rolling of Seamed Tubes) ตามที่ระบุไว้ก่อนหน้านี้ ท่อที่มีรอยต่อหรือท่อเชื่อมตะเข็บถูกผลิตขึ้นโดยการตัดแผ่นหรือแผ่นในเครื่องตัดแบบสามลูกกลิ้งหรือในชุดของแท่นตัดแบบม้วนแล้วเชื่อมตามแนวสัมผัส สำหรับเครื่องตัดแบบสามลูกกลิ้ง ตามภาพ 9 (a) แกนของลูกกลิ้งล่างสองลูกจะถูกยึดในระนาบแนวนอน ในขณะที่ลูกกลิ้ง

บนสุดสามารถปรับได้ในแนวตั้งเพื่อควบคุมเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ผลิต ลูกกลิ้งสามลูกถูกขับเคลื่อนด้วยแรง การจัดเรียงลูกกลิ้งสำหรับการตัดแบบสี่ลูกกลิ้ง ดังแสดงตามภาพ 9 (b) แผ่นชิ้นงานถูกขับเคลื่อนระหว่างลูกกลิ้งขับเคลื่อนสองตัวทางด้านซ้าย และลูกกลิ้งด้านล่างจะถูกปรับในสองทิศทางตามความหนาและมุมตัด



ภาพ 8 ลูกรีดเก็บขนาด

ที่มา: Youssef H. A., 2012

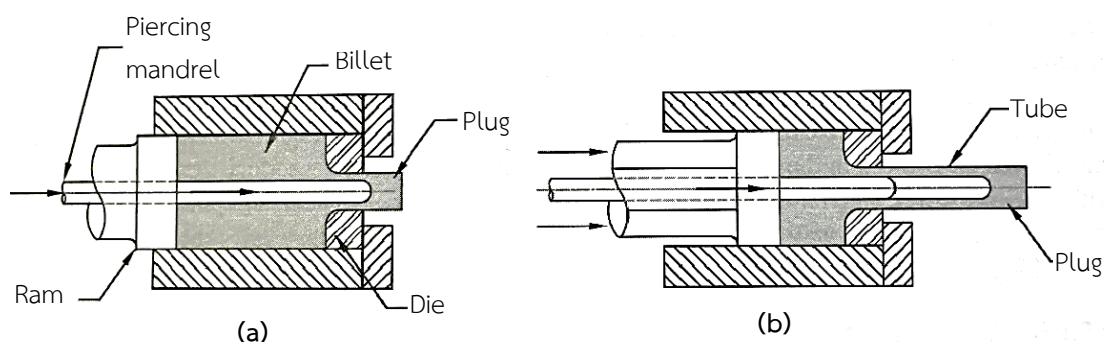


ภาพ 9 เครื่องตัดแบบสามลูกกลิ้งและแบบสี่ลูกกลิ้ง

ที่มา: Youssef H. A., 2012

### 1.2.2 การอัดรีดท่อ (Tube Extrusion)

ท่อที่มีความยาวสามารถผลิตได้โดยการอัดรีดโดยการตีแมนเดรลที่ส่วนปลายเพื่อให้ผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์ ความหนาของผนังท่อถูกควบคุมโดยระยะห่างระหว่างตายและเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกลาง ดังแสดงในภาพ 10 เหล็กแท่งที่ใช้สำหรับการอัดรีดท่ออาจเป็นแบบกลวง (a) เพื่อให้ผ่านแมนเดรลได้ หรืออาจเป็นแท่งเหล็ก (Solid Billet) สามารถเจาะโดยแมนเดรลก่อนที่จะเริ่มการอัดรีดท่อ (b) แรงกดของแมนเดรลเพื่อเจาะเหล็กแท่งที่ร้อนนั้นมาจากระบบไฮดรอลิกที่แยกอิสระต่อกันในเครื่องอัด (Double-Action Hydraulic Press)



ภาพ 10 การอัดรีดท่อโดยใช้เครื่องอัดแบบดับเบิลแอ็กชัน

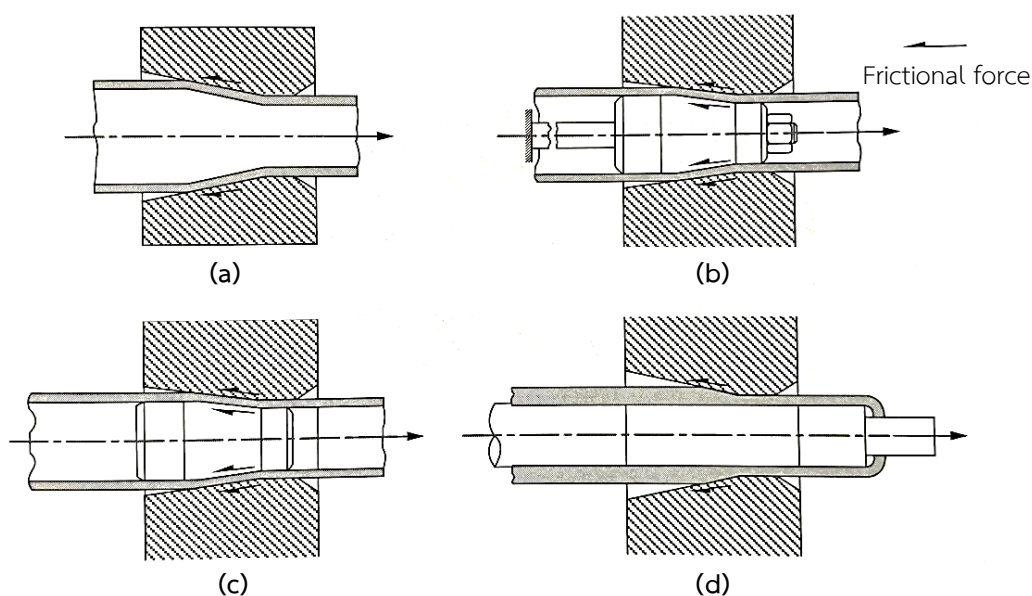
ที่มา: Youssef H. A., 2012

### 1.2.3 การลากขึ้นรูปท่อ (Tube Drawing)

ท่อที่ผลิตโดยการอัดรีด (Extrusion) หรือ Roll-piercing มักจะจบกระบวนการด้วยการให้ความเย็นโดยการลากขึ้นรูป (Drawing) เพื่อให้ได้ขนาดและค่าพิกัดความเผื่อที่ดี ผิวสำเร็จที่ดีขึ้น และมีความแข็งแรงที่สูงขึ้น หรือเพื่อผลิตท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า ความหนาของท่อที่บางนั้นสามารถทำได้โดยกระบวนการขึ้นรูปอื่น ๆ การลากขึ้นรูปท่อแบบเย็นสามารถผลิตท่อที่มีรูปทรงอื่น ๆ ได้ เครื่องจักรส่วนใหญ่ที่ใช้สำหรับการลากขึ้นรูปท่อเป็นแบบตั้งโต๊ะ อย่างไรก็ตาม ท่อสามารถลากขึ้นรูปท่อเป็นแบบม้วนได้เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเล็กและวัสดุมีความเหนียว เช่น ท่อทองแดงหรืออลูมิเนียม ลักษณะการลากขึ้นรูปท่อประกอบด้วย 4 แบบ ได้แก่ (a) การลดท่อ (Tube Sinking), (b) การลากขึ้นรูปท่อด้วยแมนเดรลแบบตายตัว (Tube Drawing with a Fixed Mandrel), (c) การลากขึ้นรูปท่อด้วยแมนเดรลแบบลอยตัว (Tube Drawing with a Floating Mandrel) และ (d) การลากขึ้นรูปท่อด้วยแมนเดรลแบบเคลื่อนที่ (Tube Drawing with a Moving Mandrel) ดังแสดงในภาพ 11

1.2.3.1 การลดท่อ (Tube Sinking) เป็นกระบวนการของการลากขึ้นรูปท่อโดยไม่มีแมนเดรล ใช้สำหรับท่อที่มีอัตราส่วนความหนาต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูงกว่า หรือเมื่อ

วัตถุประสงค์หลักของกระบวนการ คือ การควบคุมเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกโดยไม่คำนึงถึงความหนาของผนัง ชั้นแรกให้ปลายท่อผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์แล้วจับยึดด้วยขากรรไกรของหัวดึง การลดของท่อทำให้ความยาวท่อและความหนาของผนังเพิ่มขึ้น เพอร์เซ็นต์ของความหนาที่เพิ่มขึ้นและการยึดตัวของท่อขึ้นอยู่กับความเค้นในการไหลของชิ้นส่วนที่ดึง รูปทรงของแม่พิมพ์ และแรงเสียดทานของส่วนต่อประสาน กระบวนการนี้ไม่จำกัดขนาดของท่อที่สามารถผลิตได้ และสามารถลดลงได้ถึง 35%



ภาพ 11 เทคนิคการลากขึ้นรูปท่อ

ที่มา: Youssef H. A., 2012

1.2.3.2 การลากขึ้นรูปท่อด้วยแมนเดรลแบบตายตัว (Tube Drawing with a Fixed Mandrel) โดยที่แมนเดรลสั้นหรือปลั๊กถูกยึดไว้ในตำแหน่งในปากของดาย โดยใช้แท่ง Tie จับยึดที่ส่วนท้ายของแท่งดึง กระบวนการนี้ไม่สามารถผลิตท่อยาวหรือท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในน้อยกว่า 6 มิลลิเมตรได้ ส่วนมากใช้ในการลากขึ้นรูปท่อตรงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ถึงปานกลางโดยมีความยาวจำกัด ท่อที่ได้จะมีลักษณะเฉพาะโดยควบคุมค่าขนาดพิกัดความเผื่อของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและความหนาของผนังท่อที่มีความสม่ำเสมอ สำหรับแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผนังท่อ ดาย และแมนเดรลที่มีค่ามาก สามารถแก้ไขได้โดยกำหนดมุมดายที่ใหญ่ขึ้น และ/หรือ การหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพ

1.2.3.3 การลากขึ้นรูปท่อด้วยแมนเดรลแบบลอยตัว (Tube Drawing with a Floating Mandrel) รูปร่างของแมนเดรลหรือปลั๊กสำหรับวิธีนี้ได้รับการออกแบบ



มาเพื่อให้ปรับตัวเองให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องในระหว่างการลากขึ้นรูป ตามภาพ 11 (c) แทบไม่มีการจำกัดความยาวของท่อที่สามารถลากขึ้นรูปได้ ดังนั้น วิธีการนี้จึงเหมาะสำหรับการลากขึ้นรูปท่อม้วนด้วยความเร็วสูงถึง 10 เมตร/วินาที

1.2.3.4 การลากขึ้นรูปท่อด้วยแมนเดรลแบบเคลื่อนที่ (Tube Drawing with a Moving Mandrel) โดยที่แมนเดรลทำจากแท่งเหล็กอัลลอยด์ที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนตลอดทั้งแท่งและจุดศูนย์กลางของรูเจาะจนถึงปลายของท่อ แกนเคลื่อนที่ผ่านแม่พิมพ์พร้อมกับท่อที่ดึงออกมา ตามภาพ 11 (d) การเคลื่อนที่ของแกนหมุนด้วยความเร็วในการดึงที่สม่ำเสมอของท่อช่วยป้องกันการเสียดสีกับผนังท่อภายใน ข้อเสียของวิธีนี้คือต้องดึงท่อออกจากแมนเดรล ซึ่งอาจต้องใช้กระบวนการม้วนอีกครั้ง ท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กที่ใช้ในการผลิตเข็มฉีดยากลากขึ้นรูปด้วยวิธีนี้

## 2. ความหมายของ Tube และ Pipe

Tube หมายถึง ผลิตภัณฑ์ทรงกลวงที่มีความยาวต่อเนื่อง มีหน้าตัดเป็นรูปทรงต่างๆ เช่น กลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้า เป็นต้น เมื่อพิจารณาความหมายโดยรวมนี้ ก็สรุปความได้ว่า Pipe คือ ประเภทหนึ่งของ Tube เมื่อกล่าวถึง Tube และ Pipe ในเชิงพาณิชย์ของ “ผลิตภัณฑ์ท่อ” มักเกิดความ สับสนขึ้นเนื่องจากแต่ละมาตรฐานหรือแต่ละประเทศเรียกผลิตภัณฑ์ท่อ Tube และ Pipe ในความหมายที่แตกต่างกันออกไป เมื่อสรุปความตามที่หนังสืออ้างอิงที่น่าเชื่อถือส่วนใหญ่ได้ให้ความหมายไว้ ดังต่อไปนี้ (ประสิทธิ์ เวียงแก้ว, 2550)

Tube หมายถึง ผลิตภัณฑ์ท่อที่กำหนดขนาดโดยการระบุค่า Outside Diameter (ค่ามิติจริงของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก) และกำหนดความหนาของผนังท่อเป็นมิลลิเมตร หรือนิ้ว หรือ Gauge ในการใช้งานส่วนใหญ่ของ Tube นั้นมักถูกใช้เป็นท่อขนาดเล็กภายในอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น Heat Exchangers, Air-Compressors, Boilers และ Refrigerators ผลิตภัณฑ์ Tube ที่ใช้งานส่วนใหญ่มีขนาดเริ่มตั้งแต่ OD. 1/8 นิ้ว (3.175 mm) ถึง 3 นิ้ว (76.2 mm) ส่วน Tube ที่ขนาดใหญ่กว่า 3 นิ้ว มีใช้งานอยู่เพียงเล็กน้อย

Pipe หมายถึง ผลิตภัณฑ์ท่อที่กำหนดขนาดโดยการระบุค่า Nominal Size เช่น ประเทศสหรัฐอเมริการะบุขนาดเป็น Nominal Pipe Size (NPS) และนานาชาติระบุขนาดเป็น Diameter Nominal (DN) ส่วนประเทศญี่ปุ่นระบุขนาดเป็น Nominal Diameter (ND) ซึ่งทั้งสามชื่อ เป็นขนาดที่เป็นเพียงชื่อเรียกเท่านั้น อาจไม่ใช่ค่าจริงของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก สำหรับความหนาของผนังท่อถูกกำหนดเป็น Schedule Number หรือ Weight Class โดยส่วนใหญ่ Pipe มักถูกใช้เป็นท่อที่เชื่อมต่อจากอุปกรณ์หนึ่งไปยังอีกอุปกรณ์หนึ่ง ผลิตภัณฑ์ Pipe ที่ใช้งานส่วนใหญ่มีขนาดเริ่มตั้งแต่ NPS 1/8 (DN 6) ถึง NPS 80 (DN 2000) หรือใหญ่กว่านี้ในกรณีพิเศษ

### 3. ความเป็นมาของมาตรฐานขนาดท่อ

มาตรฐานขนาดท่อและความหนาผนังท่อ (Pipe Size & Pipe Wall Thickness) ที่ใช้ งานกันอยู่ในปัจจุบัน มักสร้างความสับสนให้กับผู้เกี่ยวข้องอยู่เสมอ ในยุคแรกนั้น ระบบที่ใช้ในการ กำหนดขนาดท่อที่มีชื่อว่า Iron Pipe Size (IPS) ซึ่งได้กำหนดขนาดท่อโดยอ้างอิงกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในโดยประมาณของท่อ ผู้ทำงานด้านท่อได้เริ่มต้นอ้างอิงขนาดท่อเริ่มตั้งแต่ 2 นิ้ว 4 นิ้ว 6 นิ้ว เรื่อยไป ส่วนความหนาของท่อถูกกำหนดไว้เพียงความหนาเดียวต่อขนาดท่อแต่ละขนาด ซึ่งต่อมา ความหนาท่อที่กำหนดไว้นี้ถูกเรียกว่า Standard (STD) หรือ Standard Weight (STD WT) การที่ ความหนาของท่อถูกกำหนดไว้เพียงความหนาเดียวนี้เอง ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อแต่ละ ขนาดเป็นค่าคงที่ไม่มีมีการแปรผัน และในที่สุดได้กลายเป็นค่ามาตรฐาน

เมื่อวงการอุตสาหกรรมเริ่มพัฒนาขึ้น จึงเกิดความต้องการใช้ท่อที่รับแรงดันสูงขึ้น ดังนั้น จึงต้องมีการผลิตท่อที่หนาขึ้นแล้วตั้งชื่อเป็น Extra Strong (XS) และหนาขึ้นไปอีกเป็น Double Extra Strong (XXS) โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกยังคงไว้เป็นค่ามาตรฐาน ทำให้เส้น ผ่านศูนย์กลางภายในเริ่มเบี่ยงเบนไปจากค่าอ้างอิงเริ่มต้นและแปรผันตามความหนาของ XS และ XXS

การพัฒนาการด้านคุณภาพวัสดุทั้งในแง่ความแข็งแรงและความคงทนต่อการกัดกร่อน ทำให้บางอุตสาหกรรมต้องการท่อบางลง และเป็นจุดเริ่มต้นในการนำระบบใหม่มาใช้ในการ กำหนดขนาดและความหนาของท่อ ระบบใหม่นี้ใช้ชื่อเรียกขนาดท่อว่า Nominal Pipe Size (NPS) แทนระบบเก่า IPS แล้วคำว่า Schedule (Sch) ถูกตั้งขึ้นเพื่อระบุความหนาของท่อ อย่างไรก็ตาม ระบบใหม่ที่ตั้งขึ้นยังคงค่ามาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกคงที่ ค่าเดิมที่ใช้ในระบบ IPS และวิธี เรียกความหนาแบบเดิมคือ STD, XS และ XXS ยังถูกคงไว้จนถึงปัจจุบัน เหล่านี้คือที่มาของ มาตรฐานที่เกิดขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งในปัจจุบันคือมาตรฐาน ASME B 36.10

ในยุคสมัยที่มีการพยายามก่อตั้งมาตรฐานให้เป็นสากล มีองค์กรสากลเกิดขึ้นคือ International Standards Organization (ISO) ได้กำหนดขนาดท่อเป็นระบบ SI Unit และใช้ชื่อ เรียกขนาดท่อว่า Diameter Nominal (DN) ซึ่งสามารถเทียบเท่า (Equivalent) กับขนาด NPS ได้

### 4. ขนาด มิติ และความหนาท่อ (Pipe Sizes and Dimensions)

4.1 ขนาดและมิติของท่อเหล็กกล้า (Steel Pipe Sizes and Dimensions) ในทาง ปฏิบัติจะครอบคลุมถึงท่อเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel Pipe) และท่อเหล็กกล้าผสม (Alloy Steel Pipe) แต่ไม่ครอบคลุมถึงท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel Pipe) โดยมาตรฐานที่กำหนด ขนาดและมิติท่อเหล็กกล้ามีดังนี้

### มาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา

กำหนดขนาดของท่อเหล็กกล้าด้วยมาตรฐาน ASME B 31.10 ค่า Nominal Pipe Size (NPS) มีข้อสังเกตคือ ท่อขนาดตั้งแต่ 14 นิ้วขึ้นไป NPS จะมีค่าเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ส่วนท่อขนาดเล็กกว่า 14 นิ้ว NPS มีค่าไม่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ เช่น ท่อ NPS 14 เป็นท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 14 นิ้ว, ท่อ NPS 4 เป็นท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4.5 นิ้ว เป็นต้น

ASME B 31.10 ครอบคลุมขนาดท่อเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel Pipe) และท่อเหล็กกล้าผสม (Alloy Steel Pipe) แต่ไม่ครอบคลุมขนาดของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel Pipe)

ASME B 31.10 กำหนดค่าความหนาของผนังท่อไว้หลาย ๆ ค่า เพื่อให้เลือกใช้งานได้เหมาะสมกับงานแต่ละประเภท ความหนาของผนังท่อถูกกำหนดไว้ดังนี้

- กำหนดด้วย Schedule numbers (Sch) Schedule Numbers online Sch 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140 และ 160 โดยความหนาของผนังท่อจะมากขึ้นตามค่า Schedule Numbers ที่สูงขึ้น ท่อ ต่างขนาดกันที่มี Schedule Number เดียวกัน ส่วนใหญ่จะมีความหนาแตกต่างกัน โดยท่อขนาดใหญ่กว่ามักจะมี ความหนามากกว่า

- กำหนดด้วย Weight Class เป็นมาตรฐานความหนาผนังท่อที่ถูกกำหนดขึ้นในยุคที่ใช้ระบบ Iron Pipe Size (IPS) ซึ่งยังคงใช้งานมาจนถึงปัจจุบัน ความหนาของผนังท่อถูกกำหนดไว้ 3 Class คือ Standard (STD), Extra Strong (XS) และ Double Extra Strong (XXS)

### มาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น

ประเทศญี่ปุ่นได้กำหนดขนาดของท่อเหล็กกล้าด้วยค่า Nominal Diameter (ND) ตามมาตรฐาน JIS ซึ่งได้แยกแยะวิธีการเรียกท่อเป็นมิลลิเมตรและเป็นนิ้ว โดยใช้อักษร “A” ต่อท้ายขนาดท่อที่ระบุเป็นมิลลิเมตร และใช้อักษร “B” ต่อท้ายขนาดท่อที่ระบุเป็นนิ้ว ตัวอย่าง เช่น ท่อ “ND 100A” หรือ ท่อ “ND 4B” เป็นชื่อเรียกท่อขนาดเดียวกันคือท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 114.3 mm ส่วนความหนาของผนังท่อถูกกำหนดไว้ด้วย Schedule Numbers 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140 และ 160 มาตรฐานขนาดท่อเหล็กกล้าที่ใช้งาน อย่างกว้างขวาง ได้แก่ JIS G 3452, G 3454, G 3455, G 3456, G 3458, G 3460

เป็นที่น่าสังเกตว่ามาตรฐาน ASME และ JIS กำหนดขนาดและความหนาของท่อเทียบเท่ากัน แต่ขนาดและความหนาของท่อที่เทียบเท่ากันนั้นมีค่าแตกต่างกันอยู่บ้าง ดังนั้น หากมีความจำเป็นต้องใช้งานท่อของทั้งสองมาตรฐานร่วมกัน จะต้องระมัดระวังความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากความแตกต่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของการประกอบท่อด้วยหน้าแปลน (flange connection)

ตาราง 5 ตารางเปรียบเทียบการระบุขนาดท่อเหล็กกล้าของมาตรฐานต่างๆ

ประเทศ	ชื่อมาตรฐาน	ขนาดท่อ	ความหนาท่อ
สหรัฐอเมริกา	ASME B 36.10	NPS	Sch และ Weight Class
ญี่ปุ่น	JIS G 3456 และอื่นๆ	ND (A, B)	Sch และมิลลิเมตร
นานาชาติ	ISO	DN	

ที่มา: ประสิทธิ์ เวียงแก้ว, 2550

ความยาวของท่อไม่มีมาตรฐานกำหนดตายตัว ส่วนใหญ่จะผลิตความยาวท่อนละ 6 เมตร หรือ 12 เมตร ซึ่งปลายท่ออาจเป็นแบบปลายบาก (Beveled End), ปลายตัด (Plain End) หรือปลายเกลียว (Thread End)

#### 4.2 ขนาดและมิติของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel Pipe Sizes and Dimension)

มาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา

มาตรฐาน ASME B 36.19 กำหนดขนาดและมิติของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ด้วยค่า Nominal Pipe Size (NPS) เช่นเดียวกับท่อเหล็กกล้า ส่วนความหนาของผนังท่อถูกกำหนดไว้คือ Sch 5S, 10S, 20S, 40, 80, 120 และ 160 ซึ่งตัวอักษร S ถูกกำหนดขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เบื้องต้นที่จะใช้เป็นอักษรย่อของ Stainless อย่างไรก็ตามภายหลังถูกนำมาใช้ในการระบุความหนาของท่อที่ทำจากวัสดุอื่นด้วย

มาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น

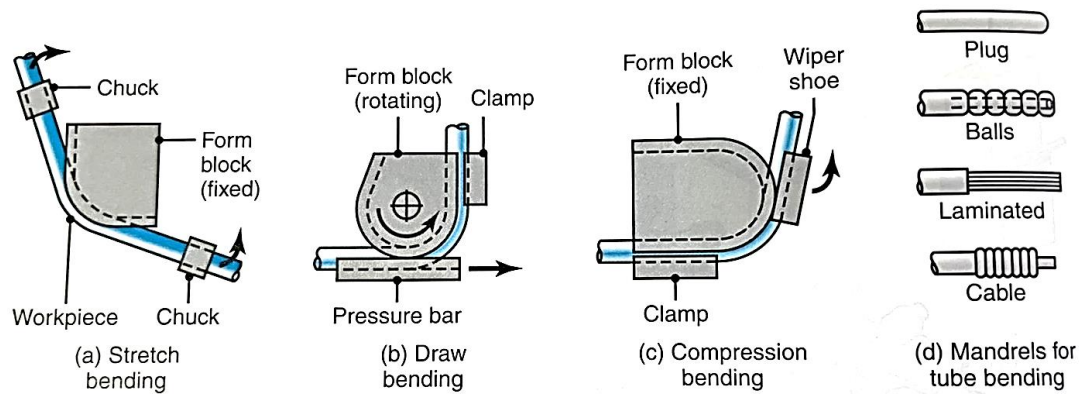
มาตรฐาน JIS G 3459 ได้กำหนดขนาดและมิติของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ด้วยค่า Nominal Diameter (ND) เช่นเดียวกับท่อเหล็กกล้า ส่วนความหนาของผนังท่อถูกกำหนดไว้คือ Sch 5S, 10S, 20S, 40, 80, 120 และ 160 หากมีความจำเป็นต้องใช้งานท่อของมาตรฐาน ASME และ JIS ร่วมกัน จะต้องระมัดระวังความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากความแตกต่างของทั้งสองมาตรฐาน

### กระบวนการ เครื่องมือ และตัวแปรที่มีผลในการตัดท่อ

#### 1. กระบวนการตัดท่อ (Tube Bending Process)

กระบวนการตัดและขึ้นรูปท่อและชิ้นส่วนที่กลวงทั่วไป ต้องใช้เครื่องมือพิเศษเพื่อหลีกเลี่ยงการโค้งงอและการหัก จะสังเกตได้ในการตัดท่อทองแดงหรือแม้แต่หลอดพลาสติก วิธีที่เก่าแก่ที่สุดและง่ายที่สุดในการตัดท่อชิ้นแรกคือ ให้บรรจวัสดุภายในด้วยอนุภาคที่หลวม ซึ่งโดยทั่วไป

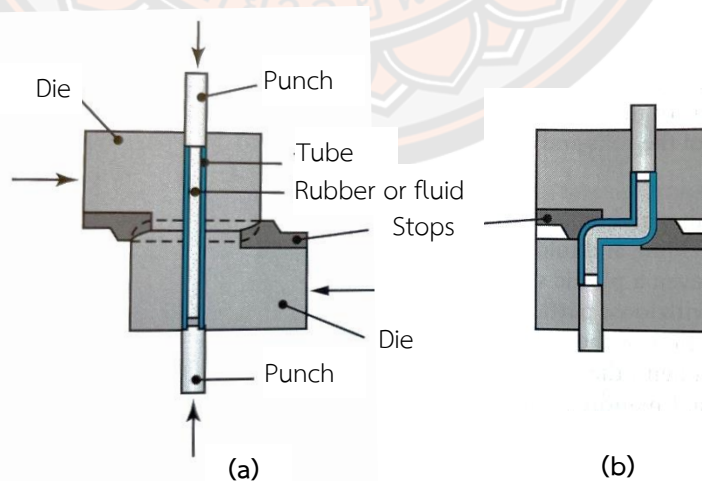
จะใช้ทราย แล้วจึงตัดโค้งงอในพิคซ์เจอร์ด้วยความเหมาะสม หน้าที่ของสิ่งที่บรรจุภายในจะช่วยป้องกันไม่ให้ท่อโค้งงอ หลังจากตัดท่อแล้วทรายก็จะถูกเขย่าออก เราสามารถเสียบท่อด้วยแมนเดรลภายในที่ยืดหยุ่นได้หลายแบบ (ภาพ 12) เพื่อจุดประสงค์เดียวกับทรายเพื่อให้ท่อมีแนวโน้มที่จะโค้งงอน้อยกว่า ส่วนท่อที่ค่อนข้างหนาและมีรัศมีการโค้งงอขนาดใหญ่สามารถตัดงอได้โดยไม่ต้องเติมอนุภาคหรือบรรจุวัสดุ และไม่ต้องใช้แมนเดรล (Kalpakjian S., 2014)



ภาพ 12 วิธีการตัดท่อ และลักษณะของแมนเดรล

ที่มา: Kalpakjian S., 2014

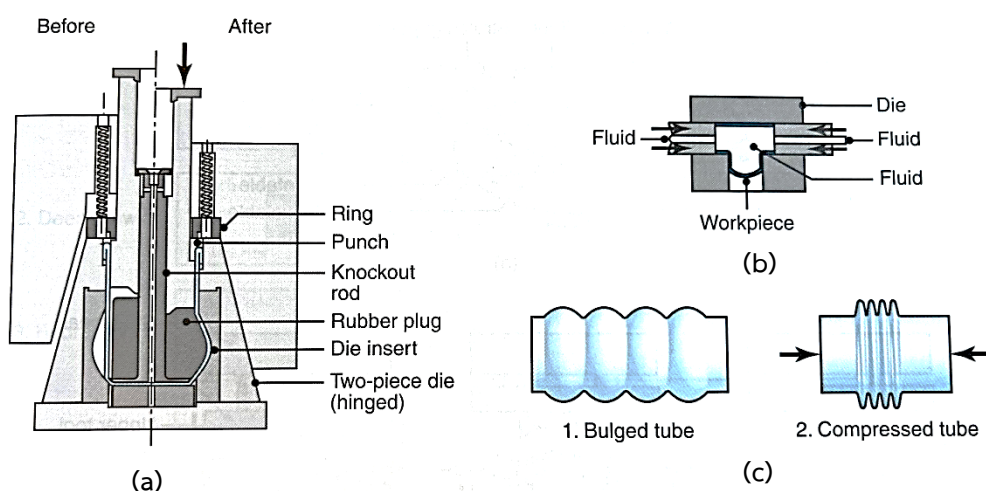
การขึ้นรูปโลหะภายใต้ความเค้นอัดสูงแสดงไว้ในภาพ 13 ใช้สำหรับการตัดท่อที่มีมุมค่อนข้างแหลม การกระทำเช่นนี้ท่อจะรับแรงอัดตามยาว ซึ่งช่วยลดความเค้นบริเวณเนื้อวัสดุด้านนอกบริเวณโค้งงอ ซึ่งช่วยปรับปรุงความสามารถในการตัดโค้งงอของวัสดุ



ภาพ 13 วิธีการขึ้นรูปท่อที่มีมุมแหลมโดยใช้แรงอัดตามแนวแกน

ที่มา: Kalpakjian S., 2014

การขึ้นรูปแบบ Bulging เป็นกระบวนการเกี่ยวข้องกับการวางขึ้นส่วนที่เป็นท่อ ทรงกรวย หรือรูปทรงโค้ง (Curvilinear Part) ลงในแม่พิมพ์แบบแยกส่วน (Split-Female Die) แล้วจึงขยายออก โดยปกติแล้วจะใช้ปลั๊กโพลียูรีเทน แสดงตามภาพ 14 (a) จากนั้นพ่นจะถอยกลับและกลับสู่ตำแหน่งเดิม และขึ้นส่วนที่ขึ้นรูปจะถอยออกโดยการเปิดตายส่วนนูนของท่อที่มีช่วงแบบปรับได้ สามารถทำเหยือกน้ำได้ด้วยวิธีนี้ (b) การผลิตอุปกรณ์สำหรับระบบประปาโดยการขยายช่องว่างท่อภายใต้แรงดันภายใน ด้านล่างของขึ้นส่วนนั้นถูกเจาะออกมาเพื่อสร้างตัว "T" (c) ขั้นตอนในการผลิตเครื่องสูบลม ผลิตภัณฑ์โดยทั่วไป ได้แก่ เหยือกกาแพหรือกระบอกน้ำ สำหรับขึ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อน ปลั๊ก แทนที่จะเป็นทรงกระบอก อาจมีรูปทรงเพื่อใช้แรงดันที่สูงขึ้นในบริเวณวิกฤต ข้อได้เปรียบที่สำคัญของการใช้ปลั๊กโพลียูรีเทนคือมีความทนทานต่อการเสียดสี การสึกหรอ และสารหล่อลื่น ยิ่งไปกว่านั้นยังไม่ทำลายพื้นผิวของขึ้นส่วนที่จะขึ้นรูปด้วย

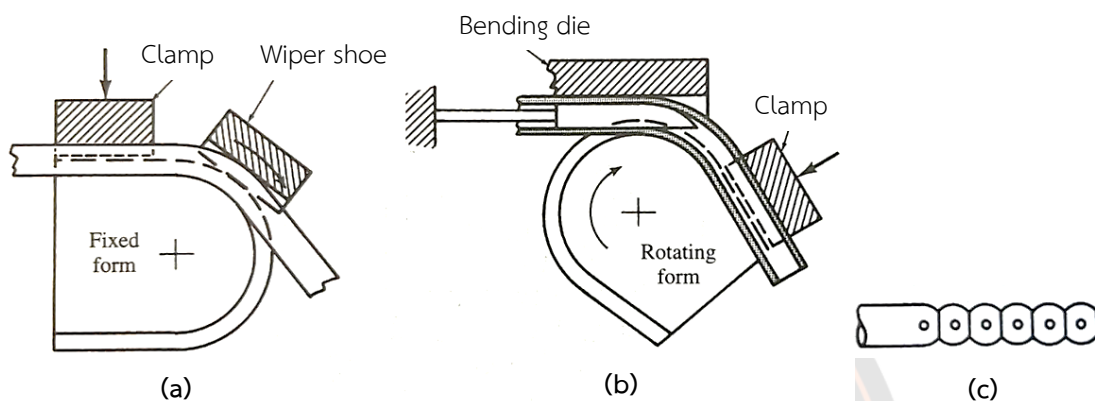


ภาพ 14 การขึ้นรูปแบบ Bulging

ที่มา: Kalpakjian S., 2014

การตัดท่อ (Tube Bending) เป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญ ปัญหาในการตัดโค้งแบบอิสระ มักเป็นปัญหาเรื่องการบิดเบี้ยวและการโก่งตัวของรูปทรงที่ซับซ้อนขึ้น เมื่อมีขึ้นส่วนจับยึดรอบ ๆ ปลายของท่อ (Form Block) จะได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น ทำให้มั่นใจได้ถึงรูปทรงที่สอดคล้องกับ Form Block ด้วยการม้วนตัวภายใต้แรงดึง โดยผ่านขึ้นส่วน Wiper Roll หรือ Wiper Block ทำหน้าที่เป็นบานพับอยู่ในแนวรัศมีความโค้งของท่อตามภาพ 15 (a) หรือโดยบล็อกแบบหมุนตามภาพ 15 (b) มีหลายวิธีการเพื่อป้องกันการเสียรูปของท่อในการตัดโค้งสำหรับรัศมีการตัดแคบ เช่น รองรับด้านในท่อด้วยทราย เลือกโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เพิ่มส่วนแบ่งทางเศรษฐกิจ โดยใช้แมนเดรลที่ประกอบด้วย

ส่วนประกอบหลายชิ้นตามภาพ 15 (c) หรือลากขึ้นรูปท่อบนแมนเดรลแบบคงที่ตามภาพ 15 (b) เครื่องตัด CNC สามารถตั้งโปรแกรมให้ผลิตท่อที่มีการตัดโค้งได้หลายแนวในทิศทางที่แตกต่างกันตามความต้องการสำหรับระบบไฮดรอลิกของรถยนต์หรือเครื่องบิน และท่อไอเสียรถยนต์ (Schey J. A., 2000)



ภาพ 15 กระบวนการตัดท่อแบบต่าง ๆ

ที่มา: Schey J. A., 2000

## 2. เครื่องมือตัดท่อ (Tube bending tooling)

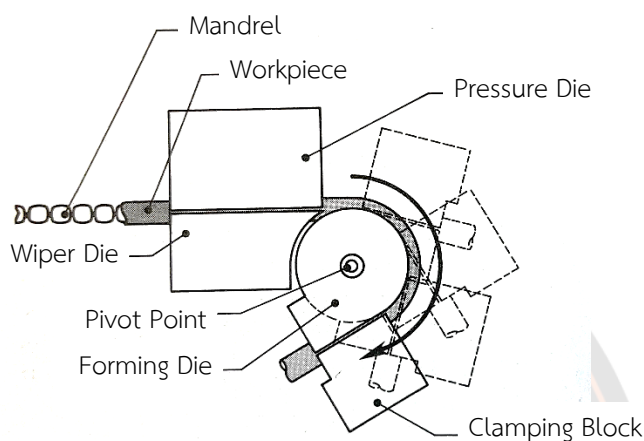
การตัดท่อเป็นกระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold forming process) ที่ตัดท่อโลหะให้เป็นไปตามรูปทรงของแม่พิมพ์อย่างถาวร และคงรูปทรงหน้าตัดเดิมไว้ ลักษณะที่เกิดจากกระบวนการนี้ คือ (Todd R. H., 1994)

- 1) ลดความหนาของผนังท่อด้านนอกในขณะที่เพิ่มความหนาของผนังท่อด้านใน
- 2) โดยปกติต้องการการรองรับด้านในและด้านนอก
- 3) เกิดโครงสร้างรูปทรงที่ซับซ้อนจากท่อโลหะเหนียว

ในกระบวนการการตัดท่อนั้นชิ้นงานควรยึดเข้ากับแม่พิมพ์อย่างแน่นหนาโดยใช้ชิ้นส่วน Clamping block จับยึดอย่างแน่น ในขณะที่ตายหมุนจะใช้ Flexible mandrel เพื่อป้องกันชิ้นงานเสียรูป ชิ้นส่วน Wiper die ช่วยบังคับท่อให้อยู่ในสภาพแน่นจึงป้องกันการเกิดรอยย่น

รูปทรงของชิ้นงาน จากท่อที่มีลักษณะเป็นท่อนตรงสามารถแปรรูปเป็นการตัดโค้งเดียวหรือหลาย ๆ โค้ง เครื่องตัดท่อแบบขับเคลื่อนด้วยโรตารีสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างรวดเร็วตามต้องการ จึงช่วยลดความจำเป็นในการใช้พื้นที่สำหรับจัดเก็บวัตถุดิบ เครื่องตัดท่อที่ขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิก จากภาพ 16 เป็นเครื่องจักรสำหรับตัดท่อโดยใช้แม่พิมพ์ อาจมีตัวรองรับด้านในและ

ด้านนอกเพื่อป้องกันการกระแทกชิ้นงานหรือเปลี่ยนรูปทรงหน้าตัดอย่างหลักการ อาจใช้เครื่องตัดท่อที่ควบคุมด้วยตัวเลข (NC; Numerical control) สำหรับงานการผลิตขนาดกลาง และใช้เครื่องจักรควบคุมเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC; Computer Numerical Control) สำหรับการผลิตในระดับที่สูงขึ้น



ภาพ 16 ชิ้นส่วนต่าง ๆ สำหรับกระบวนการตัดท่อ

ที่มา: Todd R. H., 1994

การผลิตและรูปทรงของเครื่องมือ ชิ้นส่วนตายเพียงชิ้นเดียวสามารถผลิตรูปทรงโค้งได้ไม่จำกัดองศาโดยมีการตัดโค้งแต่ละชิ้นตั้งแต่ประมาณ  $2^{\circ}$  ถึง  $180^{\circ}$  ต้องใช้แม่พิมพ์ที่แตกต่างกันสำหรับท่อแต่ละขนาดและแต่ละรัศมีการตัดโค้ง สำหรับการใส่ด้ายเฮลิคอลลทรงกลมแบบพิเศษ (Special round helical die) สามารถตัดโค้งได้  $360^{\circ}$  หรือมากกว่านั้น รูปร่างทั่วไปที่เกิดจากกระบวนการตัดนี้ ได้แก่ การพับฉาก (Elbows bends) และการตัดโค้งรูปตัวยู (U-bends) รวมถึงการโค้งสองมิติที่ซับซ้อน (Complex two-dimensional bends) ท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.25 นิ้ว ถึง 8 นิ้ว และความหนาของผนังท่อตั้งแต่ 0.031 นิ้ว ถึง 0.375 นิ้ว จะใช้เครื่องจักรสำหรับตัดท่อโดยใช้แรงในการขับเคลื่อนทางกล

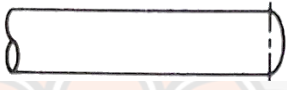
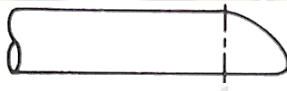



ความคลาดเคลื่อนสำหรับงานตัดส่วนใหญ่ในแนวรัศมีจะอยู่ที่ประมาณ  $\pm 0.031$  นิ้ว สำหรับท่อ Tube และ  $\pm 0.062$  นิ้ว สำหรับท่อ Pipes ผิวสำเร็จขึ้นอยู่กับกระบวนการขึ้นรูปท่อเดิมก่อนการตัด รอยย่นที่แนวรัศมีขอบด้านในอาจส่งผลต่อการตกแต่งพื้นผิว แต่โดยทั่วไปแล้วผิวสำเร็จจะไม่เปลี่ยนแปลงโดยกระบวนการตัดนี้

สำหรับชิ้นส่วนแมนเดรลแบบต่าง ๆ ในตาราง 6 นั้น หากเป็นแมนเดรลแบบเสียบ (Plug Mandrel) ใช้ในกรณีที่มีการตัดโค้งที่ไม่มากนัก ส่วนแมนเดรลแบบฟอร์ม (Form Mandrel)

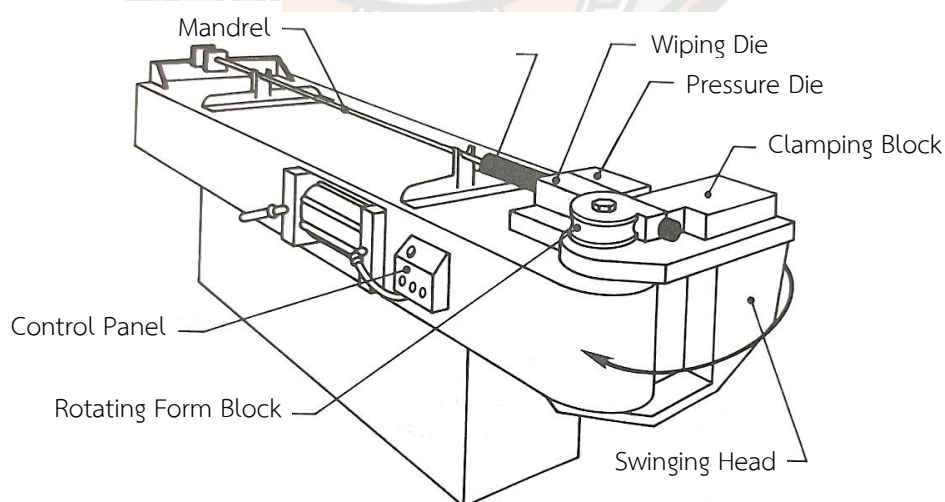


คล้ายกับแมนเดรลเสียบ แต่เพิ่มส่วนโค้งรัศมีที่ส่วนปลายเพื่อให้รองรับท่อได้มากขึ้นในระหว่างการตัด สำหรับบอลแมนเดรล (Ball Mandrel) และแมนเดรลบอลที่มีสายเคเบิลเหล็ก (Ball Mandrel with Steel Cable) ใช้ในกรณีที่มีความสำคัญต่อการตัดโค้งเป็นพิเศษ และใช้ทรายสำหรับการผลิตที่มีจำนวนน้อยมาก

ตาราง 6 ชิ้นส่วนแมนเดรลแบบต่าง ๆ

DESCRIPTION	STYLE	APPLICATION
PLUG MANDREL		NORMAL BENDS
FORM MANDREL		BENDS WHERE SUPPORT IS NEEDED
BALL MANDREL		CRITICAL BENDS
BALL MANDREL WITH STEEL CABLE		CRITICAL BENDS
SAND, CERROBEND		LOW PRODUCTION INEXPENSIVE

ที่มา: Todd R. H., 1994

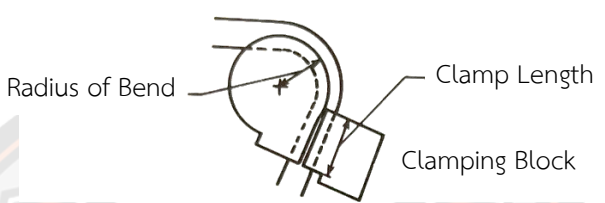


ภาพ 17 Rotary Draw Tube Bender

ที่มา: Todd R. H., 1994

หลักการทํางานของเครื่องตัดท่อแสดงไว้ตามภาพ 17 โดยเริ่มต้น Pressure Die และ Wiping Die ทำหน้าที่เป็นบล็อกให้ท่ออยู่กับที่ และ Rotating form Block และ Clamping Block หนีบจับชิ้นงานผ่านการตัดโดยการหมุน ชิ้นงานจะถูกลากขึ้นรูปภายใต้แรงดึงระหว่าง Wiping Die และ Pressure Die

ตาราง 7 ขนาดและรูปร่างของเครื่องมือ

		
RADIUS OF BEND CENTER LINE	WALL THICKNESS (IN)	APPROXIMATE CLAMP LENGTH
1XOD	< .035	4 to 5 OD
	.035 to .065	3 to 4 OD
	>.065	2 to 3 OD
2XOD	<.035	3 to 4 OD
	.035 to .065	2 to 3 OD
	>.065	1.5 to 2.5 OD
3XOD	<.065	2 to 3 OD
	>.065	1 to 2 OD

ที่มา: Todd R. H., 1994

ผลกระทบที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุชิ้นงาน กระบวนการตัดอาจทำให้งานเปลี่ยนรูปและความหนาของผนังไม่สม่ำเสมอในระหว่างการตัด มีผลกระทบทางกายภาพหรือทางเคมีน้อยมากบนชิ้นงานจากกระบวนการตัดท่อ วัสดุชิ้นงานที่ตัดโดยทั่วไป ได้แก่ สแตนเลส, เหล็กเหนียว, ทองแดง, ทองเหลือง และอะลูมิเนียมเกรดดีถึงดีเยี่ยม ส่วนไททานเนียมมีการจัดอันดับที่ต่ำกว่าเล็กน้อยในเรื่องการขึ้นรูปโดยการตัด

วัสดุเครื่องมือ ได้แก่ Mandrel, Pressure Die, Forming Block และ Clamping Blocks ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือชุบแข็งเพื่อยืดอายุการใช้งาน ส่วน Wiping Die ทำมาจาก อะลูมิเนียมหรือบรอนซ์ เพื่อลดการเกิดรอยขีดข่วนบนชิ้นงาน

ขนาดและรูปร่างของเครื่องมือ จากตาราง 7 แสดงให้เห็น Clamping Block เป็น การจับยึดแบบพื้นฐานและเป็นตำแหน่งที่สัมพันธ์กับการหมุนของตาย ความยาวของ Clamping Block ถูกกำหนดโดยรัศมีของการตัดโค้งและความหนาของผนังของชิ้นงาน

### 3. ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการ (Factors Affecting Process Results)

สำหรับกระบวนการตัดท่อ มีปัจจัยที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อค่าความคลาดเคลื่อนใน การตัดและพื้นผิวของท่อ ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ (Todd R. H., 1994)

- วัสดุชิ้นงาน
- รูปทรงการตัดโค้ง
- ประเภทและปริมาณการหล่อลื่น
- ความแข็งของอุปกรณ์จับยึดและตัดท่อ
- พื้นผิวของเครื่องมือจับยึด

ความเร็วในการตัดท่อเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.875 นิ้ว และความ หนาของผนัง 0.06 นิ้ว โดยปกติการตัด U-Bend (360 องศา) จะใช้เวลา 4 วินาที, การตัด 70 องศา ใช้เวลา 2 วินาที และการตัด 15° ใช้เวลา 1 วินาที

การหล่อลื่นสำหรับการตัดท่อเหล็กกล้า อะลูมิเนียม และทองแดง สารหล่อลื่นที่ เหมาะที่สุด ได้แก่ น้ำมันมิเนอร์ลและไขมันออร์แกนิก สำหรับการตัดท่อสแตนเลส, ทองแดง และไท ทาเนียมใช้สารหล่อลื่นที่คล้ายกันกับวัสดุชิ้นงานข้างต้น แต่ต้องไม่มีกำมะถันหรือคลอไรด์ และการ หล่อลื่นสำหรับการตัดท่อแมกนีเซียมใช้สารหล่อลื่นเช่นเดียวกันกับวัสดุชิ้นงานกลุ่มแรก และสามารถ ใช้ไขมันสัตว์หรือสบู่เป็นสารหล่อลื่นได้

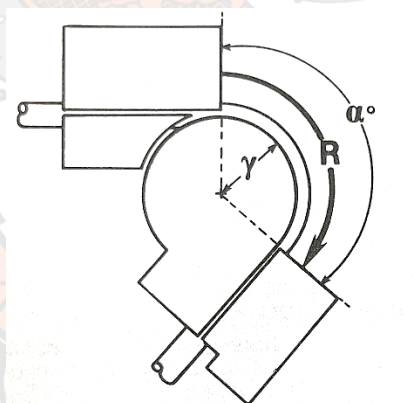
แรงที่ใช้ในการตัดแสดงในตาราง 8 สำหรับการตัดท่ออะลูมิเนียมและสแตนเลส หน่วยเป็น ฟุต-ปอนด์ (ft-lbs.) โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ กัน มีความหนาของผนัง 0.035 นิ้ว ความต้องการด้านพลังงานโดยทั่วไปมีตั้งแต่ 4 ถึง 245 ft-lbs.

องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องด้านต้นทุน ได้แก่ เวลาในการปรับตั้ง (Setup Time), เวลา ในการนำชิ้นงานเข้า-นำชิ้นงานออก (Load/Unload Time), รูปทรงการตัดโค้ง (Bend Geometry), อัตราค่าแรงทางตรง (Direct Labor Rate), อัตราค่าโสหุ้ย (Overhead Rate) และค่าตัดจำหน่าย อุปกรณ์และเครื่องมือ (Amortization of Equipment and Tooling)

ตาราง 8 แรงที่ใช้ในการตัด

Material	Outside diameter (in.)	Power (ft-lbs.)
Aluminum (6061-T6)	1/4	4
	1/2	20
	3/4	45
	1	80
Stainless steel (21-6-9)	1/4	12
	1/2	55
	3/4	135
	1	245

ที่มา: Todd R. H., 1994



ภาพ 18 ปัจจัยในการคำนวณหาเวลาในการตัดโค้ง

ที่มา: Todd R. H., 1994

เวลาในการตัดโค้ง (Bending Time; T) แบบองศาเดียว สามารถหาค่าของมุม ( $\alpha$ ; Bend Angle) และอัตราการตัดโค้ง (Bending Rate; R) ได้ ในบางกรณีจำเป็นต้องใช้ข้อมูลหลาย ๆ ครั้งเพื่อให้เกิดการตัดโค้งที่ซับซ้อน ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อเวลาในการตัดท่อ คือ องศาการตัด (Bend Angle) และอัตราการตัดโค้ง (Bending Rate) ซึ่งมีหน่วยเป็นองศาต่อวินาที ขึ้นอยู่กับประเภทวัสดุ เส้นผ่านศูนย์กลาง และความหนาของผนังท่อ สำหรับอัตราการตัดโค้งที่ 45°/วินาที เป็นเรื่องปกติสำหรับท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก (Todd R. H., 1994)

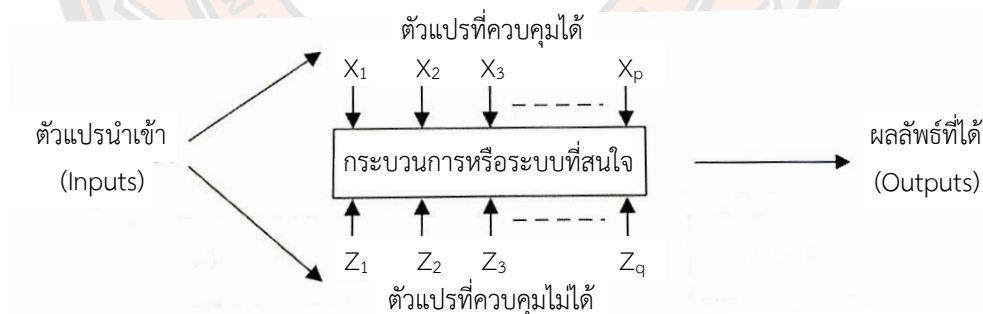
$$\text{Bending time (T)} = \frac{\alpha}{R} \quad (2.1)$$

โดยที่ T = Bending time (sec),  $\alpha$  = Bend angle ( $^{\circ}$ ), R = Bending rate ( $^{\circ}/\text{sec}$ ),  $\gamma$  = Bend radius to centerline (in.)

ปัจจัยหลักในการคำนวณเวลา ได้แก่ องศาการดัด (Bend Angle), อัตราการดัดโค้ง (Bending Rate) และรัศมีการดัดโค้ง (Bend Radius) สามารถตรวจสอบอัตราการดัดโค้ง (Bending Rate) ได้จากคู่มือ ค่าอัตราพื้นฐานตามความสัมพันธ์ของความหนาของผนังท่อ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก และประเภทของวัสดุท่อ

### การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทางสถิติ

วิธีการทางสถิติสำหรับการออกแบบการทดลองถูกค้นคิดการใช้ขึ้นจาก Sir Ronald A. Fisher เนื่องจากเป็นผู้มีส่วนรับผิดชอบทางด้านสถิติและการวิเคราะห์ข้อมูลที่สถานีทดลองทางเกษตรกรรมรอตทัมสเตต มหานครลอนดอน ประเทศอังกฤษเป็นเวลานานหลายปี Fisher เป็นทั้งผู้พัฒนาและเป็นบุคคลแรกที่น่าการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) มาใช้เป็นวิธีการเบื้องต้นในการวิเคราะห์ทางสถิติเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง (ปารเมศ ชูติมา, 2545)



ภาพ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ

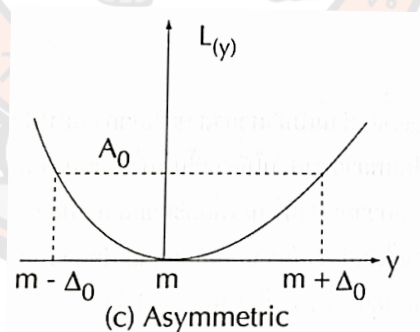
ที่มา: ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2551

การออกแบบแผนการทดลอง (Experimental Design or Design of Experiments) คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบ หรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) จากกระบวนการหรือระบบ

นั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า “ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่ควบคุมได้ (Controllable Variables or Factors) หรือตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่สามารถออกแบบได้” (Design Variables or Factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า “ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่รบกวนระบบ” (Uncontrollable or (Factors)) ดังแสดงในภาพ 19 (ประไพศรี สุธัสน์ ณ อยุรยา, 2551)

ดร.ทาคุชิ (Genichi Taguchi) เป็นวิศวกรสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ได้นำเอาหลักการการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ โดยพยายามปรับให้ง่ายขึ้นในขั้นตอนการวิเคราะห์ผลโดยไม่ใช้การแจกแจงทางสถิติและตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อสะดวกสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานจริง แต่จะใช้ค่าวัดที่ได้พัฒนาขึ้นเอง ได้แก่ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนระบบ (Signal-to-Noise Ratios) ซึ่งจำแนกตามลักษณะทางคุณภาพ แบ่งได้เป็น 3 กรณี คือ

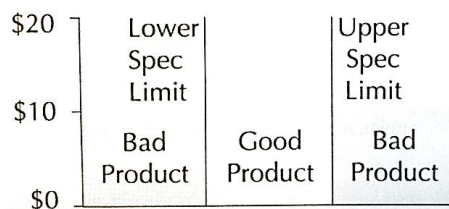
- 1) กรณีค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger-the Better) เช่น ระยะทางที่รถวิ่งได้ต่อลิตร (กิโลเมตร) ผลผลิตที่ผลิตได้ (Yield (%))
- 2) กรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller the Better) เช่น ความเข้มข้นก๊าซพิษในอากาศ (%) ของเสียในกระบวนการ (%)
- 3) กรณีค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด (Target-the Better) เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของงานเจาะ ปริมาตรบรรจุแป้งเด็ก ค่าความต้านทานแรงดึงของใยผ้า ดังแสดงในภาพ 20



ภาพ 20 ลักษณะทางคุณภาพที่น่าสนใจ

ที่มา: ประไพศรี สุธัสน์ ณ อยุรยา, 2551

จากงานวิจัยโดยหนังสือพิมพ์ Asahi (1979) ในประเทศญี่ปุ่น เพื่อตรวจสอบนิยามของคำว่า การสูญเสีย หรือ Loss ซึ่งแต่เดิมพิจารณาในความเข้าใจ คือ การที่ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตอยู่ภายใต้ข้อกำหนดมาตรฐาน (All or Nothing Situation) ดังภาพ 21 กับแนวคิดของ Taguchi



ภาพ 21 The “All” or “Nothing” loss function

ที่มา: ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2551

ตามแนวคิดของ Taguchi นั้น การสูญเสีย (Loss) เกิดจากการที่ผลิตภัณฑ์ผลิตได้ไม่ตรงกับมาตรฐาน หรือค่าเป้าหมาย (Target) นั่นคือ “การสูญเสีย (Loss) แปรผันโดยตรงกับค่าเบี่ยงเบนจากค่าเป้าหมาย (Deviation from Target)” ซึ่งทาคุชินิยมฟังก์ชันความสูญเสียในรูปแบบของสมการกำลังสอง (Quadratic Loss Function)

$$l \propto (y - \tau)^2 \quad (2.2)$$

โดยที่  $l$  คือ ค่าความสูญเสีย,  $y$  คือ ค่าลักษณะทางคุณภาพที่วัดได้ และ  $\tau$  คือ ค่าเป้าหมายทางคุณภาพ ดังนั้น กรณีข้อกำหนดสมมาตร (Specification) จะได้

$$l(y_i) = k(y_i - \tau)^2 \quad (2.3)$$

โดยที่  $k$  คือ ค่าคงที่ต่อหน่วยค่าเบี่ยงเบน กรณีข้อกำหนดไม่สมมาตร (Asymmetric Specification) จะได้

$$l(y_i) = \begin{cases} k_1(y_i - \tau)^2 & y_i < \tau \\ k_2(y_i - \tau)^2 & y_i > \tau \end{cases} \quad (2.4)$$

โดยที่  $k_1$  คือ ค่าคงที่ต่อหน่วยค่าเบี่ยงเบนกรณีค่าที่วัดได้ต่ำกว่าเป้าหมาย,  $k_2$  คือ ค่าคงที่ต่อหน่วยค่าเบี่ยงเบนกรณีค่าที่วัดได้สูงกว่าเป้าหมาย

### 1. กลยุทธ์ตามวิธีของทาคุชิ (Taguchi's Strategy)

เนื่องจากความสูญเสีย (Loss) เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ความต้องการในตัวผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไปในทางที่ตี ประชญาการออกแบบการทดลองของทาคุชิจึงมีวัตถุประสงค์หลักในการทำให้ค่าคาดคะเนของความสูญเสียมีค่าต่ำสุด (Minimizing the Expected Loss)

ค่าคาดคะเนของความสูญเสียมีองค์ประกอบที่อธิบายได้ 2 ส่วน คือ ความแปรปรวนของ Y และค่ากำลังสองของค่าเบี่ยงเบนของค่าเฉลี่ยจากค่าเป้าหมาย แนวคิดดังกล่าวนำไปสู่การสร้างตัววัด (Performance Measure) ของ Taguchi คือ “ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน” (Signal-to-Noise Ratios) ดังนี้ คือ ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 กรณี ตามภาพที่ 21 ดังนี้

1) กรณีค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger-the-Better)

$$\frac{S}{N_L} = -10 \log \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{y_i^2} \right]}{n} \right\} \quad (2.5)$$

ตาราง 9 แผนการทดลองของทาคุชิ

Test Run	Design Matrix	Noise Matrix	y	S/N
1	$X_{11}, X_{12}, X_{13}, \dots, X_{1p}$	$W_{11}, W_{12}, \dots, W_{1q}$ $W_{21}, W_{22}, \dots, W_{2q}$ $\vdots$ $W_{r1}, W_{r2}, \dots, W_{rq}$	$y_{11}$ $y_{12}$ $\vdots$ $y_{1r}$	$\{S/N\}_1$
2	$X_{21}, X_{22}, X_{23}, \dots, X_{2p}$	$W_{11}, W_{12}, \dots, W_{1q}$ $W_{21}, W_{22}, \dots, W_{2q}$ $\vdots$ $W_{r1}, W_{r2}, \dots, W_{rq}$	$y_{21}$ $y_{22}$ $\vdots$ $y_{2r}$	$\{S/N\}_2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
n	$X_{n1}, X_{n2}, X_{n3}, \dots, X_{np}$	$W_{11}, W_{12}, \dots, W_{1q}$ $W_{21}, W_{22}, \dots, W_{2q}$ $\vdots$ $W_{r1}, W_{r2}, \dots, W_{rq}$	$y_{n1}$ $y_{n2}$ $\vdots$ $y_{nr}$	$\{S/N\}_n$

ที่มา: ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2551

2) กรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Small-the-Better)

$$\frac{S}{N_S} = -10 \log \left\{ \frac{\sum y_i^2}{n} \right\} \quad (2.6)$$



3) กรณีค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด (Target-the-Best หรือ Nominal-the-Best)

$$\frac{S}{N_T} = 10 \log \left\{ \frac{\bar{y}^2}{S^2} \right\} \quad (2.7)$$

## 2. แผนการทดลองของทากูชิ

การออกแบบการทดลองเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลนั้น ทากูชิใช้การสร้างเมตริกซ์ข้อมูลสำหรับตัวแปร ปัจจัย 2 เมตริกซ์ ตามลักษณะของปัจจัย คือ

1) Design Matrix We Inner Array เป็นเมตริกซ์ที่ประกอบด้วยข้อมูลของตัวแปรที่ควบคุมหรือออกแบบได้ (Design Variable Space) โดยจะใช้เมตริกซ์นั้นเป็นเมตริกซ์หลัก และนำแต่ละแถวไปรวมกับแถวของ Noise Matrix

2) Noise Matrix หรือ Outer Array เป็นเมตริกซ์ที่ประกอบด้วยข้อมูลของตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Noise Space) โดยที่ Column (สดมภ์) ของ Noise Matrix แทนตัวแปรปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Noise factors) ในขณะที่แถวแต่ละแถวของเมตริกซ์ Noise แทนระดับปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ การออกแบบการทดลองของทากูชิที่สมบูรณ์ (Complete Taguchi Experimental Design) จะประกอบด้วย n แถวของ Design Matrix (n คือจำนวนการทดลองที่ทำทั้งหมด) ของ p ปัจจัย โดย n = จำนวนแถวของ Design Matrix คูณกับจำนวนแถวของ Noise Matrix

แผนการทดลองที่สมบูรณ์ของ Taguchi แสดงไว้ในตาราง 9

## 3. ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีของทากูชิ

การวิเคราะห์ด้วยวิธีของทากูชิ (Steps in Taguchi Methodology) มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากระดับ (ค่า) ที่ทำให้ค่าตัววัดของทากูชิ คือ Signal-to-Noise Ratio (S/N;  $\eta$ ) มีค่าสูงที่สุด (จุดที่ดีที่สุดคือ จุด ที่ให้ค่า Max {S/N} ณ วิธีปฏิบัติของกลุ่มปัจจัยนั้น ๆ) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 7 ขั้นตอนดังนี้ คือ

1. กำหนดค่าตอบสนอง (y) ที่ใช้วัดผลและวิเคราะห์ปัจจัยเบื้องต้น
2. ระบุปัจจัยแยกเป็น 2 กลุ่ม คือปัจจัยที่ควบคุมได้ และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (กรณีที่ควบคุมไม่ได้ ถ้าสามารถวัดค่าได้ขณะทดลองให้ทำการวัดค่าด้วย)
3. ระบุแผนการทดลองที่ใช้สำหรับ Design Matrix (Inner Array) และ Noise Matrix (Outer Array) ซึ่งส่วนใหญ่แผนการทดลองที่ใช้ในแต่ละเมตริกซ์มักจะใช้แผนที่ทดลองน้อย เช่น การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน การทดลองแบบ Orthogonal (เนื่องจากการทดลองที่สมบูรณ์ของ Taguchi มีค่าเท่ากับจำนวนแถวของ Design Matrix คูณ ด้วยจำนวนแถวของ Noise Matrix)
4. ทำการทดลองเก็บรวบรวมข้อมูลและคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน

ระบบ (Signal-to-Noise Ratio ; S/N) ตามวัตถุประสงค์ของคุณภาพของระบบที่ศึกษา คือ Larger-the-Better, Smaller-the-Better หรือ Nominal-the-Best (Target the Best)

5. กรณีศึกษาลักษณะทางคุณภาพ 2 กรณีแรก (Larger-the-Better หรือ Smaller-the-Better) หลังจากคำนวณ S/N หรือ S/N, แล้ว (ข้ามไปขั้นตอนที่ 7) กำหนด Combinations ของปัจจัยที่ทำให้ค่า S/N สูงสุด ส่วนกรณีที่ทำให้ค่าเป้าหมายดีที่สุด (Target-the-Better) ให้ทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (ANOM; Analysis of Mean) เพื่อระบุปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยเพียงอย่างเดียว เพื่อใช้เป็น “ตัวแปรปรับค่า” (Adjustment Variable) เพื่อปรับให้ค่าตอบสนอง มีค่าตรงกับเป้าหมาย (หรือใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด)

6. กำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ณ จุดที่ทำให้ค่า  $\text{Max}\{S/N\}$  ยกเว้นตัวแปรที่ใช้ในการปรับค่า (Adjustment Variable) ให้กำหนดระดับ ณ จุดที่ทำให้ค่าตอบสนองเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงค่าเป้าหมายมากที่สุด โดยสร้างสมการพยากรณ์ความสัมพันธ์ตามหลักการออกแบบการทดลอง

7. ในระดับปฏิบัติการจริง ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลว่าค่าที่กำหนดเป็นค่าที่ดีที่สุดจริง (Confirmation Runs)

### การวิเคราะห์ความแปรปรวน และการทดสอบสมมติฐาน

งานวิจัยนี้ เป็นการทดลองอย่างสุ่มสมบูรณ์หรือการจำแนกทางเดียว (Complete Randomized Design; CRD หรือ One-Way ANOVA) โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ CRD นี้จะทำการวิเคราะห์ส่วนของความแปรปรวนได้จากสมการต้นแบบ ดังนี้

จาก

$$\begin{aligned} Y_{ij} &= \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \\ (Y_{ij} - \mu) &= \tau_i + \varepsilon_{ij} \\ V(Y_{ij} - \mu) &= V(\tau_i) + V(\varepsilon_{ij}) \end{aligned}$$

จาก

$$\sum_i^a \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = \sum_i^a [n_i(\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2] + \sum_i^a \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$$

ความแปรปรวนที่ปรับแล้วทั้งหมดด้วยค่าเฉลี่ย = ความแปรปรวนจากปัจจัย + ความแปรปรวนจากค่าผิดพลาด จะเห็นได้ว่าแหล่งที่มา (Source) ของความแปรปรวนแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังตาราง 10

ตาราง 10 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน กรณีจำแนกทางเดียว

Source (แหล่งที่มา)	d.f. (องศาเสรี)	Sum Square (ผลบวกกำลังสอง)	Mean Square (ค่าเฉลี่ย SS)	F (ค่าสถิติ)
Treatment (วิธีปฏิบัติ)	$a - 1$	$SSA$	$MSA = \frac{SSA}{a - 1}$	$F = \frac{SSA}{MSE}$
Error (ความผิดพลาด)	$N - a$	$SSE = SST - SSA$	$MSE = \frac{SSE}{N - a}$	
Total (adj) (ทั้งหมดที่ปรับแล้ว)	$N - 1$	$SST$		

ที่มา: ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2551

และสามารถเขียนแทนด้วย  $SST = SSA + SSE$

โดย  $SST$  = ผลบวกกำลังสองของทั้งหมดที่ปรับแล้ว

= Sum Square of Total

$SSA$  = ผลบวกกำลังสองของปัจจัย A หรือวิธีปฏิบัติ

= Sum Square of Factor an Effect or Treatment

และ  $SSE$  = ผลบวกกำลังสองของค่าผิดพลาดหรือสิ่งที่อธิบายไม่ได้

= Sum Square of Error or Residual

$$SST = \sum_i \sum_j (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 ; \bar{y}_{..} = \frac{\sum \sum y_{ij}}{N} \text{ หรือค่าเฉลี่ยรวม (Grand Mean)}$$

$$= \sum_i \sum_j y_{ij}^2 - \frac{T_{..}^2}{N} ; T_{..} = \text{ผลรวมทั้งหมด (Grand Total)}$$

$N$  = จำนวนการทดลองทั้งหมด

$$SSA = \sum_{i=1}^a \frac{T_{i.}^2}{n_i} - \frac{T_{..}^2}{N} \text{ หรือ } \sum_{i=1}^a [n_i (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2]$$

$$SSE = SST - SSA$$

การทดสอบสมมติฐานเป็นกระบวนการทางสถิติที่เป็นทางเลือกหนึ่งในการสรุปข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะทางคุณภาพ (Quality Characteristic) ของระบบ หรือค่าพารามิเตอร์ที่สนใจของประชากร

เพื่อใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมตามวัตถุประสงค์ที่สนใจศึกษา (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2551) สามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

กรณีสุ่มตัวอย่างเพียงหนึ่งชุด (One Sample) มักทำโดยมีวัตถุประสงค์ในการสรุปข้อความเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์หลัก คือ ค่าที่ชี้บ่งตำแหน่งของกระบวนการ ( $\mu$ ; Mean) และค่าที่ใช้บอกการกระจายหรือความแตกต่างในระบบ ( $\sigma$ ; Variance) เพื่อประโยชน์ในการทราบถึงสภาพปัจจุบันของระบบหรือเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานข้อกำหนด (Specification) เช่น ข้อกำหนดระบุว่า ชิ้นงานที่ผลิตต้องทนแรงดึง ไม่ต่ำกว่า 200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ทำการสุ่มตัวอย่างมาขนาด 20 ตัวอย่าง พบว่าค่าเฉลี่ยจากตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 208 psi ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.74 psi จะสรุปได้หรือไม่ว่ากระบวนการผลิตที่มีสอดคล้องกับมาตรฐาน เป็นต้น

กรณีสุ่มตัวอย่างสองชุด (Two Samples) ผู้เก็บข้อมูลโดยทั่วไปมีวัตถุประสงค์ในการเปรียบเทียบว่าข้อมูลจากสองแหล่งที่แตกต่างกัน มีลักษณะที่เหมือนกันหรือแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งโดยทั่วไปก็ยังคงทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์หลัก คือ ผลต่างของค่าเฉลี่ย ( $\mu_1 - \mu_2$ ) เพื่อพิจารณาว่าตำแหน่งระบบแตกต่างกันหรือไม่ ( $\mu_1 - \mu_2 = 0?$ ) และอัตราส่วนของความแปรปรวน ( $\sigma_1^2/\sigma_2^2$ ) เพื่อพิจารณาว่าความแปรปรวนเท่ากันหรือไม่ ( $\sigma_1^2/\sigma_2^2 = 1?$ ) เนื่องจากในทางทฤษฎีทางสถิติ การแจกแจงของตัวทดสอบที่อธิบายค่าสถิติของค่าพารามิเตอร์ทั้งสองนี้สามารถระบุได้

การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing) คือ การทดสอบเพื่อสรุปหรือพิสูจน์ข้อความซึ่งเป็นข้อสมมติเกี่ยวกับระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษาว่าเป็นไปตามที่คาดคะเนไว้หรือไม่ เช่น ต้องการพิสูจน์ว่ารถยนต์ที่ผลิตขึ้นมากินน้ำมันน้อยหรือวิ่งได้ระยะทางเฉลี่ยมากกว่า 12 กิโลเมตรต่อลิตร ซึ่งเป็นการพิสูจน์ตำแหน่งของค่ากลาง ( $\mu$ ) โดยผู้กล่าวตั้งใจจะชี้ให้เห็นว่า  $\mu > 12$  ในการทดสอบสมมติฐานนั้น จะแบ่งข้อสมมติเป็นสองส่วนหลักเรียกว่า สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) และสมมติฐานอื่นหรือสมมติฐานรอง (Alternate or Alternative Hypothesis)

ก) สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis;  $H_0$ )

ประกอบด้วยข้อสมมติหรือข้อความที่ต้องการพิสูจน์ว่าเท็จ (Disprove) หรือข้อความที่ ต้องการปฏิเสธ ข้อความที่ระบุในสมมติฐานหลักจะเป็นบทกลับหรือส่วนกลับของสมมติฐานอื่นหรือสมมติฐานรองเสมอ

ข) สมมติฐานอื่น (Alternate Hypothesis;  $H_a$  หรือ  $H_1$ )

ประกอบด้วย ข้อสมมติหรือข้อความที่ต้องการจะพิสูจน์ว่าจริง (Prove) หรือ ต้องการยอมรับ ยกเว้นกรณีที่พิสูจน์ว่าเท่ากัน เครื่องหมายเท่ากับจะปรากฏในสมมติฐานหลัก เนื่องจากวิธีการในการทดสอบจะต้องทำการกำหนดระดับการทดสอบ (Significance Level หรือ Type I Error;  $\alpha$ ) จึงจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ใน  $H_0$

การอนุมานทางสถิติ (Inferential Statistics) คือ การสรุปข้อความเกี่ยวกับพารามิเตอร์ (ลักษณะที่แท้จริงของระบบ/กระบวนการ/ประชากร) ที่สนใจศึกษา วิธีการทดสอบสมมติฐานจัดว่าเป็นศาสตร์พื้นฐานของวิชาการอนุมานอื่น ๆ เช่น การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) และการประมาณค่าแบบช่วง (Interval Estimation) เป็นต้น ซึ่งในกรณีสุดท้ายคือการประมาณค่าแบบช่วง จัดได้ว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับการทดสอบสมมติฐานและอาจจะระบุได้ว่าเป็นเครื่องมือที่ใช้แทนกันได้อย่างตรง

## โครงข่ายประสาทเทียม

### 1. วิวัฒนาการของ Machine Learning

บัญชา ปะสีละเตสัง (2564) กล่าวว่า Machine Learning (ML) คือ องค์ประกอบส่วนหนึ่งของ AI หรือปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) ที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะเป็นส่วนที่ใช้ในการคิดและตัดสินใจ หรืออาจกล่าวได้ว่า Machine Learning ก็คือสมองของ AI

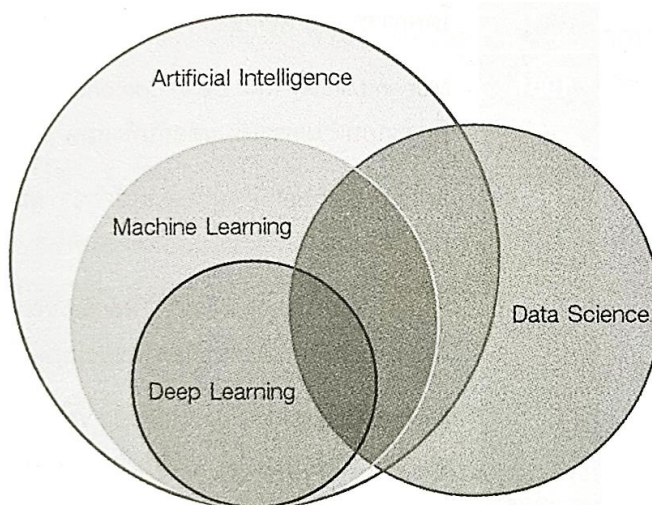
Machine Learning เป็นศาสตร์อีกแขนงหนึ่งที่ใช้สร้างการเรียนรู้ให้กับเครื่อง โดยอาศัยวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติ ในการสร้างแบบจำลอง (Model) จากข้อมูลที่มีอยู่ เพื่อใช้ในการทำนายผลและตัดสินใจ (Predictive and Making Decision) ทั้งนี้ Machine Learning ถือเป็นส่วนหนึ่งของการสร้าง AI และยังคงนำความรู้ด้านวิทยาศาสตร์ข้อมูล (Data Science) มาเป็นพื้นฐานในการคำนวณ

Artificial Intelligence (AI): เป็นการสร้างปัญญาประดิษฐ์ในลักษณะต่าง ๆ โดยใช้วิธีคิดคล้ายกับมนุษย์ เช่น หุ่นยนต์ การจดจำใบหน้า การจดจำลายมือ การสั่งงานด้วยเสียง ระบบผู้เชี่ยวชาญ และอื่น ๆ อีกมากมาย ซึ่งต้องใช้ Machine Learning เป็นส่วนหนึ่งของการทำงาน

Machine Learning (ML): สำหรับสร้างการเรียนรู้เพื่อทำนายผลและตัดสินใจของ AI หรืออาจกล่าวได้ว่า ML ก็คือวิธีการคิด (Algorithm) ของ AI นั่นเอง

Deep Learning (DL): เป็นการเรียนรู้ในเชิงลึก ซึ่งต้องใช้วิธีการคิดที่ซับซ้อนมากขึ้น โดยพัฒนาต่อจากพื้นฐานของ Machine Learning

Data Science (DS): เป็นวิทยาศาสตร์แขนงหนึ่งที่ว่าด้วยการวิเคราะห์และจัดการข้อมูล โดยทั้ง AI, ML และ DL ต่างก็ต้องใช้ข้อมูลสำหรับทำนายผลและตัดสินใจ ดังนั้น Data Science จึงเป็น พื้นฐานที่สำคัญซึ่งต้องนำไปใช้ร่วมกับ AI, ML และ DL



ภาพ 22 ภาพความสัมพันธ์ขอบข่ายปัญญาประดิษฐ์

ที่มา: บัญชา ปะสีละเตสัง, 2564

สำหรับวิวัฒนาการของ Machine Learning สามารถเรียงลำดับความเป็นมาที่น่าสนใจบางส่วน ตามลำดับปี ค.ศ. ได้ดังนี้

ค.ศ.1943 Walter Pitts และ Warren McCulloch ได้ร่วมกันสร้างทฤษฎี Neural Network โดยอาศัยหลักการทางจิตวิทยาของมนุษย์มาเป็นการคิดคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า McCulloch-Pitts Neurons และยังเป็นมาตรฐานมาจนถึงปัจจุบัน

ค.ศ.1950 Alan Turing ได้สร้างการทดสอบที่ชื่อ Turing Test เพื่อตอบคำถามที่ว่า Can machines think โดยการทดสอบดังกล่าวก็เพื่อพิสูจน์ความฉลาดของคอมพิวเตอร์ว่าสามารถที่จะคิดได้เองหรือไม่

ค.ศ.1951 Marvin Minsky และ Dean Edmonds ได้สร้าง Artificial Neural Network (โครงข่ายประสาทเทียม) ที่ประกอบด้วยการเชื่อมต่อกันทั้งหมด 40 นิวรอน

ค.ศ.1952 Arthur Samuel คือผู้เริ่มต้นใช้คำว่า Machine Learning เป็นคนแรก โดยนำมาเป็นหลักการ เพื่อสร้างโอกาสที่จะชนะในเกมคอมพิวเตอร์

ค.ศ.1957 Frank Rosenblatt ได้สร้าง Perceptron ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของหน่วยของ Neural Network โดยจำลองมาจากเซลล์ประสาทของมนุษย์ และใช้เรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน

ค.ศ.1965 Alexey (Oleksii) Ivakhnenko และ Valentin Lapa ได้พัฒนา Multi-layer Perceptron และถือว่าเป็น จุดเริ่มต้นที่พัฒนาไปสู่การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning)

ค.ศ.1967 Thomas Cover and Peter E. Hart จากมหาวิทยาลัย Stanford ได้สร้างโมเดลการเรียนรู้ที่เรียกว่า Nearest Neighbors ทั้งรูปแบบของ Classification และ Regression

ค.ศ.1969 Marvin Minsky ได้แก้ไขปัญหบางอย่างของ Perceptron ซึ่งสร้างโดย Rosenblatt ที่ไม่สามารถ ใช้กับฟังก์ชันที่ซับซ้อนได้ เช่น XOR ด้วยการแทนที่ Perceptron ลงใน Multiple Hidden Layer

ค.ศ.1970 Seppo Linnainmaa ได้เผยแพร่หลักการของ Backpropagation ใน Neural Network โดยใช้วิธี Differential ซึ่งก็ได้รับการพัฒนาเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน

ค.ศ.1979 Kunihiko Fukushima ได้พัฒนาการจดจำรูปแบบ (Pattern Recognition) จากวิธีการของ Multi layer Network และเป็นพื้นฐานที่ใช้งานกันในปัจจุบันนี้ เช่น การจดจำใบหน้าหรือลายมือ และวัตถุต่าง ๆ เป็นต้น

ค.ศ.1990 Robert Schapire และ Yoay Freund ได้สร้างโมเดลของ Machine Learning ที่เรียกว่า Boosting โดยการนำหลายๆ โมเดลมาใช้งานร่วมกัน แล้วเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแต่ละโมเดลโดยวิธีการ Voting หรือ Average (ปัจจุบันจัดอยู่ในกลุ่ม Ensemble Learning)

ค.ศ.1993 Cortes และ Vapnik ได้สร้างโมเดลที่ชื่อ Support Vector Machines (SVM) โดยเริ่มสร้างตั้งแต่ปี1993 และได้เผยแพร่ปี 1995 ซึ่งถือเป็นโมเดลที่ได้รับความนิยมอีกตัวหนึ่งของ Machine Learning

ค.ศ.1995 Tin Kam Ho ได้สร้างโมเดล Random Forest โดยรวมการตัดสินใจแบบต้นไม้ (Decision Tree) หลายๆ อันเข้าด้วยกัน คล้ายกับต้นไม้หลายต้นที่รวมกันเป็นป่า ซึ่งจะให้ผลการทำนายที่มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ค.ศ.1998 Yann LeCun ได้เสนอวิธีการคำนวณแบบ Stochastic Gradient Descent ซึ่งต่อมาได้ถูกนำไปใช้ในขั้นตอนของ Backpropagation ของ Neural Network รวมถึง Deep Learning

## 2. โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network)

โครงข่ายเซลล์ประสาท (Neural Network) เป็นโมเดลหลักของ Machine Learning ที่มักถูกเลือกใช้สำหรับงานทางด้าน AI อาจกล่าวได้ว่า Neural Network คือส่วนหนึ่งของ AI เพราะฉะนั้น ผู้ที่จะเรียนรู้เพื่อก้าวไปสู่การสร้างปัญญาประดิษฐ์จำเป็นต้องมีพื้นฐานเกี่ยวกับ Neural Network ที่ดีพอในระดับหนึ่ง (บัญชา ปะสิลเตสัง, 2564) โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) เป็นวิวัฒนาการที่พัฒนาขึ้นโดยมีต้นกำเนิดจากชีววิทยาทางประสาท โครงข่ายประสาทเทียมเป็นแบบจำลองที่พยายามเลียนแบบวิธีการประมวลผลข้อมูลพื้นฐานบางอย่าง

ที่พบในสมอง เนื่องจากสมองของมนุษย์สามารถทำงานที่ซับซ้อน โครงข่ายประสาทเทียมที่จำลองมาจากสมองก็มีประโยชน์ในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนเช่นกัน วิศวกรรมการของโครงข่ายประสาทเทียมได้เติบโตขึ้นจากการสร้างแบบจำลองขององค์ประกอบการประมวลผลอย่างง่าย (Simple Processing Elements) หรือเซลล์ประสาท (Neurons) ไปจนถึงโครงข่ายประสาทคู่ขนานอีกมากมาย (Samarasinghe S., 2007)

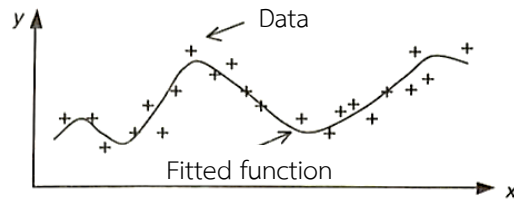
โครงข่ายประสาทเทียมทำงานได้อย่างหลากหลาย ได้แก่ การทำนายผล (Prediction) หรือการประมาณค่าฟังก์ชัน (Function Approximation), การจำแนกประเภท (Classification), การจัดกลุ่ม (Clustering) และการพยากรณ์ (Forecasting) ดังแสดงในภาพ 23 โครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพมากเมื่อสร้างแบบจำลองเข้ากับข้อมูล Fitting models to data (ภาพ 23a) สามารถใส่ตัวแบบเชิงซ้อนที่ไม่เป็นเชิงเส้นกับข้อมูลหลายมิติเพื่อความถูกต้องตามต้องการ ดังนั้น การทำนายด้วยโครงข่ายประสาทเทียมจึงถูกเรียกว่าตัวประมาณสากล (Universal Approximators) จากมุมมองของฟังก์ชันการทำงาน สิ่งเหล่านี้ถือได้ว่าเป็นส่วนขยายของเทคนิคหลายตัวแปร เช่น การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression) และการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Regression)

นอกจากนี้ โครงข่ายประสาทเทียมยังสามารถหาข้อมูลที่ซับซ้อนและงานด้านจำแนกประเภทสัญญาณ (อนุกรมเวลา) ที่เกี่ยวข้องกับการจำแนกที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ซับซ้อนอย่างเด็ดขาด (Complex Classification Tasks) ตามภาพ 23b ในสถานการณ์ที่กลุ่มที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในข้อมูลไม่เป็นที่รู้จักมาก่อน โครงข่ายประสาทเทียมมีประโยชน์ในการจัดกลุ่มแบบไม่มีผู้ดูแล (Unsupervised Clustering) ซึ่งจะใช้คุณสมบัติภายในของข้อมูลเพื่อค้นหาโครงสร้างกลุ่มที่ไม่รู้จัก (Discovering Clusters in Data) ตามภาพ 23c คุณลักษณะที่มีประสิทธิภาพของวิธีการจัดกลุ่มนิเวศแบบไม่มีผู้ดูแลที่เรียกว่า Self-organization คือ สามารถเปิดเผยความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ระหว่างกลุ่มของข้อมูลได้พร้อม ๆ กันในขณะที่ค้นหากลุ่ม โครงข่ายประสาทเทียมยังสามารถพยากรณ์อนุกรมเวลา (Time-Series Forecasting) ได้ด้วย ซึ่งจะคาดการณ์ผลลัพธ์ถัดไปหรือผลลัพธ์สำหรับขั้นตอนของเวลาหลาย ๆ ขั้นถัดไป ตามภาพ 23d ซึ่งทำได้โดยการจับรูปแบบชั่วคราวของข้อมูลในรูปแบบของหน่วยความจำที่ผ่านมาซึ่งฝังอยู่ในแบบจำลองการพยากรณ์นั้น ความรู้ในอดีตที่ผ่านมามักจะกำหนดพฤติกรรมในอนาคต (Samarasinghe S., 2007)

เซลล์ประสาท (Neuron) เป็นหน่วยเซลล์พื้นฐานในระบบประสาท เซลล์ประสาททางชีววิทยาในสมองของมนุษย์แสดงไว้ในภาพ 24 ในเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์จะมีเส้นใยแอกซอนที่เรียกว่าแอกซอน (Axon) และปุ่มส่วนปลายที่เรียกว่าไซแนปส์ (Synapse) แอกซอนเป็นเส้นทางขาออกของเซลล์ประสาทจะแยกส่วนและเชื่อมต่อกับเดนไดรต์ (Dendrites) จำนวนมาก ซึ่งเป็นเส้นทางขาเข้าของเซลล์ประสาทอื่น ๆ ผ่านทางแยกที่เรียกว่าไซแนปส์ เซลล์ประสาทแต่ละเซลล์จะรับ และ

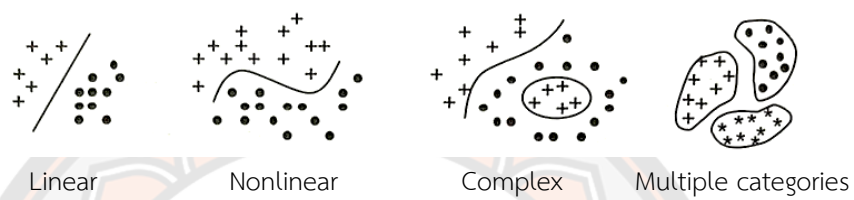


(a) Function approximation

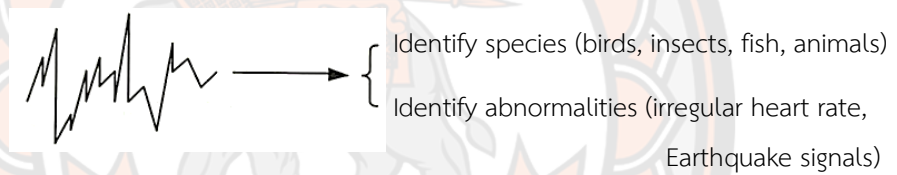


(b) Classification

(1) Data classification: assign data to a class



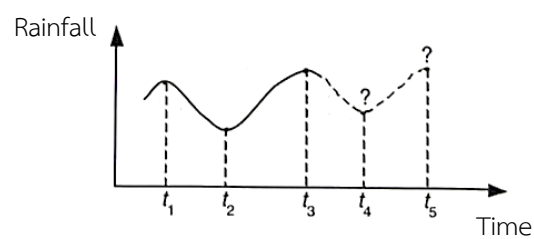
(2) Signal classification: assign time-series data to a class



(c) Unsupervised clustering: find unknown clusters in data



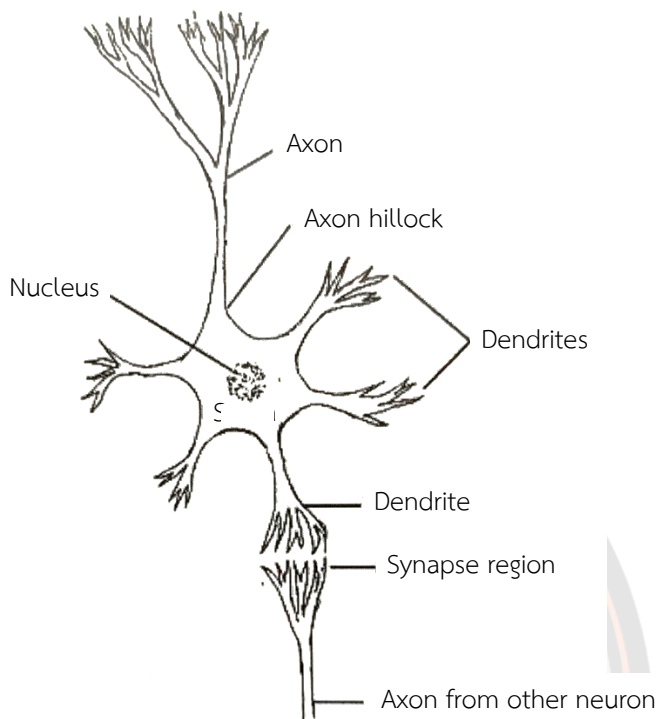
(d) Forecasting: predict next outcomes of a time series



ภาพ 23 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมในการสร้างแบบจำลองข้อมูลทางวิทยาศาสตร์

ที่มา: ปรับปรุงมาจาก Samarasinghe S., 2007

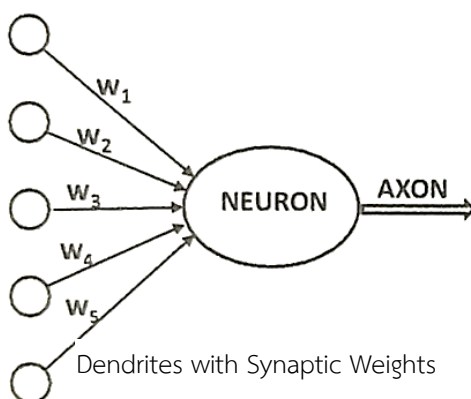
รวมสัญญาณจากเซลล์ประสาทจำนวนมากผ่านเดนไดรต์ที่เชื่อมต่อในลักษณะเดียวกัน (Chow T. W. S., 2007)



ภาพ 24 ลักษณะทั่วไปของเซลล์ประสาททางชีวภาพและการเชื่อมต่อ

ที่มา: Chow T. W. S., 2007

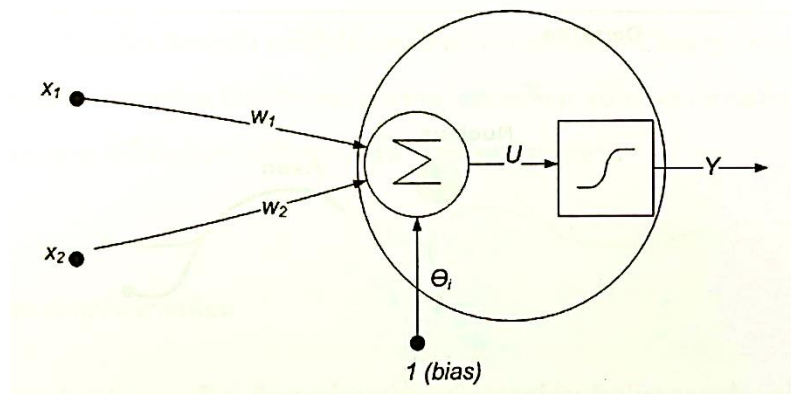
กลไกทางชีววิทยานี้จำลองขึ้นเป็นโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งมีหน่วยคำนวณที่เรียกว่าเซลล์ประสาท เราจะใช้คำว่า "โครงข่ายประสาทเทียม" แทนที่จะเป็นโครงข่ายทางชีววิทยาในสิ่งมีชีวิต หน่วยคำนวณเชื่อมต่อกันผ่านค่าน้ำหนัก ซึ่งทำหน้าที่เดียวกับตัววัดจุดแข็งของการเชื่อมต่อแบบซินแนปติก (Synaptic) ในสิ่งมีชีวิต ข้อมูลที่ส่งไปยังเซลล์ประสาทแต่ละอันจะถูกปรับขนาดด้วยน้ำหนัก ซึ่งส่งผลกระทบต่อฟังก์ชันที่คำนวณในหน่วยนั้น โครงสร้างนี้แสดงไว้ในภาพ 25 โครงข่ายประสาทเทียมคำนวณฟังก์ชันของข้อมูลอินพุตโดยการขยายค่าที่คำนวณจากเซลล์ประสาทอินพุตไปยังเซลล์ประสาทเอาต์พุต และใช้น้ำหนักเป็นพารามิเตอร์กลาง การเรียนรู้เกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนค่าน้ำหนักที่เชื่อมต่อเซลล์ประสาท เช่นเดียวกับการตอบสนองจากสิ่งเร้าภายนอกที่จำเป็นสำหรับการเรียนรู้ในสิ่งมีชีวิต สิ่งเร้าภายนอกในโครงข่ายประสาทเทียมนั้นมาจากข้อมูลการฝึกอบรมที่มีตัวอย่างคู่อินพุต-เอาต์พุตของฟังก์ชันที่ต้องการเรียนรู้



ภาพ 25 โครงข่ายประสาทเทียม

ที่มา: Aggarwal C. C., 2018

ตัวอย่างเช่น ข้อมูลการฝึก (Training data) มีการแสดงภาพพิกเซลเป็นอินพุต และป้ายกำกับ (Annotated labels) เช่น แครอท กล้วย เป็นเอาต์พุต คู่ข้อมูลการฝึกเหล่านี้จะถูกป้อนเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้การแสดงข้อมูลอินพุตเพื่อคาดการณ์เกี่ยวกับป้ายกำกับเอาต์พุต ข้อมูลการฝึกอบรมจะให้ผลย้อนกลับถึงความถูกต้องของค่าน้ำหนักในโครงข่ายประสาทเทียม ขึ้นอยู่กับว่าผลลัพธ์ที่คาดการณ์ไว้ สำหรับข้อมูลที่ป้อนเข้านั้นตรงกับป้ายกำกับเอาต์พุตที่มีคำอธิบายประกอบในข้อมูลการฝึกมากเพียงใด เราสามารถมองข้อผิดพลาดที่เกิดจากโครงข่ายประสาทเทียมในการคำนวณฟังก์ชันว่าเป็นการตอบสนองที่ไม่พึงประสงค์ในสิ่งมีชีวิตทางชีววิทยา ซึ่งนำไปสู่การปรับตัวในจุดแข็งของซินแนปติก ในทำนองเดียวกัน ค่าน้ำหนักระหว่างเซลล์ประสาทจะถูกปรับในโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อตอบสนองต่อข้อผิดพลาดในการทำนาย เป้าหมายของการเปลี่ยนน้ำหนักคือการปรับเปลี่ยนฟังก์ชันที่คำนวณแล้วเพื่อให้การคาดการณ์ถูกต้องมากขึ้นในการทำซ้ำในอนาคต ดังนั้น ค่าน้ำหนักจะถูกเปลี่ยนอย่างระมัดระวังด้วยวิธีที่เหมาะสมทางคณิตศาสตร์ เพื่อลดข้อผิดพลาดในการคำนวณในตัวอย่างนั้นด้วยการปรับค่าน้ำหนักระหว่างเซลล์ประสาทอย่างต่อเนื่อง ในคู่อินพุตและเอาต์พุตหลายคู่ ฟังก์ชันที่คำนวณโดยโครงข่ายประสาทเทียมจะได้รับการปรับปรุงเมื่อเวลาผ่านไป เพื่อให้การคาดการณ์แม่นยำยิ่งขึ้น ดังนั้น หากโครงข่ายประสาทเทียมได้รับการฝึกฝนด้วยภาพกล้วยหลายชนิด ในที่สุดจะสามารถจดจำกล้วยได้อย่างถูกต้องในรูปแบบที่ไม่เคยเห็นมาก่อน ความสามารถนี้ใช้สำหรับการคำนวณฟังก์ชันของอินพุตที่มองไม่เห็นได้อย่างแม่นยำโดยการฝึกชุดคู่อินพุต-เอาต์พุตที่มีขอบเขตจำกัด เรียกว่า “Model generalization” ประโยชน์หลักของ Machine learning models ทั้งหมดได้มาจากความสามารถในการสรุปการเรียนรู้จากข้อมูลการฝึกที่เห็นไปจนถึงตัวอย่างที่มองไม่เห็น (Aggarwal C. C., 2018)



ภาพ 26 แบบจำลองเซลล์ประสาทเทียมหนึ่งเซลล์

ที่มา: สิริภัทร เขียวชาญวัฒนา, 2563

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์ประสาทเทียมอย่างง่ายหนึ่งเซลล์ แสดงตามภาพ 26 สามารถเปรียบเทียบเซลล์ประสาทเทียมจากภาพนี้กับเซลล์ประสาทจริงอย่างง่ายจากภาพที่ 24 ได้ดังนี้ นิวรอน (Neuron) ในโครงข่ายประสาทเทียม หมายถึง Cell body น้ำหนัก (Weight) และการเชื่อมต่อในโครงข่ายประสาทเทียม คือ แขนงของเซลล์ประสาท (Dendrite) ส่วนผลลัพธ์ (Output) ในโครงข่ายประสาทเทียมคือข้อมูลผ่านแกนของเซลล์ประสาท (Axon) ซึ่งสามารถเขียนแทนความสัมพันธ์ของแต่ละส่วนที่เกี่ยวข้องกันด้วยรูปแบบที่สามารถนำไปประมวลผลทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T \quad (2.8)$$

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T \quad (2.9)$$

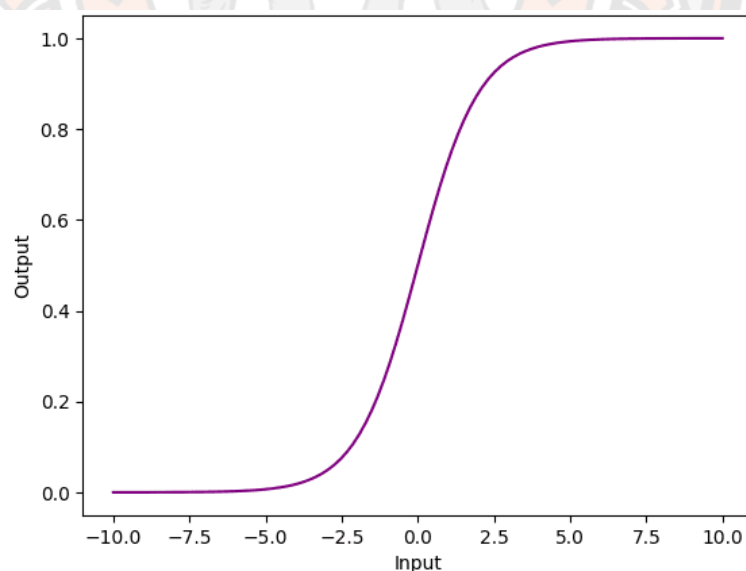
โดยที่  $X$  = เวกเตอร์ตัวแปรของข้อมูลนำเข้า (Input data) มีขนาด  $m$  มิติ,  $W$  = เวกเตอร์น้ำหนักหรือความสำคัญที่ให้กับข้อมูลนำเข้าแต่ละตัว มีขนาด  $m$  มิติเช่นเดียวกับ  $X$ ,  $U$  = ฟังก์ชันของข่ายงาน (Network functions) โดยคำนวณจากผลรวมทั้งหมดของผลคูณของค่าข้อมูลอินพุตกับค่าน้ำหนักความสำคัญที่ให้กับข้อมูลอินพุตแต่ละตัวบวกกับไบแอส,  $Y$  = ค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการตีความของค่า  $U$  เมื่อผ่านฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function)

### 3. ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation Functions)

เนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมได้รับความนิยมมากขึ้นในด้านการเรียนรู้ของเครื่อง (ML) จึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องเข้าใจถึงบทบาทของฟังก์ชันกระตุ้นที่มีต่อการใช้งาน ในส่วนนี้จะ

กล่าวถึงแนวคิดของฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้กับเอาต์พุตของเซลล์ประสาทแต่ละตัวในโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อแนะนำความไม่เป็นเชิงเส้นของโมเดล หากไม่มีฟังก์ชันกระตุ้น โครงข่ายประสาทเทียมก็เป็นเพียงชุดของการแปลงแบบเชิงเส้นเท่านั้น ซึ่งจะจำกัดความสามารถในการเรียนรู้รูปแบบและความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนของข้อมูล ฟังก์ชันกระตุ้นมีคุณสมบัติและลักษณะการใช้งานเฉพาะของตัวเองที่ใช้งานทั่วไป ได้แก่ ReLU, Sigmoid และ TanH การเลือกฟังก์ชันกระตุ้นที่ถูกต้องสำหรับปัญหาเฉพาะอาจเป็นข้อพิจารณาที่สำคัญเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในโครงข่ายประสาทเทียม (Muhammad Asad Iqbal Khan, 2023)

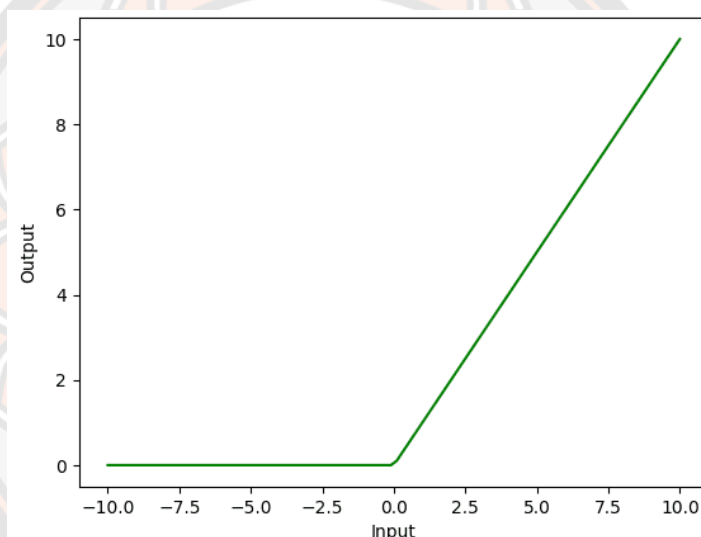
1. Sigmoid Activation Function เป็นฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้กันทั่วไปในโครงข่ายประสาทเทียม และเรียกอีกอย่างว่า Logistic Activation Function รับอินพุตและจับคู่กับค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งสามารถตีความได้ว่าเป็นความน่าจะเป็น วิธีการนี้มีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับงานจำแนกประเภทไบนารี ซึ่งเครือข่ายจำเป็นต้องทำนายความน่าจะเป็นของอินพุตที่เป็นของหนึ่งในสองคลาส ข้อดีหลักประการหนึ่งของฟังก์ชันนี้คือ สามารถสร้างความแตกต่างได้ ซึ่งหมายความว่าสามารถใช้ในอัลกอริธึมการเผยแพร่ย้อนกลับเพื่อฝึกโครงข่ายประสาทเทียมได้ นอกจากนี้ ยังมีการไล่ระดับที่ราบรื่น (Smooth Gradient) ซึ่งสามารถช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาต่าง ๆ เช่น การไล่ระดับที่เสียหายได้ อย่างไรก็ตาม ฟังก์ชันนี้ยังสามารถไล่ระดับที่ขาดหายไประหว่างการฝึกสอน (Training) ได้



ภาพ 27 Sigmoid Activation Function

ที่มา: Muhammad Asad Iqbal Khan., 2023

2. ReLU Activation Function เป็นอีกหนึ่งฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้กันทั่วไปในโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งแตกต่างจากฟังก์ชัน Sigmoid และ TanH, ReLU เป็นฟังก์ชันที่ไม่อิมิตัว ซึ่งหมายความว่าไม่ราบที่ปลายสุดของช่วงอินพุต แต่ ReLU จะแสดงค่าที่ป้อนเข้าหากเป็นค่าบวก หรือ 0 หากเป็นค่าลบ ฟังก์ชันเชิงเส้นที่เรียบง่ายนี้มีข้อดีหลายประการที่เหนือกว่า Sigmoid Activation Function และ TanH Activation Function เนื่องจากมีประสิทธิภาพทางการคำนวณมากกว่า ทำให้เหมาะสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมขนาดใหญ่ และ ReLU ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าไม่ไวต่อปัญหาการไล่ระดับที่ขาดหายไป เนื่องจากลักษณะเฉพาะตัวที่ไม่มีความชันและแบนราบ นอกจากนี้ ReLU ยังช่วยกระจายการเปิดใช้งานของเซลล์ประสาทในเครือข่าย ซึ่งสามารถนำไปสู่การสรุปที่ดีขึ้น



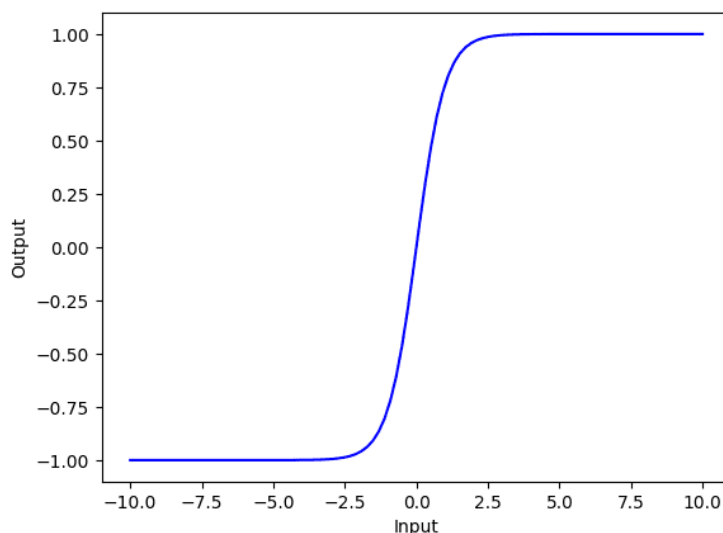
ภาพ 28 ReLU Activation Function

ที่มา: Muhammad Asad Iqbal Khan., 2023

3. TanH Activation Function เป็นฟังก์ชันกระตุ้นที่ส่งออกค่าระหว่าง -1 และ 1 โดยมีเอาต์พุตเฉลี่ยเป็น 0 วิธีนี้สามารถช่วยทำให้มั่นใจว่าเอาต์พุตของเลเยอร์โครงข่ายประสาทเทียมยังคงอยู่ตรงกลางประมาณ 0 ทำให้มีประโยชน์สำหรับวัตถุประสงค์ในการทำให้เป็นมาตรฐาน TanH เป็นฟังก์ชันกระตุ้นที่ราบรื่นและต่อเนื่อง ซึ่งทำให้ง่ายต่อการปรับให้เหมาะสมในระหว่างขั้นตอนการไล่ระดับ

สำหรับ TanH Function อาจไวต่อปัญหาการไล่ระดับที่ขาดหายไป เช่นเดียวกับ Sigmoid Activation Function โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมมรดบลิคที่มี

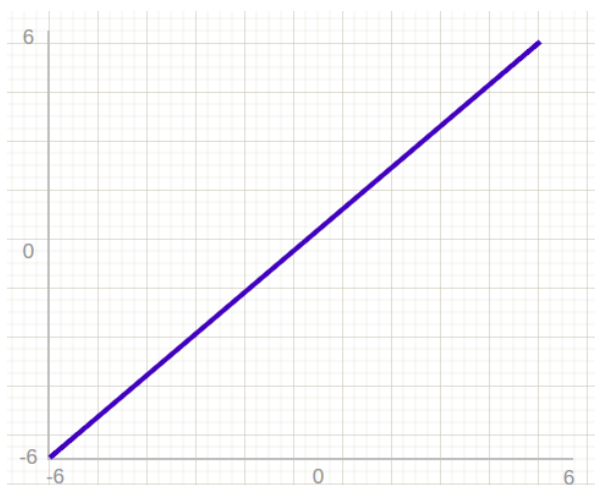
หลายเลเยอร์ เนื่องจากความชันของฟังก์ชันมีขนาดเล็กมากสำหรับค่าอินพุตที่มากหรือน้อย ทำให้การไล่ระดับแพร่กระจายผ่านโครงข่ายได้ยาก นอกจากนี้ เนื่องจากการใช้ฟังก์ชันนี้อาจใช้เวลาในการคำนวณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเทนเซอร์ขนาดใหญ่หรือเมื่อใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมระดับลึกที่มีหลายเลเยอร์



ภาพ 29 TanH Activation Function

ที่มา: Muhammad Asad Iqbal Khan., 2023

4. Identity Activation Function ฟังก์ชันกระตุ้นแบบเชิงเส้น หรือที่เรียกว่า "No Activation" หรือ "Identity Function" เป็นฟังก์ชันกระตุ้นที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอินพุต ฟังก์ชันนี้ไม่แก้ไขผลรวมน้ำหนักของอินพุตและส่งคืนค่าที่ได้รับ เทียบเคียงกับฟังก์ชันเอกลักษณ์จากแคลคูลัสแลมบ์ดา อย่างไรก็ตาม มีสองประเด็นหลักเกี่ยวกับฟังก์ชันกระตุ้นเชิงเส้น ประการแรก ฟังก์ชันนี้ไม่สามารถใช้กับ Backpropagation ได้เนื่องจากอนุพันธ์ของฟังก์ชันเป็นค่าคงที่ที่ไม่มีความสัมพันธ์กับอินพุต และทำให้เลเยอร์ทั้งหมดของโครงข่ายประสาทเทียมยุบรวมเป็นหนึ่งเดียว ประการที่สอง ไม่ว่าจะมียูนิทกี่ก็ตาม เลเยอร์สุดท้ายจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของเลเยอร์แรก เมื่อใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบเชิงเส้น หรือ Identity Activation Function วิธีการนี้สามารถที่จะช่วยลดโครงข่ายประสาทได้อย่างมีประสิทธิภาพเหลือชั้นเดียว (Petru Potrimba, 2023)



ภาพ 30 Identity Activation Function

ที่มา: Petru Potrimba., 2023

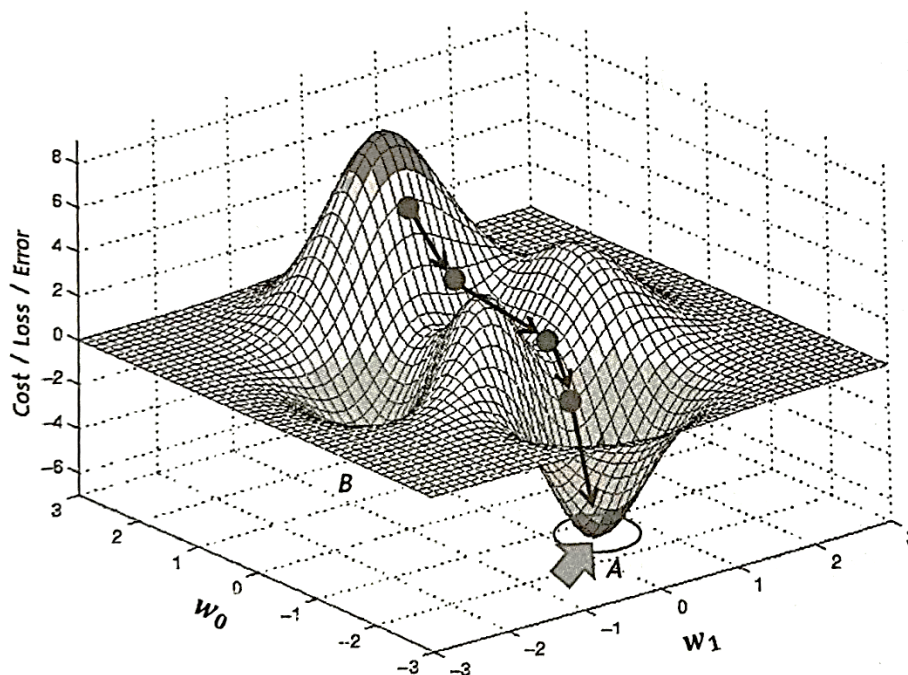
#### 4. การหาค่าน้ำหนักที่ดีที่สุดโดย Gradient Descent

ความหมาย Gradient descent โดยทั่วไป หมายถึงการเคลื่อนตัวลงมาตามทางลาดชัน แต่ในทาง Machine Learning และ Deep Learning หมายถึง การหาค่า Weight หรือ  $W$  ที่ดีที่สุด ที่ทำให้ Cost หรือ Loss ของ Model (ซึ่งก็คือ Neural Network: NNที่กำลังทำการสร้างอยู่) มีค่าน้อยที่สุด ดังที่ได้ทราบแล้วว่า แต่ละ Model เกิดจาก NN หรือ Neuron หลายตัว ที่เชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายทำงานร่วมกันจนได้ Output ออกมา ซึ่งตัว Model ถือว่าเป็นฟังก์ชันคณิตศาสตร์อย่างหนึ่ง หากป้อนค่า Weight ต่าง ๆ แล้วพล็อตค่า Cost/Loss ออกมาจะได้เป็นเส้นหรือกราฟ ดังภาพ 31 ได้มาจากการป้อนค่า  $W_0$  และ  $W_1$  จาก -3 ถึง 3 เข้า Model แล้ววัด Cost ออกมาพล็อตจากภาพจะเห็นว่าจุดที่ดีที่สุด (Cost น้อยสุด ค่าคลาดเคลื่อน หรือ Error น้อยสุด) คือจุด A นั่นคือจุดที่  $W_0 = -1.2$ ,  $W_1 = 0.4$  โดยประมาณ ในกระบวนการคำนวณ หากได้ค่า  $W_0$   $W_1$  แล้ว ถือว่าภาระกิจเสร็จสิ้น และสามารถนำค่า Weight ดังกล่าวไปใช้ใน Model ได้ (กอบเกียรติ สระอุบล, 2565)

ในทางปฏิบัติ ข้อมูลจริงจะมีจำนวนมาก มีความซับซ้อน จนอาจไม่สามารถพล็อตกราฟได้ครบถ้วนเหมือนในภาพ หรือสามารถทำได้แต่อาจใช้เวลายาวนานเกินไป ดังนั้น จึงต้องใช้วิธีการที่เรียกว่า Gradient descent โดยวิธีดังกล่าวจะทำหน้าที่หาค่า  $W_0$  และ  $W_1$  ที่ทำให้ Cost/Loss ต่ำสุดเร็วที่สุด โดยหลักการเริ่มต้น จะสมมุติจุดเริ่มต้นที่ใดที่หนึ่ง จากนั้น Gradient descent จะคำนวณแล้วทำให้ค่อย ๆ ขยับปรับ Weight ไปเรื่อย ๆ (ไปในทิศทางที่ทำให้ Cost ลดลง) จนสุดท้ายได้ค่า Weight ณ จุดที่ Cost ต่ำที่สุดคือจุด A (ในทางเทคนิคเรียกว่า Convergence คือถึงจุดที่ดี



ที่สุดแล้ว) การทำ Gradient descent ที่ดี มีประสิทธิภาพ ควรจะใช้เวลาหรือจำนวนครั้งน้อยที่สุด กล่าวโดยสรุป Gradient Descent ใน NN คือการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมมาปรับ Weight ให้ได้ Cost หรือ Loss น้อยที่สุด และเร็วที่สุด การเคลื่อนตัวลงมาจากจุดสูงสุดโดย Gradient Descent



ภาพ 31 การเคลื่อนตัวลงมาจากจุดสูงสุดโดย Gradient Descent

ที่มา: กอบเกียรติ สระอุบล, 2565

## 5. หลักการของ Backpropagation และ Gradient Descent

บัญชา ปะสีละเตสัง (2564) ได้กล่าวว่า โมเดลจะมีความถูกต้องแม่นยำมากที่สุด เมื่อมีความผิดพลาดน้อยที่สุด ดังนั้นจึงเกิดปัญหาตามมาว่า ทำอย่างไรจึงจะลดข้อผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งค่าความผิดพลาดที่กล่าวมานี้ จะดูจากข้อแตกต่างระหว่าง ผลลัพธ์จริง (ในข้อมูลตัวอย่าง) กับค่าที่ทำนายผลจากโมเดล การคำนวณทั้งกรณีของ Single Layer Perceptron และ Multi-layer Perceptron มีรูปแบบสมการ คือ

$$y = x_1w_1 + x_2w_2 + x_3w_3 + \dots + x_nw_n + bias \quad (2.10)$$

แม้จะหาเอาต์พุตในขั้นตอนสุดท้ายได้ แต่อาจไม่ใช่ผลลัพธ์ที่ถูกต้องที่สุด ทั้งนี้ก็เพราะข้อมูลต่างๆ ที่นำมาใช้นั้นเป็นเพียงการสมมติขึ้นมาเท่านั้น ซึ่งหากพิจารณาในรูปการใช้งานจริง

ค่าอินพุตเริ่มแรกจะใช้ข้อมูลตัวอย่างที่นำมา Train Model แต่ค่าน้ำหนัก (Weight) จำเป็นต้องสมมติขึ้นมาเอง ดังนั้น สิ่งที่ต้องพิจารณา คือ ค่าน้ำหนักที่สมมติขึ้นมานั้นใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงเพียงใด โดยหากใกล้เคียงกับน้ำหนักจริงข้อผิดพลาดก็จะมีค่าน้อย แต่ถ้าค่าน้ำหนักที่สมมติขึ้นนั้นแตกต่างจากค่าน้ำหนักจริงมาก ข้อผิดพลาดจะมีค่ามากตามไปด้วย แสดงให้เห็นว่า หากเราต้องการให้โมเดลมีความแม่นยำในการทำนายผลมากที่สุด ต้องคำนวณหาค่าน้ำหนักที่มีความถูกต้องหรือใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงให้มากที่สุด เพื่อลดข้อผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดนั่นเอง เหล่านี้เป็นขั้นตอนที่มีความยุ่งยากต่อการเรียนรู้มากที่สุดของ Neural Network สำหรับการหาค่าน้ำหนักของ Neural Network มีแนวทางโดยสังเขป ดังนี้

1. เลือกข้อมูลตัวอย่างมา 1 แถว แล้วกำหนดเป็นค่าที่ขึ้น Input ส่วนค่าน้ำหนักและไบแอสให้สมมติโดยการสุ่มตัวเลข จากนั้นทำการคำนวณไปตามขั้นตอนดังที่กล่าวมา จนกว่าจะได้ผลลัพธ์สุดท้าย หรือผลการทำนายออกมา

2. หาความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์จริง (Actual) กับผลการทำนาย (Predict) หรือเรียกว่า Loss แต่เนื่องจากชั้น Output อาจมีมากกว่า 1 นิวรอน ดังนั้น จึงใช้วิธีการค่าเฉลี่ยในแบบ Mean Square Error (MSE)

3. เนื่องจากปัจจุบันยังไม่ทราบค่าน้ำหนักที่แท้จริงเป็นเท่าใด ดังนั้น จึงใช้หลักการของ Gradient Descent เพื่อหาค่าน้ำหนักที่ทำให้ข้อผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด โดยเทียบระหว่างค่า Loss ที่เกิดขึ้นกับน้ำหนักแต่ละค่าในรูปแบบของ Partial Derivative ( $\partial$ ) เช่น

$$\frac{\partial L}{\partial w_5} \quad (2.11)$$

โดยที่ L คือ Loss, w คือ Weight จากสมการ (2.11) หมายความว่า หากค่า  $w_5$  เปลี่ยนแปลงไป โดยให้น้ำหนักค่าอื่น ๆ เช่น  $w_1, w_2, \dots$  คงที่ จะมีผลให้ค่าความผิดพลาดหรือ Loss เพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งต้องทำเช่นนี้กับค่าน้ำหนักอื่น ๆ ที่เหลือจนครบทั้งหมด

4. เนื่องจากทำการคำนวณค่า Loss ที่ชั้น Output ดังนั้น การหาค่า Gradient จึงต้องเริ่มต้นที่ค่าเอาต์พุต แล้วย้อนกลับไปยังชั้นก่อนนี้ตามลำดับจนถึงชั้น Input โดยใช้วิธี Partial Derivative ในรูปแบบของ กฎลูกโซ่ (Chain Rule) ซึ่งมีลักษณะทั่วไป ดังนี้

$$\frac{\partial a}{\partial c} = \frac{\partial a}{\partial b} \cdot \frac{\partial b}{\partial c} \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial a}{\partial z} = \frac{\partial a}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial z} \quad (2.13)$$

5. เนื่องจากการหาค่า Gradient จะดำเนินการแบบย้อนกลับจากชั้น Output ไปยังชั้น Input ดังนั้น จึงเรียกขั้นตอนนี้ว่า Backpropagation

6. นำข้อมูลรายการอื่น ๆ ทำเช่นเดียวกัน จากนั้นอัปเดตค่าน้ำหนักจนกว่าจะได้ค่าน้ำหนักซึ่งให้ผลลัพธ์ซึ่งมีความถูกต้องมากที่สุด หรือมีข้อผิดพลาดน้อยที่สุดสำหรับข้อมูลชุดนั้น

วิธีการดังกล่าวมาเป็นแนวทางโดยสังเขป สำหรับกระบวนการนี้ยังมีลักษณะปลีกย่อยอื่นที่ต้องดำเนินการอีกมาก ซึ่งเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อน ด้วยเหตุนี้ ขั้นตอนของ Backpropagation จึงเป็นงานที่ยุ่งยากซับซ้อนเกินไป ดังนั้น โดยส่วนใหญ่จึงนิยมใช้ไลบรารีหรือโปรแกรมในการคำนวณมากกว่าที่จะคำนวณด้วยตนเอง

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่องการหาค่าที่เหมาะสมสปริงกลับของเครื่องซีเอ็นซีตัดท่อนพื้นฐานทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมนี้ ผู้วิจัยได้ทบทวนวรรณกรรมของงานวิจัยที่ผ่านมาจากฐานข้อมูล TCI (Thai Journal Citation Index Centre โดยใช้คำสำคัญว่า “สปริงกลับ” และ “ตัดท่อ” ตั้งแต่ พ.ศ.2550 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2565 และทำการคัดเลือกบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตัดท่อนตามแนวทางเกี่ยวข้องกัน ซึ่งมีจำนวนบทความทั้งสิ้น 6 บทความ ดังนี้

อุดมศักดิ์ ธัญญรักษ์ (2540) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสปริงกลับของอะลูมิเนียม A1100-H14 หนา 4.5 มิลลิเมตร และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 หนา 2 มิลลิเมตร ในการตัดท่อนโดยขึ้นรูปเป็นวงกลมที่ขนาดรัศมีการตัดโค้งที่ต่างกัน ในช่วง 20 ถึง 29 มิลลิเมตร กัดขึ้นรูป 2 ขั้นตอนจนเป็นรูปวงกลม โดยการสร้างแม่พิมพ์และติดตั้งบนเครื่องเพรส 100 ตัน บันทึกข้อมูลการสปริงกลับได้แก่ แรงที่ใช้กดและขนาดรัศมีหลังการขึ้นรูป จากการทดลองสรุปได้ว่าการทดสอบวัสดุทั้งสองชนิดนั้น ที่อัตราการตัด (R/t) น้อย มีการสปริงกลับน้อย และอัตราการตัด (R/t) มาก มีการสปริงกลับมาก ส่วนค่าความคาดเคลื่อนการสปริงกลับของค่าที่คำนวณกับค่าที่ทดลอง ในการขึ้นรูปของอะลูมิเนียม ขั้นตอนที่ 1 มากกว่าขั้นตอนที่ 2 อยู่ 0.156 เปอร์เซ็นต์ ในการขึ้นรูปเหล็กกล้าขั้นตอนที่ 1 มากกว่าขั้นตอนที่ 2 อยู่ 0.39 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าการสปริงกลับที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเครียดตกค้างภายในของชิ้นงานจริง ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ แรงที่ใช้กด และอัตราการตัด

ภาสกร เกวี (2545) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสปริงกลับของท่อเหล็ก ซึ่งเป็นท่อน้ำมันเบอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 มิลลิเมตร หนา 0.9 มิลลิเมตร ภายใต้โมเมนต์ดัด โดยการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งใช้ค่า

รัศมีการตัดโค้งที่ต่างกันในช่วง 12.4 ถึง 32.4 มิลลิเมตร พฤติกรรมวัสดุที่ใช้แบบจำลอง Power hardening law โดยนำทฤษฎีคานตรง ทฤษฎีคานโค้ง และทฤษฎีการเสียรูปโลหะของ Tresca มาประยุกต์ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการตีกลับ ผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า รัศมีการสปริงกลับมีค่ามากขึ้นเมื่อรัศมีที่ใช้ในการตัดมีค่ามากขึ้น และรัศมีการสปริงกลับมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดที่รัศมีตัด 32.4 มิลลิเมตร คิดเป็น 0.03 เปอร์เซ็นต์

อดิศร ไทยเจริญ (2550) ได้ทำการวิจัยแนวทางในการดำเนินการลดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการตัดท่อไอเสียรถยนต์ เน้นการลดของเสียจากการตัดท่อไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดในกระบวนการตรวจสอบ พบปัญหา คือ เกิดจากความผันแปรจากกระบวนการตัดท่อ ทำให้เกิดของเสียขึ้นในกระบวนการผลิตประมาณร้อยละ 7 ของชิ้นงานที่ผลิต จึงแก้ปัญหาเครื่องจักรตัดท่อไอเสียรถยนต์ โดยการเปลี่ยนชิ้นส่วนรวมถึงชุดอุปกรณ์ควบคุมเพื่อเพิ่มความแม่นยำและถูกต้องในการปรับตั้ง และเปลี่ยนวัตถุดิบในการผลิตชิ้นส่วน ได้ผลลัพธ์อัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกสำหรับชุดแม่พิมพ์ความดันเป็น 230 ความเร็วในการตัดของแกน C เป็น 3 และความดันของชุดแม่พิมพ์ความดันและแม่พิมพ์จับงาน เป็น 700 และ 1000 psi ตามลำดับ ซึ่งมีผลทำให้สามารถลดของเสียลงเหลือร้อยละ 2.64 ของชิ้นงานที่ผลิต และยังช่วยลดต้นทุนวัตถุดิบจากความไม่ได้คุณภาพอีกประมาณ 2,511,449 บาทต่อปี

วาสนา พรหมศิริพร, สิทธิ ใจ้ววัฒนา, อนันตพร ธรรมอร่ามกิจ, รวิวัฒน์ รักสัจ, ประพจน์ ขุนทอง และ เจตวิทย์ ภัครชพันธ์ุ (2554) ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องตัดท่อโดยใช้แรงคน และวิเคราะห์พฤติกรรมการตัดด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเป็นการลดต้นทุนและพัฒนาเครื่องตัดท่อเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กและอุตสาหกรรมขนาดย่อม จากการออกแบบและสร้างเครื่องตัดท่อพบว่าเครื่องตัดท่อสามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสมและสามารถรองรับการตัดท่อขนาดตามที่ต้องการได้ ผลการเปรียบเทียบการทดสอบด้วยเครื่องตัดท่อที่ได้ออกแบบขึ้นกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการตัดท่อ พบว่าผลการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับท่อ รวมถึงผลการวิเคราะห์การสปริงกลับของท่อ ให้ผลที่สอดคล้องกัน โดยท่อที่มีความหนาตั้งแต่ 1 มิลลิเมตรลงไปจะเกิดความเสียหายในลักษณะของการพับหรือการบุงขึ้น ในขณะที่การตัดท่อในความหนาตั้งแต่ 1.2 มิลลิเมตรขึ้นไปไม่พบความเสียหาย และผลการวิเคราะห์การตีตัวของท่อพบว่าเมื่อตัดท่อที่มีความหนาเพิ่มมากขึ้น ท่อที่ถูกตัดจะเกิดการสปริงกลับหรือเกิดการคลายการตัด ดังนั้น การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จึงสามารถนำมาช่วยในการออกแบบ และจำลองการทำงานของเครื่องตัดท่อให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้

พิทยาภรณ์ โกมาร (2555) ได้ทำการศึกษาการชดเชยการสปริงกลับของการตัดท่อทองแดง B88 และท่อสแตนเลส 904L เริ่มโดยการตรวจหาคุณสมบัติเชิงกลและสารผสมในเนื้อวัสดุ ชิ้นงานทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.52 มิลลิเมตร หนา 0.9 มิลลิเมตร ทำการตัดที่มุมองศาและรัศมี

ตัดต่าง ๆ ด้วยเครื่องตัดท่อซีเอ็นซี โดยควบคุมความเร็วในการตัด และนำชิ้นงานที่ได้ไปวัดหามุมองศา การสปริงกลับและนำค่าที่ได้ไปหามุมองศาขดเคียวการสปริงกลับจากการคำนวณทางทฤษฎีและจากการทดลอง ผลการทดลองพบว่า ท่อทั้งสองชนิดมีการสปริงกลับ ท่อที่มีความแข็งน้อยกว่าจะมีการสปริงกลับมากกว่า การสปริงกลับของท่อเพิ่มขึ้นเมื่อมุมองศาและรัศมีที่ใช้ในการตัดเพิ่มขึ้น โมเมนต์ดัดลดลงเมื่อมุมองศาและรัศมีที่ใช้ในการตัดเพิ่มขึ้น การตัดท่อในองศาที่มากกว่าจะได้องศาตามความต้องการ และเมื่อตัดท่อเลยจุดแรงดึงสูงสุดจะทำให้ชิ้นงานขาด

อรรถกร เก่งพล และวุฒิชัย ยังสว่าง (2558) ได้ทำการวิจัยการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคอนครีตเร็นท์ในการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการตัดท่อ โดยใช้แนวคิดด้านการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการตัดท่อด้วยการออกแบบกระบวนการผลิตใหม่ นำหลักการของวิศวกรรมคอนครีตเร็นท์และการจำลองสถานการณ์มาทำการวิเคราะห์และปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการ จากแนวทางดังกล่าวนี้สามารถกำหนดวิธีแก้ปัญหา โดยการออกแบบเครื่องมือและการออกแบบโปรแกรมของเครื่องตัดท่อใหม่ และเพื่อแก้ปัญหาปรับปรุงกระบวนการที่ซับซ้อนของพนักงานในการตัดท่อ จากการวิจัยพบว่ากระบวนการผลิตหลังปรับปรุง สามารถลดจำนวนของเครื่องตัดท่อได้ 1 เครื่อง และลดจำนวนของพนักงานได้ 2 คน ส่งผลให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการซื้อเครื่องตัดท่อได้ 2,300,000 บาท และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการจ้างพนักงานได้ 353,875 บาทต่อปี ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการตัดท่อเพิ่มขึ้นจากเดิม 50 เปอร์เซ็นต์

นอกจากการทบทวนวรรณกรรมของงานวิจัยที่ผ่านมาจากฐานข้อมูล TCI แล้ว ยังได้ทำการทบทวนวรรณกรรมจากฐานข้อมูลวารสารระดับนานาชาติ ScienceDirect และ Scopus โดยใช้คำสำคัญว่า “Springback optimization” และ “CNC tube bending” ตั้งแต่ พ.ศ.2550 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2565 และทำการคัดเลือกบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตัดท่อตามแนวทางเกี่ยวข้องกัน ซึ่งมีจำนวนบทความทั้งสิ้น 43 บทความ ดังแสดงในตาราง 11 พบว่ายังไม่มีงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่นำเสนอการนำเงื่อนไขด้านเวลา (Time Dependent) ในขั้นตอนการขึ้นรูปของเครื่องจักร มีเพียงการนำเงื่อนไขด้านเวลาก่อนและหลังจากการใช้เครื่องจักรเท่านั้น อีกทั้งยังพบว่าการนำทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้มีเพียง 6.97% ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้นำเงื่อนไขไม่พบจากการได้ทบทวนวรรณกรรมของงานวิจัยที่ผ่านมา นำเป็นเงื่อนไขและแนวทางที่เพิ่มขึ้นสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ เพื่อเพิ่มเติมในส่วนที่ยังขาดและส่วนที่นำเสนอเพิ่มเติม

Gheorghe, A., Lucian, L., Mioara, G. F., & Adrian, C. V. (2007) ได้ศึกษาการสปริงกลับจากการตัดท่อโดยใช้การออกแบบการทดลองและโครงข่ายประสาทเทียม โดยการทดลองแบบแฟคทอเรียลประเภท  $L_9 (3^4)$  เพื่อกำหนดความสำคัญสัมพันธของปัจจัย 4 ประการ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ความเครียด รัศมีการตัด และมุมตัด หาค่ามุมสปริงกลับของการตัดท่อเพื่อให้ได้ข้อมูลตัวแทนของการทดลอง หาอิทธิพลของความสัมพันธของแต่ละปัจจัยใช้วิธีการ ANOVA โดยได้กำหนด

อิทธิพลความสัมพันธ์ที่มีต่อองศาการสปริงกลับของปัจจัย 4 ปัจจัย ผลคือองศาการดัดมีความสำคัญที่สุด 46.79% ตามด้วยรัศมีการดัด 20.74% เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 19.08% และความเค้น 9.81% ในปัจจัยอื่น ๆ เช่น องศาการดัดที่แตกต่างกันระหว่าง  $60^\circ$  ถึง  $180^\circ$  มีค่าความเครียดระหว่าง 230 MPa และ 300 MPa และผลของการจำลองโครงสร้างประสาทเทียมพบว่าแบบจำลอง BPNN มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ ข้อดีของ ANN มีความสามารถในการเรียนรู้ ความสามารถในการสื่อสารทั่วไป และความสามารถในการปรับตัว ข้อเสียอย่างหนึ่งของ ANN คือต้องใช้เวลานานในการเลือกประเภทเครือข่ายที่เหมาะสมเพื่อแก้ไขปัญหาที่กำหนด เนื่องจากเครือข่ายประเภทต่าง ๆ มีมากมายสำหรับอัลกอริทึมในการเรียนรู้ และฟังก์ชันการถ่ายโอนซึ่งสามารถใช้ได้

Mentella, A., Strano, M., & Gemignani, R. (2008) ได้พัฒนาวิธีการคำนวณแบบใหม่ที่ช่วยให้ได้ค่าที่เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว โดยการควบคุมชิ้นส่วนเครื่องมือหลักบางชิ้นส่วน ได้แก่ บูสเตอร์และตายแรงดัน พิจารณาปัจจัยหลัก ได้แก่ ความหนา เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก รัศมีการดัด และมุมมององศาการดัด พบว่าอัตราการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของเครื่องมือช่วย (บูสเตอร์และตายแรงดัน) มีความสำคัญอย่างยิ่งในสภาวะการดัดขึ้นรูป Oliveira, D. A., & Worswick, M. J. (2009) ได้ศึกษาผลกระทบของกระบวนการดัดท่อและกระบวนการไฮโดรฟอร์มมิง (Hydroforming) ที่มีต่อลักษณะของโครงสร้างเป็นอลูมิเนียมอัลลอยด์รูปตัวเอส (S-Rail) โดยใช้เครื่องดัดท่อและแมนเดรลแบบเต็มรูปแบบด้วยเครื่องอัดไฮโดรฟอร์มมิง 1,000 ตัน เพื่อตรวจสอบผลกระทบของความรุนแรงในการดัดต่อความหนาและการกระจายความเครียดภายในท่อ ใช้การจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการดัดท่อและไฮโดรฟอร์มมิง พบว่าการดัด S-Rail ส่งผลให้ส่วนโค้งด้านนอกบางลงและด้านในของส่วนโค้งหนาขึ้น เนื่องจากความเค้นตามแนวแกนในบริเวณดังกล่าว ตัวแปรที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อระดับการเปลี่ยนแปลงความหนาและความเครียดในการดัด คือ ความรุนแรงของการโค้งงอ (Bend Severity)

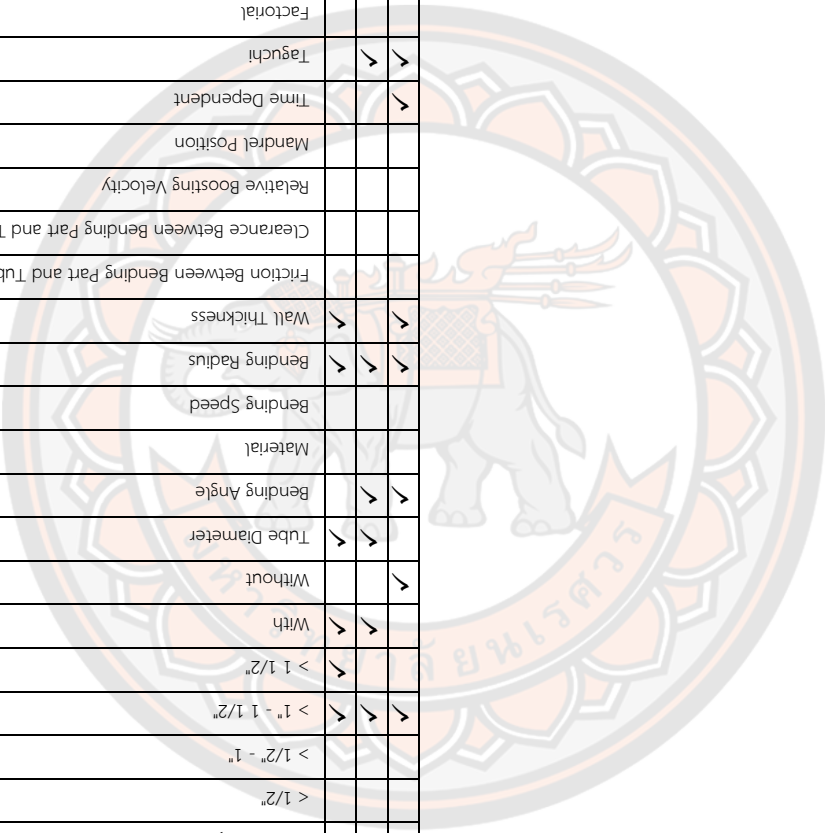
Daxin, E., & Liu, Y. (2010) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสปริงกลับและการสปริงกลับที่ขึ้นกับเวลาในการดัดท่อสแตนเลส เกรด 1Cr18Ni9Ti โดยดำเนินการกับเครื่องดัดท่อและสังเกตการสปริงกลับที่ขึ้นกับเวลาและการทำเครื่องหมายไว้ พบว่าการสปริงกลับที่ขึ้นกับเวลามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ R/d และตั้งข้อสังเกตว่าการสปริงกลับที่ขึ้นกับเวลาของท่อสแตนเลสนี้เป็นผลมาจากการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (Strain Hardening) Jiang, Z. Q., Yang, H., Zhan, M., Yue, Y. B., Liu, J., Xu, X. D., & Li, G. J. (2010) ได้ศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติของวัสดุบางประการและมุมมององศาการดัดต่อมุมสปริงกลับในการดัดด้วยเครื่องดัด NC ของท่อไทเทเนียมอัลลอยด์ เกรด TA18 และใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3D Elastic-plastic ทำการวิเคราะห์หลายตัวแปรและแบบเป็นขั้นตอน พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับท่อสแตนเลสและท่ออลูมิเนียมอัลลอยด์ มุมสปริงกลับของ







Article	Tube Material		Tube Diameter				Mandrel		Parameter										DOE			Model		FEM				Machine			
	Aluminum Alloy	Stainless Steel	< 1/2"	> 1/2" - 1"	> 1" - 1 1/2"	> 1 1/2"	With	Without	Tube Diameter	Bending Angle	Material	Bending Speed	Bending Radius	Wall Thickness	Friction Between Bending Part and Tube	Clearance Between Bending Part and Tube	Relative Boosting Velocity	Mandrel Position	Time Dependent	Taguchi	Factorial	Response Surface Methodology (RSM)	Neural Network	Other	Abaqus	LS-DYNA	ANSYS	Other	Machine in Lab	Machine Creating	Add Tooling for Test
A. Mentella et al. (2008)																															
Achimaş Gheorghe et al. (2007)																															
This work																															



โลหะผสมไททานเนียมภายใต้สภาวะการดัดแบบเดียวกันนั้นใหญ่กว่ามาก และความสัมพันธ์ระหว่างการสปริงกลับของท่อโลหะผสมไททานเนียม, Young's modulus, Yield stress, Strain hardening coefficient มีความคล้ายคลึงกับท่อสแตนเลสและอลูมิเนียมอัลลอยด์สำหรับการดัดด้วยเครื่อง NC

Yang, H., Li, H., & Zhan, M. (2010) ได้ทำการศึกษาการดัดแบบ Rotary Draw Bending (RDB) แบบควบคุมแรงเสียดทาน ในท่อชนิดผนังบางโดยการเน้นบทบาทของแรงเสียดทานเพื่อให้ได้การดัดที่แม่นยำภายใต้อัตราส่วนรัศมีการดัดขนาดเล็ก และใช้การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ร่วมกับการทดลองทางกายภาพ พบว่าผลกระทบของแรงเสียดทานต่อพฤติกรรมการดัดงอมีผลหลายประการ เช่น การย่น การผันแปรของความหนาผนังท่อ และการเสียรูปของหน้าตัด

Liu, Y. F., & Daxin, E. (2011) ได้นำเสนอแบบจำลองการวิเคราะห์ที่พิจารณาการเสียรูป Ovalization เพื่อคำนวณค่าสปริงกลับและความเครียดในแนวสัมผัสการดัดท่อ ซึ่งการสปริงกลับและหน้าตัดการเสียรูป Ovalization เป็นข้อบกพร่องที่สำคัญของการดัดท่อ ในการศึกษาเมื่อเทียบกับการคำนวณที่ไม่พิจารณาถึงการเสียรูป Ovalization พบว่าแบบจำลองที่ศึกษาสามารถทำนายแนวโน้มของมุมสปริงกลับได้ดีกว่าอัตราส่วนรัศมีการดัดงอและอัตราส่วนความหนาของผนังท่อ และเมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแบบจำลองนี้และการคำนวณที่ไม่พิจารณาถึงการเสียรูป Ovalization แสดงให้เห็นว่าผลกระทบของการเสียรูป Ovalization ในการสปริงกลับนั้นไม่สำคัญนัก เมื่ออัตราส่วนรัศมีการดัดและอัตราส่วนความหนาของผนังท่อมีขนาดที่มากเพียงพอ E, D. X., Guan, Z. P., & Chen, J. S. (2012) ได้ศึกษาอิทธิพลของแรงดึงที่เพิ่มขึ้นต่อการสปริงกลับของท่อภายใต้การดัดแบบ RDB การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าแรงดึงที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของ NL ไปยังจุดศูนย์กลางการดัดและทำให้พฤติกรรมการเสียรูปภายใต้การดัดแบบหมุนดึงหรือการดัดแบบควบคุมด้วยตัวเลข (NC) แตกต่างกับการดัดแบบธรรมดา และยังสามารถขยายมุมสปริงกลับได้หาก พิจารณาการเคลื่อนไหวของ NL ในบางช่วง มุมสปริงกลับจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอัตราส่วนความหนา/เส้นผ่านศูนย์กลางของผนังที่เพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อผนังบางลง

Jeong, H. S., Ha, M. Y., & Cho, J. R. (2012) ได้ทำการศึกษาการคาดการณ์ค่ามุมสปริงกลับของท่อ Inconel 625 ในระหว่างกระบวนการดัด โดยการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี Elastic และ Elastic เพื่อทำนายโมเมนต์ดัดและการสปริงกลับของท่อ สำหรับการสปริงกลับที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ เช่น Strength Coefficient, work hardening exponent และ Yield Strength ผลการศึกษาพบว่ารัศมีการดัดและอัตราส่วน D/t ของโลหะผสม Inconel 625 มีความแข็งแรงสูงและชุบแข็งได้สูงกว่าโลหะอื่น ๆ สำหรับการวิเคราะห์ FE เพื่อทำนายการสปริงกลับในสภาวะของมุมองศาการดัดในช่วง  $90^\circ$  ถึง  $180^\circ$  ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในช่วง 0.01 ถึง 0.1 และรัศมีการโค้งงอในช่วง 6.75 ถึง 25.75 มม. พบว่าเมื่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นจาก 0.01 เป็น 0.1 ความ

เค้นแรงดึงสูงสุดจะเพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการตัดท่อ และมุมสปริงกลับเพิ่มขึ้นหลังจากกระบวนการ

Li, H., Yang, H., Song, F. F., Zhan, M., & Li, G. J. (2012) ได้ศึกษาพฤติกรรมการสปริงกลับของวัสดุท่อไทเทเนียม High Strength Titanium Tube (HSTT) เกรด Ti-3Al-2.5V ที่มีความแข็งแรงสูง โดยการใช้ทฤษฎีการเสียรูปของพลาสติก (Plasticity Deformation), Explicit/Implicit 3D-FE และการทดลองทางกายภาพ พบว่าพฤติกรรมการสปริงกลับของวัสดุท่อ HSTT ในการตัดแบบโรตารี (RDB) ควรมีการชดเชยค่ามุมสปริงกลับ รัศมีการตัด ในขณะที่ส่วนที่ตัดขวางจะทำให้หน้าตัดแบนราบ ด้านตัวแปรของคุณสมบัติของวัสดุ และมิติทางเรขาคณิต (มุมตัดและรัศมีการโค้งงอ) มีอิทธิพลต่อกระบวนการตัด ทั้งค่ามุมสปริงกลับและรัศมีการตัด มุมสปริงกลับเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงด้วยมุมโค้งงอที่ใหญ่ขึ้น ในขณะที่การเติบโตของรัศมีการตัดจะผันผวนเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของมุมตัดที่ระยะการตัดภายหลัง ความผันแปรสูงสุดของมุมสปริงกลับและรัศมีการตัดด้วยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการประมวลผลคือ 78% และ 62.5% ตามลำดับ

Li, H., Yang, H., Tian, Y. L., Li, G. J., & Wang, Z. H. (2012) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสปริงกลับที่ขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของท่อผนังบางเมื่อขึ้นรูปเย็น โดยใช้ท่ออัลลอยด์ 6061-T4 ผนังบางที่มีความแข็งแรงปานกลาง ประกอบด้วยทฤษฎีการเสียรูปของพลาสติก (Plasticity) วิธี FEM และวิธีออกแบบการทดลอง ใช้เครื่องตัดแบบ RDB และสังเกตการสปริงกลับเชิงมุมและการเติบโตของรัศมี โดยเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) และความหนาของผนัง (t) พบว่า 1) เมื่อ D เพิ่มขึ้น ความเค้นแรงดึงสัมผัสจะเพิ่มขึ้นและค่าสัมประสิทธิ์ตามสัดส่วนลดลง ซึ่งทำให้มุมสปริงกลับลดลง ในขณะที่รัศมีสปริงกลับเพิ่มขึ้นเนื่องจากรัศมีการตัดที่ใหญ่ขึ้น 2) เมื่อค่า t เพิ่มขึ้น ความเค้นแรงดึงสัมผัสจะลดลงและค่าสัมประสิทธิ์ตามสัดส่วนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มุมสปริงกลับและรัศมีสปริงกลับเพิ่มขึ้น 3) ภายใต้อัตรา D/t เดียวกัน มุมสปริงกลับจะแปรผันเพียงเล็กน้อย ในขณะที่รัศมีสปริงกลับเพิ่มขึ้นตามเส้นผ่านศูนย์กลาง D/t ที่ใหญ่ขึ้น 4) สามารถใช้ D/t เป็นดัชนีและแนวทางที่เหมาะสมในการประเมินมุมสปริงกลับ สำหรับการเพิ่มของรัศมี ควรพิจารณาผลกระทบแต่ละอย่างของ D และ t

Liu, J., Yang, H., Zhan, M., & Jiang, Z. Q. (2012) ได้ศึกษาการทำนายผลของท่อโลหะผสมไททาเนียมแบบผนังหนาในการตัดแบบ RDB โดยพิจารณาจากผลกระทบด้านความแข็งแรง ด้วยการสร้างแบบจำลอง FEM ใหม่ซึ่งพิจารณาจาก Strength-Differential Effect (S-D Effect) เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ได้จากการทดสอบแรงดึง และแรงอัด ได้นำไปใช้กับบริเวณเส้นโค้งภายนอกและภายใน ผลจากการจำลองนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบเดิม โดยใช้คุณสมบัติแรงดึงของวัสดุเพื่อประเมินความแม่นยำในการทำนายรูปร่างของท่อ เมื่อเทียบกับ FEM แบบเดิม ผลการวิจัยพบว่า แบบปัจจุบันมีความน่าเชื่อถือมากกว่าสำหรับการทำนายผลของระดับความหนาของผนังระดับความผิดพลาดของหน้าตัด และมุมมองการสปริงกลับ เมื่อข้อกำหนดขนาดในการตัด  $\varnothing 14 \times$

1.35 x 42 และ  $\varnothing$  20 x 1.9 x 60 อย่างแม่นยำ (เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก x ความหนาของผนัง x รัศมีการดัด; มิลลิเมตร) ด้วยความแม่นยำที่เพิ่มขึ้นถึง 21%, 25% และ 17% ตามลำดับ

Ku, T. W., Cha, J. H., Kim, Y. B., Kwak, O. G., Kim, W. S., & Kang, B. S. (2013) ได้ทำการศึกษาการตรวจสอบเชิงตัวเลขและทดลองเกี่ยวกับกระบวนการตัดรูปด้วยสำหรับการผลิตท่อถ่ายเทความร้อนของท่อสแตนเลส เกรด SUS304L โดยการจำลองเชิงตัวเลข และวิเคราะห์องค์ประกอบไฟไนต์ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม ABAQUS Explicit/Implicit พิจารณาตัวแปรด้านกระบวนการ เช่น ความเร็วการตัด ระยะเวลาการตัดขึ้นรูปด้วย และมุมมองการตัด โดยคำนึงถึงการคืนตัว Elastic Recovery หลังจากการตัดรูปด้วย ในการศึกษาพบว่าคุณสมบัติสำคัญของตัวแปรสำหรับกระบวนการที่กำหนดคุณภาพผลิตภัณฑ์ของท่อรูปด้วย คือ ความเร็วการตัดที่สัมพันธ์กับระยะเวลาในการตัดขึ้นรูปท่อรูปด้วย (U-bending)

Li, H., Yang, H., Song, F. F., & Li, G. J. (2013) ได้เสนอวิธีการออกแบบเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับ TB โดยผสมผสานเทคโนโลยีหลายอย่างเข้าด้วยกัน เช่น วิศวกรรมฐานความรู้ การสร้างแบบจำลอง Parametric CAD และ Parametric Finite ตัวแปรการออกแบบ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ความหนาของผนัง รัศมีการดัด มุมองศาการดัด และประเภทวัสดุ พบว่า วิธีการสร้างแบบจำลองพารามิเตอร์ 3D-FE ได้รับการพัฒนาเพื่อประเมินความสามารถในการขึ้นรูปของการตัดท่อภายใต้ชุดเครื่องมือที่ออกแบบ การคาดคะเนเชิงปริมาณและความน่าเชื่อถือของการเปลี่ยนรูปในการตัดทำได้จริง รวมถึงการยุบ การยุบตัวของผนัง การเสียรูป และสปริงแบ็ค ด้วยการคำนวณสปริงแบ็คและการชดเชย จึงทำให้ระบบการออกแบบเครื่องมือตัดทำได้สำเร็จ

Li, H., Yang, H., & Liu, K. (2013) ได้ศึกษาความไม่เชิงเส้นของการสปริงกลับของท่อโลหะผสมไททาเนียมความแข็งแรงสูง Ti-3Al-2.5V เมื่อตัดแมนเดรล เกี่ยวกับการสปริงกลับทั้งเชิงมุมและรัศมี พฤติกรรมสปริงกลับแบบไม่เชิงเส้นของท่อไทเทเนียมความแข็งแรงสูง (HSTT) จากการตัดแบบสากล ได้แก่ การตัด RDB ผลการวิจัยพบว่า 1) ในช่วงแรกของการตัดโค้ง มุมสปริงกลับจะเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเส้นตรงด้วยองศาการตัดที่ใหญ่ขึ้น จากนั้นจะเพิ่มขึ้นในแนวเส้นตรงเมื่อมุมการตัดเกินค่าวิกฤติ ในขณะที่การเพิ่มของรัศมีลดลงแบบทวีคูณเมื่อมุมตัดเพิ่มขึ้นในระยะแรก จากนั้นจะยังคงไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมุมตัดเกินค่าวิกฤติอีกค่าหนึ่ง การสปริงกลับทำงานแบบไม่เชิงเส้นมากขึ้นภายใต้รัศมีการดัดที่เล็กลง ทั้งค่าวิกฤติสำหรับปรากฏการณ์สปริงกลับทั้งสองจะมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยรัศมีการดัดที่เล็กลง มุมวิกฤติสำหรับรัศมีสปริงกลับนั้นมากกว่ามุมสปริงกลับ 2) รัศมีการสปริงกลับสามารถประเมินได้จากมุมสปริงกลับของบริเวณการตัดของท่อ การเปลี่ยนแปลงของรัศมีการดัดมีผลอย่างมากต่อการสปริงกลับเชิงมุมและรัศมี

Song, F. F., Yang, H., Li, H., Zhan, M., & Li, G. J. (2013) ได้ศึกษาการทำนายการสปริงกลับของท่อ Ti-3Al-2.5V ขนาด 9.525 มม. ความหนาผนังท่อ 0.508 มม. พบว่า องค์ประกอบ

Solid และ Continuum Shell ทำนายผลการทดลองได้ดี ส่วนองค์ประกอบ C3D8R (8-node linear brick) จำเป็นต้องมี Influence of the number of elements through thickness ( $N_{EL}$ ) อย่างน้อย 3 เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้ Lei, G., & Xiaona, L. (2015) ได้ศึกษาการตัดท่อที่ทำจากโลหะผสมไททาเนียม ชนิดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่แต่ผนังบาง เช่น  $\varnothing 25 \times 0.5$  อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของผนังที่ 50 โดยมีจุดประสงค์เพื่อแก้ไขและหาเทคนิคใหม่ ๆ ทดแทนวิธีการขึ้นรูปแบบเดิม พบว่าวิธีการใหม่โดยการการออกแบบเครื่องมือตัดมีความเหมาะสม และได้ปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ประหยัดวัตถุดิบ ลดการสูญเสียของเสีย ลดรอบการผลิต ได้รับความนิยมนำมาใช้ และงานมีมูลค่าเพิ่มขึ้น

Lin, J. C., & Lee, K. (2015) ได้ศึกษาตัวแปรในกระบวนการตัดสำหรับท่อไร้รอยต่อด้วยใช้วิธีทากูชิและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (CAE) จากโปรแกรม ABAQUS 6.12 โดยการกำหนดตัวแปร ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ความหนาของผนังท่อ วัสดุ และรัศมีการตัด พบว่าการจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) สำหรับกระบวนการตัดก่อนการผลิตสามารถหลีกเลี่ยงการสูญเสียกำลังคนและวัตถุดิบ การทดสอบยืนยันดำเนินการตามตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีทากูชิ พบว่าข้อผิดพลาดของความเครียดระหว่างการจำลองด้วย CAE และการทดลองการตัดไม่เกิน 6.39%. Zhan, M., Huang, T., & Yang, H. (2015) ได้นำเสนอวิธีการใหม่โดยใช้ Digital Speckle Correlation Method (DSCM) ในการกำหนดค่า Contractile Strain Ratio (CSR) ในช่วงการเสียรูปขนาดใหญ่ เมื่อใช้วิธี CSR กับท่อไร้ตะเข็บโลหะผสมไทเทเนียม Ti-3Al-2.5V (ASTM Gr. 9) จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยลดลงอย่างรวดเร็วในระยะเริ่มต้น จากนั้นจึงลดลงอย่างช้า ๆ จนกระทั่งเสถียรในระยะสุดท้าย และเมื่อพิจารณาความแปรผันใน CSR สามารถช่วยปรับปรุงความแม่นยำในการจำลองของการตัดในด้านระดับการทำให้ผนังบาง ระดับความราบของหน้าตัดและมุมสปริงกลับ โดยมีการปรับปรุงมากที่สุดคือ 18.6%, 28.9% และ 22.4% ตามลำดับ

Zhan, M., Wang, Y., Yang, H., & Long, H. (2016) ได้สร้างแบบจำลองการวิเคราะห์การสปริงกลับของการตัดท่อโดยพิจารณาจากตัวแปรต่าง ๆ ของท่อไทเทเนียมอัลลอย โดยพิจารณาจากสถานะสมดุลสถิต (Static Equilibrium) เมื่อพิจารณาความแปรผันเหล่านี้แยกกันหรือรวมกัน มุมสปริงกลับที่ได้ทั้งหมดนั้นใหญ่กว่าและใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าผลลัพธ์ เมื่อไม่พิจารณาความแปรผันสำหรับท่อโลหะผสม Ti-3Al-2.5V Ti-3Al-2.5V ขนาด  $D6 \text{ มม.} \times t0.6 \text{ มม.}$  Ghiotti, A., Simonetto, E., Bruschi, S., & Bariani, P. F. (2017) ได้นำเสนอการวัดค่าสปริงกลับในกระบวนการตัดแบบสามลูกกลิ้งของชิ้นส่วนโครงสร้างกลวง โดยเสนอแนวทางการวัดใหม่โดยใช้เทคนิคการวัด Inertial ซึ่งช่วยให้สามารถวัดค่าเรขาคณิตโค้งงอได้แบบเรียลไทม์ในระหว่างกระบวนการ วิธีการใหม่นี้ใช้การวัดอัตราเชิงมุมและการเร่งความเร็วในระบบพิกัด 3 มิติ และช่วยให้สามารถกำหนดแกนตามยาวของส่วนโค้งส่วนกำหนดค่าก่อนที่จะปลดชิ้นงานออก Sofuoglu, M. A.,

Gürgen, S., Çakır, F. H., & Orak, S. (2017) ได้ศึกษาพฤติกรรมการสปริงกลับของท่อ AA6082T6 สำหรับการดัดแบบสามจุด (Three point Bending) โดยการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข และเปรียบเทียบผลกับผลลัพธ์จากการทดลองเพื่อตรวจสอบแบบจำลอง นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของระยะห่างของหัวกด และความหนาของท่อในสปริงกลับ พบว่าผลการจำลองสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี และเมื่อระยะห่างของหัวกดเพิ่มผลกระทบของสปริงกลับจะเพิ่มขึ้นในทางกลับกัน การสปริงกลับจะมากขึ้นเมื่อความหนาของผนังท่อเพิ่มขึ้น

Li, H., Ma, J., Liu, B. Y., Gu, R. J., & Li, G. J. (2018) ได้ศึกษาข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการ Neutral Layer Shifting (NLS) ในการดัดท่อ โดยการวิเคราะห์สถานะสมดุลของโมเมนต์และแรงในระหว่างการดัดท่อ เช่น พฤติกรรมแอนไอโซโทรปี/ความไม่สมมาตร และตัวแปรทางเรขาคณิต เช่น รัศมีการดัด เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และความหนาของผนัง ใช้การดัดแบบ RDB ใช้กับท่อ Ti-3Al-2.5 V ส่วนการดัดแบบกด (Press Bending) ใช้กับท่อ AZ31 และ A6063

Xue, X., Liao, J., Vincze, G., & Pereira, A. B. (2018) ได้นำเสนอกลยุทธ์การควบคุมสปริงกลับแบบปิดสำหรับท่อผนังบางแบบผสมอะลูมิเนียมอัลลอยด์ภายใต้การดัดแบบ RDB โดยใช้แมนเดรล ด้วยการควบคุมกระบวนการ 2 ลักษณะ เกี่ยวข้องกับการจัดวางจุกแมนเดรลและการใช้ตัวช่วยการกดตามแนวแกนเพื่อประเมินประสิทธิภาพการควบคุม ผลการจำลองพบว่าการจัดวางจุกแบบแมนเดรลส่งผลกระทบต่อมุมสปริงกลับตามยาวเป็นหลัก แต่ไม่บิดเบี้ยวในส่วนเส้นรอบวง มุมสปริงกลับจะเพิ่มขึ้นก่อนแล้วจึงลดลงหลังจากการทดสอบการจัดวางจุกแมนเดรลไปข้างหน้าหลายครั้ง ส่วนกลยุทธ์การใช้ตัวช่วยการกดตามแนวแกนสามารถลดการบิดเบี้ยวได้ แต่ไม่สามารถชดเชยมุมสปริงกลับได้ Derr, R., Jung, A., & Diebels, S. (2019) ได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมโดยอัตโนมัติของเครื่องมือสำหรับการปั๊มรอยนูน (Embossing) บนท่อ โดยการพัฒนาเครื่องมือจำลอง Graphical User Interface (GUI) สำหรับการตรวจสอบตัวเลขของกระบวนการขึ้นรูปท่อ ตัวแปรของวัสดุสำหรับแบบจำลอง Finite Element (FE) กำหนดเพื่อวิธีการทดสอบแรงดึง R. Safdarian (2019) ได้ศึกษาการทำนายความล้มเหลวของท่อซูเปอร์ฮีเตอร์ในกระบวนการดัด RDB โดยใช้แบบจำลองความเสียหายของ Gurson–Tvergaard–Needleman (GTN) ใช้สำหรับทำนายการแตกหักในการจำลองเชิงตัวเลขของท่อ RDB ระเบียบวิธีพื้นผิวการตอบสนองใช้เพื่อเพื่อระบุตัวแปรของ GTN พบว่ามีความใกล้เคียงระหว่างตำแหน่งการแตกหักที่คาดการณ์ไว้ในการจำลองเชิงตัวเลขและจากการทดลองหลังจากใช้กระบวนการ RDB

Borchmann, L., Heftrich, C., & Engel, B. (2020) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความผิดของแกนเครื่องต่อการเกิดรอยร่นระหว่างการดัดแบบ RDB โดยการจำลองด้วย FEM โดยคำนึงถึงความผิดของแต่ละแกนของเครื่อง ผลลัพธ์แสดงให้เห็นอิทธิพลของความผิดของแกนของ Bend Die, Wiper Die, Pressure Die และ Mandrel ที่ทำให้เกิดรอยร่นที่ส่วนโค้งด้านใน Li, Y. S., Li, A. D.,

Yue, Z. M., Qiu, L. Y., Badreddine, H., Gao, J., & Wang, Y. G. (2020) ได้ศึกษาการพยากรณ์การสปริงกลับของท่อ AL6061 ในกระบวนการตัดแบบอิสระโดยใช้ FEM และวิเคราะห์ผล มีการสร้างแบบจำลอง FEM ของกระบวนการตัดแบบอิสระ อิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการ เช่น แรงเสียดทาน ช่องว่าง และรูปร่างของชิ้นส่วนแม่พิมพ์เคลื่อนที่ ที่มีต่อการสปริงกลับ ผลการวิจัยพบว่าค่า Neutral Layer Offset มีแนวโน้มที่จะเคลื่อนไปสู่ทิศทางการรับแรงดึงของวัสดุในกระบวนการตัดแบบอิสระ ซึ่งแตกต่างจากการตัดแบบโรตารีแบบดั้งเดิม

Ma, J., Ha, T., Blindheim, J., Welo, T., Ringen, G., & Li, H. (2020) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเสื่อมสภาพตามธรรมชาติก่อนและหลังการดำเนินการขึ้นรูปของการสปริงกลับในการตัดท่อโลหะผสม Al-Mg-Si โดยอาศัยหลักการ Time Dependent จากงานวิจัยสามารถทำให้มีความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับอิทธิพลของการเกิด Pre/Post Aging ของการสปริงกลับ ซึ่งสามารถช่วยในการควบคุมความถูกต้องของผลิตภัณฑ์ท่อโลหะผสมอัลลอยด์ที่ตัดโค้งได้ Podder, B., Banerjee, P., Kumar, K. R., & Hui, N. B. (2020) ได้ทำการสร้างแบบจำลอง Forward และ Reverse Modelling ของการขึ้นรูปการไหลของการอบอ่อนท่ออลูมิเนียมเกรด H30 โดยทำการทดลองทั้งหมด 136 ครั้ง เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของ Feed Speed Ratio, Roller Infeed และ Axial Stagger ที่มีต่อ 3 Output ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน การสปริงกลับและ Ovality ใช้แนวทางเครือข่ายประสาทเทียม 3 วิธี คือ Back Propagation Neural Network, Limited Memory BFGS Network และ Genetic Neural System จากนั้นทำการวัดประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 3 แล้วนำมาเปรียบเทียบด้วยการวิเคราะห์การถดถอย ผลการวิจัยพบว่า GANN ทำงานได้ดีกว่าวิธีอื่นมาก เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการทำนาย Ovality โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยนั้นแย่มากที่สุด และจำเป็นต้องพิจารณาตัวแปรกระบวนการอื่นเพิ่มเติมเพื่อความแม่นยำในการทำนายที่ดีขึ้น และพบว่าความแม่นยำในการทำนายโดยใช้ LBFGSNN นั้นดีกว่าวิธีอื่น

Safdarian, R. (2019) ได้ศึกษาการตรวจสอบการแตกหักของท่อในกระบวนการตัดแบบ RDB ด้วยวิธีการทดลองและเชิงตัวเลข สำหรับการวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองความเสียหายของ GursonTvergaard Needleman (GTN) ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขของ RDB สำหรับการทำนายการแตกหักของท่อเหล็ก เกรด BS 3059 ผลการวิจัยพบว่าการใช้ค่าในการให้ความเร็วที่เพิ่มขึ้นของชิ้นส่วน Pressure Die ทำให้ท่อแตก และใช้ค่าที่สูงมีแนวโน้มในการเกิดรอยร้าวของผนังด้านในของท่อ และพบว่ามีแนวโน้มในการแตกหักเพิ่มขึ้นหากเพิ่มจำนวนลูกแมนเดรลและลดระยะห่างระหว่างตำแหน่งแมนเดรลกับจุดศูนย์กลางการตัด ความรีของท่อจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดจำนวนลูกแมนเดรลและเพิ่มระยะห่างระหว่างตำแหน่งแมนเดรลกับศูนย์กลางการตัด และ Safdarian, R. (2020) ได้ศึกษาการตรวจสอบการแตกหักของท่อในกระบวนการท่อแบบ RDB ด้วยวิธีการทดลองและเชิงตัวเลข

Zhang, S., Fu, M., Wang, Z., Lin, Y., & He, C. (2020) ได้ศึกษาการพยากรณ์การเกิดการสปริงกลับของท่อโลหะสองชั้น (Bi-Layered) ด้วยการตัดโดยใช้เครื่องตัดท่อ CNC เมื่อพิจารณาถึงการสกัดด้วยการเปลี่ยนเลเยอร์ที่เป็นกลาง โดยพิจารณาตัวแปรตัวแปร ได้แก่ Composite elastic modulus และ Composite strain neutral layer ผลการวิจัยพบว่า ผลทางทฤษฎีใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าผลจากการทดลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FE) สำหรับการศึกษการเปลี่ยนแปลงของมุมสปริงกลับด้วยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างชั้น ผลการวิจัยพบว่าท่อ Bimetallic ที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างชั้นต่ำกว่า 0.3 สามารถลดการสปริงกลับได้

Ghiotti, A., Simonetto, E., & Bruschi, S. (2021) ได้ศึกษาข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการตัดท่อแบบ RDB ด้วยการให้ความร้อนเฉพาะพื้นที่ โดยทำการวิเคราะห์เพื่อให้การพยากรณ์ที่รวดเร็วของการกระจายความเค้นและความเครียดในส่วนตัดขวาง (Cross-Section) และผลกระทบต่อสปริงกลับอันเป็นผลมาจากตัวแปรทางความร้อนและทางกลของกระบวนการ แนวทางที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำในการทำนายการกระจายความหนาแน่นสำเร็จทั่วบริเวณหน้าตัดตรงของท่อ โดยมีข้อผิดพลาดต่ำกว่า 9.3% และมุมสปริงกลับมีข้อผิดพลาดต่ำกว่า 0.5 องศา สำหรับการตัดโค้ง 90 องศา

Ma, J., Li, H., & Fu, M. W. (2021) ได้ทำการศึกษาแนวทางการวิเคราะห์การสริงกลับแบบจำลองของ Springback ในการตัดท่อ Ti-3Al-2.5V ทำให้สามารถวิเคราะห์การสปริงกลับสำหรับการตัดท่อได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ โดยการพิจารณาอย่างครอบคลุมถึงตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ รูปทรงเรขาคณิต และกระบวนการ โดยทำการสร้างแบบจำลองเชิงวิเคราะห์สำหรับการแก้ปัญหาการกระจายความเค้น/ความเครียดในการเสียรูปจากการตัดแบบจำลองการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินอย่างรอบคอบ ซึ่งแสดงให้เห็นประสิทธิภาพที่ดีจากแบบจำลองสำหรับการพยากรณ์การสปริงกลับกรณีการขึ้นรูปมุม  $\geq 90$  องศา มีข้อผิดพลาดต่ำกว่า 5.79% นอกจากนี้ Ma, J., Welo, T., & Wan, D. (2021) ยังได้ศึกษาผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ในกระบวนการตัดท่ออะลูมิเนียม AA6060 แบบผสมผสาน โดยการทดลองที่ควบคุมกระบวนการจากเส้นทางการผลิต 4 เส้นทาง ผลกระทบของเส้นทางการผลิตที่มีต่อมิติทางเรขาคณิตขั้นสุดท้ายและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นส่วนที่ตัด เส้นทาง R1 และ R3 ช่วยลดการสปริงกลับได้ถึง 50% และทำให้ผนังบางลง 26% อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาถึงความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ สำหรับเส้นทางที่มี AA นั้น R3 สามารถปรับปรุงความแข็งได้ถึง 16% เมื่อเทียบกับ R1 สำหรับเส้นทางที่ไม่มี AA ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เป็น T4-temper โดย R4 สามารถทำให้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงกว่า R2 ถึง 20 % ยิ่งไปกว่านั้น เส้นทาง R1 และ R3 สามารถสร้างการกระจายความแข็งที่สม่ำเสมอมากขึ้นในส่วนตัดขวางของท่อที่โค้งงอได้มากกว่าอีกสองเส้นทาง หมายความว่า AA ช่วยลดผลกระทบจากการแข็งตัวก่อนการเสียรูป โดยการค้นพบทั้งหมดนี้เป็นพื้นฐาน



ฐานความรู้สำหรับการเลือกเส้นทางการผลิตที่เหมาะสม เช่นเดียวกับการออกแบบเส้นทางใหม่ที่กำหนดเองสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ท่ออะลูมิเนียมที่มีมูลค่าเพิ่มอย่างมีประสิทธิภาพ

Simonetto, E., Ghiotti, A. & Bruschi, S. (2021) ได้ศึกษาการวัดค่ามุมสปริงกลับในกระบวนการตัดแบบ RDB โดยใช้เทคนิคการวัดในกระบวนการที่พัฒนาขึ้นใหม่ และนำเสนอการประเมินการวัดแรงสปริงกลับแบบเฉื่อยในระหว่างกระบวนการ เป็นการตรวจสอบด้วยการใช้ฟังก์ชันด้านตำแหน่งของเกจวัดและการกระจายความเครียดของภาคตัดขวางตามแนวโค้ง Wang, W., Hu, S. H., Abd El-Aty, A., Wu, C., Yang, Q. C., Chen, H., Shen, Y., & Tao, J. (2021) ได้ศึกษาวิเคราะห์การสปริงกลับของค่า A-Value ที่แตกต่างกันของท่อทองแดง และอลูมิเนียมสำหรับการตัดขึ้นรูปแบบอิสระ โดยการทดลองและการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รัศมีการตัดของท่อที่ขึ้นรูปถูกวัดด้วย ABAQUS ร่วมกับการคำนวณทางเรขาคณิต ผลการวิจัยพบว่า เมื่อค่า A สูง มุมตัดจะสูง รัศมีการตัดจะต่ำ และมุมสปริงกลับจะมากขึ้น ความแปรผันของความเครียดและมุมสปริงกลับในแต่ละส่วนของกระบวนการตัดท่อ T2-Cu นั้นสูงกว่าท่อ AA6061-T6

Wu, J., & Zhang, Z. (2021) ได้นำเสนอการพัฒนาขั้นตอนการผลิตท่อ 3 มิติ ต่อการเกิดสปริงกลับที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตัดแบบยืดหยุ่น โดยใช้กลยุทธ์ ได้แก่ 1) กำหนดรูปร่างที่ต้องการและรูปร่างการผลิต (2) ปรับรูปร่างการผลิตให้เหมาะสมโดยใช้วิธีการออกแบบ 3) แยกแยะรูปร่างการผลิตเพื่อให้ได้ตัวแปรการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุด และใช้การทดสอบประสิทธิภาพด้วยกลยุทธ์ใหม่ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการสร้างตัวแปรจากจากกลยุทธ์ใหม่นั้นมีผลเพียงบางส่วน Zhang, S. Y., Fu, M. Y., Wang, Z. L., Fang, D. Y., Lin, W. M., & Zhou, H. F. (2021) ได้สร้างแบบจำลองการพยากรณ์การสปริงกลับและวิธีการชดเชยสำหรับการตัดขึ้นรูปท่อโลหะที่มีความโค้งแปรผัน ซึ่งอ้างอิงจากสูตรทางทฤษฎีของการทำนายมุมการสปริงกลับของท่อความโค้งคงที่ รัศมีความโค้งของจุดใดๆ บนเส้นโค้งแกนกลางท่อหลังจากสปริงกลับสามารถคำนวณได้ผ่านแบบจำลองนี้ ผลการวิจัยพบว่าวิธีการที่นำเสนออยู่นั้นอยู่ในระดับดีสำหรับการทำนายความโค้งแบบผันแปรของการสปริงกลับจากการตัดท่อโลหะ

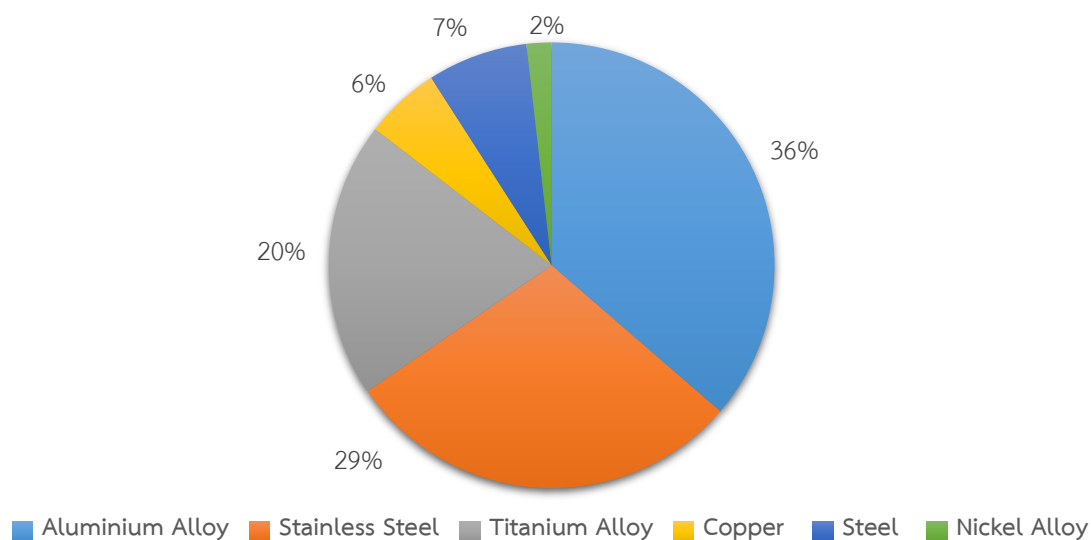
Zhou, H. F., Zhang, S. Y., Qiu, L. M., & Wang, Z. L. (2021) ได้ศึกษาการทำนายผลการสปริงกลับของท่ออะลูมิเนียม 6060-T6 โดยพิจารณาผลกระทบของหน้าตัดของท่อจากการใช้เมนเดรลบนเครื่องตัดท่อแบบ RDB โดยการแยกแยะตัวแปรที่มีผลต่อการสปริงกลับ ได้แก่ องศาการตัด, รัศมีการตัด, ความหนาผนังท่อ, แรงเสียดทานระหว่าง Bending Die กับท่อ, ช่องว่างระหว่าง Bending Die กับท่อ, แรงเสียดทานระหว่าง Pressure Die กับท่อ, ช่องว่างระหว่าง Pressure Die กับท่อ, แรงเสียดทานระหว่าง Wiper Die กับท่อ, ช่องว่างระหว่าง Wiper Die กับท่อ และ boosting velocity ประยุกต์ใช้วิธีการของทากูชิ และวิเคราะห์ผลจาก FE Simulation และ ANOVA จากนั้น นำตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าการตีกลับและหน้าตัดของท่อ Training ใน

D2CVAE-GAN, AE-RBF Model และ IoCSD-SAP ผลการทดลองพบว่า ค่าความผิดพลาดเปอร์เซ็นต์สัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) สำหรับมุมมองการตีกลับของวิธีการที่นำเสนอ คือ 4.73% และแบบจำลองการวิเคราะห์สามแบบที่แตกต่างกันคือ 38.92%, 14.39% และ 14.22% ตามลำดับ

Fu, M., Wang, Z., Zhang, S., Liu, X., Lin, Y., & Wang, L. (2022) ได้ศึกษาลักษณะการเสีรूपของส่วนตัดขวางของท่อ Bimetallic Cu/Al ภายใต้การตัดแบบ RDB ตามโปรไฟล์หน้าตัดด้านนอกโดยเส้นโค้ง B-spline ที่ขับเคลื่อนด้วยฟิสิกส์ (physics-driven) ผลการวิจัยพบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างโปรไฟล์ทางทฤษฎีกับโปรไฟล์การทดลองแสดงให้เห็นข้อผิดพลาดเส้นรอบวงโดยเฉลี่ยของโปรไฟล์เชิงทฤษฎีอยู่ที่ 1.82% ซึ่งน้อยกว่าข้อผิดพลาดของโปรไฟล์การทดลองสำหรับทำให้เกิดความริบแบบดั้งเดิมมาก นอกจากนี้ การเสีรूपทั้งภาคตัดขวางได้รับผลกระทบจากความหนาของผนังที่แตกต่างกัน ผนังชั้นนอกและชั้นในที่บางลงมักจะแสดงแนวโน้มตรงกันข้ามเมื่อความหนาของผนังแตกต่างกันไป

Li, H., Zhang, L., Chen, G., Ma, J., Wei, D., Bian, T., Yang, J., Wu, c., Yang, H. (2022) ได้ศึกษาการสปริงกลับขึ้นอยู่กับเวลา (Time-dependent) ของวัสดุท่อไททาเนียม Ti-3Al-2.5V ที่มีความแข็งแรงสูง (HSTT) โดยการทดลองและการสร้างแบบจำลอง ผลการวิจัยพบว่า ความเค้นตกค้างและวิวัฒนาการการเคลื่อนที่ของ HSTT ระหว่างการตัดก่อให้เกิดการสปริงกลับทันที การสปริงกลับที่ขึ้นกับเวลานั้นได้รับการทดลอง 6 ครั้ง มีการใช้แบบจำลองที่ผ่านการตรวจสอบเพื่อสำรวจกฎวิวัฒนาการของสปริงแบ็คที่ขึ้นอยู่กับเวลาและความเค้นตกค้างของ HSTT เมื่อมีการโค้งงอและมีการชี้แจงผลกระทบที่ขึ้นกับประวัติการเสีรूपของสปริงแบ็คที่ขึ้นกับเวลาสำหรับส่วนประกอบที่มีการตัดหลายจุดในเชิงพื้นที่ ซึ่งการค้นพบและวิธีการของการศึกษานี้สามารถช่วยให้เกิดผลสำเร็จในการผลิตชิ้นส่วนท่อประสิทธิภาพสูงที่มีความแม่นยำสูงขึ้น

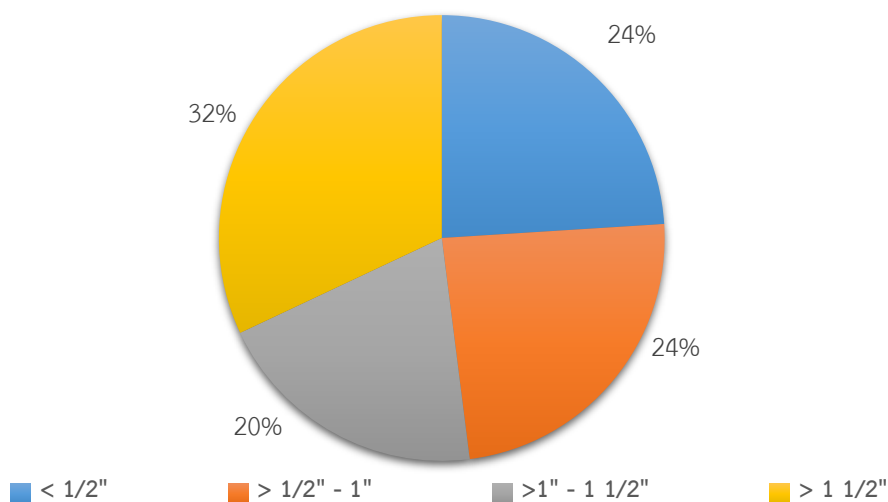
Zhang, H., & Hu, Y. (2022) ได้ศึกษาอิทธิพลของแรงที่เพิ่มขึ้นของชิ้นส่วน Pressure Die ต่อคุณภาพการขึ้นรูปในกระบวนการตัดท่อผนังบาง โดยการสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์ท่อผนังบาง การสปริงกลับ และการยึดตัวตามแนวแกนภายใต้การเพิ่มแรงดันของชิ้นส่วน Pressure Die ถูกสร้างขึ้นตามลำดับ โดยพิจารณาจากผลกระทบของพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตและวัสดุ มีการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FE) เพื่อจำลองกระบวนการตัดท่อและการสปริงกลับ ผลการวิจัยพบว่า การเพิ่มแรงดันแม่พิมพ์สามารถลดการเกิดความหนาของผนังและการยึดตัวตามแนวแกนของท่อที่ตัดงอได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มุมสปริงกลับจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก แรงกด และผลกระทบต่อคุณภาพการขึ้นรูปจะเพิ่มขึ้น



ภาพ 32 จำนวนการเลือกใช้วัสดุท่อจากการทดสอบการทนการกัดกร่อน

สำหรับการทดสอบการทนการกัดกร่อนในส่วนของคุณสมบัติของวัสดุของท่อ (Tube Material) จะเห็นได้ว่า จากผู้วิจัยทั้งสิ้น 43 ท่าน สามารถแบ่งชนิดของวัสดุท่อที่นำมาใช้ในการวิจัยออกเป็น 6 ชนิด ได้แก่ ท่ออลูมิเนียมผสม (Aluminium Alloy Tube), ท่อสแตนเลส (Stainless Steel Tube), ท่อไทเทเนียมผสม (Titanium Alloy Tube), ท่อทองแดง (Copper Tube), ท่อเหล็ก (Steel Tube) และท่อนิกเกิลผสม (Nickel Alloy Tube) และบางงานวิจัยได้ดำเนินการในหลาย ๆ วัสดุด้วยกัน โดยจำนวนจากการทดสอบการทนการกัดกร่อนด้านชนิดวัสดุท่อ ได้แก่ ท่ออลูมิเนียมผสม 36%, ท่อสแตนเลส 29%, ท่อไทเทเนียมผสม 20%, ท่อทองแดง 6%, ท่อเหล็ก 7% และท่อนิกเกิลผสม 2% ดังแสดงจำนวนการเลือกใช้แต่ละวัสดุท่อตามภาพ 32

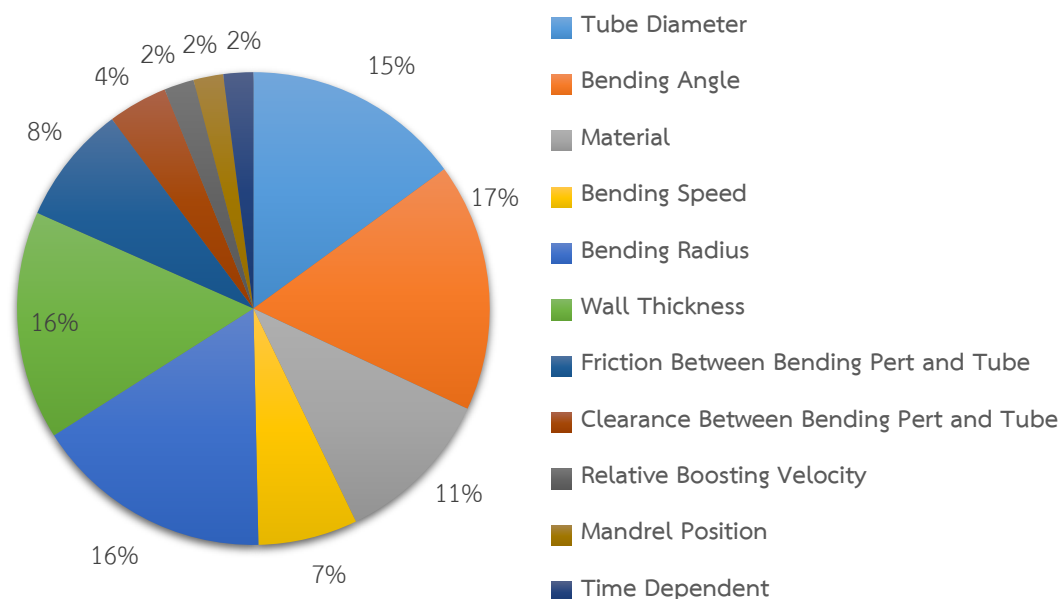
สำหรับการทดสอบการทนการกัดกร่อนในส่วนของคุณสมบัติของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (Tube Diameter) จากผู้วิจัยทั้งสิ้น 43 ท่าน แบ่งช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อได้ 4 ช่วงขนาด ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า  $\frac{1}{2}$  นิ้ว, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า  $\frac{1}{2}$  นิ้ว จนถึง 1 นิ้ว, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1 นิ้ว จนถึง  $1\frac{1}{2}$  นิ้ว และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า  $1\frac{1}{2}$  นิ้ว ขึ้นไป โดยจำนวนความถี่จากการทดสอบการทนการกัดกร่อนด้านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า  $\frac{1}{2}$  นิ้ว 24%, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า  $\frac{1}{2}$  นิ้ว จนถึง 1 นิ้ว 24%, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1 นิ้ว จนถึง  $1\frac{1}{2}$  นิ้ว 20% และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า  $1\frac{1}{2}$  นิ้ว ขึ้นไป 32% โดยจำนวนในการเลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจากการทดสอบการทนการกัดกร่อนเพื่อนำมาทำการวิจัยดังแสดงตามภาพ 33



ภาพ 33 จำนวนการเลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจากการทบทวนวรรณกรรม

ดังจะเห็นได้ว่าแต่ละงานวิจัยนั้นได้ดำเนินการโดยเป็นไปตามสภาพของชนิดวัสดุที่ต้องการวิจัยหน้างานของแต่ละท่านตามความจำเป็น สำหรับงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวิจัยร่วมและดำเนินการเก็บข้อมูลร่วมกับหน่วยงานภายในโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (กฟผ.แม่เมาะ) จังหวัดลำปาง ซึ่งวัสดุท่อโดยส่วนใหญ่เป็นท่อเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ดังนั้น เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อหน่วยงานดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ท่อเหล็ก (Steel Tube) เป็นท่อไร้ตะเข็บเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Seamless Cold Drawn Medium Carbon Steel Tube) เกรด ASTM A-210 Gr. A1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $1\frac{3}{4}$  นิ้ว หรือ 44.45 มิลลิเมตร สำหรับใช้ในการวิจัย ซึ่งเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและวัสดุที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยปราศจากการใช้แมนเดรล (Mandrel) อ้างอิงจาก Ma, J., Ha, T., Blindheim, J., Welo, T., Ringen, G., & Li, H. (2020) เนื่องจากสัดส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกต่อความหนาอยู่ในช่วง 7-10 มม. ( $OD/t \leq 20$ )

สำหรับการทบทวนวรรณกรรมในส่วนของตัวแปรนำเข้า (Input Parameter) เพื่อนำมาเป็นปัจจัยนำเข้าในการทดลอง จากจำนวนผู้วิจัยทั้งสิ้น 43 ท่าน สามารถแบ่งตัวแปรนำเข้าสำหรับการตัดท่อได้ 11 ตัวแปร ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (Tube Diameter), มุมองศาการตัด (Bending Angle), วัสดุท่อ (Material), ความเร็วในการตัด (Bending Speed), รัศมีดัด (Bending Radius), ความหนาผนังท่อ (Wall Thickness), แรงเสียดทานระหว่างชิ้นส่วนเครื่องมือกับท่อ (Friction Between Bending Pert and Tube), ช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนเครื่องมือกับท่อ (Clearance Between Bending Pert and Tube), ความเร็วสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น (Relative Boosting



ภาพ 34 จำนวนการเลือกใช้ตัวแปรนำเข้าในการตัดท่อจากการทบทวนวรรณกรรม

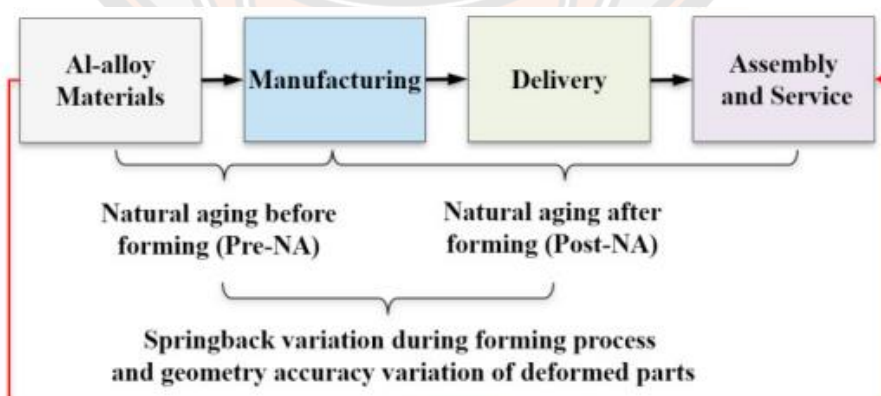
Velocity), ตำแหน่งของเมนเดรล (Mandrel Position) และเงื่อนไขเวลา (Time Dependent) โดยจำนวนความถี่จากการทบทวนวรรณกรรมด้านตัวแปรนำเข้า ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 15%, มุมองศาการตัด 17%, วัสดุท่อ 11%, ความเร็วในการตัด 7%, รัศมีการตัด 16%, ความหนาท่อ 16%, แรงเสียดทานระหว่างชิ้นส่วนเครื่องมือกับท่อ 8%, ช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนเครื่องมือกับท่อ 4%, ความเร็วสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น 2%, ตำแหน่งของเมนเดรล 2% และเงื่อนไขเวลา 2% โดยจำนวนในการเลือกใช้ตัวแปรนำเข้าในการตัดท่อจากการทบทวนวรรณกรรมเพื่อนำมาทำการวิจัยดังแสดงตามภาพ 34

จากการทบทวนวรรณกรรมในส่วนของตัวแปรนำเข้า (Input Parameter) จะเห็นได้ว่าตัวแปรที่นิยมนำมาเป็นปัจจัยสำหรับการทดลองและวิจัย 4 ลำดับแรก ได้แก่ มุมองศาการตัด (Bending Angle), รัศมีการตัด (Bending Radius), ความหนาผนังท่อ (Wall Thickness) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (Tube Diameter) สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวแปรนำเข้า 3 ลำดับแรกข้างต้น ได้แก่ มุมองศาการตัด, รัศมีการตัด และความหนาท่อ มาใช้สำหรับการทดลองในการวิจัยครั้งนี้ เนื่องจากบุคลากรผู้เชี่ยวชาญด้านการใช้เครื่องจักรสำหรับการตัดท่อในหน่วยงานโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (กฟผ.แม่เมาะ) จังหวัดลำปาง มีความเห็นร่วมกันสำหรับการเลือกปัจจัยดังกล่าว และเนื่องจากเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมในการทดลองได้ ส่วนปัจจัยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (Tube Diameter) สำหรับการวิจัยนี้เลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44.45 มิลลิเมตร โดยคงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและแบ่งความหนาท่อ (Wall Thickness) ออกเป็น 3 ขนาดความหนา (3 ระดับ)

ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและขนาดความหนาที่ใช้ภายในหน่วยงานโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (กฟผ.แม่เมาะ) จังหวัดลำปาง สำหรับใช้ในการทดลอง

สำหรับปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับอิทธิพลการเกิดการสปริงกลับ คือ เงื่อนไขด้านเวลา (Time Dependent) ที่ผ่านมามีการศึกษา ดังนี้ Daxin, E., & Liu, Y. (2010) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสปริงกลับและการสปริงกลับที่ขึ้นกับเวลาในการตัดท่อสแตนเลส เกรด 1Cr18Ni9Ti ส่วน Ma, J., Ha, T., Blindheim, J., Welo, T., Ringen, G., & Li, H. (2020) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเสื่อมสภาพตามธรรมชาติก่อนและหลังการดำเนินการขึ้นรูปของการสปริงกลับในการตัดท่อโลหะผสม Al-Mg-Si โดยอาศัยหลักการ Time Dependent เป็นการศึกษามุมสปริงกลับในการขึ้นรูปและมิติทางเรขาคณิต โดยอาศัยเงื่อนไขด้านเวลา (Time Dependent) ก่อน-หลังจากการขึ้นรูปเท่านั้น ดังแสดงตามภาพ 35 การวิจัยครั้งนี้ ได้นำปัจจัยเงื่อนไขด้านเวลา (Time Dependent) ในกระบวนการผลิต (Manufacturing) หรือขั้นตอนการตัดโดยเน้นในขณะที่กำลังดำเนินการตัดรวมเข้าไว้ด้วย

กล่าวโดยสรุปสำหรับปัจจัยนำเข้าในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ ได้แก่ มุมองศาการตัด (Bending Angle), รัศมีดัด (Bending Radius), ความหนาผนังท่อ (Wall Thickness) และเงื่อนไขด้านเวลา (Time Dependent) โดยเลือกใช้ท่อเหล็ก (Steel Tube) เป็นท่อไร้ตะเข็บเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Seamless Cold Drawn Medium Carbon Steel Tube) เกรด ASTM A-210 Gr. A1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $1\frac{3}{4}$  นิ้ว หรือ 44.45 มิลลิเมตร สำหรับใช้ในการวิจัย เป็นการนำช่องว่างของการศึกษาการสปริงกลับในการตัดท่อก่อนหน้า หลังจากการทบทวนวรรณกรรมมาทำการวิจัยเพิ่มเติมและต่อยอด



ภาพ 35 การศึกษาการสปริงกลับก่อนและหลังกระบวนการผลิต

ที่มา: Ma, J., Ha, T., Blindheim, J., Welo, T., Ringen, G., & Li, H. (2020)

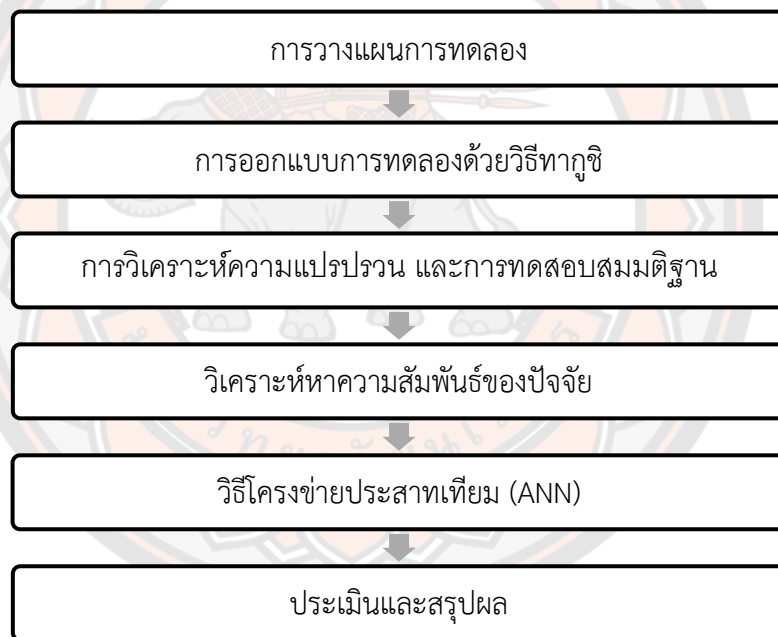
สำหรับการทบทวนวรรณกรรมในส่วนของการนำการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE) จากจำนวนผู้วิจัยทั้งสิ้น 43 ท่าน มีเพียง 6 งานวิจัยที่ได้นำ DOE มาเป็นหนึ่งในเครื่องมือสำหรับงานวิจัย ได้แก่ การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทาคุชิ (Taguchi Method) ในกระบวนการตัดท่อ ได้แก่ Zhou, H. F., Zhang, S. Y., Qiu, L. M., & Wang, Z. L. (2021), Lin, J. C., & Lee, K. (2015) และ Gheorghe, A., Lucian, L., Mioara, G. F., & Adrian, C. V. (2007), การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียล (Factorial) ในกระบวนการตัดท่อ ได้แก่ Zhang, S., Fu, M., Wang, Z., Lin, Y., & He, C. (2020) และ Li, H., Ma, J., Liu, B. Y., Gu, R. J., & Li, G. J. (2018) และการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ได้แก่ R. Safdarian (2019) รวมทั้งสิ้น 6 ผลงาน

การออกแบบการทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้วิธีทาคุชิมาเป็นเครื่องมือสำหรับใช้ในการวิจัย ซึ่งวิธีทาคุชิเป็นเทคนิคหนึ่งที่มีส่วนช่วยในการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการ ด้วยต้นทุนต่ำ เวลาในการดำเนินการน้อย และง่ายต่อการคำนวณและทำความเข้าใจ เพื่อช่วยในการแก้ปัญหาที่สาเหตุได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ และจากการทบทวนวรรณกรรมจะเห็นได้ว่าการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทาคุชินิยมใช้มากที่สุดในกระบวนการตัดท่อ อันอาจเนื่องมาจากวิธีการนี้ให้ผลการทดลองเพื่อช่วยในการแก้ปัญหาที่สาเหตุได้อย่างถูกต้องและแม่นยำและเหตุผลอื่น ๆ ข้างต้นจึงเลือกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

ส่วนสำคัญของการวิจัยเรื่องการทำค่าที่เหมาะสมสปริงกลับของเครื่องซีเอ็นซีตัดท่อบนพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียมนี้ แบ่งการดำเนินการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เป็นการทดลองการตัดท่อโลหะ มีการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองโดยวิธีการของทาคุชิ (Taguchi Method) เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการสปริงกลับจากการตัดท่อโลหะ และส่วนที่ 2 เป็นวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) เพื่อนำไปประมาณค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการตัดท่อเหล็ก ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังแสดงตามภาพ 36



ภาพ 36 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

#### การทดลองกระบวนการตัดท่อโลหะ

##### 1. การวางแผนการทดลอง

สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง ได้แก่ เครื่องตัดท่อซีเอ็นซี Herber 76 CNC TB Bending Machine วัสดุชิ้นงาน คือ ท่อเหล็ก เกรด ASTM A-210 Gr. A1 ปัจจัยนำเข้า คือ



ความหนาของท่อ (Wall Thickness), รัศมีดัด (Bending Radial), เวลาหยุด (Dwell Time) และมุมองศาการดัด (Bending Angle) ปัจจัยส่งออก คือ ค่ามุมสปริงกลับ (Springback Angle)

### 1.1 เครื่องตัดท่อซีเอ็นซี

การทดลองนี้ใช้เครื่องตัดท่อซีเอ็นซี Herber 76 CNC TB Booster Bending Machine โดยปราศจากการใช้แมนเดรล (Mandrel) รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องแสดงในตาราง 12

**ตาราง 12 ข้อมูลทางเทคนิค Herber 76 CNC TB Booster Bending Machine**

Technical data detail	Dimension
Capacity, Ø mm	63 x 5
Radius, min/max	40/200
Radius difference	-
Bending speed/repeatability	40°/s. ±0,1°
Length of mandrel	3,000
Weight (kg.)	7,000
Machine dimensions (m)	6,7 x 1,7 x 1,8
Motor kW	32
Length feeding (mm/sec)	900
Tolerance range	0,05–0,1°/mm

ที่มา: Herber Engineering., 2023

**ตาราง 13 ข้อกำหนดทางกลท่อเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A210 A-1**

Chemical Composition				
Carbon	Manganese	Phosphorus	Sulfur	Silicon
0.27% Max.	0.93% Max.	0.035% Max.	0.035% Max.	0.10% Min.
Mechanical Properties				
Tensile Strength (Min.)	Yield Strength (Min.)	Hardness (Max.)		
415 MPa	255 MPa	79 HRB	143 HB	

ที่มา: ประสิทธิ์ เวียงแก้ว, 2550

## 1.2 วัสดุชิ้นงาน

วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง คือ ท่อไร้ตะเข็บเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Seamless Cold Drawn Medium Carbon Steel Tube) เกรด ASTM A-210 Gr. A1 ขนาดความโตภายนอก (OD) 1 3/4 นิ้ว หรือ 44.45 มิลลิเมตร ขนาดความหนา 3 ขนาด ได้แก่ 4.57, 5.59 และ 6.10 มิลลิเมตร คุณสมบัติวัสดุแสดงในตาราง 13



(a) Herber 76 CNC TB Bending Machine (b) Steel tube (c) CMM Mitutoyo

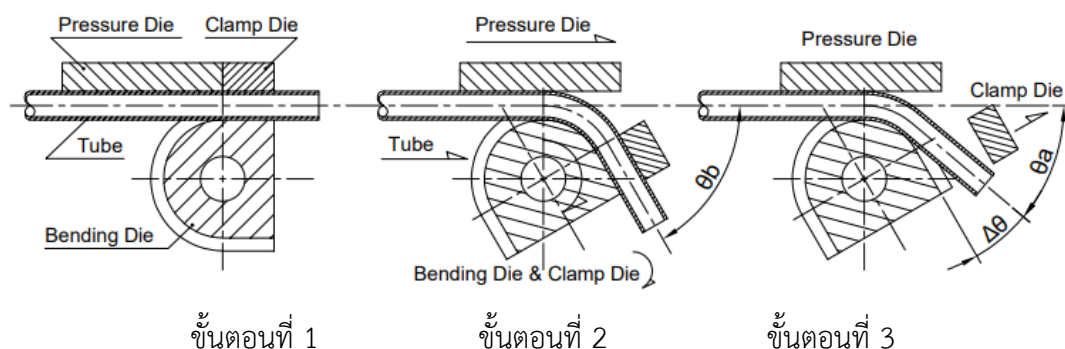
### ภาพ 37 เครื่องจักร วัสดุ และเครื่องมือวัด สำหรับการทดลอง

## 1.3 การวัดค่ามุมสปริงกลับ

การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลที่มีต่อการสปริงกลับ ในการตัดท่อไร้ตะเข็บเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เกรด ASTM A-210 Gr. A1 มีการตรวจสอบชิ้นงานหลังจากการตัดด้วยเครื่อง CMM Mitutoyo รุ่น Beyond Apex 707 โดยมีการคำนวณหาค่ามุมจริงที่ได้จากการตัด (Actual Angle) ดังนี้ (Ma, J., Ha, T., Blindheim, J., Welo, T., Ringen, G., & Li, H., 2020)

$$\Delta\theta = \theta_b - \theta_a \quad (3.1)$$

โดยที่  $\Delta\theta$  คือ ค่ามุมสปริงกลับ (Springback Angle),  $\theta_b$  คือ ค่ามุมเป้าหมายในการตัด (Targeted Bending Angle) และ  $\theta_a$  คือ ค่ามุมจริง (Actual Angle)



ภาพ 38 ขั้นตอนการตัดท่อและขนาดสำหรับใช้ในการวัดมุม

ภาพ 38 แสดงขั้นตอนการตัดท่อและขนาดสำหรับใช้ในการวัดมุมสำหรับเครื่อง Herber 76 CNC TB รวมถึงเครื่องตัดท่อทั่วไปที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน กระบวนการประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ในสถานะที่ชิ้นส่วน Bending Die อยู่ในลักษณะองศาที่ปกติ ท่อจะถูกป้อนเข้าสู่ตำแหน่งที่พร้อมสำหรับการจับยึด จากนั้นชิ้นส่วน Pressure Die และ Clamp Die จะเคลื่อนที่กดท่อให้แนบกับชิ้นส่วน Bending Die

ขั้นตอนที่ 2 ชิ้นส่วน Bending Die และ Clamp Die จะพาส่วนของปลายท่อให้หมุนตามมุมตัดที่กำหนด ( $\theta_b$ ) ในขณะที่ชิ้นส่วน Pressure Die จะพาปลายท่ออีกด้านเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงเพื่อให้ท่อโค้งตามองศาที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 3 ชิ้นส่วน Clamp Die จะเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรงเพื่อปลดล็อกชิ้นงานท่อที่ตัดแล้ว จากนั้นสังเกตว่าท่อจะสปริงกลับได้ค่ามุมจริง ( $\theta_a$ ) เพื่อคำนวณตามสมการ (3.1) สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งคือขั้นตอนนี้เกี่ยวข้องกับปัจจัยนำเข้า คือ เวลาหยุดรอ (Dwell Time)

## 2. การออกแบบการทดลองโดยวิธีการของทากูชิ

สำหรับการทดลองใช้แผนการทดลองออร์ทอกอนัลแอร์เรย์ชนิด L27 ( $3^4$ ) กล่าวคือ จำนวนการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง มีจำนวนปัจจัยนำเข้า 4 ปัจจัย ได้แก่ ความหนาผนังท่อ (Wall Thickness), รัศมีดัด (Bending Radial), เวลาหยุด (Dwell Time) และมุมองศาการดัด (Bending Angle) โดยกำหนดการทดลองที่ 3 ระดับ คือ ระดับที่ 1 หมายถึง ค่าที่ต่ำที่สุด, ระดับที่ 2 หมายถึง ค่าตรงกลางที่อยู่ระหว่างระดับ 1 และระดับ 3 ส่วนระดับที่ 3 หมายถึง ค่าที่สูงที่สุด แสดงในตาราง 14 แผนการทดลองอ้างอิงจาก Gheorghe, A., Lucian, L., Mioara, G. F., & Adrian, C. V. (2007) และ Ma, J., Ha, T., Blindheim, J., Welo, T., Ringen, G., & Li, H. (2020) ดังตาราง

ตาราง 14 ระดับของปัจจัยในกระบวนการตัดท่อ

ปัจจัยนำเข้า	ระดับ		
	ต่ำ	กลาง	สูง
ความหนาผนังท่อ (มิลลิเมตร) [A]	4.57	5.59	6.10
รัศมีดัด (มิลลิเมตร) [B]	76.2	114.3	152.4
เวลาหยุด (วินาที) [C]	0	3	6
มุมมองศาการดัด (องศา) [D]	60	90	120

ปัจจัยนำเข้าในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ ได้แก่ ความหนาผนังท่อ, รัศมีดัด, เวลาหยุด และมุมมองศาการดัด โดยแต่ละปัจจัยแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง โดยเลือกใช้ท่อเหล็ก (Steel Tube) เป็นท่อไร้ตะเข็บเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Seamless Cold Drawn Medium Carbon Steel Tube) เกรด ASTM A-210 Gr. A1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 3/4 นิ้ว หรือ 44.45 มิลลิเมตร, ขนาดความหนาผนังท่อที่ 4.57, 5.59 และ 6.10 มิลลิเมตร, รัศมีดัดที่ 76.2, 114.3 และ 152.4 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาดความหนาผนังท่อ และรัศมีดัด เป็นขนาดที่ใช้ภายในหน่วยงานโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (กฟผ.แม่เมาะ) จังหวัดลำปาง

เวลาหยุดเป็นหนึ่งในปัจจัยนำเข้าสำหรับงานวิจัยนี้ โดยเพิ่มเติมในเรื่องของเงื่อนไขเวลา (Time Dependent) แบ่งออกเป็น 3 ระดับเช่นกัน ได้แก่ ระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง โดยการเลือกใช้ช่วงค่าหน่วยเวลาที่ 0, 3 และ 6 วินาที เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างให้ทราบความเปลี่ยนแปลงของการทดลอง 3 ระดับ

จากการทบทวนวรรณกรรมสำหรับมุมมองศาการดัดจะเห็นได้ว่า มีจำนวนความถี่ที่เลือกใช้ปัจจัยนี้มากถึง 17% มากเป็นลำดับที่หนึ่งจากรวมทั้งหมด โดยมุมมองศาการดัดที่ใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมามีหลาย ๆ องศาด้วยกัน ได้แก่ 30, 45, 60, 90, 120 และ 150 องศา งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ค่ามุมมองศาที่ 3 ระดับ ได้แก่ 60, 90 และ 120 องศา โดยใช้หลักการเปรียบเทียบตามลักษณะของมุมองศา ได้แก่ มุมป้าน (ดัดที่มุม 60 องศา), มุมฉาก (ดัดที่มุม 90 องศา) และมุมแหลม (ดัดที่มุม 120 องศา) เพื่อเป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างเพื่อให้ทราบความเปลี่ยนแปลงของการทดลองในเรื่องของมุมมองศาการดัดที่ 3 ระดับ

จากนั้นทำการทดลองตามตาราง 15 รวมทั้งเก็บรวบรวมข้อมูลและคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนระบบ (S/N) ตามวัตถุประสงค์ของคุณภาพ คือ ค่ามุมสปริงกลับ (Springback Angle) เป็นประเภทยิ่งน้อยยิ่งดี และทำการทดลองเพื่อยืนยันว่าค่าที่กำหนดเป็นค่าที่ดีที่สุดจริง

ตาราง 15 ค่าการทดลองในกระบวนการตัดท่อ จำนวน 27 การทดลอง

ลำดับ	ปัจจัยนำเข้า			
	ความหนาผนังท่อ (มิลลิเมตร)	รัศมีตัด (มิลลิเมตร)	เวลาหยุด (วินาที)	มุมมองการตัด (องศา)
1	4.57	76.2	0	60
2	4.57	76.2	0	60
3	4.57	76.2	0	60
4	4.57	114.3	3	90
5	4.57	114.3	3	90
6	4.57	114.3	3	90
7	4.57	152.4	6	120
8	4.57	152.4	6	120
9	4.57	152.4	6	120
10	5.59	76.2	3	120
11	5.59	76.2	3	120
12	5.59	76.2	3	120
13	5.59	114.3	6	60
14	5.59	114.3	6	60
15	5.59	114.3	6	60
16	5.59	152.4	0	90
17	5.59	152.4	0	90
18	5.59	152.4	0	90
19	6.10	76.2	6	90
20	6.10	76.2	6	90
21	6.10	76.2	6	90
22	6.10	114.3	0	120
23	6.10	114.3	0	120
24	6.10	114.3	0	120
25	6.10	152.4	3	60

ลำดับ	ปัจจัยนำเข้า			
	ความหนาผนังท่อ (มิลลิเมตร)	รัศมีดัด (มิลลิเมตร)	เวลาหยุด (วินาที)	มุมมองศาการดัด (องศา)
26	6.10	152.4	3	60
27	6.10	152.4	3	60

### 3. การวิเคราะห์ความแปรปรวน และการทดสอบสมมติฐาน

สำหรับการทดลองนี้ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรมมินิแทบ (Minitab) ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ผลจากการออกแบบการทดลอง ในการวิจัยนี้ กำหนดช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ( $\alpha=0.05$ )

จากตาราง 15 สามารถนำข้อมูลมาใช้ในการทดสอบสมมติฐาน กรณีการทดลองแบบจำแนกทางเดียว โดยมีขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน คือ การทดสอบสมมติฐานสำหรับค่ามุมสปริงกลับ (Springback Angle) กับ 4 ตัวแปร คือ ความหนาผนังท่อ (Wall Thickness), รัศมีดัด (Bending Radial), เวลาหยุด (Dwell Time) และมุมมองศาการดัด (Bending Angle) ว่ามีผลต่อกันหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้น ระดับนัยสำคัญ  $\alpha$  เท่ากับ 0.05 โดยทำตามขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ตั้งสมมติฐานในการทดสอบ สมมติฐานการทดสอบผลกระทบจากปัจจัยหลัก (Main Effect) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สมมติฐานที่ 1 ผลกระทบจากความหนาผนังท่อ

$$H_0 : \tau_i = 0 ; \forall_i \quad (\text{ความหนาผนังท่อไม่มีผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับ})$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0 ; \exists_i \quad (\text{ความหนาผนังท่อมีผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับ})$$

สมมติฐานที่ 2 ผลกระทบจากรัศมีดัด

$$H_0 : \beta_j = 0 ; \forall_j \quad (\text{รัศมีดัดไม่มีผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับ})$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 ; \exists_j \quad (\text{รัศมีดัดมีผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับ})$$

สมมติฐานที่ 3 ผลกระทบจากเวลาหยุด

$$H_0 : \gamma_k = 0 ; \forall_k \quad (\text{เวลาหยุดไม่มีผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับ})$$

$$H_1 : \gamma_k \neq 0 ; \exists_k \quad (\text{เวลาหยุดมีผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับ})$$

สมมติฐานที่ 4 ผลกระทบจากมุมมองศาการดัด

$$H_0 : \delta_l = 0 ; \forall_l \quad (\text{มุมมองศาการดัดไม่มีผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับ})$$

$$H_1 : \delta_l \neq 0 ; \exists_l \quad (\text{มุมมองศาการดัดมีผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับ})$$

เมื่อ	$\tau_i$	คือ ผลกระทบจากความหนาผนังท่อที่ระดับที่ $i$ ; $i = 1, 2, 3$
	$\beta_j$	คือ ผลกระทบจากรัศมีดัดที่ระดับที่ $j$ ; $j = 1, 2, 3$
	$\gamma_k$	คือ ผลกระทบจากเวลาหยุดที่ระดับที่ $k$ ; $k = 1, 2, 3$
	$\delta_l$	คือ ผลกระทบจากมุมมองศากการดัดที่ระดับที่ $l$ ; $l = 1, 2, 3$

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดระดับนัยสำคัญ ( $\alpha=0.05$ )

ขั้นตอนที่ 3 คำนวนสถิติที่ใช้ในการทดสอบ

$$F_0 = \frac{MSA}{MSE} ; v = (a - 1, N - a) \quad (3.2)$$

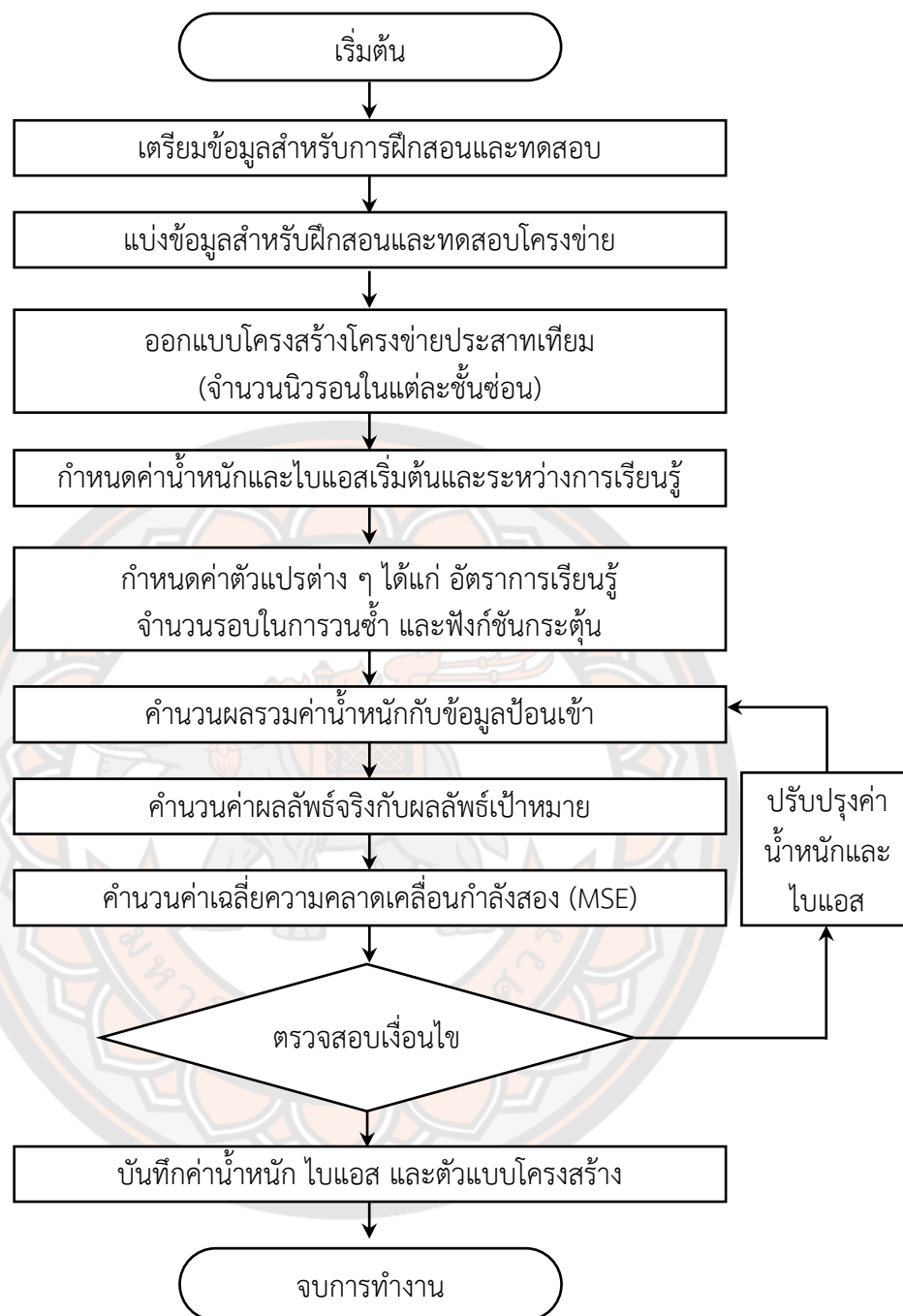
ขั้นตอนที่ 4 สรุปผล จะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อ  $p - value = P(F > F_0) < \alpha$   
หรือ จะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อ  $F_0 > F_{\alpha, (a-1, N-a)}$

### วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (ANN)

ขั้นตอนก่อนการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม จะเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยในการได้มาซึ่งค่าการสปริงกลับที่ตรงกับความต้องการ ในที่นี้ คือ  $\theta_a$  ค่ามุมจริง (Actual Angle) ที่ได้หลังจากการดัด ซึ่งเป็นผลจากการตั้งค่ามุม  $\theta_b$  คือ ค่ามุมเป้าหมายในการดัด (Targeted Bending Angle) สำหรับกระบวนการดัดด้วยเครื่องดัดท่อซีเอ็นซี

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีโครงข่ายประสาทเทียมในการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ สำหรับการทำนายค่ามุมสปริงกลับ (Springback Angle) โดยรูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมคือแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น (Multilayer Feed Forward Neural Network) ด้วยระบบกระบวนการเรียนรู้แบบย้อนกลับ (Back-propagation) ระเบียบวิธีการดำเนินงานของโครงข่ายประสาทเทียม แสดงดังภาพ 39

กระบวนการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม ตามภาพ 39 สำหรับงานวิจัยนี้ เริ่มต้นกระบวนการจากการเตรียมข้อมูลสำหรับการฝึกสอน (Train set) และการทดสอบ (Test set) โดยการนำเข้าข้อมูลจากการทดลองในกระบวนการดัดท่อที่ได้ จำนวน 27 การทดลอง โดยข้อมูลในขั้นนำเข้าหรือตัวแปรต้น (x) ได้แก่ ความหนาของท่อ (Wall Thickness), รัศมีดัด (Bending Radial), เวลาหยุด (Dwell Time) และมุมมองศากการดัด (Bending Angle) ผ่านชั้นซ่อนซึ่งงานวิจัยนี้กำหนดที่จำนวน 1 ชั้นซ่อน ส่งต่อข้อมูลไปยังชั้นส่งออกหรือตัวแปรตาม (y) คือ ค่ามุมสปริงกลับ (Springback Angle) ทำการแบ่งข้อมูลสำหรับฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายโดยวิธีการสุ่ม แบ่งข้อมูลการทดลอง (Dataset) ออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ข้อมูลสำหรับการฝึกสอนและข้อมูลสำหรับการทดสอบ 80:20 เปอร์เซนต์ จะได้ข้อมูลสำหรับการฝึกสอน จำนวน 21 ข้อมูล และข้อมูลสำหรับการทดสอบ จำนวน 6



ภาพ 39 กระบวนการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม

ข้อมูล จากนั้นทำการออกแบบโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อการทำจำนวนนิวรอนและกำหนดโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม ทำการกำหนดค่าน้ำหนักและไบแอสเริ่มต้นด้วยวิธีการสุ่ม แทนค่าโดยอ้างอิงจากสมการ (2.10) เช่น



$$y = x_1w_1 + x_2w_2 + x_3w_3 + x_4w_4 + bias \quad (3.3)$$

โดยที่  $x_1$  คือ ความหนาของท่อ (Wall Thickness),  $x_2$  คือ รัศมีดัด (Bending Radial),  $x_3$  คือ เวลาหยุด (Dwell Time),  $x_4$  คือ มุมองศาการดัด (Bending Angle),  $w_1$  คือ ค่าน้ำหนักลำดับที่ 1,  $w_2$  คือ ค่าน้ำหนักลำดับที่ 2,  $w_3$  คือ ค่าน้ำหนักลำดับที่ 3,  $w_4$  คือ ค่าน้ำหนักลำดับที่ 4

จากนั้นกำหนดอัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) กำหนดจำนวนรอบในการวนซ้ำหรือจนกว่าจะได้ค่า MSE ที่ต่ำที่สุด โดยใช้หลักการของ Gradient Descent เพื่อหาค่าน้ำหนักที่ทำให้ข้อผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด สำหรับในขั้นตอนนี้มีการเพิ่มกระบวนการทดลองการเลือกใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง 4 ฟังก์ชันเพิ่มเติม จากนั้นจึงคำนวณผลรวมค่าน้ำหนักกับข้อมูลป้อนเข้า จากค่าที่ Output ในแต่ละชั้น ซึ่งในขั้นตอนนี้เรียกว่า Feed Forward หรือ Forward Propagation ก่อนการส่งผลลัพธ์ค่า MSE เพื่อแสดงผล จะมีการปรับค่าด้วยฟังก์ชันกระตุ้น (Activation Function) ยกตัวอย่างการใช้ Sigmoid Activation Function เป็นฟังก์ชันสำหรับการปรับค่าให้อยู่ในช่วง 0-1 จากสมการ (3.4)

$$Sigmoid(y) = \frac{1}{(1+e^{-z})} \quad (3.4)$$

ดังนั้น ผลลัพธ์สุดท้ายที่เป็นค่าที่โมเดลทำนายออกมาได้ หรือ  $\hat{y} = Sigmoid(y)$  ตัวอย่างเช่น หากผลการคำนวณจากสมการ (3.3) ได้ค่า  $y = 0.36$  ดังนั้น  $\hat{y} = Sigmoid(y) = Sigmoid(0.36) = 0.5890$  ตามตัวอย่างการคำนวณค่ากระบวนการ Forward Propagation และ Backward Propagation ของณัฐโชติ พรหมฤทธิ์ และสัจจาภรณ์ ไวจรรยา (2564)

ขั้นตอนสุดท้ายของการทำ Forward Propagation คือ การประเมินว่าผลการ Predict คาดเคลื่อนจาก Output  $y$  มากน้อยเพียงใดด้วย Loss Function ( $L = Loss(y, \hat{y})$ ) โดยที่  $L$  คือ MSE ตัวอย่างเช่น  $y = 0.7$  และ  $L = MSE$  ดังนั้น  $L$  จะมีค่า 0.0123 กล่าวคือ

$$L = Loss(y, \hat{y}) = (y, \hat{y})^2 = (0.7 - 0.589)^2 = 0.0123$$

หลังจากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการ Backward Propagation โดยสามารถทำกระบวนการดังกล่าวเพื่อปรับค่า  $w_1$  จากการหาอนุพันธ์ของ  $L$  เทียบกับ  $w_1$  หรือความชัน (Gradient) ของ  $Loss(y, \hat{y})$  หรือ Error ที่  $w_1$  ด้วยสมการ (3.5)

$$\text{Error\_at\_}W_1 = \frac{\partial L}{\partial w_1} \quad (3.5)$$

เนื่องจากไม่มี  $w_1$  ใน  $L$  จึงจำเป็นต้องใช้กฎลูกโซ่ (Chain Rule)

$$\frac{\partial L}{\partial w_1} = \frac{\partial L}{\partial \hat{y}} \times \frac{\partial \hat{y}}{\partial z} \times \frac{\partial z}{\partial w_1}$$

สำหรับการหาค่าในแต่ละเทอม ตัวอย่างเช่น

$$\frac{\partial L}{\partial \hat{y}} = \frac{\partial [(y - \hat{y})^2]}{\partial \hat{y}} = -0.2(y - \hat{y})$$

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \hat{y}} \right| = -2(0.7 - 0.589) = -0.222$$

$$X_1, X_2, w_1, w_2, b, y = (0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 0.3, 0.7)$$

$$\hat{y} = \frac{1}{(1 + e^{-z})}$$

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial z} = \hat{y} [1 - \hat{y}]$$

$$\left. \frac{\partial \hat{y}}{\partial z} \right| = 0.589(1 - 0.589) = 0.242$$

$$X_1, X_2, w_1, w_2, b = (0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 0.3)$$

$$\frac{\partial z}{\partial w_1} = \frac{\partial (w_1 X_1 + w_2 X_2) + b}{\partial w_1} = X_1$$

$$\left. \frac{\partial z}{\partial w_1} \right| = 0.05$$

$$X_1, X_2, w_1, w_2, b = (0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 0.3)$$

$$\text{ดังนั้น } \text{Error\_at\_}W_1 = (-0.222)(0.242)(0.05) = -0.003$$

หากกำหนดอัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) เท่ากับ 0.5 จะปรับค่า  $w_1$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Update } W_1 &= W_1 - \text{Learning\_Rate} \times \text{Error\_at\_}W_1 \\ &= (0.2) - (0.5) (-0.03) \\ &= 0.2015 \end{aligned}$$

สรุปขั้นตอนข้างต้นที่กล่าวมา เป็นกระบวนการการคำนวณการปรับค่าน้ำหนักและไบแอสย้อนกลับจากชั้น Output ไปยังชั้นซ่อนแรก ค่าน้ำหนักที่ส่งมาแต่ละหน่วยจะคำนวณด้วยฟังก์ชันผลรวม คำนวณค่าผลลัพธ์จริงที่ได้จากฟังก์ชันกระตุ้นกับผลลัพธ์เป้าหมาย คำนวณค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดฝึกสอนหากค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองต่ำที่สุดหรือรอบของการวนซ้ำครบตามกำหนดจึงจบการทำงาน หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไขให้ปรับปรุงค่าน้ำหนักและไบแอสจนกว่าจะได้ค่า MSE ที่ต่ำที่สุด จากนั้นทำการบันทึกค่าน้ำหนักและไบแอส รวมทั้งบันทึกตัวแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้เพื่อเตรียมการทำนายผลค่ามูสปริงกลับจากฟังก์ชันกระตุ้นอื่น ๆ ทั้งสิ้น 4 ฟังก์ชัน จึงจบกระบวนการ

หลังจากได้นำวิธีโครงข่ายประสาทเทียมในการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์แล้ว จึงทำการประเมินผลประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้สร้างขึ้น โดยทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม ด้วยการเปรียบเทียบการใช้ฟังก์ชันกระตุ้น 4 ฟังก์ชัน ได้แก่ Sigmoid Function (Logistic Function), ReLU Function, TanH Function และ Identity Function จึงต้องมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองว่าแบบจำลองใดให้ผลการทำนายที่ดีกว่า สำหรับเกณฑ์การวัดประสิทธิภาพแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบ่งเป็น 2 เกณฑ์ ดังนี้

1. ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) เป็นการวัดความแม่นยำของตัวแบบเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายและผลลัพธ์จริงที่มาจากผลการทดลอง เพื่อพิจารณาว่าค่าที่ทำนายได้มีความใกล้เคียงกับค่าจริงมากน้อยเพียงใด ในจำนวนนิเวรอนระหว่าง 1 ถึง 100 นิเวรอน คำนวณได้จากสมการ (3.6)

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}{n} \quad (3.6)$$

2. ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เป็นการวัดค่าจากผลการทำนายด้วยฟังก์ชันกระตุ้นชนิดต่าง ๆ โดยการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายฟังก์ชันกระตุ้นชนิดต่าง ๆ และผลลัพธ์จริงที่มาจากผลการทดลอง คำนวณได้จากสมการ (3.7)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.7)$$

โดยที่  $y_i$  คือผลลัพธ์จริงของการทดลอง,  $f(x_i)$  คือ ค่าผลลัพธ์ที่คาดการณ์ไว้,  $\bar{y}$  คือ ค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์จริงจากการทดลอง และ  $n$  คือ จำนวนรายการข้อมูลทั้งหมด

### การทดสอบการตัดต่อจากผลจากการทำนาย

เมื่อได้ผลการทำนายจากวิธีการต่าง ๆ จึงทำการทดสอบผลโดยการปฏิบัติการตัดต่อจริง แล้วเปรียบเทียบระหว่างการทำนายจากแต่ละวิธีการ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) ดังสมการ (3.6) และ (3.7) เป็นสถิติที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ



## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

ส่วนของผลการวิจัยสามารถแบ่งผลการดำเนินการเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ผลการทดลองการตัดท่อโลหะโดยการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองโดยวิธีการของทากูชิ ผลของวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และผลการทดสอบการตัดท่อจากผลจากการทำนาย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### ผลการทดลองกระบวนการตัดท่อโลหะ

##### 1. ปฏิบัติการทดลอง

วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง คือ ท่อไร้ตะเข็บเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Seamless Cold Drawn Medium Carbon Steel Tube) เกรด ASTM A-210 Gr. A1 ขนาดความโตภายนอก (OD) 1 3/4 นิ้ว หรือ 44.45 มิลลิเมตร ขนาดความหนา 3 ขนาด ได้แก่ 4.57, 5.59 และ 6.10 มิลลิเมตร ดำเนินการทดลองโดยใช้เครื่องตัดท่อซีเอ็นซี Herber 76 CNC TB Booster Bending Machine โดยปราศจากการใช้แมนเดรล (Mandrel) ทำการทดลองตัดตามแผนการทดลอง



ภาพ 40 ขั้นตอนการตัดท่อ และการวัดขนาด

##### 2. ผลการออกแบบการทดลองโดยวิธีการของทากูชิ

สำหรับการทดลองนี้เป็นการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองโดยวิธีการของทากูชิ เพื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่ามุมสปริงกลับ  $\Delta\theta$  หาได้จากสมการ (3.1) ใช้แผนการทดลองออร์ทอกอนัลแอร์เรย์ชนิด  $L_{27}(3^4)$  มีจำนวนปัจจัยนำเข้า 4 ปัจจัย ได้แก่ ความหนาผนังท่อ (Wall

Thickness), รัศมีดัด (Bending Radial), เวลาหยุด (Dwell Time) และมุมองศาการดัด (Bending Angle) ซึ่งแต่ละปัจจัยกำหนดการที่ 3 ระดับ มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง มีผลการทดลองแสดงในตาราง 16

ตาราง 16 ผลการทดลองกระบวนการดัดท่อที่มีต่อค่ามุมสปริงกลับ

ลำดับ	ปัจจัยนำเข้า				ปัจจัยส่งออก $\Delta\theta$ (องศา)
	A	B	C	D	
1	4.57	76.2	0	60	7.93
2	4.57	76.2	0	60	8.02
3	4.57	76.2	0	60	7.97
4	4.57	114.3	3	90	8.27
5	4.57	114.3	3	90	8.39
6	4.57	114.3	3	90	8.41
7	4.57	152.4	6	120	7.58
8	4.57	152.4	6	120	7.45
9	4.57	152.4	6	120	7.61
10	5.59	76.2	3	120	8.19
11	5.59	76.2	3	120	8.33
12	5.59	76.2	3	120	8.26
13	5.59	114.3	6	60	7.15
14	5.59	114.3	6	60	7.19
15	5.59	114.3	6	60	7.16
16	5.59	152.4	0	90	6.85
17	5.59	152.4	0	90	6.91
18	5.59	152.4	0	90	6.82
19	6.10	76.2	6	90	8.92
20	6.10	76.2	6	90	8.87
21	6.10	76.2	6	90	8.95
22	6.10	114.3	0	120	7.14
23	6.10	114.3	0	120	7.08

ลำดับ	ปัจจัยนำเข้า				ปัจจัยส่งออก $\Delta\theta$ (องศา)
	A	B	C	D	
24	6.10	114.3	0	120	7.21
25	6.10	152.4	3	60	6.49
26	6.10	152.4	3	60	6.39
27	6.10	152.4	3	60	6.31

### 3. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับการพิจารณาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองที่สนใจของค่ามุมสปริงกลับ  $\Delta\theta$  เป็นค่าของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal-to-Noise Ratios) กรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller-the-Better) คำนวนจากสมการ (2.6) แสดงดังตาราง 17

ตาราง 17 ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N Ratios)

ลำดับ	ปัจจัยนำเข้า				ปัจจัยส่งออก $\Delta\theta$ (Signal-to-Noise Ratios)
	A	B	C	D	
1	4.57	76.2	0	60	-17.99
2	4.57	76.2	0	60	-18.08
3	4.57	76.2	0	60	-18.03
4	4.57	114.3	3	90	-18.35
5	4.57	114.3	3	90	-18.48
6	4.57	114.3	3	90	-18.50
7	4.57	152.4	6	120	-17.59
8	4.57	152.4	6	120	-17.44
9	4.57	152.4	6	120	-17.63
10	5.59	76.2	3	120	-18.27
11	5.59	76.2	3	120	-18.41
12	5.59	76.2	3	120	-18.34
13	5.59	114.3	6	60	-17.09
14	5.59	114.3	6	60	-17.13
15	5.59	114.3	6	60	-17.10

ลำดับ	ปัจจัยนำเข้า				ปัจจัยส่งออก $\Delta\theta$ (Signal-to-Noise Ratios)
	A	B	C	D	
16	5.59	152.4	0	90	-16.71
17	5.59	152.4	0	90	-16.79
18	5.59	152.4	0	90	-16.68
19	6.10	76.2	6	90	-19.01
20	6.10	76.2	6	90	-18.96
21	6.10	76.2	6	90	-19.04
22	6.10	114.3	0	120	-17.07
23	6.10	114.3	0	120	-17.00
24	6.10	114.3	0	120	-17.16
25	6.10	152.4	3	60	-16.24
26	6.10	152.4	3	60	-16.11
27	6.10	152.4	3	60	-16.00

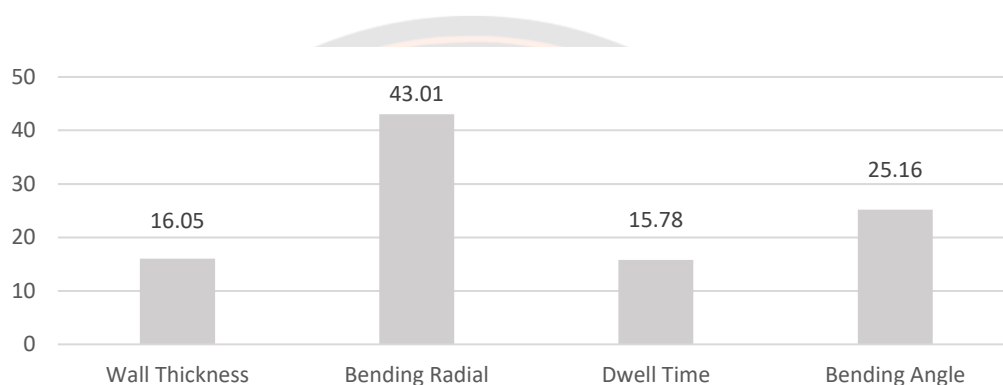
เมื่อได้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองจากการกำหนดตัวแปรที่แตกต่างกันตามตารางที่ 17 เพื่อหาระดับปัจจัยที่มีผลกระทบด้วยวิธีทากูชิ เป็นค่าของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal-to-Noise Ratios) กรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller-the-Better) ผลตอบสนองในกรณีที่เหมาะสมสามารถพิจารณาได้จากค่า S/N Ratio เฉลี่ยของระดับแต่ละปัจจัยที่มีค่ามากดังแสดงตามตารางที่ 18 ทำให้สามารถทราบปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับ

**ตาราง 18 ค่า S/N Ratio เฉลี่ยของระดับและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับ**

Level	Wall Thickness	Bending Radial	Dwell Time	Bending Angle
1	-18.01	-18.46	-17.28	-17.09
2	-17.39	-17.54	-17.63	-18.06
3	-17.40	-16.80	-17.89	-17.66
Delta	0.62	1.66	0.61	0.97
Percent	16.05	43.01	15.78	25.16
Rank	3	1	4	2



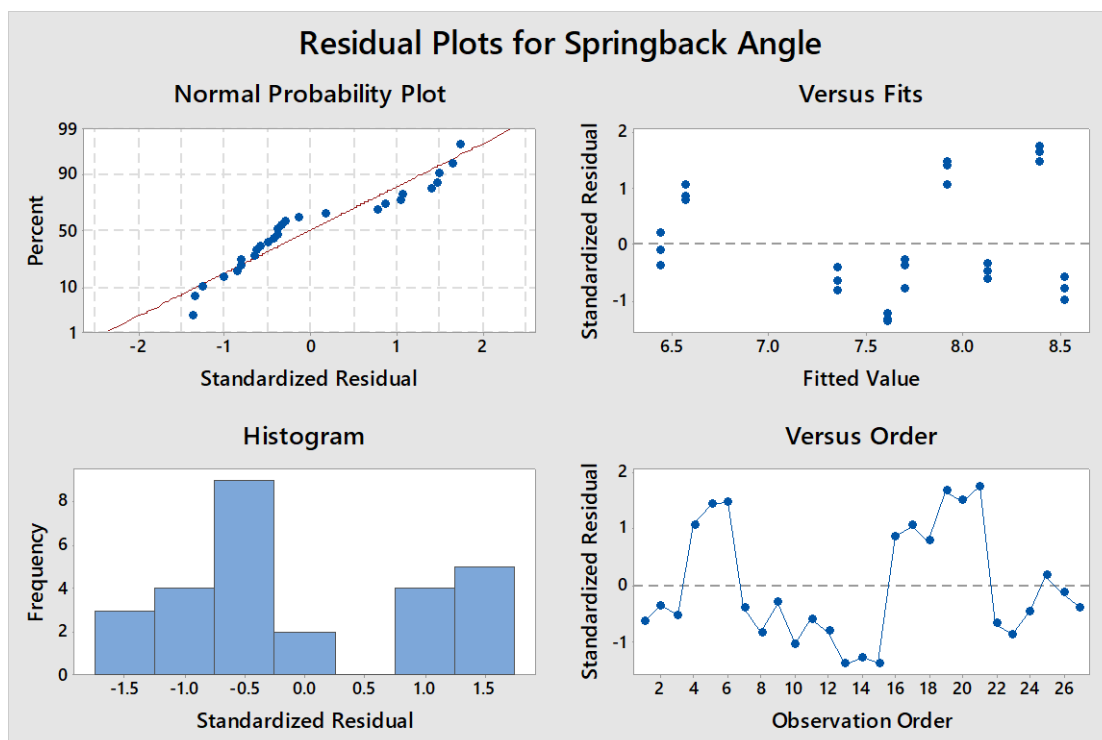
เมื่อพิจารณาค่า S/N Ratio เฉลี่ยของระดับและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับ (Springback Angle) ตามตาราง 18 สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยรัศมีดัด (Bending Radial) ส่งผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับมากที่สุด ปัจจัยนี้มีผลกระทบสูงถึง 43.01 เปอร์เซ็นต์ ปัจจัยรองลงมา ได้แก่ มุมองศาการดัด (Bending Angle) มีผลกระทบ 25.16 เปอร์เซ็นต์ ความหนาผนังท่อ (Wall Thickness) มีผลกระทบ 16.05 เปอร์เซ็นต์ และปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับน้อยที่สุด คือ เวลาหยุด (Dwell Time) มีผลกระทบ 15.78 เปอร์เซ็นต์ และสังเกตได้ว่าปัจจัยความหนาผนังท่อและปัจจัยเวลาหยุดมีค่าร้อยละที่ใกล้เคียงกัน ห่างกันเพียง 0.27 เปอร์เซ็นต์



ภาพ 41 ค่าร้อยละ S/N Ratio จากผลกระทบแต่ละปัจจัย

จากผลการทดลองเมื่อตรวจสอบการกระจายของค่าความผิดพลาด (Residuals) พบว่ามีการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) จากภาพที่ 42 (ด้านซ้าย) พบว่าการกระจายของค่าความผิดพลาดของข้อมูล (Normal Probability) มีการกระจายตามแนวเส้นตรง และกราฟความถี่ของข้อมูล (Histogram) มีการกระจายตัวแบบปกติ สรุปได้ว่าค่าความผิดพลาดมีการกระจายแบบปกติ สำหรับการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent) โดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายภาพที่ 42 (กราฟขวาบนและขวาล่าง) พบว่าการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดมีรูปแบบการกระจายเป็นอิสระ ไม่สามารถทำนายรูปแบบได้แน่นอน แสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน

การพิจารณาค่าที่มีผลกระทบของแต่ละปัจจัย สามารถพิจารณาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยผลตอบสนองที่แต่ละระดับของทั้ง 4 ปัจจัย แสดงตามภาพ 34 จากกราฟแสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยผลตอบสนอง (S/N Ratio) ของแต่ละปัจจัยทั้ง 3 ระดับ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทั้ง 4 ปัจจัย (Mean) เท่ากับ -17.60 เป็นกรณีค่าน้อยยิ่งดี (Smaller-the-Better)

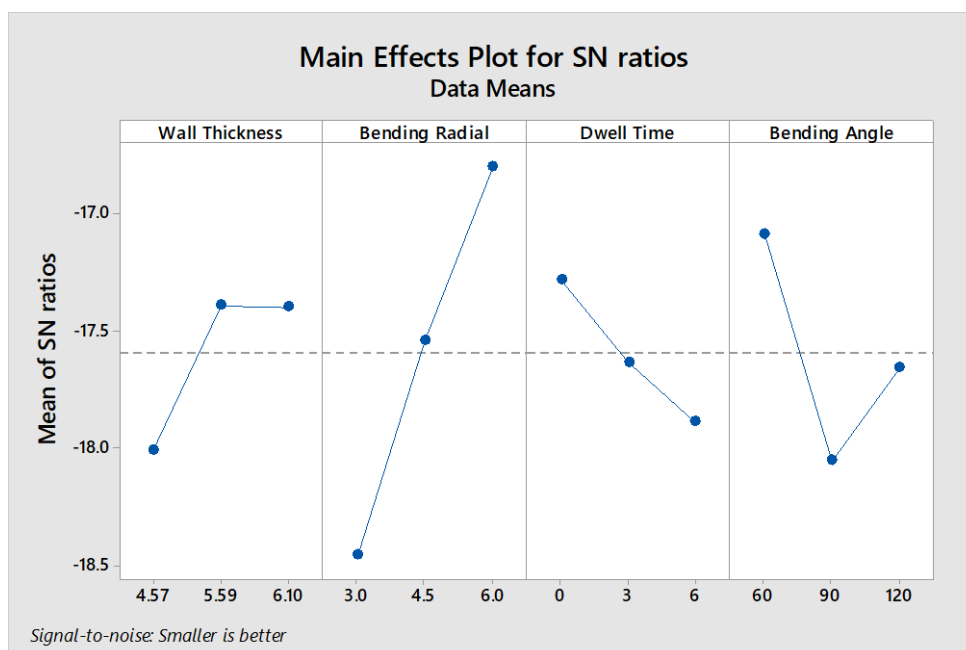


ภาพ 42 การกระจายแบบแจกแจงปกติของค่ามุมสปริงกลับ

พิจารณาปัจจัยความหนาผนังท่อ (Wall Thickness) ต่ำสุดที่ 4.57 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ยผลตอบแทนเท่ากับ -18.01 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดสำหรับปัจจัยนี้ เมื่อทำการเพิ่มความหนาผนังท่อเป็น 5.59 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่ากลางของปัจจัยนี้ ค่าเฉลี่ยผลตอบแทนเท่ากับ -17.39 แตกต่างจาก 4.57 มิลลิเมตร +0.62 ค่ามุมสปริงกลับ (Springback Angle) ถือว่าเป็นการเพิ่มค่ามุมสปริงกลับมากขึ้น เมื่อทำการเพิ่มความหนาผนังท่อเป็น 6.10 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของปัจจัยนี้ ค่าเฉลี่ยผลตอบแทนลดลงจากเดิมที่ความหนาผนังท่อ 5.59 มิลลิเมตร (S/N Ratio ของความหนาผนังท่อ 6.10 มิลลิเมตร เท่ากับ -17.40) สรุปคือ หากความหนาผนังท่อมีขนาดที่ต่ำจะส่งผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับที่น้อย ในทางกลับกัน หากความหนาผนังท่อมีขนาดที่สูงจะส่งผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับที่มาก

พิจารณาปัจจัยรัศมีดัด (Bending Radial) ต่ำสุดที่ 76.2 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ยผลตอบแทนเท่ากับ -18.46 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดสำหรับปัจจัยนี้ เมื่อทำการเพิ่มรัศมีดัดเป็น 114.3 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่ากลางของปัจจัยนี้ มีค่าเฉลี่ยผลตอบแทนเท่ากับ -17.54 เพิ่มขึ้นจากเดิม +0.92 และเมื่อทำการเพิ่มรัศมีดัดเป็น 152.4 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของปัจจัยนี้ มีค่าเฉลี่ยผลตอบแทนเท่ากับ -16.80 เพิ่มขึ้นจากค่าต่ำสุดของปัจจัย +1.66 สรุปคือ หากรัศมีดัดมีขนาดที่ต่ำจะส่งผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับที่น้อย ในทางกลับกัน หากรัศมีดัดมีขนาดที่สูงจะส่งผลกระทบต่อค่ามุม

สปริงกลับที่มาก และสังเกตได้ว่าปัจจัยรัศมีดัดมีค่าเฉลี่ยผลตอบสนอง (S/N Ratio) ค่าความแตกต่างต่ำสุดถึงสูงสุด (Delta) ที่มากกว่าปัจจัยอื่น ๆ อย่างชัดเจน



ภาพ 43 ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย S/N Ratio จากผลกระทบแต่ละปัจจัย

พิจารณาปัจจัยเวลาหยุด (Dwell Time) ต่ำสุดที่ 0 วินาที มีค่าเฉลี่ยผลตอบสนองเท่ากับ -17.28 ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดสำหรับปัจจัยนี้ เมื่อทำการเพิ่มเวลาหยุดเป็น 3 วินาที ซึ่งเป็นค่ากลางของปัจจัย มีค่าเฉลี่ยผลตอบสนองเท่ากับ -17.63 ลดลงจากเดิม -0.35 และเมื่อทำการเพิ่มเวลาหยุดเป็น 6 วินาที ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของปัจจัย มีค่าเฉลี่ยผลตอบสนองเท่ากับ -17.89 ลดลงจากค่าต่ำสุดของปัจจัยเท่ากับ -0.61 สรุปคือ หากเวลาหยุดมีเวลาน้อยจะส่งผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับที่มาก ในทางกลับกัน หากเวลาหยุดมีเวลาที่มากจะส่งผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับที่น้อย

เมื่อพิจารณาปัจจัยสุดท้าย คือ ปัจจัยมุมองศาการดัด (Bending Angle) ต่ำสุดที่ 60 องศา มีค่าเฉลี่ยผลตอบสนองเท่ากับ -17.09 ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดสำหรับปัจจัยนี้ เมื่อทำการเพิ่มมุมองศาการดัดเป็น 90 องศา ซึ่งเป็นค่ากลางของปัจจัย มีค่าเฉลี่ยผลตอบสนองเท่ากับ -18.06 ลดลงจากเดิม -0.97 และเมื่อทำการเพิ่มมุมองศาการดัดเป็น 120 องศา ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของปัจจัย มีค่าเฉลี่ยผลตอบสนองเท่ากับ -17.66 ลดลงจากค่าต่ำสุดของปัจจัยเท่ากับ -0.57 สรุปคือ หากมุมองศาการดัดมีขนาดที่ต่ำจะส่งผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับที่มาก ในทางกลับกัน หากมุมองศาการดัดมีขนาดที่สูงจะส่งผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับที่น้อย

ผลการวิเคราะห์แต่ละปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับให้มีค่าน้อยที่สุด ที่ระดับ  $A_1B_1C_3D_2$  หมายถึง ปัจจัยความหนาผนังท่อ (Wall Thickness) ที่ระดับ 4.57 มิลลิเมตร ปัจจัยรัศมีดัด (Bending Radial) ที่ระดับ 3.0 นิ้ว ปัจจัยเวลาหยุด (Dwell Time) ที่ระดับ 6 วินาที และปัจจัยมุมองศาการดัด (Bending Angle) ที่ระดับ 90 องศา

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบสมมติฐานที่ได้กำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  โดยการใช้โปรแกรมมินิแทบในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่ามุมสปริงกลับ แสดงดังตาราง 19

ตาราง 19 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่ามุมสปริงกลับ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Wall Thickness	1	1.2630	1.26302	9.91	0.005
Bending Radial	1	9.4323	9.43227	74.02	0.000
Dwell Time	1	1.3613	1.36125	10.68	0.004
Bending Angle	1	0.9988	0.99876	7.84	0.010
Error	22	2.8034	0.12743		
Total	26	15.8587			

$S = 0.356966$ ,  $R^2 = 82.32\%$ ,  $R^2$  (adj) = 79.11%, Significant at 95%

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปัจจัยหลัก (Main Effect) ได้แก่ ความหนาผนังท่อ (Wall Thickness), รัศมีดัด (Bending Radial), เวลาหยุด (Dwell Time) และมุมองศาการดัด (Bending Angle) มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยหลักทั้ง 4 ปัจจัย มีอิทธิพลต่อค่ามุมสปริงกลับในกระบวนการดัดท่ออย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ค่าความเชื่อมั่นของข้อมูลคือ  $R^2$  มีค่าเท่ากับร้อยละ 82.32,  $R^2$  (adj) มีค่าเท่ากับร้อยละ 79.11 ซึ่งค่า  $R^2$  ที่ได้มากกว่าร้อยละ 80 ดังนั้น ค่าที่ได้จึงมีความน่าเชื่อถือ สำหรับนำไปใช้ในการดำเนินงานวิจัยต่อไป (ธงชัย อริญชัย, 2557)

$$y_{\Delta\theta} = 10.657 - 0.34\tau - 0.019\beta + 0.0917\gamma + 0.00785\delta \quad (4.1)$$

โดยที่  $y_{\Delta\theta}$  คือ ค่ามุมสปริงกลับ (Springback angle) เมื่อ  $\tau$  คือ ความหนาผนังท่อ (Wall Thickness),  $\beta$  คือ รัศมีดัด (Bending Radial),  $\gamma$  คือ เวลาหยุด (Dwell Time),  $\delta$  คือ มุมองศาการดัด (Bending Angle)

เมื่อนำตัวแปรที่เหมาะสมต่อค่ามุมสปริงกลับในกระบวนการตัดต่อจากข้อมูลที่ได้  
นำไปแทนค่าตัวแปรของแต่ละปัจจัยจากโปรแกรมมินิแพบแล้ว สามารถสร้างสมการถดถอย  
(Regression Equation) ดังสมการ (4.1)

### ผลจากกระบวนการวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (ANN)

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network; ANN) สำหรับงานวิจัยนี้ จัดอยู่ในกลุ่ม  
Supervised Learning แบบ Regression ประกอบด้วยข้อมูลตัวอย่าง (Dataset) 2 กลุ่ม ได้แก่  
ข้อมูลการฝึกสอน (Train set) และข้อมูลการทดสอบ (Test set) ประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผลที่  
เรียกว่านิวรอนที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย แบ่งเป็นชั้นซ่อน (Layer) ตั้งแต่หนึ่งชั้น ในแต่ละนิวรอนจะ  
มีค่าน้ำหนัก (Weight) และไบแอส (Bias) เข้ามาเกี่ยวข้องโดยค่าทั้งสองสามารถปรับเปลี่ยนได้ตาม  
ความเหมาะสม กระบวนการทำงานมีดังต่อไปนี้

**ขั้นตอนที่ 1** เตรียมข้อมูลสำหรับการฝึกสอนและการทดสอบ โดยการนำข้อมูลที่เตรียมไว้  
จากการนำผลการทดลองกระบวนการตัดต่อที่มีต่อค่ามุมสปริงกลับจากตารางที่ 16 ทำการเตรียม  
ข้อมูลสำหรับกระบวนการวิธีโครงข่ายประสาทเทียม ประกอบด้วยตัวแปรต้น (x) และตัวแปร  
ตอบสนอง (y) ตามตาราง 20

**ขั้นตอนที่ 2** แบ่งข้อมูลสำหรับฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายโดยวิธีการสุ่ม จากข้อมูลสำหรับ  
กระบวนการวิธีโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับกระบวนการตัดต่อที่มีต่อค่ามุมสปริงกลับ จำนวน  
ทั้งสิ้น 27 ข้อมูล แบ่งข้อมูลการทดลอง (Dataset) ออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ข้อมูลสำหรับการฝึกสอน

ตาราง 20 ข้อมูลสำหรับกระบวนการวิธีโครงข่ายประสาทเทียม

ลำดับ	ตัวแปรต้น (x)				ตัวแปรตอบสนอง (y) Springback Angle
	Wall Thickness (x1)	Bending Radial (x2)	Dwell Time (x3)	Bending Angle (x4)	
1	4.57	76.2	0	60	7.93
2	4.57	76.2	0	60	8.02
3	4.57	76.2	0	60	7.97
4	4.57	114.3	3	90	8.27
5	4.57	114.3	3	90	8.39
6	4.57	114.3	3	90	8.41
7	4.57	152.4	6	120	7.58

ลำดับ	ตัวแปรต้น (x)				ตัวแปรตอบสนอง
	Wall Thickness (x1)	Bending Radial (x2)	Dwell Time (x3)	Bending Angle (x4)	(y) Springback Angle
8	4.57	152.4	6	120	7.45
9	4.57	152.4	6	120	7.61
10	5.59	76.2	3	120	8.19
11	5.59	76.2	3	120	8.33
12	5.59	76.2	3	120	8.26
13	5.59	114.3	6	60	7.15
14	5.59	114.3	6	60	7.19
15	5.59	114.3	6	60	7.16
16	5.59	152.4	0	90	6.85
17	5.59	152.4	0	90	6.91
18	5.59	152.4	0	90	6.82
19	6.10	76.2	6	90	8.92
20	6.10	76.2	6	90	8.87
21	6.10	76.2	6	90	8.95
22	6.10	114.3	0	120	7.14
23	6.10	114.3	0	120	7.08
24	6.10	114.3	0	120	7.21
25	6.10	152.4	3	60	6.49
26	6.10	152.4	3	60	6.39
27	6.10	152.4	3	60	6.31

(Train set) จำนวน 21 ข้อมูล คิดเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ ดังตาราง 21 และข้อมูลสำหรับการทดสอบ (Test set) จำนวน 6 ข้อมูล คิดเป็น 20 เปอร์เซ็นต์

**ขั้นตอนที่ 3** ออกแบบโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม ทำการหาจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นซ่อน ซึ่งการวิจัยนี้กระทำการทดลองที่จำนวน 1 ชั้นซ่อน (1 Layer) จำนวนนิวรอน 1-100 เพื่อหาจำนวนนิวรอนและกำหนดโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับฟังก์ชันกระตุ้น 4 ฟังก์ชัน

**ขั้นตอนที่ 4** กำหนดค่าน้ำหนักและไบแอสเริ่มต้นด้วยวิธีการสุ่ม กระบวนการเรียนรู้สำหรับการปรับค่าน้ำหนักและไบแอสที่เหมาะสม คือ L-BFGS (Limited-memory Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno Algorithm) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่เหมาะสมกับชุดข้อมูลที่มีขนาดเล็ก L-BFGS ค่อนข้างจะทำงานได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการช่วยประหยัดหน่วยความจำได้มาก

**ขั้นตอนที่ 5** กำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ โดยสามารถแบ่งรายละเอียด ได้แก่ กำหนดอัตราการเรียนรู้ที่ 0.001, กำหนดจำนวนรอบในการวนซ้ำที่ 50000, ฟังก์ชันกระตุ้นทำการเปรียบเทียบ 4 ฟังก์ชัน ได้แก่ Sigmoid Function (Logistic Function), ReLU Function, TanH Function และ Identity Function

**ขั้นตอนที่ 6** คำนวณผลรวมค่าน้ำหนักกับข้อมูลป้อนเข้า จากค่าที่ Output ในแต่ละชั้น หลังจากนั้นปรับค่าน้ำหนักและไบแอสย้อนกลับจากชั้น Output ไปยังชั้นซ่อนแรก ค่าน้ำหนักที่ส่งมาแต่ละหน่วยจะคำนวณด้วยฟังก์ชันผลรวม

**ขั้นตอนที่ 7** คำนวณค่าผลลัพธ์จริงที่ได้จากฟังก์ชันกระตุ้นกับผลลัพธ์เป้าหมาย

**ขั้นตอนที่ 8** คำนวณค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดฝึกสอนหากค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองต่ำที่สุดหรือรอบการวนซ้ำครบตามกำหนดจึงจบการทำงาน หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไขให้ปรับปรุงค่าน้ำหนักและไบแอสจนกว่าจะได้ค่า MSE ที่ต่ำที่สุด

**ตาราง 21** ข้อมูลสำหรับการฝึกสอน (Train set)

การทดลอง	ตัวแปรต้น (x)				ตัวแปรตอบสนอง (y) Springback Angle
	Wall Thickness (x1)	Bending Radial (x2)	Dwell Time (x3)	Bending Angle (x4)	
19	6.10	76.2	6	90	8.92
27	6.10	152.4	3	60	6.31
25	6.10	152.4	3	60	6.49
14	5.59	114.3	6	60	7.19
6	4.57	114.3	3	90	8.41
2	4.57	76.2	0	60	8.02
13	5.59	114.3	6	60	7.15
18	5.59	152.4	0	90	6.82
1	4.57	76.2	0	60	7.93

การทดลอง	ตัวแปรต้น (x)				ตัวแปรตอบสนอง (y) Springback Angle
	Wall Thickness (x1)	Bending Radial (x2)	Dwell Time (x3)	Bending Angle (x4)	
26	6.10	152.4	3	60	6.39
22	6.10	114.3	0	120	7.14
8	4.57	152.4	6	120	7.45
5	4.57	114.3	3	90	8.39
9	4.57	152.4	6	120	7.61
10	5.59	76.2	3	120	8.19
17	5.59	152.4	0	90	6.91
23	6.10	114.3	0	120	7.08
7	4.57	152.4	6	120	7.58
16	5.59	152.4	0	90	6.85
15	5.59	114.3	6	60	7.16
4	4.57	114.3	3	90	8.27

**ขั้นตอนที่ 9** เมื่อได้ค่า MSE ที่ต่ำที่สุดจึงทำการบันทึกค่าน้ำหนักและไบแอส รวมทั้งบันทึกตัวแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ เพื่อเตรียมการทำงานนายผลค่ามุมสปริงกลับจากฟังก์ชันกระตุ้นอื่นๆ ทั้งสิ้น 4 ฟังก์ชัน

**ขั้นตอนที่ 10** จบการทำงาน

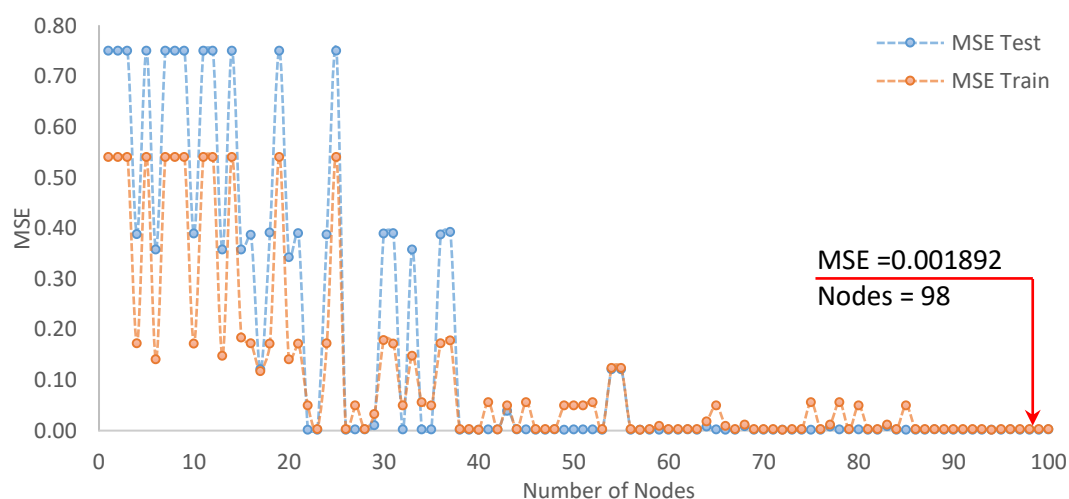
ตาราง 22 ข้อมูลสำหรับการทดสอบ (Test set)

การทดลอง	ตัวแปรต้น (x)				ตัวแปรตอบสนอง (y) Springback Angle
	Wall Thickness (x1)	Bending Radial (x2)	Dwell Time (x3)	Bending Angle (x4)	
24	6.10	114.3	0	120	7.21
20	6.10	76.2	6	90	8.87
3	4.57	76.2	0	60	7.97
12	5.59	76.2	3	120	8.26



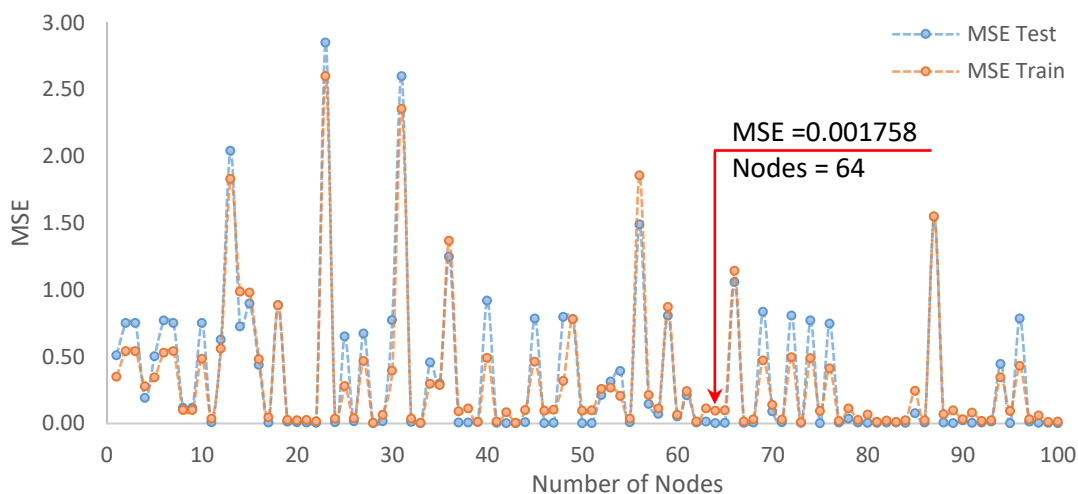
การทดลอง	ตัวแปรต้น (x)				ตัวแปรตอบสนอง (y)
	Wall Thickness (x1)	Bending Radial (x2)	Dwell Time (x3)	Bending Angle (x4)	Springback Angle
21	6.10	76.2	6	90	8.95
11	5.59	76.2	3	120	8.33

จากการทดลองออกแบบโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น Sigmoid หรือ Logistic พบว่า โครงสร้างที่เหมาะสมคือ 4-98-1 ประกอบด้วยนิวรอนชั้นนำเข้า (Input Layer) จำนวน 4 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) จำนวน 98 นิวรอน และนิวรอนในชั้นแสดงผล (Output Layer) จำนวน 1 นิวรอน โดยมีค่าเฉลี่ยความคาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) ต่ำที่สุดคือ 0.001892 ผลการทดลองหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น Sigmoid แสดงดังภาพ 44



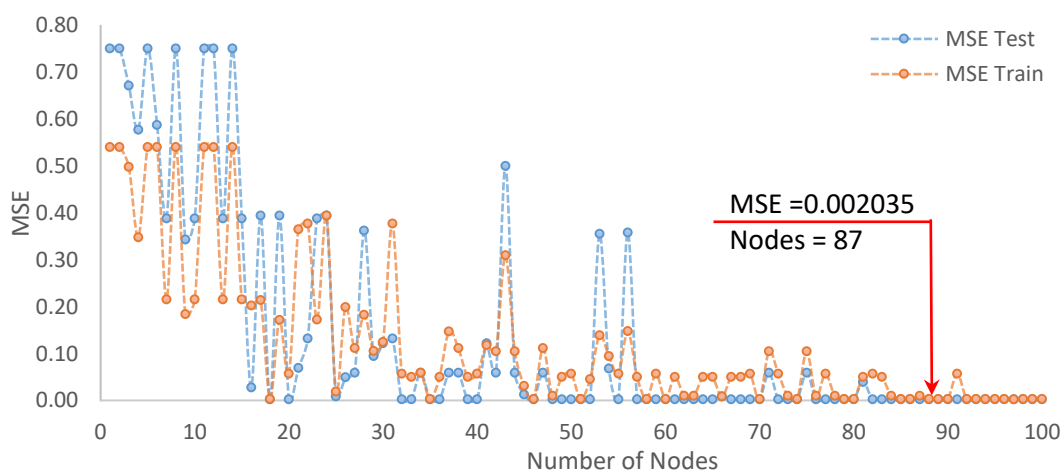
ภาพ 44 ผลการทดลองหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น Sigmoid

การทดลองออกแบบโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น ReLU พบว่า โครงสร้างที่เหมาะสมคือ 4-64-1 ประกอบด้วยนิวรอนชั้นนำเข้า (Input Layer) จำนวน 4 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) จำนวน 64 นิวรอน และนิวรอนในชั้นแสดงผล (Output Layer) จำนวน 1 นิวรอน โดยมีค่าเฉลี่ยความคาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) ต่ำที่สุดคือ 0.001758 ผลการทดลองหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น ReLU แสดงดังภาพ 45



ภาพ 45 ผลการทดลองหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น ReLU

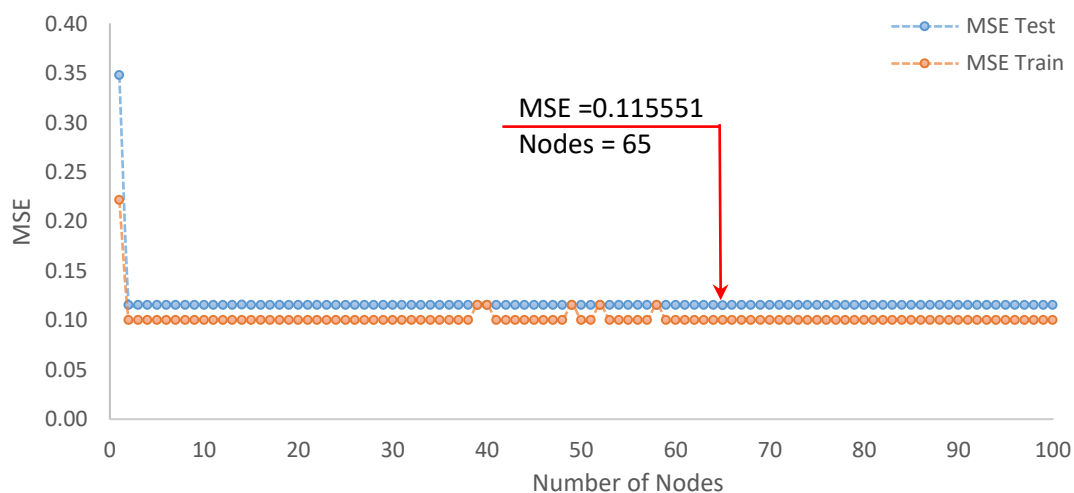
การทดลองออกแบบโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น TanH พบว่า โครงสร้างที่เหมาะสมคือ 4-87-1 ประกอบด้วยนิวรอนชั้นนำเข้า (Input Layer) จำนวน 4 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) จำนวน 87 นิวรอน และนิวรอนในชั้นแสดงผล (Output Layer) จำนวน 1 นิวรอน โดยมีค่าเฉลี่ยความคาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) ต่ำที่สุดคือ 0.002035 ผลการทดลองหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น TanH แสดงดังภาพ 46



ภาพ 46 ผลการทดลองหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น TanH

การทดลองออกแบบโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น Identity พบว่า โครงสร้างที่เหมาะสมคือ 4-65-1 ประกอบด้วยนิวรอนชั้นนำเข้า (Input Layer) จำนวน 4 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) จำนวน 65 นิวรอน และนิวรอนในชั้นแสดงผล (Output

Layer) จำนวน 1 นิวรอน โดยมีค่าเฉลี่ยความคาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) ต่ำที่สุดคือ 0.115551 ผลการทดลองหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น Identity แสดงดังภาพ 47



ภาพ 47 ผลการทดลองหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น Identity

จากการทดลองออกแบบโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมด้วยฟังก์ชันกระตุ้นทั้ง 4 ฟังก์ชัน ได้แก่ Sigmoid, ReLU, TanH และ Identity สามารถสรุปรูปแบบโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยนิวรอนชั้นนำเข้า (Input Layer) จำนวน 4 นิวรอน นิวรอนในชั้นแสดงผล (Output Layer) จำนวน 1 นิวรอน ส่วนชั้นซ่อน (Hidden Layer) จำนวน 1 ชั้นซ่อนนั้น ได้ทดสอบกับจำนวนของนิวรอน 1 ถึง 100 นิวรอน เพื่อหาค่า MSE ที่ต่ำที่สุด ผลการทดลองประกอบด้วยจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมที่แตกต่างกันไป ได้แก่ จำนวนนิวรอนของชั้น

ตาราง 23 เปรียบเทียบฟังก์ชันกระตุ้นแต่ละชนิดกับโครงสร้างที่เหมาะสมและค่าอื่น ๆ

ฟังก์ชันกระตุ้น	โครงสร้างที่เหมาะสม	Train-Test	MSE
Sigmoid	4-98-1	80-20	0.001892
ReLU	4-64-1	80-20	0.001758
TanH	4-87-1	80-20	0.002035
Identity	4-65-1	80-20	0.115551

ซ่อนฟังก์ชัน Sigmoid คือ 98 นิวรอน มีค่า MSE ต่ำสุด = 0.001892, ฟังก์ชัน ReLU คือ 64 นิวรอน มีค่า MSE ต่ำสุด = 0.001758, ฟังก์ชัน TanH คือ 87 นิวรอน มีค่า MSE ต่ำสุด = 0.002035 และ Identity คือ 65 นิวรอน มีค่า MSE ต่ำสุด = 0.115551 ดังแสดงในตาราง 23

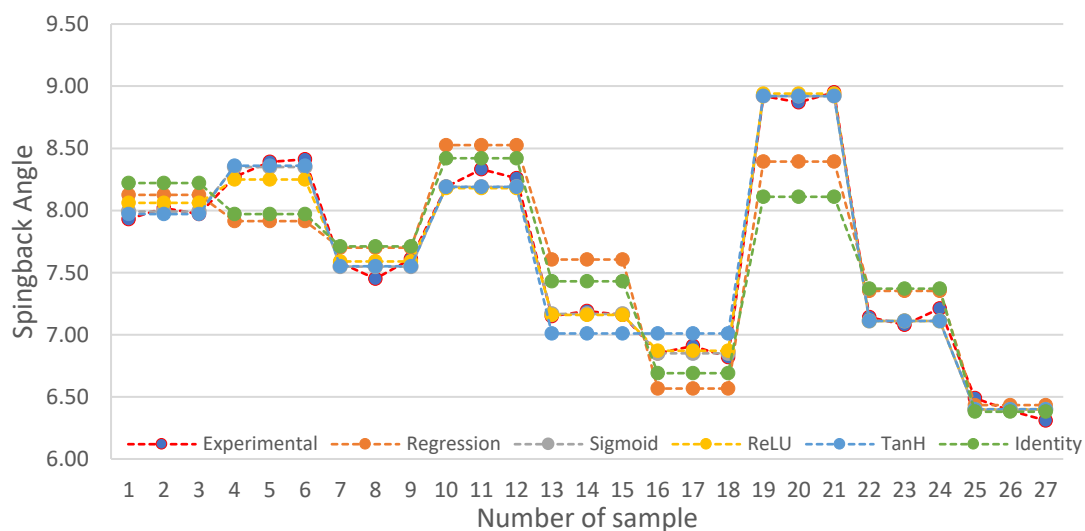
จากโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับฟังก์ชันกระตุ้น 4 ฟังก์ชัน ได้แก่ Sigmoid Function (Logistic Function), ReLU Function, TanH Function และ Identity Function ที่ได้มาโดยการทดลองที่ซ่อนจำนวน 1 ชั้น จึงนำโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมและตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลอง ดำเนินการคำนวณเพื่อทำนายค่ามุมสปริงกลับ โดยทำการเปรียบเทียบกับค่ามุมสปริงกลับจากการทดลอง (Experimental) และค่าผลการทำนายจากสมการถดถอย (Regression Equation) จากสมการ (4.1) ไว้ด้วย การเปรียบเทียบทั้งหมดได้แสดงผลการทำนายค่ามุมสปริงกลับดังตาราง 24

ตาราง 24 เปรียบเทียบผลการทำนายค่ามุมสปริงกลับจากการใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแต่ละชนิด

Bending	Experimental	Regression	Sigmoid	ReLU	TanH	Identity
1	7.93	8.13	7.97	8.06	7.97	8.22
2	8.02	8.13	7.97	8.06	7.97	8.22
3	7.97	8.13	7.97	8.06	7.97	8.22
4	8.27	7.91	8.36	8.25	8.36	7.97
5	8.39	7.91	8.36	8.25	8.36	7.97
6	8.41	7.91	8.36	8.25	8.36	7.97
7	7.58	7.70	7.55	7.59	7.55	7.71
8	7.45	7.70	7.55	7.59	7.55	7.71
9	7.61	7.70	7.55	7.59	7.55	7.71
10	8.19	8.53	8.19	8.18	8.19	8.42
11	8.33	8.53	8.19	8.18	8.19	8.42
12	8.26	8.53	8.19	8.18	8.19	8.42
13	7.15	7.61	7.17	7.16	7.01	7.43
14	7.19	7.61	7.17	7.16	7.01	7.43
15	7.16	7.61	7.17	7.16	7.01	7.43
16	6.85	6.57	6.86	6.87	7.01	6.69
17	6.91	6.57	6.86	6.87	7.01	6.69

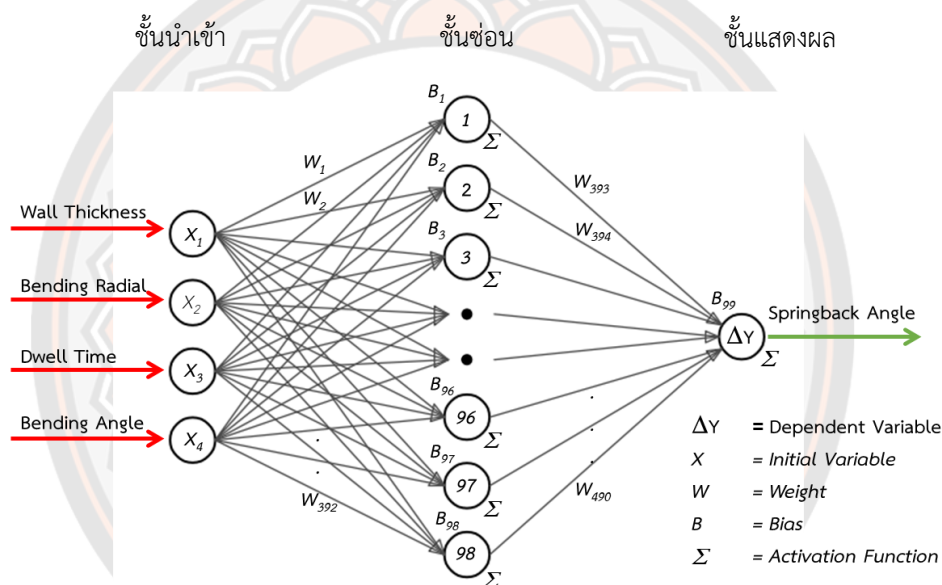
Bending	Experimental	Regression	Sigmoid	ReLU	TanH	Identity
18	6.82	6.57	6.86	6.87	7.01	6.69
19	8.92	8.40	8.92	8.94	8.92	8.11
20	8.87	8.40	8.92	8.94	8.92	8.11
21	8.95	8.40	8.92	8.94	8.92	8.11
22	7.14	7.35	7.11	7.11	7.11	7.37
23	7.08	7.35	7.11	7.11	7.11	7.37
24	7.21	7.35	7.11	7.11	7.11	7.37
25	6.49	6.43	6.40	6.40	6.40	6.38
26	6.39	6.43	6.40	6.40	6.40	6.38
27	6.31	6.43	6.40	6.40	6.40	6.38
R-Squared (%)		82.32	99.42	98.99	98.53	79.53

จากผลการทำนายค่ามุมสปริงกลับตามตาราง 24 สามารถแสดงผลการทำนายค่าดังกล่าวเป็นกราฟเส้นตรงเพื่อเปรียบเทียบความชัดเจนของผลจากฟังก์ชันกระตุ้นแต่ละชนิด โดยทำการเปรียบเทียบกับค่ามุมสปริงกลับจากการทดลอง (Experimental) และค่าผลการทำนายจากสมการถดถอย (Regression Equation) ไว้ด้วย ดังแสดงตามภาพ 48



ภาพ 48 เปรียบเทียบผลการทำนายค่ามุมสปริงกลับจากการใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแต่ละชนิด

จากการเปรียบเทียบผลการทำนายค่ามุมสปริงกลับจากการใช้ฟังก์ชันกระตุ้น 4 ชนิด จากโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม ที่ได้มาโดยการทดลองที่ชั้นซ่อนจำนวน 1 ชั้น จากตาราง 24 สังเกตได้ว่า ฟังก์ชันกระตุ้น Sigmoid หรือ Logistic Function และ ให้ค่าการทำนายที่ใกล้เคียงกับค่ามุมสปริงกลับจากการทดลอง (Experimental) มากที่สุด ซึ่งมีค่า  $R^2$  มีค่าเท่ากับร้อยละ 99.42 ลำดับถัดมาคือฟังก์ชันกระตุ้น TanH ซึ่งมีค่า  $R^2$  มีค่าเท่ากับร้อยละ 98.99 ลำดับที่ 3 คือฟังก์ชันกระตุ้น ReLU ซึ่งมีค่า  $R^2$  มีค่าเท่ากับร้อยละ 98.53 และฟังก์ชันกระตุ้นลำดับสุดท้ายที่ให้ค่า  $R^2$  ต่ำที่สุดคือ Identity Function มีค่าเท่ากับร้อยละ 79.53 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ที่สามารถทำนายได้แม่นยำดังแสดงตามภาพ 49

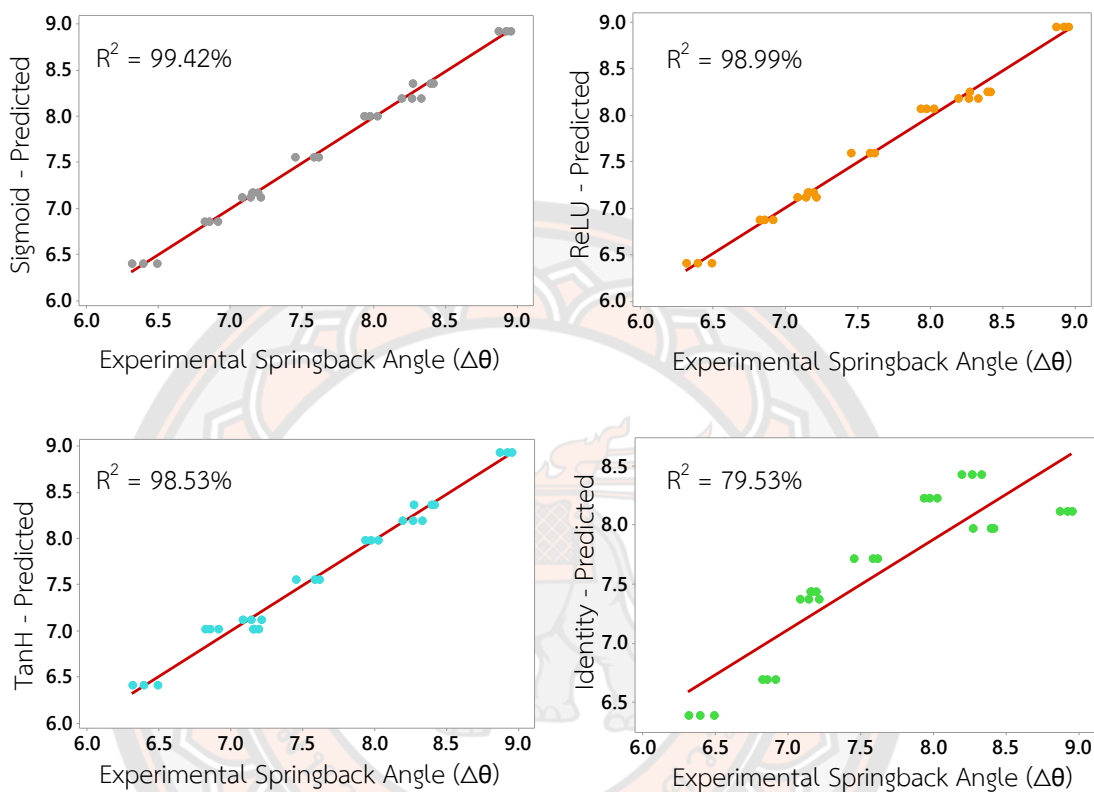


ภาพ 49 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

ข้อสังเกตอีกประการหนึ่ง จะเห็นได้ว่าการทำนายค่ามุมสปริงกลับโดยใช้สมการถดถอยนั้น กลับให้ค่า  $R^2$  ที่สูงกว่าการทำนายโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน 65 นิวรอน ด้วยฟังก์ชันกระตุ้น Identity Function ซึ่งมีค่า  $R^2$  เท่ากับร้อยละ 79.53 แต่การทำนายโดยใช้สมการถดถอยมีค่า  $R^2$  เท่ากับร้อยละ 82.32 มีค่ามากกว่าถึงร้อยละ 2.79

จากการสังเกตเปรียบเทียบผลลัพธ์โดยประเมินความแม่นยำจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Squared) สามารถสรุปได้ว่า ควรเลือกใช้โครงสร้างที่เหมาะสมคือ 4-98-1 ประกอบด้วยนิวรอนในชั้นนำเข้า (Input Layer) จำนวน 4 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) จำนวน 98 นิวรอน และนิวรอนในชั้นแสดงผล (Output Layer) จำนวน 1 นิวรอน และเลือกใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากฟังก์ชันกระตุ้น Sigmoid Function ซึ่งมีค่า  $R^2$  เท่ากับร้อยละ 99.42 สำหรับ

การใช้ทำนายผลค่ามุมสปริงกลับ เพื่อให้ได้ผลการทำนายค่ามุมสปริงกลับที่แม่นยำที่สุดสำหรับการตัดท่อโลหะสำหรับงานวิจัยนี้ ดังแสดงตามกราฟแสดงความสัมพันธ์ผลลัพธ์เป้าหมายกับผลการทำนายเปรียบเทียบจากการใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแต่ละชนิดของค่ามุมสปริงกลับ ตามภาพ 50



ภาพ 50 ความสัมพันธ์ผลลัพธ์เป้าหมายกับผลการทำนายเปรียบเทียบจากการใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแต่ละชนิดของค่ามุมสปริงกลับ

#### ผลการทดสอบการตัดท่อจากผลจากการทำนาย

ดังปรากฏแล้วว่าควรเลือกใช้โครงสร้าง ANN ที่เหมาะสมคือ 4-98-1 ประกอบด้วยนิวรอนในชั้นนำเข้า (Input Layer) จำนวน 4 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) จำนวน 98 นิวรอน และนิวรอนในชั้นแสดงผล (Output Layer) จำนวน 1 นิวรอน โดยเลือกใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากฟังก์ชันกระตุ้น Sigmoid Function ซึ่งมีค่า  $R^2$  เท่ากับร้อยละ 99.42 สำหรับการใช้ทำนายผลค่ามุมสปริงกลับ ในลำดับถัดไปเป็นขั้นตอนการนำผลการทำนายที่ได้ไปทดสอบตัวแบบทางคณิตศาสตร์แล้วเปรียบเทียบกับผลการตัดจากการทำนายจากสมการถดถอย (Regression Equation) โดยการสุ่มทดสอบการตัดรวมทั้งสิ้น 18 การทดสอบ ได้ผลแสดงตามตาราง 25 และ 26

ตาราง 25 ผลการทดสอบการตัดต่อจากการทำนายโดยสมการถดถอย

ลำดับ	WT	BR	DT	BA	ค่ามุมจากการทำนาย ด้วยสมการถดถอย	ค่ามุมเป้าหมาย ในการตัด ( $\theta_b$ )	ค่ามุมจริงที่ วัดได้	
1	4.57	76.2	0	60	8.19	68.19	60.74	
							60.58	
							60.81	
2	5.59	114.3	6	60	7.67	67.67	61.42	
							61.31	
							61.56	
3	6.10	76.2	6	90	8.46	98.46	89.22	
							89.37	
							89.11	
							$R^2 =$	99.47
							MSE =	1.0559

ตาราง 26 ผลการทดสอบการตัดต่อจากการทำนายโดย ANN

ลำดับ	WT	BR	DT	BA	ค่ามุมจากการทำนาย ด้วย ANN	ค่ามุมเป้าหมาย ในการตัด ( $\theta_b$ )	ค่ามุมจริงที่ วัดได้	
1	4.57	76.2	0	60	7.86	67.86	59.94	
							60.09	
							60.11	
2	5.59	114.3	6	60	6.93	66.93	60.24	
							60.32	
							60.51	
3	6.10	76.2	6	90	8.88	98.88	89.82	
							89.77	
							89.93	
							$R^2 =$	99.97
							MSE =	0.0593



ผลจากตาราง 25 และ 26 แสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการทดสอบการตัดต่อจริงจากการทำนาย โดยสมการถดถอย จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) = 99.47% และให้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) = 1.0559 เมื่อทำการทดสอบการตัดต่อจริงจากการทำนายโดย ANN จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) = 99.97% ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่า และให้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) = 0.0593 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยกว่า แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ที่ 4-98-1 โดยเลือกใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากฟังก์ชันกระตุ้น Sigmoid Function ให้ผลการทดสอบจริงในการตัดต่อที่มีค่าที่ดีที่สุด การปรับปรุงเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 99.47 และ 99.77 ตามลำดับ

นอกจากนี้ ได้มีการทดสอบการตัดต่อตามแบบวิธีเดิมของฝ่ายช่างกล โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้ท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และความหนาเท่ากัน ทำการทดสอบจำนวน 9 ครั้ง จากข้อมูลค่ามุมจากการทำนายตามแบบวิธีการเดิม รายละเอียดแสดงดังตาราง 27

ตาราง 27 ผลการทดสอบการตัดต่อจากการทำนายตามแบบวิธีเดิม

ลำดับ	WT	BR	DT	BA	ค่ามุมจากการทำนายตามแบบวิธีเดิม	ค่ามุมเป้าหมายในการตัด ( $\theta_b$ )	ค่ามุมจริงที่วัดได้	
1	5.59	114.3	0	90	6	96	88.87	
							88.34	
							88.91	
							88.22	
2	6.1	76.2	0	45	3.5	48.6	38.32	
							38.61	
							38.27	
							38.19	
							38.41	
							$R^2 =$	94.91
							MSE =	25.438

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพจากผลการทดสอบการตัดต่อตามแบบวิธีเดิมของฝ่ายช่างกลโรงงานแม่เมาะ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) = 94.91% ส่วนการทำนายโดย ANN ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) = 99.97% ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่า ดังนั้น กล่าวได้ว่าการทำนายโดยวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) เพื่อนำไปปฏิบัติจริงในการตัดต่อให้ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากแบบเดิมร้อยละ 5.06

งานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับการวิจัยเรื่องการสร้างแบบจำลอง Forward และ Reverse Modelling ของการขึ้นรูปการไหลของการอบอ่อนท่ออลูมิเนียม เกรด H30 ของ Podder, B., Banerjee, P., Kumar, K. R., & Hui, N. B. (2020) ได้ทำการใช้แนวทางโครงข่ายประสาทเทียม 3 วิธีการ จากนั้นทำการวัดประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 3 แล้วนำมาเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์การถดถอย ผลการวิจัยพบว่า GANN ทำงานได้ดีกว่าวิธีอื่นมาก และจำเป็นต้องพิจารณาตัวแปรกระบวนการอื่นเพิ่มเติมเพื่อความแม่นยำในการทำนายที่ดีขึ้น และพบว่าความแม่นยำในการทำนายโดยใช้ LBFSGNN นั้นดีกว่าวิธีอื่น และมีความสอดคล้องกับ Zhou, H. F., Zhang, S. Y., Qiu, L. M., & Wang, Z. L. (2021) ได้ศึกษาการทำนายผลการสปริงกลับของท่ออะลูมิเนียม 6060-T6 โดยพิจารณาผลกระทบของหน้าตัดของท่อจากการใช้เมนเดรลบนเครื่องตัดต่อแบบโรตารี โดยการแยกแยะตัวแปรที่มีผลต่อการสปริงกลับหลายตัวแปร ผลการวิจัยพบว่า จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียม 3 รูปแบบ ค่าความผิดพลาดเปอร์เซ็นต์สัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) สำหรับมุมสปริงกลับของวิธีการที่ดีที่สุด คือ 4.73%

## บทที่ 5

### บทสรุป

การลงทุนของผู้ประกอบการในภาคอุตสาหกรรมต่างมุ่งหวังผลกำไรในการประกอบธุรกิจทั้งสิ้น การประกอบกิจการในธุรกิจนั้น ๆ จำเป็นต้องมีการลงทุน มีกระบวนการผลิต และการส่งมอบต่อลูกค้า การได้มาซึ่งกำไรจะมากหรือน้อยนั้นองค์ประกอบที่สำคัญขึ้นอยู่กับ การลดต้นทุนจะเป็นผลให้ได้กำไรเพิ่มขึ้น ระบบลีน (LEAN) เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับการประกอบกิจการขององค์กร ช่วยลดความสูญเสีย เปลี่ยนความสูญเสียไปให้มีคุณค่า มีทั้งหมด 7 อย่าง หรือที่เรียกว่า 7 waste ได้แก่ ความสูญเสียเนื่องจากการผลิตมากเกินไป (Overproduction), ความสูญเสียเนื่องจากการเก็บวัสดุคงคลัง (Inventory), ความสูญเสียเนื่องจากการขนส่ง (Transportation), ความสูญเสียเนื่องจากการเคลื่อนไหว (Motion), ความสูญเสียเนื่องจากระบวนการผลิต (Processing), ความสูญเสียเนื่องจากการรอคอย (Delay), ความสูญเสียเนื่องจากการผลิตของเสีย (Defect) การลดความสูญเสียเหล่านี้จะไม่เกิดประโยชน์ต่อองค์กรเลย หากผู้บริหารงาน ผู้นำองค์กร รวมทั้งบุคลากรขาดความใส่ใจในการแก้ปัญหาอย่างจริงจัง

สำหรับหนึ่งในปัญหาความสูญเสียเนื่องจากระบวนการผลิต (Processing) กลไกของการขับเคลื่อนการผลิตที่สำคัญ คือ เครื่องจักร (Machine) ซึ่งในอดีตนั้นสถานประกอบการส่วนใหญ่ยังใช้เครื่องจักรที่ควบคุมด้วยมือ (Manual) แต่ปัจจุบันนี้การใช้ระบบอัตโนมัติ (Automation System) ได้เข้ามามีส่วนช่วยในกระบวนการผลิตมากขึ้นและมีบทบาทอย่างยิ่งในกระบวนการผลิต ซึ่งมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเสมอมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพื่อเป็นการทดแทนต้นทุนด้านแรงงานมนุษย์ เพื่อการเพิ่มกำลังการผลิต และสุดท้ายเพื่อผลกำไรที่สูงสุดขององค์กร

การหาค่าที่เหมาะสมสปริงกลับของเครื่องซีเอ็นซีตัดท่อบนพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียมเป็นโครงการวิจัยเพื่อมุ่งเน้นแก้ปัญหาในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม โดยรวมเน้นการแก้ปัญหาการใช้งานของเครื่องซีเอ็นซีตัดท่อเพื่อลดเวลาในการตั้งเครื่อง ลดความสูญเสียวัสดุชิ้นงานจากการตั้งเครื่อง หนึ่งในปัญหาของการผลิตด้วยเครื่องซีเอ็นซีตัดท่อ คือ การสปริงกลับ (Springback) ในขั้นตอนการตัดท่อหลังจากการตัดแล้ว เครื่องมือที่จับยึดจะปลดออก จากนั้นจะสังเกตเห็นว่าท่อหลังจากการตัดจะสปริงกลับหรือดีดตัวออก เป็นผลจากพฤติกรรมของวัสดุท่อแต่ละชนิดหลังจากการขึ้นรูปโดยการดัด (Bending) ปัญหาการสปริงกลับเป็นสาเหตุทำให้ต้องใช้เวลาในการตั้งเครื่อง เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการสปริงกลับหลายประการในการตัดท่อ หลายงานวิจัยต่างให้ความสำคัญต่อปัจจัยที่มีผลต่อการสปริงกลับจากการตัดท่อโดยเฉพาะงานวิจัยใน

ต่างประเทศ ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสปริงกลับเหล่านี้มีความสำคัญแตกต่างกันออกไป จึงจำเป็นที่  
ต้องศึกษาหาความสัมพันธ์ของปัจจัย จากนั้นจึงนำเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural  
network) มาประยุกต์ใช้ในการทำนายค่าการสปริงกลับ เพื่อการปรับตั้งตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดใ  
การตัดท่อโลหะ เป็นการลดระยะเวลา ขั้นตอนและจำนวนชิ้นงานทดสอบสำหรับการปรับตั้งค่าตัว  
แปรต่าง ๆ บนเครื่องตัดท่อ (Rotary Tube Bending) เพื่อเกิดประโยชน์ต่อองค์กรอุตสาหกรรมที่  
เกี่ยวข้อง

ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปต่อยอดพัฒนาความก้าวหน้าทางนวัตกรรมของ  
กระบวนการผลิตในส่วนของขั้นตอนการตัดท่อสำหรับสถานประกอบการ SMEs ได้ด้วย โดยสามารถ  
นำ Algorithm ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในระบบ PC Industrial base hardware และ PLC เข้ามาช่วยใ  
การสร้างและพัฒนา ปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตให้เป็นระบบซีเอ็นซีแบบอัตโนมัติด้วยนวัตกรรมที่  
นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ดีของสถานประกอบการ เพิ่มขีดความสามารถในกระบวนการ  
ผลิตให้สถานประกอบการได้ผลผลิตและรายได้ที่เพิ่มมากขึ้น

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิจัยร่วมและดำเนินการเก็บข้อมูลร่วมกับหน่วยงานภายในโรงไฟฟ้าแม่  
เมาะ (กฟผ.แม่เมาะ) จังหวัดลำปาง ซึ่งก่อนหน้านั้นแผนก หทคม-ฟ. / กอง กบรรม5-ฟ. / ฝ่าย อรม. ใน  
โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ได้พยายามเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการสปริงกลับ (Springback) ของท่อไอน้ำแรงดันสูง  
(Steam Boiler) สำหรับการตัดท่อในแต่ละครั้งจะมีการปรับตั้งปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสปริง  
กลับจนได้ขนาดมุมที่ต้องการ ซึ่งเสียเวลาและวัสดุเป็นอย่างมาก หลังจากงานวิจัยนี้หน่วยงานสามารถ  
นำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์เพื่อปรับตั้งค่าต่าง ๆ ได้ในเวลาอันรวดเร็วอีกด้วย

การสรุปผลการวิจัยถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ สรุปผลการทดลองการตัดท่อโลหะโดยการ  
ออกแบบและวิเคราะห์การทดลองโดยวิธีการของทาคุชิ สรุปผลของวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม  
(ANN) และสรุปผลการทดสอบการตัดท่อจริงจากผลการทำนาย ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

### สรุปผลการวิจัยการทดลองกระบวนการตัดท่อโลหะ

1. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลองโดยวิธีการของทาคุชิ (Taguchi Method) เป็นวิธีที่  
ได้รับความนิยม และสามารถหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่ามุมสปริงกลับของท่อโลหะ  
สำหรับงานไอน้ำแรงดันสูง (Steam Boiler) ชนิดท่อไร้ตะเข็บเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง  
(Seamless Cold Drawn Medium-Carbon Steel Tubes) เกรด ASTM A-210 Gr. A1 ได้ หาก  
นำวิธีทาคุชิไปใช้ในการผลิตจำนวนมาก (Mass Production) โรงงาน (Factory) วิศวกรรมการผลิต  
หรือกระบวนการทางวิศวกรรมอื่นๆ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของงานมากยิ่งขึ้น

2. ปัจจัยหลัก (Main Effect) ทั้ง 4 ปัจจัย ได้แก่ ความหนาผนังท่อ (Wall Thickness), รัศมี  
ดัด (Bending Radial), เวลาหยุด (Dwell Time) และมุมมองการดัด (Bending Angle) มีอิทธิพล

ต่อค่ามุมสปริงกลับในกระบวนการตัดท่ออย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ผลการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการวิจัยปัจจัยอื่น ๆ ในอนาคต เช่น ความเค้นของวัสดุ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ประเภทวัสดุท่อ หรือความเร็วในการตัด เป็นต้น

3. ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับมากที่สุด คือ รัศมีดัด (Bending Radial), มุมองศาการดัด (Bending Angle) ความหนาผนังท่อ (Wall Thickness) และเวลาหยุด (Dwell Time) มีผลกระทบ 43.01, 25.16, 16.05 และ 15.78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าปัจจัยความหนาผนังท่อและปัจจัยเวลาหยุดมีค่าร้อยละที่ใกล้เคียงกัน ห่างกันเพียง 0.27 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น หากมีการศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ตามข้อ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละปัจจัยอาจมีนัยสำคัญที่แตกต่างกัน

4. สำหรับอิทธิพลของระดับปัจจัยที่ทำให้เกิดค่าสปริงกลับที่น้อย เมื่อพิจารณาปัจจัยหลัก (Main Effect) ทั้ง 4 ปัจจัย สามารถสรุปได้ว่า ความหนาผนังท่อต้องมีค่าที่ต่ำ รัศมีดัดต้องมีค่าที่ต่ำ เวลาหยุดต้องใช้เวลานานที่สุด และมุมองศาการดัดต้องมีขนาดที่สูง

5. Time Dependent นอกเหนือจากการพิจารณาก่อนและหลังกระบวนการผลิตแล้ว หากพิจารณาในกระบวนการผลิตด้วยโดยเฉพาะการเจาะจงที่กระบวนการของเครื่องจักร เช่น การควบคุมเวลาในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปวัสดุจะสามารถช่วยในเรื่องค่ามุมสปริงกลับได้ด้วย ในอนาคต หากมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปัจจัยที่ขึ้นกับเวลา (Time-Dependent) ควรศึกษากระบวนการทั้ง 3 ระยะ ได้แก่ กระบวนการก่อนการขึ้นรูป ระหว่างการขึ้นรูป และหลังการขึ้นรูป

### สรุปผลกระทบของวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (ANN)

1. ปฏิบัติการออกแบบโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมคือ 4-98-1 ประกอบด้วยนิเวรอนชั้นนำเข้า (Input Layer) จำนวน 4 นิเวรอน นิเวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Layer) จำนวน 98 นิเวรอน และนิเวรอนในชั้นแสดงผล (Output Layer) จำนวน 1 นิเวรอน และเลือกใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากฟังก์ชันกระตุ้น Sigmoid Function โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) ต่ำที่สุดคือ 0.001892 เมื่อทำนายผลให้ค่า  $R^2$  เท่ากับร้อยละ 99.42

2. ฟังก์ชันกระตุ้น Sigmoid หรือ Logistic Function และ ให้ค่าการทำนายที่ใกล้เคียงกับค่ามุมสปริงกลับจากการทดลอง (Experimental) มากที่สุด ซึ่งมีค่า  $R^2$  มีค่าเท่ากับร้อยละ 99.42 ลำดับถัดมาคือฟังก์ชันกระตุ้น TanH ซึ่งมีค่า  $R^2$  มีค่าเท่ากับร้อยละ 98.99 ลำดับที่ 3 คือฟังก์ชันกระตุ้น ReLU ซึ่งมีค่า  $R^2$  มีค่าเท่ากับร้อยละ 98.53 และฟังก์ชันกระตุ้นลำดับสุดท้ายที่ให้ค่า  $R^2$  ต่ำที่สุดคือ Identity Function มีค่าเท่ากับร้อยละ 79.53

3. การทำนายค่ามุมสปริงกลับโดยใช้สมการถดถอยนั้นกลับให้ค่า  $R^2$  ที่สูงกว่าการทำนายโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน 65 นิเวรอน ด้วยฟังก์ชันกระตุ้น Identity Function ซึ่งมีค่า

$R^2$  เท่ากับร้อยละ 79.53 แต่การทำนายโดยใช้สมการถดถอยมีค่า  $R$ -sq เท่ากับร้อยละ 82.32 มีค่ามากกว่าถึงร้อยละ 2.79

### สรุปผลการทดสอบการตัดต่อจากผลจากการทำนาย

1. การทดสอบการตัดต่อจริงจากการทำนายโดยสมการถดถอย จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) = 99.47% เมื่อทำการทดสอบการตัดต่อจริงจากการทำนายโดย ANN จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) = 99.97% แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) จากฟังก์ชันกระตุ้น Sigmoid Function

2. ประสิทธิภาพจากผลการทดสอบการตัดต่อตามแบบวิธีเดิมของฝ่ายช่างกล โรงไฟฟ้าแม่เมาะ (แบบเดิม) ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) = 94.91% ส่วนการทำนายโดย ANN ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) = 99.97% ดังนั้น การทำนายด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) เพื่อนำไปปฏิบัติจริงในการตัดต่อให้ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากแบบเดิมร้อยละ 5.06

### ข้อเสนอแนะ

1. ผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อค่ามุมสปริงกลับประกอบด้วยปัจจัยหลายประการ ดังปรากฏในหลายงานที่ทำการศึกษามาแล้ว หากต้องการศึกษาปัจจัยอื่น ๆ นอกเหนือจากปัจจัยที่กล่าวมา จะเป็นการดียิ่ง เพราะจะเป็นฐานข้อมูลให้กับการศึกษาในอนาคต

2. Time Dependent ในกระบวนการผลิตด้วยโดยเฉพาะการเจาะจงที่กระบวนการของเครื่องจักร เช่น การควบคุมระยะเวลาในการขึ้นรูปวัสดุ ควรได้รับการศึกษาและพัฒนาในแง่มุมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในลำดับต่อไป เพื่อแก้ปัญหาจากผลกระทบต่อค่ามุมสปริงกลับหรือในเรื่องอื่น ๆ ให้ดีขึ้น

3. การทำนายโดยการออกแบบโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายค่ามุมสปริงกลับ ให้ค่าการทำนายที่มีความแม่นยำมากกว่าการทำนายโดยใช้สมการถดถอย ทั้งนี้ควรพิจารณาเลือกฟังก์ชันการกระตุ้นที่เหมาะสมด้วย

4. การออกแบบโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายค่ามุมสปริงกลับ กำหนดชั้นซ่อนที่จำนวนเพียง 1 ชั้นซ่อน และกำหนดการทดลองจำนวนนิวรอนที่ไม่เกิน 100 นิวรอน อาจไม่ใช่ค่าการทำนายที่มีความแม่นยำสูงสุด หากมีการนำไปสู่การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) โดยเพิ่มจำนวนชั้นซ่อนหรือจำนวนนิวรอนที่เพิ่มขึ้นอาจให้ค่าการทำนายที่มีความแม่นยำเพิ่มขึ้นจากนี้

5. การทำนายโดยใช้วิธีการโครงข่ายประสาทเทียม ถือว่าเป็นหนึ่งของการใช้ศาสตร์ของการเรียนรู้ของเครื่องช่วยในการทำนาย จะเห็นว่าให้ค่า  $R^2$  ที่สูง ซึ่งอาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด ในอนาคตควรนำศาสตร์การเรียนรู้ของเครื่องหรือปัญญาประดิษฐ์อื่นช่วยในการทำนายอันอาจให้ค่าที่แม่นยำมากกว่า

6. เนื่องจากข้อมูลมีจำนวนจำกัดเพียง 27 การทดลอง ผลลัพธ์ที่ได้อาจประสบปัญหาความสามารถในการทำนายผล ในอนาคตควรเพิ่มข้อมูลสำหรับการทดลองอันอาจให้ผลการใช้งานมีประสิทธิภาพมากขึ้น

7. ความรู้พื้นฐานจนถึงระดับสูงสำหรับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการเขียนโค้ดมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับงานด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) การเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) และการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ผู้ศึกษาควรหาความรู้ในใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์อย่างสม่ำเสมอ







### บรรณานุกรม

- Aggarwal, C. C. (2018). *Neural networks and deep learning: a textbook*. Cham: Springer.
- Borchmann, L., Heftrich, C., & Engel, B. (2020). Influence of the stiffness of machine axes on the formation of wrinkles during rotary draw bending. *Sn Applied Sciences*, 2(10). doi:10.1007/s42452-020-03419-1
- Chow, T. W. S. (2007). *Neural networks and computing: learning algorithms and applications*. London: Imperial College Press.
- Daxin, E., & Liu, Y. (2010). Springback and time-dependent springback of 1Cr18Ni9Ti stainless steel tubes under bending. *Materials & Design*, 31(3), 1256-1261. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.09.026>
- Derr, R., Jung, A., & Diebels, S. (2019). Development of a simulation model for the automatic optimization of tools for tube embossing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 26, 50-69. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2019.05.002>
- E, D. X., Guan, Z. P., & Chen, J. S. (2012). Influence of Additional Tensile Force on Springback of Tube Under Rotary Draw Bending. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(11), 2316-2322. doi:10.1007/s11665-012-0202-7
- Fu, M., Wang, Z., Zhang, S., Liu, X., Lin, Y., & Wang, L. (2022). Full-cross-section deformation characterization of Cu/Al bimetallic tubes under Rotary-Draw-Bending based on physics-driven B-spline curves fitting. *Materials & Design*, 215, 110493. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110493>
- Gheorghe, A., Lucian, L., Mioara, G. F., & Adrian, C. V. (2007). INVESTIGATIONS ON SPRINGBACK OF BENT TUBES USING DESIGN OF EXPERIMENT AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS. *IFAC Proceedings Volumes*, 40(18), 331-336. doi: <https://doi.org/10.3182/20070927-4-RO-3905.00055>
- Ghiotti, A., Simonetto, E., & Bruschi, S. (2021). Insights on tube rotary draw bending with superimposed localized thermal field. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 33, 30-41.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.02.012>

- Ghiotti, A., Simonetto, E., Bruschi, S., & Bariani, P. F. (2017). Springback measurement in three roll push bending process of hollow structural sections. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 66(1), 289-292. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.119
- Groover, M. P. (2012). *Introduction to manufacturing processes*. Hoboken, N.J.: Wiley.
- Herber Engineering. (2023). Herber 76 CNCTB; Four-axis tube bending machine for advanced bending. Retrieved 9 May 2023, from <https://herber.se/en/herber-76-cnctb-en/>
- Jeong, H. S., Ha, M. Y., & Cho, J. R. (2012). Theoretical and FE Analysis for Inconel 625 Fine Tube Bending to Predict Springback. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(12), 2143-2148.  
doi:10.1007/s12541-012-0284-z
- Jiang, Z. Q., Yang, H., Zhan, M., Yue, Y. B., Liu, J., Xu, X. D., & Li, G. J. (2010). Establishment of a 3D FE model for the bending of a titanium alloy tube. *International Journal of Mechanical Sciences*, 52(9), 1115-1124.  
doi: 10.1016/j.ijmecsci.2009.09.029
- Kalpakjian, S. (2014). *Manufacturing engineering and technology* (7th in si units ed. ed.). Singapore: Pearson Education.
- Ku, T. W., Cha, J. H., Kim, Y. B., Kwak, O. G., Kim, W. S., & Kang, B. S. (2013). A study on process parameters for cold U-bending of SUS304L heat transfer tube using rotary draw bending. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(10), 3053-3061. doi:10.1007/s12206-013-0825-0
- Lei, G., & Xiaona, L. (2015). Study on The Process of Thin-walled Titanium Alloy Tube Bending. *Procedia Engineering*, 99, 1471-1475.  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.687>
- Li, H., Ma, J., Liu, B. Y., Gu, R. J., & Li, G. J. (2018). An insight into neutral layer shifting in tube bending. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 126, 51-70. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2017.11.013
- Li, H., Yang, H., & Liu, K. (2013). Towards an integrated robust and loop tooling design for tube bending. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65(9-12), 1303-1318. doi:10.1007/s00170-012-4258-1

- Li, H., Yang, H., Song, F. F., & Li, G. J. (2013). Springback nonlinearity of high-strength titanium alloy tube upon mandrel bending. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14(3), 429-438. doi:10.1007/s12541-013-0059-1
- Li, H., Yang, H., Song, F. F., Zhan, M., & Li, G. J. (2012). Springback characterization and behaviors of high-strength Ti-3Al-2.5V tube in cold rotary draw bending. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(9), 1973-1987. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.04.022
- Li, H., Yang, H., Tian, Y. L., Li, G. J., & Wang, Z. H. (2012). Geometry-dependent springback behaviors of thin-walled tube upon cold bending. *Science China-Technological Sciences*, 55(12), 3469-3482. doi:10.1007/s11431-012-5001-8
- Li, H., Zhang, L., Chen, G., Ma, J., Wei, D., Bian, T., Yang, J., Wu, c., Yang, H. (2022). Time-dependent springback of high strength titanium tubular materials: Experiment and modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, 299, 117354. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117354>
- Li, Y. S., Li, A. D., Yue, Z. M., Qiu, L. Y., Badreddine, H., Gao, J., & Wang, Y. G. (2020). Springback prediction of AL6061 pipe in free bending process based on finite element and analytic methods. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109(7-8), 1789-1799. doi:10.1007/s00170-020-05772-2
- Lin, J. C., & Lee, K. (2015). Optimization of Bending Process Parameters for Seamless Tubes Using Taguchi Method and Finite Element Method. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015. doi:10.1155/2015/730640
- Liu, J., Yang, H., Zhan, M., & Jiang, Z. Q. (2012). Accurate prediction of the profile of thick-walled titanium alloy tube in rotary-draw bending considering strength-differential effect. *Computational Materials Science*, 60, 113-122. doi: 10.1016/j.commatsci.2012.02.029
- Liu, Y. F., & Daxin, E. (2011). Effects of Cross-Sectional Ovalization on Springback and Strain Distribution of Circular Tubes Under Bending. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20(9), 1591-1599. doi:10.1007/s11665-010-9813-z

- Ma, J., Ha, T., Blindheim, J., Welo, T., Ringen, G., & Li, H. (2020). Exploring the Influence of Pre/Post-Aging on Springback in Al-Mg-Si Alloy Tube Bending. *Procedia Manufacturing*, 47, 774-780.  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.239>
- Ma, J., Li, H., & Fu, M. W. (2021). Modelling of Springback in Tube Bending: A Generalized Analytical Approach. *International Journal of Mechanical Sciences*, 204, 106516. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106516>
- Ma, J., Welo, T., & Wan, D. (2021). The impact of thermo-mechanical processing routes on product quality in integrated aluminium tube bending process. *Journal of Manufacturing Processes*, 67, 503-512.  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.015>
- Mair, G. (2019). *Essential manufacturing*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Mentella, A., Strano, M., & Gemignani, R. (2008). A new method for feasibility study and determination of the loading curves in the rotary draw-bending process. *International Journal of Material Forming*, 1, 165-168.  
doi:10.1007/s12289-008-0017-0
- Muhammad, Asad Iqbal Khan. (2023). Activation Functions in PyTorch. Retrieved 9 May 2023, from <https://machinelearningmastery.com/activation-functions-in-pytorch/>
- Oliveira, D. A., & Worswick, M. J. (2009). Tube bending and hydroforming of aluminium alloy S-rails. *International Journal of Material Forming*, 2(3), 197-215.  
doi:10.1007/s12289-009-0404-1
- Petru, Potrimba. (2023). What is an Activation Function? A Complete Guide. Retrieved 9 May 2023, from <https://blog.roboflow.com/activation-function-computer-vision/>
- Podder, B., Banerjee, P., Kumar, K. R., & Hui, N. B. (2020). Forward and reverse modelling of flow forming of solution annealed H30 aluminium tubes. *Neural Computing and Applications*, 32(7), 2081-2093. doi:10.1007/s00521-018-3749-x
- Safdarian, R. (2019). Failure Prediction of Superheater Tubes in Rotary Tube Bending Process Using GTN Damage Model. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 72(2), 475-486. doi:10.1007/s12666-018-1499-1

- Safdarian, R. (2020). Investigation of tube fracture in the rotary draw bending process using experimental and numerical methods. *International Journal of Material Forming*, 13(4), 493-516. doi:10.1007/s12289-019-01484-5
- Samarasinghe, S. (2007). *Neural networks for applied sciences and engineering: from fundamentals to complex pattern recognition*. Boca Raton: Auerbach Publications.
- Schey, J. A. (2000). *Introduction to manufacturing processes* (3rd ed. ed.). Boston: McGraw-Hill.
- Simonetto, E., Ghiotti, A. & Bruschi, S. (2021). In-process measurement of springback in tube rotary draw bending. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(9-10), 2485-2496. doi:10.1007/s00170-020-06453-w
- Sofuoglu, M. A., Gürgeç, S., Çakır, F. H., & Orak, S. (2017). Springback Behavior of AA6082T6 Tubes in Three-point Bending Operation. *Procedia Engineering*, 182, 658-664. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.176>
- Song, F. F., Yang, H., Li, H., Zhan, M., & Li, G. J. (2013). Springback prediction of thick-walled high-strength titanium tube bending. *Chinese Journal of Aeronautics*, 26(5), 1336-1345. doi: 10.1016/j.cja.2013.07.039
- Todd, R. H. (1994). *Manufacturing processes references guide* (1st ed. ed.). New York: Industrial Press.
- Wang, W., Hu, S. H., Abd El-Aty, A., Wu, C., Yang, Q. C., Chen, H., Shen, Y., & Tao, J. (2021). Springback analysis of different A-values of Cu and Al tubes in free bending forming technology: experimentation and finite element modeling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15. doi:10.1007/s00170-020-06465-6
- Wu, J., & Zhang, Z. (2021). An improved procedure for manufacture of 3D tubes with springback concerned in flexible bending process. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(11), 267-276. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.05.036>
- Xue, X., Liao, J., Vincze, G., & Pereira, A. B. (2018). Control strategy of twist springback for aluminium alloy hybrid thin-walled tube under mandrel-rotary draw bending. *International Journal of Material Forming*, 11(2), 311-323. doi:10.1007/s12289-017-1346-7

- Yang, H., Li, H., & Zhan, M. (2010). Friction role in bending behaviors of thin-walled tube in rotary-draw-bending under small bending radii. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(15), 2273-2284.  
doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.08.021
- Youssef, H. A. (2012). *Manufacturing technology: materials, processes, and equipment*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis/CRC Press.
- Zhan, M., Huang, T., & Yang, H. (2015). Variation of contractile strain ratio of Ti-3Al-2.5V tubes and its effects in tubes numerical control bending process. *Journal of Materials Processing Technology*, 217, 165-183.  
doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.11.019
- Zhan, M., Wang, Y., Yang, H., & Long, H. (2016). An analytic model for tube bending springback considering different parameter variations of Ti-alloy tubes. *Journal of Materials Processing Technology*, 236, 123-137.  
doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.05.008
- Zhang, H., & Hu, Y. (2022). Influence of pressure die's boosting on forming quality in bending process of thin-walled tube. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 196, 104612. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104612>
- Zhang, S., Fu, M., Wang, Z., Lin, Y., & He, C. (2020). Spring-Back Prediction of the Bi-Layered Metallic Tube under CNC Bending Considering Neutral Layer Shifting Extraction. *Applied Sciences* (14). doi:10.3390/app10144978
- Zhang, S. Y., Fu, M. Y., Wang, Z. L., Fang, D. Y., Lin, W. M., & Zhou, H. F. (2021). Springback prediction model and its compensation method for the variable curvature metal tube bending forming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(11-12), 3151-3165. doi:10.1007/s00170-020-06506-0
- Zhou, H. F., Zhang, S. Y., Qiu, L. M., & Wang, Z. L. (2021). Springback angle prediction of circular metal tube considering the interference of cross-sectional distortion in mandrel-less rotary draw bending. *Science Progress*, 104(1), 30. doi:10.1177/0036850420984303
- กอบเกียรติ สรรอุบล. (2563). *เรียนรู้ AI : Machine Learning ด้วย Python (พิมพ์ครั้งที่ 1)*. กรุงเทพฯ: มีเดีย.

- คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ OIE Forum 2019. (2562). สานพลังเสริมทัพปรับสู่อุตสาหกรรมอัจฉริยะ. วารสารเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 15(58), 3-7. สืบค้นจาก <https://www.oie.go.th/assets/portals/1/fileups/2/files/publications/oie-journal-59-2562.pdf>
- เรวดี แก้วมณี. (2563). New Normal ประเด็นท้าทายใหม่ของอุตสาหกรรมไทย. วารสารเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 16(59), 3-5. สืบค้นจาก <https://www.oie.go.th/>
- ณัฐโชติ พรหมฤทธิ์ และ สัจจาภรณ์ ไวจรรยา. (2564). Fundamental of DEEP LEARNING in Practice. (พิมพ์ครั้งที่ 1). นนทบุรี: บริษัท ไอดีซี พรีเมียร์ จำกัด.
- ธงชัย อรัญชัย. (2557). การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับบอลูมินัมอัลลอย 6061-T6 บนพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม (วิทยานิพนธ์ปริญญา ดุษฎีบัณฑิต). พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- บัญชา ปะสีละเตสัง. (2564). สร้างการเรียนรู้สำหรับ AI ด้วย python machine learning (พิมพ์ครั้งที่ 1). กทม: ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด.
- ปารเมศ ชูติมา. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ. (2552). เรียนรู้และใช้งาน PLC ฉบับสมบูรณ์. นนทบุรี: ไอดีซีฯ.
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา. (2551). การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง = Design and analysis of experiments. กรุงเทพฯ: ท้อป.
- ประสิทธิ์ เวียงแก้ว. (2550). คู่มืองานท่อ (Piping Quick Reference). (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- พิเชฐ ตระการชัยศิริ. (2540). การออกแบบเครื่องจักรกล (Machne Design). สงขลา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พิทยาภรณ์ โกมาร. (2555). การศึกษาการชดเชยการตีกลับของการตัดท่อทองแดง B88 และท่อสแตนเลส 904L (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ภาสกร เกวี. (2545). การวิเคราะห์การตีกลับของท่อเหล็กในกระบวนการตัดขึ้นรูป (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- วาสนา พรหมศิริพร, สิทธิ ไฉ่ววัฒนา, อนันตพร ธรรมอร่ามกิจ, รวิวัฒน์ รักสัจ, ประพจน์ ชุนทอง และ เจตวิทย์ ภัคทรัพย์. (2554). การออกแบบสร้างเครื่องตัดท่อโดยใช้แรงคน และวิเคราะห์พฤติกรรมการตัดด้วยระเบิดไฟไนท์เอลิเมนต์ การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25. CST70.

- วิลเลียม ดี, คาลิสเตอร์. เจ อาร์. (2548). วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน [Materials Science and Engineering An Introduction] (สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ และคณะ, แปล). กรุงเทพฯ: ท้อป. (ต้นฉบับพิมพ์ปี ค.ศ.2003).
- วิทย์ สิทธิเวคิน. (2562). วิสัยทัศน์และทิศทางอุตสาหกรรมไทย. วารสารเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 15(58), 8-11. สืบค้นจาก <https://www.oie.go.th/assets/portals/1/fileups/2/files/publications/oie-journal-59-2562.pdf>
- อรรถกร เก่งพล และวุฒิชัย ยังสว่าง. (2558). การประยุกต์ใช้วิศวกรรมคอนกรีตเรี้นท์และการจำลองสถานการณ์ในการเพิ่มความสามารถในการผลิตของกระบวนการตัดท่อ: กรณีศึกษา บริษัทผลิตท่อน้ำมัน. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ; ปีที่ 25, ฉบับที่ 2 (พ.ค.-ส.ค. 2558), หน้า 233-242.
- สิรภัทร เขียวชาญวัฒนา. (2563). โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) (พิมพ์ครั้งที่ 2). ขอนแก่น: หจก.โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา.
- สมศักดิ์ อธิธิโสภณกุล. (2555). อุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก (Steel Production Industry). กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- อุดมศักดิ์ ธีญญูรักษ์. (2540). การศึกษาพฤติกรรมการติดตัวกลับของอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมในการตัดกลมท่อรีียว (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- อดิศร ไทยเจริญ. (2550). การลดของเสียจากการเปลี่ยนรุ่นสำหรับกระบวนการตัดท่อไอเสียรถยนต์ (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.



# บรรณานุกรม





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

Material Inspection Certificate

มหาวิทยาลัยบูรเวศวร

INSPECTION CERTIFICATE														
PAGE : 1/1		DATE OF ISSUE : 2017-12-18												
CERTIFICATE NO. : 171218-01		L/C No. (P/O No.) : DL171113-041												
COMMODITY : Seamless Cold Drawn Medium-Carbon Steel Tubes		CUSTOMER :												
SPECIFICATION : ASTM/ASME A/S&210 Gr.A1 (Latest Edition)		SHIPPER :												
		MAED OFFICE : 298, Jangghi-ro, Goyeong, Kyung buk, Korea												
ITEM NO.	HEAT(LOT) NO.	ORDER SIZE		QUANTITY		TENSILE TEST (Gage Length: 50 mm)			HARDNESS TEST	HEAT TREATMENT	N.D.T	HYDRO-STATIC TEST	REMARK	
		O.D.(mm)	W.T.(mm)	L.(mm)	PCS	WEIGHT (MT)	Y.S.(Mpa)	T.S.(Mpa)					EL.(%)	HRB
1	D04012(7L162)	44.45	4.57	6.000	20	0.593	MIN 255	MIN 415	MIN 30	42	73/74	G	G	
2	D04012(7L164)	44.45	5.08	6.000	20	0.651	320	475	42	74/76	G	G		
3	8-18149(7L166)	44.45	5.59	6.000	113	3.995	330	475	40	74/75	G	G		
4	D04012(7L168)	50.8	5.08	6.000	90	3.402	325	470	42	73/75	G	G		
5	8-18149(7L171)	50.8	5.59	6.000	52	2.139	335	480	40	75/76	G	G		
ITEM NO.	IMPACT TEST ( ° C )	FLATTENING TEST	FLARING TEST	FLANGE TEST	VISUAL & DIMENSION	CHEMICAL COMPOSITION(%)						REMARK		
						C	Si	Mn	P	S				
1	Energy Joule	G	G	G	G	2	-	10	-	93	35	35		
2	Shear Area %	G	G	G	G	2	-	10	-	93	35	35		
3		G	G	G	G	2	-	10	-	93	35	35		
4		G	G	G	G	2	-	10	-	93	35	35		
5		G	G	G	G	2	-	10	-	93	35	35		

\*1 : T.S : TENSILE STRENGTH (Mpa) \*4 : NON-DESTRUCTIVE \*5 : DESIGNATION \*6 : CHEMICAL COMPOSITION

Y.S : YIELD POINT STRENGTH (Mpa) UT : Ultrasonic test RT : Radiographic test H : Heat(Ladle)Analysis 열원분석 2 : X 100

\*2 : E.L : Elongation ET : Eddy Current test P : Product Analysis 제품분석 3 : X 1000

\*3 : HEAT TREATMENT ANNEALING NORMALIZING MT : Magnetic Particle test \* G : GOOD

본 제품은 관련규격에 정한 시험 및 검사에 합격하였음을 증명합니다.  
WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL HEREIN HAS BEEN MADE AND TESTED IN ACCORDANCE WITH ABOVE SPECIFICATION AND THE RESULTS OF ALL TEST ARE ACCEPTABLE.



Inspector in Charge



# INSPECTION CERTIFICATE

CUSTOMER :

ORDER NO.: DLP1905-JE-1920

PROJECT NAME: N/A

COMMODITY : Seamless Cold Drawn Medium Carbon Steel Tubes

SPECIFICATION : ASME SA210 Gr.A1 (2017 ED.)



EN10204 TYPE 3.1

Head Office : #288-52, Anha-ro, Saengnim-myeon, Gimhae-si,

Gyeonggiangnam-do, (50801)Korea

date : 2019-05-03 Page : 1/3

CERT. NO.: HS-19G0705-03

no.	Lot No.	HEAT No.	SIZE			LENGTH	Pcs	QTY		Heat Treatment	E.C.T	NOTES
			O.D	WT(MIN)	WT(MAX)			T. Length(mm)	Kg			
1	F0401-1	M38817	44.45	6.10	6.10	6,000	79	474,000	3007.9	Normalized 920 °C (Holding Time 18Min)	ASTM E309 ACCEPT	* T.S. TENSILE STRENGTH (Mpa) * Y.S. YIELDPOINT STRENGTH (Mpa) * EL. ELONGATION (%) * H. HEAT ANALYSIS * P. PRODUCT ANALYSIS * 1. GAUGE LENGTH 50mm 0.2% OFFSET
2	F0401-2	M38817	44.45	6.10	6.000	79	474,000	3007.9				
3	F0401-3	M38817	44.45	6.10	6,000	79	474,000	3007.9				
4	F0401-4	M38817	44.45	6.10	6,000	79	474,000	3007.9				
5	F0401-5	M38817	44.45	6.10	6,000	79	474,000	3007.9				
Chemical Composition (%)												
no.	Lot No.	Spec	C	SI	Mn	P	S					
			X 1000									
		MIN	-	10	-	-	-					
		MAX	27	-	93	35	35					
1	F0401-1	* H	19	20	51	19	5					
		* P	-	-	-	-	-					
2	F0401-2	* H	19	20	51	19	5					
		* P	-	-	-	-	-					
3	F0401-3	* H	19	20	51	19	5					
		* P	-	-	-	-	-					
4	F0401-4	* H	19	20	51	19	5					
		* P	-	-	-	-	-					
5	F0401-5	* H	19	20	51	19	5					
		* P	-	-	-	-	-					
Tensile Properties												
no.	Lot No.	Spec	* T.S. (Mpa)	* Y.S. (Mpa)	* EL (%)	Hardness (HRB)	Flaming Test	Flattening Test	Surface	REMARK		
		MIN	415	255	30	-	-	-	-			
		MAX	-	-	-	79	-	-	-			
1	F0401-1	* 1	449 / 451	322 / 326	46 / 44	72 / 75	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT			
2	F0401-2	* 1	440 / 451	323 / 320	45 / 44	76 / 75	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT			
3	F0401-3	* 1	448 / 455	329 / 326	45 / 45	75 / 76	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT			
4	F0401-4	* 1	455 / 453	323 / 325	48 / 47	76 / 77	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT			
5	F0401-5	* 1	442 / 439	330 / 326	44 / 47	72 / 75	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT			

WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL HEREIN HAS BEEN MADE AND TESTED IN ACCORDANCE WITH ABOVE SPECIFICATION AND THE RESULTS OF ALL TEST ARE ACCEPTABLE.



Our Quality System is Certified in  
According to ISO 9001 : 2015

Myoung, Heo

Quality Management Dept Manager

Sureyor

원사 (대표이사)

HS-CP-003-011 REV01



# INSPECTION CERTIFICATE

CUSTOMER :

ORDER NO.: DLP1905-JE-1920

PROJECT NAME: N/A

COMMODITY : Seamless Cold Drawn Medium Carbon Steel Tubes

SPECIFICATION : ASME SA210 Gr.A1 (2017 ED.)

EN10204 TYPE 3.1

CERT. NO.: HS-19G0705-03

date : 2019-05-03 Page : 2/3

Head Office : #288-52, Anha-ro, Seongnam-si, Gyeonggi-do, Korea

Gyeonggi-do, (50801) Korea

no.	Lot No.	HEAT No.	SIZE			LENGTH	Pcs	QTY		Heat Treatment	ECT	NOTES
			O.D	W	TIMINI			T. Length(mm)	Kg			
6	F0401-6	M38817	44.45	6.10	6.000	79	474.000	3007.9	Normalized 920 °C (Holding Time 18Min)	ASTM E309 ACCEPT	* T.S. TENSILE STRENGTH (Mpa) * Y.S. YIELDPOINT STRENGTH (Mpa) * EL. ELONGATION (%) * H. HEAT ANALYSIS * P. PRODUCT ANALYSIS * L. GAUGE LENGTH 50mm 0.2% OFFSET	
7	F0401-7	M38817	44.45	6.10	6.000	79	474.000	3007.9				
8	F0401-8	M38817	44.45	6.10	6.000	79	474.000	3007.9				
9	F0401-9	M38817	44.45	6.10	6.000	79	474.000	3007.9				
10	F0401-10	M38817	44.45	6.10	6.000	79	474.000	3007.9				
Chemical Composition (%)												
no.	Lot No.	Spec	C	Si	Mn	P	S					
			X 100									
		MIN.	-	10	-	-	-					
		MAX.	27	-	93	35	35					
6	F0401-6	* H	19	20	51	19	5					
		* P										
7	F0401-7	* H	19	20	51	19	5					
		* P										
8	F0401-8	* H	19	20	51	19	5					
		* P										
9	F0401-9	* H	19	20	51	19	5					
		* P										
10	F0401-10	* H	19	20	51	19	5					
		* P										
Tensile Properties												
no.	Lot No.	Spec	* T.S. (Mpa)	* Y.S. (Mpa)	* EL (%)	Hardness (HRB)	Flaring Test	Flattening Test	Surface	REMARK		
			MIN	255	30							
		MAX	-	-	79							
6	F0401-6	*1	453 / 452	323 / 326	48 / 48	75 / 72	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT			
7	F0401-7	*1	451 / 443	322 / 319	46 / 45	73 / 75	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT			
8	F0401-8	*1	453 / 446	318 / 319	48 / 48	72 / 77	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT			
9	F0401-9	*1	440 / 440	330 / 319	47 / 44	77 / 77	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT			
10	F0401-10	*1	439 / 440	320 / 318	44 / 46	73 / 76	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT			

WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL HEREIN HAS BEEN MADE AND TESTED IN ACCORDANCE WITH ABOVE SPECIFICATION AND THE RESULTS OF ALL TEST ARE ACCEPTABLE



Product Safety  
Manufactured  
at Materials  
www.hanseopipe.com  
#2100002718



ISO 9001:2015  
Certified In  
According to ISO 9001:2015



KS QP-903.01(REV.01)



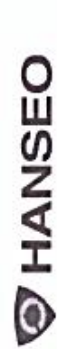
Myoung, Heo

Quality Management Dept. Manager

Surveyor

한서파이프코

# INSPECTION CERTIFICATE



CUSTOMER :  
 ORDER NO. : DLP1905-JE-1920  
 PROJECT NAME : N/A

Head Office #288-52, Anha-ro, Saengnim-myeon, Gimhae-si,  
 Gyeongsangnam-do, (50801), Korea

EN10204 TYPE 3.1

COMMODITY : Seamless Cold Drawn Medium Carbon Steel Tubes

CERT. NO. : HS-19G0705-03      date : 2019-05-03      Page : 3/3

SPECIFICATION : ASME SA210 Gr.A1 (2017 ED.)

no.	Lot No.	HEAT No.	SIZE			LENGTH	Pcs	QTY		Heat Treatment	ECT	NOTES
			OD	WT(MIN)	WT(MAX)			T. Length(mm)	Kg			
11	F0401-11	M38817	44.45	6.10	6.000	79	474.000	3007.9	Normalized 920 °C (Holding Time 18Min)	ASTM E309 ACCEPT	* T.S. TENSILE STRENGTH (Mpa) * Y.S. YIELDPOINT STRENGTH (Mpa) * EL ELONGATION (%) * H. HEAT ANALYSIS * P. PRODUCT ANALYSIS * T. GAUGE LENGTH 50mm 0.2% OFFSET	
12	F0401-12	M38817	44.45	6.10	6.000	79	474.000	3007.9				
13	F0401-13	M38817	44.45	6.10	6.000	62	372.000	2360.6				
no.	Lot No.	Spec	Chemical Composition (%)					Hardness	Flattening Test	Flaring Test	Surface	REMARK
			C	Si	Mn	P	S					
		MIN.	-	10	-	-	-	-	-	-	-	
		MAX.	27	-	93	35	35	-	-	-	-	
11	F0401-11	* H	19	20	51	19	5	-	-	-	-	
		* P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
12	F0401-12	* H	19	20	51	19	5	-	-	-	-	
		* P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
13	F0401-13	* H	19	20	51	19	5	-	-	-	-	
		* P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL HEREIN HAS BEEN MADE AND TESTED IN ACCORDANCE WITH ABOVE SPECIFICATION AND THE RESULTS OF ALL TEST ARE ACCEPTABLE.

**Myoung, Heo**  
 Quality Management Dept. Manager

Our Quality System is Certified in  
 Accordance ISO 9001 : 2015

FD 201487U  
 The Manufacturer of Material  
 www.kanso.com  
 02-94008218

Surveyor  
 원서규 이코프

KLS-CP-903-01REV.01



ภาคผนวก ข  
Booster Bending Machine Spacification





**Herber 76/90/127 CNC TB**

**Booster bending machine**

**Tryckböckningsmaskin**



## Herber 76/90/127 CNC TB

### Booster bending machine

### Tryckböckningsmaskin



The Herber four axis booster bending machine models 76-90 and 127 CNC TB with capacity OD 63 x 5 mm, 90 x 5 and 127 x 5 mm. Complete equipped for coil bending with radii down to 1 x D.



Herbers fyraxliga tryckböckningsmaskiner modell 76-90 och 127 CNC TB med kapacitet OD 63 x 5 mm, 90 x 5 och 127 x 5 mm. Komplet utrustade för slingböckning med radier ner till 1 x rörets ytterdiameter.



GB

**Standard equipment**

- ▶ Programmable speed- and pressure setting of the booster unit
- ▶ Individually programmable speed and acceleration/retardation of each axis
- ▶ Laser scanner for clamp jaw and pressure die
- ▶ Programmable tolerance range of each separate axis
- ▶ Standard components from well-known european manufacturers

**Options**

- ▶ Online connection with CAD system or measuring machine
- ▶ Customized software
- ▶ Macro programming
- ▶ Automatic tube magazine with automatic tube loading

**CNC-control systems**

The control system works with 4 individually programmable axes

- ▶ Bending
- ▶ Tube rotation
- ▶ Length feeding
- ▶ Booster pressure/speed

The CNC system is a close loop system which does not allow the machine to continue before previous movement has reached its programmed position. To optimise the accuracy and speed of the machine the degree of tolerance is programmable. Normal programmed tolerance is  $\pm 0,05-0,1$  mm/degree.

SE

**Standardutrustning**

- ▶ Programmerbara tryck- och hastighetsinställningar för påtrycknings-enheten
- ▶ Programmerbar hastighet och acceleration/retardation för varje enskild maskinrörelse
- ▶ Laserscanner för operatörens säkerhet
- ▶ Standardkomponenter från välkända europeiska tillverkare
- ▶ Programmerbart toleransområde för varje enskild axel

**Alternativ**

- ▶ Online-koppling med CAD och mätmaskin
- ▶ Kundenpassad mjukvara
- ▶ Makro programmering
- ▶ Rörmagasin med automatisk rörladdning med robot eller laddarm

**CNC-styrssystem**

Styrsystemet arbetar med 4 individuellt programmerbara axlar:

- ▶ Böckning
- ▶ Vidposition
- ▶ Längdpositionering
- ▶ Booster

Systemet är läges- och hastighetskopplat i varje axel. Detta innebär att styrsystemet inte tillåter maskinen att arbeta vidare om inne respektive programmerad position uppnåtts. För att optimera maskinens hastighet och noggrannhet är också styrsystemets toleransgrad programmerbar. Normal programmerad toleransgrad är  $\pm 0,05-0,1$  mm/grad i varje enskild axel.



## Herber 76/90/127 CNC TB

### Technical data/Tekniska data

	76 CNC TB	90 CNC TB	127 CNC TB
Capacity, Ø mm / Kapacitet, Ø mm	63 x 5	90 x 5	127 x 5
Radius, min/max / Radius, min/max	40/200	50/250	80/320
Radius difference / Radiedifferens	-	-	-
Bending speed/repeatability / Böckhastighet/toleransgrad	40%/s. ±0,1°	60%/s. ±0,1°	24%/s. ±0,1°
Length of mandrel / Rörupptagningslängd	3 000	4 000	4 000
Weight, kg / Maskinvikt, kg	7 000	10 000	17 000
Machine dimensions / Maskindimension	6,7 x 1,7 x 1,8	7,0 x 2,2 x 1,4	7,0 x 2,2 x 1,8
Motor kW / Motor kW	32	40	40
Length feeding / Längdmätning	900 mm/sec	900 mm/sec	900 mm/sec
Tolerance range / Toleransområde	0,05–0,1°/mm	0,05–0,1°/mm	0,05–0,1°/mm

Standard components conform to VDMA, ISO and DIN standards. / Standardkomponenten laut VDMA, ISO und DIN-Standard.

### Your No.1 choice in advanced tube forming solutions

**GB** We at Herber have been manufacturing cold forming machinery since 1945. Our mission is to deliver solutions to the customer's problem. Every machine is fully customized to the customer's specific requirements. Precision in every detail is one of our key principles.

**SE** Vi på Herber har tillverkat maskiner för kallformning sedan 1945. Vårt uppdrag är att leverera lösningar på våra kunders problem. Varje maskin är skräddarsydd för att kunna möta varje specifikt önskemål. Precision i varje detalj är ett av våra nyckelord.

### Herber service & support – [www.herber.se](http://www.herber.se)

Preventive maintenance is the key to safe, secure production. But despite good maintenance operating disruptions could still arise, in which case Herber is there to help you get started again.

Our service organisation is just a telephone call away. The electronics in our machines enable a modem link to be set up between your machine and us for rapid fault detection.

If telephone support or online rectification is not enough our service vehicles are on call with their mobile stock of spare parts. Wherever you are we will be there as quickly as we can to facilitate a return to full operating capacity.

Förebyggande underhåll är nyckeln till säker drift. Men trots ett bra underhåll kan det uppstå produktionsstörningar och då kan vi på Herber hjälpa dig att komma igång igen. Vår serviceorganisation är inte längre bort än ett telefonsamtal. Tack vare elektroniken i våra maskiner kan ni koppla upp er maskin mot oss via modem och internet för mycket snabb felsökning.

I de fall det inte räcker med telefonsupport eller korrigeringar via nätet finns våra servicebilar med sitt rullande reservdelslager. Oavsett var ni befinner er kommer vi så snabbt vi kan för att er verksamhet snart ska vara i full drift igen.

#### HERBER ENGINEERING AB

PO Box 203, SE-331 22 Värnamo, Sweden.  
Phone: +46 (0)370-69 95 50, Fax +46 (0)370-156 25, [info@herber.se](mailto:info@herber.se)  
[www.herber.se](http://www.herber.se)





ภาคผนวก ค  
ค่าน้ำหนักและค่าไบแอสที่ได้จากการสุ่มด้วย L-BFGS Solver เพื่อทำนายค่ามุมสปริงกลับ

## รายงานที่ 1 ค่าน้ำหนักและค่าไบแอสจาก Sigmoid หรือ Logistic Function (98 Nodes)

### ค่าน้ำหนัก (Weight)

[[-5.48101051e-02 5.19274812e-01 -5.07404214e-02 1.38798711e-01  
 -2.77147161e-02 3.03252661e-02 2.88991484e-01 5.14766042e-03  
 -5.67220040e-02 5.87880586e-01 -1.16218738e-01 7.35512082e-02  
 2.40493994e+00 -6.98527510e-02 1.06278213e-01 -6.30601688e-02  
 1.10046891e+00 -5.68825759e-02 5.07813793e-02 2.22858531e-02  
 2.72960355e-02 4.97407615e-02 -4.97836765e-02 -5.99369350e-02  
 -1.20428826e-02 -9.30827019e-02 5.92222279e-02 1.34369107e-01  
 1.19488483e-01 -8.68794249e-02 6.21885278e-01 -8.24649110e-02  
 4.35612540e-02 7.71263426e-02 -1.33161523e-01 1.47739187e-02  
 -1.51060680e-01 3.57339461e-01 2.85894653e-02 1.35570622e-01  
 -8.85897518e-02 7.71886187e-02 1.06350760e-01 1.22283773e-01  
 -1.19571560e-01 -8.51621074e-03 1.34391880e-01 -2.82055793e-02  
 8.76666708e-02 1.27563746e-02 7.56255920e-02 5.92750358e-03  
 -1.31440859e-01 -1.15376747e-01 -2.13186979e-01 -1.02168690e-01  
 1.36727141e-01 3.69217184e-02 8.84517604e-02 3.02098088e-01  
 5.51492433e-01 8.70629983e-02 4.33411762e-01 1.33897075e-01  
 7.97575825e-02 -1.25441489e-01 -3.87858677e-02 -1.23259733e-01  
 2.00259173e-01 8.27682579e-02 -1.17263192e-01 -1.16062455e-01  
 -2.87561376e-02 -7.08178777e-02 8.21573259e-02 -4.70420410e-02  
 2.09487858e-02 -1.94348660e-03 7.63029509e-01 1.88933926e-01  
 1.26391490e-01 -1.03092339e-01 9.64026675e-02 -3.95624841e-02  
 -1.19040315e-01 5.07362079e-01 -2.17316225e-03 1.35055406e-01  
 -3.57919831e-02 -1.44076445e-01 1.20132488e-01 -1.08226034e-01  
 -5.81288221e-03 1.04551158e-01 1.56549736e-02 6.44818523e-04  
 8.38505669e-02 -1.33795177e-01]  
 [ 3.78783282e-01 -1.21982469e+00 5.54024636e-01 3.79096285e-01  
 -4.60627608e-01 -1.03426996e-01 -1.22705323e+00 5.67618333e-02  
 -4.69192305e-02 4.95155370e-01 1.28617432e-01 2.21121919e-01  
 2.69319414e-02 4.50038681e-01 -4.36915885e-02 -1.16472523e-01  
 -3.31652997e+00 4.55781132e-02 3.35220639e-01 1.29847473e-01  
 1.03948580e-02 1.51487717e+00 2.41393051e-01 1.78618295e-01  
 5.83194792e-01 2.16347342e-01 -6.73643562e-01 4.37206499e-03

-1.96568415e-01 -7.62962876e-02 -2.13487232e+00 8.66797498e-02  
-2.88029462e-01 -8.83613311e-03 8.74818558e-02 -1.62715050e-01  
-2.83771083e-01 -1.11024197e+00 -2.55445122e-01 8.61736245e-02  
-3.82588237e-01 -1.82353691e-01 1.27645638e-01 1.83315730e-01  
3.09074992e-01 1.15776293e-01 -1.22902991e-01 1.29831821e-01  
1.70604885e-02 -5.86481767e-02 9.12391795e-02 2.00176322e-01  
1.35799995e-01 -1.09061675e-01 -9.46527138e-01 -9.73991322e-01  
1.51374882e-01 -6.98803831e-02 -1.30077488e-01 1.61315303e+00  
1.13235910e-01 1.09521078e-01 3.79875129e-01 3.05270579e-01  
-2.17041739e-01 -2.63561814e-01 1.28743202e-01 1.68563306e-01  
5.85859606e-02 -7.91359165e-02 1.57334835e-01 -6.70626602e-01  
1.97327156e-01 1.45224416e-01 -8.16587010e-02 -1.24167570e-01  
-2.96718293e-01 -5.23213343e-02 8.10347294e-01 -1.44680028e+00  
5.52453972e-02 6.20611307e-02 -9.55495168e-02 2.21636689e-02  
-2.03739949e-01 -1.78316166e+00 -6.77311250e-02 1.37624252e-01  
1.39749857e-01 -1.50536557e-01 3.33152283e-01 4.52604016e-02  
6.71605409e-02 1.91602287e-01 2.93582240e-01 2.23904884e-01  
-4.09316291e-02 7.87095927e-02]  
[ 4.37907911e-02 1.41993905e+00 -5.11209540e-02 -1.03845691e-01  
-5.67614377e-02 -1.29781581e-01 6.57373589e-01 -1.22714246e-01  
-6.19253863e-02 -3.22508320e-01 2.60918274e-02 8.13392169e-02  
-8.42407035e-01 -7.65151830e-02 1.10137296e-01 6.43658204e-02  
3.87502517e+00 4.01145793e-02 1.15894536e-02 -9.26141552e-02  
7.81770465e-03 2.46037557e-01 8.23481160e-02 -8.26541578e-02  
-8.24900574e-02 1.24065569e-01 4.22978390e-02 7.27658020e-02  
6.61974900e-02 -9.96232764e-02 2.32550144e+00 -8.58935967e-02  
-1.03959352e-01 -2.17693214e-02 -1.39458746e-01 9.09456645e-02  
-1.01725989e-01 1.42363097e+00 1.59986787e-02 7.54435799e-02  
1.40085290e-02 1.22743799e-01 -3.12368070e-02 2.26694001e-03  
-3.17705550e-02 6.77601074e-02 -5.56897199e-02 8.34023262e-02  
-1.16877597e-01 -7.39004826e-02 -1.72490929e-02 -9.76519162e-02  
-8.28938191e-02 9.53703115e-02 -6.01257317e-02 -9.42362646e-02  
1.00496942e-01 2.11499269e-02 3.73788290e-02 7.54140657e-01  
-1.27601206e-01 -6.55649056e-02 -2.84799992e-01 2.91555680e-02  
5.13675319e-02 7.88284256e-02 -8.63482282e-02 4.20875709e-02

6.15411390e-01 -6.74115835e-02 -5.24901190e-02 -3.48451013e-02  
2.51429868e-02 1.37219212e-01 2.44573571e-02 1.03433096e-01  
3.16956049e-02 -7.66793242e-03 2.09157088e+00 8.82646528e-01  
7.90638415e-02 -8.76998311e-02 -1.00536119e-01 -7.79630095e-02  
4.15178592e-02 1.28396493e+00 -8.47786813e-02 -4.31014102e-02  
-1.16718141e-01 -2.22628463e-02 9.84134772e-02 -1.50089843e-02  
-1.45790669e-02 -1.27748040e-01 -5.48552935e-02 -1.10098426e-01  
-1.26254034e-01 1.01519911e-01]  
[ 3.75134133e-01 3.57053154e+00 5.08434948e-01 3.47182792e-01  
-3.79179962e-01 -6.20793656e-02 2.32206422e+00 1.28866798e-01  
-1.37749097e-01 -5.90484774e-01 3.49636624e-02 8.53818287e-02  
-7.90245788e-02 4.16781920e-01 -7.20130251e-02 -1.32299667e-01  
3.10787281e+00 1.39632362e-01 1.70552166e-01 1.00242191e-01  
2.45561394e-01 1.64942026e+00 4.23964038e-02 1.48300749e-01  
5.77522661e-01 6.47076488e-02 -4.04205406e-01 2.27147382e-01  
-1.44870925e-01 -5.86321978e-02 3.24534741e+00 1.30326765e-01  
-1.75676138e-01 -9.89283727e-02 1.08887103e-01 -1.17869742e-01  
-1.60168940e-01 2.37404601e+00 -1.48752324e-01 7.47425259e-02  
-3.22711577e-01 -1.18678313e-01 4.04898694e-02 -3.11339529e-02  
2.82316368e-01 1.07791459e-01 -7.81145602e-02 6.95129988e-02  
8.44430678e-02 -8.75273703e-02 7.41483960e-02 1.86945855e-01  
1.32717595e-01 -3.06305564e-02 -9.07310429e-01 -1.40152432e-01  
7.58907054e-02 -7.51665448e-02 -3.58921471e-02 3.18912632e+00  
4.31553493e-01 1.00075508e-01 -2.53534557e-01 3.12182291e-01  
-2.47126194e-01 -1.97422721e-01 1.04450435e-01 9.49045176e-02  
-2.19111713e-01 -4.23777141e-02 1.12376923e-01 -4.60768315e-01  
1.40376345e-01 -5.66834528e-03 -5.91062913e-02 -1.62821972e-01  
-2.99252133e-01 -5.87169457e-02 -2.24855409e+00 1.81064314e+00  
1.43720850e-01 1.98637767e-01 -1.47653263e-02 1.55313673e-01  
-1.02058172e-01 1.77454980e+00 -1.66431191e-01 1.55181627e-01  
2.57062704e-02 -1.23274244e-01 3.39950185e-01 9.72265754e-02  
9.55162353e-02 7.36426218e-02 1.60998291e-01 2.93152039e-01  
-1.27886094e-01 8.89191240e-02]]  
[[-1.28838021e-01] [ 1.54322129e+00] [-7.26327017e-04] [ 1.47412130e-02]  
[ 2.37033230e-02] [ 1.12380183e-01] [ 3.35998478e-01] [-1.78151599e-01]

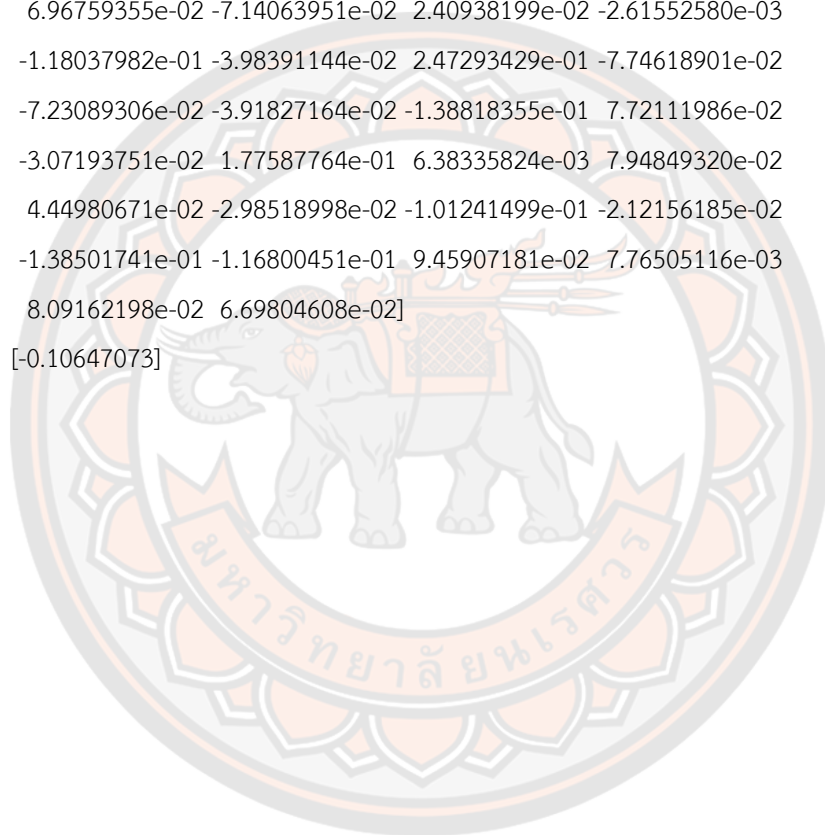


[-2.54413404e-02] [ 2.17854483e+00] [ 1.40694311e-02] [ 1.32169560e-02]  
 [ 4.17410601e+00] [-3.17218927e-02] [ 1.32469130e-02] [-1.14727395e-01]  
 [ 5.38878969e+00] [-3.91088219e-02] [-6.33866777e-02] [-4.51095202e-02]  
 [-2.40186242e-01] [-8.41699928e-01] [-3.93682351e-02] [-2.42066045e-01]  
 [-1.45925604e-01] [-2.34687265e-01] [ 3.26179698e-01] [-3.24230933e-02]  
 [-6.29899657e-02] [ 9.35017669e-02] [ 8.60645445e-01] [ 1.23623502e-02]  
 [-1.15950923e-01] [ 6.82559517e-02] [-1.76162828e-01] [-4.04535549e-03]  
 [-7.37613104e-02] [ 1.70891051e+00] [-6.27097802e-02] [-1.36733235e-01]  
 [ 1.56702007e-01] [-4.66171469e-02] [-1.92366124e-01] [-6.10668618e-02]  
 [-1.84797371e-01] [-1.79071118e-02] [-9.71907996e-02] [-8.27352880e-02]  
 [-2.26554478e-01] [-1.13420276e-01] [-1.14809389e-01] [-8.37054743e-02]  
 [-3.41190566e-02] [ 1.96807024e-02] [-5.05763105e-01] [ 3.90066635e-01]  
 [-4.11568780e-02] [ 1.27855465e-01] [ 1.14932199e-01] [-6.05161497e-01]  
 [ 1.02977452e+00] [-1.65942823e-01] [ 1.53697847e+00] [-4.45408737e-02]  
 [-8.61109068e-02] [-5.74239774e-02] [-1.46166777e-01] [-2.22096797e-01]  
 [ 2.08948011e+00] [ 1.59651756e-02] [-7.87956953e-02] [-1.99374462e+00]  
 [-4.88870414e-02] [-1.48584184e-01] [-3.69778142e-02] [-9.34029229e-02]  
 [-3.49812980e-02] [ 1.12124921e-03] [ 2.53317246e+00] [ 9.11033571e-01]  
 [ 1.06089864e-02] [-3.49388082e-03] [ 7.79948506e-02] [-3.74155225e-02]  
 [-1.27765511e-01] [-2.89337335e+00] [-1.17789719e-01] [-3.02580006e-02]  
 [-1.16911597e-01] [-4.39866068e-02] [ 8.24878451e-03] [-1.86802006e-01]  
 [ 3.47665346e-02] [-5.86257550e-02] [-2.07491393e-02] [-8.17934886e-02]  
 [-4.18881649e-02] [-3.91618021e-02]]

### ค่าไบแอส (Bias)

[ 2.87731237e-02 8.95869237e-02 4.41541281e-02 1.31376103e-01  
 8.08592825e-02 4.33362758e-02 -2.32655698e-02 1.32113857e-01  
 -3.16149008e-02 2.51341340e-01 4.38369130e-04 4.95268519e-02  
 5.63443617e-01 -1.19229733e-01 -5.74429489e-02 -9.02638592e-02  
 8.18017771e-02 -4.42948181e-02 1.19047373e-01 -6.92532135e-02  
 -1.07772694e-01 1.43839354e-01 -4.51803646e-05 -6.29383214e-03  
 5.89876845e-02 8.99082657e-02 -5.29781352e-02 -8.23110645e-02  
 -2.27531028e-02 9.73632220e-02 3.19763936e-01 -8.67036783e-02  
 5.08868007e-02 -1.54718995e-02 1.05892875e-01 -5.84680632e-02  
 -6.64834856e-02 -4.86261559e-02 1.02165175e-01 -9.35186191e-02

-6.57856482e-02 -7.22982939e-02 1.18717123e-01 -1.16295169e-01  
-4.22531792e-02 5.05320439e-02 -9.36609336e-02 2.17491942e-02  
-2.10384851e-02 -1.36389504e-01 2.98588700e-02 -4.09617639e-02  
-8.07886164e-02 1.33075080e-01 7.69619405e-02 -1.94128891e-02  
-4.87536801e-02 -1.36054160e-01 6.38827513e-02 3.57400859e-03  
8.92461578e-02 3.52924969e-02 1.26486223e-01 -9.19984432e-02  
-1.16610184e-01 7.44663559e-02 -1.25616859e-01 -2.50003664e-02  
-9.27297755e-02 -8.18169039e-02 -8.55130845e-02 9.03586641e-02  
6.96759355e-02 -7.14063951e-02 2.40938199e-02 -2.61552580e-03  
-1.18037982e-01 -3.98391144e-02 2.47293429e-01 -7.74618901e-02  
-7.23089306e-02 -3.91827164e-02 -1.38818355e-01 7.72111986e-02  
-3.07193751e-02 1.77587764e-01 6.38335824e-03 7.94849320e-02  
4.44980671e-02 -2.98518998e-02 -1.01241499e-01 -2.12156185e-02  
-1.38501741e-01 -1.16800451e-01 9.45907181e-02 7.76505116e-03  
8.09162198e-02 6.69804608e-02]  
[-0.10647073]



## รายงานที่ 2 ค่าน้ำหนักและค่าไบแอสจาก LeRU Activation Function (64 Nodes)

### ค่าน้ำหนัก (Weight)

[[-3.14557290e-01 2.20244385e-01 -1.74232076e-01 2.47894066e-01  
 2.62408765e-01 3.08590979e-01 1.57970350e-01 1.09417451e-02  
 -1.20716614e-01 -1.85518351e-01 -2.77783678e-01 1.41652442e-01  
 -5.00351466e-02 -2.02991031e-01 4.23478072e-01 -1.57031732e-01  
 -7.86729087e-02 -1.21144689e-01 9.91497757e-03 3.20776725e-01  
 5.93658661e-02 -8.55675826e-02 -6.22686700e-02 -3.59305508e-01  
 -4.11961718e-02 -2.00399841e-01 7.60995971e-02 2.75611519e-01  
 2.73411160e-01 2.02249458e-02 -3.46236072e-01 -3.26485066e-01  
 4.62654519e-02 1.66053826e-01 -4.25306822e-01 4.61378956e-02  
 -4.60152532e-01 1.56387646e-01 8.30494189e-02 2.90232656e-01  
 -1.43115129e-01 1.85933148e-01 2.36693222e-01 2.11106145e-01  
 -3.39704364e-01 -2.71851966e-01 2.86030606e-01 -1.11228534e-01  
 1.86381967e-01 2.75988433e-02 1.60908804e-01 -1.26419881e-01  
 -3.55266722e-01 -1.07160438e-01 -2.32880419e-02 -1.56210775e-01  
 2.49142795e-01 3.31178997e-01 2.38678814e-01 3.03811983e-01  
 -1.18461444e-01 1.85294751e-01 2.53483305e-01 2.72974529e-01]  
 [ 2.04884874e-01 -2.41075753e-01 -8.25482568e-02 -2.86767934e-01  
 -7.25465831e-03 2.83630143e-01 -2.66656765e-01 -1.84956050e-01  
 -7.99168721e-02 -1.51911500e-01 -5.39755443e-01 -8.78673355e-02  
 -2.94519565e-01 -3.91198129e-03 3.05449695e-02 2.67171103e-01  
 2.54248639e-01 -2.30685487e-01 2.22701629e-01 9.22308598e-01  
 -2.37140250e-01 -1.57389592e-01 -4.53337817e-01 4.41430739e-01  
 -2.14491112e-02 -3.62652738e-01 1.63119208e-01 -2.31031050e-01  
 -1.28683254e-02 1.73422195e-01 1.83503304e-02 -5.42307711e-04  
 1.95735804e-01 -2.84925549e-01 6.24922352e-02 -5.26451586e-02  
 2.82201246e-01 1.53925592e-01 -2.64981877e-01 -1.82269172e-01  
 -2.82669783e-02 1.33397613e-01 -7.81379266e-03 -3.08234654e-01  
 2.37236076e-01 3.15035151e-01 -5.48419967e-02 2.30986973e-01  
 -1.00843027e-01 -2.47886374e-01 1.58723523e-02 1.14848701e-01  
 6.85089222e-03 2.45587337e-01 1.05704387e-01 -5.49120231e-02  
 1.11916922e-01 9.24112529e-02 1.57875121e-01 2.62688623e-01  
 -2.88233778e-02 -2.47698720e-01 -1.54674223e-01 -4.05397872e-02]

[-5.84991118e-02 1.84351259e-01 -2.61337755e-01 -3.02824323e-02  
1.82600829e-01 -2.21521018e-01 -2.59374434e-01 -1.53208491e-01  
-2.46501045e-01 1.82844200e-01 -2.10527531e-01 -1.80989448e-01  
1.79323890e-01 1.84334207e-01 1.94155196e-02 2.53968317e-01  
-2.46605533e-01 2.76244874e-01 3.57233887e-02 -9.54373338e-02  
1.93495086e-01 1.08461449e-01 3.31474248e-01 -1.98402842e-01  
5.67814721e-02 2.48468932e-02 1.32200793e-01 -1.53356190e-01  
-2.78545919e-01 6.30671388e-02 -3.90766477e-02 2.52400560e-01  
-3.90329249e-02 -4.83259145e-02 1.24303288e-01 1.61463818e-02  
3.02069712e-01 1.60272969e-01 -1.96312959e-03 -1.65226549e-01  
6.17748247e-02 1.20528253e-01 1.43681494e-01 2.62763278e-01  
-1.23904662e-01 -4.94232470e-02 -4.52393739e-02 -9.32723151e-02  
-8.00028644e-02 -1.31046108e-02 2.50050403e-02 -1.30148969e-01  
-2.38549308e-01 -6.24692928e-02 -1.74032668e-01 -1.12380802e-01  
8.51284180e-02 4.64758883e-02 2.56964420e-01 4.79316576e-02  
2.29072443e-02 8.45669137e-02 1.34730868e-01 4.69592979e-02]  
[ 4.41652583e-02 6.23808880e-02 -8.62689503e-02 1.47742064e-01  
6.76594552e-02 -4.67370373e-02 -1.51115356e-01 -2.54702000e-01  
-9.04609479e-02 -2.89406870e-01 -4.88228913e-01 -2.61177197e-01  
-2.85036533e-01 -9.01028210e-02 6.69159532e-02 1.63540831e-01  
6.77995306e-02 -2.02176509e-01 2.34124618e-01 5.56376330e-01  
-1.32597353e-03 5.47559951e-02 -6.55610021e-02 -1.91481269e-02  
2.07074410e-01 3.50656200e-01 1.51803493e-01 -1.89225417e-01  
-2.25887350e-01 2.45446164e-01 2.26123414e-01 1.40588877e-01  
1.57622883e-01 -2.12160092e-01 1.68595792e-01 -1.82810497e-01  
-3.41626564e-01 -4.57856088e-02 -2.96812175e-01 2.20075289e-01  
-2.01314191e-01 1.51116870e-01 1.88198827e-01 1.01340844e-01  
4.53918242e-02 2.70878560e-01 -7.14211690e-02 -5.71234042e-03  
-9.60396606e-02 1.44213188e-01 -1.18521272e-01 1.70176900e-01  
-4.20933783e-01 -1.30022200e-01 -4.74005108e-02 -3.15377970e-01  
-2.43519936e-01 2.08810378e-01 -5.78365925e-02 -2.08744410e-01  
2.01900864e-01 4.47785275e-02 7.94381898e-02 2.98650988e-01]]  
[[-0.29436991] [ 0.28595611] [-0.01843168] [-0.13047719] [ 0.28184 ]  
[ 0.41763547] [ 0.13331487] [-0.22064471] [ 0.23691595] [-0.03569225]  
[-0.00228821] [ 0.13458412] [ 0.04358321] [ 0.162222 ] [ 0.41103879]

[-0.13312684] [-0.08064779] [-0.24464188] [-0.05935148] [ 0.31853788]  
 [-0.16997228] [ 0.0739094 ] [ 0.20665633] [-0.33924156] [ 0.09427295]  
 [ 0.27188381] [ 0.01512823] [-0.0678769 ] [ 0.15601007] [-0.01607296]  
 [-0.30372167] [-0.33324222] [ 0.00311303] [ 0.09286466] [-0.45628258]  
 [ 0.2178362 ] [-0.539082 ] [ 0.1925713 ] [-0.10873994] [-0.11792506]  
 [ 0.22736682] [ 0.13177194] [ 0.11174131] [ 0.0574196 ] [-0.28662964]  
 [-0.251798 ] [ 0.01201079] [-0.1365046 ] [-0.12214488] [-0.19877105]  
 [-0.09681817] [-0.16697613] [-0.30376629] [-0.17352995] [ 0.01420356]  
 [ 0.20180354] [ 0.41337811] [ 0.34769887] [ 0.22124712] [ 0.28794758]  
 [-0.19309334] [ 0.15605963] [ 0.053635 ] [ 0.09028643]]

### ค่าไบแอส (Bias)

[ 0.08706106 -0.13954387 -0.29127667 0.02924363 0.19044294 0.24641965  
 -0.18377752 0.07973516 0.26053927 -0.14365869 -0.12802066 -0.04417404  
 0.03978114 0.29113638 0.10582681 0.22258985 0.08480396 -0.01617176  
 -0.13192028 -0.0223326 0.1646423 -0.18033377 -0.2016992 -0.22645113  
 0.11532693 -0.07442974 -0.11127756 -0.10057657 -0.24854908 0.00878928  
 0.16400987 -0.07340055 -0.04778788 -0.28068992 -0.17293258 -0.25238633  
 -0.3125247 0.25359653 0.12732362 0.19590949 -0.21808645 -0.07590666  
 0.25146617 -0.04777581 0.23699558 0.2109685 -0.29311846 -0.05420491  
 0.04937626 -0.0898098 -0.07364796 -0.11592375 -0.17593057 -0.25331291  
 0.18497303 0.29474124 -0.28020353 0.27796671 0.04254064 -0.22060409  
 -0.30552221 0.01511924 -0.23492624 -0.11302305]  
 [0.39989314]

### รายงานที่ 3 ค่าน้ำหนักและค่าไบแอสจาก TanH Activation Function (87 Nodes)

#### ค่าน้ำหนัก (Weight)

[[-1.42737970e-01 1.90346320e-01 -1.50580158e-01 2.14928789e-01  
 -5.95008184e-03 5.73731366e-02 1.36525923e-01 1.59260768e-02  
 -1.04329394e-01 -1.60334327e-01 -2.42840117e-01 1.22423183e-01  
 -3.40789431e-02 -1.75435343e-01 1.94834068e-01 -1.79354583e-02  
 -4.40345991e-02 -1.04699358e-01 7.00245789e-02 4.54270950e-02  
 5.13069820e-02 -4.57953419e-01 -1.10547205e-01 -1.26516026e-01  
 -8.85344148e-02 -1.92130729e-01 -1.71685500e-01 2.12984689e-01  
 4.27028345e-01 -1.58383610e-01 -3.23109258e-01 -1.84485399e-01  
 1.02606371e-01 1.43512102e-01 -2.44942047e-01 4.71099699e-02  
 -2.55873519e-01 9.50311996e-03 7.17755017e-02 2.34220801e-01  
 -1.21600445e-01 1.55311981e-01 1.90218384e-01 2.17053735e-01  
 -2.55579620e-01 -1.51585355e-02 2.47202094e-01 -5.18851051e-02  
 1.61080708e-01 2.25431493e-02 1.39065514e-01 -7.73688823e-03  
 -2.55395880e-01 -2.12291489e-01 -1.78955155e-01 -1.27717306e-01  
 2.38703003e-01 6.76530822e-02 1.62601849e-01 3.14941255e-02  
 7.50084755e-02 1.60141081e-01 2.09975618e-01 2.11856330e-01  
 1.72986791e-01 -2.08349836e-01 -7.13423721e-02 -2.38485141e-01  
 2.38019209e-02 1.44419185e-01 -2.30465563e-01 -1.62924857e-01  
 -6.90681965e-02 -1.31362535e-01 1.51527616e-01 -7.62603903e-02  
 7.13044292e-02 -3.38091798e-03 4.28715508e-02 2.25551014e-01  
 2.23096911e-01 -1.99370047e-01 1.80736303e-01 -7.90542776e-02  
 -2.04948579e-01 -1.09181144e-01 5.32273593e-03]  
 [ 2.36745687e-01 -6.59697048e-02 -2.50365793e-01 1.84685502e-01  
 -1.99668700e-01 -1.11175808e-02 1.79691007e-01 1.16688216e-01  
 -2.74133444e-02 1.54274607e-01 -2.46413457e-01 3.72847171e-02  
 -9.70602435e-02 2.49082083e-01 1.51542266e-01 -4.68084303e-01  
 -1.58919025e-01 -2.44297501e-02 1.89562877e-01 6.42853871e-05  
 -7.18892471e-02 2.71088158e-01 2.32939470e-01 -4.73972230e-02  
 2.04639717e-01 -3.40063257e-01 -2.14235923e-01 -5.36635927e-01  
 2.25185180e-01 2.23482965e-01 1.29318333e-01 1.89033942e-01  
 1.33030121e-01 1.07846180e-01 1.03483940e-01 2.53638626e-01  
 2.43546775e-01 -2.58696910e-02 -2.14073743e-01 -4.90758638e-01

-9.12300993e-02 -7.00324095e-02 1.59325953e-01 -2.25861335e-01  
-2.57994747e-02 1.67582582e-01 -1.21047875e-01 -2.24164484e-01  
-1.32410515e-01 -2.30869823e-01 1.58023191e-01 -1.69304599e-01  
-2.68918990e-01 1.61547696e-01 4.66805884e-01 4.59313077e-02  
2.12938430e-01 -2.26002239e-01 2.38988983e-01 -2.28845272e-02  
3.61332451e-02 1.67228225e-01 -1.50859140e-01 2.49786051e-01  
-2.49256612e-01 4.15463495e-02 -1.39509306e-02 7.81808955e-02  
-1.32538163e-01 -3.44722818e-01 2.25627388e-02 -1.16795180e-01  
2.01436977e-01 -2.34975308e-02 -4.15051503e-02 6.56265044e-02  
1.39545061e-02 2.36801353e-01 1.48387423e-01 -1.69607291e-03  
-2.33396670e-01 5.33889229e-02 2.05057474e-01 1.31369017e-01  
2.53381402e-01 -8.58033097e-01 -3.80694863e-02]  
[-3.90981514e-02 -9.31129620e-02 -6.91425155e-02 -1.13256664e-02  
2.16106186e-02 -1.20539022e-01 -1.87729871e-01 -9.43559841e-02  
-1.86643233e-01 -9.35987902e-02 1.57635272e-01 5.20319494e-02  
2.51478227e-01 3.12754483e-02 2.48740574e-02 3.99689309e-01  
1.16441220e-01 5.94625304e-02 4.75755847e-02 5.48457132e-02  
-7.45579843e-02 5.07733171e-01 5.37080509e-02 -9.79472788e-02  
-1.30601521e-01 -2.20423933e-01 -7.81809193e-02 -2.63859536e-01  
-4.06550687e-01 -2.24856407e-01 -3.94946725e-01 -3.04599528e-02  
4.68365744e-02 1.41200905e-01 6.40531005e-02 -1.71851712e-01  
2.02170865e-01 1.19157281e-01 -1.14597328e-03 6.51035966e-02  
5.51446299e-03 -1.70352988e-01 7.26327423e-02 2.50641593e-01  
1.38796329e-01 -1.63217824e-01 -1.95223255e-01 2.20951842e-01  
2.10557687e-01 1.27231354e-01 1.33765574e-01 -1.83359466e-01  
1.66847558e-01 -1.57994063e-01 -1.62446897e-01 -4.77079328e-02  
-2.56520070e-01 1.77400360e-01 -1.73976074e-01 1.21454889e-01  
4.53036813e-02 1.38760491e-01 4.46396907e-02 2.36932784e-01  
-5.55533593e-02 -1.53497702e-03 -8.30023245e-02 1.24636320e-01  
-1.02432068e-01 1.49302525e-01 -2.12595367e-01 -1.37132088e-01  
-3.17461509e-02 -1.91933392e-01 -1.52449945e-01 1.74746443e-01  
-6.54974286e-02 -1.44438166e-01 1.77716125e-01 3.87001249e-02  
6.84028713e-02 1.99688874e-01 1.11792301e-01 -1.20598983e-01  
-2.51732092e-01 -5.67178655e-04 1.06558309e-01]  
[1.56953799e-01 -1.58827346e-01 6.89100817e-02 2.25167690e-01

-1.24155168e-01 -1.06546200e-01 -3.81773885e-02 1.18720756e-01  
 2.51610843e-01 4.52846202e-02 3.27589677e-01 8.02039009e-02  
 -7.19605992e-02 -9.98430701e-02 -8.18044876e-02 4.45253785e-01  
 -1.65577601e-01 -1.85896052e-01 -7.27760070e-02 1.67419630e-01  
 -6.60249518e-02 -3.49322847e-01 -8.68742932e-02 -2.14805324e-01  
 -3.25847552e-02 9.38614048e-03 -2.78319567e-02 -4.38902451e-01  
 -2.78093681e-01 -7.94017886e-02 -2.82860054e-01 -2.29979588e-01  
 1.86676952e-01 1.10037792e-01 1.69657726e-01 -5.26621315e-02  
 -6.91665051e-02 2.27489601e-01 -3.42008764e-02 1.84462337e-02  
 2.68444611e-01 -2.53323838e-01 -3.44352484e-02 4.26727273e-02  
 -7.76148905e-02 -5.34857034e-02 -7.40260071e-02 -1.38096684e-01  
 -2.43348272e-01 9.06803849e-02 2.55954607e-01 -2.37030637e-01  
 2.37545128e-01 2.27476306e-02 1.04625507e-01 -2.21366924e-01  
 1.30666116e-02 -2.03031967e-01 -1.04359146e-01 -1.39865955e-01  
 2.95879081e-01 -1.55742369e-02 -2.95648053e-01 2.25008094e-01  
 3.21222010e-01 1.12647236e-01 -1.86438405e-01 2.00187131e-01  
 -3.01589226e-02 -1.67531011e-02 1.13640682e-01 2.03252369e-02  
 1.37072902e-01 1.59544939e-01 -1.93819636e-02 -1.40907314e-02  
 -2.06715322e-01 -6.63030802e-02 1.98254213e-01 -1.43620483e-01  
 3.83937916e-02 1.57433888e-01 -7.47458348e-02 1.35855818e-01  
 8.07868144e-02 -7.79465294e-01 -5.72782208e-02]]  
 [[-0.13321489] [-0.17050447] [ 0.0089853 ] [-0.0893904 ] [-0.04467552] [-0.12455943]  
 [-0.16897333] [ 0.1365843 ] [ 0.00529546] [-0.06539324] [ 0.44448317] [ 0.26220851]  
 [-0.10911846] [-0.00810934] [-0.16859718] [ 2.46949323] [-0.20722714] [-0.07911848]  
 [ 0.09149172] [ 0.13365398] [-0.26370781] [-0.62285694] [ 0.22831473] [-0.31941099]  
 [ 0.03646575] [-0.25387213] [-0.23778879] [-0.19496665] [ 1.21442658] [ 0.21044107]  
 [-0.94804537] [ 0.98257651] [ 0.08240191] [-0.12823732] [ 0.01098683] [ 0.14877555]  
 [-0.10860287] [-0.04789985] [-0.16018441] [-0.2643339 ] [ 0.1900301 ] [-0.13999572]  
 [ 0.15762143] [-0.07162913] [ 0.06063959] [ 0.1678944 ] [-0.13808202] [-0.2817126 ]  
 [-0.1248992 ] [-0.34309043] [-0.13502257] [ 0.08697488] [-0.9938645 ] [ 0.23608344]  
 [-0.01795598] [-0.07070951] [ 0.20389556] [ 0.14650319] [ 0.31934544] [-0.21166414]  
 [ 0.28881752] [ 0.07009412] [-0.16142022] [ 0.038309 ] [ 0.24094818] [ 0.28832304]  
 [ 0.12538446] [ 0.11643136] [ 0.07515067] [-0.04988058] [-0.12619832] [-0.10241877]  
 [ 0.18920903] [ 0.21814497] [ 0.00777148] [-0.17484374] [ 0.00997858] [ 0.33584663]  
 [-0.0646221 ] [ 0.0261015 ] [-0.22873068] [ 0.22435911] [ 0.2900352 ] [-0.06712964]



[ 0.25717452] [ 0.3151878 ] [ 0.11355324]]

### ค่าไบแอส (Bias)

[ 0.13185463 0.17663827 -0.06210256 -0.1419007 -0.06766446 0.0784862  
 -0.12459436 0.18531325 -0.10517995 0.13559569 -0.09707907 0.00221978  
 0.19150803 -0.00749962 0.06373523 -0.06462902 -0.01613916 -0.22523697  
 0.01097528 -0.02528388 -0.10323287 -0.23918146 -0.08182716 -0.10535505  
 -0.07059412 0.15685961 0.20316118 0.20835092 0.00269683 0.20490875  
 0.02879428 0.24803975 -0.19296079 0.13189651 0.04533055 0.00889819  
 0.13260729 0.1714132 0.17003101 -0.08275804 -0.06089693 0.04893392  
 -0.23475929 0.16161771 0.04417742 -0.02892418 0.07093952 0.23384698  
 0.15622842 0.07995704 -0.15019239 0.24226125 -0.06145889 0.20811016  
 0.00407452 0.08854101 0.1989518 -0.22679214 -0.10540519 -0.16592556  
 -0.23195796 -0.08123977 0.21136369 -0.1269932 -0.19647737 0.22691061  
 -0.00343516 -0.01448679 0.09646919 0.16147492 -0.14024877 -0.15339429  
 -0.03877385 0.17849794 0.21935256 -0.15903238 0.09729727 -0.02779928  
 0.19417951 -0.10496443 -0.11877593 -0.24551311 0.19157531 -0.17149587  
 -0.11373588 -0.13906025 0.21674704]  
 [-0.15928043]

#### รายการ 4 ค่าน้ำหนักและค่าไบแอสจาก Identity Activation Function (65 Nodes)

##### ค่าน้ำหนัก (Weight)

[-0.15205608 0.16809651 -0.12803603 0.19735169 0.01439766 0.06534766  
 0.15929068 -0.01699848 -0.09888182 -0.17925709 -0.23256162 0.08903841  
 -0.01159697 -0.19345917 0.19753803 -0.12803401 -0.07308818 -0.10864351  
 0.07861521 0.02262956 0.00512743 -0.12709855 -0.10639781 -0.13920827  
 -0.10508711 -0.15509269 -0.12658246 0.24358561 0.22905582 -0.15500578  
 -0.25858191 -0.12280961 0.09356322 0.14558295 -0.27984821 -0.01961365  
 -0.24821097 0.02852421 0.066144 0.23616967 -0.12323741 0.10793899  
 0.22512654 0.23482 -0.23183996 0.01505574 0.26876597 -0.0324541  
 0.14452954 0.02556705 0.12452006 -0.0069061 -0.23594324 -0.21746403  
 -0.25473344 -0.09266777 0.19748058 0.05083741 0.16375824 0.01111185  
 0.03724431 0.11416826 0.22956873 0.22405686 0.15212153]  
 [ 0.20895306 -0.04622591 -0.53282387 0.23839234 0.62376974 0.0291605  
 0.28104136 -0.42238423 0.19424043 0.42780622 -0.42600713 -0.27686489  
 -0.05959675 -0.40187388 0.67446828 -0.2492528 -0.31660841 0.36345278  
 -0.38670031 -0.40031125 -0.61665465 0.38033707 0.1664061 -0.06483531  
 -0.44673521 0.47861855 0.33368066 -0.03514097 0.31819642 -0.3840602  
 -0.02546929 0.27661845 -0.40500317 0.02120855 -0.56674664 -0.12327211  
 0.16370244 0.07899101 -0.26511658 -0.2840151 -0.14254316 -0.64066703  
 0.26525525 0.32995621 0.34431388 0.17542294 0.38765453 -0.04307913  
 -0.28297929 0.24057524 0.43120797 0.41162809 0.59757119 0.31000894  
 -0.13092854 0.05265627 -0.45247145 0.06047226 0.20508512 -0.24412528  
 -0.49280854 -0.31033062 -0.2135172 -0.15748881 0.2977048 ]  
 [-0.12970331 0.04147445 0.05320917 -0.02321813 -0.26979527 -0.07654363  
 -0.18463166 0.19513988 -0.14167197 -0.10381382 0.13900382 0.17864057  
 -0.04855887 0.18927647 -0.13101065 0.20025354 0.09974089 -0.02684274  
 0.10999036 0.15401233 0.29615288 -0.09403885 0.03792778 0.0521612  
 0.14852863 -0.19299973 -0.33578054 0.0220639 -0.00146109 0.15560176  
 0.04112446 -0.08746127 0.13106615 -0.03616941 0.23125361 0.24759286  
 -0.00127782 -0.14703682 0.02103131 0.14859645 0.02930028 0.28455341  
 -0.13665112 -0.07391132 -0.13636516 -0.14931301 -0.0923242 -0.06145206  
 0.11970596 -0.03625379 -0.09222774 -0.12825997 -0.11447092 -0.10093473  
 0.23212699 -0.04786324 0.35375283 0.07956869 0.05724669 0.15206255

0.22458848 0.16039924 0.00892579 0.02156555 -0.03881899]  
 [ 0.50066575 0.17074072 -0.40409662 0.11214739 0.12548766 0.16069927  
 0.12631408 -0.46618773 -0.00365842 0.06118049 -0.42931137 -0.17794939  
 0.0946307 -0.349455 0.211956 -0.22663511 0.06800426 0.10135817  
 -0.16293104 -0.11896072 -0.60527092 0.36220253 0.15764794 0.13078546  
 -0.35106968 -0.07033526 0.64274185 0.28979299 0.3215016 -0.24231549  
 -0.27523148 0.19301009 -0.25953317 -0.16742269 -0.53692276 -0.57025522  
 0.10013775 0.07069241 0.10139864 -0.08223482 -0.09076142 -0.30914629  
 0.58562498 0.05789008 -0.02602927 0.06913066 0.33492189 -0.10295161  
 0.19412445 -0.05561288 0.18952632 0.12786629 -0.02971598 -0.09813139  
 -0.0604711 -0.20606527 -0.54932122 0.1564238 0.02839737 -0.04460977  
 0.05277264 0.08116293 -0.12109559 -0.29912218 0.20078264]]  
 [[ 0.57073041] [ 0.53567354] [-0.5423675 ] [ 0.33907505] [ 0.61203577] [-0.22415618]  
 [-0.23104357] [ 0.02650389] [ 0.2927571 ] [ 0.92479795] [ 0.23182792] [ 0.57698521]  
 [ 0.0356995 ] [-0.03267952] [-0.21718852] [-0.35990313] [ 0.59542478] [-0.3647314 ]  
 [-0.69994279] [-0.27220985] [ 0.41277926] [ 0.02558729] [-0.54666871] [-0.10719673]  
 [-0.37180538] [-0.1425223 ] [ 0.34323946] [-0.23823425] [-0.12806398] [-0.79367142]  
 [-0.06867319] [-0.77938655] [-0.52121248] [ 0.45451134] [ 0.46454725] [ 0.71904133]  
 [-0.55750212] [-0.11821568] [ 0.56307486] [-0.1633643 ] [ 0.46223786] [ 0.7445978 ]  
 [-0.89456858] [-0.30177699] [-0.01471721] [-0.31326549] [-0.42950173] [-0.25553115]  
 [-0.2845887 ] [-0.53950188] [ 0.50105246] [ 0.68793542] [-0.49916864] [ 0.63970966]  
 [ 0.35286688] [-0.90407083] [-0.54961472] [ 0.02730043] [-0.69159912] [-0.17742604]  
 [-0.16554912] [ 0.87807901] [-0.13879002] [-0.3979614 ] [ 0.64079506]]

### ค่าไบแอส (Bias)

[ 0.68191197 0.68681691 -0.92487176 0.76518541 0.04652087 0.17220429  
 0.05710767 0.20003847 0.19914927 0.65138901 -0.11490115 0.45012722  
 -0.48563365 -0.20138949 0.49918872 -0.3730007 0.57600134 0.19336635  
 -0.60357976 0.24506671 0.45603506 0.52079449 -0.27941852 0.23827796  
 0.11373999 -0.4595979 -0.44248192 0.00273912 0.43454235 -0.67349548  
 0.16882133 -0.6503207 0.09045792 0.0121638 0.08062861 0.90908037  
 -0.34654847 -0.09368157 0.11535573 0.1505289 -0.34759991 0.5889509  
 -0.29911699 -0.20754754 -0.60485128 -0.46706139 -0.18088896 -0.42734239  
 0.43479921 0.18488126 0.80044099 0.20483594 0.04964874 0.17529747  
 0.84794484 -0.99940472 0.3843987 0.32871194 -0.04655184 0.3455538

0.50921172 1.01076273 -0.18380802 -0.28452064 0.58843227]  
[2.34354274]





Reply all | Delete | Junk | ...  
ECM ขฟฟ2  
วันที่ 38144 11 ก.ค. 65

### ขออนุญาตเก็บข้อมูลเพื่อการวิจัย

 **SOMCHAI KONGNOO** <somchaiko63@nu.ac.th>  
Yesterday, 15:56  
Charan Khumgeon, Th. nakorn Techakan, Somnuk Wongkhot, Janjira Nantap

Reply all |

inbox

เอกสารขออนุญาตเก็บข้อมูล...  
2 MB

Show all 1 attachments (2 MB) Download

เรียน คุณจรัญ คำเงิน ผู้ช่วยผู้อำนวยการผลิตไฟฟ้า 2 (ขฟฟ2)  
สิ่งที่ส่งมาด้วย หนังสือขออนุญาตเก็บข้อมูลเพื่อการวิจัย จำนวน 5 ฉบับ (บุคคลากร 5 ท่าน)

ตรวจ-ฟ.  
38/144  
ECM...  
วันที่รับ... 18 ก.ค. 65  
วันที่ส่ง...

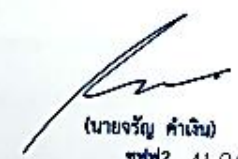
ต้นข้าพเจ้า นายสมชาย คงหนู นิสิตระดับปริญญาเอก หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการจัดการ สังกัดบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง "การหาค่าที่เหมาะสมสปริงกลับของเครื่องซีเอ็นซีตัดท่อบนพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม" (SPRINGBACK OPTIMIZATION FOR CNC TUBE BENDING MACHINE BASE ON AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK (ANN)) โดยมี รองศาสตราจารย์ ดร. กวิน สนธิเข็มชูน เป็นประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ในการทำวิทยานิพนธ์ดังกล่าว ข้าพเจ้ามีความจำเป็นต้องขอเก็บข้อมูลจากหน่วยงานและบุคลากรของท่าน จึงใคร่ขอความอนุเคราะห์จากท่านโปรดอนุญาตให้ข้าพเจ้าดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลซึ่งจะเป็นประโยชน์ทางวิชาการต่อไป จึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาให้ความอนุเคราะห์

① 1304 อสม.  
เพื่อโปรดพิจารณา

ขอแสดงความนับถือ  
นายสมชาย คงหนู  
08-9704-4732

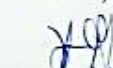
  
(นายจรัญ คำเงิน)  
ขฟฟ2. 11 ก.ค. 65


ปล. ต้นฉบับหนังสือขออนุญาตเก็บข้อมูลเพื่อการวิจัยจะนำส่งในโอกาสต่อไป

② อสม. แรตมฟ.  
เพื่อโปรดพิจารณาและ  
ให้ควมอนุเคราะห์

Sent from Mail for Windows

③ 3 วัน 8-8 (ฉบับใหม่)  
เพื่อโปรดพิจารณา

  
(นายจรัญ คำเงิน)  
ขฟฟ2. 11 ก.ค. 65  
18/07/65

  
(นายจรัญ คำเงิน)  
อสม.

11 ก.ค. 65

อ. ช. อสม-1, ช. อสม-2, อสม 5 ฟ.

36:05ม.



ที่ อว ๐๖๐๓.๐๒/ว ๑๙๓๓

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมืองพิษณุโลก  
จังหวัดพิษณุโลก ๖๕๐๐๐

๒๘ มิถุนายน ๒๕๖๕

เรื่อง ขออนุญาตเก็บข้อมูลเพื่อการวิจัย

เรียน คุณจรัญ คำเงิน

สิ่งที่ส่งมาด้วย โครงการวิจัย จำนวน ๑ ฉบับ

ด้วย นายสมชาย คงหนู รหัสประจำตัว ๖๓๐๓๑๕๐๖ นิสิตระดับปริญญาเอก หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ สังกัดบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง “การหาค่าที่เหมาะสมสปริงกลับของเครื่องซีเอ็นซีตัดท่อบนพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม (SPRINGBACK OPTIMIZATION FOR CNC TUBE BENDING MACHINE BASE ON AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK (ANN)) โดยมี รองศาสตราจารย์ ดร. กวิน สนธิเพิ่มพูน เป็นประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ในการทำวิทยานิพนธ์ดังกล่าว นิสิตมีความจำเป็นต้องขอเก็บข้อมูลจากท่าน บัณฑิตวิทยาลัย จึงใคร่ขอความอนุเคราะห์จากท่านโปรดอนุญาตให้นิสิตดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูล และอำนวยความสะดวกให้แก่ นิสิตดังกล่าว ซึ่งจะเป็นประโยชน์ทางวิชาการต่อไป หากมีข้อสงสัยประการใด สามารถสอบถามเพิ่มเติมได้ที่ นายสมชาย คงหนู หมายเลขโทรศัพท์ ๐๘ ๙๗๐๔ ๔๗๓๒ ทั้งนี้ บัณฑิตวิทยาลัย หวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความอนุเคราะห์จากท่านด้วยดี จึงขอขอบคุณอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาให้ความอนุเคราะห์

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร. อนามัย นาคคม)  
รองคณบดีฝ่ายวิชาการ ปฏิบัติราชการแทน  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร

งานวิชาการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
โทร. ๐ ๕๕๕๖ ๘๗๐๓  
โทรสาร ๐ ๕๕๕๖ ๘๘๒๖



ที่ อว ๐๖๐๓.๐๒/ว ๑๕๓๓

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมืองพิษณุโลก  
จังหวัดพิษณุโลก ๖๕๐๐๐

๒๘ มิถุนายน ๒๕๖๕

เรื่อง ขออนุญาตเก็บข้อมูลเพื่อการวิจัย

เรียน คุณบุญทิวี คำเครื่อง

สิ่งที่ส่งมาด้วย โครงการวิจัย จำนวน ๑ ฉบับ

ด้วย นายสมชาย คงหนู รหัสประจำตัว ๖๓๐๓๑๕๐๖ นิสิตระดับปริญญาเอก หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมกรรมการจัดการ สังกัดบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง “การหาค่าที่เหมาะสมสปริงกลับของเครื่องซีเอ็นซีตัดท่อบนพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม (SPRINGBACK OPTIMIZATION FOR CNC TUBE BENDING MACHINE BASE ON AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK (ANN)) โดยมี รองศาสตราจารย์ ดร. กวิน สนธิเพิ่มพูน เป็นประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ในการทำวิทยานิพนธ์ดังกล่าว นิสิตมีความจำเป็นต้องขอเก็บข้อมูลจากท่าน บัณฑิตวิทยาลัย จึงใคร่ขอความอนุเคราะห์จากท่านโปรดอนุญาตให้นิสิตดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูล และอำนวยความสะดวกให้แก่ นิสิตดังกล่าว ซึ่งจะเป็นประโยชน์ทางวิชาการต่อไป หากมีข้อสงสัยประการใด สามารถสอบถามเพิ่มเติมได้ที่ นายสมชาย คงหนู หมายเลขโทรศัพท์ ๐๘ ๙๗๐๔ ๔๗๓๒ ทั้งนี้ บัณฑิตวิทยาลัย หวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความอนุเคราะห์จากท่านด้วยดี จึงขอขอบคุณอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาให้ความอนุเคราะห์

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร. อนามัย นาคุดม)  
รองคณบดีฝ่ายวิชาการ ปฏิบัติราชการแทน  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร

งานวิชาการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
โทร. ๐ ๕๕๙๖ ๘๗๐๓  
โทรสาร ๐ ๕๕๙๖ ๘๘๒๖





ที่ อว ๐๖๐๓.๐๒/ว ๑๙๓๓

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมืองพิษณุโลก  
จังหวัดพิษณุโลก ๖๕๐๐๐

๒๘ มิถุนายน ๒๕๖๕

เรื่อง ขออนุญาตเก็บข้อมูลเพื่อการวิจัย

เรียน คุณเจนจิรา นันทะพงษ์

สิ่งที่ส่งมาด้วย โครงการวิจัย จำนวน ๑ ฉบับ

ด้วย นายสมชาย คงหนู รหัสประจำตัว ๖๓๐๓๑๕๐๖ นิสิตระดับปริญญาเอก หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมกรรมการจัดการ สังกัดบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง “การหาค่าที่เหมาะสมสปริงกลับของเครื่องซีเอ็นซีตัดท่อบนพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม (SPRINGBACK OPTIMIZATION FOR CNC TUBE BENDING MACHINE BASE ON AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK (ANN)) โดยมี รองศาสตราจารย์ ดร. กวิน สนธิเพิ่มพูน เป็นประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ในการทำวิทยานิพนธ์ดังกล่าว นิสิตมีความจำเป็นต้องขอเก็บข้อมูลจากท่าน บัณฑิตวิทยาลัย จึงใคร่ขอความอนุเคราะห์จากท่านโปรดอนุญาตให้นิสิตดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูล และอำนวยความสะดวกให้แก่ นิสิตดังกล่าว ซึ่งจะเป็นประโยชน์ทางวิชาการต่อไป หากมีข้อสงสัยประการใด สามารถสอบถามเพิ่มเติมได้ที่ นายสมชาย คงหนู หมายเลขโทรศัพท์ ๐๘ ๙๗๐๔ ๔๗๓๒ ทั้งนี้ บัณฑิตวิทยาลัย หวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความอนุเคราะห์จากท่านด้วยดี จึงขอขอบคุณอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาให้ความอนุเคราะห์

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร. อนามัย นาคุดม)  
รองคณบดีฝ่ายวิชาการ ปฏิบัติราชการแทน  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร

งานวิชาการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
โทร. ๐ ๕๕๕๖ ๘๗๐๓  
โทรสาร ๐ ๕๕๕๖ ๘๘๒๖



ที่ อว ๐๖๐๓.๐๒/ว ๑๙๓๓

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมืองพิษณุโลก  
จังหวัดพิษณุโลก ๖๕๐๐๐

๒๘ มิถุนายน ๒๕๖๕

เรื่อง ขออนุญาตเก็บข้อมูลเพื่อการวิจัย

เรียน คุณสมนึก วงศ์ศข

สิ่งที่ส่งมาด้วย โครงการวิจัย จำนวน ๑ ฉบับ

ด้วย นายสมชาย คงหนู รหัสประจำตัว ๖๓๐๓๑๕๐๖ นิสิตระดับปริญญาเอก หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมกรรมการจัดการ สังกัดบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง “การหาค่าที่เหมาะสมสปริงกลับของเครื่องซีเอ็นซีตัดท่อบนพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม (SPRINGBACK OPTIMIZATION FOR CNC TUBE BENDING MACHINE BASE ON AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK (ANN)) โดยมี รองศาสตราจารย์ ดร. กวิน สนธิเพิ่มพูน เป็นประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ในการทำวิทยานิพนธ์ดังกล่าว นิสิตมีความจำเป็นต้องขอเก็บข้อมูลจากท่าน บัณฑิตวิทยาลัย จึงใคร่ขอความอนุเคราะห์จากท่านโปรดอนุญาตให้นิสิตดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูล และอำนวยความสะดวกให้แก่ นิสิตดังกล่าว ซึ่งจะเป็นประโยชน์ทางวิชาการต่อไป หากมีข้อสงสัยประการใด สามารถสอบถามเพิ่มเติมได้ที่ นายสมชาย คงหนู หมายเลขโทรศัพท์ ๐๘ ๙๗๐๔ ๔๗๓๒ ทั้งนี้ บัณฑิตวิทยาลัย หวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความอนุเคราะห์จากท่านด้วยดี จึงขอขอบคุณอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาให้ความอนุเคราะห์

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร. อนามัย นาอุดม)  
รองคณบดีฝ่ายวิชาการ ปฏิบัติราชการแทน  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร

งานวิชาการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
โทร. ๐ ๕๕๙๖ ๘๗๐๓  
โทรสาร ๐ ๕๕๙๖ ๘๘๒๖



ที่ อว ๐๖๐๓.๐๒/ว ๑๙๓๓

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมืองพิษณุโลก  
จังหวัดพิษณุโลก ๖๕๐๐๐

๒๘ มิถุนายน ๒๕๖๕

เรื่อง ขออนุญาตเก็บข้อมูลเพื่อการวิจัย

เรียน คุณธนากร เตชนันท์

สิ่งที่ส่งมาด้วย โครงการวิจัย จำนวน ๑ ฉบับ

ด้วย นายสมชาย คงหนู รหัสประจำตัว ๖๓๐๓๑๕๐๖ นิสิตระดับปริญญาเอก หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมกรรมการจัดการ สังกัดบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง “การหาค่าที่เหมาะสมสปริงกลับของเครื่องซีเอ็นซีตัดท่อนบนพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม (SPRINGBACK OPTIMIZATION FOR CNC TUBE BENDING MACHINE BASE ON AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK (ANN)) โดยมี รองศาสตราจารย์ ดร. กวิน สนธิเพิ่มพูน เป็นประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ในการทำวิทยานิพนธ์ดังกล่าว นิสิตมีความจำเป็นต้องขอเก็บข้อมูลจากท่าน บัณฑิตวิทยาลัย จึงใคร่ขอความอนุเคราะห์จากท่านโปรดอนุญาตให้นิสิตดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูล และอำนวยความสะดวกให้แก่ นิสิตดังกล่าว ซึ่งจะเป็นประโยชน์ทางวิชาการต่อไป หากมีข้อสงสัยประการใด สามารถสอบถามเพิ่มเติมได้ที่ นายสมชาย คงหนู หมายเลขโทรศัพท์ ๐๘ ๙๗๐๔ ๔๗๓๒ ทั้งนี้ บัณฑิตวิทยาลัย หวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความอนุเคราะห์จากท่านด้วยดี จึงขอขอบคุณอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาให้ความอนุเคราะห์

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร. อนามัย นาอูตม)  
รองคณบดีฝ่ายวิชาการ ปฏิบัติราชการแทน  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร

งานวิชาการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
โทร. ๐ ๕๕๙๖ ๘๗๐๓  
โทรสาร ๐ ๕๕๙๖ ๘๘๒๖