

การออกแบบและพัฒนาเครื่องตัดท่อเหล็กกึ่งอัตโนมัติร่วมกับแบบจำลองการ ถดถอยพหุนามสำหรับการทำนายมุมตัดที่เหมาะสมที่สุด

ธนภัทร มะณีแสง¹, ณัฐพล ภูระหงษ์², สุรชาติ บุญสิงห์³, กิตติพล ลาสิงห์⁴

¹ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

^{2,3,4} คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

Email: nuttpon.phu@pcru.ac.th²

Received: Nov 05, 2025

Revised: Dec 02, 2025

Accepted: Dec 24, 2025

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาเครื่องตัดท่อเหล็กแบบกึ่งอัตโนมัติขนาดเล็กร่วมกับแบบจำลองการถดถอยพหุนามเพื่อใช้ทำนายมุมตัดที่เหมาะสมที่สุด การทดสอบดำเนินการกับท่อเหล็กขนาด 3/8-3/4 นิ้ว ความยาว 5, 6 และ 7 เมตร โดยมุ่งศึกษาความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างจำนวนรอบการหมุนของมอเตอร์ มุมตัดที่เกิดขึ้น และการเปลี่ยนแปลงของความกว้างระหว่างปลายท่อหลังจากการตัด ผลการทดลองพบว่าตัวแปรทั้งหมดมีความสัมพันธ์ค่อนข้างสูง โดยมีค่าสหสัมพันธ์เฉลี่ยมากกว่า 0.90 จำนวนรอบมอเตอร์มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับมุมตัด ขณะที่มุมตัดและความกว้างระหว่างปลายท่อมีความสัมพันธ์เชิงลบ ข้อมูลเชิงประจักษ์ดังกล่าวถูกนำไปพัฒนาเป็นแบบจำลองการถดถอยพหุนามสำหรับทำนายมุมตัดจากจำนวนรอบของมอเตอร์ ซึ่งให้ค่า R^2 เฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 98 และมีช่วงความเชื่อมั่นประมาณ ± 5 องศา ผลลัพธ์ยืนยันว่าเครื่องตัดท่อและแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายและควบคุมมุมตัดได้อย่างแม่นยำ เหมาะสำหรับการใช้งานจริงในงานตัดท่อเหล็กขนาดเล็ก

คำสำคัญ: เครื่องตัดท่อเหล็กกึ่งอัตโนมัติ, การถดถอยพหุนาม, การทำนายมุมตัด, การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

Design and Development of a Semi-Automatic Steel Pipe Bending Machine with a Polynomial Regression Model for Optimal Bending Angle Prediction

**Thanapat Maneesaeng¹, Nattapon Phurahong², Surachat Bunsing³,
Kittapon Lasing⁴**

¹ Faculty of Industrial Technology, Muban Chombueng Rajabhat University

^{2, 3, 4} Faculty of Agricultural Technology and Industrial Technology Phetchabun Rajabhat University

Email: nuttpon_t@gmail.com²

Received: Nov 05, 2025

Revised: Dec 02, 2025

Accepted: Dec 24, 2025

Abstract

This study aims to develop a compact semi-automatic steel-pipe bending machine integrated with a polynomial regression model for predicting the optimal bend angle. Experiments were conducted using steel pipes with diameters ranging from 3/8 to 3/4 inch and lengths of 5, 6, and 7 meters. The investigation focused on the quantitative relationships among motor rotation counts, the resulting bend angles, and changes in end-to-end pipe width after bending. The results show strong correlations among all variables, with average correlation coefficients exceeding 0.90. Motor rotations exhibited a positive correlation with bend angle, while bend angle and end-to-end width displayed a negative relationship. These empirical findings were used to construct a polynomial regression model for predicting bend angles from motor rotations. The model achieved an average R^2 value above 98% and a confidence interval of approximately ± 5 degrees. The findings confirm that the developed bending machine and regression model can accurately predict and control bend angles, making the system suitable for practical small-scale steel-pipe bending applications.

Keywords: Semi-automatic steel-pipe bending machine, Polynomial regression, Bend-angle prediction, Optimization

บทนำ

การตัดต่อเหล็กเป็นกระบวนการพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญในหลายอุตสาหกรรม เช่น งานก่อสร้าง โครงสร้างอาคาร และอุตสาหกรรมกระบวนการนี้มักต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีขนาดใหญ่และระบบควบคุมที่ซับซ้อน เพื่อให้ได้ความแม่นยำในการผลิต แม้เครื่องจักรเหล่านี้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่ต้นทุนที่สูงและความต้องการพื้นที่ติดตั้งมาก ทำให้ไม่เหมาะสมกับธุรกิจขนาดเล็กหรือการใช้งานภาคสนามทั่วไป ส่งผลให้ในหลายกรณีการตัดต่อด้วยแรงงานคนยังคงเป็นวิธีที่พบได้ทั่วไป ซึ่งมักมีปัญหาด้านคุณภาพ และความไม่สม่ำเสมอของรีซมีตัด จากข้อจำกัดดังกล่าว จึงเกิดแนวทางการพัฒนาเครื่องตัดต่อที่มีขนาดกะทัดรัด ใช้งานง่าย และมีต้นทุนต่ำ เพื่อตอบสนองผู้ใช้งานในระดับช่างหรือผู้ประกอบการธุรกิจขนาดย่อม ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีการตัดต่อ ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของสภาพแวดล้อมและข้อจำกัดในการใช้งานที่แตกต่างกัน การพัฒนาเหล่านี้ครอบคลุมตั้งแต่การปรับปรุงด้านกลไกไปจนถึงการนำเอาเทคนิคทางคำนวณขั้นสูงมาประยุกต์ใช้ ในระยะแรก การพัฒนาได้เริ่มต้นจากการออกแบบเครื่องมือที่เหมาะสมกับข้อจำกัดทางกายภาพและพลังงาน เช่น การพัฒนาเครื่องตัดแบบลูกกลิ้งสามตัวที่ขับเคลื่อนด้วยเฟืองและมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อให้สามารถใช้งานได้ในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านพลังงาน [1] ต่อมา มีการพัฒนาเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพและความเรียบง่าย เช่น เครื่องตัดแบบคาน ซึ่งมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนแต่สามารถ

ตัดต่อให้โค้งได้ถึง 180° โดยไม่ก่อให้เกิดการเสียรูป [2] นอกจากนี้ ยังมีการนำเอาระบบไฮดรอลิกมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตัด ระบบไฮดรอลิกช่วยเพิ่ม แรงตัด ที่จำเป็นได้อย่างมาก ทำให้สามารถลดภาระของผู้ปฏิบัติงาน [3, 4] ในช่วงหลังงานวิจัยได้มุ่งเน้นไปที่การใช้ วิธีการเชิงคำนวณ เพื่อควบคุมความแม่นยำของกระบวนการตัดให้ดียิ่งขึ้น แบบจำลองทางสถิติ และการจำลองเชิงวิศวกรรม ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการอธิบายความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมเชิงเรขาคณิตของท่อในระหว่างการตัด [5] มีการนำ การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) มาประยุกต์ใช้เพื่อทำนายข้อผิดพลาดในการตัดต่อด้วยเครื่องจักร CNC โดยจากการทดสอบกับอัลกอริทึมสมัยใหม่หลายชนิด พบว่า Logistic Regression เป็นแบบจำลองที่ให้ความแม่นยำดีที่สุด [6] ประเด็นสำคัญอีกประการหนึ่งคือการศึกษานวัตกรรมด้านการขึ้นรูป ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เกิดขึ้นหลังการคลายแรงตึง โดยมีกระบวนการหล่อหรือการขึ้นรูปของผงอัดและความหนาของท่อที่มีผลต่อการขึ้นรูป ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการพยากรณ์พฤติกรรมการตัดอย่างแม่นยำ [7] นอกจากนี้การผสมรวมเทคนิคขั้นสูงถือเป็นแนวโน้มที่น่าสนใจ เช่น การใช้ แบบจำลองการเรียนรู้จากข้อมูล ร่วมกับผลการ จำลององค์ประกอบไฟไนต์ เพื่อทำนายรูปทรงโค้งของท่อในกระบวนการตัดแบบดึงหมุน ซึ่งสามารถลดความคลาดเคลื่อนของรูปทรงได้อย่างมีนัยสำคัญ [8] รวมถึงการรวมการจำลองเชิงไฟไนต์เอลิเมนต์ เข้ากับแบบจำลองถดถอยหลายชั้น เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการ

คาดการณ์มูลค่าเงินรูปหลังการตัดให้สูงขึ้น [9] จะเห็นได้ว่างานวิจัยก่อนหน้านี้มักมุ่งพัฒนาเครื่องตัดท่อในด้านโครงสร้างกลไกหรือระบบช่วยผ่อนแรง ซึ่งช่วยลดภาระของผู้ปฏิบัติงาน แต่ยังมีข้อจำกัดสำคัญคือเครื่องถูกออกแบบเพื่อสร้างแรงตัดเป็นหลัก โดยไม่มีระบบทำนายผลการตัดอย่างเป็นระบบ ในขณะที่เครื่องตัดท่อรุ่นที่มีเทคโนโลยีสูงก็แม้จะให้ความแม่นยำดี แต่มีต้นทุนสูง ใช้งานซับซ้อน และต้องการพื้นที่ติดตั้งมาก ทำให้ไม่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือธุรกิจขนาดย่อม การตั้งค่างานรอบมอเตอร์หรือระยะดันเพื่อให้ได้มุมตัดที่ต้องการจึงยังต้องอาศัยประสบการณ์ผู้ปฏิบัติงาน และมักเกิดความคลาดเคลื่อน โดยเฉพาะในเครื่องตัดท่อขนาดเล็กหรือแบบกึ่งอัตโนมัติที่เน้นความเรียบง่ายและต้นทุนต่ำ ซึ่งยังไม่มีแบบจำลองที่เชื่อมโยงจำนวนรอบมอเตอร์หรือระยะกดเข้ากับมุมตัดจริง ช่องว่างนี้จึงเป็นที่มาของงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งมีเป้าหมายในการพัฒนาเครื่องตัดท่อขนาดเล็กที่ใช้งานง่าย ร่วมกับแบบจำลองเชิงสถิติสำหรับทำนายมุมตัดอย่างแม่นยำ ช่วยให้ผู้ใช้งานในอุตสาหกรรมขนาดเล็กสามารถตั้งค่าการทำงานได้อย่างถูกต้อง ลดการลองผิดลองถูก และยกระดับคุณภาพงานตัดโดยไม่ต้องพึ่งพาเครื่องจักรที่มีต้นทุนสูงหรือระบบควบคุมที่ซับซ้อน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องตัดท่อเหล็กแบบกึ่งอัตโนมัติที่มีโครงสร้างแข็งแรง ระบบส่งกำลังเหมาะสม และสามารถควบคุมการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับผู้ประกอบการรายย่อย

2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการหมุนของมอเตอร์ มุมตัดของท่อ และความกว้างระหว่างปลายท่อ ภายใต้ความยาวท่อที่แตกต่างกัน

3. เพื่อพัฒนาแบบจำลองการถดถอยพหุนามสำหรับทำนายมุมตัดและความกว้างปลายท่ออย่างแม่นยำ

4. เพื่อหาค่าการตั้งค่าจำนวนรอบการหมุนที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้มุมตัดที่ต้องการ โดยใช้การวิเคราะห์เชิงสถิติและการหาค่าผลตอบแทนที่เหมาะสมที่สุด และนำผลการทำนายจากแบบจำลองไปใช้ในการกำหนดค่าที่เหมาะสมสำหรับการตั้งค่าเครื่องตัดท่อตามมุมตัดที่ต้องการ

ระเบียบวิธีวิจัย

เพื่อให้ครอบคลุมตั้งแต่การออกแบบและพัฒนาเครื่องจักร ไปจนถึงการทดสอบและการวิเคราะห์ผลลัพธ์ การวิจัยครั้งนี้จึงกำหนดวิธีการดำเนินงานไว้เป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. การออกแบบระบบการทำงานและการกำหนดขั้นตอนการทำงาน

1.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานด้านกลไกการตัดท่อและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาเป็นกรอบในการออกแบบเครื่องจักร พร้อมทั้งกำหนดคุณลักษณะเป้าหมายที่ชัดเจน

1.2 ออกแบบโครงสร้างเครื่องให้มีความแข็งแรงเพียงพอต่อการรับแรงตัด จัดวางกลไกการทำงานแบบลูกกลิ้ง และระบบควบคุมให้เหมาะสม พร้อมทั้งออกแบบระบบส่งกำลัง

1.3 ติดตั้งระบบกลไกการทำงาน มอเตอร์ และชุดควบคุมตามแบบที่กำหนด พร้อมจัดวาง

องค์ประกอบให้สัมพันธ์กับโครงสร้างหลักของเครื่อง เพื่อให้เกิดการถ่ายทอดกำลังอย่างเหมาะสม และสามารถควบคุมการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4 กำหนดลำดับขั้นตอนการทำงานของเครื่องอย่างเป็นระบบ ตั้งแต่การเตรียมชิ้นงาน การตัด จนถึงการหยุดการทำงาน เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถปฏิบัติได้อย่างปลอดภัย ลดความเสี่ยงจากอุบัติเหตุ และรักษาประสิทธิภาพของกระบวนการตัดให้คงที่ทุกครั้งที่ใช้งาน

2. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการหมุนของมอเตอร์ที่ส่งผลต่อมุมตัดของท่อและความกว้างระหว่างปลายท่อ ภายใต้ความยาวท่อที่แตกต่างกัน

2.1 การทดลองและกลุ่มตัวอย่าง

ในการทดลองเครื่องตัดท่อ ได้เลือกใช้ท่อเหล็กขนาด 3/8-3/4 นิ้ว และแบ่งกลุ่มตัวอย่างตามความยาว 5, 6 และ 7 เมตร เนื่องจากท่อแต่ละความยาวมีพฤติกรรมการตอบสนองต่อจำนวนรอบการหมุนที่แตกต่างกันสำหรับผู้ประกอบการรายย่อย โดยเฉพาะกลุ่มช่างทั่วไปหรือผู้ที่มิพื้นที่ปฏิบัติงานจำกัด เหมาะสำหรับงานโครงสร้างขนาดเล็กถึงปานกลาง เช่น งานติดตั้งท่อเหล็ก งานโครงกันสาด งานราวเหล็ก และงานตัดโครงสร้างที่ต้องการความแม่นยำในระดับที่เหมาะสม การทดลองแบ่งออกเป็นกลุ่มละ 10 ครั้ง รวมทั้งหมด 30 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งทำการเพิ่มจำนวนรอบการหมุนของแผ่นเพลตเป็นลำดับ เพื่อศึกษาผลกระทบของจำนวนรอบต่อมุมตัดและความกว้างระหว่างปลายท่อ

2.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง จำนวนรอบการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรต้น (X) ต่อการเปลี่ยนแปลงของรูปทรงท่อหลังการตัด โดยเฉพาะมุมของส่วนโค้ง (ตัวแปรตาม Y_1) และความกว้างระหว่างปลายท่อทั้งสองด้าน (ตัวแปรตาม Y_2) โดยใช้การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ด้วย โปรแกรม Minitab Version 16 เพื่อประเมินระดับและตรวจสอบทิศทางความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างตัวแปรแต่ละคู่

3. การพัฒนาแบบจำลองการถดถอยพหุนามสำหรับทำนายมุมตัดและความกว้างปลายท่อ

ขั้นตอนนี้จะสร้างแบบจำลองทางสถิติที่อธิบายความสัมพันธ์ เริ่มจากตรวจสอบรูปแบบของความสัมพันธ์เบื้องต้น เพื่อระบุว่าข้อมูลมีแนวโน้มเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นหรือไม่ จากนั้นพิจารณาเลือกประเภทของแบบจำลองถดถอยที่เหมาะสม และการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย และประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่าความคลาดเคลื่อน เพื่อพิจารณาความสามารถของแบบจำลองในการทำนายค่ามุมตัดและความกว้างปลายท่อได้อย่างถูกต้อง

4. การหาค่าจำนวนรอบการหมุนที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้มุมตัดที่ต้องการ

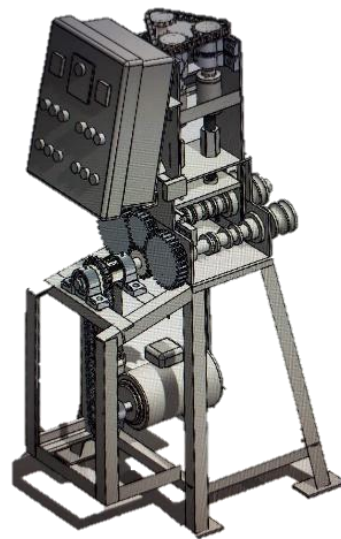
ผลลัพธ์จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะถูกใช้เป็นตัวแปรตอบสนองในการคาดการณ์มุมตัดและความกว้างปลายท่อภายใต้จำนวนรอบการหมุนที่แตกต่างกัน ในการวิเคราะห์จะประเมินค่าที่คาดการณ์ได้ร่วมกับ ช่วงความเชื่อมั่น และ

ช่วงการทำนาย เพื่อใช้ตรวจสอบความแม่นยำ และความแปรปรวนของแบบจำลอง จากนั้นค่าที่ได้จากแบบจำลองถูกนำไปใช้ในการตั้งค่าการทำงานของเครื่องตัดเพื่อให้ได้มุมตัดตามที่ต้องการ ทั้งนี้การทดลองดำเนินการภายใต้ความยาวท่อ 3 ระดับเพื่อใช้ประเมินผลของความยาวต่อความแปรปรวนของกระบวนการตัด เพราะท่อที่มีความยาวมากกว่ามักมีโอกาสดังกล่าว และความยืดหยุ่นที่สูงขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของรูปทรงหลังการตัด การกำหนดความยาวท่อที่แตกต่างกัน จึงช่วยให้สามารถตรวจสอบได้ว่าความยาวของวัสดุมีผลต่อความเสถียรและความแม่นยำของผลลัพธ์มากน้อยเพียงใด

ผลการวิจัย

1. การออกแบบเครื่องจักร

เครื่องตัดท่อเหล็กได้รับการออกแบบให้มีโครงสร้างสามารถรองรับน้ำหนักและยึดติดอุปกรณ์ได้อย่างมั่นคง โดยใช้เหล็กฉากขึ้นรูปเป็นโครงสร้าง ภายในติดตั้งชุดเฟือง Power Take-Off ทำหน้าที่ถ่ายทอดกำลังจากมอเตอร์เกียร์เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของแผ่นเพลทในการกดอัด แกนตัดด้านบนเข้าสู่ท่อเหล็ก



รูปที่ 1 การออกแบบระบบการทำงานของเครื่องตัดท่อเหล็กแบบกึ่งอัตโนมัติ

ขณะเดียวกันระบบโซ่ส่งกำลังจะเชื่อมต่อจากมอเตอร์ไปยังเฟืองขับ เพื่อหมุนแกนตัดและขับเคลื่อนท่อเหล็กให้เคลื่อนผ่านกระบวนการตัด แกนตัดจะทำหน้าที่ยึดและรับแรงกดจากแท่นกด เมื่อมอเตอร์เกียร์เริ่มทำงาน แผ่นเพลทจะกดอัด แกนตัดด้านบนและด้านล่างเข้าหากัน ส่งผลให้ท่อเหล็กโค้งงอตามรัศมีและมุมที่กำหนด ส่วนระบบควบคุมการทำงานของเครื่องประกอบด้วย สวิตช์เฟาเวอร์ซัพพลาย, แมกเนติกคอนแทคเตอร์ 220 โวลต์ 32 แอมป์, ตัวปรับความเร็วรอบ, และ เบรกเกอร์สวิตช์. มอเตอร์ขับเคลื่อนหลักเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำความเร็วรอบสูงแบบ 1-Phase ขนาด 1/8 แรงม้า 1,410 รอบต่อนาที ใช้ไฟ 220 โวลต์ กระแส 2.0 แอมป์ ทำหน้าที่ดันท่อนเหล็กออกจากแกน เพื่อกำหนดมุมของส่วนโค้งที่ต้องการตัด อีกชุดเป็น มอเตอร์เกียร์กำลังสูง รับไฟ

50 เฮิร์ตซ์ ผ่านชุดลดรอบให้เหลือ ประมาณ 90 รอบต่อนาที เพื่อเพิ่มแรงบิดสำหรับกดท่อนเหล็ก เข้ากับแกนดัดให้เกิดการโค้งงอได้ตามต้องการ โดยมีผังการออกแบบแสดง

1.1 การออกแบบระบบส่งกำลัง

ระบบส่งกำลังของเครื่องดัดท่อเหล็กใช้ หลักการทฤษฎีเฟือง ซึ่งใช้อัตราทดเฟืองคำนวณ จากอัตราส่วนจำนวนฟันของเฟืองขับและเฟือง ตาม เพื่อควบคุมความเร็วรอบและแรงบิดที่ ถ่ายทอด [10] นอกจากนี้ยังอิงหลักทฤษฎีการส่ง กำลังเชิงกล ที่ว่าด้วยการถ่ายทอดกำลังจาก มอเตอร์ไปสู่กลไกการทำงาน และการออกแบบ ระยะห่างระหว่างฟันเฟืองที่ส่งผลโดยตรงต่อ ความสัมพันธ์ของการหมุนและการเคลื่อนที่ [11]

1.1.1 ระบบการกดดัดเหล็ก

กำหนดให้

- 1) อัตราการทดเฟือง มีจำนวนฟัน

$$N_d = 15$$

- 2) เฟืองตาม มีจำนวนฟัน

$$N_f = 30$$

- 3) อัตราทดเฟือง

$$GR = N_f / N_d = 2$$

- 4) ระยะพิตซ์

$$P = 2.54 \text{ เซนติเมตร}$$

การคำนวณ

- 1) เฟืองขับหมุนใน 1 รอบ

$$D_d = N_d \times P = 15 \times 2.45 = 38.1$$

เซนติเมตร

2) ระยะทางที่เฟืองตามหมุนต่อการหมุนของ เฟืองขับ

$$D_d / GR = 19.05$$

3) ระยะทางที่สกรูเคลื่อนที่ต่อการหมุนของ เฟืองตาม $L =$ จำนวนรอบที่เฟืองตามหมุนต่อ ระยะทางต่อรอบของสกรู สกรูมีระยะทาง เคลื่อนที่ = 1 เซนติเมตรต่อการหมุนหนึ่งรอบของ เฟืองตาม โดยอัตราทด เท่ากับ 1:2 หรือ 0.5 ดังนั้น ค่า $L = 0.5 \times 1 = 0.5$ เซนติเมตร

จึงสรุปได้ว่า มอเตอร์หมุน 1 รอบ จะทำให้เฟืองตามหมุน 0.5 รอบ ระยะทางที่เฟือง ขับหมุนได้ในหนึ่งรอบคือ 38.1 เซนติเมตร ระยะทางที่เฟืองตามหมุนได้ในหนึ่งรอบคือ 19.05 เซนติเมตร สกรูเคลื่อนที่ 0.5 เซนติเมตร ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าหากมอเตอร์หมุน 1 รอบ จะกดแผ่น เพลทลงได้ 0.5 เซนติเมตร



รูปที่ 2 ระบบการกดดัดเหล็ก

1.1.2 ระบบการกดดัดเหล็ก

กำหนดให้

- 1) $N_r =$ ความเร็วรอบหลังจากเกียร์ส่งกำลัง มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (RPM)
- 2) $N_m =$ ความเร็วรอบมอเตอร์ มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที (RPM)
- 3) $R =$ อัตราทดเกียร์
- 4) $v =$ ความเร็วเชิงเส้น มีหน่วยเป็นเมตร ต่อวินาที (m/s)
- 5) $\omega =$ ความเร็วเชิงมุม มีหน่วยเป็นเรเดียน ต่อวินาที (rad/s)

6) r = รัศมีล้อเลื่อน มีหน่วยเป็นเมตร (m)
การคำนวณ

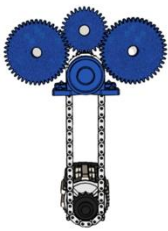
1) ความเร็วรอบหลังจากระบบส่งกำลังด้วย
ชุดเกียร์ $N_r = 1400 / 60 = 23.33$ รอบต่อ
นาที

2) คำนวณความเร็วเชิงมุม (ω)

$$\omega = \frac{2\pi N_r}{60} = 2.44 \text{ เรเดียนต่อวินาที}$$

3) คำนวณความเร็วเชิงเส้นการเคลื่อนที่ของ
ท่อนเหล็ก ถ้า r เท่ากับ 0.07 เมตร

ความเร็วเชิงเส้น : $v = 2.44 \times 0.07$
เมตรต่อวินาที



รูปที่ 3 ระบบการเคลื่อนที่ของท่อนเหล็ก

1.1.3 ขั้นตอนการทำงาน

เครื่องตัดท่อนเหล็กนี้ถูกออกแบบ
มาเพื่อตัดท่อนขนาด 3/8 ถึง 3/4 นิ้ว โดยใช้ระบบ
ขับเคลื่อนที่สามารถปรับความเร็วและแรงบิดได้
อย่างยืดหยุ่นผ่าน ชุดเกียร์ลดรอบ ซึ่งมีอัตราทด
หลักที่ 1:60 ชุดเกียร์นี้ทำหน้าที่เพิ่มแรงบิดและ
ลดความเร็วรอบของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับการ
ตัด ระบบส่งกำลังจะถ่ายทอดแรงหมุนผ่าน ชุดโซ่
และเฟือง ไปยังแผ่นเพลท ที่ใช้ในการกดท่อให้
โค้งตามมุมที่กำหนด แผ่นเพลทนี้จะเคลื่อนที่ลง
ในอัตรา 0.5 เซนติเมตรต่อรอบ ด้วยความเร็ว

ประมาณ 0.0854 เมตรต่อวินาที ในทางปฏิบัติ
ผู้ปฏิบัติงานจะบ่อนท่อเหล็กเข้าสู่แนวแกนตัด
จากนั้นมอเตอร์จะขับเคลื่อนให้แผ่นเพลทกดท่อ
จนได้มุมที่ต้องการ โดยสามารถปรับความเร็วและ
แรงบิดให้เข้ากับลักษณะของท่อและวัสดุได้
นอกจากนี้ เพื่อความปลอดภัยและป้องกันความ
เสียหายของเครื่องจักรจากภาวะทำงานเกินพิกัด
(Overload) ระบบควบคุมจึงติดตั้ง เบรกเกอร์
นิรภัยไว้ด้วย เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถหยุดการ
ทำงานและนำท่อออกจากเครื่องได้อย่างสะดวก
และปลอดภัย

2. การสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ ระหว่างรอบการหมุนกับมุมโค้งของท่อ

จากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องตัดท่อ
เหล็กแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยพิจารณาผลลัพธ์จาก
ท่อนเหล็กที่มีความยาวต่างกัน (5, 6, และ 7 เมตร)
พบว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงที่ชัดเจน ผลการ
ศึกษาแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการเพิ่มจำนวนรอบ
การหมุนของมอเตอร์ จะส่งผลให้มุมของส่วนโค้ง
เพิ่มขึ้น ในขณะที่ ความกว้างระหว่างปลายท่อทั้งสอง
ด้านลดลง ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้
ผู้วิจัยได้ใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ เพื่อยืนยัน
ผลการทดสอบเชิงประจักษ์ และสรุปได้ว่าการ
ควบคุมจำนวนรอบการหมุนของมอเตอร์เป็น
ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อการกำหนด
มุมโค้ง และ ระยะห่างระหว่างปลายท่อ อันเป็น
มาตรฐานสำคัญของรูปทรงสุดท้ายของท่อที่ผ่าน
การตัดตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าค่าความสัมพันธ์
(Correlation Coefficient: r) ของทุกกลุ่มการ
ทดลองมีค่าค่อนข้างสูง สะท้อนว่าตัวแปรที่นำมา

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่ชัดเจนทั้งในเชิงบวกและเชิงลบ อย่างไรก็ตาม รูปแบบข้อมูลพบว่าเมื่อความยาวของท่อเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งสามารถอธิบายได้จากพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของท่อยาวที่ซับซ้อนกว่าท่อสั้น กล่าวคือท่อยาวมีโอกาสเกิดการโก่งตัวและการสั่นระหว่างการติดตั้งกว่ารวมถึงมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนจากการปฏิบัติงาน ส่งผลให้มุมดัดและระยะปลายท่อมีความแปรปรวนเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างจำนวนรอบการหมุนและผลการดัดลดลงตามลำดับ อย่างไรก็ตามการลดลงของค่าความสัมพันธ์เป็นเพียงเล็กน้อย ซึ่งไม่มากพอที่จะทำให้ความสัมพันธ์โดยรวมระหว่างตัวแปรลดลง

3. การสร้างแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นเพื่อทำนายมุมของส่วนโค้ง และความกว้างระหว่างเหล็กปลายท่อเหล็กทั้งสองด้าน

ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 2 และ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของส่วนโค้งและความกว้างระหว่างปลายท่อ โดยแบ่งข้อมูลตามจำนวนรอบการหมุนออกเป็น 3 กลุ่ม พบว่าทั้งสามกลุ่มมีค่า p-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า α ที่กำหนดไว้ แสดงให้เห็นว่าจำนวนรอบการหมุนของมอเตอร์ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม โดยมุมดัดมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับจำนวนรอบ ในขณะที่ความกว้างระหว่างปลายท่อมีความสัมพันธ์เชิงลบ กล่าวคือ เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ท่อจะถูกดึงผ่านรัศมีดัดมากขึ้น ทำให้มุมโค้งเพิ่มและปลายท่อหดตัวเข้าใกล้กัน พฤติกรรมนี้อธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตของมุมดัดและระยะปลายท่อ ซึ่งมีรูปแบบเป็นฟังก์ชัน

ลดลงตามมุมดัดที่เพิ่มขึ้น พฤติกรรมนี้สามารถอธิบายเชิงเรขาคณิตได้จากสมการสมการจากหลักการหลักการเรขาคณิตของวงกลม (Circular Geometry)

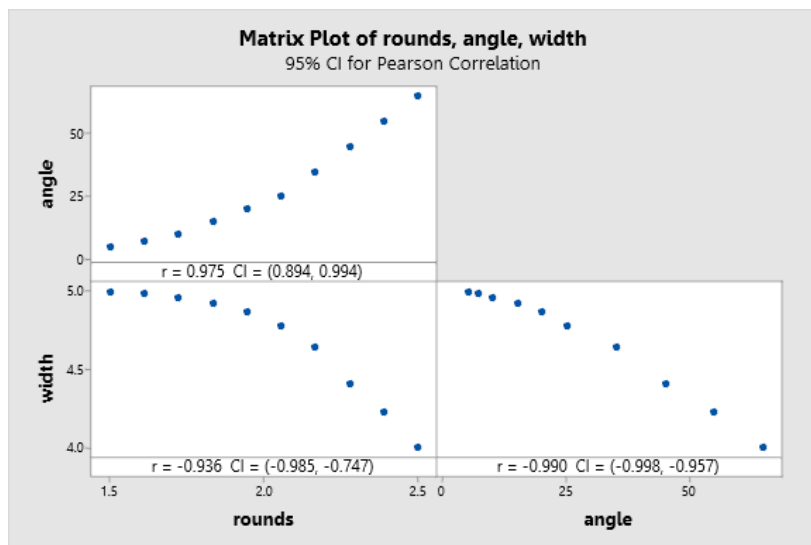
$$D = 2R \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

เมื่อ D คือระยะทางปลายท่อ R คือรัศมี และ θ คือมุมดัด ซึ่งเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าเมื่อ θ เพิ่มขึ้น $\sin(\theta/2)$ จะเพิ่มตาม ทำให้ D ลดลง ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่ามีความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างจำนวนรอบกับมุมดัด และความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างจำนวนรอบกับระยะปลายท่อในกระบวนการดัดจริง ผลการวิเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นว่าผู้ปฏิบัติงานสามารถใช้แบบจำลองในการคำนวณจำนวนรอบที่ต้องการเพื่อให้ได้มุมดัดที่กำหนดไว้ล่วงหน้าจาก ผลการทำนายจากแบบจำลองสามารถให้ค่ามุมดัดที่สอดคล้องกับค่าที่กำหนดได้อย่างถูกต้อง แผนภูมิในรูปที่ 5 แสดงรูปแบบของข้อมูลที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งและไม่เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นสมบูรณ์ ส่งผลให้แบบจำลองการถดถอยพหุนามมีความเหมาะสมกว่าวิธีการถดถอยเชิงเส้นทั่วไป ผู้วิจัยจึงนำหลักการของการถดถอยพหุนามมาใช้ เนื่องจากสมการที่ประกอบด้วยพจน์ยกกำลังของตัวแปรต้นสามารถรองรับพฤติกรรมของข้อมูลที่มีความโค้งและอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้แม่นยำกว่าแบบจำลองเชิงเส้น แบบจำลองเชิงเส้นมักไม่สามารถอธิบายแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลง หรือการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นอัตราส่วน

คงที่ได้ ทำให้มีค่า R^2 ต่ำกว่าแบบจำลองพหุนาม ทำนายค่าจริง ขณะที่แบบจำลองพหุนามสามารถ
อย่างชัดเจน จึงทำให้การใช้แบบจำลองเชิงเส้น ให้ค่าทำนายที่มีความแม่นยำสูงกว่าและ
อาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงเมื่อใช้ในการ สอดคล้องกับรูปแบบข้อมูลที่เกิดขึ้นในการทดลอง

ตารางที่ 1 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรมุมของส่วนโค้งและ ความกว้างระหว่างปลายเหล็กทั้งสอง ด้านที่เปลี่ยนไปตามจำนวนรอบของมอเตอร์

ความยาว เหล็ก	ความสัมพันธ์	ค่าความสัมพันธ์	ช่วงความเชื่อมั่น	ทิศทาง
5 เมตร	จำนวนรอบและมุมของส่วนโค้ง	0.975	(0.894 , 0.994)	ทิศทางเดียวกัน
	จำนวนรอบและความกว้าง	-0.936	(-0.985 , -0.747)	ทิศทางตรงกันข้าม
	มุมของส่วนโค้งและความกว้าง	-0.990	(-0.998, -0.957)	ทิศทางตรงกันข้าม
6 เมตร	จำนวนรอบและมุมของส่วนโค้ง	0.985	(0.934, 0.996)	ทิศทางเดียวกัน
	จำนวนรอบและความกว้าง	-0.915	(-0.980, -0.675)	ทิศทางตรงกันข้าม
	มุมของส่วนโค้งและความกว้าง	-0.961	(-0.991, -0.840)	ทิศทางตรงกันข้าม
7 เมตร	จำนวนรอบและมุมของส่วนโค้ง	0.974	(0.891, 0.994)	ทิศทางเดียวกัน
	จำนวนรอบและความกว้าง	-0.905	(-0.978, -0.640)	ทิศทางตรงกันข้าม
	มุมของส่วนโค้งและความกว้าง	-0.976	(-0.995, -0.899)	ทิศทางตรงกันข้าม



รูปที่ 4 ตัวอย่างแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของเหล็กความยาว 5 เมตร

ตารางที่ 2 การสร้างแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นเพื่อทำนายมุมของส่วนโค้งจากรอบการหมุนของมอเตอร์

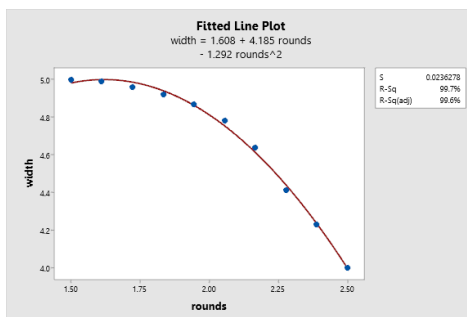
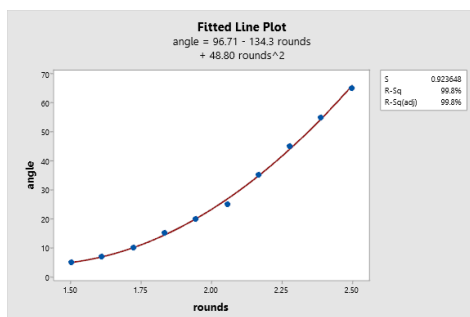
ความยาวเหล็ก	สมการถดถอย	ประเภทของแบบจำลอง	R ²	P- value
5 เมตร	angle = 96.71 - 134.3 rounds + 48.80 rounds ²	polynomial regression model	95.02	0.000
6 เมตร	angle = 50.34 - 95.37 rounds + 42.44 rounds ²	polynomial regression model	99.44	0.000
7 เมตร	angle = 136.0 - 190.0 rounds + 68.67 rounds ²	polynomial regression model	99.78	0.000

** โดยที่ rounds คือจำนวนรอบของมอเตอร์

ตารางที่ 3 การสร้างแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นเพื่อทำนายความกว้างระหว่างปลายเหล็กทั้งสองด้านจากรอบการหมุนของมอเตอร์

ความยาวเหล็ก	สมการถดถอย	ประเภทของแบบจำลอง	R ²	P-value
5 เมตร	width = - 3.755 + 12.78 rounds - 3.781 rounds ²	polynomial regression model	99.16	0.000
6 เมตร	width = - 1.975 + 9.616 rounds - 2.883 rounds ²	polynomial regression model	98.64	0.000
7 เมตร	width = - 3.948 + 12.95 rounds - 3.820 rounds ²	polynomial regression model	99.13	0.000

** โดยที่ rounds คือจำนวนรอบของมอเตอร์



รูปที่ 5 ตัวอย่างแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของส่วนโค้งและจำนวนรอบที่เปลี่ยนแปลงไป

4. การหาค่าตัวแปรตอบสนองที่เหมาะสม

ในการตั้งค่าจำนวนรอบเพื่อให้ได้มุมของส่วนโค้งที่ต้องการ โดยใช้ฟังก์ชัน response optimization ในโปรแกรม Minitab version 16 การทดลองนี้ต้องการตัดเหล็กความยาว 5-7 เมตร ให้ได้มุมของส่วนโค้ง 35 องศา และผลลัพธ์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าตัวแปรตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด : ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของส่วนโค้งและจำนวนรอบ

ความยาว	มุมที่ต้องการ (องศา)	จำนวนรอบที่ เหมาะสม (รอบ)	โอกาสที่ เป็นไปได้ (%)	ช่วงความเชื่อมั่น (องศา)	ช่วงการทำนาย (องศา)
5 เมตร	35	2.11	100	(31.46 , 38.84)	(22.91 , 47.09)
6 เมตร	35	2.01	100	(31.57 , 38.43)	(23.64 , 46.36)
7 เมตร	35	1.96	100	(29.86 , 40.14)	(18.03 , 51.97)

ซึ่งแสดงค่าจำนวนรอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการตัดท่อให้ได้มุม 35 องศา โดยผลการวิเคราะห์ด้วย Response Optimization พบว่าทุกความยาวท่อใช้จำนวนรอบใกล้เคียงกันประมาณ 2 รอบ พร้อมค่าความเป็นไปได้ 100% สะท้อนความแม่นยำของแบบจำลองถดถอยพหุนาม ช่วงความเชื่อมั่นค่อนข้างแคบ (ประมาณ 31–40 องศา) แสดงถึงความเสถียรของการตัด ในขณะที่ช่วงการทำนายมีความกว้างมากกว่า ซึ่งบ่งชี้ว่าการใช้งานจริงอาจมีความแปรปรวนบางส่วน ผู้ประกอบการจึงสามารถตั้งค่าเครื่องตัด 2 รอบเพื่อให้ได้มุมตัดตามต้องการได้อย่างแม่นยำในสภาวะปฏิบัติจริง

สรุปและอภิปรายผล

1. อภิปรายผล

ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นพบว่าทุกกลุ่มการทดลองมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด แสดงว่าจำนวนรอบการหมุนของมอเตอร์มีผลต่อมุมโค้งและความกว้างระหว่างปลายท่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การเพิ่มจำนวนรอบส่งผลให้มุมโค้งเพิ่มขึ้นในทิศทางเชิงบวก ขณะที่ความกว้างระหว่างปลายท่อลดลงตามรูปแบบ

ความสัมพันธ์เชิงลบ เมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายด้วยแบบจำลองถดถอยพหุนาม พบว่าแบบจำลองมีความแม่นยำสูง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากกว่า 0.95 ในทุกกลุ่มการทดลอง ผลการวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้ที่แสดงว่าแบบจำลองถดถอยพหุนามสามารถทำนายมุมตัดได้อย่างแม่นยำสอดคล้องกับงานของ Kim และคณะ [7] ซึ่งได้นำแบบจำลองเชิงข้อมูลมาใช้ในการทำนายรูปทรงของท่อหลังการตัดในกระบวนการตัดแบบดึงหมุนและรายงานว่าการทำนายมีความคลาดเคลื่อนต่ำ งานทั้งสองสะท้อนทิศทางเดียวกันคือ การใช้แบบจำลองที่สร้างจากข้อมูลจริงของกระบวนการตัดสามารถช่วยเพิ่มความแม่นยำในการทำนายรูปทรงหลังการตัดลดความคลาดเคลื่อน และสนับสนุนการตั้งค่ากระบวนการให้เหมาะสมยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาระบบตัดท่อที่ควบคุมคุณภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้การเลือกใช้แบบจำลองพหุนามยังมีความเหมาะสมทางทฤษฎี เนื่องจากกระบวนการตัดท่อไม่ได้มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นสมบูรณ์ระหว่างจำนวนรอบกับรูปทรงผลลัพธ์ แต่มีพฤติกรรมความโค้งของข้อมูล (curvilinear behavior) ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าท่อยาวมีความแปรปรวนสูงกว่า ซึ่งสามารถอธิบายได้จาก

ทฤษฎีการดัดของคานที่ระบุว่าภาระโก่งตัวจะแปรผันตามกำลังสี่ของความยาว (L^4) และแปรผกผันกับค่าความแข็งงอ EI [13,14] จากกรอบทฤษฎีดังกล่าวจึงอธิบายได้ว่าท่อยาวจะมีความยืดหยุ่นเชิงดัดสูงกว่า มีความต้านทานต่อโมเมนต์ดัดลดลง และมีโอกาสเกิดการโก่งตัว การบิดตัว และการคืนรูปหลังการดัดมากกว่าท่อสั้น ส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของมุมดัดและความกว้างปลายท่อมากขึ้นตามความยาว ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดลองที่พบว่าท่อความยาว 7 เมตรมีค่าการกระจายตัวสูงกว่ากลุ่ม 5 และ 6 เมตร

2. สรุปผล

2.1 จำนวนรอบที่เหมาะสมในการดัดเหล็กให้ได้มุม 35 องศามีความคล้ายคลึงกันในแต่ละความยาวของเหล็ก โดยจำนวนรอบที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง 1.96 ถึง 2.11 รอบ

2.2 การตั้งค่าจำนวนรอบที่เหมาะสมนี้มีโอกาสที่เป็นไปได้ 100% ในทุกกรณี

2.3 ความยาวของเหล็กที่ใช้ในการทดลองมีผลต่อการตั้งค่าจำนวนรอบที่เหมาะสม แม้ว่าเหล็กจะมีความยาวแตกต่างกัน แต่มุมที่ต้องการยังคงอยู่ที่ 35 องศาในทุกกรณี

2.4 จำนวนรอบและมุมของส่วนโค้งของเหล็กมีความสัมพันธ์ ส่งผลให้การตั้งค่าจำนวนรอบที่เหมาะสมสามารถทำได้มุมของส่วนโค้งตามที่ต้องการ โดยไม่มีความแตกต่างมากนักระหว่างความยาวของเหล็ก

2.5 ช่วงความเชื่อมั่น ในแต่ละความยาวของเหล็กจะอยู่ระหว่าง 31.46 - 40.14 องศา ส่วนช่วงการทำนายอยู่ระหว่าง 18.03 - 51.97

องศา แสดงถึงความไม่แน่นอนในการคาดการณ์มุมของส่วนโค้งสำหรับการทดลองในอนาคต

2.6 แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นช่วยให้สามารถกำหนดจำนวนรอบการดัดได้อย่างถูกต้องโดยไม่ต้องอาศัยประสบการณ์เฉพาะบุคคล จึงเอื้อต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กที่ต้องการควบคุมคุณภาพงานดัดภายใต้ข้อจำกัดด้านต้นทุนและทรัพยากรบุคคล

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ และโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่ได้สนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์สำหรับการพัฒนาเครื่องจักร

References

- [1] T. Ahmed, M. Faheem, and M. A. Murtaza, "Case study & stress analysis of a 3-roller bar bending machine," *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, vol. 3, no. 8, pp. 57–67, 2013.
- [2] M. C. Baraiya, N. N. Jadeja, A. B. Jasoliya, R. U. Jagad, and V. R. Makwana, "Research paper of manually operated pipe bending machine," *Paripex – Indian Journal of Research*, vol. 3, no. 5, pp. 66–67, 2014.

- [3] S. B. Deshmukh, J. A. Patil, D. S. Gurame, and D. S. Patil, "Design analysis and fabrication of hydraulic bar bending machine," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 4, no. 5, pp. 2658–2666, 2017.
- [4] M. Krishna S. A., "Experimental design and fabrication of a portable hydraulic pipe bending machine," *International Journal of Development Research*, vol. 4, no. 12, pp. 2681–2684, Dec. 2014.
- [5] V. Görüş, M. Bahşı, and M. Çevik, "Machine learning for the prediction of problems in steel tube bending process," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 133, no. 1, p. 108584, 2024.
- [6] D. S. Kim, J. W. Lee, and H. S. Kim, "Tube geometry prediction in rotary draw bending process using random forest regression," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 116, pp. 2543–2555, 2021.
- [7] S. Mazdak, M. R. Sheykholeslami, M. Gholami, H. Parvaz, M. M. Najafizadeh, S. Mahmoudi, and A. Vanaki, "A statistical model for estimation of bending angle in laser bending of two-layer steel–aluminum sheets," *Optics & Laser Technology*, vol. 157, p. 108575, 2023.
- [8] E. Gao, D. Xue, and Y. Li, "Springback angle prediction for high-strength aluminum alloy bending via multi-stage regression," *Metals*, vol. 15, no. 4, p. 358, 2025.
- [9] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 11th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2019.
- [10] R. L. Norton, *Machine Design: An Integrated Approach*, 6th ed. Boston, MA, USA: Pearson, 2019.
- [11] American Gear Manufacturers Association, *ANSI/ AGMA 2001- D04: Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth*, Alexandria, VA, USA: AGMA, 2004.
- [12] F. P. Beer, E. R. Johnston Jr., J. T. DeWolf, and D. F. Mazurek, *Mechanics of Materials*, 7th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2015.
- [13] J. M. Gere and B. J. Goodno, *Mechanics of Materials*, 9th ed. Stamford, CT, USA: Cengage Learning, 2018.