

Research Article

การพัฒนาออกแบบและสร้างชุดตัดเหล็กเส้นแบนด้วยเครื่องกดไฮดรอลิก
Development of a Hydraulic Press-Based Flat Steel Bar Cutting System

เกียรติศักดิ์ ทาน้อย¹ วิชญาส นาคสูงเนิน¹ พีระพงศ์ บัวพา¹ และ กิตติพล ขาวงาม^{1*}

Kiadtisak Thanoi¹ Wichayaphas Naksungnoen¹ Peerapong Buapa¹ and Kittipon Khaongam^{1*}

¹ สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมเชื่อม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

¹ Department of Welding Technical Education, Faculty of Technical Education,

Rajamangala University of Technology Isan, Khon kaen Campus

*Corresponding author. E-mail: kittipon.khaongam@hotmail.com

Received: May 29, 2026

Revised: June 22, 2026

Accepted: June 25, 2026

Available online: June 28, 2026

APA Citation:

Thanoi, K. ., Naksungnoen, W. ., Buapa, P. ., & Khaongam, K. (2026). Development of a Hydraulic Press-Based Flat Steel Bar Cutting System. *Journal of Industrial Technology Buriram Rajabhat University*, 8(1), 13–28. <https://doi.org/10.14456/brujit.2026.2>

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาลำบากและความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพในการตัดเหล็กเส้นแบนด้วยเครื่องกดไฮดรอลิก ซึ่งเกิดจากกระบวนการป้อนชิ้นงานแบบดั้งเดิมที่ขาดประสิทธิภาพ จึงได้พัฒนาและออกแบบชุดรางลำเลียงสำหรับป้อนเหล็กเส้นแบนร่วมกับเครื่องกดไฮดรอลิกเพื่อเพิ่มความเร็วและความแม่นยำในการตัด วิธีการวิจัยประกอบด้วยการสร้างต้นแบบระบบรางลำเลียงและทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตัดระหว่างกรณีมีและไม่มีรางลำเลียง พร้อมประเมินด้านเวลาและความเที่ยงตรงของชิ้นงาน ผลทดลองพบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถลดเวลาในการตัดเหล็กเส้นแบนหนา 9 mm จาก 8.6 s/piece (ก่อนพัฒนา) เหลือ 3.8 s/piece (หลังพัฒนา) คิดเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพร้อยละ 55.81 ในด้านความแม่นยำ ชิ้นงานที่มีความหนา 3, 6 และ 9 mm ความยาวเป้าหมาย 150 mm มีค่าความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 150.2, 150.1 และ 150.2 mm ตามลำดับ มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1 mm และค่าความฉากเฉลี่ยประมาณ 90° มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1° นอกจากนี้การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (process capability analysis) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าค่า Cp (process capability index) และ Cpk (process capability index ที่ปรับด้วยตำแหน่งจริง) สำหรับความหนา 3, 6 และ 9 mm เท่ากับ 1.85/1.39, 1.95/1.60 และ 3.30/2.26 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมที่ 1.33 ผลการวิจัยยืนยันว่าชุด

รางลำเลียงที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตควบคุมคุณภาพและมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมจริง

คำสำคัญ: เครื่องกดไฮดรอลิก การตัดเหล็กเส้นแบน ระบบรางลำเลียง ความแม่นยำในการตัด
ความสามารถของกระบวนการ (Cp, Cpk)

Abstract

The aim of this research is to overcome the problem of delay and non-uniform quality in the cutting of flat steel bars by hydraulic press, due to the inefficient traditional process of feeding the steel bar to the hydraulic press. So a conveyor rail system to convey flat steel bars along with the hydraulic press was developed and designed to boost the cutting speed and precision. The research method was to build a prototype for the conveyor rail system and test it to see the difference in cutting performance between the conveyor rail and no conveyor rail, as well as the cutting time and the accuracy of the workpieces. The experimental results indicated that the developed system could cut the cutting time of the flat steel bars with a thickness of 9 mm from 8.6 s/piece (before development) to 3.8 s/piece (after improvement), which is an improvement of 55.81% efficiency. The accuracy of the workpieces with thicknesses of 3, 6 and 9 mm and a target 150 mm, showed average size of 150.2, 150.1, and 150.2 mm, respectively, with a tolerance of up to 1 mm, and an average squareness of about 90° with a tolerance of up to 1°. In addition, the results of the process capability analysis using a computer program showed that the values of Cp (process capability index) and Cpk (process capability index adjusted for actual position) for thicknesses of 3, 6 and 9 mm were 1.85/1.39, 1.95/1.60 and 3.30/2.26 respectively, all of which are superior to the industrial standard of 1.33. The results of the research validate the developed conveyor rail system which can enhance the production efficiency, ensure quality control and can be applied in real industrial conditions.

Keywords: Hydraulic press, Flat steel bar cutting, Conveyor-assisted feeding system, Cutting accuracy, Process capability (Cp, Cpk)

1. บทนำ

ระบบไฮดรอลิกถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตสมัยใหม่เนื่องจากมีความสามารถในการสร้างแรงสูงควบคุมได้อย่างแม่นยำและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะการทำงานที่หลากหลาย [1] ข้อได้เปรียบดังกล่าวทำให้เครื่องกดไฮดรอลิกเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับกระบวนการตัดโลหะเฉพาะการตัดเหล็กเส้นแบนซึ่งถูกใช้อย่างกว้างขวางในงานโครงสร้างและงานอุตสาหกรรมเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตัดแบบดั้งเดิม เช่น การตัดด้วยแก๊สหรือเครื่องเลื่อยกล ระบบไฮดรอลิกให้ความรวดเร็วในการตัดที่สูงกว่ามีความแม่นยำด้านมิติที่ดีกว่าและมีความปลอดภัยในการปฏิบัติงานมากกว่าจากความต้องการของภาคอุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้นในการเพิ่มผลผลิตและความสม่ำเสมอของคุณภาพการปรับปรุงระบบตัดด้วยไฮดรอลิกจึงเป็นประเด็นสำคัญงานวิจัยจำนวนมากให้ความสำคัญกับการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฮดรอลิกและกลไกการตัด เช่น Sanchez-Marquez และ Jabaloyes Vivas [2] ได้พัฒนาระบบเซอร์โวไฮดรอลิกตำแหน่งความแม่นยำสูงสำหรับเครื่องมือกลใช้ตัวควบคุมพีซี PID แบบปรับค่าตัวเองออนไลน์ซึ่งสามารถปรับค่าพารามิเตอร์แบบเวลาจริงส่งผลให้ลดเวลาตอบสนองค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวและเพิ่มประสิทธิภาพภายใต้โหลดที่เปลี่ยนแปลงในบริบทของการตัดเหล็กเส้นแบน Huang et al. [3] รายงานว่าระบบไฮดรอลิกแบบควบคุมด้วยปั๊มที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพและความแม่นยำดีกว่าการตัดด้วยแก๊ส นอกจากนี้ Thummala et al. [4] ได้พัฒนาเครื่องตัดเหล็กเส้นแบนด้วยระบบไฮดรอลิกต้นแบบในปริณิญาพันธ์และรายงานที่สามารถตัดเหล็กหนา 3, 6 และ 9 mm ได้เร็วกว่าการตัดด้วยแก๊ส ต่อมา Li et al. [5] ได้นำเสนอการควบคุมแยกกำลังและความเร็วสำหรับระบบเซอร์โวไฮดรอลิกของเครื่องตัดแบบโรลลิงแชร์ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานลงได้ 44.6% เมื่อเทียบกับระบบทั่วไปพร้อมทั้งคงความแม่นยำสูงและเสถียรภาพ งานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องจักรไฮดรอลิกอื่น ๆ เช่น ระบบอัดบล็อกกึ่งอัตโนมัติ ยังชี้ให้เห็นว่าการบูรณาการองค์ประกอบของระบบช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความสม่ำเสมอในการทำงานแม้จะมีความก้าวหน้าดังกล่าวแต่ประสิทธิภาพของกระบวนการตัดด้วยไฮดรอลิกยังคงถูกจำกัดขึ้นก่อนการตัดเฉพาะกระบวนการบ่อนขึ้นงาน ในทางปฏิบัติเหล็กเส้นแบนมักถูกบ่อนเข้าสู่เครื่องจักรด้วยแรงงานคนอาศัยพนักงานหลายคนส่งผลให้กระบวนการทำงานไม่ต่อเนื่อง ใช้เวลานานและเกิดความแปรปรวนสูงในการจัดตำแหน่งขึ้นงาน [6] ความไม่สม่ำเสมอดังกล่าวนำไปสู่ปัญหาคุณภาพของผลิตภัณฑ์และเพิ่มความเสี่ยงด้านความปลอดภัยข้อจำกัดเหล่านี้ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการปรับปรุงระบบบ่อนขึ้นงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของกระบวนการขนถ่ายวัสดุอัตโนมัติเฉพาะสายพานลำเลียงอัจฉริยะได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการขนถ่ายวัสดุและลดการพึ่งพาแรงงานคน Yu et al. [7] ได้นำเสนอระบบโลจิสติกส์สายพานลำเลียงแบบโมดูลาร์ที่ปรับเปลี่ยนได้พร้อมการควบคุมแบบกระจาย แสดงให้เห็นว่าสถาปัตยกรรมสายพานลำเลียงที่มีความยืดหยุ่นสามารถลดเวลาที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าและปรับปรุงความต่อเนื่องของการไหลของวัสดุในสภาพแวดล้อมการผลิตอัตโนมัติทำนองเดียวกัน Wang et al. [8] ได้พัฒนาระบบขนถ่ายวัสดุอัตโนมัติด้วยสายพานลูกกลิ้งแบบแอคทีฟที่ช่วยลดความ

แปรปรวนของกระบวนการอย่างไรก็ตามงานวิจัยเหล่านี้ยังไม่ได้บูรณาการระบบลำเลียงเข้ากับเครื่องกดไฮดรอลิกสำหรับตัดโลหะดังนั้นช่องว่างงานวิจัยที่สำคัญ คือ การบูรณาการรางลำเลียงกับเครื่องกดไฮดรอลิกสำหรับเหล็กเส้นแบนยังมีน้อยงานวิจัยส่วนใหญ่เน้นประสิทธิภาพการตัดเพียงด้านเดียวและขาดการประเมินความสามารถของกระบวนการด้วยดัชนี C_p และ C_{pk} [9] ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องกดไฮดรอลิกร่วมกับระบบรางลำเลียงแบบลูกกลิ้งสำหรับการตัดเหล็กเส้นแบน โดยบูรณาการรางลำเลียงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการป้อนชิ้นงาน ลดแรงงานคน พร้อมทั้งเปรียบเทียบเวลา ความแม่นยำ และประเมินความสามารถของกระบวนการ (C_p , C_{pk}) แนวทางนี้มุ่งเพิ่มผลิตภาพและความสม่ำเสมอของคุณภาพสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาชุดเครื่องตัดเหล็กเส้นแบนด้วยเครื่องกดไฮดรอลิกร่วมกับระบบรางลำเลียง
- 2.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการตัดในด้านเวลาและความแม่นยำก่อนและหลังการพัฒนา รวมทั้งประเมินความสามารถของกระบวนการโดยใช้ดัชนี C_p และ C_{pk}

3. ขอบเขตของการวิจัย

- 3.1 ใช้เหล็กเส้นแบนที่มีความหนา 3, 6 และ 9 mm ใช้เครื่องกดไฮดรอลิกรุ่น VO-50 ในการทดลอง
- 3.2 ออกแบบชุดตัดเหล็กเส้นแบนและระบบรางลำเลียงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 3.3 ประเมินผลในด้านเวลาในการตัด ความแม่นยำของชิ้นงาน และความสามารถของกระบวนการ (C_p , C_{pk})
- 3.4 การทดลองดำเนินการภายใต้สภาวะการทำงานที่กำหนดในห้องปฏิบัติการ

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

4.1 หลักการตัดด้วยเครื่องกดไฮดรอลิก การตัดเหล็กเส้นแบนด้วยเครื่องกดไฮดรอลิกเป็นกระบวนการตัดเฉือน (shearing process) ที่อาศัยแรงกดจากระบบไฮดรอลิกในการทำให้วัสดุเกิดความเค้นเฉือนจนขาดออกจากกันระบบไฮดรอลิกสามารถสร้างแรงกดสูงและสม่ำเสมอจึงเหมาะสำหรับกระบวนการตัดโลหะที่ต้องการความแม่นยำและความต่อเนื่องในการทำงานนอกจากนี้ยังช่วยลดเวลาในการตัดและเพิ่มความปลอดภัยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตัดแบบดั้งเดิม เช่น การตัดด้วยแก๊สหรือเครื่องเลื่อยกล [10]-[11]

4.2 ระบบรางลำเลียงสำหรับการป้อนชิ้นงานระบบรางลำเลียงแบบลูกกลิ้งถูกนำมาใช้เพื่อช่วยป้อนเหล็กเส้นแบนเข้าสู่ตำแหน่งตัดอย่างต่อเนื่องลดแรงเสียดทานระหว่างการเคลื่อนที่ของชิ้นงานและลดความแปรปรวนที่เกิดจากการป้อนด้วยแรงงานคนระบบดังกล่าวช่วยเพิ่มความรวดเร็วในการทำงานและช่วยให้ตำแหน่งของชิ้นงานมีความสม่ำเสมอมากขึ้นส่งผลต่อความแม่นยำของกระบวนการตัดและประสิทธิภาพการผลิต [12]

4.3 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (process capability analysis) เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ตรวจสอบว่ากระบวนการผลิตสามารถผลิตชิ้นงานให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดได้อย่างสม่ำเสมอเพียงใดวิธีการนี้ได้รับความนิยมในระบบควบคุมคุณภาพอุตสาหกรรมเพราะสามารถบอกได้ทั้งศักยภาพสูงสุดและประสิทธิภาพที่แท้จริงของกระบวนการผ่านดัชนีหลัก 2 ตัว คือ C_p และ C_{pk} เกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมทั่วไปกำหนดว่าหาก C_p และ C_{pk} มีค่ามากกว่า 1.33 แสดงว่ากระบวนการผลิตนั้นมีความสามารถเพียงพอ (capable) สำหรับการผลิตจริง [13]

C_p (process capability index) เป็นดัชนีที่บอกศักยภาพสูงสุดของกระบวนการสมมติให้ค่ากลางของชิ้นงานที่ผลิตได้อยู่ตรงเป้าหมายพอดีไม่เกิดการเอียงศูนย์ คำนวณได้จากสมการ (1)

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (1)$$

C_{pk} (process capability index ที่ปรับด้วยตำแหน่งจริง) เป็นดัชนีที่บอกความสามารถตามจริงของกระบวนการคำนึงถึงว่าค่ากลางของชิ้นงานอาจคลาดเคลื่อนจากเป้าหมายมีการเอียงศูนย์ คำนวณได้จากสมการ (2)

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right) \quad (2)$$

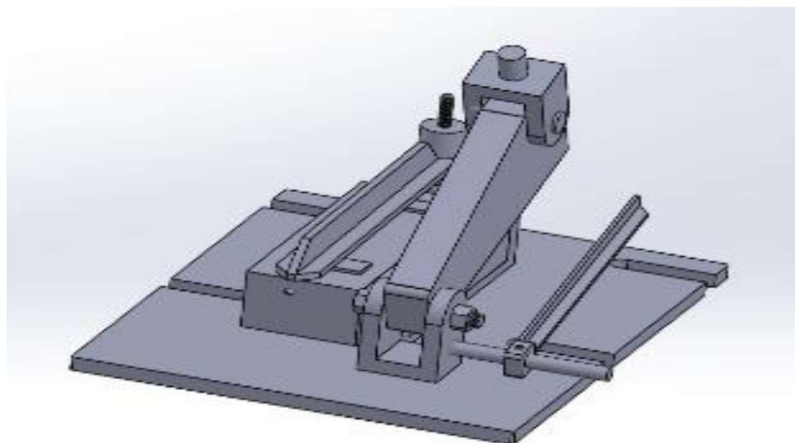
เมื่อ USL (upper specification limit) = ขีดจำกัดบนของค่าที่ยอมรับได้ค่าสูงสุด LSL (lower specification limit) = ขีดจำกัดล่างของค่าที่ยอมรับได้ค่าต่ำสุด σ = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการ μ = ค่าเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผลิตได้จริง

5. วิธีการดำเนินการวิจัย

5.1 การออกแบบและพัฒนาโครงสร้างเครื่อง

งานวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการออกแบบชุดตัดเหล็กเส้นแบนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พิจารณาโครงสร้างฐาน ชุดตัด และระบบรองรับแรง จากนั้นทำการดัดแปลงเครื่องกดไฮดรอลิก รุ่น VO-50 ที่มีอยู่เดิมดังภาพที่ 1 ให้สามารถติดตั้งระบบรางลำเลียงได้ ในภาพที่ 1 แสดงเครื่องก่อนพัฒนาซึ่งยังไม่มีระบบรางลำเลียงชุดกดชิ้นงานเดิมเป็นแบบเสาเดี่ยว และชุดตั้งความยาวเดิมเป็นแบบเสาเดี่ยว

การพัฒนาครั้งนี้ได้ติดตั้งส่วนประกอบใหม่ ซึ่งมีลูกศรสีแดงกำกับเพื่อนั่นส่วนที่เปลี่ยนแปลง ได้แก่ ชุดกดชิ้นงานเปลี่ยนจากเสาเดี่ยวเป็นแบบ 2 เสาพร้อมแผ่นกดขนาดกว้างขึ้นและชุดตั้งความยาวชิ้นงานเปลี่ยนจากเสาเดี่ยวเป็นแบบ 2 เสา นอกจากนี้ยังเพิ่มระบบรางลำเลียงแบบลูกกลิ้งจำนวน 6 ลูกกลิ้งสำหรับป้อนชิ้นงาน รายละเอียดการประกอบระบบรางลำเลียงแสดงในตารางที่ 1 และผลลัพธ์ของเครื่องหลังพัฒนาทั้งระบบปรากฏในภาพที่ 2



ภาพที่ 1 เครื่องตัดเหล็กเส้นแบบก่อนพัฒนา Thummala et al. [4]

5.2 การพัฒนาระบบรางลำเลียง

การออกแบบและสร้างระบบรางลำเลียงแบบลูกกลิ้งเพื่อใช้ในการป้อนชิ้นงานเข้าสู่ตำแหน่งตัด กำหนดระยะห่างและจำนวนลูกกลิ้งให้เหมาะสมกับขนาดของเหล็กเส้นแบบ สร้างระบบรางลำเลียงแบบลูกกลิ้ง (roller conveyor) มีรายละเอียดดังนี้ จำนวนลูกกลิ้ง 6 units ระยะห่าง 120 mm วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเคลือบผิว เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm โครงรองรับ เหล็กกล่องขนาด 40×40 mm ระบบนี้ช่วยลดแรงเสียดทานและเพิ่มความสม่ำเสมอในการป้อนชิ้นงานเข้าสู่ตำแหน่งตัด

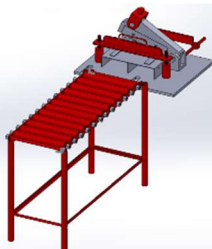
5.3 ขั้นตอนการประกอบและติดตั้ง

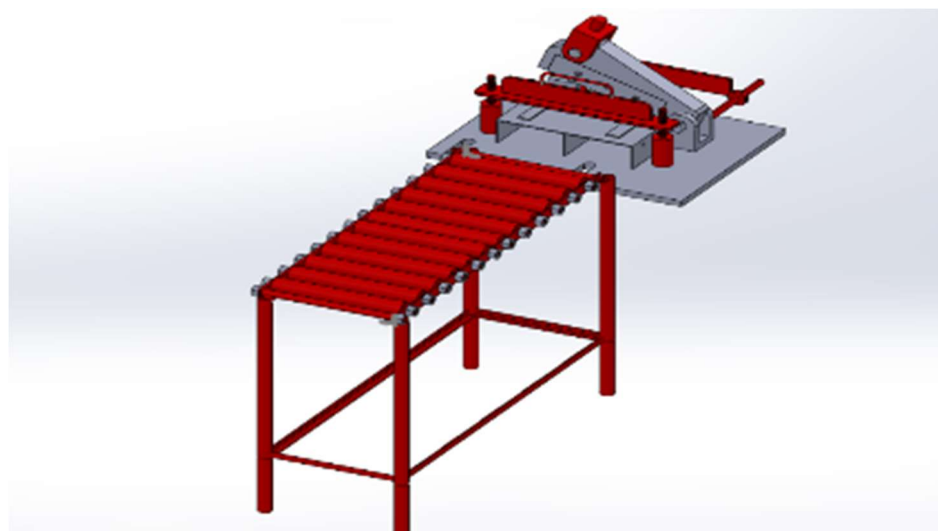
การดัดแปลงเครื่องกดไฮดรอลิกร่วมกับรางลำเลียงขั้นตอนการประกอบและติดตั้งระบบรางลำเลียงแสดงดังตารางที่ 1 ประกอบด้วยภาพย่อย 6 ภาพเรียงลำดับ ได้แก่ (1) ตัวยึดชุดตัดเหล็กเข้ากับแกนไฮดรอลิก (2) การติดตั้งชุดรองรับแผ่นบาร์สำหรับปรับตั้งความยาวชิ้นงาน (3) การติดตั้งเสาชุดกดพร้อมแผ่นบาร์กดชิ้นงาน (4) โครงสร้างรางลำเลียง (5) ชุดรางลำเลียงพร้อมโครงและลูกกลิ้ง และ (6) ชุดตัดเหล็กเส้นแบบหลังการพัฒนา ลักษณะการประกอบชุดตัดหลังการพัฒนาแสดงดังภาพที่ 2

ตารางที่ 1 ขั้นตอนการพัฒนาสร้างระบบรางลำเลียงสำหรับชุดตัดเหล็กเส้นแบบ

1 ตัวยึดชุดตัดเหล็กเข้ากับแกนไฮดรอลิก	2 การติดตั้งชุดรองรับแผ่นบาร์ปรับตั้งความยาวชิ้นงาน	3 การติดตั้งเสาชุดกดพร้อมแผ่นบาร์กดชิ้นงาน

ตารางที่ 1 (ต่อ)

		
4 โครงสร้างรางลำเลียง	5 ชุดรางลำเลียงพร้อมโครงและลูกกลิ้ง	6 ชุดตัดเหล็กเส้นแบนหลังการพัฒนา



ภาพที่ 2 เครื่องตัดเหล็กเส้นแบนหลังพัฒนา (พร้อมติดตั้งระบบรางลำเลียง)

5.4 การทดลองและเก็บข้อมูล

การทดลองใช้เหล็กเส้นแบนเกรด SS400 ขนาด 150×100 mm ความหนา 3, 6 และ 9 mm แต่ละความหนาเตรียมไว้จำนวน 10 piece ทดสอบเวลาและเตรียมเพิ่มอีก 30 ชิ้นต่อความหนา สำหรับการทดสอบความแม่นยำภายหลังการพัฒนาเครื่องมือวัดประกอบด้วยจับเวลาดิจิทัลความละเอียด 0.01s เวอร์เนียคาลิเปอร์ยี่ห้อ Mitutoyo ความละเอียด 0.02 mm และโปรแทรกเตอร์ความละเอียด 0.5° กระบวนการทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการทดสอบเวลาในการตัด เปรียบเทียบระหว่างวิธีการตัด 4 แบบ ได้แก่ (ก) ชุดตัดหลังพัฒนาซึ่งติดตั้งระบบรางลำเลียง (ข) ชุดตัดก่อนพัฒนาที่ไม่มีรางลำเลียง (ค) การตัดด้วยแก๊ส และ (ง) การตัดด้วยเลื่อยชักขนาด 14 in รุ่น HR-014 แต่ละวิธีทำการตัดเหล็กทั้งสามความหนาอย่างต่อเนื่องจำนวนความหนาละ 10 piece บันทึกเวลาตั้งแต่เริ่มป้อนชิ้นงานจนกระทั่งตัดขาดสมบูรณ์จากนั้นจึงวัดความ

ยาวและความฉากของชิ้นงานที่ได้ ส่วนที่สองเป็นการทดสอบความแม่นยำของชุดตัดหลังพัฒนา ทำการตัดเหล็กแต่ละความหนาจำนวน 30 piece นำมาวัดความยาวจริงด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์และวัดความฉากด้วยโปรแทรกเตอร์เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการตัดด้วยดัชนี Cp และ Cpk ต่อไปตัวอย่างข้อมูลเวลาในการตัดสำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 9 mm แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างข้อมูลเวลาในการตัด (s) สำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 9 mm

ครั้งที่	ชุดตัดก่อนพัฒนา (s)	ชุดตัดหลังพัฒนา (s)
1	8.6	3.8
2	8.7	3.9
3	8.5	3.7
4	8.6	3.8
5	8.8	3.9
6	8.5	3.7
7	8.6	3.8
8	8.7	3.8
9	8.6	3.9
10	8.5	3.7
เฉลี่ย	8.6	3.8
SD	0.10	0.08

5.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลมาคำนวณจากนั้นวิเคราะห์ดัชนีความสามารถของกระบวนการ (Cp และ Cpk) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ± 1 mm (USL=151 mm, LSL=149 mm) เพื่อประเมินเสถียรภาพของกระบวนการ

6. ผลการดำเนินงาน

ผลการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ได้แก่ 6.1 การเปรียบเทียบเวลาในการตัดระหว่างกระบวนการต่างๆ 6.2 ความแม่นยำของชิ้นงาน และ 6.3 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Cp, Cpk) พร้อมทั้งอภิปรายผลในหัวข้อ 7

6.1 การเปรียบเทียบเวลาในการตัด

การทดสอบประสิทธิภาพด้านเวลาดำเนินการโดยเปรียบเทียบระหว่างชุดตัดเหล็กเส้นแบนก่อนหลังการปรับปรุงติดตั้งระบบรางลำเลียงกับก่อนพัฒนารวมถึงเปรียบเทียบกับ การตัดด้วยแก๊สและการตัดด้วย

เครื่องเลื่อยชัก 14 in ทดสอบกับเหล็กเส้นแบนขนาด 150x100 mm ที่มีความหนา 3, 6 และ 9 mm จำนวนความหนาละ 10 piece ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยในการตัดเหล็กเส้นแบนขนาดความหนาต่างๆ

กระบวนการตัด	ความหนา 3 mm	ความหนา 6 mm	ความหนา 9 mm
ชุดตัดหลังพัฒนา (รางลำเลียง)	3.4 s	3.5 s	3.8 s
ชุดตัดก่อนพัฒนา	4.4 s	6.4 s	8.6 s
การตัดด้วยแก๊ส	24.1 s	27.4 s	31.2 s
เครื่องเลื่อยชัก 14 in	35.0 s	64.0 s	90.5 s

จากตารางที่ 3 พบว่าชุดตัดหลังพัฒนามีเวลาเฉลี่ยในการตัดลดลงเมื่อเทียบกับก่อนพัฒนาทุกความหนา สามารถลดเวลาได้คิดเป็น 20.83% สำหรับความหนา 3 mm 45.31% สำหรับความหนา 6 mm และ 55.81% สำหรับความหนา 9 mm เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตัดด้วยแก๊ส พบว่าชุดตัดหลังพัฒนาใช้เวลาน้อยกว่า 85.9%, 87.2% และ 87.8% สำหรับความหนา 3, 6 และ 9 mm ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับเครื่องเลื่อยชักพบว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่า 90.3%, 94.5% และ 95.8% ตามลำดับ

6.2 ความแม่นยำของชิ้นงานหลังพัฒนา

การประเมินความแม่นยำด้านความยาวและความฉากของชิ้นงานหลังพัฒนาดำเนินการโดยวัดชิ้นงานทั้ง 10 pieces/mm ด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ ความละเอียด 0.02 mm และเครื่องวัดมุม ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความแม่นยำของชิ้นงานหลังการพัฒนาระบบรางลำเลียง

ความหนา ชิ้นงาน (mm)	ความยาว เป้าหมาย (mm)	ความยาว เฉลี่ย (mm)	ความคลาด เคลื่อน (mm)	ความฉาก เฉลี่ย (°)	ความคลาดเคลื่อน ความฉาก (°)
3	150	150.2	+0.2	90.1	$\pm 0.8^\circ$
6	150	150.1	+0.1	89.9	$\pm 0.7^\circ$
9	150	150.2	+0.2	90.0	$\pm 0.6^\circ$

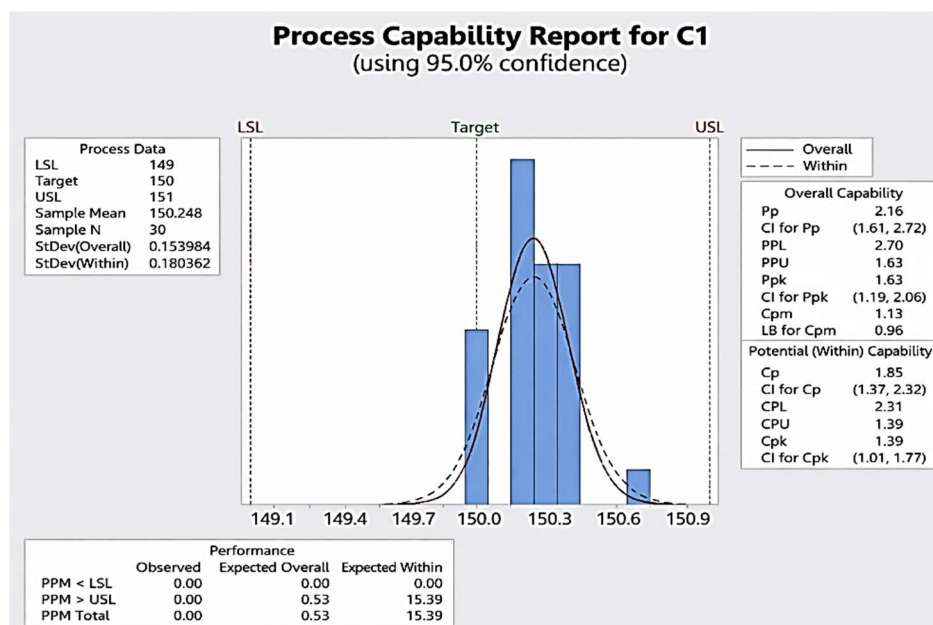
จากตารางที่ 4 พบว่าชิ้นงานทุกความหนามีความยาวเฉลี่ยอยู่ในช่วง 150.1-150.2 mm มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 1 mm เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดในขอบเขตการวิจัย นอกจากนี้ ค่าความฉากเฉลี่ยของชิ้นงานทุกความหนาอยู่ที่ประมาณ 90° มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 1^\circ$ แสดงให้เห็นว่าระบบรางลำเลียงช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอในการจัดตำแหน่งชิ้นงานก่อนตัดส่งผลให้ชิ้นงานมีความถูกต้องทางมิติ

6.3 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Cp และ Cpk) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์ดัชนีความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Index) ดำเนินการด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินความเสถียรและศักยภาพของกระบวนการตัดหลังพัฒนา กำหนดค่าเป้าหมายความยาวชิ้นงานที่ 150 mm และค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ± 1 mm USL=151 mm, LSL=149 mm ผลการวิเคราะห์สำหรับเหล็กเส้นแบนแต่ละความหนาแสดงดังภาพที่ 3 ถึง 5

6.3.1 ผลการวิเคราะห์สำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 3 mm

การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการสำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 3 mm ดำเนินการเพื่อประเมินเสถียรภาพของกระบวนการตัดโดยใช้ค่าดัชนี Cp และ Cpk เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของกระบวนการ ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 3



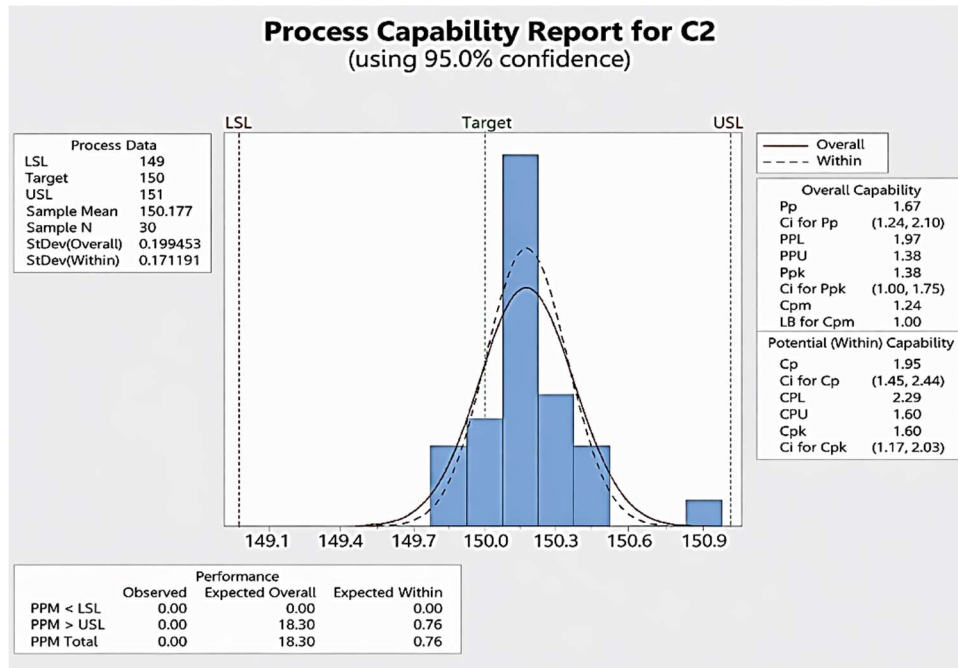
ภาพที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการสำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 3 mm

ภาพที่ 3 พบว่าค่าเฉลี่ยของกระบวนการ (Sample Mean) เท่ากับ 150.248 mm และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานภายในกระบวนการ (Within StDev) เท่ากับ 0.180 mm ส่งผลให้ค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ Cp และ Cpk มีค่าเท่ากับ 1.85 และ 1.39 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมที่ 1.33 [14] ยืนยันว่ากระบวนการยังสามารถควบคุมคุณภาพของชิ้นงานให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าค่า Cpk จะต่ำกว่าค่า Cp เล็กน้อยซึ่งบ่งชี้ว่ากระบวนการยังมีการเอียงศูนย์ไปทางขีดจำกัดบนบางส่วนเมื่อพิจารณาลักษณะของวัสดุ พบว่าเหล็กเส้นแบนหนา 3 mm มีแนวโน้มเกิดการสั่นสะเทือนและการเบี่ยงตัวระหว่างการป้อนเข้าสู่ตำแหน่งตัดได้ง่ายกว่าวัสดุที่มีความหนามากกว่า เนื่องจากมีความแข็งแรงเชิงโครงสร้างต่ำกว่าส่งผลให้ค่าความแปรปรวนของกระบวนการสูงกว่ากลุ่ม 6 และ 9 mm เล็กน้อย ระบบ

รางลำเลียงและระบบไฮดรอลิกที่พัฒนาขึ้นยังสามารถควบคุมแนวการเคลื่อนที่ของวัสดุและรักษาความสม่ำเสมอของแรงเฉือนได้อย่างต่อเนื่องทำให้กระบวนการยังคงมีเสถียรภาพและสามารถผลิตชิ้นงานได้

6.3.2 ผลการวิเคราะห์สำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 6 mm

การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการสำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 6 mm ดำเนินการเพื่อประเมินเสถียรภาพและประสิทธิภาพของกระบวนการตัดโดยใช้ค่าดัชนี C_p และ C_{pk} เป็นตัวชี้วัดคุณภาพของกระบวนการ ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4



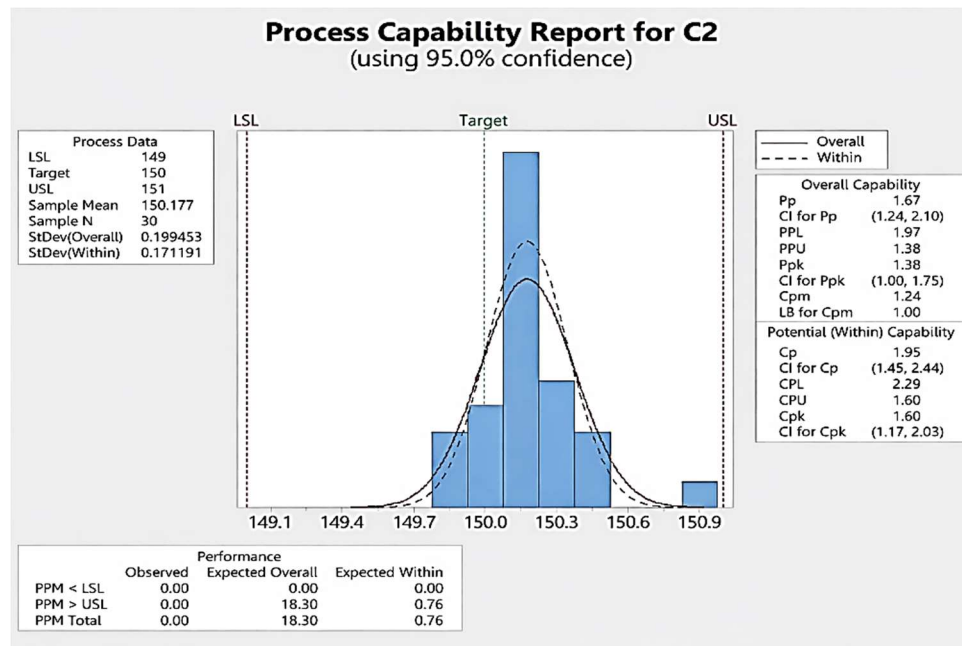
ภาพที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการสำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 6 mm

จากภาพที่ 4 พบว่าค่าเฉลี่ยของกระบวนการ (Sample Mean) เท่ากับ 150.100 mm และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานภายในกระบวนการ (Within StDev) เท่ากับ 0.171 mm ส่งผลให้ค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ C_p และ C_{pk} มีค่าเท่ากับ 1.95 และ 1.60 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมที่ 1.33 [15] ยืนยันว่ากระบวนการมีเสถียรภาพและสามารถควบคุมคุณภาพของชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูล พบว่าค่าเฉลี่ยของกระบวนการอยู่ใกล้ค่าเป้าหมายมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กเส้นแบนหนา 3 mm ส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานลดลงและช่วยเพิ่มเสถียรภาพการกระจายตัวของข้อมูลมีลักษณะสม่ำเสมอมากขึ้นระบบสามารถควบคุมความแปรปรวนของกระบวนการได้ดีขึ้นเหล็กเส้นแบนหนา 6 mm มีความแข็งแรงเชิงโครงสร้างมากกว่าเหล็กเส้นแบนหนา 3 mm จึงช่วยลดการสั่นสะเทือนและการเบี่ยงตัวของชิ้นงานระหว่างการป้อนเข้าสู่ตำแหน่งตัดส่งผลให้ระบบรางลำเลียงสามารถควบคุมแนวการเคลื่อนที่ของวัสดุได้มีเสถียรภาพมากขึ้นขณะเดียวกันระบบไฮดรอลิกสามารถ

ถ่ายทอดแรงเฉือนได้อย่างต่อเนื่องกระบวนการตัดมีความแม่นยำสูงขึ้นและลดโอกาสการเกิดของเสียภายในกระบวนการ

6.3.3 ผลการวิเคราะห์สำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 9 mm

การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการสำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 9 mm ดำเนินการเพื่อประเมินศักยภาพของกระบวนการตัดและความสามารถในการควบคุมคุณภาพของระบบที่พัฒนาขึ้นใช้ค่าดัชนี C_p และ C_{pk} เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของกระบวนการผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการสำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 9 mm

ภาพที่ 5 พบว่าค่าเฉลี่ยของกระบวนการ (Sample Mean) เท่ากับ 150.317 mm และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานภายในกระบวนการ (Within StDev) เท่ากับ 0.101 mm ส่งผลให้ค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ C_p และ C_{pk} มีค่าเท่ากับ 3.30 และ 2.26 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม แสดงให้เห็นว่ากระบวนการมีความแปรปรวนต่ำมากและมีศักยภาพสูงในการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานให้เป็นไปตามข้อกำหนดเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลพบว่าข้อมูลส่วนใหญ่กระจุกตัวอยู่ใกล้ค่าเฉลี่ยและมีการกระจายตัวต่ำมาก สอดคล้องกับค่าดัชนี C_{pk} ที่สูงกว่า 2.00 ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับดีเยี่ยม กระบวนการมีเสถียรภาพสูงและสามารถควบคุมความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่าเฉลี่ยของกระบวนการจะมีแนวโน้มเอียงไปทางขีดจำกัดบนเล็กน้อย เหล็กเส้นแบนหนา 9 mm มีความแข็งแรงเชิงโครงสร้างสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุทุกขนาดที่ใช้ในการทดสอบส่งผลให้การสั่นสะเทือนและการเคลื่อนตัวของชิ้นงานระหว่างกระบวนการตัดลดลงทำให้ระบบรางลำเลียงสามารถควบคุมตำแหน่งของวัสดุได้อย่างแม่นยำมากขึ้นขณะเดียวกันระบบไฮดรอลิกสามารถถ่ายทอดแรงเฉือนได้อย่างมีประสิทธิภาพและสม่ำเสมอ

ส่งผลให้ค่าความแปรปรวนของกระบวนการต่ำที่สุดและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 5 สรุปค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ (C_p , C_{pk})

ความหนาชิ้นงาน (mm)	C_p	C_{pk}	เกณฑ์มาตรฐาน (1.33)	ผลการประเมิน
3	1.85	1.39	ผ่าน	มีความสามารถเพียงพอ
6	1.95	1.60	ผ่าน	มีความสามารถเพียงพอ
9	3.30	2.26	ผ่าน	มีความสามารถดีเยี่ยม

จากตารางที่ 5 สรุปได้ว่ากระบวนการตัดเหล็กเส้นแบนด้วยเครื่องกดไฮดรอลิกร่วมกับระบบรางลำเลียงมีค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการผ่านเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมทุกความหนาโดยความหนา 9 mm ให้ค่าสูงที่สุดเนื่องมาจากความหนาที่มากขึ้นทำให้ชิ้นงานมีแนวโน้มการโก่งตัวหรือการเคลื่อนที่ระหว่างตัดน้อยกว่าส่งผลให้ความแปรปรวนลดลง

7. อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการดำเนินงานในหัวข้อ 7.1-7.4 สามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

7.1 ด้านเวลาในการตัด การติดตั้งระบบรางลำเลียงช่วยลดเวลาในการตัดลงอย่างชัดเจนเฉพาะในเหล็กหนา 9 mm ซึ่งก่อนพัฒนามีเวลาเฉลี่ย 8.6s หลังพัฒนาลดเหลือ 3.8s คิดเป็นประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 55.81% ผลดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการของระบบลำเลียง (Conveyor System Theory) ช่วยลดแรงต้านทานการเคลื่อนที่และลดเวลาในการจัดตำแหน่งชิ้นงานด้วยแรงงานคนที่พบว่าระบบสายพานลำเลียงสามารถลดเวลา [16] ในการเคลื่อนย้ายวัสดุได้

7.2 ด้านความแม่นยำ ระบบรางลำเลียงช่วยให้ตำแหน่งของชิ้นงานมีความสม่ำเสมอส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนของความยาวไม่เกิน 1 mm และความฉากไม่เกิน 1° ซึ่งเป็นไปตามขอบเขตการวิจัยที่กำหนดไว้ผลดังกล่าวเกิดจากการที่ระบบไฮดรอลิกสามารถควบคุมแรงกดได้อย่างคงที่ประกอบกับระบบลำเลียงที่ช่วยควบคุมตำแหน่งชิ้นงานให้ตรงกับแนวตัดรายงานวาระบบตัดด้วยไฮดรอลิกให้ความแม่นยำดี [17] กว่า การตัดด้วยแกส

7.3 ด้านความสามารถของกระบวนการ ค่า C_p และ C_{pk} ที่สูงกว่า 1.33 ในทุกความหนายืนยันว่ากระบวนการหลังพัฒนามีความเสถียรและมีศักยภาพเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลการศึกษาสอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมที่กำหนดว่า $C_{pk} > 1.33$ ถือว่ากระบวนการมีความสามารถเพียงพอ [18] ค่า C_{pk} ที่เพิ่มขึ้นตามความหนาของชิ้นงาน (1.39, 1.60, 2.26) ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการตัดเหล็กที่มีความหนามากกว่ามีแนวโน้มให้ความแม่นยำสูงกว่า เนื่องจากชิ้นงานมีแรงต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างตัดน้อยกว่า

7.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย อย่างไรก็ตามค่า C_{pk} ที่ต่ำกว่า C_p ในทุกความหนา (โดยเฉพาะความหนา 3 mm ที่ค่า $C_{pk} = 1.39$ ซึ่งใกล้เคียงเกณฑ์) แสดงให้เห็นว่ากระบวนการยังมีการเยื้องศูนย์ ซึ่งอาจเกิดจากการตั้งค่าตำแหน่งหยุดชิ้นงานหรือการสึกหรอของอุปกรณ์ ดังนั้น ควรมีการปรับตั้งศูนย์และบำรุงรักษาเครื่องอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้กระบวนการอยู่ในภาวะควบคุมที่ดียิ่งขึ้น

8. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการออกแบบและพัฒนาชุดตัดเหล็กเส้นแบนด้วยเครื่องกดไฮดรอลิกร่วมกับระบบรางลำเลียง ชุดตัดหลังพัฒนาสามารถลดเวลาในการตัดลงได้ 20.83%, 45.31% และ 55.81% สำหรับเหล็กหนา 3, 6 และ 9 mm ตามลำดับ เมื่อเทียบกับก่อนพัฒนาด้านความแม่นยำชิ้นงานมีความยาวเฉลี่ยอยู่ในช่วง 150.1-150.2 mm และความฉากเฉลี่ย $89.9-90.1^\circ$ ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่กำหนดนอกจากนี้ การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการพบว่าค่า C_p/C_{pk} สำหรับเหล็กหนา 3, 6 และ 9 mm เท่ากับ 1.85/1.39, 1.95/1.60 และ 3.30/2.26 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมที่ 1.33 ผลการวิจัยยืนยันว่าระบบรางลำเลียงที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและควบคุมคุณภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ

9. ข้อเสนอแนะ

ควรมีการปรับตั้งและบำรุงรักษาระบบรางลำเลียงรวมถึงชุดตัดอย่างสม่ำเสมอ เพื่อรักษาความแม่นยำและเสถียรภาพของกระบวนการ นอกจากนี้ ในอนาคตอาจพัฒนาระบบป้อนชิ้นงานอัตโนมัติร่วมกับเซนเซอร์และ PLC รวมถึงระบบตรวจสอบขนาดแบบเรียลไทม์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดความคลาดเคลื่อนของกระบวนการ อีกทั้งควรศึกษาการประยุกต์ใช้กับวัสดุประเภทอื่นและประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบที่พัฒนาขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.กิตติพล ขาวงาม ที่ปรึกษาวิจัย คุณจิรวัฒน์ ทุมมาลา คุณรัฐพล สวัสดิ์ และคุณสิวันฐ พลทิพย์ ผู้ริเริ่มแนวคิดต้นแบบระบบตัดเหล็กเส้นแบน และสาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมการเชื่อม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่สนับสนุนทรัพยากรและอำนวยความสะดวกงานวิจัยนี้บรรลุล่วงประสงค์

คำแถลงบทบาทและส่วนร่วมของผู้เขียน

เกียรติศักดิ์ ทาน้อย : เขียนต้นฉบับบทความ ดำเนินการทดลอง เก็บรวบรวมข้อมูล
วิษณุภาส นาคสูงเนิน : ตรวจสอบและบันทึกข้อมูลภาคสนาม วิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น จัดทำตาราง
พีระพงศ์ บัวพา : ออกแบบชิ้นส่วนระบบรางลำเลียงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ช่วยประกอบติดตั้งชุดตัดเหล็กเส้นแบน

กิตติพล ขาวงาม : กำหนดแนวความคิดการวิจัย ออกแบบระเบียบวิธีวิจัย คำนวณวิเคราะห์ข้อมูล (Cp/Cpk) เขียนตรวจสอบและแก้ไขต้นฉบับ กำกับดูแลทิศทางการวิชาการ และบริหารจัดการโครงการวิจัย ผู้เขียนทุกคนได้อ่านและอนุมัติต้นฉบับบทความฉบับสุดท้าย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Benić, J., Brezak, D., Šitum, Ž., Kolar, D., & Lisjak, D. (2023). Detailed experimental comparison of energy efficiency between proportional and direct driven hydraulic system. *Results in Engineering*, 18, 101178. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101178>
- [2] Sanchez-Marquez, R., & Jabaloyes Vivas, J. (2021). Building a C control chart: A novel and practical method for practitioners. *Computers & Industrial Engineering*, 158, 107428. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107428>
- [3] Huang, Z., Xu, Y., Ren, W., Fu, C., Cao, R., Kong, X., & Li, W. (2022). Design of position control method for pump-controlled hydraulic presses via adaptive integral robust control. *Processes*, 10(1), 14. <https://doi.org/10.3390/pr10010014>
- [4] Thummala, C., Sawatdee, R., & Phontip, S. (2019). *Design and construction of a flat steel bar cutting machine applied by a hydraulic press machine*. Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus. (in Thai)
- [5] Li, L., Chen, H., Jin, R., Xu, Y., Liu, Q., Li, G., & Huang, H. (2024). Independent metering-based leveling system with multi-actuator for energy saving: Modeling, control, and application on large-size forming equipment. *Energy Conversion and Management*, 302, 118119. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118119>
- [6] Zhang, S., & Xia, X. (2011). Modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors. *Applied Energy*, 88(9), 3061–3071. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.015>
- [7] Yu, B., Xie, N., Zheng, B., & Chen, D. (2019). Methodology and decentralised control of modularised changeable conveyor logistics system. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(8), 739–749.
- [8] Wang, C.-N., Hsu, H.-P., & Tran, V.-V. (2017). An improved dispatching method (a-HPDB) for automated material handling system with active rolling belt for 450 mm wafer fabrication. *Applied Sciences*, 7(8), 780. <https://doi.org/10.3390/app7080780>
- [9] Borucka, A., Kozłowski, E., Antosz, K., & Parczewski, R. (2023). A new approach to production process capability assessment for non-normal data. *Applied Sciences*, 13(11), 6721. <https://doi.org/10.3390/app13116721>

- [10] Sandin, O., Rodríguez, J. M., Larour, P., Parareda, S., Frómeta, D., Hammarberg, S., ... Casellas, D. (2024). A particle finite element method approach to model shear cutting of high-strength steel sheets. *Computational Particle Mechanics*, 11(5), 1863–1886. <https://doi.org/10.1007/s40571-023-00708-5>
- [11] Liu, K.-F., Jin, T., Shang, Z.-T., & Wang, H. (2024). Neural adaptive dynamic surface control of an electro-hydraulic loading system for rail grinders. *Nonlinear Dynamics*, 112(16), 14191–14213. <https://doi.org/10.1007/s11071-024-09808-0>
- [12] Ruane, P., Walsh, P., & Cosgrove, J. (2022). Development of a digital model and metamodel to improve the performance of an automated manufacturing line. *Journal of Manufacturing Systems*, 65, 538–549. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.10.011>
- [13] de-Felipe, D., & Benedito, E. (2017). A review of univariate and multivariate process capability indices. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(5), 1687–1705. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0273-6>
- [14] Montgomery, D. C. (2020). *Introduction to statistical quality control*. John Wiley & Sons.
- [15] Sanchez-Marquez, R., & Jabaloyes Vivas, J. (2021). Building a Cpk control chart: A novel and practical method for practitioners. *Computers & Industrial Engineering*, 158, 107428. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107428>
- [16] Dulina, L., Zuzik, J., Furmannova, B., & Kukla, S. (2024). Improving material flows in an industrial enterprise: A comprehensive case study analysis. *Machines*, 12(5), 308. <https://doi.org/10.3390/machines12050308>
- [17] Hou, T., Kou, Z., Wu, J., Xu, P., Zhang, B., & Peng, Y. (2023). Positioning control strategy of hydraulic support pushing system in fully mechanized coal face. *Electronics*, 12(17), 3628. <https://doi.org/10.3390/electronics12173628>
- [18] Kwilinski, A., & Kardas, M. (2023). Enhancing process stability and quality management: A comprehensive analysis of process capability indices. *Virtual Economics*, 6(4), 73–92. [https://doi.org/10.34021/ve.2023.06.04\(5\)](https://doi.org/10.34021/ve.2023.06.04(5))