

การเพิ่มเสถียรภาพการพิมพ์คอนกรีต 3 มิติด้วยการควบคุมตำแหน่งหัวฉีดแบบเรียลไทม์ Enhancing Stability of 3D Concrete Printing through Real-Time Nozzle Position Control

เกียรติศักดิ์ สกุลพันธ์^{1*} และ ธนภัทร พรหมวัฒน์²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม Kiattisak.sa@spu.ac.th*

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม Thanapat.pr@spu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการพัฒนาระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวฉีดในเครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ โดยใช้ PLC Mitsubishi FX3U ร่วมกับ Servo Motor รุ่น HG-KR13 และ Servo Drive รุ่น MR-J4-10A ที่เชื่อมต่อผ่านโปรโตคอล Modbus RTU ซึ่งรับคำสั่งจากโปรแกรมภาษา Python บนคอมพิวเตอร์ ระบบควบคุมนี้ใช้หลักการแบบวงปิด (Closed-Loop Control) โดยอาศัยสัญญาณ Feedback จาก Incremental Encoder เพื่อนำมาคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่ง และประเมินเสถียรภาพของระบบผ่านตัวชี้วัดทางสถิติคือ Mean Absolute Error (MAE) และ Root Mean Square Error (RMSE) ผลการทดลองพบว่าแนวแกน X มีค่า MAE และ RMSE เท่ากับ 9.694 มม. ส่วนแนวแกน Y มีค่า MAE และ RMSE เท่ากับ 4.842 มม. โดยค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยในทั้งสองแกนไม่เกิน 5% ซึ่งอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับค่าความแม่นยำเชิงกลของ Ball Screw รุ่น C-TBSB2005-1000 ที่มี Lead Accuracy ± 0.167 มม. ต่อระยะ 1000 มม. ทั้งนี้ระบบควบคุมสามารถรักษาความเสถียรในทิศทางขาไปและขากลับได้ดี โดยเฉพาะในแนวแกน X แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบควบคุมที่พัฒนาแล้ว ข้อเสนอแนะในอนาคตคือการนำค่าชดเชยพิกัด (Correction Factor) มาใช้เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนสะสม และการประยุกต์ใช้ Machine Learning เพื่อเพิ่มความสามารถในการปรับตัวของระบบในสภาพแวดล้อมการทำงานจริง

คำสำคัญ: การควบคุมการเคลื่อนที่, เครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ, PLC, Servo Motor, Modbus RTU

Abstract

This paper aims to present develop a nozzle position control system for a 3D concrete printer using a Mitsubishi FX3U PLC in conjunction with an HG-KR13 servo motor and an MR-J4-10A servo drive, communicating via the Modbus RTU protocol and receiving commands from a Python-based application on a computer. The system employs a closed-loop control approach using feedback signals from an incremental encoder to calculate position error and evaluate system stability through engineering statistical indicators, namely Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Square Error (RMSE). Experimental results show that the MAE and RMSE in the X-axis are 9.694 mm, while those in the Y-axis are 4.842 mm. The relative position error in both axes remains below 5%, which is within the acceptable range when compared to the mechanical accuracy of the C-TBSB2005-1000 ball screw, which has a lead accuracy of ± 0.167

mm over a 1000 mm travel distance. The system demonstrated consistent performance in both forward and return directions, particularly in the X-axis, indicating the effectiveness of the developed control system. Future improvements include the implementation of correction factors to reduce cumulative positioning error and the integration of machine learning techniques to enhance the system's adaptability in real-world operational environments.

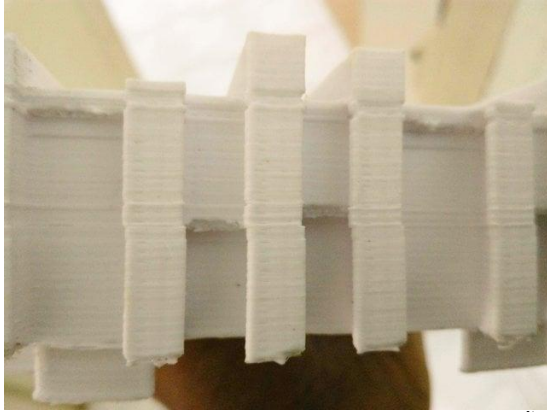
Keywords: Motion Control, 3D Concrete Printer, PLC, Servo Motor, Modbus RTU

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ (3D Concrete Printing) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เนื่องจากสามารถลดระยะเวลาการก่อสร้าง ลดต้นทุนแรงงาน และเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตโครงสร้างที่มีรูปแบบซับซ้อนได้โดยไม่ต้องพึ่งพาแบบหล่อคอนกรีตแบบดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม กระบวนการพิมพ์คอนกรีตดังกล่าวยังคงเผชิญกับข้อจำกัดด้านความแม่นยำของการควบคุมตำแหน่งหัวฉีด ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความแข็งแรง ความสม่ำเสมอ และคุณภาพของชิ้นงานคอนกรีตที่ได้

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมตำแหน่งหัวฉีดของเครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ โดยใช้ Programmable Logic Controller (PLC) รุ่น Mitsubishi FX3U เป็นตัวกลางรับคำสั่งที่ส่งมาจากซอฟต์แวร์ภาษา Python ผ่านโปรโตคอล Modbus RTU จากคอมพิวเตอร์ ผ่านพอร์ต RS-485 เพื่อควบคุม Servo Drive รุ่น MR-J4-10A ซึ่งควบคุมการเคลื่อนที่ของ Servo Motor รุ่น HG-KR13 ที่มี Encoder แบบ Incremental ในตัว ระบบควบคุมนี้อาศัยแนวคิดแบบวงปิด (Closed-Loop Control) ซึ่งการประมวลผล Feedback จะเกิดขึ้นภายใน Servo Drive เพื่อให้สามารถปรับตำแหน่งหัวฉีดได้แบบเรียลไทม์ตามคำสั่งที่ได้รับ

ระบบควบคุมนี้ถูกออกแบบให้รองรับการส่งพิกัดตำแหน่งจากคำสั่ง G-code ไปยังรีจิสเตอร์ของ PLC และแปลงเป็นสัญญาณ Pulse/Direction เพื่อส่งงาน Servo Motor ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด พร้อมจัดการลำดับการพิมพ์อัตโนมัติด้วยการตรวจสอบค่า Counter ภายใน PLC ข้อมูล Feedback ที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ความแม่นยำและเสถียรภาพของระบบผ่านค่าทางสถิติเชิงวิศวกรรม ได้แก่ Mean Absolute Error (MAE) และ Root Mean Square Error (RMSE) ซึ่งผลลัพธ์สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงระบบให้ตอบสนองต่อการใช้งานจริงในอุตสาหกรรมการพิมพ์คอนกรีตสามมิติได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 1 แสดงถึงการเคลื่อนที่ของหัวพิมพ์ที่ไม่แม่นยำ ทำให้ชิ้นของวัสดุที่พิมพ์ออกมาไม่ตรงกัน ส่งผลให้โครงสร้างไม่แข็งแรงและมีความเสี่ยงต่อการพังทลาย [9]

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษารวบรวมพบว่า ความเสถียรของกระบวนการพิมพ์คอนกรีต 3 มิติได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การควบคุมตำแหน่งของหัวฉีด ซึ่งสัมพันธ์กับพารามิเตอร์การพิมพ์ ได้แก่ ขนาดหัวฉีด ความเร็ว และอัตราการไหลของวัสดุ Ying Wei et al. (2024) ได้เสนอพารามิเตอร์ไร้มิติ (ϕ) สำหรับใช้ประเมินการเสียรูปของวัสดุจากปัญหา meandering และ tearing เมื่อควบคุมตำแหน่งหัวฉีดไม่แม่นยำ [1] ในขณะเดียวกัน Zhao et al. (2025) เน้นย้ำถึงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นระหว่างการพิมพ์ เช่น voids, pits และ breakpoints ซึ่งสัมพันธ์กับพฤติกรรมของการไหลของวัสดุและการเคลื่อนที่ของหัวฉีด โดยแนะนำว่าควรมีการควบคุมความเร็วของหัวฉีดและอัตราการฉีดวัสดุแบบเรียลไทม์เพื่อหลีกเลี่ยงข้อบกพร่องเชิงโครงสร้าง [2]

Chung et al. (2021) ชี้ให้เห็นว่าการพัฒนาระบบควบคุมสำหรับเครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติควรอยู่ภายใต้กรอบของ มาตรฐานทางเทคนิคที่ชัดเจน ซึ่งรวมถึงการกำหนดสเปกของหัวฉีด ระบบเคลื่อนที่ และแนวทางการประเมินประสิทธิภาพ [3] ในด้านการควบคุมคุณภาพ Azamfirei et al. (2023) ได้เสนอการประยุกต์ใช้ระบบอัตโนมัติและการตรวจสอบแบบ in-line inspection ซึ่งช่วยลดข้อเสียและเพิ่มเสถียรภาพของการผลิต โดยมีความเชื่อมโยงกับแนวคิดของ Industry 4.0 [4]

Kruger et al. (2020) ได้นำเสนอแบบจำลองการออกแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์พิมพ์ที่เหมาะสม เช่น ความเร็วหัวพิมพ์และความสูงเลเยอร์ โดยอิงจาก คุณสมบัติรีโอโลยี ของวัสดุ เพื่อป้องกันการยุบตัวจากน้ำหนักตนเองของเลเยอร์คอนกรีต [5] Khan et al. (2021) ได้ทำการวิเคราะห์ศักยภาพของเทคโนโลยี 3DCP โดยเน้นความสำคัญของการควบคุมพารามิเตอร์การผลิตเพื่อให้เกิดความยั่งยืนทั้งในด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และพลังงาน [6]

Rehman et al. (2024) พัฒนาอุปกรณ์วัดคุณสมบัติของคอนกรีตแบบอัตโนมัติที่ฝังในเครื่องพิมพ์ ซึ่งสามารถประเมินความแข็งแรง ความแข็งแรงอัด และค่าการยุบตัวแบบเรียลไทม์ ทั้งยังช่วยให้ระบบควบคุมสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของวัสดุและสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ [7] ขณะที่ Takva et al. (2024) พบว่ารูปทรงเรขาคณิตของอาคารมีผลต่อประสิทธิภาพการพิมพ์ โดยเฉพาะการใช้รูปทรงสมมาตร เช่น วงกลม ช่วยลดเวลาและต้นทุนการผลิต โดยการ

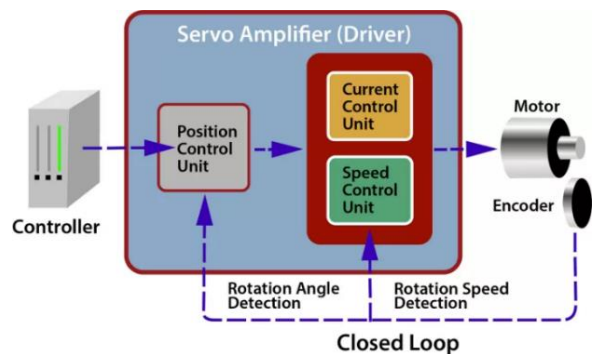
ควบคุมตำแหน่งหัวฉีดอย่างแม่นยำเป็นเงื่อนไขสำคัญที่เชื่อมโยงการออกแบบกับสมรรถนะการก่อสร้างจริง [8]

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การควบคุมตำแหน่งหัวฉีดในระบบพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ จำเป็นต้องอาศัยองค์ความรู้ทางวิศวกรรมในหลายด้าน ได้แก่ ระบบควบคุมอัตโนมัติ การสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ การขับเคลื่อนด้วยเซอร์โวมอเตอร์ และความแม่นยำเชิงกลของระบบนำทาง โดยในโครงงานนี้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องหลัก 4 ด้าน ดังนี้

3.1 ระบบควบคุมแบบวงปิด (Closed-Loop Control)

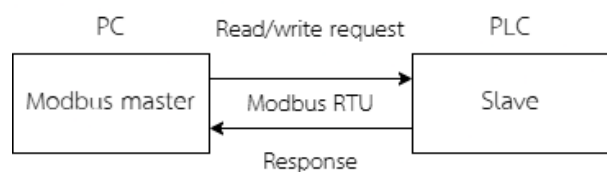
ระบบควบคุมแบบวงปิดเป็นระบบที่มีการนำค่าผลลัพธ์จริงของการควบคุม (Output) ส่งกลับมาเปรียบเทียบกับค่าที่ต้องการ (Setpoint) เพื่อให้ตัวควบคุมสามารถปรับสัญญาณควบคุมให้เหมาะสมโดยอัตโนมัติ ซึ่งช่วยลดความคลาดเคลื่อน (Error) ได้อย่างต่อเนื่อง ในระบบนี้ สัญญาณ Feedback จาก Encoder ภายใน Servo Motor จะถูกส่งกลับไปยัง Servo Drive เพื่อประมวลผลและปรับตำแหน่งให้สอดคล้องกับตำแหน่งเป้าหมายที่รับมาจาก PLC ซึ่งช่วยให้การควบคุมตำแหน่งเป็นไปอย่างต่อเนื่องและแม่นยำ



รูปที่ 2 Closed-Loop Servo Control System Diagram [10]

3.2 การสื่อสารแบบ Modbus RTU

Modbus RTU (Remote Terminal Unit) เป็นโพรโทคอลการสื่อสารแบบอนุกรมที่นิยมใช้งานในระบบอัตโนมัติและอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความเรียบง่าย เชื่อถือได้ และสามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ได้หลากหลายภายใต้โพรโทคอลนี้ อุปกรณ์หนึ่งจะทำหน้าที่เป็น Master (เช่น คอมพิวเตอร์) และอีกอุปกรณ์เป็น Slave (เช่น PLC) กรณีศึกษาที่ขอพบตัวภาษา Python บนคอมพิวเตอร์จะส่งค่าพิกัดจากคำสั่ง G-code ไปยัง PLC Mitsubishi FX3U ผ่าน Modbus RTU ทางพอร์ต RS-485 โดย PLC จะรับข้อมูลไปประมวลผล และส่งสัญญาณควบคุมตำแหน่งไปยัง Servo Drive เพื่อสั่งให้หัวฉีดเคลื่อนที่ตามตำแหน่งที่กำหนด



รูปที่ 3 โครงข่ายสื่อสาร Modbus RTU

3.3 การทำงานของ Servo Motor และ Incremental Encoder

Servo Motor เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนที่สามารถควบคุมตำแหน่ง ความเร็ว และแรงบิดได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะเมื่อนำมาใช้ร่วมกับ Encoder ซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับการหมุนของมอเตอร์และแปลงเป็น สัญญาณพัลส์สำหรับ Feedback อย่างไรก็ตาม ในระบบใช้ Servo Motor รุ่น HG-KR13 พร้อม Encoder แบบ Incremental ซึ่งจะส่งสัญญาณพัลส์ กลับเข้าสู่ Servo Drive เพื่อใช้ในการประเมินตำแหน่งจริงของหัวฉีดและ ควบคุมให้ตรงตามคำสั่งอย่างแม่นยำ การใช้ Encoder ทำให้สามารถวัด และประเมินค่าความคลาดเคลื่อนได้แบบเรียลไทม์ ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญ ของระบบควบคุมแบบวงปิด



รูปที่ 4 Servo Motor รุ่น HG-KR13 [11]

3.4 ความแม่นยำเชิงกลของระบบขับเคลื่อนด้วย Ball Screw

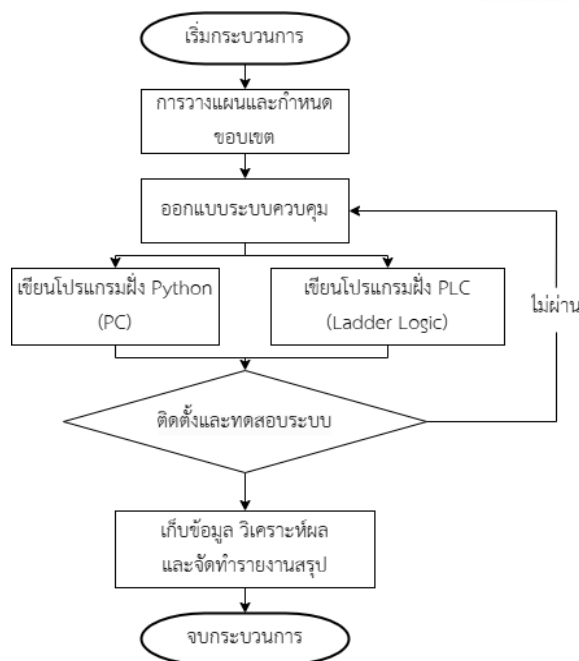
ในการเคลื่อนที่เชิงเส้นของหัวฉีด ระบบนี้ใช้ Ball Screw รุ่น C-TBSB2005-1000 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. ความยาว 1000 มม. และมี ระยะลีด (Lead) เท่ากับ 5 มม. ซึ่งหมายถึงระยะที่ Ball Nut เคลื่อนที่ได้ต่อการหมุนหนึ่งรอบของ Shaft โดย Ball Screw รุ่นนี้เป็น แบบเกลียวเดี่ยว (Single Start) จึงทำให้ค่า Lead มีค่าเท่ากับ Pitch ในขณะที่ Ball Screw มีระดับความแม่นยำตามมาตรฐาน เกรด C7 โดย ผู้ผลิตระบุค่าความคลาดเคลื่อนเชิงเส้น (Lead Accuracy) ไม่เกิน ± 0.050 มม. ต่อระยะ 300 มม. หรือประมาณ ± 0.167 มม. สำหรับความยาว 1000 มม. โดยที่ค่าตัวแปรสามารถใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานในการเปรียบเทียบกับ ค่าความคลาดเคลื่อนที่วัดได้จากการทดลองจริง



รูปที่ 5 Ball Screw รุ่น C-TBSB2005-1000 ที่ใช้ในระบบขับเคลื่อนเชิงเส้นของหัวฉีด [12]

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

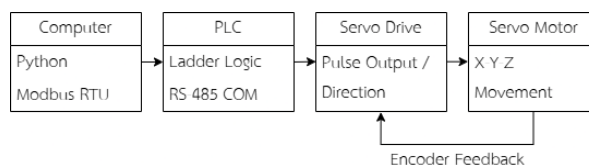
โครงการนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองที่มุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการควบคุม ตำแหน่งหัวฉีดสำหรับเครื่องพ่นพลาสมา 3 มิติ โดยเน้นการประเมิน ความแม่นยำของตำแหน่งและความเสถียรในการตอบสนองต่อคำสั่งการ เคลื่อนที่ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้



รูปที่ 6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

4.1 การออกแบบระบบควบคุม

เริ่มต้นจากการออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้ คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการส่งคำสั่งควบคุมหัวฉีดผ่านโปรแกรม ภาษา Python โดยใช้ไลบรารี Modbus ในการส่งข้อมูลผ่านพอร์ต RS-485 ด้วยโปรโตคอล Modbus RTU ไปยัง PLC Mitsubishi FX3U ซึ่งจะ ทำหน้าที่รับค่าพิกัดตำแหน่งและส่งสัญญาณ Pulse/Direction ไปยัง Servo Drive รุ่น MR-J4-10A เพื่อควบคุม Servo Motor รุ่น HG-KR13 ที่ ติดตั้ง Encoder แบบ Incremental ภายในตัว ระบบนี้มีลักษณะการ ควบคุมแบบวงปิด (Closed-Loop Control) โดยใช้ค่าพัลส์ Feedback จาก Encoder เพื่อประเมินและปรับตำแหน่งให้แม่นยำตามคำสั่งที่รับมา



รูปที่ 7 โครงสร้างระบบควบคุม

4.2 การเขียนโปรแกรมควบคุม

ฝั่งคอมพิวเตอร์จะพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา Python สำหรับอ่าน และแปลงคำสั่ง G-code ให้เป็นค่าพิกัดในหน่วยมิลลิเมตร ซึ่งจะถูกส่งเข้า Register ของ PLC เช่น D10-D40 แทนตำแหน่งในแกน X, Y และ ความเร็ว (Feed rate) ส่วนฝั่ง PLC เขียนโปรแกรมด้วย Ladder Diagram โดยรับค่าจาก Register และส่งงาน Pulse Output ไปยัง Servo Drive เพื่อควบคุมทิศทางและจำนวนพัลส์ตามค่าที่กำหนด รวมถึงตรวจสอบ สถานะการเคลื่อนที่จาก Counter ภายใน PLC เพื่อจัดลำดับคำสั่งอย่างมี ประสิทธิภาพ

4.3 การทดสอบระบบและเก็บข้อมูล

การทดลองกำหนดตำแหน่งเป้าหมายในแนวแกน x และ y เป็น 200 มม. และ 100 มม. ตามลำดับ พร้อมกำหนดความเร็วหัวฉีดที่ 25.00 –

75.00 มม./วินาที จากนั้นตรวจสอบค่าพัลส์สะสมที่ได้รับจาก Encoder ซึ่งถูกประมวลผลใน Servo Drive และแปลงกลับเป็นระยะจริงเพื่อนำไปคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน (Position Error) และค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เป็นเปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติเชิงวิศวกรรม ได้แก่ Mean Absolute Error (MAE) และ Root Mean Square Error (RMSE) เพื่อตรวจสอบความแม่นยำและเสถียรภาพของระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้น

5. ผลการดำเนินงานวิจัย

การทดสอบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวฉีดในเครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติได้ดำเนินการในแนวแกน X และ Y โดยกำหนดตำแหน่งเป้าหมายที่ 200 มม. และ 100 มม. ตามลำดับ พร้อมทั้งปรับความเร็วหัวฉีดในช่วง 25.00 ถึง 75.00 มม./วินาที เพื่อประเมินความแม่นยำและเสถียรภาพของระบบในสภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน X

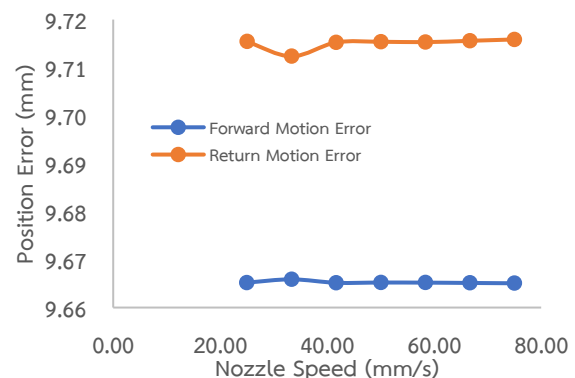
Actual Position (mm)	Nozzle Speed (mm/s)	Target Position (mm)	Position Error (mm)	Relative Position Error (%)
209.67	25.00	200	9.67	4.83
209.72	25.00	200	9.72	4.86
209.67	33.33	200	9.67	4.83
209.71	33.33	200	9.71	4.86
209.67	41.67	200	9.67	4.83
209.72	41.67	200	9.72	4.86
209.67	50.00	200	9.67	4.83
209.72	50.00	200	9.72	4.86
209.67	58.33	200	9.67	4.83
209.72	58.33	200	9.72	4.86
209.67	66.67	200	9.67	4.83
209.72	66.67	200	9.72	4.86
209.67	75.00	200	9.67	4.83
209.72	75.00	200	9.72	4.86

ข้อมูลจาก Encoder ภายใน Servo Motor ถูกนำมาคำนวณหาตำแหน่งจริงของหัวฉีดในแต่ละรอบการทดลอง แล้วเปรียบเทียบกับตำแหน่งเป้าหมายเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่ง (Position Error) และค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ (Relative Position Error)

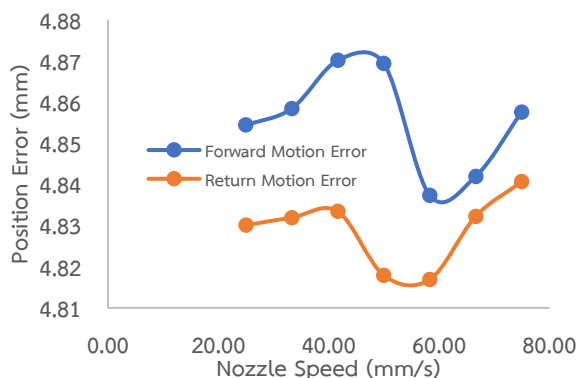
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน Y

Actual Position (mm)	Nozzle Speed (mm/s)	Target Position (mm)	Position Error (mm)	Relative Position Error (%)
104.85	25.00	100	4.85	4.85
104.83	25.00	100	4.83	4.83
104.86	33.33	100	4.86	4.86
104.83	33.33	100	4.83	4.83
104.87	41.67	100	4.87	4.87
104.83	41.67	100	4.83	4.83
104.87	50.00	100	4.87	4.87
104.82	50.00	100	4.82	4.82
104.84	58.33	100	4.84	4.84
104.82	58.33	100	4.82	4.82
104.84	66.67	100	4.84	4.84
104.83	66.67	100	4.83	4.83
104.86	75.00	100	4.86	4.86
104.84	75.00	100	4.84	4.84

ค่าทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ Mean Absolute Error (MAE) และ Root Mean Square Error (RMSE) โดยในแนวแกน X พบว่า MAE เท่ากับ 9.694 มม. และ RMSE เท่ากับ 9.694 มม. ส่วนในแนวแกน Y พบว่า MAE เท่ากับ 4.842 มม. และ RMSE เท่ากับ 4.842 มม. โดยค่า Relative Error เฉลี่ยในทั้งสองแนวมีค่าไม่เกิน 5% ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำที่ยอมรับได้ในงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน X กับความเร็วหัวฉีด (แสดงเส้นขาไปและขากลับในแกน X)



รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน Y กับความเร็วหัวฉีด (แสดงเส้นขาไปและขากลับในแกน Y)

เพื่อให้เห็นแนวโน้มของค่าความคลาดเคลื่อนชัดเจนยิ่งขึ้น ได้จัดทำกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับความเร็วหัวฉีดในแต่ละแนวแกน ทั้งในทิศทางขาไปและขากลับ จากกราฟพบว่าในแนวแกน X ค่าความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มคงที่ และใกล้เคียงกันระหว่างทิศทางขาไปและขากลับ แสดงถึงเสถียรภาพในการตอบสนองของระบบ ขณะที่ในแนวแกน Y มีความผันผวนเล็กน้อย โดยบางช่วงความเร็ว ทิศทางขากลับมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าขาไป สะท้อนถึงการตอบสนองเชิงกลที่อาจได้รับผลกระทบจากแรงเฉื่อยและสมดุลของระบบ

เมื่อเปรียบเทียบกับความแม่นยำเชิงกลของ Ball Screw รุ่น C-TBSB2005-1000 ซึ่งมีค่า Lead Accuracy ไม่เกิน ± 0.050 มม. ต่อ 300 มม. หรือประมาณ ± 0.167 มม. ต่อระยะ 1000 มม. จะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่วัดได้จากกราฟทดลองยังอยู่ในขอบเขตที่ Ball Screw รองรับได้ จึงยืนยันได้ว่าระบบควบคุมมีความแม่นยำและเสถียรภาพเหมาะสมต่อการใช้งานในระบบพิมพ์คอนกรีต 3 มิติในระดับอุตสาหกรรม

6. สรุปผลการดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบควบคุมตำแหน่งหัวฉีดสำหรับเครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ โดยใช้ PLC Mitsubishi FX3U ร่วมกับ Servo Drive MR-J4-10A และ Servo Motor รุ่น HG-KR13 ที่มี Encoder ภายใน เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน X และ Y อย่างแม่นยำ โดยระบบทำงานแบบวงปิด (Closed-Loop Control) และรับคำสั่งจากซอฟต์แวร์ภาษา Python ผ่านโปรโตคอล Modbus RTU ที่เชื่อมต่อผ่านพอร์ต RS-485 การทดลองกำหนดตำแหน่งเป้าหมายที่ 200 มม. และ 100 มม. สำหรับแกน X และ Y ตามลำดับ และทดสอบในช่วงความเร็ว 25.00–75.00 มม./วินาที พบว่าในแนวแกน X มีค่า Mean Absolute Error (MAE) เท่ากับ 9.694 มม. และ Root Mean Square Error (RMSE) เท่ากับ 9.694 มม. ส่วนแนวแกน Y มีค่า MAE เท่ากับ 4.842 มม. และ RMSE เท่ากับ 4.842 มม. โดยมีค่า Relative Position Error เฉลี่ยในทั้งสองแนวไม่เกิน 5% ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในระดับอุตสาหกรรม

เมื่อเปรียบเทียบกับ Ball Screw รุ่น C-TBSB2005-1000 ที่ใช้ในระบบ ซึ่งมีระยะลีด (Lead) เท่ากับ 5 มม. และความแม่นยำระดับ C7 โดยมี Lead Accuracy ± 0.050 มม. ต่อ 300 มม. หรือประมาณ ± 0.167 มม. ต่อ 1000 มม. จะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งที่เกิดขึ้นจากการทดลองยังอยู่ภายในขอบเขตความแม่นยำทางกลที่อุปกรณ์สามารถรองรับได้ จึงสามารถยืนยันได้ว่าระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้

สอดคล้องกับขีดจำกัดของกลไกและมีความเสถียรในการควบคุมตำแหน่งหัวฉีด

เพื่อเพิ่มความแม่นยำของระบบในระยะยาว แนะนำให้ใช้เทคนิคการชดเชยค่าพิกัดคำสั่ง (Correction Factor) ซึ่งคำนวณจากระยะเป้าหมายเทียบกับระยะจริง เช่น ในแนวแกน X ที่เคลื่อนที่เฉลี่ยได้ 209.694 มม. แทนระยะเป้าหมาย 200 มม. จะได้ Correction Factor ประมาณ 0.9538 เพื่อนำไปคูณปรับในคำสั่ง G-code ให้เคลื่อนที่ได้ตรงยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ยังสามารถพัฒนาระบบเพิ่มเติมโดยใช้เทคนิค Machine Learning เพื่อให้ระบบมีความสามารถในการปรับตัวอัตโนมัติตามสภาพการทำงานที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะยกระดับความแม่นยำและเสถียรภาพของระบบให้เหมาะสมต่อการใช้งานในระดับอุตสาหกรรมอย่างแท้จริง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ying Wei, S. Han, Z. Chen, et al. (2024). Numerical simulation of 3D concrete printing derived from printer head and printing process. *Journal of Building Engineering*, 88, 109241.
- [2] Zhao, H., Sun, J., Wang, X., et al. (2025). Real-time and high-accuracy defect monitoring for 3D concrete printing using transformer networks. *Automation in Construction*, 170, 105925.
- [3] Chung, J., Lee, G., & Kim, J.-H. (2021). *Framework for technical specifications of 3D concrete printers*. *Automation in Construction*, 127, 103732.
- [4] Azamfirei, V., Psarommatas, F., & Lagrosen, Y. (2023). *Application of automation for in-line quality inspection, a zero-defect manufacturing approach*. *Journal of Manufacturing Systems*, 67, 1–22.
- [5] Kruger, J., Cho, S., Zeranka, S., et al. (2020). *3D concrete printer parameter optimisation for high rate digital construction avoiding plastic collapse*. *Composites Part B: Engineering*, 183, 107660.
- [6] Khan, S. A., Koç, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2021). *Sustainability assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures*. *Journal of Cleaner Production*, 303, 127027.
- [7] Rehman, A. U., Kim, I.-G., & Kim, J.-H. (2024). *Development of an automated and inline sensor-printer integrated instrument for in-situ assessment of structural build-up and quality of concrete*. *Developments in the Built Environment*, 17, 100344.
- [8] Takva, C., Top, S. M., Gökgöz, B. I., et al. (2024). *Applicability of 3D concrete printing technology in building construction with different architectural design decisions in housing*. *Journal of Building Engineering*, 98, 111257.
- [9] Ultimaker Community of 3D Printing Experts, URL: <https://community.ultimaker.com/topic/14407-layer-misalignment/>, accessed on 24/02/2025.
- [10] Quantum devices, Servo motor encoders, URL:

<https://www.quantumdev.com/optical-encoder-applications/servo-motors/> , accessed on 24/02/2025.

[11] Premier Equipment Solutions, URL: <https://premierequipsolutions.com/protection-controls-ss-100-a-flame-pak-sd14856>, accessed on 24/02/2025

[12] Misumi Thailand ,URL:<https://th.misumi-ec.com/th/vona2/detail/110310436049/?HissuCode=C-TBSB2005-1000&PNSearch=C-TBSB2005-1000&KWSearch=C-TBSB20051000&searchFlow=results2type&list=PageSearchResult>, accessed on 24/02/2025.



ธนภัทร พรหมวัฒนภักดี ได้สำเร็จการศึกษา
ปริญญาโท: วิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัย
เชียงใหม่ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีปทุม



เกียรติศักดิ์ สุกตพันธุ์ ได้สำเร็จการศึกษา
ปริญญาเอก: วิศวกรรมอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
การผลิต, สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ปัจจุบัน
ดำรงตำแหน่งหัวหน้าสาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม