วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ปีที่ 4 ฉบับที่ 4 กรกฎาคม – สิงหาคม 2569
Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University, Vol. 4 No. 4 July – August 2026

บทความวิจัย (Research Article)

การออกแบบและพัฒนาต้นแบบถุงมือหุ่นยนต์เพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพมือด้วยระบบควบคุมระยะไกล

ธีรถวัลย์ ปานกลาง[1], รัตนสุดา สุภดนัยสร[2,*], สุทิวัฒน์ ศรีษะแก้ว[1] กฤษฎา วารินทร์[2], สุนิศา จิตสุนทรชัยกุล[2] และ สุรินทร์ ผลงาม[3]

[1] สาขาวิชาคอมพิวเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
[2] สาขาวิชาเทคโนโลยีสุขภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
[3] สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและวิทยาการข้อมูล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: rattanasuda.su@bsru.ac.th โทรศัพท์: 087-1026957
(รับบทความ: 6 กุมภาพันธ์ 2569; แก้ไขบทความ: 27 มิถุนายน 2569; ตอบรับบทความ: 1 กรกฎาคม 2569)

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ พัฒนา และประเมินประสิทธิภาพเชิงวิศวกรรมของต้นแบบถุงมือหุ่นยนต์สำหรับการฟื้นฟูสมรรถภาพมือ ต้นแบบประกอบด้วยถุงมือหุ่นยนต์ ระบบขับเคลื่อนด้วยแรงดันลมร่วมกับการควบคุมการเปิด–ปิดวาล์วลมด้วยเซอร์โวมอเตอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 และระบบควบคุมระยะไกลผ่านแพลตฟอร์ม Blynk โดยสามารถควบคุมการกำ–แบนิ้วมือได้ทั้งแบบรวมและแบบแยกนิ้วอิสระ การทดสอบประสิทธิภาพของระบบดำเนินการในระดับต้นแบบเชิงวิศวกรรม โดยประเมินการอ่านค่าจากเซนเซอร์วัดความโค้งงอ การตอบสนองของระบบควบคุม และความเสถียรของการสื่อสารไร้สาย ผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถตรวจจับและถ่ายทอดข้อมูลการเคลื่อนไหวของนิ้วมือได้อย่างถูกต้อง โดยมีเวลาในการตอบสนองเฉลี่ยประมาณ 59 มิลลิวินาที และระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ นอกจากนี้ ได้มีการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน จำนวน 30 คน จากการคัดเลือกแบบเจาะจง ซึ่งเป็นการประเมินในกลุ่มผู้ใช้งานทั่วไป โดยผลการประเมินพบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 4.42) ครอบคลุมด้านความสะดวกในการใช้งาน ความแม่นยำ ความปลอดภัย และความเสถียรของระบบ อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้เป็นการทดสอบในระดับต้นแบบเชิงวิศวกรรม และยังไม่มีการประเมินประสิทธิผลทางคลินิกกับผู้ป่วยจริงผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าต้นแบบหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ช่วยฟื้นฟูสมรรถภาพมือ และสามารถพัฒนาต่อยอดสู่การใช้งานด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมทางการแพทย์ในอนาคต

คำสำคัญ: หุ่นยนต์ฟื้นฟู ถุงมือหุ่นยนต์ การฟื้นฟูสมรรถภาพมือ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

การอ้างอิงบทความ: ธีรถวัลย์ ปานกลาง, รัตนสุดา สุภดนัยสร, สุทิวัฒน์ ศรีษะแก้ว กฤษฎา วารินทร์, สุนิศา จิตสุนทรชัยกุล และ สุรินทร์ ผลงาม, "การออกแบบและพัฒนาต้นแบบถุงมือหุ่นยนต์เพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพมือด้วยระบบควบคุมระยะไกล, "*วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 4, หน้า 78-94, 2569.

วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ปีที่ 4 ฉบับที่ 4 กรกฎาคม – สิงหาคม 2569
Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University, Vol. 4 No. 4 July – August 2026

บทความวิจัย (Research Article)

Design and Development of a Robotic Glove Prototype for Hand Rehabilitation Using a Remote Control System

Theerathawan Panklang[1], Rattanasuda Supadanaison[2,*], Suthiwat Srisakaew[1], Kitsada Warin[2], Sunisa Jitsoonthonchaiyakul[2] and Surin Pholngam[3]

[1] Department of Computer Electronics, Faculty of Science and Technology Bansomdejchaopraya Rajabhat University
[2] Department of Health Technology, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University
[3] Department of Information Technology and Data Science of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

*Corresponding Author: rattanasuda.su@bsru.ac.th, Tel: 087-1026957
(Received: February 6, 2026; Revised: June 27, 2026; Accepted: July 1, 2026)

Abstract

This research aimed to design, develop, and evaluate the engineering performance of a robotic glove prototype for hand rehabilitation. The prototype consisted of a robotic glove, a pneumatic actuation system integrated with servo motor-controlled pneumatic valves, an ESP8266 microcontroller, and a remote control system via the Blynk platform. The system was capable of controlling hand grasping and finger extension movements in both collective and independent finger control modes. The system performance was evaluated at the engineering prototype level by assessing flex sensor readings, control system response, and wireless communication stability. The results showed that the system was able to accurately detect and transmit finger movement data, with an average response time of approximately 59 milliseconds. The system also demonstrated continuous and stable operation. In addition, user satisfaction was evaluated with 30 participants selected through purposive sampling, representing general users rather than target patients. The evaluation results indicated that the overall user satisfaction was at a high level (Mean = 4.42), covering usability, accuracy, safety, and system stability. However, this study was limited to engineering prototype testing and did not include clinical effectiveness evaluation with actual patients. The findings suggest that the developed robotic rehabilitation glove has potential for application as a hand rehabilitation assistive device and could be further developed for future medical and rehabilitation technology applications.

Keywords: Rehabilitation Robot, Robotic Glove, Hand Rehabilitation, Internet of Things (IoT)

Please cite this article as: T. Panklang, R. Supadanaison, S. Srisakaew, K. Warin, S. Jitsoonthonchaiyakul and S. Pholngam, "Design and Development of a Robotic Glove Prototype for Hand Rehabilitation Using a Remote Control System," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 4, pp. 78-94, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

โรคหลอดเลือดสมองเป็นสาเหตุสำคัญของความพิการในระยะยาวและการสูญเสียสมรรถภาพทางกายของผู้ป่วยทั้งในระดับโลกและในประเทศไทย โดยมีแนวโน้มของภาระโรคและจำนวนผู้ป่วยเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในระดับประเทศและระดับโลก [1,2] ผู้ป่วยจำนวนมากมีความบกพร่องด้านการเคลื่อนไหวของรยางค์ส่วนบน โดยเฉพาะการทำงานของมือและนิ้วมือ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำกิจวัตรประจำวัน การประกอบอาชีพ และคุณภาพชีวิตอย่างมีนัยสำคัญ [3] ผู้ป่วยกลุ่มหนึ่งแม้จะยังคงมีแรงกล้ามเนื้อมือและแขนเหลืออยู่บางส่วน แต่มีภาวะกล้ามเนื้อมือเกร็งงอร่วมด้วย ทำให้ช่วงการเคลื่อนไหวของข้อต่อจำกัดและจำเป็นต้องได้รับการฟื้นฟูอย่างต่อเนื่องจึงจะสามารถฟื้นคืนการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4] การฟื้นฟูสมรรถภาพมือของผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองโดยทั่วไปอาศัยการออกกำลังกายซ้ำ ๆ ภายใต้การดูแลของนักกายภาพบำบัด นักกิจกรรมบำบัด และทีมสหสาขาวิชาชีพที่เกี่ยวข้อง ซึ่งต้องใช้เวลาและทรัพยากรบุคลากรจำนวนมาก [5] ขณะเดียวกันผู้ป่วยจำนวนไม่น้อยมีข้อจำกัดด้านการเดินทางและค่าใช้จ่าย ทำให้ไม่สามารถเข้ารับบริการฟื้นฟูในสถานพยาบาลได้อย่างสม่ำเสมอ ความถี่และความต่อเนื่องของการฝึกจึงไม่เพียงพอ ส่งผลให้ผลลัพธ์ด้านการฟื้นฟูสมรรถภาพไม่เป็นไปตามศักยภาพสูงสุด นอกจากนี้ การฝึกด้วยวิธีดั้งเดิมมักขาดระบบบันทึกข้อมูลเชิงปริมาณของรูปแบบการเคลื่อนไหวและระยะเวลาการฝึก ทำให้ยากต่อการประเมินและติดตามความก้าวหน้าของผู้ป่วยอย่างเป็นระบบ [6]

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอุปกรณ์ประเภทถุงมือหุ่นยนต์แบบสวมใส่ (Wearable Robotic Glove) ที่ใช้แนวคิดของ Soft Robotics เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความปลอดภัยในการใช้งาน งานวิจัยล่าสุดได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยแรงดันลม (Pneumatic Actuation) และวัสดุนิ่ม เช่น งานของ Lim et al. [7] ที่พัฒนาถุงมือหุ่นยนต์แบบผ้าเพื่อช่วยฟื้นฟูการทำงานของมือในผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง รวมถึงงานของ Bazina et al. [8] และ Lee et al. [9] ที่ได้ออกแบบถุงมือหุ่นยนต์แบบ Soft Pneumatic ซึ่งสามารถเลียนแบบการเคลื่อนไหวของนิ้วมือได้ใกล้เคียงธรรมชาติ นอกจากนี้ ยังมีการพัฒนาเทคโนโลยีขั้นสูง เช่น การใช้ระบบช่วยตามแรง (Assist-as-Needed Control) และการประยุกต์ใช้ระบบตรวจจับสัญญาณชีวภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการฟื้นฟู อย่างไรก็ตาม แม้ว่างานวิจัยในต่างประเทศจะมีความก้าวหน้าและเริ่มมีการทดสอบในระดับผู้ป่วยจริงแล้ว แต่ยังคงมีข้อจำกัดสำคัญ ได้แก่ ต้นทุนอุปกรณ์ที่สูง ความซับซ้อนของระบบและการพึ่งพาเทคโนโลยีนำเข้า นอกจากนี้ อุปกรณ์บางประเภทไม่รองรับการควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแบบแยกอิสระ หรือยังไม่รองรับการเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายเพื่อการติดตามผลจากระยะไกลอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญต่อการนำไปใช้งานจริงในบริบทของประเทศกำลังพัฒนา

แม้ว่าปัจจุบันจะมีการพัฒนาถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือทั้งในเชิงงานวิจัยและเชิงพาณิชย์เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอุปกรณ์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยแรงดันลมและระบบควบคุมการเคลื่อนไหวของมือ แต่ระบบส่วนใหญ่ยังมีข้อจำกัดในด้านการควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแบบแยกอิสระ ซึ่งมีความสำคัญต่อการฟื้นฟูการทำงานของมือในผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง เนื่องจากผู้ป่วยแต่ละรายอาจมีระดับความบกพร่องของนิ้วมือแตกต่างกัน การฝึกเฉพาะนิ้วที่มีปัญหาจะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของข้อต่อ ลดภาวะนิ้วหดเกร็ง และส่งเสริมการฟื้นคืนการทำงานของกล้ามเนื้อมัดเล็กได้อย่างเหมาะสมมากขึ้น นอกจากนี้ อุปกรณ์บางประเภทมีต้นทุนสูง ใช้ระบบควบคุมที่ซับซ้อน และพึ่งพาอุปกรณ์นำเข้า ทำให้ยาก

บทความวิจัย (Research Article)

ต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในบริบทของการฟื้นฟูที่บ้านหรือสถานพยาบาลทั่วไป

ดังนั้น การพัฒนาอุปกรณ์หุ่นยนต์ฟื้นฟูมือที่ใช้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถจัดหาได้ง่ายภายในประเทศ มีต้นทุนไม่สูง และสามารถเชื่อมต่อกับระบบอินเตอร์เน็ต เพื่อรองรับการควบคุมและติดตามผลจากระยะไกล จึงเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มโอกาสในการเข้าถึงการฟื้นฟูสมรรถภาพมือ งานวิจัยนี้มีความแตกต่างจากงานวิจัยเดิม โดยมุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาถุงมือหุ่นยนต์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยแรงดันลมร่วมกับการควบคุมการเปิด–ปิดวาล์วลมด้วยเซอร์โวมอเตอร์ ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือได้ทั้งแบบรวมและแบบแยกนิ้วอิสระ เพื่อเพิ่มความสะดวกในการใช้งานและการฝึกฟื้นฟูจากระยะไกล

การวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ออกแบบและพัฒนาต้นแบบหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือ 2) ประเมินประสิทธิภาพเชิงวิศวกรรมของระบบในด้านการตอบสนองและความเสถียรของการทำงาน และ 3) ประเมินความเหมาะสมในการใช้งานเบื้องต้นของระบบจากผู้ใช้งานทั่วไป

2. ทบทวนวรรณกรรม

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาเทคโนโลยีด้านหุ่นยนต์ฟื้นฟู (Rehabilitation Robotics) ระบบอินเทอร์เฟซระหว่างสมองกับคอมพิวเตอร์ (Brain–Computer Interface) ได้รับการนำมาประยุกต์ใช้ในงานเวชศาสตร์ฟื้นฟูและวิศวกรรมการแพทย์อย่างแพร่หลาย [10] มีรายงานว่าการใช้หุ่นยนต์ช่วยฟื้นฟูรยางค์ส่วนบนร่วมกับกิจกรรมบำบัดสามารถเพิ่มความเข้มข้นของการฝึก ช่วยให้การเคลื่อนไหวมีความแม่นยำสม่ำเสมอ และสนับสนุนการประเมินผลฟื้นฟูด้วยข้อมูลเชิงปริมาณ [6] ขณะเดียวกัน โรงพยาบาลหลายแห่งในประเทศไทยเริ่มนำหุ่นยนต์ฟื้นฟูมาใช้ในงานคลินิกและรายงานบทบาทของเทคโนโลยีดังกล่าวต่อการฟื้นฟูผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง [4] อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์หุ่นยนต์ฟื้นฟูเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่เป็นเทคโนโลยีนำเข้า มีราคาสูง และต้องพึ่งพาชิ้นส่วนเฉพาะทาง ทำให้การจัดหาและบำรุงรักษาทำได้ยากในบริบททรัพยากรจำกัด

ในประเทศไทย มีความพยายามพัฒนาอุปกรณ์ช่วยฟื้นฟูสมรรถภาพสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองหลายรูปแบบ ทั้งแขนหุ่นยนต์กายภาพบำบัดแบบสวมใส่ และอุปกรณ์ช่วยใช้งานมือสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง รวมถึงอุปกรณ์ช่วยฟื้นฟูการเดินสำหรับผู้ป่วยที่มีภาวะขาอ่อนแรง [3,5] ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรมภายในประเทศในการพัฒนาอุปกรณ์ฟื้นฟูที่เหมาะสมกับบริบทของระบบบริการสุขภาพไทย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นอุปกรณ์ขนาดใหญ่หรือระบบเฉพาะทาง และยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานจริงในระดับครัวเรือนหรือการฟื้นฟูที่บ้าน

ในระดับนานาชาติ งานวิจัยด้านถุงมือหุ่นยนต์ (Robotic Glove) และอุปกรณ์เสริมการเคลื่อนไหวของมือ (Hand Exoskeleton) ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการใช้เทคโนโลยี Soft Robotics ที่เน้นความยืดหยุ่นและความปลอดภัยในการใช้งาน เช่น งานของ Polygerinos et al. [11] ที่พัฒนา Soft Robotic Glove โดยใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยแรงดันลมเพื่อช่วยการเคลื่อนไหวของนิ้วมือ และงานของ In et al. [12] ที่พัฒนา Exo-Glove ซึ่งใช้ระบบสายดึงเพื่อควบคุมการเคลื่อนไหวของมือ นอกจากนี้ งานวิจัยล่าสุดยังมีการพัฒนาอุปกรณ์ถุงมือหุ่นยนต์แบบผ้าและแบบแรงดันลมที่สามารถใช้งานร่วมกับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองได้จริง และช่วยเพิ่มความสามารถในการทำกิจวัตรประจำวัน [7] ในด้านกลไกการขับเคลื่อน ระบบขับเคลื่อนด้วยแรงดันลม (Pneumatic Actuation) ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากมีความยืดหยุ่น น้ำหนักเบา และมีความ

ปลอดภัยต่อผู้ใช้งานเมื่อเทียบกับระบบมอเตอร์แข็ง อย่างไรก็ตาม ระบบดังกล่าวมักมีข้อจำกัดด้านการควบคุมแรงดันและความแม่นยำในการเคลื่อนไหว [7,11] ขณะเดียวกัน การใช้เซนเซอร์วัดความโค้งงอ (Flex Sensor) ได้ถูกนำมาใช้ในการตรวจจับการเคลื่อนไหวของนิ้วมือ โดยทำหน้าที่วัดระดับการดัดงอของนิ้วและแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ในการควบคุมระบบ ตัวอย่างเช่น งานของ Yang et al. [13] ได้พัฒนาถุงมือที่ติดตั้ง Flex Sensor เพื่อวัดการเคลื่อนไหวของนิ้วมือข้างปกติ และส่งข้อมูลไปควบคุม hand Exoskeleton ของอีกข้างหนึ่งสำหรับการฟื้นฟูแบบ Bilateral Rehabilitation อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้ผสานการทำงานร่วมกับระบบ Internet of Things (IoT) ซึ่งเป็นจุดที่งานวิจัยนี้นำมาต่อยอด [13] นอกจากนี้ Lim et al. [7] ได้พัฒนาถุงมือหุ่นยนต์แบบนุ่ม (Soft Robotic Glove) ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนแบบนิวแมติก (Pneumatic System) เพื่อช่วยการเคลื่อนไหวของนิ้วมือ โดยมุ่งเน้นการออกแบบโครงสร้างให้มีความยืดหยุ่น ปลอดภัย และเหมาะสมกับการใช้งานด้านการฟื้นฟูสมรรถภาพมือ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวยังมุ่งเน้นด้านกลไกและการออกแบบอุปกรณ์เป็นหลัก และยังไม่ได้ผสานระบบควบคุมแบบไร้สายหรือการเชื่อมต่อผ่าน IoT สำหรับการติดตามผลระยะไกล [7]

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า งานวิจัยด้านถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือส่วนใหญ่มุ่งเน้นการพัฒนาด้านกลไกการขับเคลื่อน ความยืดหยุ่นของอุปกรณ์ และความปลอดภัยในการใช้งาน โดยเฉพาะระบบขับเคลื่อนด้วยแรงดันลมและเทคโนโลยี Soft Robotics อย่างไรก็ตาม งานวิจัยจำนวนมากยังมีข้อจำกัดด้านการควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแบบแยกอิสระ การรองรับการใช้งานฟื้นฟูที่บ้านผ่านระบบควบคุมระยะไกล รวมถึงต้นทุนของอุปกรณ์และความซับซ้อนของระบบควบคุม นอกจากนี้ แม้ว่าบางงานวิจัยจะมีการประยุกต์ใช้ระบบเซนเซอร์และระบบ IoT เพื่อสนับสนุนการติดตามผลจากระยะไกล แต่ยังไม่พบการออกแบบที่มุ่งเน้นการผสานระบบขับเคลื่อนด้วยแรงดันลมร่วมกับการควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแบบแยกอิสระโดยใช้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต้นทุนต่ำและสามารถจัดหาได้ง่ายภายในประเทศ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาต้นแบบถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือที่ให้ความสำคัญกับ 1) การควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแบบแยกอิสระ 2) การควบคุมและติดตามผลระยะไกลผ่านระบบไร้สาย และ 3) การออกแบบระบบที่มีต้นทุนต่ำและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานจริงในบริบทของประเทศกำลังพัฒนา

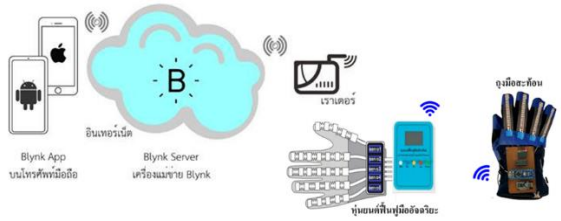
3. วิธีการวิจัย

การออกแบบและพัฒนาต้นแบบถุงมือหุ่นยนต์เพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพมือโดยใช้ระบบ IoT ได้ออกแบบเพื่อช่วยฟื้นฟูกล้ามเนื้อมือของผู้ใช้งานผ่านระบบควบคุมอัตโนมัติ และสามารถเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชัน Blynk โดยผสมผสานเทคโนโลยีไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ระบบสื่อสารไร้สาย และเซนเซอร์ตรวจวัดการเคลื่อนไหวของนิ้วมือในงานวิจัยนี้ใช้เซนเซอร์วัดความโค้งงอ (Flex Sensor) ซึ่งเป็นตัวต้านทานชนิดหนึ่งที่ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงตามระดับการดัดงอของนิ้วมือ โดยเมื่อผู้ใช้งานทำการกำหรือแบมือ เซนเซอร์จะตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของมุมงอและแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแบบแอนะล็อก เพื่อนำไปประมวลผลในระบบควบคุม โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย การออกแบบระบบ การพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบ การทดสอบเชิงวิศวกรรม และการประเมินผลการใช้งาน ซึ่งการพัฒนามีการเชื่อมต่อในภาพรวมดังแสดงในรูปที่ 1

ในการออกแบบระบบควบคุมของถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือ งานวิจัยนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 2 ประเภท ได้แก่ ESP8266 และ Arduino Nano โดยแต่ละส่วนของระบบถูกออกแบบให้เหมาะสมกับ

บทความวิจัย (Research Article)

ลักษณะการทำงานที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ส่วนของถุงมือฟื้นฟูมือใช้ ESP8266 เนื่องจากมีโมดูล Wi-Fi ในตัวสามารถเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) และแพลตฟอร์ม Blynk ได้โดยตรง เหมาะสำหรับการควบคุมและสั่งงานจากระยะไกล ในขณะที่ถุงมือสะท้อนเลือกใช้ Arduino Nano เนื่องจากมีขนาดเล็ก ใช้พลังงานต่ำ และมีขาอินพุตแอนะล็อกที่เหมาะสมสำหรับการรับค่าสัญญาณจาก Flex Sensor ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งสามารถทำงานร่วมกับโมดูลสื่อสาร NRF24L01 ได้อย่างเสถียรสำหรับการส่งข้อมูลแบบไร้สายระยะใกล้ การเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่แตกต่างกันในแต่ละส่วนช่วยให้ระบบโดยรวมมีประสิทธิภาพ ลดความซับซ้อน และเหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน



รูปที่ 1 ภาพรวมการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของหุ่นยนต์ฟื้นฟูมืออัจฉริยะ

ระบบหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน ได้แก่ 1) ชุดถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือ ซึ่งทำหน้าที่สร้างการเคลื่อนไหวของนิ้วมือด้วยระบบขับเคลื่อนด้วยแรงดันลม 2) กล่องควบคุมหุ่นยนต์ฟื้นฟูมืออัจฉริยะ สำหรับเลือกโหมดการทำงาน 3) ถุงมือสะท้อน ซึ่งใช้ Flex Sensor ตรวจจับการเคลื่อนไหวของนิ้วมือและส่งข้อมูลแบบไร้สายเพื่อควบคุมถุงมือฟื้นฟู และ 4) ระบบควบคุมระยะไกลผ่านแพลตฟอร์ม Blynk สำหรับสั่งงานและติดตามการทำงานผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยองค์ประกอบแต่ละส่วนทำงานร่วมกันเพื่อสนับสนุนการฟื้นฟูสมรรถภาพมือแบบเรียลไทม์ ดังนี้

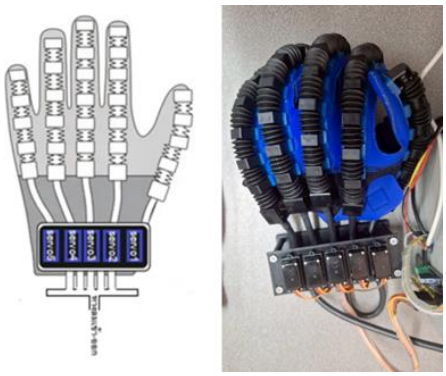
3.1 ชุดอุปกรณ์ถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือสำหรับสวมใส่มือในการฟื้นฟู

มีการออกแบบสำหรับสวมใส่เพื่อช่วยในการฟื้นฟูสมรรถภาพมือของผู้ใช้งาน โดยให้สามารถสวมใส่เพื่อช่วยในการฟื้นฟูสมรรถภาพมือของผู้ใช้งานโดยระบบขับเคลื่อนใช้หลักการนิวแมติก (Pneumatic System) อาศัยปั๊มลมสุญญากาศขนาดเล็กจำนวน 2 ตัว ซึ่งสามารถสร้างแรงดันลมได้ทั้งแบบบวกและแบบลบ (การอัดและการดูดอากาศ) เพื่อควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือผ่านถุงลม (Air Bladder) ที่ติดตั้งในนิ้วมือทั้งห้า ซึ่งปั๊มลมที่ใช้ทำงานที่แรงดันไฟฟ้า 5–12 โวลต์ มีกระแสไฟฟ้าในช่วงประมาณ 450–700 mA และมีอัตราการไหลของอากาศประมาณ 4–7 ลิตรต่อนาที โดยมีการใช้โซลินอยด์วาล์ว (Solenoid Valve) ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของอากาศจากปั๊มลม เพื่อเลือกการจ่ายลมเข้า (แรงดันบวก) หรือการดูดลมออก (แรงดันลบ) ในระบบ

ในส่วนของการควบคุมลมที่ส่งไปยังนิ้วมือแต่ละนิ้ว ใช้วาล์วลมแบบเปิด–ปิด (On–off Valve) ที่ติดตั้งอยู่บนสายลมของถุงมือ โดยมีเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) ทำหน้าที่ควบคุมการเปิด–ปิดวาล์วลมในแต่ละนิ้วในลักษณะเชิงกล ซึ่งเซอร์โวมอเตอร์จะหมุนตามมุมที่กำหนดเพื่อเปิดทางให้อากาศไหลเข้าสู่ถุงลมหรือปิด/ระบายอากาศออก ส่งผลให้นิ้วมือเกิดการงอ (Flexion) และคลายตัว (Extension) ได้ตามคำสั่ง เซอร์โวมอเตอร์แต่ละตัวถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ผ่านสัญญาณ PWM ทำให้สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแต่ละนิ้วได้อย่างอิสระและแม่นยำ

บทความวิจัย (Research Article)

ผู้ใช้งานสามารถเลือกโหมดการทำงานของระบบฟื้นฟูได้จากกล่องควบคุมที่ติดตั้งกับอุปกรณ์ ได้แก่ โหมดกำมือ โหมดแบมือ และโหมดกำ–แบอัตโนมัติ นอกจากนี้ ระบบยังรองรับการควบคุมแบบไร้สายผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตโดยใช้แพลตฟอร์ม Blynk ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ทำให้สามารถสั่งงานจากระยะไกลได้ นอกจากนี้ยังมีโหมดควบคุมผ่านถุงมือสะท้อนแบบไร้สาย ซึ่งใช้มือข้างปกติของผู้ใช้งานหรือนักกายภาพบำบัดในการควบคุมการเคลื่อนไหวของถุงมือฟื้นฟูแบบเรียลไทม์ เพื่อใช้ในการฝึกการกำ–แบมือและการหยิบจับวัตถุในกิจกรรมประจำวันได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงดังรูปที่ 2

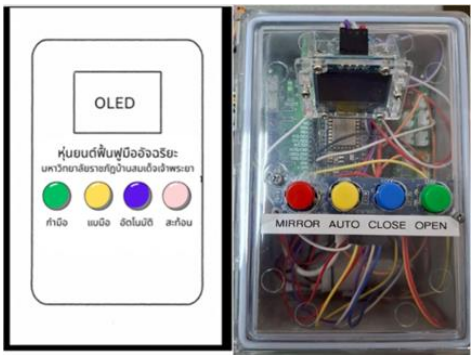


รูปที่ 2 โครงสร้างถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือและระบบขับเคลื่อนด้วยแรงดันลม โดย (ซ้าย) แสดงการจัดวางถุงลมในนิ้วมือ และ (ขวา) แสดงชุดวาล์วลมและการเชื่อมต่อท่อลมกับถุงมือ

จุดสำคัญของระบบที่พัฒนาขึ้นในครั้งนี้ คือ การรองรับการควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแบบแยกอิสระผ่านถุงมือสะท้อนแบบไร้สาย โดยใช้ Flex Sensor ตรวจจับการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแต่ละนิ้ว และส่งข้อมูลไปควบคุมระบบถุงมือฟื้นฟูแบบเรียลไทม์ ทำให้ระบบสามารถตอบสนองต่อการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแต่ละนิ้วได้อย่างเป็นธรรมชาติ นอกจากนี้ ระบบยังสามารถควบคุมการกำ–แบมือในภาพรวมผ่านกล่องควบคุมและแพลตฟอร์ม Blynk เพื่อรองรับการใช้งานในการฝึกฟื้นฟูสมรรถภาพมือจากระยะไกลได้ การออกแบบดังกล่าวช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในการใช้งาน และเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในการฟื้นฟูสมรรถภาพมือของผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง

3.2 กล่องควบคุมหุ่นยนต์ฟื้นฟูมืออัจฉริยะ

ที่ติดกับตัวชุดอุปกรณ์ถุงมือหุ่นยนต์ ประกอบด้วยปุ่มควบคุม การกำมือ การแบมือ การกำมือ-แบมืออัตโนมัติ และการควบคุมด้วยถุงมือสะท้อน ดังแสดงในรูปที่ 3



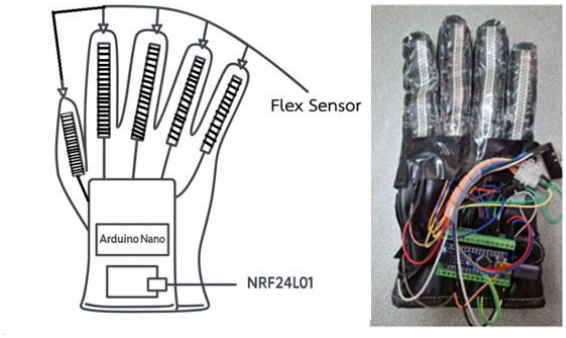
รูปที่ 3 กล่องควบคุมหุ่นยนต์ฟื้นฟูมืออัจฉริยะ

3.3 ถุงมือสะท้อน

มีหลักการทำงานโดยติดตั้งเซนเซอร์วัดความโค้งงอ (Flex Sensor) บริเวณนิ้วมือแต่ละนิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเซนเซอร์ดังกล่าวเป็นตัวต้านทานชนิดหนึ่งที่ค่าความต้านทานจะเปลี่ยน แปลงตามระดับการดัดงอของนิ้วมือ เมื่อผู้ใช้งานทำการกำหรือแบมือ เซนเซอร์จะตรวจจับการเปลี่ยน แปลงของมุมการงอ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแบบแอนะล็อกส่งไปยัง

บทความวิจัย (Research Article)

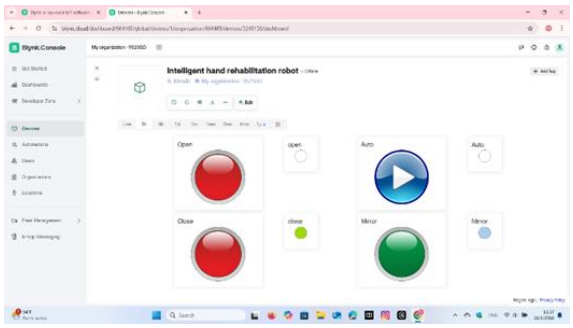
ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano เพื่อประมวลผล จากนั้นข้อมูลการเคลื่อนไหวของนิ้วมือจะถูกส่งผ่านโมดูลสื่อสารไร้สาย NRF24L01 ที่ความถี่ 2.4 GHz ไปยังระบบถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือ เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของระบบขับเคลื่อนให้สอดคล้องกับการเคลื่อนไหวของมือผู้ใช้งานแบบเรียลไทม์ ดังแสดงในรูปที่ 4 (ด้านขวา) การออกแบบระบบในลักษณะนี้ช่วยให้สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือได้อย่างเป็นธรรมชาติ โดยอาศัยการเคลื่อนไหวของมืออีกข้างหนึ่งของผู้ใช้งาน หรือผู้ดูแล เพื่อใช้ในการฝึกฟื้นฟูสมรรถภาพมือ รวมถึงการประยุกต์ใช้ในการควบคุมการหยิบจับวัตถุในกิจกรรมประจำวันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ถุงมือสะท้อน โดย (ซ้าย) แสดงตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์วัดความโค้งงอ (Flex Sensor) และการเชื่อมต่อกับ Arduino Nano และโมดูล NRF24L01 และ (ขวา) แสดงอุปกรณ์จริงที่พัฒนา

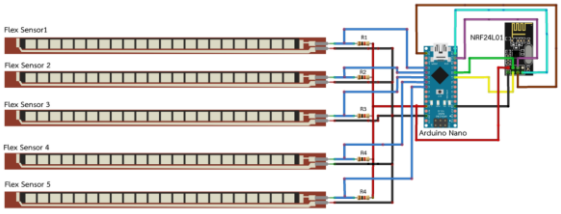
3.4 Blynk Server

เป็นเครื่องมือในการควบคุมถุงมือหุ่นยนต์ผ่านเครือข่ายอินเตอร์เน็ต จากเว็บเบราเซอร์ซึ่งควบคุมปรับค่ากำมือ แบมือ การกำและแบมือตามเวลาที่กำหนด การทำงานได้จากระยะไกล ทำให้ผู้ดูแลผู้ป่วยหรือนักกายภาพบำบัดสามารถฝึกการใช้งานมือให้ผู้ป่วยได้จากทุกที่ทั่วโลก ดังรูปที่ 5

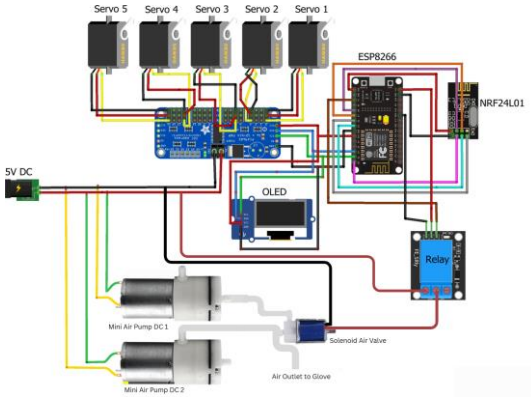


รูปที่ 5 Blynk Server

การเชื่อมต่อส่วนต่างๆ กันผ่านวงจรไฟฟ้าเพื่อทำงานร่วมกันอย่างเป็นระบบของหุ่นยนต์ฟื้นฟูมืออัจฉริยะทั้ง 4 ส่วนดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น มีรายละเอียดต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 6 และ รูปที่ 7



รูปที่ 6 แผนผังวงจรถุงมือสะท้อน



รูปที่ 7 แผนผังวงจรถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟู

บทความวิจัย (Research Article)

4. ผลการวิจัย

จากการพัฒนาและทดสอบต้นแบบอุปกรณ์ สามารถสรุปผลการทดสอบดังนี้

4.1 การทดสอบการอ่านค่าจากตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลของเซนเซอร์วัดความโค้งงอ (Flex Sensor)

ติดตัวต้านทานขนาด 1 kΩ บนถุงมือและ Pull-up ดำเนินการโดยเก็บข้อมูลจำนวน 10 ครั้ง ผ่านการอ่านค่าจาก Serial Monitor ของ Arduino IDE ภายในระยะเวลา 10 วินาที การทดสอบประกอบด้วยการอ่านค่าในสภาพที่นิ้วยังอยู่ในท่าปกติไม่เกิดการดัดงอ และในสภาพที่มีการดัดนิ้วจนสุด เพื่อเปรียบเทียบช่วงค่าที่เกิดขึ้นจากทั้งสองสภาวะ ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานในการเขียนโปรแกรมควบคุมและกำหนดเงื่อนไขการทำงานของระบบ เพื่อให้สามารถตรวจจับระดับการดัดนิ้วได้อย่างถูกต้องและความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งานจริง ผลการอ่านค่าแต่ละสภาวะสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบอ่านค่า ADC ที่ได้จากเซนเซอร์ดัดงอที่ติดกับถุงมือสะท้อนในแต่ละนิ้ว

นิ้ว	ระดับการดัดงอของนิ้วมือ				
	0%	25%	50%	75%	100%
ก้อย	1023	940	850	760	692
นาง	1023	924	760	650	595
กลาง	1023	810	710	660	628
ชี้	1023	849	650	495	356
โป้ง	1023	900	760	600	474

ผลการทดสอบจากตารางที่ 1 พบว่า เมื่ออยู่ในสภาวะนิ้วปกติ เซนเซอร์ให้ค่า ADC สูงสุดใกล้เคียง 1023 ในทุกนิ้ว เนื่องจากเซนเซอร์ไม่มีการดัดงอ เมื่อเพิ่มระดับการกำมือเป็นร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 พบว่าค่า ADC มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามระดับการงอของนิ้วมือ โดยแต่ละนิ้วมีช่วงการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันตามลักษณะการเคลื่อนไหวและตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ ทั้งนี้ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้กำหนดช่วงค่า (Threshold) สำหรับการตรวจจับระดับการงอนิ้วและการควบคุมการเคลื่อนไหวของถุงมือหุ่นยนต์ได้อย่างเหมาะสม

4.2 การตอบสนองของการสื่อสารข้อมูลระหว่างถุงมือสะท้อนและถุงมือฟื้นฟู

การทดสอบเวลาตอบสนองของระบบ เป็นการประเมินเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลการเคลื่อนไหวของนิ้วมือจากถุงมือสะท้อนผ่านโมดูลสื่อสารไร้สาย NRF24L01 ไปยังถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือ โดยเริ่มจับเวลาตั้งแต่มีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก Flex Sensor จนกระทั่งเซอร์โวมอเตอร์ของระบบฟื้นฟูเริ่มทำงาน การทดลองดำเนินการจำนวน 10 รอบ และบันทึกค่าระยะเวลาที่วัดได้เพื่อนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การทดสอบดำเนินการโดยใช้ฟังก์ชันจับเวลาภายในไมโครคอน โทรลเลอร์ Arduino Nano โดยเริ่มต้นจากการบันทึกเวลาเมื่อถุงมือสะท้อนส่งข้อมูลการเคลื่อนไหวของนิ้วมือออก (T0) จากนั้นเมื่อโมดูลสื่อสารไร้สาย NRF24L01 บนถุงมือหุ่นยนต์รับข้อมูลสำเร็จ จะบันทึกเวลาเป็นค่า (T1) และเมื่อระบบสั่งงานเซอร์โวมอเตอร์ให้เริ่มเคลื่อนไหว จะบันทึกเวลาเป็นค่า (T2) โดยเวลาตอบสนองรวมของระบบคำนวณจากผลต่างของเวลา (T2 – T0) การบันทึกค่า T0, T1 และ T2 ใช้ฟังก์ชัน millis() ซึ่งเป็นการนับเวลาแบบสะสม (Timestamp) ตั้งแต่เริ่มต้นการทำงานของระบบ โดยค่าที่นำมาวิเคราะห์เป็นผลต่างของเวลาในแต่ละรอบการทดสอบ เพื่อให้ได้ค่า

บทความวิจัย (Research Article)

ระยะเวลาการตอบสนองที่แท้จริงของระบบ ทั้งนี้การทดลองกำหนดให้มีการส่งข้อมูลในช่วงเวลาคงที่ประมาณ 120 มิลลิวินาที (Fixed Interval) เพื่อควบคุมตัวแปรและให้ผลการวัดมีความสม่ำเสมอการทดลองวัดเวลาตอบสนองดำเนินการในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร (Indoor Environment) ภายใต้สภาวะที่ไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณ โดยกำหนดระยะห่างระหว่างถุงมือสะท้อนและถุงมือหุ่นยนต์คงที่ที่ประมาณ 1 เมตร ใช้การสื่อสารผ่านโมดูล NRF24L01 ความถี่ 2.4 GHz และควบคุมให้ไม่มีอุปกรณ์ไร้สายอื่นใช้งานในบริเวณใกล้เคียงเพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน ทั้งนี้ระบบสามารถรับส่งข้อมูลได้อย่างต่อเนื่องและเสถียรตลอดการทดสอบ อย่างไรก็ตาม การทดสอบยังดำเนินการภายใต้สภาวะเครือข่ายเดียวและระยะทางคงที่ยังไม่ได้ครอบคลุมสภาวะการใช้งานที่หลากหลาย ซึ่งจะพิจารณาเพิ่มเติมในการศึกษาครั้งต่อไป ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเวลาการตอบสนองของระบบ (Response Time Test) กำหนด T0 = เวลาเวลาที่ถุงมือสะท้อนส่งข้อมูล T1 = เวลาเมื่อ NRF24L01 รับข้อมูลได้ และT2 = เวลาสั่งงานมอเตอร์

ครั้ง	T0 (ms)	T1 (ms)	T2 (ms)	เวลาตอบสนองรวม (T2 – T0) (ms)
1	1000	1012	1059	59
2	1120	1131	1179	59
3	1240	1253	1300	60
4	1360	1372	1418	58
5	1480	1491	1539	59
6	1600	1612	1659	59
7	1720	1733	1780	60

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเวลาการตอบสนองของระบบ (Response Time Test) กำหนด T0 = เวลาเวลาที่ถุงมือสะท้อนส่งข้อมูล T1 = เวลาเมื่อ NRF24L01 รับข้อมูลได้ และT2 = เวลาสั่งงานมอเตอร์ (ต่อ)

ครั้ง	T0 (ms)	T1 (ms)	T2 (ms)	เวลาตอบสนองรวม (T2 – T0) (ms)
8	1840	1852	1900	60
9	1960	1970	2018	58
10	2080	2094	2141	61
เฉลี่ย				**59**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)				**1.05**
ค่าต่ำสุด (Min)				**58**
ค่าสูงสุด (Max)				**61**
%CV				**1.78%**

จากตารางที่ 2 การทดสอบวัดเวลาการตอบสนองของระบบถุงมือหุ่นยนต์ โดยวัดช่วงเวลาตั้งแต่ถุงมือสะท้อนส่งข้อมูล (T0) จนกระทั่งระบบสั่งงานเซอร์โวมอเตอร์ (T2) ผ่านการสื่อสารไร้สายด้วยโมดูล NRF24L01 ทำการทดสอบซ้ำทั้งหมด 10 ครั้งภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน พบว่าเวลาตอบสนองรวม (T2 – T0) มีค่าอยู่ในช่วง 58–61 มิลลิวินาที โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 59 มิลลิวินาที และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 1.05 มิลลิวินาที คิดเป็นค่าความแปรปรวนสัมพัทธ์ (Coefficient of Variation: %CV) เท่ากับ 1.78% แสดงให้เห็นว่าระบบมีเสถียรภาพในการตอบสนองสูง เนื่องจากค่าที่ได้ในแต่ละครั้งมีความใกล้เคียงกันมากและมีการกระจายตัวต่ำ ผลการทดสอบนี้ยืนยันว่าระบบสามารถส่งและรับข้อมูลผ่านโมดูลไร้สาย NRF24L01 พร้อมทั้งสั่งงานมอเตอร์ได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ เหมาะสมสำหรับการใช้งานในการควบคุมถุงมือหุ่นยนต์แบบเรียลไทม์ อย่างไรก็ตาม การทดสอบใน

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบในระดับต้นแบบ (Prototype Testing) จึงกำหนดจำนวนรอบการทดลองจำนวน 10 ครั้งเพื่อประเมินประสิทธิภาพเบื้องต้นของระบบ

4.3 การทดสอบการทำงานของกล่องควบคุมและถุงมือหุ่นยนต์

ผลการทดสอบพบว่า กล่องควบคุมซึ่งประกอบด้วยปุ่มกดควบคุมจำนวน 4 ปุ่ม สามารถส่งคำสั่งไปยังเซอร์โวมอเตอร์ของถุงมือหุ่นยนต์ได้อย่างต่อเนื่องและถูกต้องครบทั้ง 30 ครั้งของการทดสอบ คิดเป็นร้อยละ 100 โดยส่วนใหญ่ระบบตอบสนองได้อย่างราบรื่น อย่างไรก็ตาม พบว่าเซอร์โวมอเตอร์มีการตอบสนองล่าช้ากว่าปกติจำนวน 2 ครั้ง จากการทดสอบทั้งหมด 30 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 6.67 ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่มีการส่งคำสั่งต่อเนื่องหรือระบบอยู่ภายใต้ภาวะโหลดสูง ส่งผลให้การเคลื่อนไหวของเซอร์โวเกิดความหน่วงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ระบบยังสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่พบข้อผิดพลาดในการสื่อสารหรือการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ นอกจากการประเมินความถูกต้องของการทำงานของกล่องควบคุมแล้ว ได้มีการทดสอบเวลาตอบสนองของการควบคุมด้วยปุ่มกด เพื่อประเมินระยะเวลาตั้งแต่เริ่มกดปุ่มสั่งงานจนกระทั่งเซอร์โวมอเตอร์ของถุงมือหุ่นยนต์เริ่มเคลื่อนที่ โดยกำหนดให้ T0 เป็นเวลาเริ่มต้นการกดปุ่ม T1 เป็นเวลาที่ไมโครคอน โทรลเลอร์ได้รับคำสั่ง และ T2 เป็นเวลาที่เซอร์โวมอเตอร์เริ่มทำงาน ทั้งนี้ เวลาตอบสนองรวมของระบบคำนวณจากผลต่างของเวลา (T2 – T0) โดยทำการทดลองจำนวน 10 รอบภายใต้สภาวะเดียวกัน เพื่อประเมินความรวดเร็วและความสม่ำเสมอของการตอบสนองของระบบ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบเวลาตอบสนองของการควบคุมด้วยปุ่มกด

ครั้ง	T0 (ms)	T1 (ms)	T2 (ms)	เวลาตอบสนองรวม (T2 – T0) (ms)
1	1000	1008	1044	44
2	1120	1129	1166	46
3	1240	1248	1284	44
4	1360	1369	1405	45
5	1480	1489	1527	47
6	1600	1608	1643	43
7	1720	1728	1764	44
8	1840	1849	1885	45
9	1960	1969	2006	46
10	2080	2089	2125	45
ค่าเฉลี่ย				**44.9**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)				**1.20**
ค่าต่ำสุด (Min)				**43**
ค่าสูงสุด (Max)				**47**
%CV				**2.67%**

จากตารางที่ 3 ผลการทดสอบเวลาตอบสนองของการควบคุมด้วยปุ่มกด พบว่าเวลาตอบสนองรวมของระบบมีค่าอยู่ในช่วง 43–47 มิลลิวินาที โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 44.9 มิลลิวินาที และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 1.20 มิลลิวินาที คิดเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) เท่ากับ 2.67% แสดงให้เห็นว่าระบบมีความสม่ำเสมอในการตอบสนองและมีการกระจายตัวของข้อมูลในระดับต่ำ ทั้งนี้ เนื่องจากการควบคุมด้วยปุ่มกดเป็นการสั่งงานโดยตรงภายในระบบ จึงไม่มีความหน่วงจากการสื่อสารไร้สายหรือเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ส่งผลให้เซอร์โวมอเตอร์สามารถตอบสนองต่อคำสั่งได้อย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง แม้ว่าจะพบการตอบสนองล่าช้าในบาง

กรณีจำนวน 2 ครั้งจากการทดสอบการทำงานทั้งหมด 30 ครั้ง ซึ่งอาจเกิดจากการส่งคำสั่งต่อเนื่องหรือการทำงานภายใต้ภาวะโหลดสูง แต่ระบบยังสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่พบข้อผิดพลาดในการสื่อสารหรือการควบคุมอุปกรณ์ ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากล่องควบคุมมีประสิทธิภาพในการสั่งงานและมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นช่องทางควบคุมของระบบถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือ

4.4 การทดสอบเวลาตอบสนองของการควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Blynk

การทดสอบเวลาตอบสนองของการควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Blynk เพื่อประเมินระยะเวลาตั้งแต่ผู้ใช้ส่งคำสั่งผ่านแอปพลิเคชันจนกระทั่งเซอร์โวมอเตอร์ของถุงมือหุ่นยนต์เริ่มเคลื่อนที่ โดยกำหนดให้ T0 เป็นเวลาเริ่มต้นการส่งคำสั่งจากแอปพลิเคชัน Blynk ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต T1เป็นเวลาที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้รับข้อมูลคำสั่ง และ T2 เป็นเวลาที่เซอร์โวมอเตอร์เริ่มทำงาน ทั้งนี้เวลาตอบสนองรวมของระบบคำนวณจากผลต่างของเวลา (T2 – T0) โดยทำการทดลองจำนวน 10 รอบภายใต้สภาวะเดียวกันเพื่อประเมินความรวดเร็วและความสม่ำเสมอของการตอบสนองของระบบผลการทดลอง

จากผลการทดสอบเวลาตอบสนองของการควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Blynk พบว่าเวลาตอบสนองรวมของระบบมีค่าอยู่ในช่วง 124–132 มิลลิวินาที โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 127.7 มิลลิวินาที และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 2.31 มิลลิวินาที คิดเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) เท่ากับ 1.81% แสดงให้เห็นว่าระบบมีความสม่ำเสมอในการตอบสนองและมีการกระจายตัวของข้อมูลอยู่ในระดับต่ำ แม้ว่าการควบคุมผ่าน Blynk จะมีเวลาตอบสนองสูงกว่าการควบคุมด้วยปุ่มกดและการสื่อสารผ่านโมดูล NRF24L01 เนื่องจากข้อมูลต้องส่งผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตก่อนถึงอุปกรณ์ปลายทาง แต่ค่าการตอบสนองที่ได้ยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการใช้งานของระบบถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือ และสามารถรองรับการควบคุมจากระยะไกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบเวลาตอบสนองของการควบคุมผ่าน Blynk

ครั้ง	T0 (ms)	T1 (ms)	T2 (ms)	เวลาตอบสนองรวม (T2 – T0) (ms)
1	1000	1032	1124	124
2	1120	1155	1246	126
3	1240	1273	1368	128
4	1360	1392	1486	126
5	1480	1515	1609	129
6	1600	1635	1728	128
7	1720	1753	1847	127
8	1840	1876	1972	132
9	1960	1994	2087	127
10	2080	2116	2210	130
ค่าเฉลี่ย				**127.7**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)				**2.31**
ค่าต่ำสุด (Min)				**124**
ค่าสูงสุด (Max)				**132**
%CV				**1.81**

จากตารางที่ 4 ผลการทดสอบเวลาตอบสนองของการควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Blynk พบว่าเวลาตอบสนองรวมของระบบมีค่าอยู่ในช่วง 124–132 มิลลิวินาที โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 127.7 มิลลิวินาที และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 2.31 มิลลิวินาที คิดเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) เท่ากับ 1.81% แสดงให้เห็นว่าระบบมีความ

สม่ำเสมอในการตอบสนองและมีการกระจายตัวของข้อมูลอยู่ในระดับต่ำ แม้ว่าการควบคุมผ่าน Blynk จะมีเวลาตอบสนองสูงกว่าการควบคุมด้วยปุ่มกดและการสื่อสารผ่านโมดูล NRF24L01 เนื่องจากข้อมูลต้องส่งผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตก่อนถึงอุปกรณ์ปลายทาง แต่ค่าการตอบสนองที่ได้ยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการใช้งานของระบบถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือ และสามารถรองรับการควบคุมจากระยะไกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.5 การทดสอบความถูกต้องของการควบคุมแบบแยกนิ้ว

การทดสอบเพื่อประเมินความสามารถของระบบในการควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแบบแยกอิสระ โดยให้ผู้ทดลองสวมถุงมือสะท้อนที่ติดตั้งเซนเซอร์วัดความโค้งงอ (Flex Sensor) บริเวณนิ้วมือทั้ง 5 นิ้ว ได้แก่ นิ้วโป้ง นิ้วชี้ นิ้วกลาง นิ้วนาง และนิ้วก้อย จากนั้นให้ผู้ทดลองทำการงอนิ้วทีละนิ้ว โดยกำหนดให้นิ้วอื่นอยู่ในตำแหน่งปกติ เพื่อส่งข้อมูลการเคลื่อนไหวผ่านโมดูลสื่อสารไร้สาย NRF24L01 ไปยังระบบถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือ จากนั้นตรวจสอบว่าถุงมือหุ่นยนต์สามารถตอบสนองการเคลื่อนไหวได้ตรงกับนิ้วที่สั่งงานหรือไม่ โดยถือว่าการตอบสนองถูกต้องเมื่อถุงมือหุ่นยนต์เคลื่อนไหวเฉพาะนิ้วเดียวกับที่ผู้ทดลองงอและไม่มีการเคลื่อนไหวผิดพลาดในนิ้วอื่น ทำการทดสอบนิ้วละ 10 ครั้ง รวมทั้งหมด 50 ครั้ง ภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกัน และบันทึกผลในรูปแบบจำนวนครั้งที่ควบคุมได้ถูกต้องและไม่ถูกต้อง เพื่อนำมาคำนวณค่าความถูกต้องของระบบ (Accuracy) ผลการทดสอบ พบว่าระบบสามารถควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแต่ละนิ้วได้อย่างถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 96 โดยนิ้วโป้ง นิ้วกลาง และนิ้วก้อยมีความถูกต้องร้อยละ 100 ขณะที่นิ้วชี้และนิ้วนางมีความถูกต้องร้อยละ 90 เนื่องจากในบางกรณีค่าการดัดงอของนิ้วมีลักษณะใกล้เคียงกัน ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการจำแนกสัญญาณเล็กน้อย แสดงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบความถูกต้องของการควบคุมการเคลื่อนไหวแบบแยกนิ้วของถุงมือหุ่นยนต์

นิ้ว	จำนวนครั้ง	สำเร็จ	ไม่สำเร็จ	Accuracy
โป้ง	10	10	0	100%
ชี้	10	9	1	90%
กลาง	10	10	0	100%
นาง	10	9	1	90%
ก้อย	10	10	0	100%
รวม	**50**	**48**	**2**	**96%**

4.6 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ (User Satisfaction)

กลุ่มตัวอย่างในการประเมินความพึงพอใจ จำนวน 30 คน ได้มาจากการคัดเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) ภายในงานประกวดนวัตกรรมสายอุดมศึกษาประจำปี 2568 (EXPO2025) ที่จัดโดยสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) โดยมีทั้งคณะกรรมการ ผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เยี่ยมชมร่วมทดลองใช้งานระบบถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือ หลังการสาธิต ผู้ประเมินได้ตอบแบบสอบถามความพึงพอใจในประเด็นด้านการใช้งาน ความแม่นยำ ความปลอดภัย และความน่าสนใจของนวัตกรรม

ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน จำนวน 30 คน พบว่า คะแนนเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 4.42 จากคะแนนเต็ม 5 อยู่ในระดับมาก โดยทุกด้านที่ประเมินมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากทั้งหมด และมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) เท่ากับ 2.49% แสดงให้เห็นว่าความคิดเห็นของผู้ใช้งานมีความสอดคล้องกันในระดับสูงและมีการกระจายตัวของ

บทความวิจัย (Research Article)

ข้อมูลต่ำ อย่างไรก็ตาม การประเมินในครั้งนี้เป็นการทดสอบในสภาพแวดล้อมของงานแสดงนวัตกรรม และยังไม่ได้ดำเนินการทดสอบกับผู้ป่วยจริงในบริบททางคลินิก ดังนั้น ในการศึกษาครั้งต่อไปควรมีการทดลองกับกลุ่มผู้ป่วยเป้าหมายโดยตรง เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบในด้านการฟื้นฟูสมรรถภาพมืออย่างเป็นรูปธรรมมากยิ่งขึ้น สรุปได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ประเมินความพึงพอใจของผู้ทดสอบใช้หุ่นยนต์ฟื้นฟูมืออัจฉริยะ

ด้านที่ประเมิน	รายละเอียด	ค่าเฉลี่ย (Mean)	ระดับความพึงพอใจ
1. ความสะดวกในการสวมใส่และใช้งาน	การใช้งานง่าย น้ำหนักเบา ใส่กระชับ	4.47	มาก
2. ความแม่นยำของการตอบสนอง	ความใกล้เคียงของการขยับนิ้วกับการทำงานของหุ่นยนต์	4.38	มาก
3. ความปลอดภัยในการใช้งาน	ระบบหยุดฉุกเฉินตอบสนองทันที ไม่มีความเสี่ยง	4.55	มาก
4. ความเสถียรของระบบ	ความต่อเนื่อง ความลื่นไหล และความนิ่งในการทำงาน	4.29	มาก
5. ความง่ายในการเรียนรู้การใช้งาน	ใช้เวลาเรียนรู้ไม่นาน ปุ่มคำสั่งชัดเจน	4.52	มาก
คะแนนเฉลี่ยรวม	**สรุปความพึงพอใจโดยรวมจากทุกด้าน**	**4.42**	**มาก**



รูปที่ 8 การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้

การวิจัยครั้งนี้มีการเก็บข้อมูลจากอาสาสมัครจำนวน 30 คน เพื่อประเมินการใช้งานต้นแบบถุงมือหุ่นยนต์เพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพมือด้วยระบบควบคุมระยะไกลและความพึงพอใจของผู้ใช้งาน โดยก่อนดำเนินการวิจัย ผู้เข้าร่วมทุกคนได้รับการชี้แจงเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ รวมถึงสิทธิในการถอนตัวจากการวิจัยได้ตลอดเวลาโดยไม่ส่งผลกระทบใด ๆ การเข้าร่วมการวิจัยเป็นไปด้วยความสมัครใจ ทั้งนี้งานวิจัยไม่มีการเก็บข้อมูลส่วนบุคคลที่สามารถระบุตัวตนของผู้เข้าร่วมได้ และข้อมูลที่ได้รับจะถูกนำเสนอในภาพรวมเพื่อวัตถุประสงค์ทางวิชาการเท่านั้น

5. สรุปและอภิปรายผลการการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้ออกแบบและพัฒนาต้นแบบถุงมือหุ่นยนต์เพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพมือโดยใช้ระบบ IoT ซึ่งสามารถช่วยฟื้นฟูการเคลื่อนไหวของนิ้วมือผ่านระบบควบคุมอัตโนมัติและการสั่งงานจากระยะไกล โดยระบบประกอบด้วยถุงมือหุ่นยนต์ที่ใช้กลไกขับเคลื่อนแบบนิวแมติก (Pneumatic System) ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 และระบบควบคุมผ่านแพลตฟอร์ม Blynk ซึ่งรองรับการควบคุมการกำ–แบมือได้ทั้งแบบรวมและแบบแยกนิ้วอิสระ

ผลการทดสอบเชิงวิศวกรรมพบว่า ระบบสามารถตรวจจับและถ่ายทอดการเคลื่อนไหวของนิ้ว

มือได้อย่างถูกต้อง โดยมีเวลาในการตอบสนองเฉลี่ย 59 มิลลิวินาที ระยะเวลาดังกล่าวอยู่ในช่วงที่มนุษย์สามารถรับรู้การตอบสนองของระบบได้อย่างต่อเนื่องและใกล้เคียงเวลาจริง (Real-Time Interaction) จึงเหมาะสมต่อการใช้งานด้านการฟื้นฟูสมรรถภาพมือที่ต้องอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนไหวและการตอบสนองของอุปกรณ์อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ค่าการตอบสนองดังกล่าวอยู่ต่ำกว่าช่วงเวลาที่โดยทั่วไปยอมรับได้สำหรับงานด้าน Rehabilitation Robotics ซึ่งมักอยู่ในช่วงต่ำกว่า 100–200 มิลลิวินาที แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้รวดเร็วเพียงพอสำหรับการใช้งานแบบเรียลไทม์ นอกจากนี้ ค่าความแปรปรวนของเวลาตอบสนองอยู่ในระดับต่ำ สะท้อนถึงความเสถียรของระบบสื่อสารไร้สายและการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า เช่น Polygerinos et al. [11] และ Lim et al. [7] พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการพัฒนาโครงสร้างและกลไกของถุงมือหุ่นยนต์เป็นหลัก ขณะที่งานวิจัยนี้ได้บูรณาการระบบควบคุมแบบไร้สายและการเชื่อมต่อผ่านเครือข่ายอินเตอร์เน็ตเข้ามาเพิ่มเติม ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในลักษณะการฟื้นฟูที่บ้าน (Home-Based Rehabilitation) และรองรับการติดตามผลจากระยะไกลได้ จุดสำคัญของระบบที่พัฒนาขึ้น คือ การรองรับการควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแบบแยกอิสระผ่านถุงมือสะท้อนร่วมกับ Flex Sensor ในแต่ละนิ้ว ซึ่งช่วยให้สามารถฝึกการเคลื่อนไหวของนิ้วมือเฉพาะส่วนได้ นอกจากนี้ยังเลือกใช้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีต้นทุนต่ำและสามารถจัดหาได้ง่ายภายในประเทศ จึงเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการฟื้นฟูสมรรถภาพมือที่บ้านในอนาคต

อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบพบว่าระบบยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น การเกิดความหน่วงของเซอร์โวมอเตอร์ในสภาวะที่มีโหลดสูง และความไม่เสถียรของแรงดันไฟเลี้ยงที่อาจส่งผลต่อความต่อเนื่องของการทำงาน นอกจากนี้ การทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการทดสอบในระดับต้นแบบ โดยมีจำนวนรอบการทดลองและกลุ่มตัวอย่างที่จำกัด และยังไม่ได้ดำเนินการทดสอบกับผู้ป่วยจริง รวมถึงยังไม่มีการประเมินตามมาตรฐานความปลอดภัยทางการแพทย์ เช่น ISO 13482 สำหรับหุ่นยนต์ช่วยเหลือบุคคล (Personal Care Robots) [14] หรือ IEC 60601 สำหรับความปลอดภัยของอุปกรณ์ไฟฟ้าทางการแพทย์ [15] จึงไม่สามารถสรุปผลในเชิงคลินิกได้อย่างสมบูรณ์ ในด้านคุณค่าทางวิชาการ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงแนวทางการบูรณาการเทคโนโลยีไมโครคอนโทรลเลอร์ และระบบนิวแมติก เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ฟื้นฟูสมรรถภาพมือที่มีต้นทุนต่ำและสามารถเข้าถึงได้ง่าย ซึ่งมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้จริงในระบบสาธารณสุข โดยเฉพาะในบริบทของการฟื้นฟูที่บ้าน

สำหรับแนวทางการพัฒนาในอนาคต ควรมีการเพิ่มจำนวนรอบการทดสอบในสภาวะที่หลากหลาย การทดลองกับกลุ่มผู้ป่วยจริงในระดับคลินิก การพัฒนาระบบให้สามารถประเมินผลการฟื้นฟูได้แบบอัตโนมัติ และการปรับปรุงความเสถียรของระบบควบคุมและแหล่งจ่ายไฟ รวมถึงการออกแบบให้สอดคล้องกับมาตรฐานอุปกรณ์ทางการแพทย์ เพื่อรองรับการใช้งานในเชิงพาณิชย์และการใช้งานจริงในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยนี้จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

7. เอกสารอ้างอิง

[1] กองยุทธศาสตร์และแผนงาน, *สถิติสาธารณสุข พ.ศ. 2566*, กรุงเทพฯ: กองยุทธศาสตร์และแผนงาน สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข, 2566.

[2] GBD 2021 Stroke Collaborators, "Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990–2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021," *The Lancet Neurology*, vol. 23, no. 10, pp. 973–1003, 2024, doi: 10.1016/S1474-4422(24)00369-7.

[3] คคนันท์ งามเด่นเจริญศรี, "การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ช่วยใช้งานมือสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองที่มีแรงมือและแขนบางส่วนร่วมกับอาการเกร็งของนิ้วมือ," วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมทางการแพทย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2563.

[4] ตรีนุช อมรภิญโญเกียรติ, "บทบาทของการใช้หุ่นยนต์ฟื้นฟูผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองในโรงพยาบาลตากสิน," *วารสารสาธารณสุขและวิทยาศาสตร์สุขภาพ*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 2, หน้า 160–171, 2565.

[5] ศิวะพร ขาวอิ่น, พรสวรรค์ โพธิ์สว่าง, และ กฤติกานต์ พลงาม, "การศึกษาประสิทธิผลของการใช้ Robotic Assisted Therapy ร่วมกับการฟื้นฟูทางกิจกรรมบำบัดแบบดั้งเดิมในการเพิ่มความสามารถการควบคุมการเคลื่อนไหวรยางค์ส่วนบนผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองที่มีภาวะอัมพาตครึ่งซีก," *วารสารกรมการแพทย์*, ปีที่ 43, ฉบับที่ 4, หน้า 54–60, 2561.

[6] สุวรรณา วุฒิรณฤทธิ์, กนกวรรณ ศิลปกรรมพิเศษ, และ กฤษณา อุไรศรีพงศ์, "การพัฒนาอุปกรณ์ช่วยฟื้นฟูการเดินสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองที่มีภาวะขาอ่อนแรง," *วารสารวิจัยสุขภาพและการพยาบาล*, ปีที่ 39, ฉบับที่ 3, หน้า 194–204, 2566.

[7] D. Y.-L. Lim, H.-S. Lai, and R. C.-H. Yeow, "A bidirectional fabric-based soft robotic glove for hand function assistance in patients with chronic stroke," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 20, Art. no. 120, 2023, doi: 10.1186/s12984-023-01250-4.

[8] T. Bazina, M. Kladarić, E. Kamenar, and G. Gregov, "Development of rehabilitation glove: Soft robot approach," *Actuators*, vol. 13, no. 12, Art. no. 472, 2024, doi: 10.3390/act13120472.

[9] Y. Lee and H. Park, "Design optimization of a soft robotic rehabilitation glove based on finger workspace analysis," *Biomimetics*, vol. 9, no. 3, Art. no. 172, 2024, doi: 10.3390/biomimetics9030172.

[10] J. J. Daly and J. R. Wolpaw, "Brain–computer interfaces in neurological rehabilitation," *The Lancet Neurology*, vol. 7, no. 11, pp. 1032–1043, 2008, doi: 10.1016/S1474-4422(08)70223-0.

[11] P. Polygerinos, Z. Wang, K. C. Galloway, R. J. Wood, and C. J. Walsh, "Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 73, pp. 135–

143, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.robot.2014.08.014.

[12] H. In, B. B. Kang, M. Sin, and K.-J. Cho, "Exo-Glove: A wearable robot for the hand with a soft tendon routing system," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 22, no. 1, pp. 97–105, Mar. 2015, doi: 10.1109/MRA.2014.2362863.

[13] S.-H. Yang *et al.*, "An instrumented glove-controlled portable hand-exoskeleton for bilateral hand rehabilitation," *Biosensors*, vol. 11, no. 12, Art. no. 495, 2021, doi: 10.3390/bios11120495.

[14] Robots and Robotic Devices—Safety Requirements for Personal Care Robots, ISO 13482:2014, 2014.

[15] Medical Electrical Equipment—Part 1: General Requirements for Basic Safety and Essential Performance, Edition 3.2, IEC 60601-1:2005+AMD1:2012+AMD2:2020 CSV, Aug. 2020.