ระบบวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดแรงกด

วทัญญู ธิบูรณ์บุญ[1*] และ ชัยพร เขมะภาตะพันธ์[2]

[1]หลักสูตรวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
[2]วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
*watanyu@windowslive.com

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยกึ่งทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาระบบวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดแรงกดที่มีประสิทธิภาพใช้เป็นเครื่องมือตรวจวิเคราะห์ลักษณะการลงน้ำหนักใต้ฝ่าเท้า 2) สร้างกราฟมาตรฐานสำหรับใช้เปรียบเทียบลักษณะการลงน้ำหนักใต้ฝ่าเท้าขณะเดิน กลุ่มตัวอย่างประกอบด้วย 1) กลุ่มเป้าหมาย เลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จากผู้ที่มีโครงสร้างเท้าปกติ เดินลงน้ำหนักเท้าปกติ สวมรองเท้าที่ติดตั้งชุดอุปกรณ์วัดแรงกดได้ จำนวน 5 คน เพื่อนำข้อมูลไปสร้างกราฟมาตรฐาน และ 2) กลุ่มบุคคลทั่วไป โดยการสุ่มอย่างง่าย (Simple Random Sampling) จากผู้ที่สามารถสวมรองเท้าที่ติดตั้งชุดอุปกรณ์วัดค่าแรงกดได้ จำนวน 3 คน เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ขั้นตอนดำเนินการวิจัย 1) ออกแบบระบบโดยใช้เซนเซอร์ตรวจวัดแรงกดและไมโครคอนโทรลเลอร์ 2) พัฒนาอุปกรณ์และโปรแกรมให้การทำงานของระบบมีประสิทธิภาพ คลาดเคลื่อนไม่เกิน ±5% 3) สร้างกราฟมาตรฐานโดยนำระบบไปใช้กับกลุ่มเป้าหมาย และ 4) ตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ โดยนำระบบไปใช้กับกลุ่มคนทั่วไป

ผลการวิจัยพบว่า 1) ระบบวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดแรงกดมีประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย สามารถวัดค่าแรงกด ประมาลผล และแสดงผลในรูปแบบกราฟ โดยความคลาดเคลื่อนไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด 2) กราฟมาตรฐานที่สร้างขึ้นใช้เปรียบเทียบลักษณะการลงน้ำหนักใต้ฝ่าเท้าขณะเดินได้ โดยตำแหน่งใดที่ค่าแรงกดเบี่ยงเบนจากเส้นกราฟมาตรฐานในทิศทางสูงกว่าปกติ แสดงว่ามีแรงกดใต้ฝ่าเท้ามากซึ่งอาจส่งผลทำให้เท้าเกิดการบาดเจ็บ

คำสำคัญ: ระบบวัดแรงกด แรงกดใต้ฝ่าเท้า เซนเซอร์ตรวจวัดแรงกด

Underfoot Pressure Measurement System While Walking with a Pressure Sensor

Watanyu Tiboolboon[1*] and Chaiyaporn Khemapatapan[2]

[1]Department of Computer and Telecommunications Engineering. Faculty of College of innovative Technology and Engineering. Dhurakij Pundit University.
[2]Faculty of College of innovative Technology and Engineering. Dhurakij Pundit University.
*watanyu@windowslive.com

Abstract

This research is a quasi-experimental study with the following objectives: 1) to develop a foot pressure measurement system during walking using efficient pressure sensors as a tool for analyzing the characteristics of weight distribution under the feet, and 2) to create a standard graph for comparing the characteristics of weight distribution under the feet during walking. The sample groups consist of: 1) the target group selected through purposive sampling from individuals with normal foot structure and normal weight-bearing while walking, wearing shoes equipped with pressure measurement devices. There are a total of 5 participants in this group, and their data is used to create the standard graph. And 2) the general population group selected through simple random sampling from individuals who are capable of wearing shoes with pressure measurement devices. There are a total of 3 participants in this group, and they are used to evaluate the system's performance. The research process includes: 1) Designing the system using force sensors and microcontrollers to measure pressure, 2) Developing devices and software to ensure the system operates efficiently with a tolerance of ±5%, 3) Creating standard graphs for comparing the pressure distribution during walking, using the system on the target group, and 4) Evaluating the system's performance by applying it to a general population.

The research findings revealed that: 1) The system for measuring pressure under the feet while walking, using sensor-based force measurement, proved to be effective for the research objectives. It was able to accurately measure and analyze pressure values and present the results in graph format, with deviations within the specified criteria. 2) The generated standard graph allowed for a comparison of the distribution of pressure under the feet during walking. Any position where the pressure deviated significantly from the standard graph indicated higher-than-normal pressure, which could potentially lead to foot injuries.

Keywords: Pressure measurement system, Pressure under the foot, Pressure sensor for measuring pressure

1. บทนำ

เท้าเป็นอวัยวะสำคัญที่ทำหน้าที่ในการยืน เดิน วิ่งหรือกระโดดเพื่อทำกิจกรรมต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน รวมทั้งรองรับน้ำหนักตัวทั้งหมด เท้าประกอบด้วยกระดูกเล็ก ๆ จำนวน 26 ชิ้น จัดเรียงเป็นรูปโค้งโดยมีเอ็นยึดกระดูกเข้าด้วยกัน และกล้ามเนื้อช่วยทำให้เท้าเกิดความยืดหยุ่น (Flexibility) และความมั่นคง (Stability) ในการเคลื่อนไหว เท้าแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ทุกส่วนมีหน้าที่หลักในการยืนและเดิน โดยเท้าส่วนหน้า (Forefoot) มีหน้าที่ในการส่งแรงยันพื้นเพื่อให้เกิดการยกเท้าลอยขึ้นพ้นพื้นในระยะ Toe Off ของการเดิน เท้าส่วนกลาง (Midfoot) หรือบริเวณอุ้งเท้า มีหน้าที่รับและกระจายแรงกระทำขณะที่ยืนหรือในระยะ Midstance ของการเดิน และเท้าส่วนหลัง (Hindfoot) ทำหน้าที่สัมผัสพื้นขณะวางเท้าลงกับพื้นใน ขณะเดินในระยะ Stance Phase เพื่อรับและกระจายแรงกระแทกที่เกิดขึ้นเมื่อปลายขามีการบิดหมุน ขณะร่างกายเคลื่อนที่แรงจาก

น้ำหนักตัวที่กระทำต่อเท้าจะมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อก้าวขาไปข้างหน้า ขาที่ติดอยู่กับพื้นจะทำหน้าที่รับน้ำหนักตัวสลับกันระหว่างเท้าซ้ายและเท้าขวา หากวิ่งหรือกระโดดเท้าแต่ละข้างจะรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นถึง 3-4 เท่าของน้ำหนักร่างกาย [1] การลงน้ำหนักของเท้าดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับแรงที่พื้นกระทำต่อฝ่าเท้าซึ่งหากมีแรงกระทำมาก ซ้ำ ๆ บ่อยครั้ง จะส่งผลทำให้เท้ามีปัญหาเกิดอาการบาดเจ็บบริเวณนิ้วเท้า ส้นเท้า อุ้งเท้า หลังเท้า หรืออื่น ๆ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่แรงกระทำ และเป็นอุปสรรคต่อการทำกิจกรรมต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน การป้องกันหรือแก้ไขปัญหาการบาดเจ็บของเท้าจึงถือเป็นเรื่องสำคัญโดยเฉพาะในกลุ่มผู้สูงวัยที่ผู้รู้แนะนำให้ออกกำลังกายด้วยการเดิน

การเดินออกกำลังกายเป็นทางเลือกอันดับแรก ๆ ของผู้สูงวัยหรือผู้มีสุขภาพร่างกายอ่อนแอ เป็นวิธีออกกำลังกายที่ใช้อุปกรณ์เฉพาะรองเท้าและสถานที่ที่เหมาะสม การเดินส่งผลดีต่อสุขภาพหลายประการ อาทิ ช่วยลดความเสี่ยงในการเป็นโรคหลอดเลือดสมอง ช่วยให้ปอดทำงานได้ดีขึ้น ช่วยให้ระบบไหลเวียนเลือดทำงานได้ปกติ ช่วยให้สุขภาพจิตดี อารมณ์แจ่มใส [2] แม้การเดินออกกำลังกายจะส่งผลดีต่อสุขภาพแต่การเดินที่ลงน้ำหนักเท้าไม่ถูกต้องหรือเดินนานเกินไปอาจทำให้เอ็นและกล้ามเนื้อบาดเจ็บได้ ผู้ออกกำลังกายด้วยการเดินหรือคนทั่วไปที่ชีวิตประจำวันต้องเดินเป็นเวลานานจึงควรหาวิธีป้องกันมิให้เท้าเกิดการบาดเจ็บ ดังนั้นหากทราบข้อมูลแรงกระทบที่กระทำต่อเท้าหรือฝ่าเท้าก็จะเป็นประโยชน์ต่อการป้องกันอาการบาดเจ็บของเท้าได้ตรงจุด

จากความสำคัญของเท้าที่มีต่อการใช้ชีวิตประจำวัน ปัญหาการบาดเจ็บของเท้าที่เกิดจากการเดินออกกำลังกาย และข้อดีของการทราบตำแหน่งที่แรงกระทำใต้ฝ่าเท้า ผู้วิจัยจึงสนใจพัฒนาระบบวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินโดยใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดแรงกดและไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีประสิทธิภาพ สร้างกราฟมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบการลงน้ำหนักของเท้า เพื่อเป็นเครื่องมือวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดิน และวิเคราะห์ลักษณะการลงน้ำหนักของเท้าเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน ซึ่งช่วยให้ทราบตำแหน่งที่เท้ามีแนวโน้มเกิดการบาดเจ็บ ทำให้พิจารณาหาวิธีป้องกันหรือแก้ไขปัญหาการบาดเจ็บของเท้าได้เหมาะสม

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อพัฒนาระบบวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดแรงกดที่มีประสิทธิภาพใช้เป็นเครื่องมือตรวจวิเคราะห์ลักษณะการลงน้ำหนักของเท้าที่ส่งผลต่อการเกิดอาการบาดเจ็บ

2.2 เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับใช้เปรียบเทียบลักษณะการลงน้ำหนักใต้ฝ่าเท้าขณะเดิน

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1.1 เท้า (Foot) เป็นอวัยวะส่วนที่อยู่ต่ำสุดของร่างกายทำหน้าที่รองรับน้ำหนักร่างกายทั้งหมด และเป็นอวัยวะสำคัญที่ร่างกายใช้ในการเคลื่อนที่ทำกิจกรรมต่าง ๆ ในชีวิตประจำวันทั้งการยืน เดิน วิ่ง กระโดด อีกทั้งทำหน้าที่พยุงกระดูกเชิงกรานและกระดูกสันหลังทำให้ร่างกายสมดุล เท้าประกอบด้วยกระดูกเล็กจำนวน 26 ชิ้น จัดเรียงเป็นรูปโค้งโดยมีเอ็นยึดกระดูก 107 เส้น กล้ามเนื้อ 19 มัด ยึดกระดูกเป็นรูปเท้า กระดูกเท้าแต่ละชิ้นจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่เป็นรูปโค้งทำให้เกิดอุ้งเท้า และด้านบนของเท้ามีลักษณะโค้งนูนช่วยให้เกิดความยืดหยุ่นและการกระจายน้ำหนักในขณะเคลื่อนไหว [3] กระดูกเท้าแบ่งออกเป็น 3 ส่วน แต่ละส่วนทำหน้าที่ในการยืนและเดิน โดยเท้าส่วนหน้ามีหน้าที่ในการส่งแรงยันพื้นเพื่อให้เกิดการยกเท้าลอยขึ้นพ้นพื้นในระยะ Toe Off ของการเดิน เท้าส่วนกลางมีหน้าที่รับและกระจายแรงกระทำขณะยืนหรือในระยะ Midstance ของการเดิน และเท้าส่วนหลังทำหน้าที่สัมผัสพื้นเป็นส่วนแรกของการวางเท้าลงกับพื้นขณะเดินในระยะ Stance Phase เพื่อรับและกระจายแรงกระแทกที่เกิดขึ้นเมื่อปลายขามีการบิดหมุน เมื่อร่างกายมีการเคลื่อนที่แรงจากน้ำหนักตัวที่กระทำต่อเท้าจะมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อก้าวขาไปข้างหน้า ขาที่ติดอยู่กับพื้นจะทำหน้าที่รับน้ำหนักตัวสลับกันระหว่างเท้าซ้ายและเท้าขวา การวิ่งหรือกระโดดเท้าแต่ละข้างจะรับน้ำหนัก เพิ่มขึ้นถึง 3-4 เท่าของน้ำหนักตัว [1]

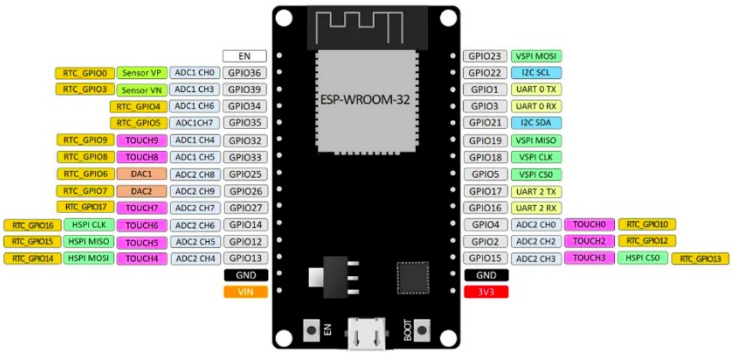
การเดินเป็นการเคลื่อนไหวของขาสองข้างสลับกันเป็นจังหวะ และมีการเคลื่อนไหวของลำตัวเพื่อให้เป็นจุดศูนย์ถ่วงของร่างกายขณะเคลื่อนที่ วงจรการเดินปกติเริ่มจากการลงสู่พื้นด้วยส้นเท้าและจบด้วยส้นเท้าของเท้าข้างเดียวกันลงสู่พื้น แบ่งเป็น 2 ระยะ คือ ระยะ Stance phase ใช้เวลาประมาณ 60% ของวงจรการเดิน และระยะ Swing phase ใช้เวลาประมาณ 40% ของวงจรการเดิน ระยะ Stance phase แบ่งเป็น 3 จังหวะ คือ 1) จังหวะเท้าลงสู่พื้น เริ่มต้นจากนำเท้าลงสู่พื้นซึ่งจะใช้ส้นเท้าค่อนไปทางด้านนอกเป็นส่วนใหญ่ มีเปอร์เซ็นต์เพียงเล็กน้อยที่ใช้เท้าส่วนกลางและส่วนปลายในการลงสู่พื้น และสิ้นสุดเมื่อเกิดการถ่ายน้ำหนักไปทางด้านหน้า 2) จังหวะกลางเท้า เริ่มต้นจากการถ่ายน้ำหนักมายังปลายเท้าและสิ้นสุดเมื่อส้นเท้าเริ่มยกขึ้นพ้นพื้น จังหวะนี้เท้าจะสามารถปรับสภาพจากเคยยืดหยุ่นในจังหวะลงสู่พื้นให้กระดูกกลับมายึด

ติดกันทำหน้าที่เป็นคานงัดในการเคลื่อนที่ไปด้านหน้าของจังหวะการส่งตัว และ 3) จังหวะการส่งตัว เริ่มต้นตั้งแต่ส้นเท้าเริ่มยกขึ้นพ้นพื้นและสิ้นสุดลงเมื่อนิ้วเท้าพ้นพื้น น้ำหนักจะถูกถ่ายมายังด้านหน้าตลอดฝ่าเท้า เมื่อส้นเท้ายกขึ้นขาจะหมุนออกด้านนอก เท้าจะเกิดการหงายอีกครั้ง [4] เมื่อศึกษาตำแหน่งการรับน้ำหนักของเท้าพบว่า ขณะยืนน้ำหนักตัวประมาณ 60% กดลงที่ ส้นเท้า อีก 40% กดลงที่ส้นเท้าส่วนหน้า ขณะเดินเท้ารับน้ำหนัก 120% ของน้ำหนักตัว และขณะวิ่งเท้าจะรับน้ำหนักมากถึง 275% ของน้ำหนักตัว [5] ดังนี้นปัญหาส่วนใหญ่ที่เกิดกับเท้าจึงมักจะเป็นเรื่องความเจ็บปวดขณะเคลื่อนไหว เช่น การปวด ส้นเท้าด้านหลังหรือเอ็นร้อยหวายอักเสบ รองช้ำหรือเอ็นฝ่าเท้าอักเสบหรือ การปวดจมูกเท้า เป็นต้น

3.1.2 Force Sensor เป็นอุปกรณ์ช่วยในการวัดปริมาณแรงที่กระทำต่อวัตถุ ประกอบด้วย ฟิล์มโพลีเมอร์ซึ่งเป็นสื่อกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนความต้านทานในลักษณะที่คาดเดาได้เมื่อมีแรงกระทำบนพื้นผิว หากใช้แรงกระทำกับพื้นผิวของฟิล์มโพลีเมอร์อนุภาคขนาดเล็กจะสัมผัสกับอิเล็กโทรดของเซนเซอร์ทำให้ความต้านทานฟิล์มเปลี่ยนไป จำนวนของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดกับค่าความต้านทานจะทำให้สามารถวัดปริมาณของแรงที่กระทำ [6]

3.1.3 การสื่อสารด้วยโปรโตคอล ESP-NOW กับ ESP32 ในการสื่อสารระหว่างESP32 ปัญหาหลักในการรับข้อมูลจากโหนดเซ็นเซอร์คือ การเข้าถึงเครือข่ายไร้สายในพื้นที่ แต่สามารถทำได้โดยใช้โปรโตคอลการสื่อสาร ESP-NOW บนบอร์ด ที่พัฒนาโดย Espressif ออกแบบเพื่อใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ผ่านทางระบบไร้สาย Wi-Fi รองรับการสื่อสารทั้งแบบเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส สามารถส่งข้อมูลได้สูงสุดเฟรมละ 250 ไบต์ รองรับการติดต่อกลับสำหรับการรับแจ้งเตือนผลการส่งข้อมูล ลักษณะการสื่อสารแบบ ESP-NOW สามารถสื่อสารได้ 2 ลักษณะ คือ 1) สื่อสารทางเดียว โดยทำงานได้ 3 รูปแบบ ดังนี้ หนึ่งผู้ส่งและหนึ่งผู้รับ หนึ่งผู้ส่งหลายผู้รับ หลายผู้ส่งหนึ่งผู้รับ และ 2) สื่อสารสองทิศทาง ข้อจำกัดของ ESP-NOW คือ ในการเข้ารหัสข้อมูลการสื่อสารจะทำได้เพียง 10 อุปกรณ์ในโหมด Station และ 6 อุปกรณ์ในโหมด SoftAP หรือ SoftAP+Station การสื่อสารแบบไม่เข้ารหัสสามารถทำได้ไม่เกิน 20 อุปกรณ์ [7]

3.1.4 ESP-WROOM-32 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความสามารถและเหมาะสมสำหรับการพัฒนาแอปพลิเคชันและงานเกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์ รองรับ WIFI มาตรฐาน 802.11 b/g/n และ บลูทูธ V. 4.2 สามารถควบคุมอุปกรณ์ด้วย GPIO (General Purpose Input/Output) โดยใช้สถาปัตยกรรม Tensilica LX6 จำนวน 2 คอร์ ใช้สัญญาณนาฬิกา 240 สามารถเขียนโปรแกรม ผ่าน Arduino IDE เหมือน Arduino ได้ และรองรับไลบารี่ส่วนใหญ่ของ Arduino การอัพโหลด กดปุ่ม Boot ค้างไว้ แล้วกดปุ่ม Upload รอจนขึ้นคำว่า Connection แล้วปล่อยปุ่ม Boot การจัดการขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังภาพที่ 1 [8]



ภาพที่ 1 ESP-WROOM-32

3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bucinskas, V. et al. [9] พัฒนาระบบพยากรณ์การล้มโดยใช้เซ็นเซอร์แบบสวมใส่ที่เท้า (Veostat) เพื่อหลีกเลี่ยงการเดินที่ไม่ประสานกันที่มีโอกาสทำให้เกิดการหกล้มของผู้สูงอายุ การทำงานของระบบมีการติดตั้งเซ็นเซอร์อยู่ในซับรองเท้าเพื่อกระจายแรงกดของเท้าที่วัดได้ นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์การเดิน จังหวะการก้าว การกระจายน้ำหนักระหว่างส้นเท้าและระยะทาง ทำการทดลองโดยให้ผู้ทดลองเดินปกติและเดินผิดปกติ ผลการวิจัยพบว่า ประสิทธิภาพความแม่นยำของการตรวจจับการเดินที่ผิดปกติ ถูกต้องร้อยละ 94

Natapatchakrid Thimabut et al. [10] พัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับแรงกดใต้ฝ่าเท้าชนิดพกพาอย่างง่าย โดยใช้แผ่นรองเท้าติดเซ็นเซอร์ชนิดตัวต้านทานแบบเพียโซเพื่อวัดแรงที่เกิดขึ้นตรงตำแหน่งส้นเท้า ปุ่มกระดูกนิ้วหัวแม่มือ และปุ่มกระดูกนิ้วก้อยเท้าขณะเดินแบบ Real Time นำอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นและเครื่องวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าประเภทแผ่นรองเท้า (F-Scan) ซึ่งใช้เป็นเครื่องอ้างอิงมาตรฐาน ไปวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าของกลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 คน เมื่อยืน 30 วินาที และเดินเป็นระยะทาง 5 เมตร ทำการเก็บข้อมูล 3 ครั้ง นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและค่าสหสัมพันธ์ภายในกลุ่ม (Intra-class Correlation Coefficients : ICCs) เปรียบเทียบความสอดคล้องของแรงกดใต้ฝ่าเท้า ผลการวิจัยพบว่า ค่า ICCs (α=0.05) ของแรงกดใต้ฝ่าเท้าของตำแหน่งส้นเท้า ปุ่มกระดูกนิ้วก้อยเท้า และปุ่มกระดูกนิ้วหัวแม่เท้าปรากฏดังนี้ ขณะยืน ค่า ICCs ของเท้าขวาเป็น 0.641 (0.370–0.811), 0.466 (0.133–0.705) และ 0.721 (0.491–0.857) ตามลำดับ เท้าซ้ายเป็น 0.727 (0.501–0.860), 0.502 (0.179–0.727) และ 0.545 (0.235–0.754) ตามลำดับ ขณะเดิน ค่า ICCs ของเท้าขวาเป็น 0.884 (0.771–0.943), 0.799 (0.620–0.899) และ 0.878 (0.760–0.940) ตามลำดับ เท้าซ้ายเป็น 0.826 (0.666–0.913), 0.796 (0.614–0.897) และ 0.711 (0.476–0.851) ตามลำดับ จากการพิจารณาค่า ICCs ที่ได้สรุปได้ว่า อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นและเครื่องอ้างอิงมาตรฐานมีความสอดคล้องกัน อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ในการตรวจวินิจฉัยการกระจายแรงกดใต้ฝ่าเท้าที่ผิดปกติได้

Pissanu et al. [11] พัฒนาต้นแบบเครื่องตรวจวัดแรงฝ่าเท้าเพื่อวัดแรงและวิเคราะห์ความดันฝ่าเท้าในรองเท้า โดยใช้เซนเซอร์วัดน้ำหนัก (Load Cell) ต่อกับ XH711 ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณสำหรับหาแรงกดฝ่าเท้าเชิงพื้นที่ของเท้าข้างละ 4 ตัว และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผล แสดงผลการวิเคราะห์แบบทันทีทันใด เพื่อคำนวนค่าความดันเฉลี่ยสูงสุด ผลการวิจัยพบว่า ผู้ทดลองที่ทำการยืนปกติ ยืนบนขาข้างหนึ่ง และยืนแบบก้าวเท้า แสดงให้เห็นความแตกต่างเฉลี่ย 6.94% ในขณะที่การยืนปกติและการทดสอบการยืนขาเดียวจะสูงกว่าผลลัพธ์ แสดงว่าจุดกดทั้ง 4 จุด มีข้อผิดพลาดในตำแหน่งของ COP อยู่ในระดับต่ำ การเพิ่มเซ็นเซอร์เพิ่มเติมจะช่วยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพแบบไดนามิกของการวัด COP

4. วิธีดำเนินการวิจัย

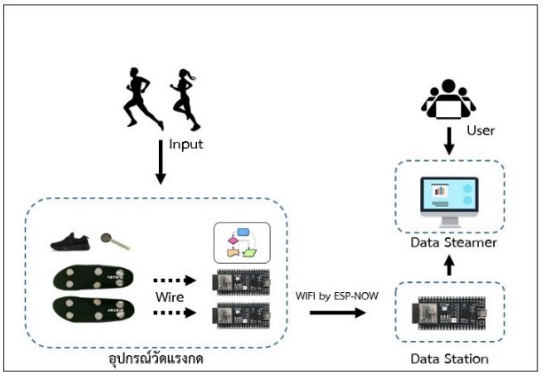
เพื่อให้ระบบวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินด้วยเซนเซอร์วัดแรงกดที่พัฒนามีประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย จึงดำเนินการวิจัยตามลำดับขั้นตอนดังนี้

4.1 ศึกษาแนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยศึกษาค้นคว้าแนวคิดทฤษฎีจากเอกสาร บทความ งานวิจัย และเว็บไซต์ที่เกี่ยวข้องกับระบบ เช่น โครงสร้างเท้าและการเคลื่อนไหว ปัญหาและความผิดปกติของเท้า เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย WIFI โปรโตคอล ESP-NOW ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP-32 เซนเซอร์วัดแรง (FSR) เป็นต้น

4.2 วิเคราะห์และออกแบบระบบ

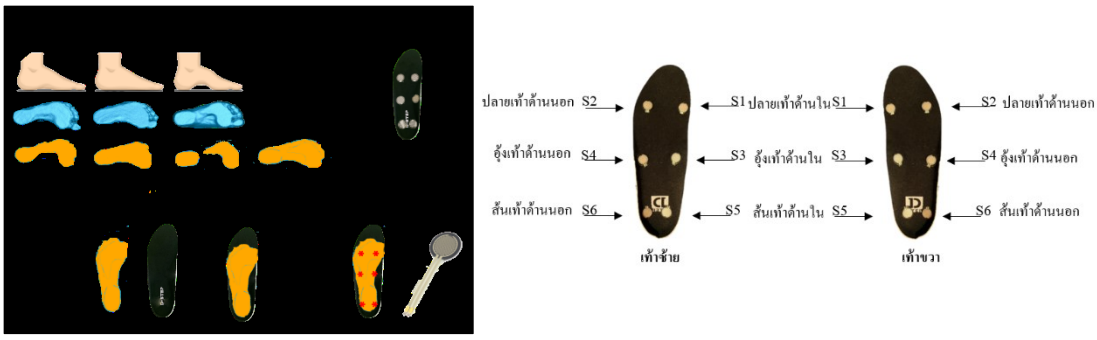
4.2.1 ออกแบบการทำงานของระบบ ผู้วิจัยวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างเท้า การลงน้ำหนักใต้ฝ่าเท้าขณะยืนและเคลื่อนที่ นำเซ็นเซอร์ตรวจวัดแรงกดและไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้กับระบบเพื่อรับแรงกดใต้ฝ่าเท้า และพัฒนาโปรแกรมรับค่าจากเซนเซอร์รับแรงกดและส่งค่าไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ แนวคิดการทำงานของระบบในภาพรวมแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แนวคิดการทำงานของระบบวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดแรงกด

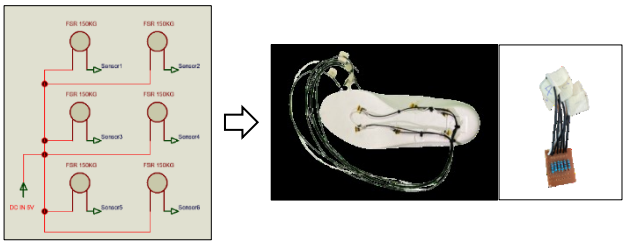
4.2.2 พัฒนาอุปกรณ์ของระบบ

1. วิเคราะห์และกำหนดตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์วัดแรงกด โดยวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างเท้า การลงน้ำหนักใต้ฝ่าเท้าขณะยืนและเคลื่อนที่ กำหนดตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์วัดแรงกดบนพื้นรองเท้า จำนวน 6 จุด เพื่อกระจายจุดรับแรงกดใต้ฝ่าเท้าโดยใช้เทคนิคการซ้อนภาพกราฟิก กำหนดสัญลักษณ์และชื่อแต่ละตำแหน่งเพื่อการแสดงผล ดังภาพที่ 3



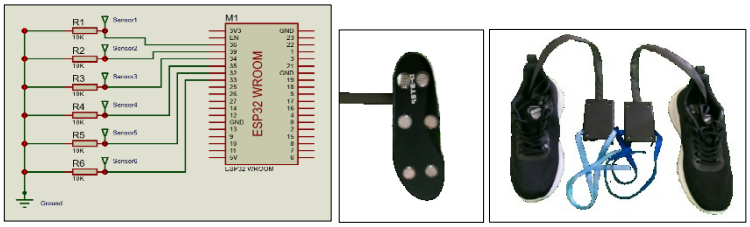
ภาพที่ 3 ตำแหน่ง สัญลักษณ์ และชื่อตำแหน่งในการติดตั้งเซนเซอร์วัดแรงกดใต้ฝ่าเท้า

2. ออกแบบวงจรและเชื่อมต่อกับวงจรเซนเซอร์วัดแรงกดโดยใช้สาย Ultra Light Style เบอร์ 26 กำหนดให้สายสีขาวเป็นไฟเลี้ยง 5 โวลต์ สายสีดำเป็นสายส่งข้อมูลของเซนเซอร์วัดแรงกดที่ติดตั้ง ดังแผนภาพวงจรในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 โครงสร้างวงจรเซนเซอร์ตรวจวัดแรงกดและการเชื่อมต่อกับวงจรเซนเซอร์วัดแรงกด

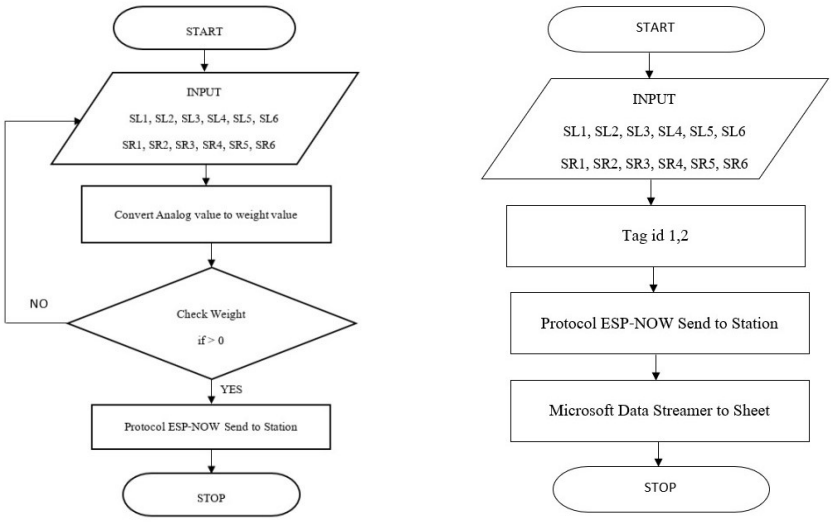
3. เชื่อมต่อวงจรเซนเซอร์วัดแรงกดเข้ากับ ESP32 WROOM แล้วประกอบอุปกรณ์วัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าที่เชื่อมต่อวงจรเรียบร้อยแล้วเข้ากับแผ่นรองเท้าและรองเท้าให้พร้อมใช้งาน ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การเชื่อมต่อวงจรเซนเซอร์วัดแรงกดเข้ากับ ESP32 WROOM และรองเท้าที่ประกอบอุปกรณ์วัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าพร้อมใช้งาน

4.2.3 ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมระบบ

1. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมส่งค่าอุปกรณ์วัดแรงกดไป data station และส่งข้อมูลจาก Data station ไป Data streamer ดังผังงานเพื่อพัฒนาโปรแกรมดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ผังงานโปรแกรมส่งค่าอุปกรณ์วัดแรงกดไป data station (1) และส่งข้อมูลจาก Data station ไป Data streamer (2)

2. พัฒนาโปรแกรมสื่อสารระหว่าง ESP32 WROOM ของระบบที่ออกแบบ ลักษณะการสื่อสารให้ส่งข้อมูลจาก 2 อุปกรณ์ ไปยังอุปกรณ์รับข้อมูล

3. พัฒนาส่วนรายงานค่าแรงกดใต้ฝ่าเท้าจำแนกตามตำแหน่งในรูปแบบกราฟเส้นตรงเพื่อเปรียบเทียบลักษณะการลงน้ำหนักเท้ากับกราฟมาตรฐาน

4.3 ทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์และโปรแกรม

ดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์และโปรแกรมในระบบ โดยพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์และโปรแกรมจากความถูกต้องเที่ยงตรง ความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้ โดยกำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ได้เท่ากับ $\pm$ 5% ลำดับการทดสอบมีดังนี้

1. ทดลองหาค่าความต้านทานที่ทำให้เซนเซอร์วัดแรงกดได้แม่นยำ โดยใช้ความต้านทานมาตรฐาน 3 ค่า 10, 15 และ 20 kΩ ต่อวงจรเข้ากับเซนเซอร์วัดแรงกด ใช้แรงขนาด 5, 10 และ 15 kg กดลงบนเซนเซอร์วัดแรงกด อ่านค่าแรงกดที่เซนเซอร์วัดแรงกดรับได้ หาค่าแรงกดเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน หากค่าเฉลี่ยของแรงกดที่เซนเซอร์วัดแรงกดรับได้มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่เกินเกณฑ์ $\pm$ 5% แสดงว่าค่าความต้านทานนั้น ๆ เซนเซอร์วัดแรงกดได้แม่นยำ

2. ทดสอบความคงที่ในการวัดของเซนเซอร์วัดแรงกด โดยให้ผู้ทดสอบสวมรองเท้าที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงกดยืนและอ่านค่าแรงกดที่เซนเซอร์วัดแรงกดรับได้ของเท้าซ้ายและขวา ทำซ้ำ 5 ครั้ง หาผลรวมของแรงกดเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดสอบแต่ละครั้ง หากผลรวมของแรงกดเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดสอบแต่ละครั้งไม่เกินเกณฑ์ $\pm$ 5% แสดงว่าเซนเซอร์วัดแรงกดได้คงที่ เชื่อถือได้

3. ทดสอบความเที่ยงตรงในการรับ-ส่งข้อมูลจากอุปกรณ์วัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าไปที่ Data station ด้วย Protocol ESP-NOW และจาก Data Station ไปที่โปรแกรม Microsoft office excel ด้วย Microsoft data streamer โดยอ่านค่าผ่าน Serial Monitor ที่เชื่อมต่อกับ Data Station ทำการทดสอบโดยผู้ทดสอบสวมรองเท้าที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงกด ยืนและทดสอบส่งแรงกด 10 ครั้ง อ่านค่าแรงกดที่เซนเซอร์วัดแรงกดรับได้ เปรียบเทียบข้อมูลที่อุปกรณ์รับ-ส่งแต่ละครั้ง หากพบว่าข้อมูลที่รับ-ส่งแต่ละครั้งตรงกันทุกจุด แสดงว่าการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์วัดแรงกดใต้ฝ่าเท้ากับ Data station และระหว่าง Data Station กับโปรแกรม Microsoft office excel มีความเที่ยงตรง

4.4 สร้างกราฟมาตรฐาน

นำระบบที่ผ่านการทดสอบประสิทธิภาพไปใช้กับกลุ่มเป้าหมายซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างที่ได้จากการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จากผู้ที่มีโครงสร้างเท้าปกติ เดินลงน้ำหนักเท้าปกติ ขนาดเท้าพอดีสวมรองเท้าที่ติดตั้งชุดอุปกรณ์วัดแรงกดได้ จำนวน 5 คน เพื่อยืนยันความถูกต้องน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้นำไปสร้างกราฟมาตรฐาน โดยให้กลุ่มเป้าหมายเดินเป็นระยะทาง 100 เมตร วัดค่าแรงกดใต้ฝ่าเท้า หากค่าแรงกดที่เซนเซอร์วัดแรงกดรับได้ของทุกคนมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด $\pm$ 5% แสดงว่าข้อมูลที่ระบบวัดได้มีความถูกต้องเที่ยงตรง เชื่อถือได้ จะนำไปสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับใช้เปรียบเทียบลักษณะการลงน้ำหนักใต้ฝ่าเท้าขณะเดิน

4.5 ตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

เพื่อตรวจสอบและยืนยันประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ผู้วิจัยจึงนำระบบพร้อมกราฟมาตรฐานไปใช้กับกลุ่มคนทั่วไปซึ่งได้จากการสุ่มอย่างง่าย (Simple Random Sampling) จากผู้ที่สวมรองเท้าซึ่งติดตั้งชุดอุปกรณ์วัดค่าแรงกดได้ จำนวน 3 คน ทำการทดสอบโดยวิธีการเดิม ระบบจะอ่านค่าแรงกดใต้ฝ่าเท้า ประมวลผลข้อมูล และรายงานผลในรูปแบบของกราฟจำแนกตามตำแหน่งเซนเซอร์รับแรงกดเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการลงน้ำหนักใต้ฝ่าเท้าขณะเดินเพื่อป้องกันการบาดเจ็บของเท้า

5. ผลการวิจัย

5.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์และโปรแกรม

5.1.1 เมื่อใช้ความต้านทานมาตรฐาน 10, 15 และ 20 KΩ ต่อวงจรเข้ากับเซนเซอร์วัดแรงกด และใช้แรงกดบนเซนเซอร์วัดแรงกดขนาด 5, 10 และ 15 kg ผลการทดลองพบว่า ค่าความต้านทานที่ทำให้เซนเซอร์วัดแรงกดรับค่าได้แม่นยำโดยค่าเฉลี่ยของแรงกดที่รับได้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด $\pm$ 5% คือ 10 KΩ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ความต้านทาน 10 KΩ กับระบบวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดแรงกด

5.1.2 ผลการทดสอบความคงที่ในการวัดของเซนเซอร์วัดแรงกด จากการให้ผู้ทดสอบที่มีน้ำหนักตัว 75.6 kg ยืนทดสอบ 5 ครั้ง ผลการทดสอบพบว่า ผลรวมของแรงกดเฉลี่ยที่เซนเซอร์วัดแรงกดรับได้แต่ละครั้งเท่ากับ 73.6, 75.2, 76.0, 74.4 และ 76.0 kg ตามลำดับ อยู่ในช่วง $\pm$ 5% ของน้ำหนักตัวที่กดลงคือ 71.9-79.3 kg ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละครั้งเท่ากับ 2.6, 0.5, 0.5, 1.6 และ 0.5% ตามลำดับ ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด $\pm$ 5% แสดงว่า เซนเซอร์วัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าได้คงที่มีความเชื่อถือได้ในการวัด

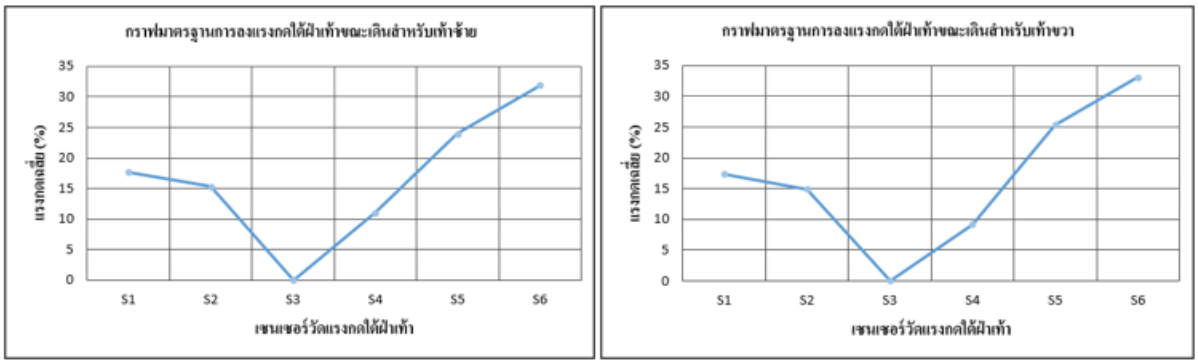
5.1.3 ผลการทดสอบความเที่ยงตรงในการรับ-ส่งข้อมูลของอุปกรณ์และโปรแกรมในระบบ

1. ผลการทดสอบความเที่ยงตรงในการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์วัดแรงกดใต้ฝ่าเท้ากับ Data station ด้วย Protocol ESP-NOW ซึ่งกดรับและอ่านค่าผ่าน Serial Monitor ที่เชื่อมต่อกับทั้งสองอุปกรณ์ พบว่า ข้อมูลทั้งหมดที่รับ-ส่งถูกต้องตรงกัน คิดเป็น 100%

2. ผลการทดสอบความเที่ยงตรงในการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างระหว่าง Data Station ด้วย Microsoft data streamer ไปที่โปรแกรม Microsoft office excel โดยอ่านค่าผ่าน Serial Monitor ที่เชื่อม ต่อกับ Data Station พบว่าข้อมูลทั้งหมดที่รับ-ส่งถูกต้องตรงกัน คิดเป็น 100%

5.2 ผลการใช้งานระบบกับกลุ่มเป้าหมายและสร้างกราฟมาตรฐาน

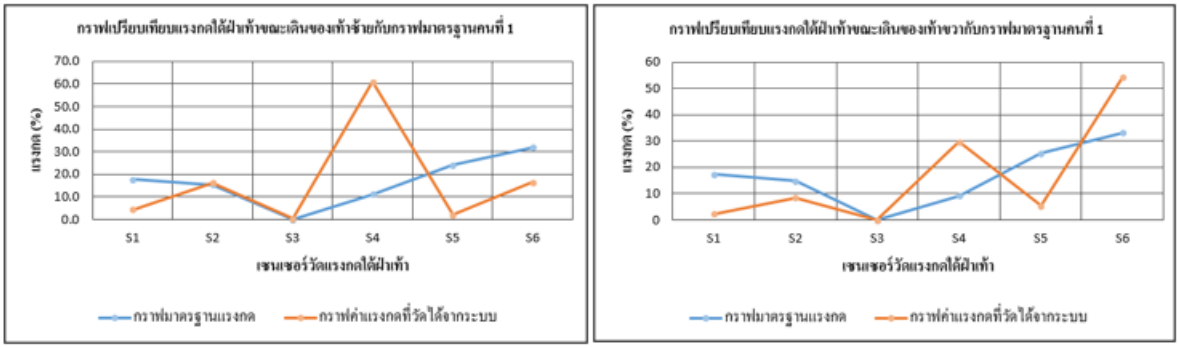
จากการนำระบบที่ผ่านการทดสอบประสิทธิภาพแล้วไปใช้งานกับกลุ่มเป้าหมาย จำนวน 5 คน พบว่า แรงกดที่อ่านค่าได้จากเท้าซ้ายและเท้าขวาของทั้ง 5 คน มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด $\pm$ 5% และค่าแรงกดเฉลี่ยรวมเท้าซ้าย เท่ากับ 70.8 kg เท้าขวา เท่ากับ 70.9 kg ไม่เกินเกณฑ์ $\pm$ 5% ของน้ำหนักตัวเฉลี่ย (67.6-74.6 kg) และค่าความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 0.5% และ 0.4% ตามลำดับ ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด $\pm$ 5% แสดงว่า ค่าแรงกดใต้ฝ่าเท้าที่วัดได้มีความเที่ยงตรง เมื่อนำเปอร์เซ็นต์ของแรงกดเฉลี่ยรวมของเท้าซ้ายและเท้าขวาไปสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบและวิเคราะห์ลักษณะการลงน้ำหนักใต้ฝ่าเท้าขณะเดิน ได้กราฟมาตรฐานของเท้าซ้ายและเท้าขวาดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 กราฟมาตรฐานการลงแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินของเท้าซ้ายและเท้าขวา

5.3 ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบกับกลุ่มคนทั่วไป

จากการนำระบบไปใช้กับกลุ่มตัวอย่างซึ่งเป็นกลุ่มคนทั่วไป จำนวน 3 คน วัดค่าแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินของเท้าซ้ายและเท้าขวา คำนวณเปอร์เซ็นต์ของแรงกดใต้ฝ่าเท้า แสดงผลในรูปแบบกราฟเปรียบเทียบแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินกับกราฟมาตรฐาน ตัวอย่างกราฟแสดงผลของกลุ่มตัวอย่างคนที่ 1 คนจาก 3 คน ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 กราฟเปรียบเทียบแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินที่อ่านค่าได้ (%) กับกราฟมาตรฐานของเท้าซ้ายและเท้าขวาของกลุ่มตัวอย่างคนที่ 1

จากภาพที่ 8 จะเห็นได้ว่า เส้นกราฟของแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินที่เซนเซอร์วัดแรงอ่านค่าได้ (%) ตำแหน่งที่ 4 ของเท้าซ้ายเบี่ยงเบนจากเส้นกราฟมาตรฐานในทิศทางสูงมากผิดปกติ แสดงว่ามีแรงกดลงบริเวณอุ้งเท้าด้านนอกของเท้าซ้ายมากผิดปกติ ส่วนเส้นกราฟของแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินที่เซนเซอร์วัดแรงอ่านค่าได้ (%) ตำแหน่งที่ 4 และตำแหน่งที่ 6 ของเท้าขวาเบี่ยงเบนจากเส้นกราฟมาตรฐานในทิศทางสูงกว่าปกติ แสดงว่ามีแรงกดลงบริเวณอุ้งเท้าด้านนอกและส้นเท้าด้านนอกของเท้าขวาผิดปกติ

6. สรุปผลการวิจัย

6.1 ผลการพัฒนาระบบวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดแรงกด พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพสามารถใช้เป็นเครื่องมือตรวจวิเคราะห์ลักษณะการลงน้ำหนักของเท้าที่ส่งผลต่อการเกิดอาการบาดเจ็บได้เที่ยงตรง เชื่อถือได้ เมื่อค่าความต้านทานมาตรฐานที่ใช้ต่อวงจรของระบบ เท่ากับ 10 kΩ

6.2 กราฟมาตรฐานที่สร้างขึ้นจากข้อมูลค่าแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินของกลุ่มตัวอย่างที่มีโครงสร้างเท้าปกติ และเดินลงน้ำหนักเท้าปกติ สามารถใช้เปรียบเทียบลักษณะการลงน้ำหนักใต้ฝ่าเท้าขณะเดินจำแนกตามตำแหน่งเซนเซอร์ตรวจวัดแรงได้ โดยตำแหน่งใดที่เส้นกราฟมีลักษณะซ้อนทับหรือคู่ขนานกับเส้นกราฟมาตรฐาน แสดงว่าลักษณะการลงน้ำหนักของเท้าเป็นปกติ หากเส้นกราฟเบี่ยงเบนสูงกว่าเส้นกราฟมาตรฐาน แสดงว่ามีการลงน้ำหนักใต้ฝ่าเท้าตำแหน่งนั้นๆ มากกว่าปกติ มีแนวโน้มส่งผลต่อการบาดเจ็บของเท้า

สรุป ระบบวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดแรงกดที่พัฒนาขึ้น และกราฟมาตรฐานสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าและเปรียบเทียบลักษณะการลงน้ำหนักของเท้าขณะเดินได้อย่างมีประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย หากเส้นกราฟมีลักษณะซ้อนทับหรือคู่ขนานกับเส้นกราฟมาตรฐาน แสดงว่าลักษณะการลงน้ำหนักของเท้าเป็นปกติ หากเส้นกราฟเบี่ยงเบนสูงกว่าเส้นกราฟมาตรฐาน แสดงว่ามีการลงน้ำหนักใต้ฝ่าเท้า ณ ตำแหน่งนั้น ๆ มากกว่าปกติ ซึ่งจะส่งผลต่อการบาดเจ็บของเท้ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดแรงกดที่กระทำต่อเท้า

จากผลการวิจัยที่พบว่า ระบบวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินด้วยเซนเซอร์ตรวจแรงกดที่พัฒนาขึ้นวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินได้เที่ยงตรงและคงที่ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำงานของระบบ วิเคราะห์ สังเคราะห์ข้อมูลที่ได้ก่อนออกแบบการทำงานของระบบ กำหนดเกณฑ์พิจารณาประสิทธิภาพการทำงานของระบบจากค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของอุปกรณ์วัดแรงกดที่ผู้ผลิตระบุไว้ ทดลองหาค่าความต้านทานที่ทำให้เซนเซอร์วัดแรงกดได้แม่นยำ ทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์และโปรแกรมก่อนนำไปใช้ ส่งผลทำให้ระบบวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าขณะเดินที่พัฒนามีประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย สอดคล้องกับการวิจัยของ Natapatchakrid Thimabut et al. [10] ที่พัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับแรงกดใต้ฝ่าเท้าชนิดพกพาโดยใช้แผ่นรองเท้าติดเซ็นเซอร์ชนิดตัวต้านทานแบบเพียโซวัดแรงที่เกิดขึ้นตรงตำแหน่งส้นเท้า ปุ่มกระดูกนิ้วหัวแม่มือ ปุ่มกระดูกนิ้วก้อยเท้าขณะเดิน และอุปกรณ์ตรวจจับแรงกดพสามารถตรวจวินิจฉัยการกระจายแรงกดใต้ฝ่าเท้าที่ผิดปกติได้ การวิจัยของ Bucinskas [9] ที่พัฒนาระบบพยากรณ์การล้มโดยใช้เซ็นเซอร์แบบสวมใส่ที่เท้าและติดตั้งเซ็นเซอร์อยู่ในซับรองเท้าเพื่อกระจายแรงกดของเท้าที่วัดได้ และพบว่าระบบมีความแม่นยำในการตรวจจับการเดินที่ผิดปกติถูกต้องร้อยละ 94

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 เพื่อลดปัญหาความคลาดเคลื่อนในการวัดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของสาย ควรเลือกใช้สายที่ทนต่อการบิดงอเชื่อมต่ออุปกรณ์

7.2 เพื่อให้การวัดค่าแรงกดใต้ฝ่าเท้ามีความแม่นยำสูงขึ้น ควรเลือกใช้เซ็นเซอร์วัดแรงที่ระบุค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า ±5% หรือเลือกใช้อุปกรณ์วัดแรงกดอื่นที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำทดแทน

7.3 ควรให้คำแนะนำวิธีสวมรองเท้าที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงกด วิธีการเดินที่ถูกต้องแก่ผู้รับการทดสอบ และตรวจสอบความพร้อมก่อนทำการทดสอบ

7.4 ควรวิจัยพัฒนาต่อยอดระบบวัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าด้วยเซนเซอร์วัดแรงสำหรับใช้ในสถานการณ์อื่น เช่น การวิ่ง การเดินของผู้ที่มีโครงสร้างของร่างกายผิดปกติ เป็นต้น

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Torkamol Kamolrat. (2004). *Supplementary teaching materials for the course on Orthopedic Physical Therapy 2: Diseases of the Ankle and Foot.* [unpublished manuscript]. Faculty of Medical Technology of Khon Kaen University. (In Thai)

[2] Somkid Sihakot. (21, March, 2022). *Effects of foot vibration apparatus on physical recovery level After exercise walking*. [Paper Presentation], The 15th National and International Research Presentation Conference, Suan Sunandha Rajabhat University. (In Thai)

[3] moana. (n.d.). *Get to Know Foot Structure*. FOOT EFX. http://www.healthyfootefx.com/ndex.php?lay=show&ac=article&Id=539522802&Ntype=8. URL (In Thai)

[4] Michaud, Thomas C. (1993). *Foot Orthose and Other Forms of Conservative Foot Care*. N.P.: Williams & Wilkins.

[5] Firstphysioclinic. (6, March, 2015). *Misshapen Feet*. http://www.firstphysioclinic.com/. URL (In Thai)

[6] Pasic, R. (2021, February 19). *ESP-NOW communication protocol with ESP32* [Paper Presentation], Revija za univerzalno odliÿnost, no.37 Bitola North Macedonia.

[7] Parede, J. (2023, April 15). What is a Force Sensor: Working Principle and Applications. https://th.jf-parede.pt/

[8] Robotsiam (9, March, 2015). ESP32 Development Board WiFi. https://www.robotsiam.com/product /123/devkitc-v2-esp32-development-board-wifi-bluetooth. URL (In Thai)

[9] Bucinskas, V. Dzedzickis, A. Rozene, J. Subaciute-Zemaitiene, J. Satkauskas, I. Uvarovas, V. Bobina, R. Morkvenaite-Vilkonciene, I. (2021). *Wearable Feet Pressure Sensor for Human Gait and Falling Diagnosis*. National Center For Biotechnology information. Vilnius Gediminas Technical University. [Master's thesis]. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8347941/.

[10] Natapatchakrid Thimabut, Siriporn Janchai, Arporn Teeramongkonrasamee, & Areerat Suputtitada. (2014). *Development of a simple portable device for plantar pressure measurement for improvement of foot assessment*, Chulalongkorn Medical Journal, 58(3), 223-233. .(In Thai)

[11] Pissanu Khumeechai. (7, November, 2020). *Prototype for measurement foot pressure meter*. [Paper Presentation],The 8th National and International Academic Conferences and Research Presentations, Khon Kaen International Convention and Exhibition Center. (In Thai)