

การพัฒนาเครื่องรับรู้สำหรับตรวจวัดพฤติกรรมหินโรยทางรถไฟ Development of Prototype for Monitoring the Railway Ballast Behavior

กฤษฎา ชีโนวัง* และ พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม
Kidsada Cheenowang* and Peerapong Jitsangiam

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University

* Corresponding author e-mail: Kidsada_Chee@cmu.ac.th

(Received: September 30, 2020, Revised: November 9, 2020, Accepted: November 17, 2020)

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์และประเมินพฤติกรรมชั้นหินโรยทางรถไฟ ในอดีตได้ประเมินพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุโดยอาศัยวิธีการทางตัวเลขของสมการเชิงประจักษ์ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงได้ ต่อมาได้มีการพัฒนาให้มีการตรวจวัดพฤติกรรมด้วยการติดตั้งเครื่องมือทดสอบในสนามเพื่อประเมินพฤติกรรมที่เกิดขึ้นขณะใช้งานแต่การตรวจวัดพฤติกรรมนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการรับ-ส่งข้อมูลและการที่เครื่องมือทดสอบส่งสัญญาณผ่านสายจะทำให้เครื่องมือตรวจวัดขาดอิสระการเคลื่อนตัวซึ่งทำให้การตรวจวัดพฤติกรรมมีความคลาดเคลื่อน ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีเป้าหมายในการสร้างเครื่องมือการตรวจวัดที่แม่นยำและสามารถอธิบายพฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้นขณะใช้งาน โดยเครื่องมือตรวจวัดต้องมีลักษณะเหมือนอนุภาคหินโรยทางจำลองที่สามารถตรวจวัดพฤติกรรมและส่งข้อมูลที่ไต่ไปยังฐานข้อมูลเพื่อประมวลผลด้วยเทคโนโลยีไร้สายสามารถวัด ความเค้น และการเคลื่อนตัว ได้ในขณะเดียวกัน ผลจากการศึกษาวิจัย สามารถสร้างต้นแบบของเครื่องวัดดังกล่าวได้ โดยใช้การตรวจวัดความเค้นด้วย Flex Sensor รุ่น RP-S40-ST ตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้วย Gyro Sensor รุ่น GY-521 (MPU6050) และประมวลผลด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น Wemos D1 mini ที่สามารถส่งสัญญาณแบบไร้สายได้ และใช้วงจรแผ่นพิมพ์เพื่อลดขนาดของเครื่องตรวจวัด ซึ่งเมื่อมีการเชื่อมต่อพบว่าเครื่องตรวจวัดสามารถใช้งานได้จริงและส่งข้อมูลที่ตรวจวัดได้ไปยังฐานข้อมูลบน google platform

คำสำคัญ: เครื่องรับรู้, หินโรยทางรถไฟ, พฤติกรรมชั้นหินโรยทาง

Abstract

The analysis and evaluation of ballast behavior, in the past, were relied upon the estimation of stress and strain of a material through a numerical method of empirical formulas. By doing this, a scientific link between real material behavior and calculated results did not exist. Consequently, in-field monitoring systems were established to evaluate such ballast behavior based on the electrical and wire measurement technologies. However, for the long-term performance of the rail ballast track, data collection and transmission of the in-field monitoring system following such wire technologies were not precise and persistent due to the degree of freedom of installed measuring devices was incompatible with ballast movement characteristics under the in-service train conditions. This study aimed to create a single unit of the measuring device with a sensor system following the wireless technologies capable of capturing the stress and the movement of the ballast under the in-service rail condition. Study findings showed that such a single unit of the wireless measuring device could be functionally fabricated using a steel frame with a flexible cover. The wireless sensor system of flex sensor (RP-S40-ST) for the stress measurement and the gyro sensor (GY-521 MPU6050) for the movement measurement was set up inside a

fabricated unit. The data processing system relied on the microcontroller of Wemos D1 mini. This single unit of the measuring device with a wireless sensor system could be used functionally to measure the stress and the movement as expected.

Keywords: Sensor, Ballast, Ballast Behaviors

1. บทนำ

โครงสร้างถนนและระบบรางเป็นโครงสร้างส่วนที่มีการก่อสร้างเพิ่มเติมบนชั้นดินเดิม (Additional Layer) ทำหน้าที่หลักเป็นโครงสร้างส่วนที่ทำหน้าที่ในการรับแรงกระทำที่มาจากการใช้งานถนน/ราง และเป็นตัวกลางในการถ่ายแรงลงสู่ชั้นดินเดิมเพื่อป้องกันการพังเสียหายของชั้นดิน โดยเมื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมที่ตอบสนองต่อแรงกระทำนี้ คือ พฤติกรรมที่แรงกระทำทำให้เกิดความเค้นขึ้นภายในโครงสร้าง และพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของอนุภาคภายใน ซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้ส่งผลต่อการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้าง ที่สัมพันธ์กับการใช้งานที่เกิดขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ความถูกต้องและแม่นยำ จำเป็นต้องมีการตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างที่รองรับถนนและรางที่แม่นยำด้วย

การตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างที่รองรับถนนและรางรถไฟนั้น ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างหลายวิธี เช่น การวิเคราะห์และประเมินพฤติกรรมจากข้อมูลที่ได้จากการเก็บตัวอย่างในสนามแล้วประเมินเชิงตัวเลขบนพื้นฐานทางทฤษฎี และการตรวจวัดพฤติกรรมจากการประเมินจากค่าข้อมูลที่ได้ในสนามที่เกิดจากการใช้งานจริง เป็นต้น แต่การตรวจวัดในอดีตที่ผ่านมายังไม่สามารถตอบสนองต่อข้อจำกัดที่เกิดขึ้นจริงในสนามได้ และในบางกรณีการตรวจวัดในสนามก็ยังไม่สามารถทำการตรวจวัดได้อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ จากหนังสือความรู้เบื้องต้นวิศวกรรมรถไฟ ของ เจน บุญเชื้อ (วิศวกรใหญ่ ฝ่ายการช่างโยธา การรถไฟแห่งประเทศไทย) (Boonsue, 2011) ได้แสดงทฤษฎีและการวิเคราะห์โครงสร้างทางรถไฟ โดยได้แสดงการคำนวณเพื่อให้ได้มาซึ่งการทรุดตัวในชั้นหินโรยทางและแรงที่กระทำแล้วถ่ายแรงมายังชั้นโครงสร้างต่าง ๆ โดยคำนวณบนสมมติฐานทฤษฎีคานายาวบนพื้นอีลาสติก แล้วกำหนดค่าตัวแปรจากสภาพทาง, น้ำหนักเพลา, ขนาดไม้หมอน, ระยะไม้หมอน, ความหนาหินของหินโรยทาง, ความเร็วของรถไฟ และลักษณะรูปร่างของราง จากการประเมินจากตัวแปรที่ได้จากตัวอย่างในสนามแล้ววิเคราะห์ในเชิงตัวเลข ข้อมูลที่ได้จากการประเมินเป็นข้อมูลที่แม่นยำในเชิงตัวเลขและการคำนวณ แต่ไม่สามารถอนุมานค่าที่ได้จากการประเมินเหล่านั้นเป็นตัวแทนของพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนามได้ อีก

ทั้งการประเมินในเชิงตัวเลขนี้ถูกจำกัดขึ้นบนสมมติฐานที่ ซึ่งหมายความว่าพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนามอาจมีเหตุปัจจัยที่มากกว่าสมมติฐานเหล่านั้นได้ โดยการวิเคราะห์นั้นไม่ได้ให้ความสำคัญเรื่องความถี่และความคาบของแรงกระทำ ซึ่งจะส่งผลถึงระยะการทรุดตัวของหินโรยทางในแนวตั้งอีกด้วย โดยการทดสอบที่ความถี่ต่ำ จะให้ค่าการทดสอบต่ำกว่าค่าที่ประเมินไว้ประมาณ 50% แต่เมื่อทดสอบที่ความถี่สูง จะให้ค่าการทดสอบที่ต่ำกว่าการประเมินเพียง 21% (Zhang, Zhao, Zhai, 2019) โดยทั้งนี้ ได้แนะนำการทดสอบว่าควรให้มีการทดสอบที่ให้น้ำหนักกระทำจากรถไฟ ความถี่ และความเร็วของรถไฟจากการใช้งานของรถไฟจริงเข้ามามีส่วนร่วมในการประเมินด้วย การตรวจวัดด้วยการค่าที่ได้จากการทดสอบในสนาม เป็นการประเมินพฤติกรรมโดยการออกแบบเครื่องและอุปกรณ์การตรวจวัดแล้วนำไปติดตั้งในสนาม ซึ่งอาจใช้วิธีติดตั้งที่หลากหลาย เช่น การตรวจวัดโดยการติดตั้งไปพร้อมกับการก่อสร้าง การติดตั้งหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จ เป็นต้น ซึ่งการทดสอบเพื่อประเมินพฤติกรรมด้วยวิธีเหล่านี้จะช่วยให้ได้ข้อมูลที่เป็นตัวแทนของพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนามได้ จากงานวิจัยของ Blanc et al. (2017) และ Duong et al. (2016) ได้ทำการวิจัยเพื่อทำการตรวจวัดพฤติกรรมโดยติดตั้ง Geophones เพื่อตรวจวัด Vertical Displacement velocity และ Stain gauge เพื่อตรวจวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง ซึ่งจะตรวจสอบทั้งในแนวตั้งในชั้นดินเดิมและตรวจสอบแนวราบในชั้นที่มีการปรับปรุงโครงสร้างใหม่ ส่วน Temperature sensors จะถูกติดตั้งในรอยต่อระหว่างชั้น Asphalt cement แล้วส่งสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดผ่านสายสัญญาณมายังหน่วยรับค่าและประมวลผลเก็บไว้ในฐานข้อมูลในสนาม แล้วจึงส่งข้อมูลที่ตรวจวัดได้ผ่านระบบไร้สายสัญญาณไปยังหน่วยประมวลผลกลาง แต่การตรวจวัดพฤติกรรมด้วยวิธีนี้มีข้อจำกัดคือ ชุดเครื่องรับรู้ตรวจวัดที่ทำการติดตั้งในสนามจะถูกยึดโยงด้วยสายสัญญาณทำให้การเคลื่อนตัวของเครื่องรับรู้ที่ใช้ตรวจวัดไม่มีความอิสระต่อการเคลื่อนตัว อีกทั้งค่าที่ได้จากการตรวจวัดยังทำการตรวจวัดและแสดงผลได้เพียงการเคลื่อนตัว ยังไม่สามารถตรวจวัดพฤติกรรมความเค้นที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำเมื่อมีการใช้งานได้ จากการวิจัยของ Stith (2004) ได้ทำ

การตรวจวัดพฤติกรรมที่เกิดขึ้นต่อทางรถไฟแต่มุ่งเน้นไปยังการตรวจวัดพฤติกรรมของรางด้วย Tekscan Sensor ซึ่งเป็นเครื่องรับรู้ที่ตรวจวัดการกระจายแรงดันโดยตรงที่เกิดขึ้นต่อรางและความเค้นที่เกิดขึ้นจากล้อที่สัมผัสต่อโครงสร้างรางรถไฟ ซึ่งการตรวจวัดพฤติกรรมนี้จะทำการติดตั้ง Tekscan Sensor ไว้ที่รอยต่อระหว่างไม้มอนรถไฟและรางรถไฟแล้วจึงทำการอ่านค่าที่ได้จากการตรวจวัดซึ่งถึงแม้ว่าการตรวจวัดนี้จะเป็นการวัดในสนามที่ให้ค่าข้อมูลการตรวจวัดจริงที่เกิดขึ้นและยังมีการทดสอบเพื่อเทียบความถูกต้องในห้องปฏิบัติการ แต่การตรวจวัดนี้ไม่สามารถใช้งานในการตรวจวัดชั้นโครงสร้างชั้นอื่นได้ เนื่องจาก Tekscan Sensor เป็นเครื่องรับรู้ที่มีลักษณะเป็นแผ่นโดยจะทำงานเมื่อมีการสัมผัสเครื่องรับรู้ทั้ง 2 ด้านและรับค่าจาก Pressure Sensitive Material ส่งไปยังตัวนำสัญญาณและเข้าสู่หน่วยประมวล ซึ่งการสัมผัสเครื่องรับรู้ทั้ง 2 ด้านนี้เมื่อต้องการนำไปประยุกต์ใช้ในโครงสร้างชั้นดินหรือหินโรยทางอาจไม่สามารถตอบสนองต่อพฤติกรรมความเค้นของแรงที่เกิดขึ้นในชั้นดินหรือหินโรยทาง ในทุกทิศทางได้

จากข้อจำกัดที่เกิดขึ้นในการตรวจวัดที่ผ่านมาในอดีตงานวิจัยนี้จึงศึกษาและมุ่งเน้นที่จะประดิษฐ์เครื่องตรวจวัดเพื่อประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างถนนและรางรถไฟบนพื้นฐานของเครื่องรับรู้ทดสอบที่มีความสามารถในการรับ-ส่งข้อมูลผ่านระบบไร้สายสัญญาณ (WiFi) เพื่อให้สามารถติดตั้ง/ฝังเครื่องตรวจวัดหรือ Prototype ไว้ภายในโครงสร้างที่รองรับถนนหรือทางรถไฟ ซึ่งจะทำให้การตรวจวัดพฤติกรรมนั้นคือค่าที่ได้จากการใช้งานจริง และเพื่อลดข้อจำกัดในการตรวจวัดในด้านความเป็นอิสระของอุปกรณ์ตรวจวัดกับอนุภาคไม่ให้ถูกยึดโยงด้วยระบบสายสัญญาณ อีกทั้งยังทำให้ข้อจำกัดในการรับ-ส่งข้อมูลที่ยังขาดความต่อเนื่อง (Real Time) ลดลง ด้วยการสร้างชุด Prototype ที่มีลักษณะรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด $7 \times 7 \times 7$ ลบ.ซม. เนื่องจาก Unland and Al-Khasawneh (2009) ได้แนะนำให้พิจารณาเรื่องปัจจัยรูปร่างของอนุภาคหินโรยทางที่ส่งผลต่อพฤติกรรมชั้นหินโรยทางด้วย ซึ่งพบว่ารูปร่างของอนุภาคหินโรยทางควรมีรูปร่างเกือบกลม หรือทรงลูกบาศก์ที่มีขนาดกว้าง : ยาว : สูง ที่มีสัดส่วนประมาณ 1 : 1 : 1 เนื่องจากจะให้ค่าแรงสัมผัส (Contact Force) และการถ่ายพลังงาน (Transferred Energy) ได้สูงที่สุด ในส่วนการประเมินพฤติกรรมความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจะใช้พื้นฐานจาก flex sensor แบบสี่เหลี่ยม รุ่น RP-S40-ST และใช้ร่วมกับ gyro sensor รุ่น GY-521 (MPU6050) เพื่อประเมินลักษณะการเคลื่อนไหว/เคลื่อนตัวของ Prototype ที่เกิดขึ้นในชั้นโครงสร้างที่รองรับถนนและรางรถไฟ และใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น

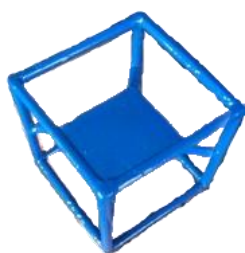
Wemos D1 mini ที่เปรียบเสมือนสมองกลของระบบในการประมวลผลและรับ-ส่งข้อมูลผ่านระบบไร้สายสัญญาณ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปแสดงผลยังฐานข้อมูลที่สร้างขึ้นใน Google Platform เนื่องจากเป็นฐานข้อมูลแบบเปิด (Open Source) ที่สามารถใช้งานอย่างทั่วไประยะต่อการเข้าถึงฐานข้อมูล

2. การออกแบบเครื่องตรวจวัด

การออกแบบรูปร่าง/รูปทรง เพื่อใช้เป็นต้นแบบเครื่องตรวจวัดพฤติกรรม (ซึ่งต่อไปจะเรียกเครื่องตรวจวัดพฤติกรรมนี้ว่า Prototype) จะคัดเลือกบนพื้นฐานที่สามารถตอบสนองกับการทดสอบในสภาพการใช้งานจริง และสามารถตรวจวัดได้ค่าที่ถูกต้อง โดยที่รูปร่าง/รูปทรงจะต้องส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของชั้นหินโรยทางรถไฟให้น้อยที่สุด

การหารูปร่างที่เหมาะสมโดยยึดถือขนาดที่เหมาะสม ซึ่งจะพิจารณาลักษณะทางกายภาพของขนาดหินโรยทางเป็นหลัก โดยขนาดอนุภาคของหินโรยทางที่ใช้ในการทำงานโครงสร้างทางรถไฟ จะอยู่ในช่วงขนาด 20 มม ถึง 60 มม อ้างอิงจาก BS812 Part 1 : (1975) ดังนั้นขนาดของเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมนี้ควรมีขนาดไม่เกิน 6 ซม. แต่เนื่องจากการทำเครื่องตรวจวัดที่ขนาด 6 ซม. จะทำให้ flex sensor หรือเครื่องรับรู้สำหรับตรวจวัดความเค้นที่เกิดขึ้นต่อ Prototype เหลือพื้นที่การโค้งงอน้อยเกินไป จึงทำให้ขนาดที่กำหนดไว้เพื่อให้สอดคล้องกับขนาดอนุภาคของหินโรยทางมากที่สุด คือ รูปร่างไม่เกิน 7 ซม

เมื่อได้ขนาดของรูปร่างที่กำหนดขึ้นว่ามีขนาดโดยประมาณที่ 7 ซม. รูปทรงที่เหมาะสมที่สุดในการจัดทำเครื่องมือทดสอบคือรูปทรงที่มีความเหลี่ยมมุมต่าง ๆ เพราะจะทำให้การเคลื่อนตัวของหินโรยทางรถไฟมีอิสระต่อกันและทำให้ได้ค่าจากการวัดที่แม่นยำ แต่ในความเป็นจริงในปัจจุบันยังไม่สามารถออกแบบขึ้นรูปวัสดุเป็นเหลี่ยมมุมให้ใกล้เคียงกับอนุภาคหินโรยทางธรรมชาติได้มากนัก เหตุผลอีกประการหนึ่งคือ ถึงแม้ว่าจะสามารถทำการขึ้นรูปทรงให้เหมือนอนุภาคหินโรยทางได้ เครื่องมือตรวจวัดนี้อาจไม่สามารถใช้งานได้จริงเนื่องจากไม่สามารถเทียบวัดค่าความถูกต้องของการทำงานเครื่องรับรู้ได้แม่นยำและจะส่งผลให้การสอบวัดความถูกต้องจากการวัดทำได้ยากมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงเลือกที่จะใช้รูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีขนาด $7 \times 7 \times 7$ ลบ.ซม. เพื่อให้มีขนาดที่เหมาะสมกับการทดสอบ และยังสามารถทำการสอบเทียบค่าความถูกต้องจากการวัดได้อีกด้วย ดังแสดงรูปที่ 1

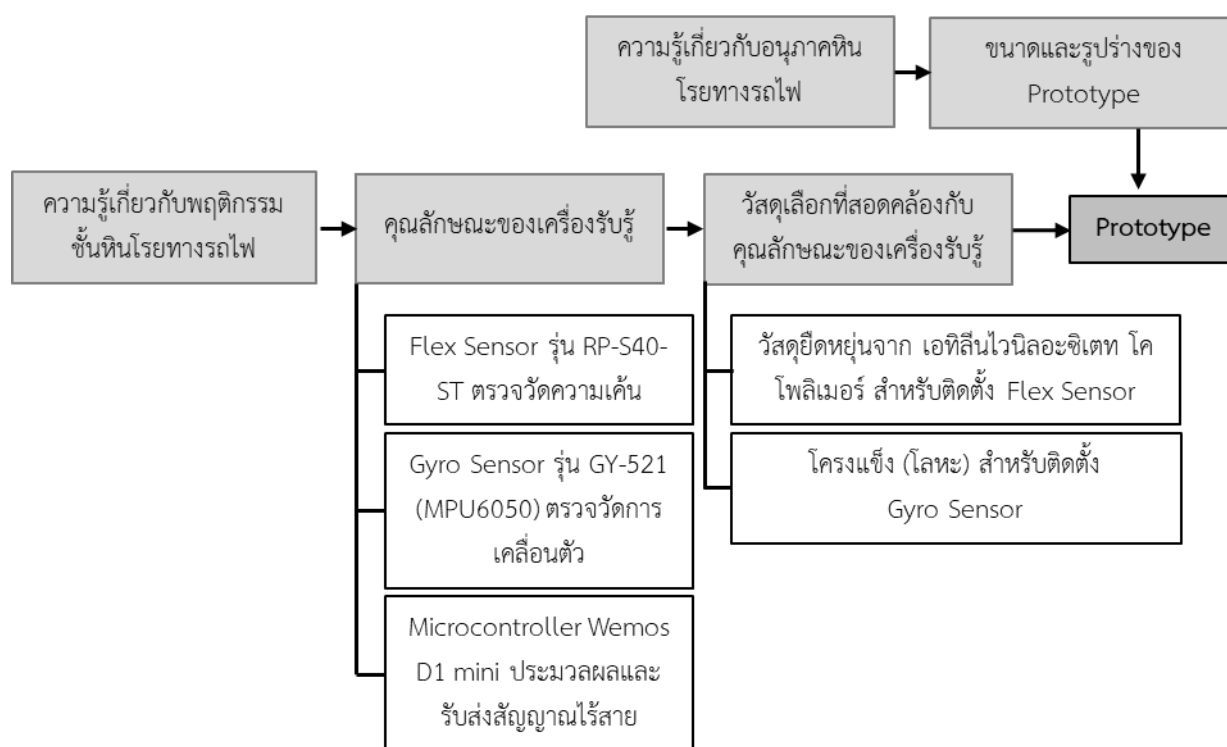


รูปที่ 1 โครงสร้างหลักของ Prototype รูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 7x7x7 ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm³)

นอกจากขนาดของเครื่องตรวจวัดหรือ Prototype แล้ว สิ่งที่สำคัญต่อมา คือ วัสดุที่เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งข้อจำกัดและการใช้งานของ Prototype นี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องรับรู้ที่จะนำมาใช้ เนื่องจากเครื่องรับรู้ที่จะนำมาใช้ประกอบเป็นเครื่องตรวจวัดหรือ Prototype นี้จะมีพฤติกรรมและหลักการทำงานที่แตกต่างกัน โดย flex sensor จะมีพฤติกรรมโดยอาศัยการแปลงค่าเนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่าง การอ่านค่าจากการโค้งงอ โดยจะนำมาใช้เพื่อการตรวจวัดค่าความเค้นที่กระทำที่ผิวของเครื่องตรวจวัด ดังนั้นวัสดุที่จะนำมาใช้ต้องเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง แข็งแรง และทนทาน ส่วน gyro sensor รุ่น GY-521 (MPU6050) เป็นเครื่องรับรู้ที่จะนำมาใช้เพื่อตรวจวัดมุมที่เปลี่ยนไปของเครื่องตรวจวัดและความเร่งของ Prototype นี้ไม่สามารถยึดติดกับวัสดุที่ผิวของ Prototype นี้ได้เนื่องจากจะทำให้ค่าตรวจวัดนี้เกิดการคาดเคลื่อน ที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของโครง Prototype

การเลือกวัสดุเพื่อประกอบเป็น Prototype เพื่อใช้ทดสอบพฤติกรรมนี้ จากที่กล่าวไปคือ เมื่อมีแรงมากระทำที่ผิวของ Prototype จะทำให้วัสดุที่ผิวที่มีความยืดหยุ่นเกิดการเคลื่อนตัว อันเนื่องมาจากแรงกระทำ ซึ่งในบางกรณี Prototype หรือรวมไปถึงอนุภาคหินรอยทางของโครงสร้างทางรถไฟจริงอาจไม่เคลื่อนตัวเนื่องจากแรงกระทำไม่ได้ ดังนั้น gyro sensor รุ่น GY-521 (MPU6050) จึงต้องมีวัสดุและการทำงานที่เป็นอิสระต่อ flex sensor และวัสดุที่จะนำมาใช้ในการประกอบ Prototype นี้ต้องมีลักษณะ โครงสร้างข้างในแข็งแรงเพื่อป้องกันไม่เกิดการเคลื่อนโดยไม่จำเป็น หรือให้เกิดการเคลื่อนตัวเสมือนอนุภาคหินรอยทาง อีกทางหนึ่งวัสดุที่มาห่อหุ้มที่ผิวต้องมีลักษณะยืดหยุ่นเพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานของ flex sensor ซึ่ง Prototype นี้จึงมีลักษณะ “อ่อนนอก แข็งใน”

จากหลักการที่ต้องการผิวของ Prototype ที่มีความยืดหยุ่นและโครงสร้างข้างในที่แข็งแรง จึงเลือกที่จะสร้างโครงสร้างภายในจากวัสดุหลักเพื่อคงรูปร่าง ซึ่งจะทำการเป็นลักษณะโครงเหล็กเส้นที่เชื่อมติดจนเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่เปิดพื้นที่ตรงกลางแต่ละด้านไว้ ซึ่งพื้นที่ผิวข้างที่เปิดพื้นที่ไว้จะใช้วัสดุชนิด เอทิลีนไวโนลอะซิเตท โคลิโพลิเมอร์ มาห่อหุ้ม เพื่อให้มีความยืดหยุ่นและพร้อมสำหรับติดตั้ง flex sensor ภายในช่องว่างภายในของทรงลูกบาศก์จะมีการทำฐานที่แบ่งพื้นที่เป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ใช้สำหรับติดตั้งชุดเครื่องรับรู้ gyro sensor และพื้นที่ส่วนที่ 2 จะมีไว้สำหรับพื้นที่เพื่อติดตั้งแหล่งจ่ายพลังงานให้แก่บอร์ดและ sensor



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการออกแบบ Prototype สำหรับตรวจวัดพฤติกรรมชั้นหินโรยทางรถไฟ

3. คุณลักษณะของเครื่องรับรู้

การตรวจสอบพฤติกรรมของชั้นหินโรยทางรถไฟ ที่ต้องการตรวจวัดมี 3 พฤติกรรม คือ พฤติกรรมของความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชั้นหินโรยทาง พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของชั้นหินโรยทาง และพฤติกรรมการพลิกตัว/การหมุนของหินในชั้นหินโรยทางรถไฟ ซึ่งมีเครื่องรับรู้ที่จำเป็นดังนี้

3.1 Flex sensor แบบสี่เหลี่ยม รุ่น RP-S40-ST (40*40 ตารางมิลลิเมตร (mm²))

การตรวจวัดพฤติกรรมความเค้นที่เกิดขึ้นภายในของชั้นหินโรยทาง จะอาศัยการทำงานของ flex sensor แบบสี่เหลี่ยม รุ่น RP-S40-ST (40*40 ตารางมิลลิเมตร) โดยอาศัยหลักการการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เกิดจากแรงกระทำ แล้วเกิดการแบ่งแรงดันจากตัวต้านทาน จึงอ่านค่าที่ได้จากการทดสอบ โดยหลักการในการเลือก flex รุ่นนี้ เนื่องจากเป็นเครื่องรับรู้ที่มีรูปร่างเป็นแผ่น 4 เหลี่ยมซึ่งเมื่อนำมาใช้ร่วมกับ Prototype ที่มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ตามที่ได้ออกแบบไว้จะทำให้ flex รุ่นนี้ สามารถใช้งานได้แม่นยำกว่า flex แบบเส้น ซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบใกล้เคียงกับความเค้นที่เกิดขึ้นต่อ Prototype นี้



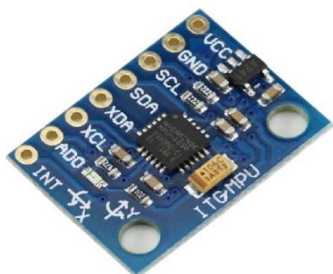
รูปที่ 3 flex sensor แบบสี่เหลี่ยม รุ่น RP-S40-ST

3.2 Gyro Sensor รุ่น GY-521 (MPU6050)

การตรวจวัดพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของหินในชั้นหินโรยทางรถไฟ จะอาศัยการทำงานของ gyro sensor รุ่น GY-521 (MPU6050) ดังรูปที่ 4 โดยอาศัยหลักการการทำงานของเครื่องรับรู้ซึ่งเป็นการทำงานที่ตรวจวัดพฤติกรรมจากฟังก์ชันที่มีอยู่แล้วในเครื่องรับรู้รุ่นนี้ ทำให้การตรวจวัดพฤติกรรมนี้สามารถตรวจวัดได้เลยหากมีการเชื่อมต่อกับระบบและแหล่งพลังงาน และหน่วยที่ตรวจวัดได้จะแสดงในหน่วยของความเร่งเชิงเส้น คือ เมตรต่อวินาทีกำลังสอง

การตรวจวัดพฤติกรรมการพลิกตัวหรือการบิดทำมุมของหินโรยทางรถไฟ จะอาศัยการทำงานของ gyro sensor รุ่น GY-

521 (MPU6050) ดังรูปที่ 4 เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นการตรวจวัดพฤติกรรมของหินโรยทางรถไฟจากฟังก์ชันการทำงานของเครื่องรับรู้ได้โดยตรง ทำให้สามารถเชื่อมต่อระบบและอ่านค่าที่ได้ทันที และค่าที่ได้จะแสดงในหน่วยของ องศา



รูปที่ 4 Gyro Sensor รุ่น GY-521 (MPU6050)

3.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น Wemos D1 mini

ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น Wemos D1 mini ดังรูปที่ 5 เปรียบเสมือนสมองกลของระบบที่ออกแบบ ทำหน้าที่รับและส่งข้อมูล และประมวลผลค่าที่ได้ ซึ่ง WeMos D1 Mini เป็นบอร์ดพัฒนา ESP8266 บนบอร์ดมีชิปสำหรับ USB to TTL อยู่บนบอร์ดแล้ว ทำให้ WeMos D1 Mini สามารถเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB ได้โดยตรง โดยที่ WeMos D1 Mini เป็นบอร์ดที่สามารถใช้ Arduino IDE และ syntax สำหรับ Arduino ในตัวบอร์ดได้มีส่วนส่งสัญญาณ Wifi เพื่อเชื่อมต่อกับระบบและรับส่งข้อมูลแบบไร้สายได้



รูปที่ 5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น Wemos D1 mini

3.4 ตัวขยายสัญญาณอนาล็อก รุ่น MCP3008

การติดตั้ง flex sensor เข้ากับ Prototype ที่มีรูปทรงลูกบาศก์ทำให้มีพื้นที่สำหรับการตรวจวัดด้วย flex sensor มีทั้งหมด 6 ด้าน แต่มีข้อจำกัดในช่องสัญญาณสำหรับรับค่าอนาล็อกจาก flex sensor บน ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น Wemos D1 mini ที่มีช่องเพื่อแปลงค่าสัญญาณอนาล็อกเพียง 1 ช่อง จึงต้องติดตั้ง ตัวขยายสัญญาณอนาล็อก รุ่น MCP3008 เพื่อขยายสัญญาณอนาล็อกให้รองรับค่าที่ได้จาก flex sensor ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตัวขยายสัญญาณอนาล็อก รุ่น MCP3008

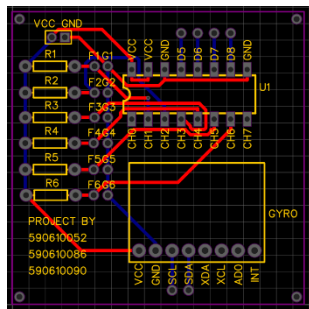
MCP3008 (Microchip) เป็น Chip แปลงสัญญาณ Analog ให้เป็นสัญญาณ Digital ด้วยจำนวน 8 Channels 10 Bit ADC โดยต่อผ่าน SPI interface MCP3008 นี้สามารถต่อใช้งานร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งตัวบอร์ด Raspberry Pi สามารถรับได้แต่สัญญาณ Digital เท่านั้น แต่สัญญาณที่เข้ามาเป็น Analog จึงต้องใช้ MCP3008 แปลงสัญญาณก่อนเนื่องจากขา Analog Read ของ NodeMCU มีเพียงขาเดียวคือขา A1 เราจึงไม่สามารถอ่านค่า Analog จากเครื่องรับรู้ได้มากกว่า 1 ช่อง ด้วยข้อจำกัดนี้จึงแก้ไขได้โดยใช้ IC MCP3008 ซึ่งเป็น IC สำหรับอ่านค่า Analog ใช้สายสัญญาณเพียง 4 เส้นสามารถอ่านได้ถึง 8 ช่องในตัวเดียว ค่าที่อ่านได้มีความละเอียด 10 bit คือ ค่าระหว่าง 0-1023 ต่อวงจร ESP8266 MCP3008

โดยเมื่อกำหนดเครื่องรับรู้ที่ต้องการใช้ในการจัดทำเครื่องตรวจวัดพฤติกรรมแล้ว จำเป็นต้องมีการออกแบบเขียนคำสั่งเพื่อรับค่า ประมวลผล และแสดงค่าที่ได้จากการอ่าน โดยการเขียนคำสั่งจะใช้คำสั่งพื้นฐานของเครื่องรับรู้ เพื่อความสะดวกต่อการเรียกใช้งานจากเว็บของ Arduino แล้วจึงออกแบบการเชื่อมต่อวงจร ระหว่างเครื่องรับรู้กับฮาร์ดแวร์อื่นๆ เนื่องจาก Prototype นี้ ประกอบด้วยเครื่องรับรู้หลายตัวทำให้ค่าที่อ่านได้มีจำนวนมาก ซึ่งจำเป็นต้องใช้บอร์ดที่รองรับพอร์ตที่มากขึ้นประกอบกับการใช้งานกับบอร์ดใหม่เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการในการใช้งาน และเพื่อให้ขนาดของ Prototype มีขนาดเล็กมากที่สุด ที่สามารถบรรจุในรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 7x7x7 ลูกบาศก์เซนติเมตรได้ จึงต้องทำการเขียนวงจรขึ้นใหม่ในรูปแผ่นพิมพ์เพื่อลดขนาดของวงจรการต่อเครื่องรับรู้ในกล่อง

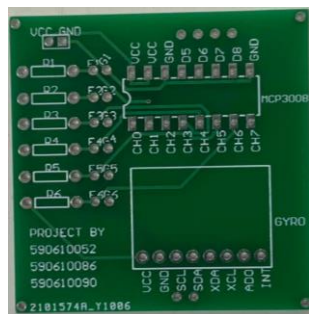
3.5 แผ่นวงจรพิมพ์ PCB

แผ่นวงจรพิมพ์ PCB แบบเขียนเอง ดังรูปที่ 7 เปรียบเสมือนการต่อวงจรทั้งหมดเข้าด้วยกัน ซึ่งโดยปกติแล้วการต่อวงจรจะ

ประกอบไปด้วยเครื่องรับรู้หลักที่ใช้งาน แหล่งพลังงาน หน่วยประมวลผล พอร์ตรับ-ส่งออกข้อมูล ตัวต้านทานและสายไฟ ซึ่งพบว่าวงจรเหล่านี้มีองค์ประกอบของการทำงานที่มาก ทำให้ขนาดของวงจรมีขนาดใหญ่ และทำให้มีข้อจำกัดในการทำงาน จึงเขียนวงจรขึ้นใหม่และสังเคราะห์แผ่นวงจรพิมพ์สำเร็จรูปขึ้นมาใหม่เพื่อลดขนาดของวงจรให้เล็กลงและสามารถประกอบเข้าไปข้างในพื้นที่ยาวของโครง Prototype ได้



รูปที่ 7a แผ่นวงจรพิมพ์ PCB (แบบสำหรับส่งผลิต)



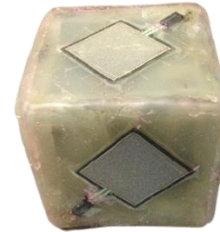
รูปที่ 7b แผ่นวงจรพิมพ์ PCB (แบบสำหรับการใช้งาน)

4. การประกอบชุดเครื่องรับรู้

4.1 โครงหลักและการขึ้นรูปพื้นผิวยืดหยุ่นโดยรอบของ Prototype

โครงร่างหลักของ Prototype ทำขึ้นจากโครงหลักเส้นที่มีขนาดเล็ก เป็นทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ และถูกแบ่งพื้นที่ภายในไว้เป็น 2 ส่วน เพื่อรองรับกับบอร์ดและแหล่งจ่ายพลังงาน ดังรูปที่

1 และเมื่อได้โครงหลักของ Prototype แล้วจึงนำมาประกอบร่วมกับชุดหล่อแบบผิวของ Prototype จาก เอทิลีนไวไนลอะซิเตท โคลิโพลิเมอร์ จึงได้ลักษณะของ Prototype ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ลักษณะโครงสร้างของ Prototype

4.1.1 เชื่อมต่อเครื่องรับรู้เข้ากับแผ่นวงจรพิมพ์ PCB

4.1.2 เชื่อมต่อแผ่นพิมพ์ PCB เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์

4.1.3 เชื่อมต่อแผ่นวงจร PCB เข้ากับ flex sensor

4.1.4 ติดตั้งแหล่งจ่ายพลังงาน (ถ่านไฟฉายขนาด 9V)

5. การเขียนคำสั่งสำหรับการใช้งาน Prototype

การได้ชุดเครื่องตรวจวัดหรือ Prototype จำเป็นต้องมีการเขียนคำสั่งเพื่อใช้ในการออกคำสั่งการทำงานให้กับเครื่องตรวจวัดที่ประกอบขึ้นจาก Prototype และเครื่องรับรู้ โดยเลือกใช้ Arduino ซึ่งเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่พัฒนาแบบ Open Source ตัวบอร์ดถูกออกแบบให้ใช้งานง่าย จึงเหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาถึงรูปแบบการใช้งานที่ง่าย แต่สามารถได้เครื่องตรวจวัดที่สามารถทำงานได้จริง

การเขียนคำสั่งเพื่อใช้สำหรับงานวิจัยนี้จำเป็นต้องทำการติดตั้งไลบรารีหลัก 3 ส่วนคือ ไลบรารีเพื่อการใช้งานของ ESP8266, ไลบรารีเพื่อการใช้งาน MCP3008 และไลบรารีเพื่อการใช้งาน WIFI Manager และทำการเขียนคำสั่งเพื่อใช้สำหรับเครื่องรับรู้ต่าง ๆ ดังรูปที่ 9

```
Civil_Project | Arduino 1.8.13 Hourly Build 2020/02/19 03:33
File Edit Sketch Tools Help

Civil_Project
1 #include <ESP8266WiFi.h> // เรียกใช้ไลบรารี ESP8266WiFi ใช้นอกรีต Wemos D1 Mini ในการเชื่อมต่อ WiFi
2 #include <WiFiClientSecure.h> // เรียกใช้ไลบรารี WiFiClientSecure ในการจัดการ https กับ server
3 #include <DNSServer.h> // เรียกใช้ไลบรารี DNSServer ในการจัดการ DNS Server เพื่อจัดการกับนามแฝง IP
4 #include <ESP8266WebServer.h> // เรียกใช้ไลบรารี ESP8266WebServer ในการสื่อสารผ่าน WebServer แทนหมายเลข IP
5 #include <WiFiManager.h> // เรียกใช้ไลบรารี WiFiManager เพื่อรีเซ็ตสัญญาณเป็น Access point ในโหมด SmartConfig
6
7 #include <Wire.h> // เรียกใช้ไลบรารี Wire ในการสื่อสารผ่าน I2C ของ MPU6050
8 #include <MCP3008.h> // เรียกใช้ไลบรารี MCP3008 ในการสื่อสารผ่าน SPI ของ MCP3008
9 #define CS_PIN D8 // กำหนดขา D8 ให้เป็นขาเลือกชิป (เป็นสายที่เชื่อมกับชิปเลือกของ IC)
10 #define CLOCK_PIN D5 // กำหนดขา D5 ให้เป็นขาเลือกชิป (เป็นสายที่เชื่อมกับชิปเลือกของ IC)
11 #define MOSI_PIN D7 // กำหนดขา D7 ให้เป็นขาเลือกชิป (เป็นสายที่เชื่อมกับชิปเลือกของ IC)
12 #define MISO_PIN D6 // กำหนดขา D6 ให้เป็นขาเลือกชิป (เป็นสายที่เชื่อมกับชิปเลือกของ IC)
13
14 // เริ่มต้นการตั้งค่า MCP3008 และ MCP3008 อ่านค่าจากขา D5, D6, D7, D8
15 MCP3008 adc(CLOCK_PIN, MOSI_PIN, MISO_PIN, CS_PIN);
16
17 // MPU6050 Slave Device Address
18 const uint8_t MPU6050SlaveAddress = 0x68; // เรียกอ่านค่า MPU6050 ผ่านที่อยู่อุปกรณ์ที่กำหนด
19
20 // Select SDA and SCL pins for I2C communication
21 const uint8_t scl = D3; // กำหนดขา D3 ให้เป็นขาเลือกชิป (เป็นสายที่เชื่อมกับชิปเลือกของ IC)
22 const uint8_t sda = D4; // กำหนดขา D4 ให้เป็นขาเลือกชิป (เป็นสายที่เชื่อมกับชิปเลือกของ IC)
23
24 int minVal=265; // กำหนดค่า minVal เท่ากับ 265
25 int maxVal=402; // กำหนดค่า maxVal เท่ากับ 402
26 double Angle_x; // เรียกใช้ค่าการเชื่อมต่อค่าของเซ็นเซอร์ของ Angle_x
27 double Angle_y; // เรียกใช้ค่าการเชื่อมต่อค่าของเซ็นเซอร์ของ Angle_y
28 double Angle_z; // เรียกใช้ค่าการเชื่อมต่อค่าของเซ็นเซอร์ของ Angle_z
```

รูปที่ 9 ตัวอย่างคำสั่งของโปรแกรม Arduino

สำหรับการใช้งานส่วนที่สำคัญที่สุด คือการทำให้เครื่องตรวจจับที่ประดิษฐ์สามารถใช้งานและรับส่งข้อมูลแบบไร้สายได้ ซึ่งถือเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการวิจัยครั้งนี้ โดยได้เลือกใช้เครื่องรับรู้ ไมโครคอนโทรเลอร์ (Wemos D1 Mini) เนื่องจากมีฟังก์ชันในการรับส่งข้อมูลด้วยสัญญาณ WIFI ให้มีการรับส่งข้อมูลผ่านระบบไร้สายซึ่งจะนำไปแสดงผลบนระบบ Google platform บนระบบ Google Software เนื่องจากเป็นการใช้งานบนระบบซอฟต์แวร์ที่ง่ายและสะดวกต่อการเข้าถึงของผู้คนโดยทั่วไป โดยข้อมูลที่ได้จากแสดงผลบนฐานข้อมูลซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากรูปที่ 10

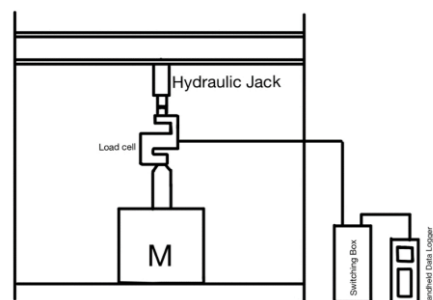


รูปที่ 10 คิวอาร์โค้ดเพื่อใช้สำหรับเข้าถึงแหล่งข้อมูลที่ Prototype ตรวจวัดได้

6. การทดสอบการใช้งาน Prototype และอภิปรายผลการศึกษา

6.1 การทดสอบการใช้งานเพื่อตรวจวัดค่าความเค้นที่เกิดขึ้นต่อผิวของ Prototype

การทดสอบการทำงานของ flex sensor ที่ถูกประกอบติดอยู่กับผิวของ Prototype ที่มีความยืดหยุ่นสูงจะอาศัยหลักการทดสอบโดยการให้น้ำหนักที่ทราบค่าและทำการอ่านค่าที่เครื่องรับรู้วัดได้ โดยการทดสอบจะออกแบบให้เครื่องทดสอบวางนิ่งอยู่บนพื้นราบแข็งและทำการให้น้ำหนักกระทำที่ผิว ซึ่งการให้น้ำหนักที่ทราบค่าจะใช้เครื่องมือแม่แรงไฮดรอลิกทำหน้าที่ให้น้ำหนักที่ต้องการ ผสมกับการใช้เครื่องมือวัดค่าที่เรียกว่า “Load Cell” รุ่น 101BH แล้วประมวลผลด้วยเครื่องมืออ่านค่า (Datalogger รุ่น TC-32K TypeS2770) การทดสอบแสดงดังรูปที่ 11

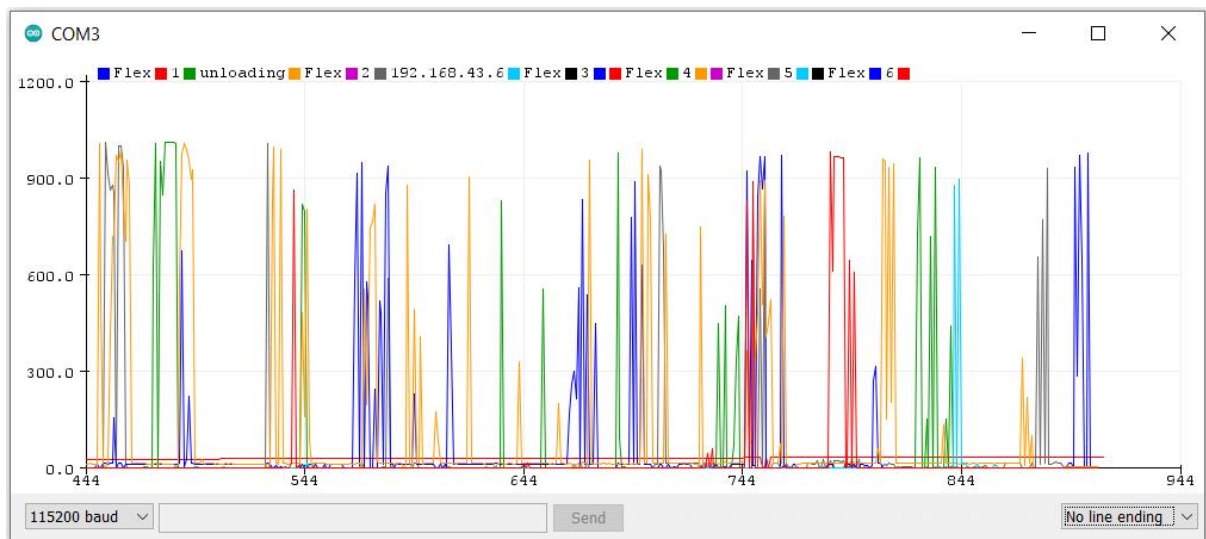


รูปที่ 11 a การออกแบบการทดสอบเพื่อประเมินค่าความเค้นที่เกิดขึ้นต่อผิวของ Prototype เมื่อมีแรงกระทำ



รูปที่ 11b การทดสอบเพื่อประเมินค่าความเค้นที่กระทำต่อผิวนอกของ Prototype เมื่อมีแรงกระทำ

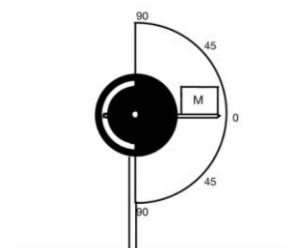
การทดสอบจะกำหนดให้แรงกระทำที่ผิวของ Prototype โดยเพิ่มแรงให้เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นแล้วอ่านค่าที่ได้จาก flex sensor ซึ่งจากการที่ผิวของ Prototype มีความยืดหยุ่นเมื่อมีแรงกระทำจะทำให้ผิวของ Prototype เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเมื่อมีการทดสอบการทำงานจะพบว่าเมื่อผิวนอกของเครื่องตรวจวัดหรือ Prototype มีการยุบตัวจะพบว่า flex sensor มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างการโค้งงอและส่งค่าที่อ่านได้มาแสดงผล ดังรูปที่ 12 ซึ่งกราฟที่แสดงแต่ละเส้น แสดงถึงแรงที่กระทำต่อ Flex ในแต่ละด้าน



รูปที่ 12 ตัวอย่างแสดงค่าที่ตรวจวัดได้จากการใช้งานของ flex sensor

6.2 การทดสอบการใช้งานเพื่อตรวจวัดค่าการหมุนรอบแกน

การออกแบบเพื่อใช้ในการทดสอบการอ่านค่ามุมของ Prototype จะกำหนดให้เครื่องตรวจวัดหรือ Prototype วางอยู่บนเครื่องทดสอบที่ติดตั้งจานอ่านค่าองศา โดยมีแขนเหวี่ยงและตัวปรับค่ามุมที่ต้องการ เมื่อทำการติดตั้งเครื่องตรวจวัดหรือ Prototype เข้ากับแขนเหวี่ยง แล้วจึงทำการปรับมุมมองค่าเปลี่ยนค่า แล้วจึงอ่านค่าที่ได้จากเครื่องตรวจเพื่อนำมาหาความสัมพันธ์ โดยการทดสอบจะเป็นไปดังรูปที่ 13



รูปที่ 13a การออกแบบการทดสอบเพื่ออ่านค่ามุมของ gyro sensor



รูปที่ 13b การทดสอบเพื่ออ่านค่าการทำงานของ gyro sensor

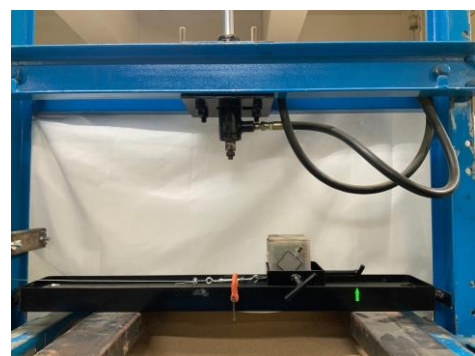
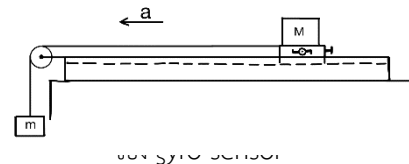
เมื่อทดสอบการหมุนรอบแกนของ Prototype พบว่า Prototype สามารถทำงานได้เมื่อมีการใช้งาน แต่ตรวจวัดมุมมีหน่วยที่ตรวจวัดได้ คือ องศา

6.3 การทดสอบการใช้งานเพื่อตรวจวัดค่าความเร่งอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่

ในการทดสอบเพื่อให้ได้มาซึ่งความเร่งที่อ่านค่าได้จากการเคลื่อนที่ของเครื่องทดสอบหรือ Prototype อาศัยหลักการการเคลื่อนที่จากกฎทางฟิสิกส์ของนิวตันข้อที่ 2 ตามสมการที่ 1 คือ การให้แรงในขนาดคงที่จะทำให้วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ทำการออกแบบการทดสอบโดยการให้แรงแก่ Prototype ด้วยการให้น้ำหนักที่ทราบค่ากระทำแก่เส้นเชือกที่คล้องผ่านรอกแล้วปล่อยให้ Prototype เกิดการเคลื่อนที่ตามรางในแนวแกน

$$\sum F = ma \quad (1)$$

การออกแบบการทดสอบ ได้ออกแบบให้ Prototype เคลื่อนที่ตามรางเส้นตรง เนื่องจากต้องการทราบค่าความเร่งในแนวแกนที่ละแกน แล้วจึงทำการให้น้ำหนักกระทำแล้วปล่อยให้วัตถุเคลื่อนที่ ดังแสดงดังรูปที่ 14 เพื่ออ่านค่าความเร่งที่ได้การแสดงผลของข้อมูลเครื่องรับรู้



รูปที่ 14b การทดสอบเพื่ออ่านค่าความเร่งของ gyro sensor

เมื่อทำการทดสอบการเคลื่อนที่ของ Prototype แล้วค่าที่ได้จากการตรวจวัดแสดงในรูปของความเร่งซึ่งแสดงดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 ตัวอย่างการแสดงผลค่าจากการทดสอบด้วย Gyro Sensor

จากกราฟที่แสดงดังรูปที่ 15 แสดงผลที่ได้จากการเคลื่อนไหว/ขยับ ของเครื่องตรวจวัดต้นแบบซึ่งกราฟแต่ละเส้นแสดงค่าความเร่งที่เกิดขึ้นในแนวแกน X, Y และ Z

7. สรุป

การประดิษฐ์เครื่องตรวจวัดพฤติกรรมของชั้นหินรอยทางบนพื้นฐานการรับ-ส่งข้อมูลแบบไร้สายสัญญาณ ได้ข้อสรุป ดังนี้

1. เครื่องตรวจวัดพฤติกรรมชั้นหินรอยทางสามารถทำงานและตรวจวัดพฤติกรรมความเค้นที่กระทำต่อ Prototype ได้ โดยอาศัยการตรวจวัดจาก flex sensor แบบสี่เหลี่ยม รุ่น RP-S40-ST โดยเมื่อมีแรงกระทำต่อพื้นผิว flex sensor จะเปลี่ยนรูปร่างให้มีการโค้งงอและแสดงผลการตรวจวัดได้ในรูปของความถี่นาฬิกา

2. เครื่องตรวจวัดพฤติกรรมชั้นหินรอยทางสามารถทำงานและตรวจวัดพฤติกรรมการหมุนรอบแกนและการเคลื่อนตัวของ Prototype ได้ โดยอาศัยการตรวจวัดจาก gyro sensor รุ่น GY-521 (MPU6050) ในการตรวจวัดมุมที่เกิดการหมุน/พลิกตัวและความเร่งที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ของ Prototype

3. เครื่องตรวจวัดพฤติกรรมชั้นหินรอยทางสามารถส่งข้อมูลผ่านระบบไร้สายสัญญาณมายังฐานข้อมูล Google sheet ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ดังรูปที่ 10

8. ข้อเสนอแนะ

การประดิษฐ์เครื่องตรวจวัดพฤติกรรมชั้นหินรอยทางรถไฟพบว่าสามารถตรวจวัดและแสดงค่าการทำงานผ่านระบบรับส่งข้อมูลแบบไร้สายได้จริง แต่ยังคงขาดเรื่องของการอ่านค่าที่ได้จากการทดสอบ อาทิเช่น ค่ามุมที่ได้จากการอ่านค่าของ gyro sensor การแปลงค่าความโค้งงอของ flex sensor เป็นน้ำหนักที่กระทำเป็นค่าความเค้นที่เกิดขึ้นต่อผิวของ Prototype ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นต้องพัฒนาต่อไป คือการพัฒนาการอ่านค่าความถูกต้องของเครื่องตรวจวัดซึ่งควรมีการทดสอบเพื่อสอบเทียบความถูกต้องให้แก่เครื่องทดสอบ โดยควรอ้างอิง/กำหนดค่าการทดสอบจากค่าจริงที่ประเมินไว้ให้อยู่ในช่วงของการทดสอบของ Prototype

9. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในด้านวิชาการ, ด้านการดำเนินงานวิจัย และให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัยให้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีมา ณ โอกาสนี้

10. เอกสารอ้างอิง

- Blanc, J., Hornych, P., Duong, N. S., Blanchard, J.-Y., & Nicollet, P. (2017). Monitoring of an experimental motorway section. *Road Materials and Pavement Design*, 20(1), 74-89. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1374997>
- Boonsue, J. (2011). *Basic Knowledge of Rail Engineering*. Phangthai Part.
- Duong, N. S., Blanc, J., & Hornych, P. (2016). Instrumentation of an Innovative Pavement Section on Motorway A10. In J. Aguiar-Moya, A. Vargas-Nordcbeck, F. Leiva-Villacorta, & L. Loria-Salazar (Eds.), *The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability* (pp. 701-714). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42797-3_46
- Stith, J. C. (2004). Pressure Measurements in Railroad Trackbeds at the Rail/Tie Interface Using Tekscan Sensors (Corpus ID: 53496627) [Master's thesis]. Semantic Scholar.
- Unland, G., & A-Khasawneh, Y. (2009). The influence of particle shape on parameters of impact crushing. *Minerals Engineering*, 22(3), 220-228. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.08.008>
- Zhang, X., Zhao, C., & Zhai, W. (2019). Importance of load frequency in applying cyclic loads to investigate ballast deformation under high-speed train loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.01.023>