

## ระบบป้องกันการกัดกร่อนท่อโลหะใต้ดินแบบแคโทดิกชนิดอิมเพรสเคอร์เรนท์ ด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

### IoT-Based Impressed Current Cathodic Protection System for Underground Pipelines

อภิวัฒน์ อัสวณิน<sup>1\*</sup> รัฐพงษ์ จันทรพิ้ว<sup>1</sup> สุวพันธ์ ธรรมจินดา<sup>1</sup> กำธร เลยหยุด<sup>1</sup> และ จิตภา ไพรสุด<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น apiwat.au@rmuti.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างระบบควบคุมและแสดงผลออนไลน์สำหรับระบบป้องกันการกัดกร่อนท่อโลหะในดินด้วยวิธีแคโทดิกชนิดอิมเพรสเคอร์เรนท์ (Impressed Current Cathodic Protection: ICCP) โดยระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยวงจรควบคุมกระแสตรงที่สามารถปรับระดับแรงดันและกระแสตามค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของโลหะโดยจะสามารถควบคุมแรงดันป้องกันให้อยู่ที่  $-0.850$  โวลต์ โดยวัดแรงดันเทียบกับอิเล็กโทรดอ้างอิง  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  และมีระบบวัดและส่งค่าศักย์ไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเน็ตเข้าสู่แพลตฟอร์มการแสดงผลออนไลน์บนเว็บ (Web Dashboard) สำหรับการติดตามสภาพการทำงานของระบบจากระยะไกล ผลการทดลองภาคสนามแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมศักย์ไฟฟ้าบนผิวโลหะให้อยู่ในช่วงมาตรฐานที่ป้องกันการกัดกร่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งสามารถตรวจสอบข้อมูลได้แบบเรียลไทม์ ช่วยลดต้นทุนในการบำรุงรักษาและเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการระบบท่อใต้ดิน

**คำสำคัญ:** การป้องกันการกัดกร่อน, แคโทดิก, ระบบควบคุม, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

#### Abstract

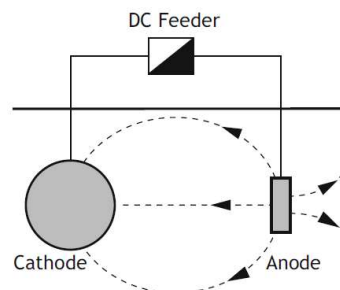
This research aims to design and develop a control and online monitoring system for the impressed current cathodic protection (ICCP) of underground metal pipelines. The proposed system includes a DC control circuit capable of adjusting voltage and current levels according to the appropriate reference potential for corrosion prevention. The protective potential is maintained at  $-0.850$  volts, measured against a  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  reference electrode. A real-time voltage monitoring and transmission module is implemented via an internet-connected microcontroller, enabling data display through a web-based dashboard for remote system monitoring. Field test results indicate that the system effectively regulates the potential on the metal surface within the standard corrosion protection range. Furthermore, the online monitoring platform supports real-time data access, which reduces maintenance costs and

enhances the efficiency of underground pipeline corrosion management.

**Keywords:** Corrosion Protection, Cathodic, Control System, Internet of Things (IoT)

#### 1. บทนำ

โครงสร้างโลหะที่ฝังอยู่ใต้ดิน เช่น ท่อส่งก๊าซ ท่อน้ำมัน หรือท่อน้ำดิบ มักประสบปัญหาการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีและไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะและดินโดยรอบ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความปลอดภัย การใช้งาน และอายุการใช้งานของระบบอย่างมีนัยสำคัญ หนึ่งในวิธีการที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการป้องกันการกัดกร่อนคือ การใช้ระบบป้องกันแบบแคโทดิกชนิดอิมเพรสเคอร์เรนท์ (Impressed Current Cathodic Protection: ICCP) ซึ่งอาศัยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายภายนอก เพื่อควบคุมศักย์ไฟฟ้าของโลหะให้มีค่าต่ำพอที่จะยับยั้งกระบวนการเกิดสนิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

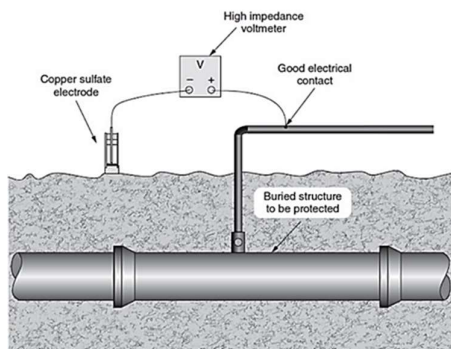


รูปที่ 1 ระบบป้องกันแบบแคโทดิกชนิดอิมเพรสเคอร์เรนท์ [1]

การวัดค่าแรงดันป้องกันในดินเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของระบบป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิก โดยเฉพาะในโครงสร้างโลหะใต้ดิน เช่น ท่อส่งน้ำมัน ท่อน้ำ หรือโครงสร้างฐานรากของอาคาร ค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างโลหะกับดินที่อยู่รอบโครงสร้างจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าโลหะนั้นได้รับการป้องกันอย่างเหมาะสมหรือไม่ในการวัดค่าศักย์ในดินจะใช้อิเล็กโทรดอ้างอิง เช่น  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  (Copper/Copper Sulfate Electrode) วางอยู่บนพื้นผิวดินหรือติดตั้งใกล้กับโครงสร้างเป้าหมาย แล้วใช้โวลต์มิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างโลหะ (เช่น ท่อเหล็ก) กับอิเล็กโทรดอ้างอิง เพื่อให้ได้ค่าศักย์ป้องกัน (Protection Potential)

\*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง  $-0.850$  ถึง  $-0.900$  โวลต์ เมื่อเทียบกับอิเล็กโทรดอ้างอิงแบบ  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามมาตรฐาน NACE SP0169 [2] สำหรับการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะฝังดินอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการวัดจะต้องกระทำในสภาพแวดล้อมจริง เช่น บริเวณท่อใต้ดินที่เชื่อมต่อกับระบบ ICCP เพื่อให้สะท้อนถึงสภาพการทำงานจริงของระบบจริง การวัดค่าแรงดันป้องกันในดินอย่างต่อเนื่องยังสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบในการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของฉนวนรอบท่อ การรั่วไหลของกระแส และความเสถียรของระบบพลังงานที่จ่ายให้กับระบบแคโทดิก



รูปที่ 2 การต่อใช้งานอิเล็กโทรดอ้างอิง [1]

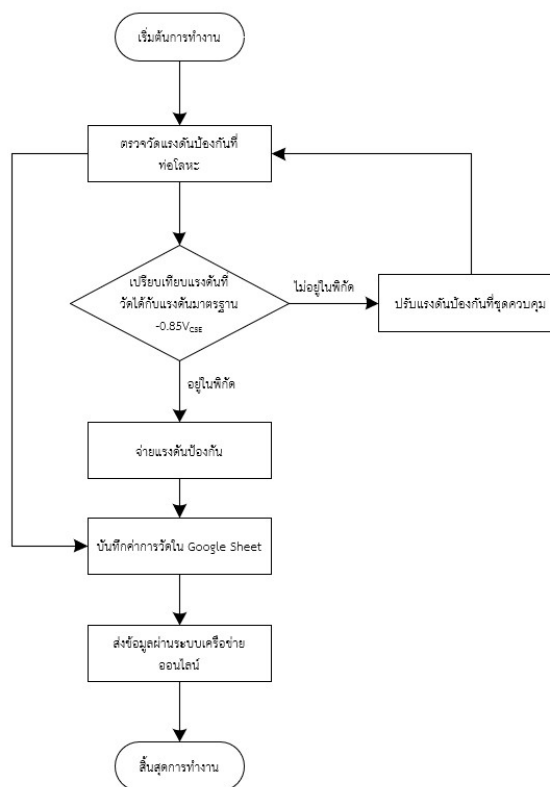
ในปัจจุบัน เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ได้ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบและควบคุมระบบวิศวกรรมหลากหลายประเภท โดยเฉพาะในงานระบบอัตโนมัติและระบบโครงสร้างพื้นฐาน การนำ IoT มาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบ ICCP ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้เหมาะสมกับสภาวะจริงของดินในแต่ละพื้นที่ อีกทั้งยังสามารถติดตามการทำงานแบบเรียลไทม์จากระยะไกลผ่านอินเทอร์เน็ตและแพลตฟอร์มแสดงผลออนไลน์ ซึ่งช่วยลดภาระด้านการบำรุงรักษา และเพิ่มความแม่นยำในการจัดการความเสี่ยงจากการกัดกร่อน [3-5]

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและออกแบบชุดต้นแบบระบบป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิกชนิดอิมเพรสเซอร์เรนท์ที่ทำงานร่วมกับเทคโนโลยี IoT โดยระบบสามารถควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมที่โดยที่ระดับแรงดันของวัสดุที่วัดเทียบกับอิเล็กโทรดอ้างอิง  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  ของวัสดุที่ฝังในดินตามมาตรฐานจะอยู่ที่  $-0.85 \text{ V}_{\text{cse}}$  พร้อมระบบวัดค่าศักย์และส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์สู่แพลตฟอร์มออนไลน์ เพื่อให้สามารถตรวจสอบสถานะการทำงานของระบบได้ทุกที่ทุกเวลา และรองรับการทำงานแบบออฟไลน์โดยใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทน [6-7]

## 2. ขั้นตอนการทำงานของระบบ

กระบวนการทำงานของชุดต้นแบบประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอนหนึ่งคือ ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าจะตรวจวัด

แรงดันไฟฟ้า และส่งข้อมูลไปประมวลผล ส่วนที่สองคือรับค่าที่ได้มาประมวลผลและนำมาปรับแรงดันป้องกันให้ได้ตามค่าที่ต้องการสามารถเพิ่มและลดแรงดันได้ทั้งแบบปรับมือและการปรับอัตโนมัติ ส่วนที่สามคือทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าตามระดับที่เหมาะสม ส่วนที่สี่คือแสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายทั้งในหน้าจอแสดงผล และผ่านแพลตฟอร์มออนไลน์ โดยตามหลักการทำงานของกระบวนการทำงานของชุดต้นแบบระบบป้องกันการกัดกร่อนท่อโลหะใต้ดินแบบแคโทดิกชนิดอิมเพรสเซอร์เรนท์ด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ค่าที่วัดได้จะถูกส่งไปเก็บยัง Google sheet และข้อมูลจะถูกส่งไปแสดงผลบนเว็บไซต์ที่สร้างขึ้น ดังแสดงขั้นตอนการทำงานการทำงานในรูปที่ 3

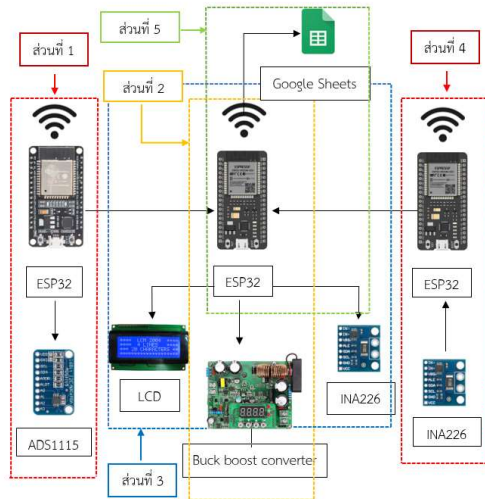


รูปที่ 3 กระบวนการทำงานของชุดต้นแบบ

## 3. การออกแบบและสร้างระบบ

การทำงานชุดต้นแบบระบบป้องกันการกัดกร่อนท่อโลหะใต้ดินแบบแคโทดิกชนิดอิมเพรสเซอร์เรนท์ด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง จะทำหน้าที่ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อน โดยนำค่า แรงดันที่ได้รับจากชุดตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า ผ่านการประมวลผลตามที่ได้ออกแบบไว้ แล้วคำนวณหาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการป้องกันการกัดกร่อนในระดับที่เหมาะสม จากนั้นระบบจะส่งคำสั่ง ไปยังวงจรปรับระดับแรงดันไฟฟ้า เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ขั้วแอโนดจนกระทั่งครบวงจร จะแสดงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าผ่านหน้าจอแสดงผลและส่ง

ข้อมูลไปแสดงผลออนไลน์ผ่านเว็บไซต์ที่สร้างขึ้น เป็นส่วนประกอบของระบบต่าง ๆ ประกอบด้วยอุปกรณ์ทั้งระบบควบคุม ชุดสร้างแรงดัน ส่วนแสดงผล และส่วนการติดต่อสื่อสารและเก็บข้อมูล โดยแสดงในรูปที่ 4

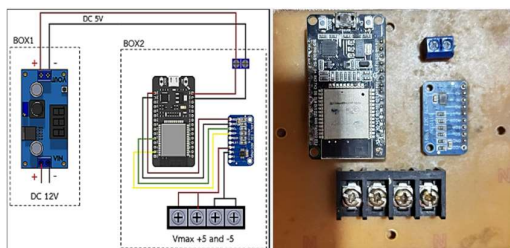


รูปที่ 4 กระบวนการทำงานของชุดต้นแบบ

โดยการออกแบบสามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 ชุดตรวจวัดแรงดันการกักต่อนของท่อโลหะในดิน ส่วนที่ 2 ชุดควบคุมการปรับค่าแรงดันในการป้องกันการกักต่อน ส่วนที่ 3 ชุดแสดงผลค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ส่วนที่ 4 ชุดบันทึกค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ส่วนที่ 5 ระบบแสดงผลออนไลน์บนเว็บ

### 3.1 ชุดตรวจวัดแรงดันการกักต่อนของท่อโลหะในดิน

ชุดตรวจวัดทำหน้าที่ในการวัดค่าแรงดันกักต่อนในดินระหว่างท่อโลหะหนาปานกลางเทียบกับดินโดยทำการวัดด้วยอิเล็กโทรดอ้างอิง  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  โดยใช้โมดูลวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและส่งข้อมูลไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4 วงจรบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กักโมดูลวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ADS1115

### 3.2 ชุดควบคุมการปรับค่าแรงดันการป้องกันการกักต่อน

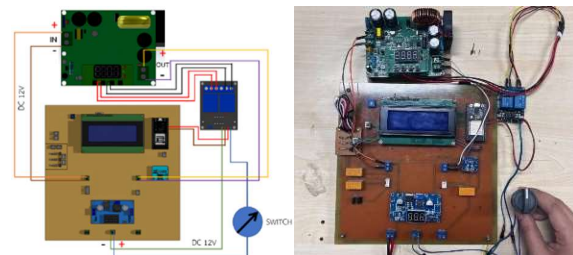
ชุดควบคุมการป้องกันการกักต่อนจะทำหน้าที่รับค่าแรงดันไฟฟ้าจากวงจรบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่านโมดูล ADS1115 เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการควบคุมปรับค่าแรงดันของวงจร buck converter (Buck Converter) สำหรับจ่ายแรงดันป้องกันให้ระบบ เพื่อให้ได้ค่าแรงดันในการป้องกันการกักต่อนที่  $-0.85 V_{cse}$  โดยจ่ายแรงดันในการป้องกันที่ท่อโลหะทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด และวงจรที่หลักขั้วแอโนดทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด

### 3.3 ชุดแสดงผลค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า

การแสดงผลค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า โดยใช้โมดูลวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากระแสตรงหรือเรียกว่าโมดูล INA226 จากนั้นจะส่งข้อมูลโดยการเชื่อมต่อบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เพื่อทำการประมวลผลค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและส่งค่าพารามิเตอร์ขึ้นผ่านจอแสดงผล

### 3.4 ชุดบันทึกค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า

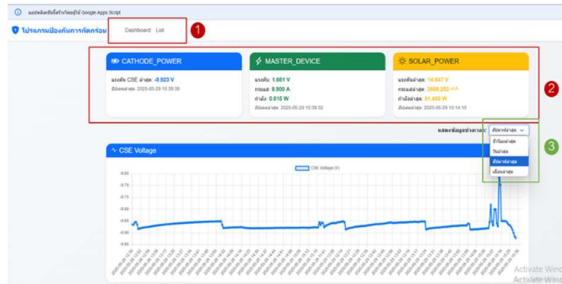
การบันทึกค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าจะประกอบด้วยเซนเซอร์วัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าเพื่อนำค่าที่วัดได้มาบันทึกข้อมูล โดยใช้โมดูล INA226 เมื่อทำการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ก็จะส่งข้อมูลโดยการเชื่อมต่อบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และแสดงผลผ่านหน้าจอแสดงผล



รูปที่ 5 การออกแบบและสร้างชุดควบคุมและแสดงผล

### 3.5 ระบบแสดงผลออนไลน์บนเว็บ

การแสดงผลค่าที่วัดได้บนเว็บไซต์ประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ได้แก่ การรับค่าและบันทึกข้อมูลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 รับค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้และส่งข้อมูลไปยัง Google Sheets ผ่านการเชื่อมต่อแบบไร้สายด้วยระบบ Wi-Fi การออกแบบหน้าเว็บไซต์เพื่อใช้แสดงผลข้อมูลที่ต้องการ ด้วย Google Apps Script สำหรับดึงข้อมูลจาก Google Sheets และจัดรูปแบบการแสดงผลบนหน้าเว็บการแสดงผลข้อมูล บนเว็บไซต์แบบเรียลไทม์ ซึ่งช่วยให้สามารถตรวจสอบสถานะระบบได้จากระยะไกล



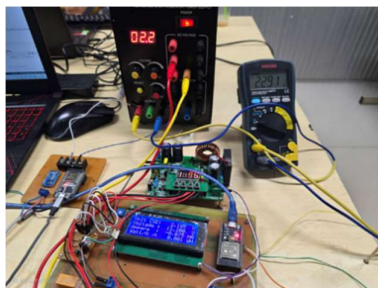
รูปที่ 6 การแสดงผลค่าที่วัดได้บนเว็บไซต์

#### 4. ผลการทดสอบระบบ

##### 4.1 ผลการทดลองวัดค่าทางไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน

หลังจากออกแบบและสร้างชุดตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว ได้ทำการทดสอบความแม่นยำของอุปกรณ์ โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากชุดไมโครคอนโทรลเลอร์กับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือมาตรฐาน คือ ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ SANWA CD771 ซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์อ้างอิงในการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า ผลต่างของค่าที่วัดได้จะถูกนำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

ผลการทดสอบชุดตรวจวัดสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งานในระบบควบคุมการป้องกันการกักกร่อนแบบแคโทดิก

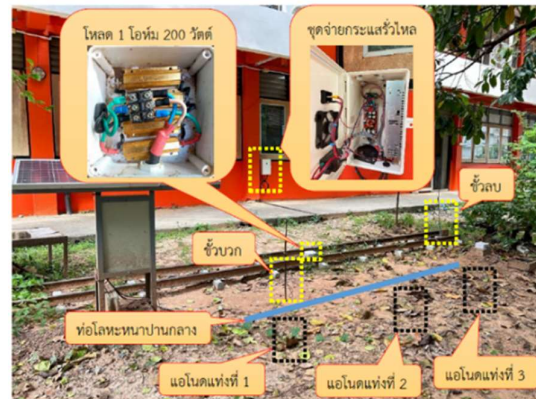


รูปที่ 6 การแรงดันไฟฟ้าของชุดตรวจวัดแรงดันเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ SANWA CD771

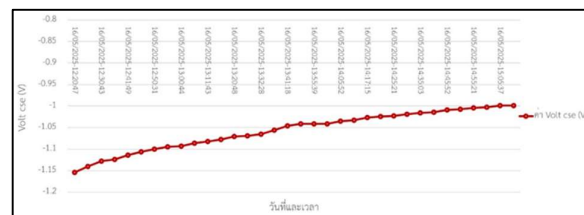
##### 4.2 ผลการทดสอบการปรับแรงดันป้องกัน

สำหรับการทดลองการปรับแรงดันจะทดสอบในสภาวะการใช้งานจริง โดยจะเป็นการปรับแบบอัตโนมัติโดยกำหนดค่าแรงดันป้องกันการกักกร่อนอ้างอิงตามค่ามาตรฐานคือ  $-0.850 V_{cse}$  และทำการจำลองปล่อยกระแสปรกวนลงในดิน ในส่วนนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพการป้องกันการกักกร่อนของท่อโลหะในดิน ในบริเวณที่ติดตั้งชุดต้นแบบการป้องกันการกักกร่อนแบบแคโทดิกชนิดอิมเพรสเคอร์เรนท์ที่สร้างขึ้น ณ จุดติดตั้งทดสอบที่อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ในการเก็บผลการทดลองการปรับแรงดัน

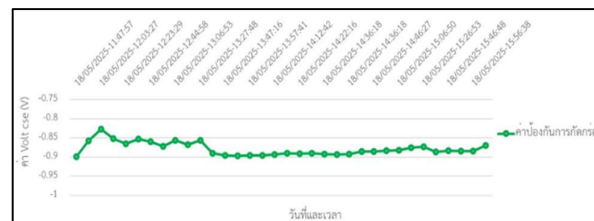
ป้องกันการกักกร่อนของท่อโลหะในดินว่าระบบสามารถปรับแรงดันให้ใกล้เคียงกับแรงดันที่ต้องการหรือไม่ โดยทำการวัดแรงดันการป้องกันการกักกร่อนของท่อโลหะขณะปล่อยกระแสรั่วไหลและไม่ปล่อยกระแสรั่วไหล และบันทึกข้อมูลแรงดันป้องกันว่าระบบสามารถปรับให้อยู่ในค่ามาตรฐานหรือไม่ จากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าค่อนข้างคงที่อยู่ในช่วง  $-0.84 V_{cse}$  ถึง  $-0.90 V_{cse}$



รูปที่ 7 พื้นที่การทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของชุดตรวจวัดแรงดันการกักกร่อนของท่อโลหะในดิน



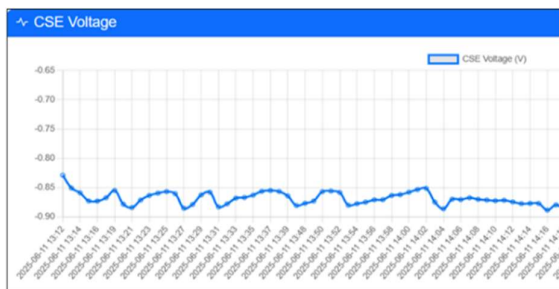
รูปที่ 7 ผลการทดสอบการวัดแรงดันการกักกร่อนขณะที่มีกระแสรั่วไหลและไม่ได้ใช้งานเปิดระบบป้องกัน



รูปที่ 8 ผลการทดสอบการวัดแรงดันการกักกร่อนขณะที่มีกระแสรั่วไหลและเปิดระบบป้องกันแบบอัตโนมัติ

### 4.3 ผลการทดสอบการแสดงผลผ่านเว็บไซต์

การทดสอบระบบแสดงผลออนไลน์ผ่านเว็บไซต์ดำเนินการโดยส่งค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ไปยัง Google Sheets ผ่านการเชื่อมต่อ Wi-Fi จากนั้นใช้ Google Apps Script ในการประมวลผลและจัดรูปแบบข้อมูลให้แสดงผลแบบเรียลไทม์บน Web Dashboard



รูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบแรงดันป้องกันการกัดกร่อนบนเว็บไซต์

## 5. สรุป

จากการทดสอบระบบต้นแบบภายใต้สภาพแวดล้อมจริง พบว่าระบบควบคุมแรงดันอัตโนมัติสำหรับการป้องกันการกัดกร่อนแบบ ICCP ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถจ่ายพลังงานให้กับ ESP32, โมดูล INA226, ADS1115, จอ LCD และวงจรควบคุมได้ครบถ้วน โดยไม่พบปัญหาแรงดันตกหรือกระแสไม่พอ

ผลการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างท่อเหล็กกับอิเล็กโทรดอ้างอิงแบบ Cu/CuSO<sub>4</sub> พบว่าค่าอยู่ในช่วง  $-0.850 V_{cse}$  ถึง  $-0.900 V_{cse}$  ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมตามมาตรฐาน NACE สำหรับการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะฝังดิน ระบบควบคุมสามารถรักษาค่าแรงดันให้อยู่ใกล้ค่าที่ตั้งเป้าไว้ด้วยความคลาดเคลื่อนต่ำ โดยการเลือกใช้โมดูล ADS1115 เป็นตัวตรวจวัดช่วยให้ระบบสามารถควบคุมได้แม่นยำและเหมาะสมกับการใช้งานภาคสนาม

นอกจากนี้ ระบบยังสามารถส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์เข้าสู่ฐานข้อมูลออนไลน์ผ่าน Google Apps Script และแสดงผลบน Web Dashboard ได้อย่างถูกต้องและต่อเนื่อง ทำให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามสถานะระบบจากระยะไกลได้ตลอดเวลา ซึ่งช่วยอำนวยความสะดวกในการวางแผนการบำรุงรักษาและการปรับแต่งระบบในอนาคตอย่างมีประสิทธิภาพ

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] P. R. Roberge, "Handbook of Corrosion Engineering", 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, LLC, 2012.
- [2] NACE International, "NACE SP0169-2013: Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems", Houston, TX, USA: NACE International, 2013.
- [3] M. R. Adzman, A. A. M. Sallehuddin, N. M. Husin, N. S. M. Haniff, M. Gunasilan, M. H. Idris, and M. Amiruddin., (2024). "Improved impressed current cathodic protection systems by incorporating a pulse-feeding technique integrated with internet of things capabilities". International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 7254–7265, Dec. 2024, doi: 10.11591/ijece.v14i6.pp7254-7265.
- [4] B. C. Johan, D. Tjandra, A. Noertjahyana, R. Lim, and G. B. Wijaya, "IoT for Cathodic Protection System as Iron Concrete's Corrosion Protection", Journal of Electrical Systems (JES), vol. 20, no. 5s, 2024.
- [5] T. B. Dang and T.-P. Nghiem, "Studying and Realizing the Based-Intelligent IoT System for Pipeline Cathodic Protection", SSAD, vol. 33, no. 3, pp. 24–32, Sep. 2023.
- [6] A. O. M. Maka, T. N. Chaudhary, G. Alaswad, and O. Elsayah, "Applications of solar photovoltaics in powering cathodic protection systems: A review", Clean Technologies and Environmental Policy, vol. 26, pp. 1–22, 2024, doi: 10.1007/s10098-024-02750-0.
- [7] "Solar Powered Cathodic Protection Systems—Design Considerations," MATCOR, 2021. [Online]. Available: <https://www.matcor.com/solar-powered-cathodic-protection-systems-design-considerations/>