



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

การออกแบบและพัฒนาเครื่องส่งและรับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อการค้นหาอุปกรณ์ตรวจสอบท่อ

Design and Development of Electromagnetic Transmitter and Receiver for Searching the Pipeline Inspection Gauge

จิตสุภา บุญทาธาต¹ ภาสกร สังฆะมณี¹ คมสัน ดีศรี¹ นรรัตน์ วัฒนมงคล^{1*}

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อำเภอมือง จังหวัดชลบุรี 20131

Jitsupa Boontathat¹ Passakorn Sangkamanee¹ Komsan Deesri¹ Norrarat Wattanamongkhon^{1*}

¹ Faculty of Engineering, Burapha University, Muang, Chonburi 20131

* Corresponding author.

E-mail: norrarat@eng.buu.ac.th; Telephone: 08 6572 6807

วันที่รับบทความ 6 ธันวาคม 2560; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 1 6 กุมภาพันธ์ 2561; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 2 12 มีนาคม 2561; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 3 26 เมษายน 2561; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 4 5 พฤษภาคม 2561; วันที่ตอบรับบทความ 15 พฤษภาคม 2561

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปอุตสาหกรรมน้ำมันและก๊าซปิโตรเคมี หรือโรงกลั่นน้ำมันจะใช้อุปกรณ์ตรวจสอบท่อป้อนเข้าไปภายในท่อเพื่อตรวจสอบการถูกกัดกร่อนหรือการสึกหรอของท่อ ในระหว่างกระบวนการตรวจสอบ อุปกรณ์นี้มักจะเกิดการติดค้างอยู่ภายในท่อเนื่องจากผิวด้านในของท่อไม่เรียบ หรือมีการโค้งงอ ในงานวิจัยนี้ เราจึงได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องส่งและรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับใช้ค้นหาอุปกรณ์ตรวจสอบท่อเพื่อลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ โดยอาศัยสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ 22 เฮิรตซ์ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลการตรวจจับและคำนวณหาตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจสอบท่อ โดยนำไปทดสอบกับท่อเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว และมีความหนา 7.11 มิลลิเมตร จากผลการทดสอบพบว่าสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ 22 เฮิรตซ์ เครื่องส่งและเครื่องรับสามารถสื่อสารกันได้ดีที่สุดในระยะห่างที่มากที่สุดที่เครื่องรับสามารถระบุตำแหน่งเครื่องส่งที่อยู่ห่างกันในแนวตั้งและแนวนอนได้เท่ากับ 12 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ และมีความถูกต้องโดยเฉลี่ยของการตรวจจับตำแหน่งเท่ากับร้อยละ 94

คำสำคัญ

อุปกรณ์ตรวจสอบท่อ ความถี่เรโซแนนซ์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

Abstract

In general, the oil and gas petroleum industry or petrochemicals use the pipeline inspection gauges (PIG) by entering the PIG inside the pipeline to inspect the corrosion or deterioration of the pipeline. During the inspection process, this PIG will often be trapped in the pipeline because the uneven surface or bending of pipeline. In this research, we present the design and development of electromagnetic transmitter and receiver for pipeline inspection gauge to reduce dependence on foreign technology. We use the property of electromagnetic wave frequency 22 Hz for communication between

transmitter and receiver. Microcontroller is used for processing to detect and calculate the position of PIG in the pipeline. It will be tested with the diameter of pipeline size 6 inches and the thickness 7.11 millimeters. From our experiment results, the transmitter and receiver can communicate effectively at the frequency of 22 Hz. The farthest distance detection in the vertical and horizontal is 12 and 10 cm, respectively, and provides the average correctness of position detection as 94%.

Keywords

pipeline inspection gauge; resonance frequency; electromagnetic wave

1. บทนำ

เนื่องจากการทำงานตรวจสอบท่อของบริษัทผู้ให้บริการตรวจสอบการถูกกัดกร่อน การรั่วของท่อส่งก๊าซ การสึกหรอของท่อ หรือการเปื่อยเบนของรูปทรงของท่อส่งก๊าซ สำหรับอุตสาหกรรมน้ำมันและก๊าซ ปิโตรเคมี หรือโรงกลั่นน้ำมันเพื่อทำความเข้าใจในท่อหรือป้องกันอันตรายต่าง ๆ ที่อาจจะส่งผลกระทบต่อชีวิต ทรัพย์สิน และสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปในระหว่างทำการตรวจสอบสภาพของท่อจะต้องนำอุปกรณ์ตรวจสอบท่อ (pipeline inspection gauges: PIG) [1-4] ป้อนเข้าไปภายในท่อดังรูปที่ 1 (ข้อมูลจากเว็บไซต์ของบริษัท ดาคอน อินสเปคชั่น เซอร์วิส เซส จำกัด [5]) รวมถึงนำไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ทำความสะอาดท่อรูปแบบต่าง ๆ ด้วย อย่างไรก็ตาม การใช้งานโดยทั่วไปมักเกิดเหตุการณ์ที่อุปกรณ์ชนิดนี้ติดอยู่ภายในท่อ ส่งผลให้เกิดความยากในการค้นหาตำแหน่งของอุปกรณ์ชิ้นนี้เพื่อนำเอาอุปกรณ์ตรวจสอบท่อออกมา โดยบริษัทที่ดำเนินธุรกิจลักษณะเช่นนี้มักจะเป็นบริษัทจากยุโรปซึ่งนำเทคโนโลยีนี้เข้ามาบริการให้กับลูกค้าในประเทศไทยและประเทศใกล้เคียง

สำหรับเครื่องส่งและรับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่นำเข้ามาจากต่างประเทศจะถูกนำมาใช้ในการค้นหาตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจสอบท่อที่ติดอยู่ภายในท่อ โดยชุดส่งสัญญาณจะถูกติดตั้งภายในอุปกรณ์ตรวจสอบท่อเพื่อใช้เป็นเครื่องส่งสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ 22 เฮิร์ตซ์ (ดังรูปที่ 2) และชุดรับสัญญาณรุ่น TRAXALL 770 ซึ่งได้รับการพัฒนาด้วยเทคโนโลยีที่ทันสมัยในการตรวจจับเพื่อระบุตำแหน่งและ

สามารถติดตามการส่งสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจสอบท่อได้พร้อมกันมากถึง 7 เครื่องที่มีความถี่ของเครื่องส่งแตกต่างกัน ใช้ได้กับท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4-48 นิ้ว และมีความหนา 6.2-111 มิลลิเมตร [5]

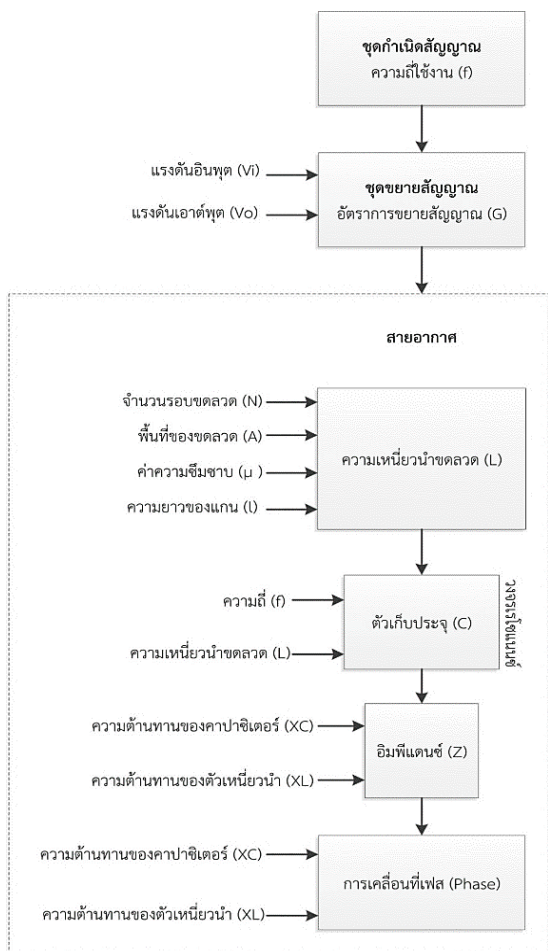
จากที่กล่าวมาในข้างต้น เราจึงมีแนวคิดที่จะนำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ตรวจสอบท่อซึ่งเป็นการกระตุ้นให้ผู้วิจัยต้องการพัฒนาด้วยตนเอง เพื่อต้องการลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ โดยอุปกรณ์นี้จะใช้ความถี่เรโซแนนซ์ 22 เฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นคลื่นความถี่เดียวกันกับที่ใช้ในเครื่องรุ่น TRAXALL 770 เมื่อพัฒนาเสร็จจะนำไปทดสอบที่บริษัทดาคอน โดยใช้งานจริงกับท่อเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว และมีความหนา 7.11 มิลลิเมตร เพื่อ



รูปที่ 1 อุปกรณ์ตรวจสอบท่อ (caliper pig) [5]



รูปที่ 2 การใช้งานเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณอุปกรณ์ตรวจสอบท่อรุ่น TRAXALL 770 [5]



รูปที่ 3 ขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาชุดส่งสัญญาณ

ต้องการทราบถึงขีดความสามารถในการตรวจจับและระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจสอบท่อที่ทีมผู้วิจัยพัฒนาขึ้น และเป็นแนวทางที่จะพัฒนาอุปกรณ์นี้ในรุ่นต่อ ๆ ไปให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

2. ระบบที่นำเสนอ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณ การออกแบบและสร้างสายอากาศ วงจรขยายสัญญาณ ชุดประมวลผลและแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การออกแบบและพัฒนาเครื่องส่งสัญญาณ

จากรูปที่ 3 แสดงขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาเครื่องส่งสัญญาณ เริ่มพิจารณาจากเครื่องส่งสัญญาณ

สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยโมดูลกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมสามารถปรับความถี่และค่าดิวตี้ไซเคิล (duty cycle) ได้จากการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้า ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้สัญญาณความถี่ 22 เฮิร์ตซ์ แล้วส่งต่อไปยังชุดขยายสัญญาณ (power amplifier) เพื่อให้เครื่องรับสัญญาณสามารถตรวจจับได้ในระยะทางที่ไกลขึ้น ทดลองโดยการใช้ออสซิลโลสโคปป้อนแรงดันไฟฟ้าอินพุต 4 โวลต์ (แรงดันไฟฟ้ายอดถึงยอด) เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณแล้วทำการวัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 8 โวลต์ ดังนั้นวงจรนี้จะมีอัตราขยายสัญญาณเท่ากับ 2 เท่า โดยชุดขยายสัญญาณนี้จะนำไปต่อร่วมกับแกนขดลวดที่ออกแบบมาเพื่อใช้เป็นสายอากาศ

จากนั้นจะทำการออกแบบและสร้างสายอากาศ โดยเลือกใช้แกนเหล็กแผ่นเป็นตัวยึดเหนี่ยววางซ้อนกัน ซึ่งแต่ละแผ่นจะถูกเคลือบด้วยฉนวนไว้ นิยมนำไปใช้งานในย่านความถี่ต่ำ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้ตัวมันจะทำให้เกิดการขยายตัวและการยุบตัวของสนาม แม่เหล็ก ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ายังมีค่ามากจะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้ผลดี โดยจำนวนรอบของการพันขดลวดจะมีผลโดยตรงต่อค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งส่งผลให้สนามแม่เหล็กเกิดมากขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในสมการ (1)

$$L = \frac{N^2 \times A \times \mu}{l} \quad (1)$$

L = ค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น เฮนรี (H)

N = จำนวนของขดลวด

A = พื้นที่ของขดลวด มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

μ = ค่าความซึมซับได้ (permeability)

l = ความยาวของวัสดุตัวนำ มีหน่วยเป็น เมตร (m)

โดยสายอากาศของชุดส่งจะใช้งานการพันลวดทองแดงรอบแกนเหล็กแผ่นจำนวน 8,000 รอบ ลวดทองแดงมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 5×10^{-7} ตารางเมตร มีความยาว 10 เซนติเมตร และค่าความซึมซับแกนเหล็กแผ่นเท่ากับ 6.9×10^{-3} จากนั้นนำค่าต่าง ๆ เหล่านี้แทนลงในสมการ (1)

$$L = \frac{8,000^2 \times 6.9 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^{-7}}{10 \times 10^{-2}}$$

จะได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ .2208 เฮนรี่

วงจรปรับหาความถี่ถูกนำมาใช้งานเพื่อทำให้เกิดการสั่นพ้องหรือเรโซแนนซ์ (resonance) [6] ส่งผลให้ประสิทธิภาพของสายอากาศในการรับส่งสัญญาณอยู่ในสภาวะที่ดีที่สุด วงจรไฟฟ้าทั่วไปที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ RLC จะเกิดเรโซแนนซ์ได้ก็ต่อเมื่อค่าความต้านทานเชิงซ้อน (impedance, Z) รวมของวงจรซึ่งเป็นจำนวนจินตภาพมีค่าเป็นศูนย์ หรืออาจกล่าวได้ว่าวงจรจะเสมือนมีแต่ค่าความต้านทานเท่านั้น ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$Z = X_C = X_L \quad (2)$$

โดยที่ $X_C = 1/\omega C$ และ $X_L = \omega L$ เมื่อ $\omega = 2\pi f$ จากสมการ (2) จะได้ว่าค่าตัวประกอบกำลัง (power factor) มีค่าเท่ากับ 1 วงจรจนความถี่ที่ออกแบบไว้เป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานโดยอ้างอิงจากวงจรขนานแบบ 3 สาขา (branches) สำหรับต่ออุปกรณ์ R, L และ C โดยที่ L และ C ไม่มีค่าความต้านทานภายใน ดังนั้นวงจรเรโซแนนซ์จะขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) และค่าความจุไฟฟ้า (C) เท่านั้น จากเงื่อนไขดังกล่าวจะได้สมการของความถี่เรโซแนนซ์คือ

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

ความสัมพันธ์ที่ได้ตามสมการ (3) เป็นเพียงการพิจารณาจากวงจรขนานในอุดมคติเพื่อนำมาใช้ประกอบการออกแบบเท่านั้น ซึ่งในวงจรที่ใช้งานจริงนั้นขดลวดและตัวเก็บประจุจะมีความต้านทานภายในเสมอ เมื่อทราบค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศชุดส่งสัญญาณและความถี่ที่ได้ออกแบบไว้แล้วนำไปแทนค่าลงในสมการ (3) เพื่อหาค่าตัวเก็บประจุจะได้

$$C = \frac{1}{4 \times \pi^2 \times 22^2 \times 2.208}$$

ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 23.70 ไมโครฟารัด เมื่อนำค่า f, L และ C ไปแทนในสมการ (2) เพื่อหาค่าความต้านทาน

เชิงซ้อนรวมของสายอากาศเครื่องส่งสัญญาณ จะได้ $X_C = X_L = 305.21 \Omega$ ส่งผลให้ค่ามัมเฟสเป็นศูนย์หรือไม่มี ความต่างเฟสเกิดขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์ตามที่ต้องการ

2.2 การออกแบบและพัฒนาชุดรับสัญญาณ

จากรูปที่ 4 จะแสดงขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาชุดรับสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ 22 เฮิร์ตซ์ เริ่มต้นจากการออกแบบสายอากาศรับเพื่อทำหน้าที่รับสัญญาณจากสายอากาศของเครื่องส่งสัญญาณ โดยสายอากาศชุดรับสัญญาณจะทำการพันลวดทองแดงรอบแกนเหล็กแผ่นจำนวน 20,000 รอบ ลวดทองแดงมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 1.5×10^{-7} ตารางเมตร มีความยาว 20 เซนติเมตร และค่าความซึมซาบ แกนเหล็กแผ่นเท่ากับ 6.9×10^{-3} จากนั้นนำค่าต่าง ๆ เหล่านี้แทนลงในสมการ (1)

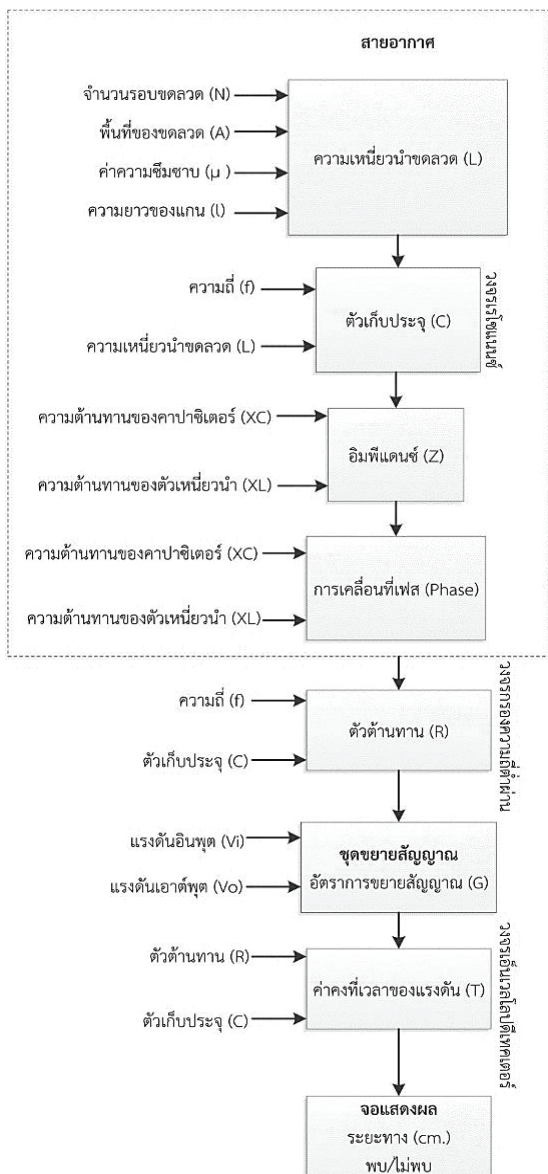
$$L = \frac{20,000^2 \times 6.9 \times 10^{-3} \times 1.5 \times 10^{-7}}{20 \times 10^{-2}}$$

จะได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 2.07 เฮนรี่ เมื่อทราบค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศรับแล้วจึงนำไปแทนค่าลงในสมการ (4) เพื่อหาค่าตัวเก็บประจุจะได้

$$C = \frac{1}{4 \times \pi^2 \times 22^2 \times 2.07}$$

ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 25.28 ไมโครฟารัด เมื่อนำค่า f, L และ C ไปแทนในสมการ (2) เพื่อหาค่าความต้านทานเชิงซ้อนรวมของสายอากาศชุดรับสัญญาณ จะได้ $X_C = X_L = 286.14 \Omega$ ส่งผลให้ค่ามัมเฟสเท่ากับศูนย์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์ตามที่ต้องการ

จากนั้นสัญญาณจะเข้าสู่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนั้น เราต้องการความถี่ตัด (cut-off frequency, f_c) เท่ากับ 30 เฮิร์ตซ์ เพื่อให้สัญญาณที่มีค่าความถี่ต่ำกว่าค่านี้ผ่านไปได้ เนื่องจากความถี่ที่ใช้ส่งสัญญาณคือ 22 เฮิร์ตซ์ หากเรากำหนดให้ตัวเก็บประจุทุกตัวมีค่าเท่ากัน และความต้านทานทุกตัวมีค่าเท่ากัน จะได้

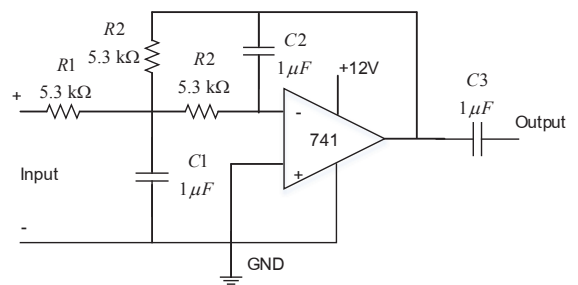


รูปที่ 4 ขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาชุดรับสัญญาณ

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4)$$

หากเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด ไมโครฟารัด จะคำนวณ หา 1 ความต้านทานได้จากการแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (4) จะได้ $R = 5.3 \text{ k}\Omega$ ดังแสดงในรูปที่ 5

จากนั้นจะส่งสัญญาณที่ได้ไปยังชุดขยายสัญญาณเพื่อให้แอมพลิจูดของสัญญาณมีค่าสูงขึ้น ก่อนส่งต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งจะทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณตาม



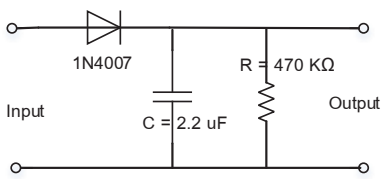
รูปที่ 5 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

โปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้ ก่อนนำข้อมูลไปแสดงผลการตรวจจับและระยะห่างจากตัวส่งสัญญาณซึ่งถูกติดตั้งอยู่กับอุปกรณ์ตรวจสอบเพื่อให้ทราบตำแหน่งที่ต้องการผ่านทางหน้าจอแอลซีดี

2.3 ชุดประมวลผลและแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

วงจรเอนVELOPE ดีเทคเตอร์ (envelope detector) เป็นวงจรที่รับสัญญาณมาจากวงจรขยายสัญญาณ ในวงจรนี้ไดโอดจะทำหน้าที่ตัดเอาเฉพาะสัญญาณด้านบวก และผ่านวงจร RC ก่อนป้อนเข้าไปยังพอร์ตแอนะล็อก อินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ การออกแบบวงจรนี้เริ่มจากการวัดคาบเวลาสัญญาณอินพุตซึ่งอ่านค่าจากสโคปได้ $T = 0.1$ เราต้องการออกแบบให้ค่าคงที่เวลา (time constant, $\tau = RC$) ของแรงดันไฟฟ้ามากกว่าคาบเวลาของสัญญาณอินพุตมากๆ เพื่อให้ตัวเก็บประจุมีเวลาน้อยที่จะทำการอัดประจุและคายประจุ สัญญาณจึงผ่านไปโดยไม่เกิดความผิดเพี้ยน ดังนั้นจึงเลือกใช้ $R = 470 \text{ k}\Omega$ และ $C = 2.2 \mu\text{F}$ (ดังแสดงในรูปที่ 6) จะได้ค่าคงที่เวลา $RC = 1.034$ ซึ่งมากกว่าคาบเวลาของสัญญาณอินพุตประมาณ 10 เท่า อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสัญญาณอินพุตที่ผ่านไดโอดมีค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม 0.7 โวลต์ จึงทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกมาถูกลดทอนลงเล็กน้อย

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ยี่ห้อ Arduino Nano รุ่น MEGA326P เป็นหน่วยประมวลผลซึ่งจะนำไปเชื่อมต่อกับโมดูลแสดงผลแบบแอลซีดี 16 ตัวอักษร 24 บรรทัด ใช้ซอฟต์แวร์ Arduino IDE ในการเขียนโปรแกรม



รูปที่ 6 วงจรเอนเวลโลบตีเทคเตอร์

ภาษา C เป็นคำสั่งในการประมวลผลการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยโปรแกรมจะเริ่มจากการรับค่าแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่ได้มาจากชุดวงจรขยายสัญญาณ จากนั้นจะทำการตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าที่รับเข้ามานี้ว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 5 โวลต์ หรือไม่ หากใช่ก็จะนำไปคำนวณหาค่าระยะทางที่สามารถตรวจจับได้ (หน่วยเป็นเซนติเมตร) จากนั้นนำไปเทียบกับค่าความละเอียดของไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 10 บิต ซึ่งเป็นเลขจำนวนเต็มตั้งแต่ 0 ถึง 1023 เพื่อนำไปใช้ในการสร้างเงื่อนไขการโปรแกรม (รายละเอียดในขั้นตอนนี้จะขอกล่าวอธิบายในหัวข้อ 3.4) แต่หากแรงดันไฟฟ้าที่รับเข้ามาไม่ได้อยู่ในช่วง 0 ถึง 5 โวลต์ โปรแกรมจะย้อนกลับไปรับค่าสัญญาณแอนะล็อกและเริ่มกระบวนการเหล่านี้วนซ้ำเช่นเดิม

ระยะเวลาใช้งานแบตเตอรี่ หมายถึง ระยะเวลาที่อุปกรณ์หรือโหลดซึ่งต้องการนำพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไปใช้งานก่อนที่จะต้องนำมาประจุไฟใหม่อีกครั้ง โดยทั่วไปการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าที่อยู่ในแบตเตอรี่เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงซึ่งโดยเฉลี่ยในประเทศไทยมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 30 ดังนั้นระยะเวลาที่แบตเตอรี่จะสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์หรือโหลดได้นานเท่าใด สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$t = \frac{V \times mAh}{W} \quad (5)$$

เมื่อ t คือระยะเวลาใช้งานแบตเตอรี่ มีหน่วยเป็น ชั่วโมง

W คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานจริง มีหน่วยเป็น วัตต์

V คือค่าแรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โวลต์

mAh คือความจุของแบตเตอรี่ มีหน่วยเป็น มิลลิแอมป์แอมป์ชั่วโมง

แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของเครื่องส่งสัญญาณจะถูกติดตั้งเข้าไปภายในอุปกรณ์ตรวจสอบท่อ จึงต้องคำนึงถึง

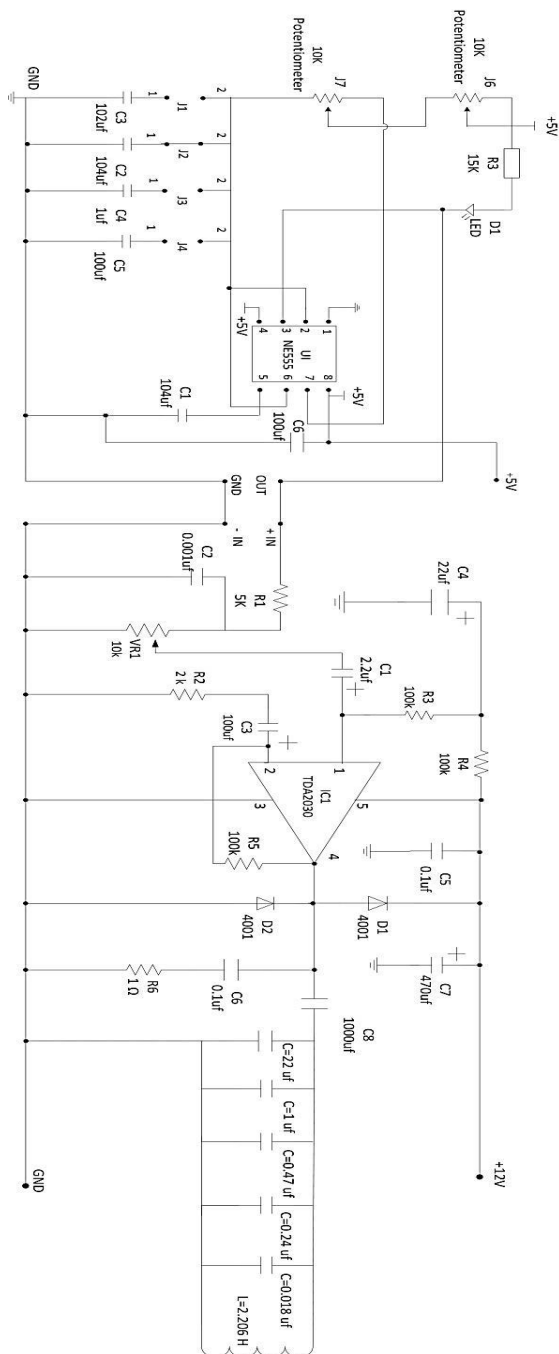
ระยะเวลาและระยะทางที่อุปกรณ์นี้ใช้ขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่อยู่ภายในท่อ ดังนั้นเครื่องส่งสัญญาณนี้จึงต้องมีพลังงานไฟฟ้าที่มากพอ ซึ่งในที่นี้ได้เลือกใช้แบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ ความจุ 1,500 มิลลิแอมป์แอมป์ชั่วโมง แต่เมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าร้อยละ 30 ดังนั้นแบตเตอรี่นี้จึงมีความจุที่สามารถใช้งานได้เพียง 1,050 มิลลิแอมป์แอมป์ชั่วโมง ชุดส่งสัญญาณใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ กระแสไฟฟ้าใช้งานสูงสุด 0.026 แอมป์ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานมีค่าเท่ากับ $12 \times 0.026 = 0.312$ วัตต์ เมื่อนำไปแทนในสมการ (5) จะได้ว่าเวลาที่จะสามารถใช้งานชุดส่งสัญญาณได้นาน 40.38 ชั่วโมง

ชุดรับสัญญาณจะถูกใช้งานอยู่ภายนอกท่อทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณความถี่จากชุดส่งสัญญาณเพื่อระบุตำแหน่ง ดังนั้นแหล่งพลังงานของชุดรับสัญญาณจึงควรสามารถใช้งานได้นานเพื่อใช้ในการค้นหา ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์ แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ ความจุ 2,200 มิลลิแอมป์แอมป์ชั่วโมง ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียพลังงานแล้ว แบตเตอรี่นี้จึงมีความจุที่สามารถใช้งานได้จริง 1,540 มิลลิแอมป์แอมป์ชั่วโมง ชุดรับสัญญาณใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ กระแสไฟฟ้าใช้งานสูงสุด 0.2 แอมป์ กำลังไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 2.4 วัตต์ ดังนั้นจะได้ว่าเวลาที่จะสามารถใช้งานชุดรับสัญญาณได้นาน 7.7 ชั่วโมง

2.4 เครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณที่สร้างขึ้น

เครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณที่สร้างขึ้นจากวงจรที่ได้ออกแบบไว้สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ ขั้นตอนการทำงานของเครื่องรับและเครื่องส่งสัญญาณสำหรับอุปกรณ์ตรวจสอบท่อมี่ดังนี้

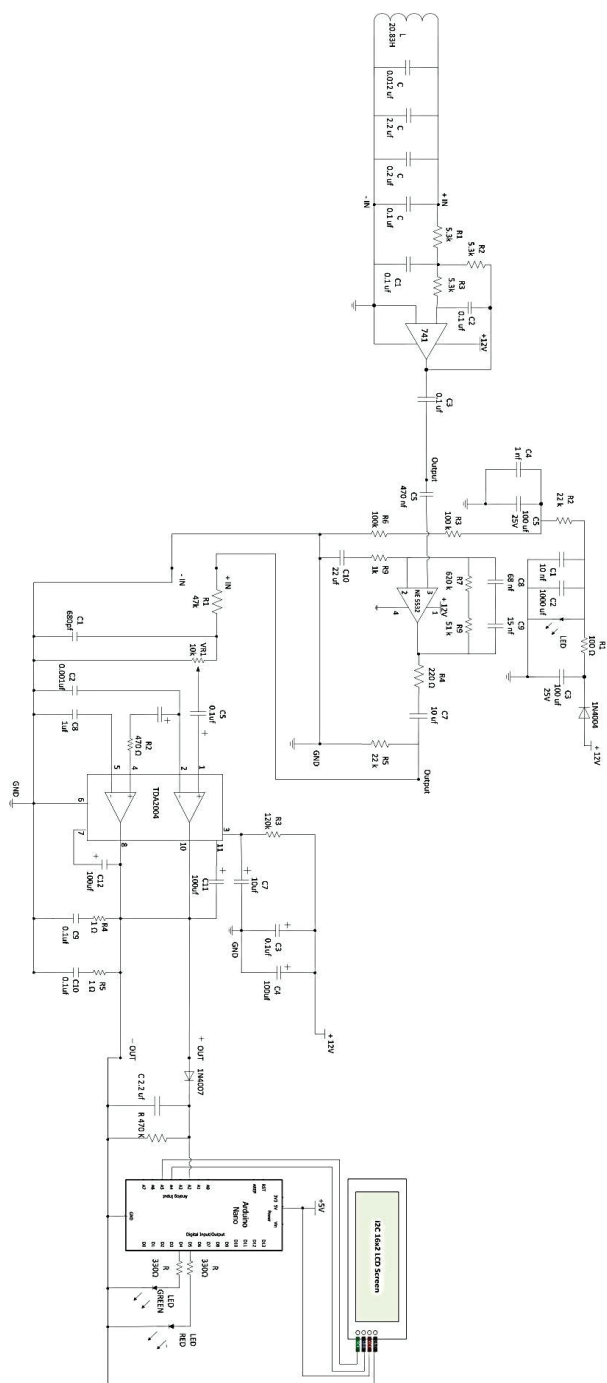
- 1) เปิดสวิตช์ชุดรับและชุดส่งสัญญาณเพื่อเริ่มการทำงานของอุปกรณ์ โดยชุดรับสัญญาณจะเริ่มทำงานเปิดหน้าจอแสดงผลแบบและไฟแสดงสถานะสีแดงจะสว่างขึ้น



รูปที่ 7 วงจรและเครื่องส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

- 2) ชุตส่งสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เริ่มจากชุดกำเนิดสัญญาณจะทำหน้าที่สร้างคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 22 เฮิร์ตซ์ ก่อนส่งต่อไปยัง

วางจรรยาบรรณ เพื่อให้การส่งสัญญาณสามารถ
ส่งได้ในระยะทางที่ไกลขึ้น



รูปที่ 8 วงจรและเครื่องรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

- 3) ชุดรับสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะเริ่มทำการตรวจจับสัญญาณความถี่ 22 เฮิร์ตซ์ที่ผ่านเข้ามา

หลอดไฟสีแดงจะดับลงและหลอดไฟสีเขียวจะสว่างขึ้นสัญญาณจะถูกส่งต่อไปยังวงจรขยายสัญญาณ



เครื่องส่งสัญญาณภายในท่อ



เครื่องรับสัญญาณภายนอกท่อ

รูปที่ 9 การติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณสำหรับค้นหาอุปกรณ์ตรวจสอบท่อ

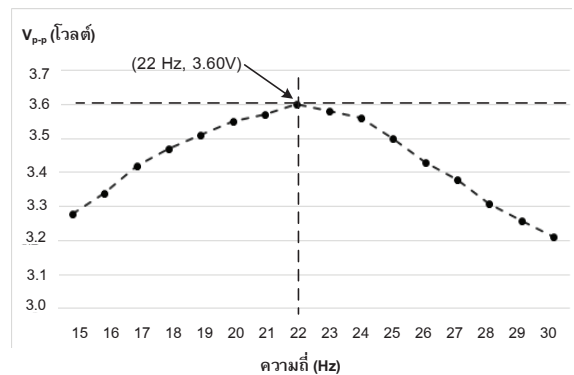
และชุดประมวลผลก่อนส่งข้อมูลตัวเลขระยะทางที่สามารถคำนวณได้ไปแสดงบนหน้าจอแอลซีดี

3. ผลการวิจัย

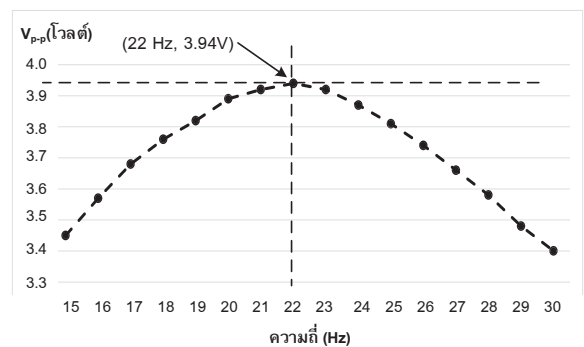
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดสอบความถี่ที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณ การทดสอบขณะเครื่องส่งและรับสัญญาณอยู่ภายนอกและภายในท่อ การทดสอบระยะทางสูงสุดที่สามารถรับส่งได้ระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ และการทดสอบความแม่นยำในการบอกตำแหน่ง เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การทดสอบความถี่ที่ใช้ในการรับและส่งสัญญาณ

จากรูปที่ 9 แสดงการติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณอุปกรณ์ตรวจสอบท่อในการใช้งานจริง โดยที่เครื่องส่งสัญญาณจะถูกติดตั้งภายในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว และมีความหนา 7.11 มิลลิเมตร ส่วนเครื่องรับสัญญาณจะติดตั้งอยู่ภายนอกท่อเพื่อทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณตามที่ได้ออกแบบไว้ จากนั้นจะเริ่มทดสอบการรับและส่งสัญญาณของอุปกรณ์ว่าสามารถตรวจจับได้จริงที่ความถี่เรโซแนนซ์ตามที่ต้องการคือ 22 เฮิรตซ์ หรือไม่ โดยใช้ฟังก์ชันกำเนิดสัญญาณกำหนดให้ความถี่มีค่าอยู่ระหว่าง 15 ถึง 30 เฮิรตซ์ (เนื่องจากความถี่ตัดของตัวกรองผ่านต่ำตั้งค่าไว้ที่ 30 เฮิรตซ์) โดยพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าที่มีค่ามากที่สุดที่สายอากาศชุดส่งและชุดรับสัญญาณเพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อกำหนดให้ค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตเท่ากับ 4 โวลต์



รูปที่ 10 ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องส่งสัญญาณ

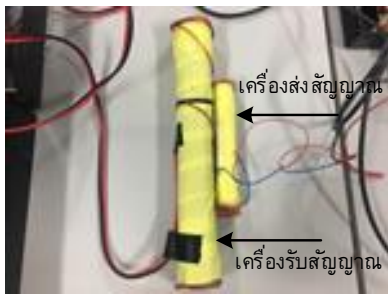


รูปที่ 11 ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องรับสัญญาณ

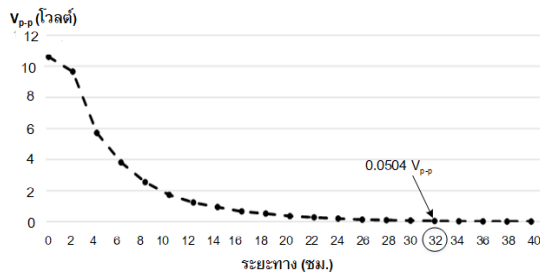
จากรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่าสายอากาศชุดส่งสัญญาณสามารถทำงานได้ดีที่สุดที่ความถี่ 22 เฮิรตซ์ (ซึ่งสอดคล้องกับที่ได้ออกแบบไว้) และมีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 3.60 โวลต์ ในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าสายอากาศชุดรับสัญญาณสามารถทำงานได้ดีที่สุดที่ความถี่ 22 เฮิรตซ์เช่นกัน และมีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 3.94 โวลต์ สาเหตุที่แรงดันไฟฟ้าที่ชุดรับสัญญาณมีค่ามากกว่าชุดส่งสัญญาณเนื่องจากชุดรับสัญญาณมีวงจรขยายสัญญาณเพื่อทำให้สามารถตรวจจับสัญญาณได้ในระยะทางไกลมากขึ้น

3.2 การทดสอบอุปกรณ์ขณะเครื่องส่งสัญญาณอยู่ภายนอกท่อ

เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพเมื่อต้องการทราบว่าระยะทางที่ไกลที่สุดที่เครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณสามารถตรวจจับได้เป็นเท่าใด และมีค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นเท่าใดใน



รูปที่ 12 การวางสายอากาศของเครื่องส่งและรับติดกันภายนอกท่อ



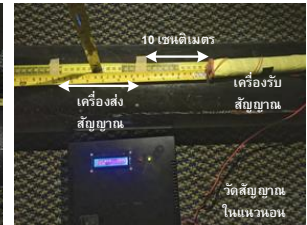
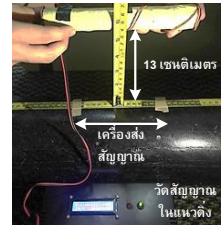
รูปที่ 13 ผลการทดสอบการรับ-ส่งสัญญาณเมื่ออยู่ภายนอกท่อ

ขณะที่ไม่มีอะไรมาขวางกั้น จึงได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการรับ-ส่งสัญญาณ โดยวางสายอากาศเครื่องส่งและสายอากาศเครื่องรับสัญญาณให้ติดกันขณะอยู่ภายนอกท่อ (ดังรูปที่ 12) แล้วบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า จากนั้น จะทำการย้ายเครื่องส่งสัญญาณให้ห่างออกจากเครื่องรับไปในแนวระนาบคร่าวละ 2 เซนติเมตร แล้วบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า ทำการทดสอบเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเครื่องรับไม่สามารถตรวจจับสัญญาณจากเครื่องส่งได้จึงหยุดทำการทดลอง

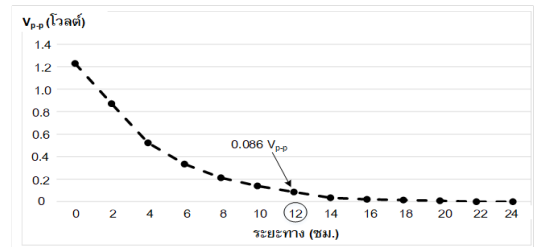
พิจารณาจากรูปที่ 13 จะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณจะแปรผกผันกัน หมายความว่า ยิ่งระยะห่างกันมากขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าลดลงไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเครื่องรับตรวจจับสัญญาณไม่ได้ โดยที่แรงดันไฟฟ้าอินพุตจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.05 โวลต์ เพื่อให้ชุดประมวลผลที่เครื่องรับสามารถทำงานได้ ซึ่งระยะทางห่างที่สุดที่สามารถตรวจจับสัญญาณได้เท่ากับ 32 เซนติเมตร



ก) การติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณในท่อและเครื่องรับสัญญาณนอกท่อ



ข) การวัดระยะการรับ-ส่งสัญญาณในแนวดิ่งและแนวนอน



ค) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณ

รูปที่ 14 ผลการทดสอบการรับ-ส่งสัญญาณเมื่ออยู่ภายนอกท่อ

3.3 การทดสอบอุปกรณ์ขณะเครื่องส่งสัญญาณอยู่ภายในท่อ

จากรูปที่ 14(ก) แสดงการติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณจะถูกติดตั้งไว้ภายในท่อเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว และมีความหนา 7.11 มิลลิเมตร มีระยะห่างจากผนังด้านบนของท่อ 3 เซนติเมตร และเครื่องรับสัญญาณจะวางอยู่ภายนอกและวางติดอยู่กับผิวท่อเหล็กซึ่งจะเป็นลักษณะการนำไปใช้งานจริง จากผลการทดสอบในรูปที่ 14(ข) พบว่าแรงดันไฟฟ้าในระหว่างการรับ-ส่งสัญญาณจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตต่ำที่สุดที่สามารถรับ-ส่งสัญญาณได้คือ 0.05 โวลต์ จากนั้นจะทดสอบโดยการนำสายอากาศเครื่องรับสัญญาณวางติดกับผนังภายนอกท่อเหล็กและเลื่อนขึ้นไปใน

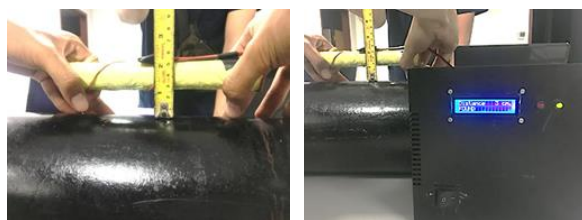
ตารางที่ 1 การกำหนดช่วงของค่า ADC เทียบกับระยะห่างระหว่างสายอากาศเครื่องรับกับผนังท่อเหล็กที่ระยะต่าง ๆ

ระยะห่าง (ซม.)	แรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้ (โวลต์)	การกำหนดช่วงของค่า ADC
0	1.229	ADC >=250
1	1.080	222<= ADC <250
2	0.871	184<= ADC <222
3	0.683	166<= ADC <184
4	0.523	148<= ADC <166
5	0.425	130<= ADC <148
6	0.335	112<= ADC <130
7	0.258	94<= ADC <112
8	0.213	76<= ADC <94
9	0.179	58<= ADC <76
10	0.140	40<= ADC <58
11	0.105	22<= ADC <40
12	0.086	10<= ADC <22
>12 (ตรวจไม่พบ)	0.042	ADC <10

แนวตั้งและแนวนอนแล้วบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยทุกครั้ง จากผลการทดสอบพบว่าเครื่องรับสามารถตรวจจับสัญญาณได้ระยะทางในแนวตั้งและแนวนอนเท่ากับ 12 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 14(ข) ซึ่งระยะทางที่ตรวจจับได้จะมีระยะใกล้กว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่เครื่องส่งอยู่ภายนอกท่อ เนื่องจากต้องส่งสัญญาณผ่านท่อเหล็กซึ่งเป็นตัวกีดขวางสัญญาณ ดังนั้นสัญญาณจึงถูกลดทอนสูงขึ้นตามความหนาของท่อเหล็กและระยะห่างที่เพิ่มขึ้น

3.4 การทดสอบความถูกต้องของการบอกระยะทางที่ตรวจจับได้

เริ่มจากการกำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศกับผนังท่อเหล็กที่ระยะต่าง ๆ โดยใช้ตลับเมตรวัดระยะ แล้วบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณแอนะล็อกซึ่งอยู่ในช่วง 0 ถึง 5 โวลต์ แล้วจึงนำไปเทียบกับค่าความละเอียดของไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 10 บิต ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง



รูปที่ 15 การอ่านค่าระยะห่างจากจอแสดงผลและตลับเมตร

1023 (analog to digital converter: ADC) เพื่อนำไปใช้ในการสร้างเงื่อนไขของการโปรแกรมให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (6)

$$\frac{1023}{5} = \frac{\text{ค่าของ ADC}}{\text{แรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากเครื่องรับสัญญาณ}} \quad (6)$$

จากตารางที่ 1 ในการทดลองจะเริ่มจากการกำหนดระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณเริ่มต้นจาก 0 เซนติเมตร (วางชิดกัน) โดยจะบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องรับสัญญาณ และค่า ADC ที่คำนวณได้จากสมการ (6) โดยการโปรแกรมลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ จะสังเกตได้ว่าแรงดันไฟฟ้าจะไม่เท่ากับ 5 โวลต์ เนื่องจากมีผนังของท่อเหล็กหนา 7.11 มิลลิเมตรมาขวางกั้น แรงดันไฟฟ้าจึงถูกลดทอนลงไป อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นเราจึงต้องทำการทดสอบเช่นเดิมจำนวน 10 ครั้ง ในแต่ละระยะแล้วหาค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้ และกำหนดช่วงของค่า ADC สำหรับค่า ADC ที่ต้องกำหนดเป็นช่วงเนื่องจากค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง ๆ หนึ่งเช่นเดียวกัน ส่งผลให้ค่า ADC ที่ได้จากการทดสอบแต่ละครั้งไม่เท่ากันด้วย จากนั้นจะเพิ่มค่าระยะห่างไปจนกระทั่งระยะห่างมากกว่า 12 เซนติเมตร เครื่องรับจะตรวจจับสัญญาณไม่ได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากรูปที่ 14(ค)

การทดสอบความถูกต้องของการบอกระยะทางที่ตรวจจับได้จากเครื่องรับสัญญาณ ทำการทดสอบโดยนำเครื่องส่งสัญญาณติดตั้งเข้าไปภายในท่อ จากนั้นนำเครื่องรับสัญญาณมาตรวจจับสัญญาณเพื่อวัดระยะทางจากผิวด้านบนของท่อ

เหล็กโดยจะต้องวางในแนวเดียวกันกับเครื่องส่งสัญญาณ ดังรูปที่ 15 ระยะทางที่วัดจะอยู่ระหว่างความสูงที่ห่างออกจากพื้นผิวท่อในแนวดิ่งแล้วทำการบันทึกผลการทดสอบโดยการอ่านค่าระยะห่างจากจอแสดงผลและระยะห่างที่อ่านได้จากตลับเมตรซึ่งจะใช้เป็นค่าเปรียบเทียบเพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง ดังแสดงในสมการ (7)

$$\% \text{ความถูกต้อง} = \frac{\text{ระยะทางที่อ่านได้จากจอแสดงผล}}{\text{ระยะทางที่อ่านได้จากตลับเมตร}} \times 100\% \quad (6)$$

เราได้ทำการทดสอบที่ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณจริงที่ระยะ 3 6 9 และ 12 ซม. แล้วทำการบันทึกผลการอ่านค่าจากจอแสดงผลและระยะจริงที่อ่านค่าได้จากตลับเมตร โดยแต่ละระยะจะทำการทดสอบซ้ำ ๆ จำนวน 10 ครั้งแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น จากผลการทดสอบพบว่าเครื่องรับสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงระยะทางผ่านหน้าจอแสดงผลมีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องโดยเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 94

5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องรับและส่งสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับใช้ค้นหาอุปกรณ์ตรวจสอบเพื่อลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ซึ่งนำไปทดสอบกับท่อเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว และมีความหนา 7.11 มิลลิเมตร โดยอาศัยสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ 22 เฮิร์ตซ์ เครื่องส่งและเครื่องรับสามารถสื่อสารกันได้ดีที่สุดในระยะห่างที่มากที่สุดที่เครื่องรับสามารถระบุตำแหน่งเครื่องส่งที่อยู่ห่างกันในแนวดิ่งและแนวนอนได้เท่ากับ 12 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ และมีความถูกต้องโดยเฉลี่ยของการตรวจจับตำแหน่งเท่ากับร้อยละ 94

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และบริษัท ดาคอน อินส

เป็คชั่น เซอร์วิส เซส จำกัด ซึ่งเป็นสถานที่ทำงานของนิสิตผู้ร่วมทำงานวิจัย (จิตสุภา บุญหาธาตุ) ที่ให้การสนับสนุนทั้งสถานที่เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Haines H, Porter PC, Barkdull L, Afzal M, Lee JY. Advanced MFL signal analysis aids pipe corrosion detection. *Pipeline Gas Ind.* 1999; 2: 49–63.
- [2] Kim HM, Park GS. A New Sensitive Excitation Technique in Nondestructive Inspection for Underground Pipelines by Using Differential Coils. *IEEE Transaction on Magnetics.* 2017; 53; no. 1.
- [3] Archila JF, Becker M. Study of Robots to Pipelines, Mathematical Models and Simulation. *IEEE Proceeding on Latin American Robotics Symposium.* 2013: 18–23.
- [4] Firas BIA, Ali AM, KSM S, Weria K, Moslem Y. Design of a multi-diameter in-line cleaning and fault detection pipe pigging device. *IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS).* 2015: 258–265.
- [5] บริษัท ดาคอนอินสเป็คชั่น เซอร์วิส เซส จำกัด. เข้าถึงได้จาก : <http://www.dacon-inspection.com/th/about-us/company-profile/> [เข้าถึงเมื่อ 23 พฤษภาคม 2560]
- [6] Khaled AO, Bryan DR, Roberto GR. Discussion of Series and Parallel Resonance phenomena in the input impedance of antennas. *IEEE American Geophysical Union (AGU) Magazine.* 2010; 45: 1–9.