

ระบบวัดระดับของเหลวโดยใช้หลักการตรวจจับค่าความจุ

Liquid Level Measurement System using Capacitive Sensor

บัณฑิตวิทยุ ภัทรสรณ์ศิริ¹, ธนพร ทัดจันทร์², ธนภัทร สุทธิอาคาร², ปวีรศา รุ่งโพธิ์ทอง², และพิพัฒน์ พรหมมี^{2*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและ
คอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
²ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
* ผู้รับผิดชอบบทความ
pipat.pr@kmitl.ac.th

Received: 21 May 2026

Revised: 10 Aug 2026

Accepted: 13 Aug 2026

บทคัดย่อ

การวัดระดับของเหลวด้วยเซนเซอร์แบบความจุไฟฟ้ามีข้อจำกัดจากค่าความจุแฝง (Parasitic Capacitance) ของสายสัญญาณและวงจรอ่านค่าเมื่อใช้งานแบบระยะไกล ส่งผลให้ความแม่นยำในการวัดค่าความจุขนาดเล็ก ลดลง. งานวิจัยนี้นำเสนอระบบวัดระดับของเหลวประเภทน้ำและแอลกอฮอล์โดยใช้หลักการตรวจจับค่าความจุไฟฟ้า (Capacitive Sensor) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์สัมพันธ์กับระดับของเหลวภายในถัง ระบบใช้เทคนิค Programmable Phase-Locked ร่วมกับวงจรกรองผ่านทุกความถี่ (All-Pass Filter) เพื่อสร้างความต่างเฟส 90° และแปลงสัญญาณเป็นค่าความจุ พร้อมทั้งประยุกต์ใช้วงจร Improved Active Shield เพื่อชดเชยผลกระทบจากค่าความจุแฝงของสายโคแอกเซียล (Coaxial Cable) และขาอินพุตของออปแอมป์ ทำให้สามารถวัดค่าความจุในช่วง 1–100 pF ได้โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ (Non-Linear Error: NLE) ต่ำกว่า 2% นอกจากนี้ ระบบสามารถทำงานแบบเรียลไทม์บนไมโครคอนโทรลเลอร์และแสดงผลได้ทันทีโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ประมวลผลภายนอก ส่งผลให้ระบบมีต้นทุนต่ำ ขนาดกะทัดรัด และเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมที่ไม่ปลอดภัย

คำสำคัญ: หลักการตรวจจับค่าความจุไฟฟ้า ค่าความจุแฝง วงจรกรองผ่านทุกความถี่

Abstract

The accuracy of liquid level measurements using capacitive sensors can be compromised in remote sensing applications due to parasitic capacitance from signal cables and interface circuits, leading to reduced precision in detecting subtle changes in capacitance. This paper introduces a capacitive method for measuring liquid levels in water and alcohol solutions, where the liquid height is assessed based on variations in capacitance between the sensing electrode and the ground indicate the liquid level in a tank. The system uses Programmable Phase-Locked techniques along with an All-Pass Filter circuit to generate a 90° phase shift and convert the locked frequency into capacitance values, unaffected by parasitic capacitance from coaxial cables and op-amp pins, which arise from circuit design and connection. The system incorporates an Improved Active Shield circuit, which has been enhanced to eliminate parasitic capacitance from both the coaxial cable and the op-amp pins, enabling capacitance measurement in the range of 1–100 pF with a normalized level error (NLE) of less than 2%. This system operates in real-time on a microcontroller, providing immediate display results. It is cost-effective, compact, and suitable for use in hazardous environments.

Keywords: Capacitive Sensor, Parasitic Capacitance, All-Pass Filter

1. บทนำ

การวัดระดับของเหลวมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรม เช่น การควบคุมปริมาณวัตถุดิบในกระบวนการผลิต โดยการเลือกชนิดของเซนเซอร์จะต้องพิจารณาจากสภาพแวดล้อมประเภทของเหลว อายุการใช้งาน และต้นทุนที่เหมาะสม เซนเซอร์อัลตราโซนิก (Ultrasonic) [1] เหมาะสำหรับการวัดระดับในถังปิด แต่มีข้อจำกัดเมื่อเกิดการสะท้อนภายใน เช่น ใสน้ำหรือฟองอากาศ เซนเซอร์เรดาร์ (Radar) [2] สามารถทำงานได้ดีในสภาพแวดล้อมที่มีฝุ่นหรือไอน้ำ แต่มีราคาสูงและต้องการการติดตั้งที่แม่นยำ ขณะที่เซนเซอร์วัดระดับด้วยความดัน (Hydrostatic level sensors) [3] ให้ความแม่นยำสูง แต่ต้องมีการชดเชยอุณหภูมิและความดันในสภาพแวดล้อมที่มีฝุ่นหรือไอน้ำ

ด้วยข้อจำกัดเหล่านี้ เซนเซอร์ประเภทความจุไฟฟ้า (Capacitive Sensor) จึงได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในการวัดระดับของเหลว เซนเซอร์ประเภทนี้มีคุณสมบัติเด่น เช่น ความไวและความแม่นยำสูง ใช้พลังงานต่ำ และไม่ถูกรบกวนจากสีหรือสภาพพื้นผิวของวัตถุ สามารถตรวจจับได้ทั้งวัตถุนำไฟฟ้าและไม่นำไฟฟ้า อีกทั้งยังมีความทนทานและต้องการบำรุงรักษาต่ำการใช้งานในพื้นที่อันตราย เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมีและโรงงานนิวเคลียร์ มักต้องแยกวงจรประมวลผลออกจากตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ เซนเซอร์ชนิดนี้ทำงานตามหลักการของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุ ทำให้ต้องเชื่อมต่อกับสายสัญญาณยาว (Remote Sensor) [4] ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาความจุแฝง (Parasitic Capacitance) [5] ส่งผลให้ค่าการวัดคลาดเคลื่อน โดยเฉพาะเมื่อวัดค่าความจุขนาดเล็กระดับพิโกฟารัด (pF) ที่ไวต่อสัญญาณรบกวนภายนอกเพื่อแก้ไขปัญหานี้ มีการนำเสนอวิธีการต่าง ๆ เช่น เทคนิคที่ใช้พื้นฐานของวงจร Relaxation Oscillator [6] ร่วมกับเทคนิคลดผลกระทบจากความจุแฝงในสายสัญญาณด้วย Active Shield [7] และการเปรียบเทียบค่าความจุอ้างอิง รวมถึงการออกแบบวงจรด้วย Instrumentation Amplifier [8] ที่ใช้ความจุอ้างอิงแบบปรับค่าได้เพื่อลดผลกระทบจากความจุแฝง อย่างไรก็ตาม วิธีการเหล่านี้มักมีความซับซ้อนและใช้จำนวนอุปกรณ์มาก ซึ่งทำให้ยากต่อการปรับใช้งานจริง

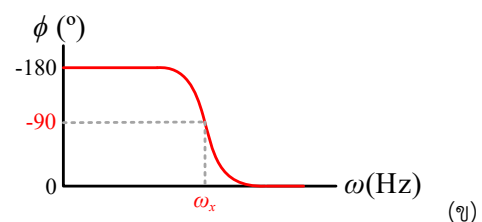
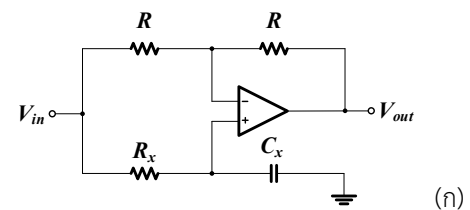
งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาระบบวัดระดับของเหลวโดยใช้หลักการตรวจจับค่าความจุไฟฟ้า บนพื้นฐานของวงจรกรองผ่าน

ทุกความถี่ (All-pass Filter) ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-C3 ทำหน้าที่อ่านค่าความจุไฟฟ้าและแปลงค่าที่ได้ให้อยู่ในรูปของระดับของเหลว ร่วมกับ Active Shield แบบปรับปรุงเพื่อกำจัดค่าความจุแฝงในสายโคแอกเซียลอย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยให้สามารถวัดระดับในระยะไกลได้อย่างแม่นยำและลดความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายต่อวงจรอ่านค่า โดยอาศัยการวัดความต่างเฟสระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณจากเซนเซอร์ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความจุของของเหลว นอกจากนี้การออกแบบเซนเซอร์รูปทรงกระบอกกลวงยังช่วยเสริมความเสถียรของสัญญาณ ทำให้ระบบนี้เป็นทางเลือกที่คุ้มค่า ไม่ซับซ้อน และเหมาะสำหรับการใช้งานในพื้นที่อันตรายต่าง ๆ โดยไม่จำเป็นต้องใช้วงจรที่ซับซ้อนและมีราคาสูง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรกรองผ่านทุกความถี่ (All-Pass Filter)

วงจรกรองผ่านทุกความถี่เป็นวงจรกรองความถี่รูปแบบหนึ่งที่ทำให้สัญญาณสามารถผ่านไปได้โดยมีแอมพลิจูดคงที่ มีช่วงการตอบสนองเฟสตั้งแต่ -180 องศา ถึง 0 องศาโดยแสดงรูปวงจรและการตอบสนองของเฟสต่อความถี่ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 1 (ก) วงจรกรองผ่านทุกความถี่ (ข) ผลการตอบสนองความถี่ต่อเฟสของวงจรกรองผ่านทุกความถี่

จากรูปที่ 1 (ก) แสดงรูปวงจรกรองผ่านทุกความถี่ประกอบไปด้วย ออปแอมป์ 1 ตัว ตัวต้านทาน 3 ตัว และตัวเก็บประจุ 1 ตัว ซึ่งจะถูกแทนที่ด้วยค่าความจุระหว่างอิเล็กทรอนิกส์

กราวด์ (C_x) จากวงจรดังกล่าวสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$H(s) = \frac{1 - sR_x C_x}{1 + sR_x C_x} \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) เมื่อวิเคราะห์ Pole และ Zero ของระบบสามารถเขียนผลการตอบสนองทางเฟส ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta\phi = -2 \tan^{-1} \left(\frac{\omega}{\omega_x} \right) \begin{cases} \omega \rightarrow 0 : \Delta\phi = -180 \\ \omega = \omega_x : \Delta\phi = -90 \\ \omega \rightarrow \infty : \Delta\phi = 0 \end{cases} \quad (2)$$

จากสมการที่ (2) เมื่อความถี่ของสัญญาณที่ป้อนเข้าสู่วงจรมีค่าเท่ากับความถี่ธรรมชาติ (Nature frequency) ของระบบ ($\omega = \omega_x$) ส่งผลให้มีความต่างเฟส $\Delta\phi = -90$ โดยความถี่ธรรมชาติของระบบมีค่าเท่ากับ $\omega_x = 1/R_x C_x$ จากกรณีดังกล่าวสามารถคำนวณค่าความจุทดสอบ C_x ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C_x = \frac{1}{\omega R_x} \quad (3)$$

2.2 วิเคราะห์ความไม่เป็นอุดมคติของระบบ

2.2.1 ความจุแฝงที่ขาอินพุตของออปแอมป์

ในทางปฏิบัติ การใช้งานออปแอมป์ต้องคำนึงถึงความจุแฝงที่เกิดขึ้นที่ขาอินพุตทั้งสอง โดยเฉพาะสองประเภทหลักของความจุแฝง ได้แก่ Capacitance common mode (C_{ic}) และ Differential capacitance (C_{id}) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างขาอินพุตทั้งสองขาของออปแอมป์ การคำนึงถึงความจุแฝงเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญ เพราะอาจมีผลกระทบต่อการทำงานของวงจรออปแอมป์ และความแม่นยำในการวัดสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) เมื่อวิเคราะห์ความจุแฝงที่ขาอินพุตของออปแอมป์ร่วมกับวงจรที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 2 (ข)

โดยในวงจรรูปที่ 2 (ข) ความจุ C_{id} ระหว่างขาอินพุตทั้งสองสามารถละเลยได้เนื่องจากคุณสมบัติ Virtual Short ของออปแอมป์ซึ่งทำให้แรงดันที่ขาอินพุตทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยไม่สร้างผลกระทบต่อการทำงานของวงจร ในส่วนความจุ C_{ic-} ซึ่งปรากฏในฟังก์ชันถ่ายโอน ส่งผลกระทบบต่อการตอบสนองของวงจรที่ความถี่สูง เนื่องจากความจุนี้อาจมีอิทธิพลต่อการ

เปลี่ยนแปลงของสัญญาณเมื่อความถี่สูงขึ้น ดังนั้นในการวิเคราะห์ระบบที่ความถี่ต่ำถึงปานกลาง เราสามารถละเลยผลกระทบจากความจุ โดยสมการฟังก์ชันถ่ายโอนและการตอบสนองเฟสแสดงไว้ใน

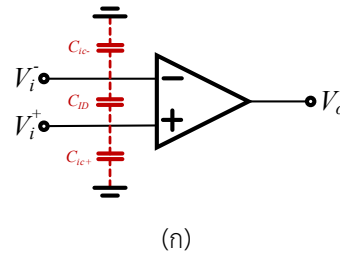
$$H(s) \approx \frac{1 - s(R_x(C_{ic+} + C_x) - RC_{ic-})}{1 + s(R_x(C_{ic+} + C_x))} \quad (4)$$

$$H(s)|_{R_x \gg R} \approx \frac{1 - s\tau'}{1 + s\tau'} \quad (5)$$

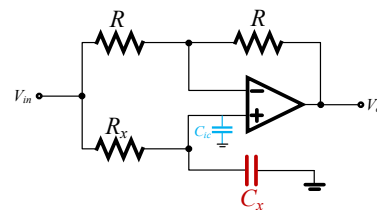
โดยที่ $\tau' = R_x C_s$ และ $C_s = C_{ic+} + C_x$

$$\Delta\phi = \angle H(s)|_{R_x \gg R} \approx -2 \tan^{-1}(\omega\tau') \quad (6)$$

เมื่อกำหนดให้ $R_x \gg R$ สมการที่ (5) จะสามารถประมาณค่าเท่ากับสมการที่ (1) การทำเช่นนี้จะส่งผลให้การแปลงสัญญาณที่แสดงในสมการ (5) ถูกย่อเป็นรูปอย่างง่ายและวงจรเทียบเท่าจะถูกแสดงในรูปที่ 2 (ข)



(ก)



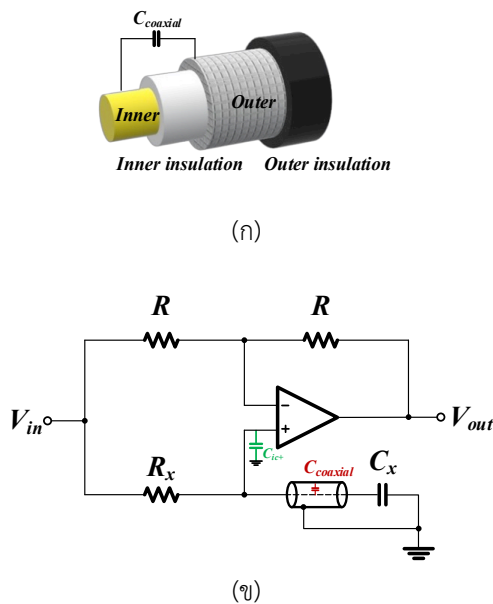
(ข)

รูปที่ 2 (ก) ความจุแฝงที่ขาอินพุตของออปแอมป์ในทางปฏิบัติ (ข) ในวงจรกรองผ่านทุกความถี่ (All-Pass Filter) และการพิจารณาความจุแฝงที่ขาออปแอมป์

2.3 ความจุแฝงภายในสายโคแอกเซียล

ในการใช้งานในรูปแบบ Remote sensor โดยเชื่อมต่อเซ็นเซอร์ผ่านสายสัญญาณสายโคแอกเซียลที่เชื่อมต่อลงกราวด์ (Passive shield) เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน จากความต่างศักย์ระหว่างสายชั้นใน (Inner) และฉนวนชั้นนอก (Outer) ส่งผลให้เกิดความ

จุลค่าของสายโคแอกเซียล ($C_{coaxial}$) ซึ่งมีประมาณ 100 pF ต่อความยาวสายหนึ่งเมตร แสดงดังรูปจำลองสายสัญญาณดังรูปที่ 3 (ก) ความจุแฝงดังกล่าวทำหน้าที่เสมือนต่อขนานกับค่าความจุของเซนเซอร์จริง ส่งผลให้ค่าความจุรวมประกอบด้วยค่าความจุของเซนเซอร์และค่าความจุแฝงของสายสัญญาณ เมื่อความยาวสายเพิ่มขึ้น ค่าความจุแฝงมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ทำให้เกิดความไม่เสถียรของผลการวัด เมื่อนำไปวิเคราะห์ร่วมกับวงจรที่นำเสนอสามารถแสดงวงจรได้ดังรูปที่ 3 (ข)



รูปที่ 3 (ก) ส่วนประกอบภายในของสายโคแอกเซียล

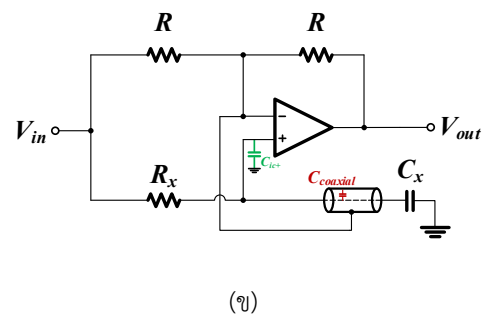
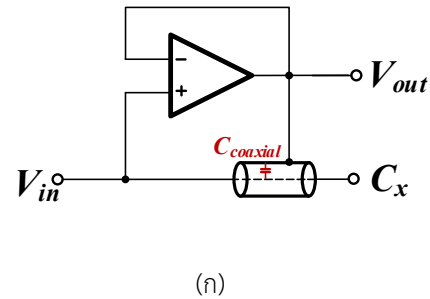
(ข) วงจรอ่านค่าความจุที่เชื่อมต่อกับสายโคแอกเซียลแบบลงกราวด์

จากรูปที่ 3 (ข) กรณีวงจรอ่านค่าความจุที่เชื่อมต่อกับสายโคแอกเซียลรูปแบบ Passive shield จะได้รับผลกระทบจากความจุแฝงภายในสายโคแอกเซียล เมื่อเทียบกับอัตราเปลี่ยนแปลงของความจุ มีค่าต่างกันหลายเท่าตัว ซึ่งส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการอ่านค่าความจุ

2.4 Active Shield แบบปรับปรุง (Improved Active Shield)

ในอดีตมีการนำเสนอวิธีที่แก้ปัญหาค่าความจุแฝงของสายโคแอกเซียล ($C_{coaxial}$) ด้วยเทคนิค Active shield โดยใช้ Unity-gain buffer ดังรูปที่ 4 (ก) ทำให้ความต่างศักย์ระหว่างสายทั้งสองชั้น

มีค่าเป็นศูนย์ส่งผลให้สามารถลดผลกระทบของความจุแฝงของสายโคแอกเซียล ($C_{coaxial}$) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับ All-Pass Filter ดังรูปที่ 4 (ข)



รูปที่ 4 (ก) วงจร Unity-gain buffer (ข) วงจร All-Pass Filter ที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบ Improved Active Shield

จากรูปที่ 4 (ข) จะพบได้ว่ามีค่าความจุแฝงที่ขาบวกของออปแอมป์ (C_{ic}) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในเชิงปฏิบัติ ออปแอมป์จะมีค่าความจุแฝงทั้งที่ขาบวกและขาลบ แต่เมื่อกำหนดให้ R มีค่าน้อยกว่า R_x ประมาณ 20 เท่า จะสามารถลดผลค่าความจุแฝงที่ขาลบของออปแอมป์ (C_{ic-}) ทำให้พจน์ที่เกี่ยวข้องกับ C_{ic-} มีผลต่อสมการน้อยมาก จึงสามารถประมาณค่าได้ในขณะเดียวกัน วงจร All-Pass Filter ที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบ Improved Active Shield ช่วยลดจำนวนออปแอมป์ที่ต้องใช้ในส่วนของวงจร Unity-gain buffer โดยใช้คุณสมบัติ Virtual Short ของออปแอมป์ในการเชื่อมต่อกับสายสัญญาณชั้นนอกและขา Non-inverting ของออปแอมป์ ทำให้สามารถใช้ออปแอมป์เพียง 1 ตัวในการแก้ปัญหาค่าความจุแฝงในสายโคแอกเซียล และสามารถนิยามสมการถ่ายโอนได้ดังสมการที่ (5) จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของกรณีดังกล่าว ส่งผลให้สมการอยู่ในรูปเดียวกันกับสมการอุดมคติของวงจร All-Pass Filter ดังสมการที่ (1)

2.5 ค่าความจุระหว่างอิเล็กโทรดกับกราวด์

เนื่องจากการออกแบบแผ่นอิเล็กโทรดต้องคำนึงถึงลักษณะของสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่น ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่กำหนดค่าความจุของระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ความสัมพันธ์พื้นฐานของตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน ดังสมการที่ (7) [9]

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (7)$$

เพื่อคำนวณค่าความจุที่เกิดขึ้นจากพื้นที่แผ่น (A) ระยะห่าง (d) ค่าคงที่ไฟฟ้าในสุญญากาศ (ϵ_0) และสัมประสิทธิ์การอนุญาตไฟฟ้าของตัวกลาง (ϵ_r) เมื่อระดับของเหลวเปลี่ยนแปลง สนามไฟฟ้าและพื้นที่ที่ถูกไดอิเล็กทริกครอบคลุมนจะเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่าความจุเปลี่ยน สูตรนี้จึงเป็นพื้นฐานสำคัญในการกำหนดรูปทรง ระยะห่าง และความไวของแผ่นอิเล็กโทรดเพื่อให้เซนเซอร์สามารถตรวจวัดระดับของเหลวโดยคำนวณเพื่อให้สอดคล้องกับรูปทรงจริง จึงจำเป็นต้องพิจารณาโครงสร้างในลักษณะตัวเก็บประจุแบบโคแอกเซียล ซึ่งประกอบด้วยอิเล็กโทรดด้านในที่มีรัศมี R_1 และอิเล็กโทรดด้านนอกที่มีรัศมี R_2 โดยมีความยาวของเซนเซอร์เท่ากับ l จากการใช้กฎของเกาส์ (Gauss's Law) และการหาความต่างศักย์ไฟฟ้าจากสนามรูปทรงกระบอก สามารถหาสูตรค่าความจุได้ดังนี้

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln(R_2/R_1)} \quad (8)$$

จากสมการนี้ แสดงให้เห็นว่าค่าความจุของรูปทรงกระบอกไม่ได้ขึ้นกับพื้นที่แผ่นแบบเชิงเส้นอีกต่อไป แต่ขึ้นกับความยาวเซนเซอร์และอัตราส่วนระหว่างรัศมีของอิเล็กโทรดทั้งสอง [10]

3. ระบบการตรวจวัดค่าความจุด้วย Improved

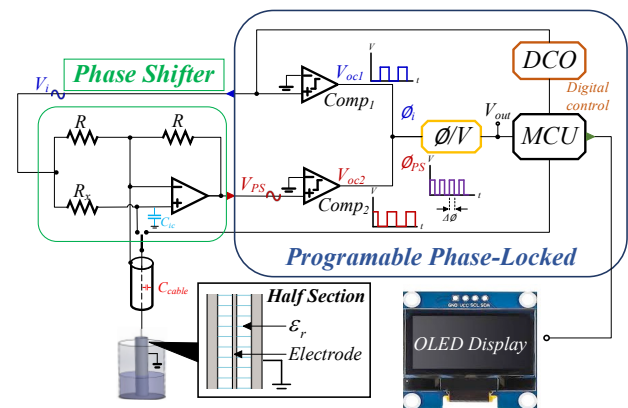
Active Shield และ วัดระดับของเหลว

3.1 การออกแบบระบบ

การกำจัดค่าความจุแฝงของสายโคแอกเซียล ($C_{coaxial}$) ทำได้โดยใช้เทคนิค Active Shield แบบปรับปรุง (Improved Active Shield) ทำให้ความต่างศักย์ระหว่างสายโคแอกเซียลทั้งสองชั้นเป็นศูนย์ ซึ่งช่วยลดผลกระทบจากความจุแฝงของสายโคแอกเซียลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น หลักการนี้จึงถูกนำมา

ประยุกต์ใช้ร่วมกับ All-Pass Filter และ วงจร PPL (Programmable Phase-Locked), ซึ่งแสดงในรูปที่ 5 สัญญาณอ้างอิง (V_{ref}) และสัญญาณที่เลื่อนเฟส (V_{ps}) จะถูกประมวลผลผ่านตัวเปรียบเทียบสองตัว คือ MAX907 ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณไซน์ให้เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม จากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกส่งไปยังวงจร ϕ/V เพื่อตรวจวัดความแตกต่างของเฟสระหว่างสัญญาณทั้งสอง และแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้า DC (V_{out}) ซึ่งจะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ของ MCU ESP32-C3

ในขณะเดียวกัน MCU จะส่งสัญญาณควบคุมไปยังตัวสั่นดิจิทัล (DCO) AD9833 เพื่อปรับความถี่ให้มีความแตกต่างเฟส 90° ตามที่โปรแกรมกำหนด เมื่อ MCU ล็อคความถี่ได้แล้ว จะนำค่าดังกล่าวมาคำนวณค่าความจุ (C_x) และแสดงผลลัพธ์บนหน้าจอ OLED ตามที่แสดงในรูปที่ 5



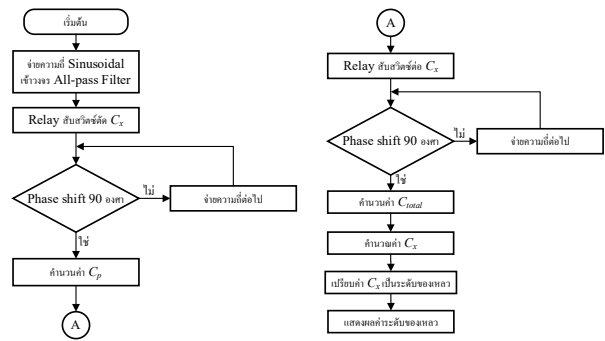
รูปที่ 5 แผนผังรวมของระบบตรวจวัดค่าความจุ

3.2 การแปลงค่าความจุเป็นระดับน้ำในระบบวัดระดับของเหลวโดยใช้เซนเซอร์ความจุ

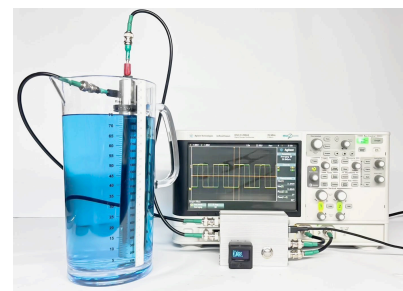
เพื่อรักษาความแม่นยำในการวัด ระบบได้นำเทคนิค Active Shield มาใช้ร่วมกับวงจร Unity-gain Buffer โดยอาศัยคุณสมบัติ Virtual Short ของออปแอมป์ในการขับสัญญาณที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับสัญญาณหลักไปยังชั้นชีลด์ของสายโคแอกเซียล วิธีนี้จะช่วยลดความต่างศักย์ระหว่างแกนสัญญาณและชีลด์ ส่งผลให้ความจุแฝงในสายลดลงและไม่ส่งผลกระทบต่อค่าที่คำนวณได้ ในขั้นตอนการประมวลผล ESP32-C3 จะสั่งการ Relay เพื่อสลับโหมดการวัดเป็น 2 จังหวะ คือการวัดค่าความจุ

แฝงภายในระบบ (C_p) และการวัดค่าความจุรวม (C_{total}) เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความจุจริงตามสมการ $C_x = C_{total} - C_p$ โดยค่าที่ได้จะแสดงผลผ่านจอ OLED พร้อมสัญญาณแจ้งเตือนจาก Buzzer และผู้ใช้สามารถควบคุมการทำงานทั้งหมดได้ผ่านปุ่มกดที่ติดตั้งไว้ในระบบ เมื่อระบบสามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ได้แล้ว ขั้นตอนถัดไปคือการแปลงค่าความจุที่ได้เป็นระดับของเหลว โดยอาศัยหลักการที่ว่าค่าความจุไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับระดับของเหลว กล่าวคือเมื่อระดับของเหลวเพิ่มขึ้น พื้นที่ของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับตัวกลางที่มีค่าสัมประสิทธิ์ไดอิเล็กทริกสูงจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความจุระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์สูงขึ้นตามไปด้วย ในงานวิจัยนี้ การคำนวณระดับน้ำจะใช้ค่าความจุจริง ซึ่งได้จากการนำค่าความจุรวมที่วัดได้มาหักลบค่าความจุแฝงภายในวงจรออก เพื่อให้ได้ค่าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับของเหลวอย่างแท้จริง จากนั้นนำค่าความจุจริงที่ได้ไปเปรียบเทียบกับระดับของเหลว ซึ่งได้จากการทดลองเติมของเหลวในระดับที่ทราบค่าแน่นอนเพื่อหาความสัมพันธ์ที่ถูกต้อง ทั้งนี้ เพื่อให้เห็นลำดับการทำงานของระบบอย่างเป็นขั้นตอน ผู้วิจัยได้นำเสนอผังงานการแปลงค่าความจุเป็นระดับน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งครอบคลุมขั้นตอนตั้งแต่การรับค่าจากส่วนวัด การประมวลผลข้อมูล ไปจนถึงการแสดงผลระดับน้ำแบบเวลาจริง (Real-time)

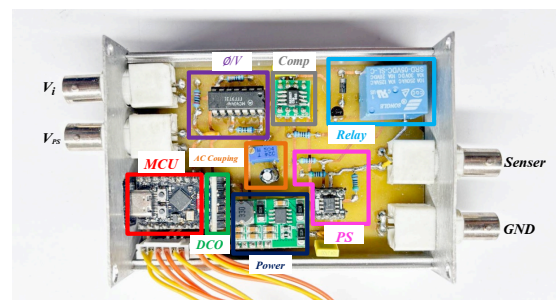
ใช้หลักการของการแปลงค่าความจุเป็นระดับน้ำ เมื่อคำนวณค่าความจุของเซนเซอร์ C_x ได้จากค่าที่ถูกล็อกด้วยวงจร Programmable Phase - Locked ตามสมการแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการแปลงค่าความจุให้เป็นระดับของเหลวภายในกระบอกบรรจุ เพื่อให้สามารถแสดงผลในรูปของความสูงในระดับเซนติเมตรโดยหลักการพื้นฐานคือ เมื่อระดับของเหลวเพิ่มขึ้น พื้นที่ของอิเล็กโทรดที่จมอยู่ในตัวกลางที่มีสัมประสิทธิ์ไดอิเล็กทริกสูง จะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความจุระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นค่าความจุ C_x จึงมีความสัมพันธ์กับระดับของเหลว ภายในกระบอก ในการทดลองทำการเติมของเหลวในกระบอกทีละระดับที่ทราบค่าแน่นอน โดยวัดระดับของเหลวในช่วง 0 ถึง 20 เซนติเมตร ทำการวัดค่าความจุที่ระบบคำนวณได้ในแต่ละระดับ จากนั้นวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุและระดับของเหลว พบว่าความสัมพันธ์มีลักษณะใกล้เคียงเชิงเส้น



รูปที่ 6 Flow chart การทำงานของระบบ



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 7 องค์ประกอบของระบบวัดระดับของเหลว (ก) การวัดระดับของเหลวด้วยเซนเซอร์ (ข) ส่วนประกอบภายในของวงจรควบคุม (ค) ลักษณะโครงสร้างของตัวเก็บประจุแบบทรงกระบอกร่วมศูนย์กลาง

4. ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง

4.1 การทำงานของระบบ

การทำงานของระบบจะเริ่มต้นด้วยการสร้างสัญญาณไซน์จากโมดูล AD9833 โดยส่งสัญญาณผ่านวงจร AC Coupling ที่ประกอบด้วย $C_{AC} = 47 \mu\text{F}$ และ $R_{AC} = 11 \text{ k}\Omega$ เพื่อทำหน้าที่กำจัดแรงดันไฟตรง (DC Offset) ก่อนเข้าสู่ส่วนประมวลผลถัดไป ในส่วนของการปรับแต่งสัญญาณได้เลือกใช้ไอซี OPA828 ร่วมกับอุปกรณ์รอบข้าง ($R = 510\Omega$ และ $R_x = 47 \text{ k}\Omega$) จัดวงจรในรูปแบบ All-Pass Filter เพื่อปรับมุมเฟสของสัญญาณให้มีความเหมาะสมต่อการตรวจจับ จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยัง Comparator เพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมก่อนเข้าสู่ MC4044P Phase Detector ดังแสดงใน รูปที่ 7 เพื่อเปรียบเทียบความต่างเฟส โดยผลลัพธ์จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟตรงด้วย Low-pass Filter ($C_{LPF} = 0.1 \mu\text{F}$, $R_{LPF} = 20 \text{ k}\Omega$) และ ลดระดับแรงดันด้วยวงจร Voltage Divider ($R_{DIV1} = 6.8 \text{ k}\Omega$, $R_{DIV2} = 330 \Omega$) เพื่อให้พร้อมสำหรับการอ่านค่าผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์

4.2 ผลการทดสอบวงจรวัดค่าความจุกับความยาวสายโค

แอกเซียลที่แตกต่างกัน

จากการทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายโคแอกเซียลที่มีความยาว 50 เซนติเมตร และ 200 เซนติเมตร โดยการทดลองจำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าความจุที่วัดได้จากสายที่มีความยาวมากกว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทางไฟฟ้าที่ค่าความจุแฝง (Parasitic Capacitance) จะแปรผันตรงตามความยาวของสายสัญญาณ ทั้งนี้ เพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำและความถูกต้องของระบบ จึงได้ทำการประเมินค่าความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติ โดยคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ตามสมการที่ (9) และวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ (Non-Linear Error: NLE) ตามสมการที่ (10) เพื่อยืนยันประสิทธิภาพในการตรวจวัดภายใต้เงื่อนไขความยาวสายที่แตกต่างกัน

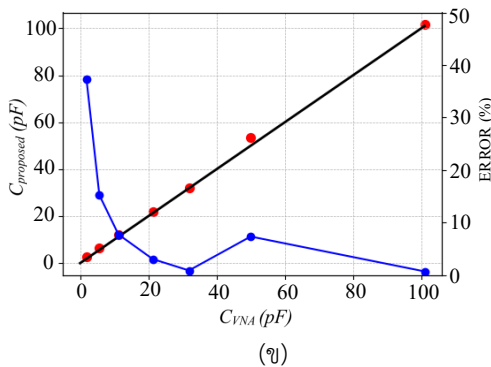
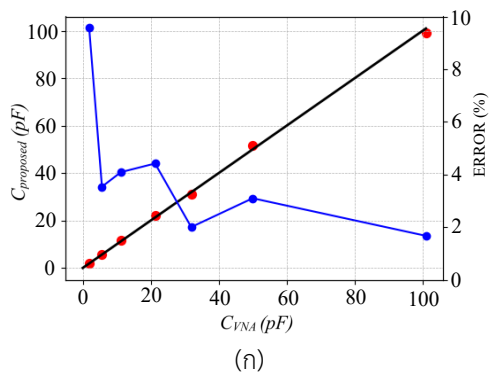
$$\text{error}(\%) = \left| \frac{C_{VNA} - C_{proposed}}{C_{VNA}} \right| \times 100 \quad (9)$$

$$\text{NLE}(\%) = \frac{\text{Max} |C_{VNA} - C_{proposed}|}{\text{Full-scaleRange}} \times 100 \quad (10)$$

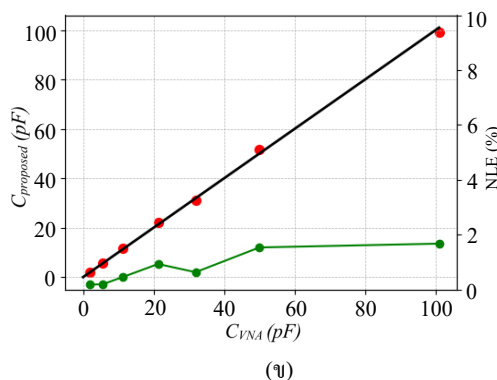
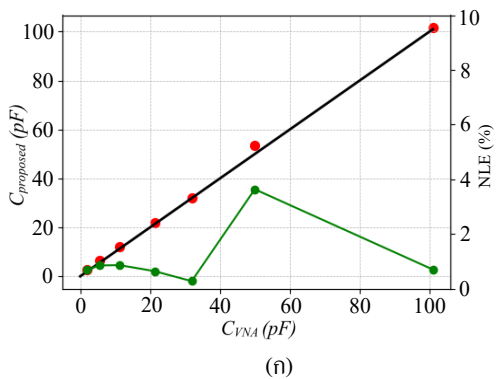
ตารางที่ 1 ผลการวัดค่าความจุเมื่อใช้สายโคแอกเซียลความยาวแตกต่างกัน

C_{VNA} (pF)	สายโคแอกเซียลยาว 50 เซนติเมตร			สายโคแอกเซียลยาว 200 เซนติเมตร		
	$C_{proposed}$ (pF)	%error (%)	%NLE (%)	$C_{proposed}$ (pF)	%error (%)	%NLE (%)
1.88	2.06	9.57	0.17	2.58	37.23	0.69
5.65	5.85	3.54	0.19	6.51	15.22	0.85
11.24	11.7	4.09	0.45	12.11	7.74	0.86
21.27	22.21	4.42	0.93	21.92	3.05	0.64
31.91	31.27	2.01	0.63	32.19	0.87	0.27
49.99	51.54	3.10	1.53	53.66	7.34	3.63
100.95	99.26	1.67	1.67	101.66	0.70	0.70

จากผลการทดสอบเฉลี่ยจำนวน 10 ครั้งในตารางที่ 1 พบว่าเมื่อใช้สายโคแอกเซียลความยาว 50 เซนติเมตร ค่าความจุที่วัดได้มีความใกล้เคียงกับค่าจริง แม้จะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นบ้าง แต่ยังคงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้และไม่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของระบบ ในทางตรงกันข้าม เมื่อเพิ่มความยาวของสายโคแอกเซียลเป็น 200 เซนติเมตร พบว่าค่าความจุที่วัดได้มีแนวโน้มสูงกว่าค่าจริงอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลของความจุแฝง (parasitic capacitance) ที่เพิ่มขึ้นตามความยาวของสาย ซึ่งระบบรวมค่าความจุจากสายโคแอกเซียลเข้าไปในผลการวัดไว้แล้ว อย่างไรก็ตามแม้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนในกรณีของสายโคแอกเซียลที่มีความยาวมากขึ้นจะสูงกว่าค่าที่อ้างอิงไว้เล็กน้อยแต่ยังอยู่ในระดับที่สามารถจัดการได้ ด้วยกระบวนการชดเชยค่าความจุแฝงที่นำเสนอ ส่งผลให้ระบบยังคงสามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสมสำหรับการวัดค่าความจุในช่วงระดับพิโคฟารัด (pF) และแสดงถึงศักยภาพของระบบในการประยุกต์ใช้งานจริงแม้ในกรณีที่ต้องใช้สายสัญญาณความยาวมากขึ้น



รูปที่ 8 (ก) กราฟ Error (50 เซนติเมตร) (ข) กราฟ Error (200 เซนติเมตร)



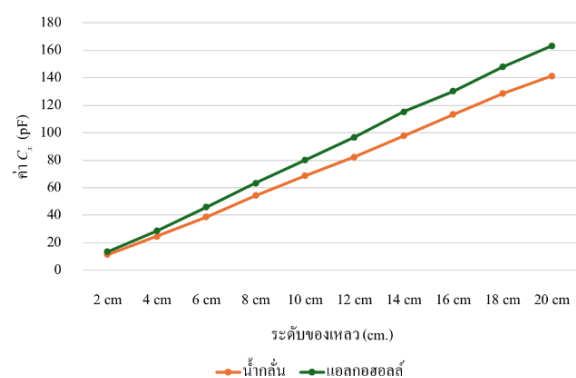
รูปที่ 9 (ก) กราฟ NLE (50 เซนติเมตร) (ข) กราฟ NLE (200 เซนติเมตร)

จากรูปที่ 8 และรูปที่ 9 แสดงผลการวัดตามค่าความจุอ้างอิง (C_{VNA}) พบว่าค่าที่ระบบวัดได้ ($C_{proposed}$) มีแนวโน้มสอดคล้องเชิงเส้นกับค่าความจุอ้างอิง ทั้งนี้การใช้สาย 50 เซนติเมตร และ 200 เซนติเมตร ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ (Non-Linear Error: NLE) และค่าความคลาดเคลื่อน (Error) มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าระบบยังสามารถคงความสม่ำเสมอของแนวโน้มการวัดได้ แม้ภายใต้สภาวะที่มีระยะสายโคแอกเซียลยาวขึ้น

4.3 การทดสอบวงจรวัดค่าความจุกับของเหลวต่างชนิดและต่างระดับ

การทดสอบวงจรวัดค่าความจุกับของเหลวหลายชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น และแอลกอฮอล์ โดยการเติมของเหลวลงในกระบอกทดสอบที่ระดับที่ทราบค่าแน่นอนในช่วงความสูงตั้งแต่ 0 ถึง 20 เซนติเมตร จากนั้นระบบจะทำการวัดและคำนวณค่าความจุที่ได้ในแต่ละระดับของของเหลว

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความจุที่วัดได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับของเหลวอย่างต่อเนื่อง โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุและระดับของเหลวมีลักษณะใกล้เคียงเชิงเส้น ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าวงจรวัดสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของระดับของเหลวได้อย่างสม่ำเสมอ และเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการวัดระดับของเหลวภายในช่วงที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 10 ความเป็นเส้นตรงระหว่างค่า C_x กับระดับน้ำ

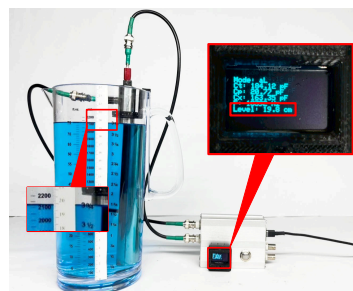
โดยผลลัพธ์จากการทดสอบดังรูปที่ 10 และ ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าค่าความจุที่วัดได้มีความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear Relationship) กับระดับของเหลว ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการวัดระดับ ด้วยเหตุผลดังกล่าวเพื่อเก็บรวบรวมข้อ

มูลค่าความจุของของเหลวแต่ละชนิด (เช่น น้ำกลั่น, แอลกอฮอล์) ในแต่ละระดับ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับอ่านระดับของเหลวโดยอ้างอิงจากค่าความจุที่วัดได้

ตารางที่ 2 ค่า C_x (pF) ในของเหลวต่างชนิด

ระดับของเหลว (cm.)	ชนิดของเหลว	
	ค่า C_x ใน น้ำกลั่น (pF)	ค่า C_x ใน แอลกอฮอล์ (pF)
2.00	11.51	13.55
4.00	24.80	28.70
6.00	38.90	45.90
8.00	54.40	63.50
10.00	68.80	80.20
12.00	82.50	96.80
14.00	97.90	115.30
16.00	113.40	130.40
18.00	128.60	148.10
20.00	141.57	163.44

จากการทดลองวัดค่าความจุของของเหลวและแสดงผลบนหน้าจอ OLED ดังรูปที่ 11 เมื่อทำการปรับระดับของเหลวในกระบอกทดลองทีละระดับ พบว่าค่าความจุที่วัดได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระดับของเหลวที่เพิ่มขึ้น โดยผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณจากตารางที่ 3 พบว่า น้ำกลั่นมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ $0.80 \pm 0.46\%$ และค่า NLE เฉลี่ยเท่ากับ $0.35 \pm 0.19\%$ ขณะที่แอลกอฮอล์มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ $1.01 \pm 0.43\%$ และค่า NLE เฉลี่ยเท่ากับ $0.53 \pm 0.34\%$ ตามลำดับ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่า %Error สำหรับน้ำกลั่นและแอลกอฮอล์เท่ากับ 0.46% และ 0.43% ตามลำดับ ขณะที่ค่า SD ของ %NLE เท่ากับ 0.19% และ 0.34% ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้สำหรับระบบวัดระดับของเหลวด้วยหลักการตรวจจับสนามไฟฟ้า

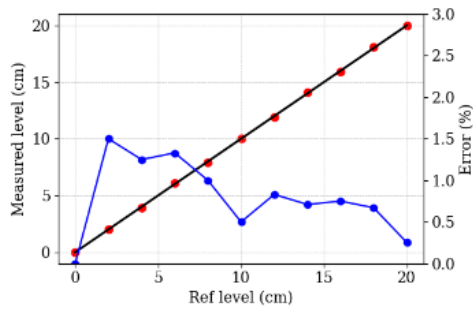


รูปที่ 11 ตัวอย่างการวัดของเหลวชนิดแอลกอฮอล์ ระดับ 20 cm.

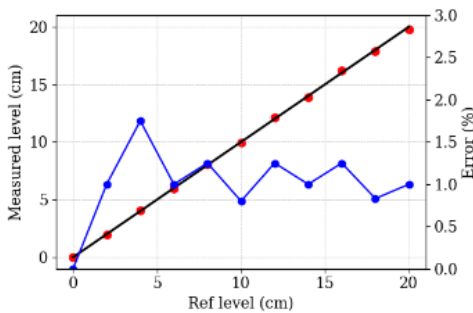
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความแม่นยำของวงจร

ระดับจริง (cm.)	น้ำกลั่น			แอลกอฮอล์		
	ระดับวัด (cm.)	%error (%)	%NLE (%)	ระดับวัด (cm.)	%error (%)	%NLE (%)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	2.03	1.50	0.15	1.98	1.00	0.10
4.00	3.95	1.25	0.25	4.07	1.75	0.35
6.00	6.08	1.33	0.40	5.94	1.00	0.30
8.00	7.92	1.00	0.40	8.10	1.25	0.50
10.00	10.05	0.50	0.25	9.92	0.80	0.40
12.00	11.90	0.83	0.50	12.15	1.25	0.75
14.00	14.10	0.71	0.50	13.86	1.00	0.70
16.00	15.88	0.75	0.60	16.20	1.25	1.00
18.00	18.12	0.67	0.60	17.85	0.83	0.75
20.00	19.95	0.25	0.25	19.80	1.00	1.00

จากผลการทดลองที่นำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุและระดับของเหลวในรูปที่ 12 และรูปที่ 13 พบว่าข้อมูลมีลักษณะเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear Relationship) อย่างชัดเจน โดยค่าความจุจะเพิ่มขึ้นตามระดับของเหลวในลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถนำค่าความจุที่วัดได้ไปใช้ในการประมาณระดับของเหลวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

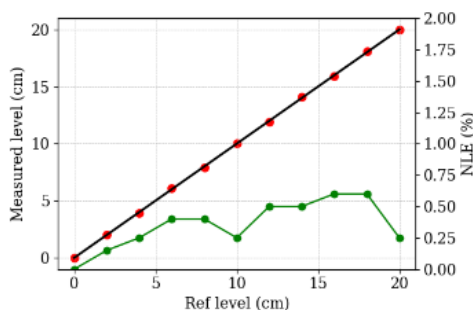


(ก)

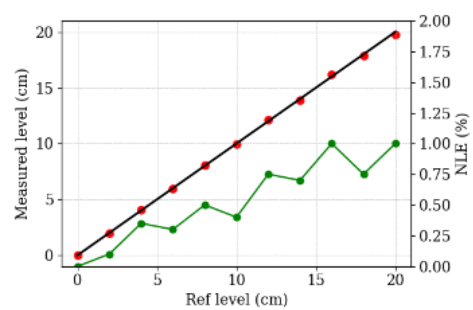


(ข)

รูปที่ 12 (ก) กราฟ %Error ของน้ำกลั่น (ข) กราฟ %Error ของแอลกอฮอล์



(ก)



(ข)

รูปที่ 13 (ก) กราฟ %NLE ของน้ำกลั่น (ข) กราฟ %NLE ของแอลกอฮอล์

5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบตรวจวัดระดับของเหลวโดยใช้หลักการตรวจจับค่าความจุไฟฟ้า (Capacitive Sensor) พบว่าระบบสามารถวัดค่าความจุได้ในช่วงประมาณ 1–100 pF ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นช่วงที่มีความละเอียดสูงและมีระดับสัญญาณที่ไวต่อสภาวะแวดล้อมมาก โดยอาศัย All-Pass Filter เพื่อควบคุมมุมเฟสให้เหมาะสมสำหรับการตรวจจับ สำหรับการผลกระทบจากค่าความจุแฝงของสายโคแอกเซียล ได้มีการใช้ Active Shield ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญในการวัดค่าความจุระดับ pF จากการตรวจสอบผลลัพธ์ทั้งจากการแสดงผลบน OLED และจากการตรวจสอบรูปคลื่นด้วยเครื่อง Oscilloscope พบว่าค่าความจุที่คำนวณได้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับเฟสของสัญญาณจริงอย่างชัดเจนและเป็นไปตามหลักทฤษฎีการวิเคราะห์หุ้มพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าระบบต้นแบบที่พัฒนานี้รองรับการใช้งานจริงสำหรับใช้ในระบบวัดระดับของเหลว โดยผลลัพธ์จากการทดสอบระบบวัดระดับของเหลว พบว่าโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ (Non-Linear Error: NLE) และค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ต่ำกว่า 2% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับระบบวัดระดับของเหลวด้วยหลักการตรวจจับค่าความจุไฟฟ้า ผลลัพธ์ดังกล่าวยืนยันถึงความถูกต้องของแนวคิดการออกแบบและศักยภาพของระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในงานวัดระดับของเหลว โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีข้อจำกัดด้านความปลอดภัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Sun, Z. Wu, D. Fang, J. Zhang and W. Wang, "Multimode Interference-Based Fiber-Optic Ultrasonic Sensor for Non-Contact Displacement Measurement," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 16, No. 14, pp. 5632–5635, 2016.
- [2] B. Zhao et al., "A Split-Type FMICW-Based Guided Wave Radar With Multisegmental Probe for Liquid Level Measurement," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 22, No. 10, pp. 9397–9407, 2022.

- [3] A. Lata, P. Maurya, R. Sarkar and N. Mandal, "Design of a Hydrostatic Liquid Level Wireless Transmitter for Efficient Level Measurement," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 24, No. 6, pp. 8105–8113, 2024.
- [4] M. A. Haberman, E. M. Spinelli and F. Reverter, "A Supply-Voltage Driving Scheme for Grounded Capacitive Sensor Front-Ends," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 71, pp. 1–7, 2022.
- [5] C. Bao, H. Zhu and J. Liu, "Introduction of parasitic capacitance and methods of reducing its capacitance," *Applied and Computational Engineering*, Vol. 85, pp. 141–147, 2024.
- [6] F. Reverter, X. Li and G. C. M. Meijer, "Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor," *Sens. Actuators A, Phys.*, Vol. 138, No. 1, pp. 1–8, 2007.
- [7] S. M. Herzog, "Circuit for measuring capacitance by charging and discharging capacitor under test and its shield," *U.S. Patent 4,743,837*, 1988.
- [8] K. C. Baby and B. George, "A simple analog front-end circuit for grounded capacitive sensors with offset capacitance," *Proc. IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. (I2MTC)*, Minneapolis, MN, USA, pp. 1372–1375, 2013.
- [9] J. Wang, "Liquid level sensing using capacitive-to-digital converters," *Analog Dialogue*, Analog Devices, Inc., 2015.
- [10] V. Tsouti, V. Mitrakos, P. Broutas and S. Chatzandroulis, "Modeling and Development of a Flexible Carbon Black-Based Capacitive Strain Sensor," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 16, No. 9, pp. 3059–3067, 2016.