



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

เซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์

Interdigital electrode water level sensor

วิตินันท์ ตะพานน้อย¹⁾ พรชัย พุกพัชรานนท์¹⁾ วรรณรัช สันติอมรทัต²⁾ และคนดิธ เจริญพัฒนานนท์^{*1)}

Titinan Tapaonoi¹⁾ Pornchai Phukpattaranont¹⁾ Wannarat Suntiamorntut²⁾ and Kanadit Chetpattananondh^{*1)}

¹⁾ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90110

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand, 90110.

²⁾ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90110

Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand, 90110.

Received February 2012

Accepted July 2012

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอเซนเซอร์วัดระดับน้ำที่ทำมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ โดยการออกแบบลายทองแดงของแผ่นวงจรให้มีลักษณะเป็นซี่วางสลับกันไปมา ทำให้เกิดเป็นค่าความจุไฟฟ้าระหว่างซี่ซึ่งมีค่าแปรผันตามระดับน้ำ จากนั้นค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จะถูกวัดและแปลงเป็นค่าระดับน้ำด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์อื่นๆที่มาตรฐานการสื่อสารแบบ RS-232 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์ที่มีย่านวัด 0-30 เซนติเมตร มีผลตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นตลอดย่านวัด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9992 และมีค่าความผิดพลาดสูงสุด 2.3%FSO นอกจากนี้ยังเป็นเซนเซอร์ที่ใช้พลังงานต่ำ

คำสำคัญ: อินเตอร์ดิจิตอลเซนเซอร์ เซนเซอร์วัดระดับน้ำ การวัดระดับของเหลว เซนเซอร์แบบค่าความจุไฟฟ้า

Abstract

This paper presents the water level sensor fabricated from a printed circuit board. The copper traces of a printed circuit board as periodic fingers and capacitance between parallel fingers varied according to the water level. The change of capacitance can be measured and converted to a water level by a microcontroller. The output signal of a water level from a microcontroller transmitted to a computer or other devices are compatible with the RS-232 standard. The experimental results show that the water level sensor has linear relation with $R^2 = 0.9992$ and maximum error is 2.3 %FSO. In addition, this sensor need low energy.

Keywords: Interdigital sensors, Water level sensors, Liquid level measurement, Capacitance sensors

*Corresponding author.

Email address: kanadit.c@psu.ac.th

1. บทนำ

เมื่อสำรวจผลิตภัณฑ์เซนเซอร์วัดระดับของเหลวที่มีจำหน่ายจะพบว่า เซนเซอร์ที่มีจำหน่ายโดยส่วนใหญ่จะเป็นเซนเซอร์สำหรับใช้งานในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง เนื่องจากเซนเซอร์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการใช้งานในอุตสาหกรรมหลายประเภท จึงต้องมีคุณสมบัติพิเศษต่างๆเพิ่มเข้ามานอกเหนือจากการวัดระดับปกติ เช่น สามารถวัดระดับของเหลวได้หลายชนิด ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี มีความปลอดภัยต่ออาหาร หรือสามารถทนความร้อนได้สูง แต่ด้วยข้อจำกัดด้านราคาและความคุ้มค่าในการใช้งาน ทำให้เซนเซอร์เหล่านี้ไม่เหมาะสำหรับการนำมาใช้งานตรวจวัดทั่วไป เช่น การวัดระดับน้ำในแปลงเกษตร การวัดระดับน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ หรือการวัดระดับน้ำในคลองชลประทาน

เมื่อศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดระดับของเหลว โดยการจำแนกประเภทของเซนเซอร์ตามหลักการทำงาน จะประกอบด้วยหลักการพื้นฐาน 4 หลักการ คือ

1) Float system เป็นการวัดระดับของเหลวโดยใช้หลักการ วัดระยะการเคลื่อนที่ของลูกลอยตามระดับของเหลว มีข้อดีคือ มีความแม่นยำในการวัดสูง เพราะเป็นการวัดที่ระดับผิวของเหลวโดยตรง ชนิดของเหลวและอุณหภูมิส่งผลกระทบต่อการใช้วัดเพียงเล็กน้อย [1] แต่เนื่องจากมีชิ้นส่วนทางกลเป็นส่วนประกอบหลัก จึงมีความยุ่งยากในการบำรุงรักษา หากขาดการหล่อลื่นที่ดี ค่าที่วัดได้จะมีความผิดพลาด

2) Detecting electrical properties เป็นการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับระดับของเหลว เช่น การวัดค่าความจุไฟฟ้า ค่าความต้านทานไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้า หรือการวัดความหนาแน่นของเหลว มีข้อดีคือ ไม่มีชิ้นส่วนทางกลที่ต้องบำรุงรักษาบ่อย แต่เนื่องจากการวัดที่ต้องให้เซนเซอร์สัมผัสกับของเหลวโดยตรง จึงอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนบนผิวของเซนเซอร์ได้

3) Hydrostatic pressure เป็นการวัดระดับของเหลวโดยการเปรียบเทียบแรงดันของเหลวกับแรงดันบรรยากาศ [2] มีข้อดีคือ ติดตั้งง่าย มีย่านวัดให้เลือกใช้งานกว้างและใช้อุปกรณ์น้อย แต่เนื่องจากโครงสร้างของเซนเซอร์มีแผ่นไดอะแฟรมขนาดเล็ก ซึ่งเสียหายได้ง่ายหากเกิดการกระทบกระเทือน มีไฟรั่ว หรือมีความชื้นสะสมภายใน ดังนั้นในการใช้งานจึงต้องมีการติดตั้งระบบกราวด์ที่ดี และต้องมีการติดตั้งสารดูดซับความชื้นในท่อนำอากาศด้วย [1]

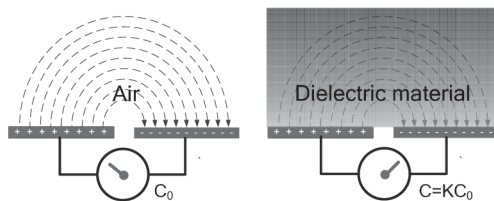
4) Time of flight เป็นการวัดระดับของเหลวโดยอาศัยหลักการจับเวลาการเดินทางของคลื่นเสียง (Ultrasonic) แสง (Laser) หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Radar) ที่ถูกส่งออกไปจากต้นทางผ่านอากาศ แล้วเกิดการสะท้อนกลับเมื่อชนกับผิวของเหลว มีข้อดีคือ ไม่ต้องบำรุงรักษาบ่อยเพราะไม่มีส่วนใดสัมผัสกับของเหลว สามารถวัดระดับของเหลวได้หลายชนิด แต่หากผิวของเหลวมีการกระเพื่อมหรือมีฟองอากาศ จะทำให้ค่าระดับที่วัดได้มีความผิดพลาด

การวัดระดับของเหลวด้วยหลักการค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance level sensor) เป็นวิธีการวัดที่มีหลักการทำงานไม่ซับซ้อน อาศัยหลักการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากค่าไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกันระหว่างของเหลวกับอากาศ มีจุดเด่นที่สำคัญคือเราสามารถเลือกขนาดป้องกันการกัดกร่อนบนผิวของอิเล็กโทรดได้ ช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของเซนเซอร์ได้นานขึ้น แต่โครงสร้างของเซนเซอร์วัดระดับแบบค่าความจุไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่ มักมีลักษณะเป็นแผ่นหรือแท่งตัวนำที่แยกออกเป็น 2 ส่วน [3-6] ทำให้มีขนาดใหญ่ ติดตั้งยากและมีความซับซ้อนในการผลิต อีกทั้งค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มีค่าต่ำในระดับพิโกฟารัด (pF) ทำให้วิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าต้องมีความซับซ้อนตามไปด้วย

อิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล (Interdigital electrode) เป็นเซนเซอร์ค่าความจุไฟฟ้าอีกรูปแบบหนึ่ง ที่ใช้การวางแผ่นตัวนำในแนวระนาบแทนการวางแบบขนาน โดยวางสลับกันระหว่างซีทีที่เป็นขั้วบวกกับซีทีที่เป็นขั้วลบคล้ายกับการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกัน ทำให้มีค่าความจุไฟฟ้ามาก ง่ายต่อการวัดค่าความจุไฟฟ้า และด้วยโครงสร้างเป็นชั้นเดียว จึงสามารถผลิตโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีอยู่ทั่วไปได้ บทความนี้เป็น การนำเสนอผลการวิจัยและพัฒนาต้นแบบเซนเซอร์วัดระดับน้ำที่ทำมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้วัดระดับน้ำทั่วไป ที่ไม่ต้องการความแม่นยำในการวัดสูง หรือมีลักษณะการใช้งานที่ต้องติดตั้งเซนเซอร์วัดระดับน้ำจำนวนมากแต่ใช้งานไม่บ่อย โดยใช้พื้นฐานการออกแบบจากโครงสร้างของอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล ซึ่งมีความเรียบง่ายและมีหลักการทำงานไม่ซับซ้อน ไม่ต้องใช้กระบวนการผลิตสูง ผู้ใช้สามารถผลิตได้เองจากแผ่นวงจรพิมพ์ เพื่อให้เกษตรกรหรือบุคคลทั่วไป ได้มีอีกทางเลือกหนึ่งในการนำเซนเซอร์วัดระดับน้ำไปใช้งาน

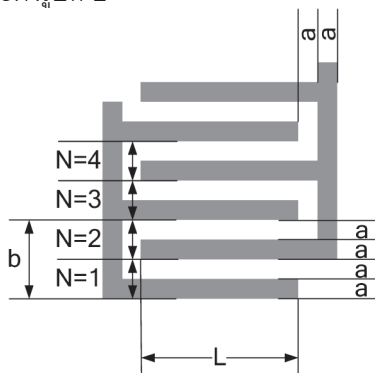
2. ทฤษฎีและหลักการ

เมื่อเรานำวัสดุไดอิเล็กตริกไปวางไว้ในสนามไฟฟ้า ที่เกิดจากแผ่นตัวนำซึ่งมีประจุไฟฟ้าต่างดั่งรูปที่ 1 ผลที่เกิดขึ้นคือ ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำจะเพิ่มขึ้น ตามคุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริกที่นำไปวาง ซึ่งวัสดุที่ต่างกัน จะมีค่าไดอิเล็กตริกแตกต่างกันด้วย เราจึงนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือวัดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวัดคุณสมบัติของวัสดุ เช่น การวัดสารพิษในอาหารทะเล การวัดปริมาณไขมันในเนื้อสัตว์ การวัดความชื้นในคอนกรีต หรือการวัดเพื่อจำแนกชนิดของวัสดุ เป็นต้น



รูปที่ 1 ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อมีวัสดุไดอิเล็กตริกวางในสนามไฟฟ้า

เมื่อนำแผ่นตัวนำที่วางในแนวระนาบ มาวางสลับกันระหว่างขั้วบวกและลบ จะทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เหมือนการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกัน เรียกรูปแบบนี้ว่า “อิเล็กโตรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล” (Interdigital electrode) มีลักษณะดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างของอิเล็กโตรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล

สำหรับการนำอิเล็กโตรดแบบอินเตอร์ดิจิตอลมาประยุกต์ใช้วัดระดับน้ำ จะเป็นการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริก 2 ชนิดคือ น้ำและอากาศ โดยน้ำจะมีค่าไดอิเล็กตริกมากกว่าอากาศประมาณ 80 เท่า (น้ำมีค่าไดอิเล็กตริกประมาณ 80 และอากาศมีค่าไดอิเล็กตริกประมาณ 1) ดังนั้น เมื่ออิเล็กโตรดสัมผัสกับน้ำมากขึ้น

ค่าความจุไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นตามระดับน้ำด้วย โดยจะมีค่าความจุไฟฟ้าระหว่างที่เท่ากับ [7]

$$C_{PU} = \epsilon_0(\epsilon_w + \epsilon_s) \frac{K \left[\sqrt{1 - (a/b)^2} \right]}{K[a/b]} + 2\epsilon_0\epsilon_w \frac{h}{a} \quad (1)$$

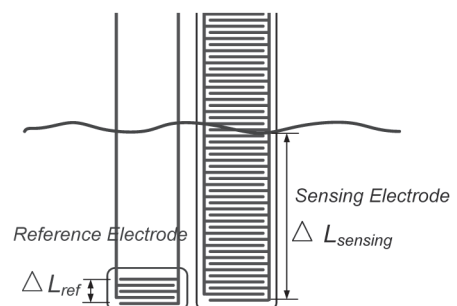
ϵ_0 , ϵ_w , และ ϵ_s เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอากาศว่าง น้ำ และวัสดุฐานรองตามลำดับ a เป็นความกว้างของลายที่ b เป็นระยะห่างระหว่างที่ และ h เป็นความหนาของตัวนำ สำหรับ $K[a/b]$ เป็นฟังก์ชันของปริพันธ์เชิงวงรีของมอดุลัส (Elliptic integrals of modulus) ถ้ากำหนดให้ L เป็นความยาวของลายที่ ซึ่งมีจำนวนเป็น N ค่าความจุไฟฟ้าทั้งหมดของอิเล็กโตรด $C_{electrode}$ มีค่าเท่ากับ

$$C_{electrode} = NLC_{PU} \quad (2)$$

3. การลดความผิดพลาดในการวัดระดับ ที่เกิดจากค่าไดอิเล็กตริกของน้ำมีการเปลี่ยนแปลง

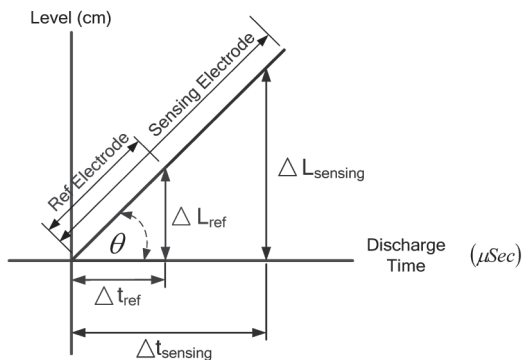
เนื่องจากอิเล็กโตรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล มีหลักการทำงานแบบค่าความจุไฟฟ้า เสมือนเป็นตัวเก็บตัวหนึ่งที่มีไดอิเล็กตริกเป็นน้ำ ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโตรดจึงขึ้นอยู่กับขนาดโครงสร้างของอิเล็กโตรดและค่าไดอิเล็กตริกของน้ำ แต่เนื่องจากค่าไดอิเล็กตริกของน้ำไม่ได้คงที่ตลอดเวลา มันสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ตามอุณหภูมิ หรือสิ่งเจือปนในน้ำ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กตริกของน้ำ ย่อมส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัดของเซนเซอร์

การเพิ่มอิเล็กโตรดอ้างอิงสำหรับใช้วัดความเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กตริกของน้ำ จะช่วยให้เซนเซอร์สามารถปรับการคำนวณค่าระดับน้ำได้อย่างเหมาะสม กับไดอิเล็กตริกที่เปลี่ยนไป โดยมีวิธีการดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 อิเล็กโตรดอ้างอิงสำหรับปรับการคำนวณค่าระดับน้ำ ให้เหมาะสมกับค่าไดอิเล็กตริกของน้ำ

อิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode) เป็นส่วนที่ถูกเพิ่มเข้ามา เพื่อใช้เป็นค่าระดับน้ำอ้างอิงในการปรับการคำนวณของอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำ (Sensing electrode) โดยอิเล็กโทรดอ้างอิงจะมีลักษณะเช่นเดียวกับอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำ เพียงแต่จะมีขนาดเล็กกว่า ซึ่งเราได้กำหนดขนาดความยาวที่แน่นอนไว้แล้ว ในการใช้งาน อิเล็กโทรดอ้างอิงจะถูกจุ่มลงในน้ำทั้งหมด ดังนั้นค่าระดับน้ำที่วัดได้จากอิเล็กโทรดอ้างอิงจะต้องเท่ากับความยาวของอิเล็กโทรดอ้างอิงเอง (ΔL_{ref}) หากระดับน้ำที่วัดได้ผิดไปจากความยาวของอิเล็กโทรดอ้างอิง แสดงว่าค่าไดอิเล็กตริกของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับอิเล็กโทรดอ้างอิง จะถูกนำไปปรับการคำนวณของอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำใหม่ ซึ่งมีหลักการดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การปรับการคำนวณของ Sensing electrode ด้วย Reference electrode เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากค่าไดอิเล็กตริกของน้ำมีการเปลี่ยนแปลง

เมื่อ ΔL_{ref} เป็นค่าความยาวของอิเล็กโทรดอ้างอิง และ Δt_{ref} เป็นค่าระยะเวลาคายประจุของอิเล็กโทรดอ้างอิง ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\tan \theta = \frac{\Delta L_{ref}}{\Delta t_{ref}} \quad (3)$$

เนื่องจากอิเล็กโทรดอ้างอิงมีสัดส่วนที่เหมือนกับอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำ และด้วยความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างระดับน้ำกับระยะเวลาคายประจุของของอิเล็กโทรด (จากการทดลองที่ 5.1) ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำกับอิเล็กโทรดอ้างอิงจึงเท่ากันดังสมการ

$$\tan \theta = \frac{\Delta L_{ref}}{\Delta t_{ref}} = \frac{\Delta L_{sensing}}{\Delta t_{sensing}} \quad (4)$$

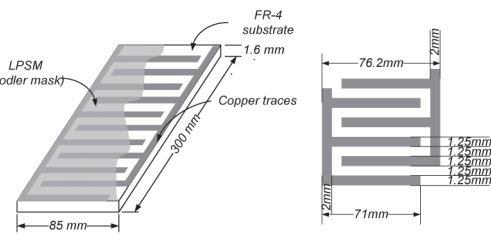
ค่าระดับน้ำของอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำจึงมีค่าเท่ากับ

$$\Delta L_{sensing} = t_{sensing} \tan \theta \quad (5)$$

ในทางปฏิบัติการวัดค่าระยะเวลาคายประจุของอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำ กับอิเล็กโทรดอ้างอิงไม่สามารถทำการวัดพร้อมกันได้ เพราะจะเกิดการรบกวนทางสนามไฟฟ้าระหว่างกันเมื่ออยู่ในน้ำ เนื่องจากกราวด์ของอิเล็กโทรดทั้งสองต่อร่วมกัน จึงต้องใช้วิธีสลับการวัดระหว่างอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำกับอิเล็กโทรดอ้างอิงโดยใช้รีเลย์

4. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

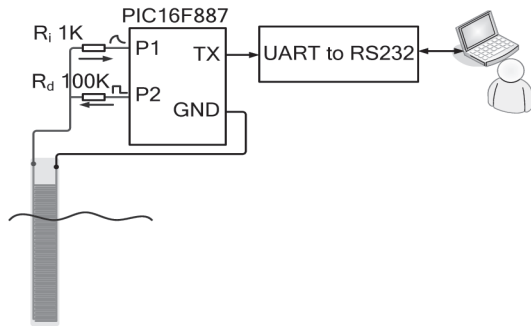
ในการออกแบบขนาดของอิเล็กโทรด จะใช้การประมาณค่าจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ และการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆตามวัสดุที่จะใช้งานจริง โดยในที่นี้จะใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.5 และกำหนดให้น้ำที่จะวัด มีค่าไดอิเล็กตริกเท่ากับ 80 (อุณหภูมิของน้ำอยู่ระหว่าง 25-35 องศาเซลเซียส) ส่วนคุณสมบัติของอิเล็กโทรดที่ต้องการ คือ มีย่านวัด 0 ถึง 30 เซนติเมตร มีขนาดกว้างประมาณ 3 นิ้ว เมื่อวัดระดับน้ำเต็มย่านวัดจะต้องให้ค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 10 nF ผลจากการแทนค่าตัวแปรต่างๆในแบบจำลองคณิตศาสตร์ในสมการที่ (1)-(2) จะได้ขนาดของลายวงจรอิเล็กโทรดดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ขนาดของลายวงจรที่ได้จากการออกแบบ

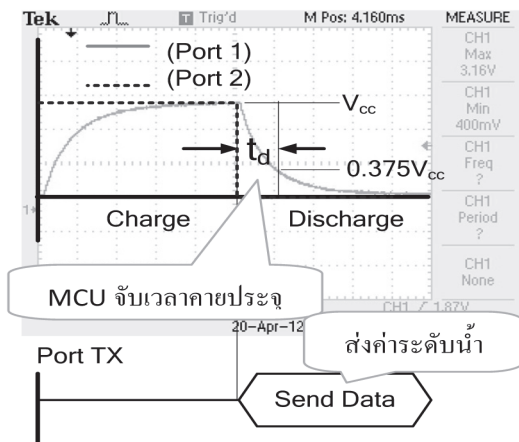
อิเล็กโทรดที่ได้จากการออกแบบ จะถูกนำไปผลิตโดยโรงงานผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งจะเคลือบลายทองแดงทั้งหมดด้วยฉนวน LPSM (Liquid Photoimageable Solder Mask) เพื่อป้องกันการกัดกร่อนและการลัดวงจรเมื่อต้องสัมผัสกับน้ำ

ในการทดลองจะใช้น้ำประปาซึ่งมีอุณหภูมิของน้ำอยู่ระหว่าง 25-35 องศาเซลเซียส โดยวัดค่าความจุไฟฟ้าจากอิเล็กโทรดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วทำการคำนวณกลับเป็นค่าระดับน้ำส่งออกพอร์ต UART ในรูปแบบ ASCII Code จากนั้นแปลงเป็นสัญญาณแบบ RS-232 ส่งต่อไปให้กับคอมพิวเตอร์ เพื่อบันทึกและแสดงผลค่าระดับน้ำ มีผังการทำงานทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ไดอะแกรมแสดงการต่อเซนเซอร์ร่วมกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต USB สำหรับทำการทดลอง

ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเตอร์ดิจิตอล จะถูกวัดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้วิธีการจับระยะเวลาคายประจุ จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและค่าคงที่ทางเวลาของ RC (RC Time constant) ซึ่งประกอบด้วยการทำงาน 4 ขั้นตอน คือ เก็บประจุ, คายประจุ, ประมวลผล และส่งข้อมูลระดับน้ำ มีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 7



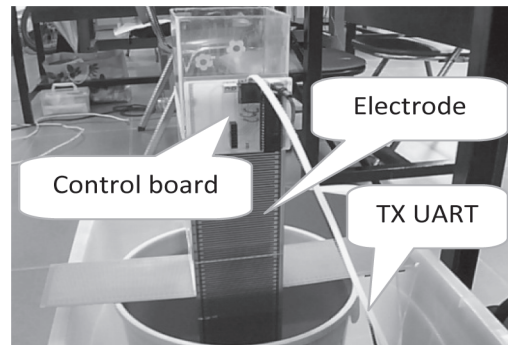
รูปที่ 7 การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กทรอนิกส์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ในขั้นตอนการเก็บประจุไฟฟ้า ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้างสัญญาณพัลส์ส่งผ่าน R_0 แล้วส่งต่อไปลายวงจรที่บวกของแผ่นอิเล็กโทรด ส่วนที่ลบถูกต่อเข้ากับขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีสถานะเป็นโลว์ เมื่ออิเล็กโทรดเก็บประจุไฟฟ้าแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะหยุดการป้อนสัญญาณพัลส์ แล้วเปลี่ยนสถานะเป็นโลว์ เพื่อให้ประจุไฟฟ้าที่สะสมในแผ่นอิเล็กโทรดคายประจุย้อนกลับออกมาผ่าน R_0 กลับเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยมี R_1 ทำหน้าที่จำกัดกระแสไหลเข้าแรงดันตกคร่อมอิเล็กทรอนิกส์ในระหว่างที่คายประจุออกมาจะถูกวัดด้วยวงจรเปรียบเทียบแรงดันซึ่งอยู่ในไมโคร

คอนโทรลเลอร์ ระยะเวลาตั้งแต่อิเล็กทรอนิกส์เริ่มต้นคายประจุจนกระทั่งแรงดันตกคร่อมอิเล็กทรอนิกส์ลดลงเหลือ 37.5% ของแหล่งจ่าย (V_{cc}) จะถูกจับเวลาด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$t = R_d C_{electrode} \ln \left(\frac{V_{cc}}{0.375 V_{cc}} \right) \quad (6)$$

จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการคำนวณระยะเวลาคายประจุเป็นค่าระดับน้ำ แล้วส่งไปแสดงผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ต่อไป มีการทดลองวัดค่าระดับน้ำดังรูปที่ 8

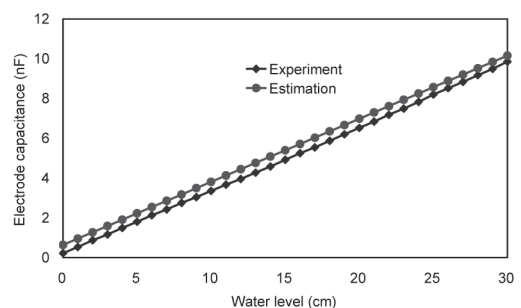


รูปที่ 8 การทดลองระดับน้ำด้วยเซนเซอร์

5. การทดลองและผลการทดลอง

5.1 ผลตอบสนองเชิงเส้น (Linearity)

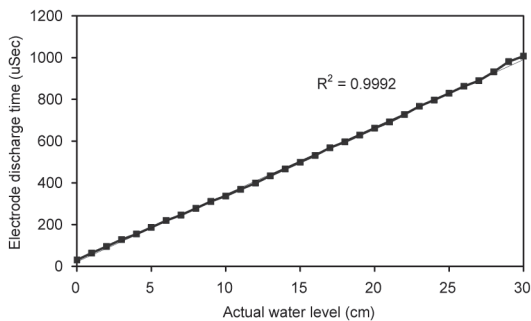
ในการทดลองเพื่อหาผลตอบสนองเชิงเส้นของอิเล็กทรอนิกส์ เป็นการทดลองใช้เซนเซอร์วัดระดับน้ำตั้งแต่ 0 ถึง 30 เซนติเมตร โดยเพิ่มระดับน้ำครั้งละ 1 เซนติเมตร พร้อมกับวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องวัด LCR ของบริษัท Hioki เพื่อเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัด กับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่าด้วยสมการ (1)-(2) มีผลการทดลองดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่า

รูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่า ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่วัดด้วยเครื่องวัด RLC มีผลตอบสนองเป็นเชิงเส้นตลอดย่านวัด 0 ถึง 30 เซนติเมตร โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9998 และมีค่าความจุไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 9.8 nF ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง มีค่าน้อยกว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่าด้วยสมการ แต่ทั้งสองวิธีมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกัน

เมื่อใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์วัดระยะเวลาคายประจุของ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าระยะเวลาคายประจุของอิเล็กโทรดดังรูปที่ 10

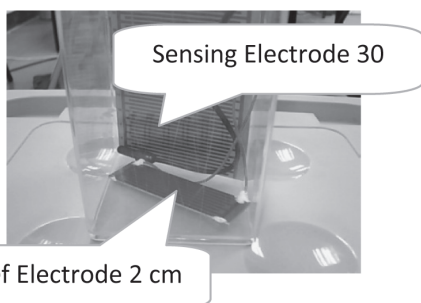


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าระยะเวลาคายประจุ ที่ได้จากการวัดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

รูปที่ 10 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าระยะเวลาคายประจุของอิเล็กโทรดที่ได้จากการวัดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีผลตอบสนองเป็นเส้นตลอดย่านวัด 0-30 เซนติเมตร โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9992 และมีค่าระยะเวลาคายประจุไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 31-1006 μ Sec

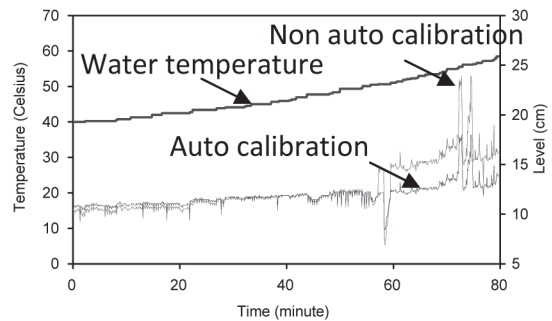
5.2 การลดความผิดพลาดในการวัดระดับ ที่เกิดจาก อุณหภูมิของน้ำมีการเปลี่ยนแปลง

กำหนดให้อิเล็กโทรดอ้างอิงมีขนาดเท่ากับ 2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 อิเล็กโทรดอ้างอิงที่มีความยาว 2 เซนติเมตร ถูกวางอยู่ที่ก้นภาชนะเพื่อให้ถูกแช่อยู่ในน้ำทั้งหมด

มีค่าระดับน้ำจริงมีค่าเท่ากับ 10 เซนติเมตร จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิของน้ำตั้งแต่ 40 – 60 องศาเซลเซียส บันทึกค่าอุณหภูมิและค่าระดับน้ำที่ผ่านการปรับการคำนวณจากอิเล็กโทรดอ้างอิงแล้ว (Auto calibration) กับค่าระดับน้ำที่วัดด้วยวิธีปกติ (Non auto calibration) โดยเก็บค่าระดับน้ำและอุณหภูมิทุก ๆ 1 วินาที มีผลการทดลองดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 เปรียบเทียบค่าระดับน้ำที่วัดแบบวิธีปกติ กับค่าระดับน้ำที่ผ่านการปรับการคำนวณแล้ว เมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้น

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิของน้ำน้อยกว่า 40 องศาเซลเซียส การวัดระดับแบบ Auto calibration จะมีค่าความผิดพลาดใกล้เคียงกับการวัดแบบ Non auto calibration แต่เมื่ออุณหภูมิของน้ำมากกว่า 40 องศาเซลเซียส การวัดระดับแบบ Auto calibration จะมีความค่าความผิดพลาดน้อยกว่า Non auto calibration แต่ก็ยังไม่สามารถลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด สาเหตุเนื่องมาจากเมื่อน้ำเริ่มมีอุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส จะเกิดไอน้ำบางส่วนระเหยไปเกาะบนอิเล็กโทรดส่วนที่เป็นอากาศ ดังรูปที่ 13 ทำให้ค่าระดับน้ำที่วัดจากเซนเซอร์มีค่ามากกว่าค่าระดับน้ำจริง

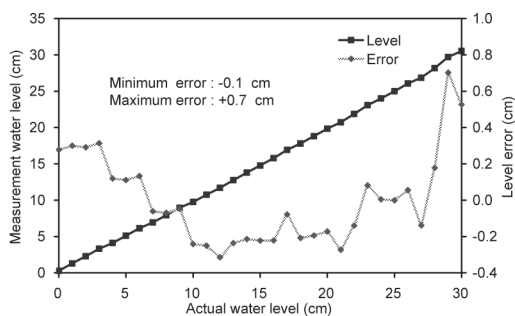


รูปที่ 13 ไอน้ำที่เกาะบนอิเล็กโทรด เมื่อน้ำมีอุณหภูมิมากกว่า 40 องศาเซลเซียส

5.3 ค่าความผิดพลาดในการวัด (Measurement error)

สำหรับการทดลองเพื่อหาค่าความผิดพลาดของเซนเซอร์เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการวัดระดับน้ำด้วยเซนเซอร์กับค่าระดับน้ำจริง ทำการทดลองโดยวัดระดับตั้งแต่ 0 ถึง 30 เซนติเมตร เพิ่มระดับน้ำครั้งละ 1 เซนติเมตร ทำการทดลองซ้ำ 10 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย มีผลการทดลองดังรูปที่ 14

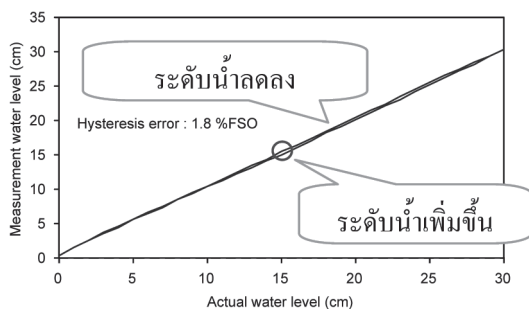
ผลจากการทดลองพบว่า เซนเซอร์มีค่าความผิดพลาดสูงสุด 0.7 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำ 27 เซนติเมตร หรือคิดเป็นค่าความผิดพลาดสูงสุด 2.3 %FSO และมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 0.2 เซนติเมตร ตลอดย่านวัด 0-30 เซนติเมตร



รูปที่ 14 ค่าความผิดพลาดเมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าระดับน้ำจริง กับค่าระดับน้ำที่วัดได้จากเซนเซอร์

5.4 ค่าความผิดพลาดแบบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis error)

ในการทดลองเพื่อหาค่าความผิดพลาดแบบฮิสเทอรีซิส จะเป็นการทดลองวัดระดับน้ำด้วยเซนเซอร์โดยเพิ่มระดับน้ำและลดลงระดับน้ำครั้งละ 1 เซนติเมตร แล้วเปรียบเทียบกับระดับน้ำจริง มีผลการทดลองดังรูปที่ 15

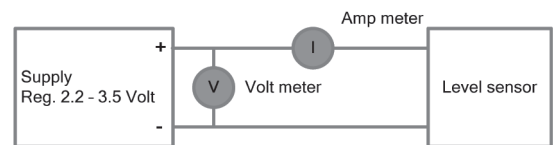


รูปที่ 15 ค่าความผิดพลาดแบบฮิสเทอรีซิสของเซนเซอร์

จากรูปที่ 15 เซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอล มีค่าความผิดพลาดแบบฮิสเทอรีซิส 1.8 %FSO ที่ระดับน้ำ 15 เซนติเมตร

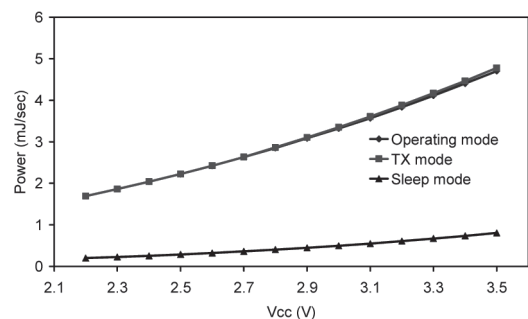
5.5 การทดลองเพื่อหาอัตราการใช้พลังงาน

ในการทดลองเพื่อหาอัตราการใช้พลังงานของเซนเซอร์ จะใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเซนเซอร์ เมื่อป้อนแรงดันของแหล่งจ่ายระหว่าง 2.2-3.5 โวลต์ (ช่วงระดับแรงดันใช้งานของเซนเซอร์) โดยวัดในโหมดการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ 3 โหมด คือ โหมดการทำงานปกติ (Operating mode) โหมดส่งข้อมูล (TX mode) และโหมดหลับ (Sleep mode) กำหนดระดับน้ำจริงขณะทดลองเท่ากับ 30 เซนติเมตร ทำการทดลองโดยปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายครั้งละ 0.1 โวลต์ วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้วย Multimeter ยี่ห้อ Fluke รุ่น 111 มีวิธีการทดลองดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 การวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าเพื่อหากำลังไฟฟ้าของเซนเซอร์โหมด

จากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัด มาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดันต่างๆในแต่ละโหมด ($P = I \cdot V$) มีผลการทดลองดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 อัตราการใช้พลังงานของเซนเซอร์ในแต่ละโหมด ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เซนเซอร์มีอัตราการใช้พลังงานในแต่ละโหมดแปรผันตามระดับแรงดันของแหล่งจ่าย โดยที่ระดับแรงดัน 3.5 โวลต์ ซึ่งเป็นแรงดันสูงสุดสำหรับการทดลองนี้ เซนเซอร์ใช้พลังงานในโหมดทำงานปกติ (Operating mode) และโหมดส่งข้อมูล (TX mode) ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 4.7 mJ/Sec และในโหมดหลับ (Sleep mode) เซนเซอร์ใช้พลังงาน 0.8 mJ/Sec ส่วนที่ระดับ

แรงดัน 2.2 โวลต์ซึ่งเป็นแรงดันต่ำสุดสำหรับการทดลองนี้ เซนเซอร์ใช้พลังงานในโหมดปกติ และโหมดส่งข้อมูลเท่ากัน คือ 1.7 mJ/Sec และในโหมดหลับเซนเซอร์ใช้พลังงาน 0.2 mJ/Sec หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 2.2 mJ/Sec

6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิคตอลิเล็กโตรด เป็นเซนเซอร์ที่มีหลักการทำงานแบบค่าความจุไฟฟ้า ประกอบด้วยส่วนของอิเล็กโตรดทำมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ และส่วนของวงจรควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เซนเซอร์ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นค่าระดับน้ำ โดยส่งข้อมูลแบบ RS-232 จึงสามารถนำไปเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ หรืออุปกรณ์อื่นที่มีมาตรฐานสื่อสารแบบเดียวกันได้ง่าย ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์ที่มีย่านวัด 0-30 เซนติเมตร มีผลตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นตลอดย่านวัด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9992 และมีค่าความผิดพลาดสูงสุด 2.3%FSO นอกจากนี้ยังเป็นเซนเซอร์ที่ใช้พลังงานต่ำ

การเพิ่มอิเล็กโตรดอ้างอิงสำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กตริกของน้ำ แม้จะมีหลักการที่สามารถลดค่าความผิดพลาดได้ แต่ในทางปฏิบัติเมื่อนำมาใช้วัดระดับน้ำที่มีอุณหภูมิสูง กลับมีปัญหาที่เกิดจากไอน้ำเกาะบนอิเล็กโตรด ทำให้ค่าระดับน้ำที่วัดได้มีค่ามากกว่าความเป็นจริง นอกจากนี้ในการนำเซนเซอร์ไปใช้งานจริง อาจมีปัญหาจากความคงทนของวัสดุเคลือบผิว LPSM เมื่อใช้งานกลางแจ้ง หรือต้องแช่อยู่ในน้ำเป็นเวลานานๆ การใช้วัสดุเคลือบที่มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมแทนการใช้วัสดุ LPSM จะช่วยยืดอายุการใช้งานของเซนเซอร์ได้นานยิ่งขึ้น ซึ่งต้องมีการศึกษาเพื่อหาวัสดุที่มีความเหมาะสมต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสภากิจแห่งชาติและมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งอยู่ระหว่างการยื่นขอจดสิทธิบัตรตามเลขที่คำขอ 1101000005 ลงวันที่ 4 ม.ค. 2554

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Irrigation Training and Research Center. Water Level Sensors and Datalogger Testing and Demonstration. ITRC Report. 1998.
- [2] Nikolov G. and Nikolova B. Virtual techniques for liquid level monitoring using differential pressure sensors. RCENT. 2008; 9: 2(23).
- [3] Canbolat H. A Novel Level Measurement Technique Using Three Capacitive Sensors for Liquids. IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT. 2009; 58(10).
- [4] Reverter F, Li X, Gerard C.M. Meijer. Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor. Sensors and Actuators. 2007; A 138.
- [5] Chandra Bera S, Kumar Ray J and Chattopadhyay S. A Low-Cost Noncontact Capacitance-Type Level Transducer for a Conducting Liquid. IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT. 2006; 55:(3).
- [6] katathikarnkul S, Chetpattananondh K. Water Level Measurement using Semicylindrical Capacitance measurement Technique. KKU ENGINEERING JOURNAL. 2011; 38 (In Thai).
- [7] Nazmul Alam Md, Bhuiyam R. H., Dougal Roger A. and Ali M. Concrete Moisture Content Measurement Using Interdigital Near-field Sensors. IEEE SENSORS JOURNAL. 2010; 10:(7).