



## บทที่ 8

### การออกแบบเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอลรุ่นที่ 2

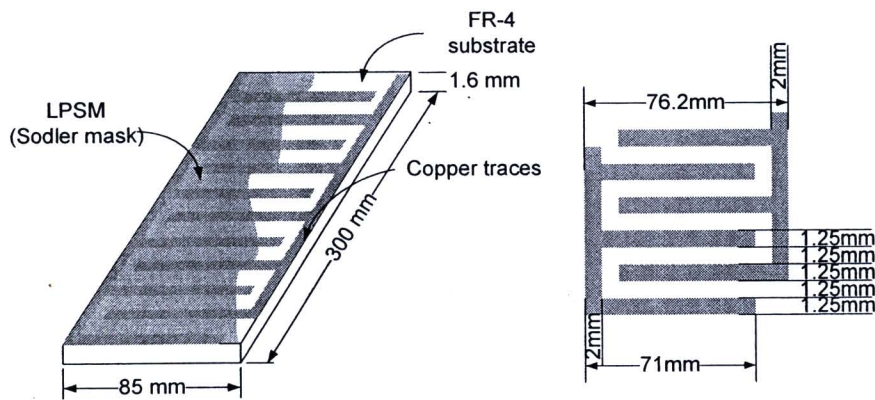
การออกแบบเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอลรุ่นที่ 2 เป็นการออกแบบเซนเซอร์วัดระดับน้ำเพื่อรองรับการใช้งานร่วมกับโมดูลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ซึ่งต้องการคุณสมบัติของเซนเซอร์วัดระดับน้ำที่กินพลังงานต่ำ และมีราคาถูก สามารถปรับการทำงานให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมได้ด้วยตัวเอง การพัฒนาจึงแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) ออกแบบอิเล็กทรอนิกส์จากวัสดุที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก 2) ออกแบบวงจรควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 3) ออกแบบส่วนประมวลผลอัจฉริยะ (Intelligent processing system) เพื่อให้สามารถวัดระดับน้ำได้อย่างถูกต้อง แม้สภาพน้ำขณะทำการวัดจะเปลี่ยนแปลงไป ต้นแบบเซนเซอร์ที่ได้จากการออกแบบ จะถูกทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติต่างๆ สำหรับนำไปเป็นข้อมูลประกอบการใช้งาน หรือนำไปสู่การพัฒนาในรุ่นต่อไป

#### 8.1 อิเล็กทรอนิกส์

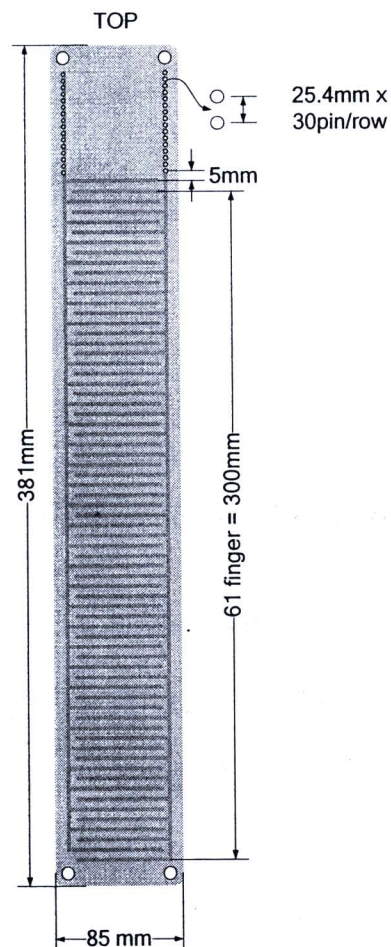
วัสดุสำหรับนำมาสร้างอิเล็กทรอนิกส์ คือ แผ่นวงจรพิมพ์ (print circuit board) เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย สามารถทำตัวเอง หรือสั่งผลิตตามแบบได้จากโรงงานภายในประเทศ ซึ่งรองรับการผลิตตั้งแต่อุปกรณ์ต้นแบบ จนถึงระดับผลิตภัณฑ์โดยไม่กำหนดจำนวนขั้นต่ำในการสั่งผลิต การผลิตจากโรงงานทำให้ได้ชิ้นงานที่รวดเร็ว และมีมาตรฐานสม่ำเสมอทุกชิ้น แผ่นวงจรพิมพ์ที่เลือกใช้ในการสร้างอิเล็กทรอนิกส์ เป็นแผ่นวงจรชนิด FR-4 หนา 1.6 มิลลิเมตร มีลายทองแดงหน้าเดียว มีความหนาของทองแดง 0.05 มิลลิเมตร แต่เนื่องจากทองแดงเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้าและเกิดสนิมโลหะได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับน้ำและอากาศ ดังนั้นจะต้องเคลือบทับด้วยฉนวนที่ป้องกันน้ำได้ ในงานวิจัยนี้จะใช้วัสดุชนิดเดียวกับที่ใช้ในการทำ solder mask เคลือบลายวงจรส่วนที่ต้องสัมผัสกับน้ำทั้งหมด เพื่อให้กระบวนการผลิตทั้งหมดเสร็จสิ้นจากโรงงานผลิตแผ่นวงจร

ในส่วนของลายวงจร ซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ ใช้การออกแบบโครงสร้างเบื้องต้นด้วยการประมาณค่าจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอในบทความของ Md. Nazmul Alam[25] โดยกำหนดค่าตัวแปรต่างๆตามวัสดุที่จะใช้งานจริง คือ วัสดุฐานรองแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.5 และน้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 80 ส่วนคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการ คือ มีย่านวัด 0-30 เซนติเมตร กว้าง 3 นิ้ว เมื่อ

วัดระดับน้ำเต็มย่านวัดจะต้องให้ค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 5 nF ผลจากการแทนค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ในสมการที่ (6-2) - (6-4) จะได้ขนาดของลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์รูปที่ 8-1



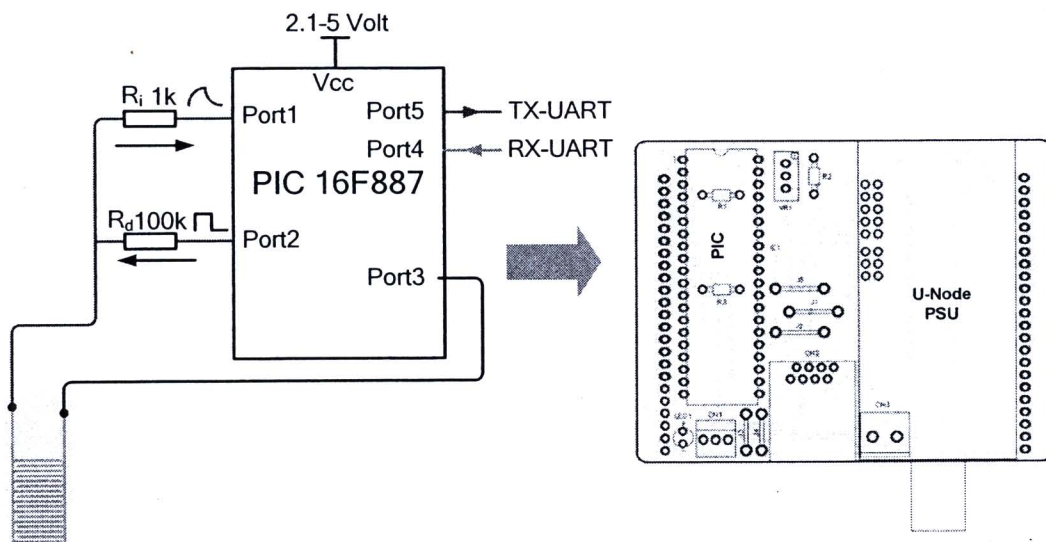
รูปที่ 8-1 ขนาดของลายวงจรที่ได้จากการออกแบบโดยใช้การประมาณค่าด้วยสมการคณิตศาสตร์



รูปที่ 8-2 ดัชนีแบบอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเทอร์คิตอลที่ได้รับการปรับปรุงในรุ่นที่ 2

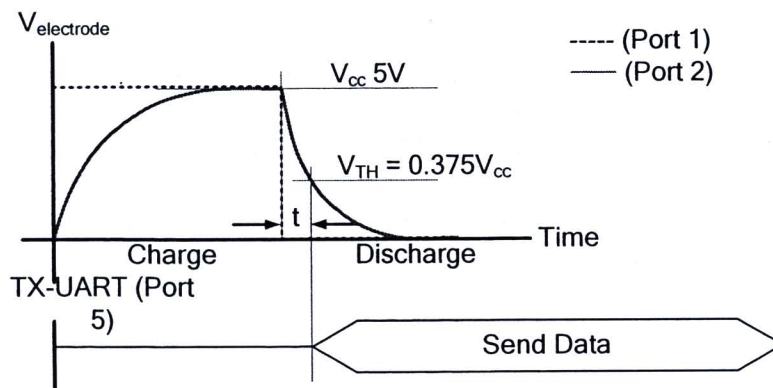
## 8.2 วงจรควบคุมการทำงาน

ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กทรอนิกส์ จะถูกวัดด้วยวงจรควบคุมการทำงาน ซึ่งใช้หลักการจับเวลาคาบประจุ ออกแบบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงตัวเดียวทำหน้าที่ควบคุมการทำงานทั้งหมด เพื่อลดจำนวนอุปกรณ์และการใช้พลังงาน สามารถควบคุมการทำงานได้ง่ายด้วยโปรแกรม จึงกำหนดค่าอัตราการสุ่มเก็บข้อมูลและรูปแบบการสื่อสารได้ตามต้องการ มีผลการออกแบบวงจรดังรูปที่ 8-3



รูปที่ 8-3 วงจรควบคุมการทำงานสำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กทรอนิกส์

การทำงานของวงจรทั้งหมดจะถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีลำดับการทำงาน 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเก็บประจุไฟฟ้า คาบประจุไฟฟ้า และขั้นตอนการส่งข้อมูล ดังรูปที่ 8-4



รูปที่ 8-4 การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กทรอนิกส์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์



ขั้นตอนการเก็บประจุไฟฟ้า ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้างสัญญาณพัลส์ผ่าน  $R_d$  แล้วส่งต่อไปลายวงจรชั่งบวกของแผ่นอิเล็กโทรด ส่วนซึ่งลบถูกต่อเข้ากับขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีสถานะเป็นโลว์ดังแสดงในรูปที่ 8-3 เมื่ออิเล็กโทรดเก็บประจุไฟฟ้าจนเต็ม ไมโครคอนโทรลเลอร์จะหยุดการป้อนสัญญาณพัลส์แล้วเปลี่ยนสถานะเป็นโลว์ เพื่อให้ประจุไฟฟ้าที่สะสมในแผ่นอิเล็กโทรดคายประจุย้อนกลับออกมา ผ่าน  $R_d$  กลับเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ แรงดันตกคร่อมอิเล็กโทรดในระหว่างที่คายประจุ จะถูกวัดด้วยวงจรเปรียบเทียบแรงดันภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยมี  $R_d$  ทำหน้าที่จำกัดกระแสไหลเข้า ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มต้นคายประจุจนกระทั่งแรงดันตกคร่อมอิเล็กโทรดลดลงเหลือ 37.5% ของแหล่งจ่าย จะถูกจับเวลาด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์มีความสัมพันธ์ดังสมการ (8-1)-(8-2)

แรงดันไฟฟ้าต้นไฟฟ้าตกคร่อมอิเล็กโทรดขณะคายประจุ ที่สัมพันธ์กับระยะเวลา ดังนี้

$$V_c(t) = V_{cc} e^{\frac{-t}{R_d C_{electrode}}} \quad (8-1)$$

จากวงจรดังรูปที่ 8-3 ระยะเวลาคายประจุตั้งแต่อิเล็กโทรดเริ่มต้นคายประจุ จนกระทั่งเหลือแรงดันตกคร่อมเท่ากับร้อยละ 37.5 ของแหล่งจ่าย มีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าดังสมการ (8-2)

$$t = 98,083 \cdot C_{electrode} \quad (8-2)$$

สมการที่ (8-2) แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการคายประจุก็จะมากขึ้นตามไปด้วย โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับระยะเวลาคายประจุเป็นเชิงเส้น ระยะเวลาคายประจุที่ได้ จะถูกเปลี่ยนเป็นรหัสแอสกี (ASCII Code) แล้วส่งออกผ่านทางพอร์ตอนุกรม UART ของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อส่งต่อไปให้กับอุปกรณ์ที่มีมาตรฐานสื่อสารแบบเดียวกันต่อไป

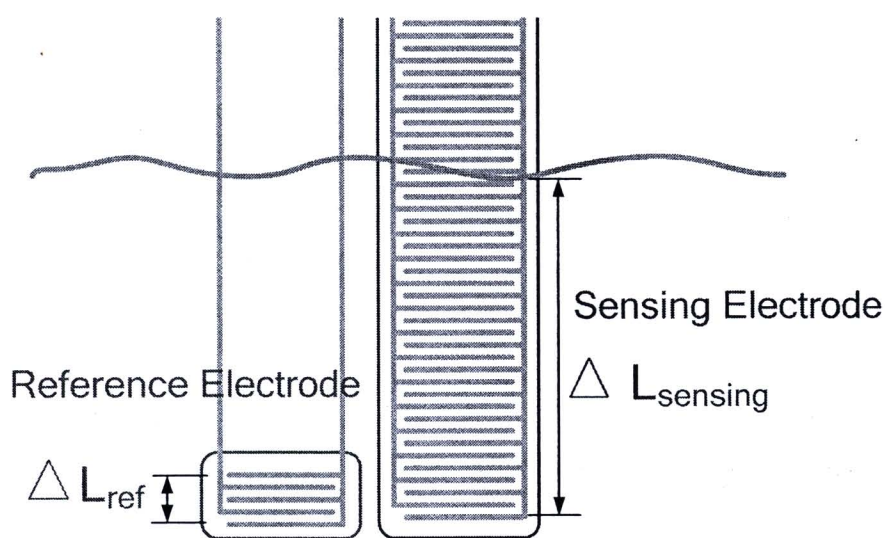
### 8.3 ระบบประมวลผลอัจฉริยะ

#### 8.3.1 การลดความผิดพลาดของค่าระดับน้ำ ที่เกิดจากการเปลี่ยนค่าไดอิเล็กตริก

เนื่องจากอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล มีหลักการทำงานที่ต้องอาศัยการเก็บประจุไฟฟ้าเสมือนตัวเก็บประจุตัวหนึ่ง ซึ่งนอกจากขนาดโครงสร้างของอิเล็กโทรดแล้ว ค่าไดอิเล็กตริกของน้ำก็เป็นปัจจัยสำคัญต่อความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรด เมื่อค่าได-

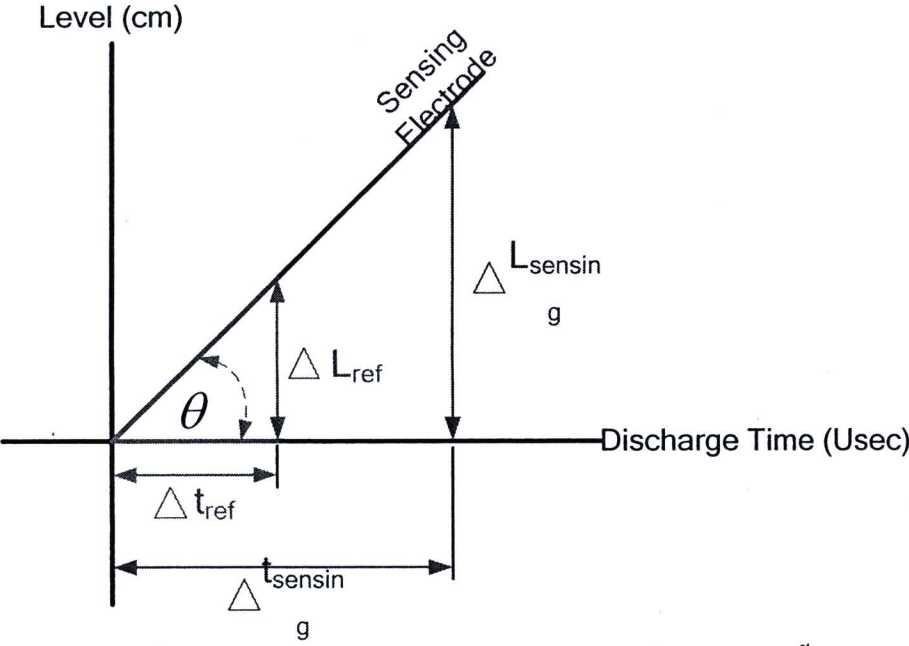


เล็กน้อยของน้ำเปลี่ยนแปลงไป อันเนื่องจากอุณหภูมิหรือสิ่งเจือปนในน้ำ ย่อมส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัดของเซนเซอร์ด้วย การเพิ่มอิเล็กโทรดสำหรับวัดความเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กตริกของน้ำขณะที่ทำการตรวจวัด เพื่อนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงในการปรับสูตรการคำนวณให้เหมาะสมกับสภาพน้ำขณะทำการวัด จะช่วยลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและสิ่งเจือปนในน้ำได้ ดังมีหลักการแสดงในรูปที่ 8-5



รูปที่ 8-5 การเพิ่มอิเล็กโทรดอ้างอิงสำหรับชดเชยค่าความผิดพลาดขณะตรวจวัดด้วยเซนเซอร์

จากรูปที่ 8-5 อิเล็กโทรดอ้างอิง(Reference Electrode) จะเป็นส่วนที่ถูกเพิ่มเข้ามาเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในการปรับสูตรการคำนวณของอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำ(Sensing Electrode) อิเล็กโทรดอ้างอิงจะมีลักษณะเดียวกับอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำ เพียงแต่จะมีขนาดเล็กกว่า ซึ่งเราได้กำหนดขนาดความยาวที่แน่นอนไว้แล้ว อิเล็กโทรดอ้างอิงที่เราทราบขนาดจะถูกจุ่มในน้ำทั้งหมด ดังนั้นค่าระดับน้ำที่วัดได้จากอิเล็กโทรดอ้างอิงจะต้องเท่ากับ ความยาวของอิเล็กโทรดอ้างอิงเอง ซึ่งหากระดับน้ำที่วัดได้ผิดไปจากความยาวของอิเล็กโทรดอ้างอิง แสดงว่าค่าไดอิเล็กตริกของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับอิเล็กโทรดอ้างอิง จะถูกนำไปปรับสูตรการคำนวณของอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำ มีหลักการดังรูปที่ 8-6



รูปที่ 8-6 การหาค่าความชันของเส้นกราฟจากข้อมูลและสิ่งเจือปนในน้ำ

โดยการปรับค่าความสัมพันธ์ของอิเล็กโตรดวัดระดับน้ำ ตามค่าความสัมพันธ์ของอิเล็กโตรดอ้างอิง จากรูปที่ 8-7 เมื่อ  $\Delta L_{ref}$  เป็นค่าความยาวของอิเล็กโตรดอ้างอิง และ  $\Delta t_{ref}$  เป็นค่าระยะเวลาคายประจุของอิเล็กโตรดอ้างอิงที่ได้จากการวัดด้วยวงจรควบคุม จากรูปที่ 8-6 มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (8-3)

$$\tan \theta = \frac{\Delta L_{ref}}{\Delta t_{ref}} \tag{8-3}$$

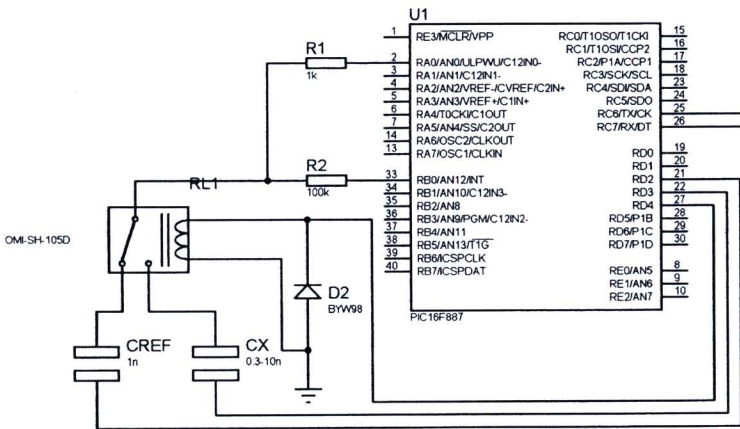
เนื่องจากอิเล็กโตรดอ้างอิงมีส่วนที่เหมือนกับอิเล็กโตรดวัดระดับน้ำ และด้วยความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างระดับน้ำกับค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโตรด (การทดลองที่ 8.4.1) ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กโตรดวัดระดับน้ำกับอิเล็กโตรดอ้างอิงจึงเท่ากันดังสมการที่ (8-4)

$$\tan \theta = \frac{\Delta L_{ref}}{\Delta t_{ref}} = \frac{\Delta L_{sensing}}{\Delta t_{sensing}} \tag{8-4}$$

จึงสามารถหาค่าระดับน้ำของอิเล็กโตรดวัดระดับได้จาก

$$\Delta L_{sensing} = t_{sensing} \tan \theta \tag{8-5}$$

ในทางปฏิบัติ การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กทรอนิกส์วัดระดับน้ำ กับอิเล็กทรอนิกส์อ่างอิงไม่สามารถทำการวัดพร้อมกันได้ เพราะจะเกิดการรบกวนทางสนามไฟฟ้าระหว่างกันเมื่ออยู่ในน้ำ เนื่องจากกราวด์ของอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสองต้องร่วมกัน จำเป็นต้องใช้วิธีการสลับกันวัด โดยใช้รีเลย์และพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่สลับกันวัดระหว่างอิเล็กทรอนิกส์วัดระดับน้ำกับอิเล็กทรอนิกส์อ่างอิง มีวงจรดังรูปที่ 8-7

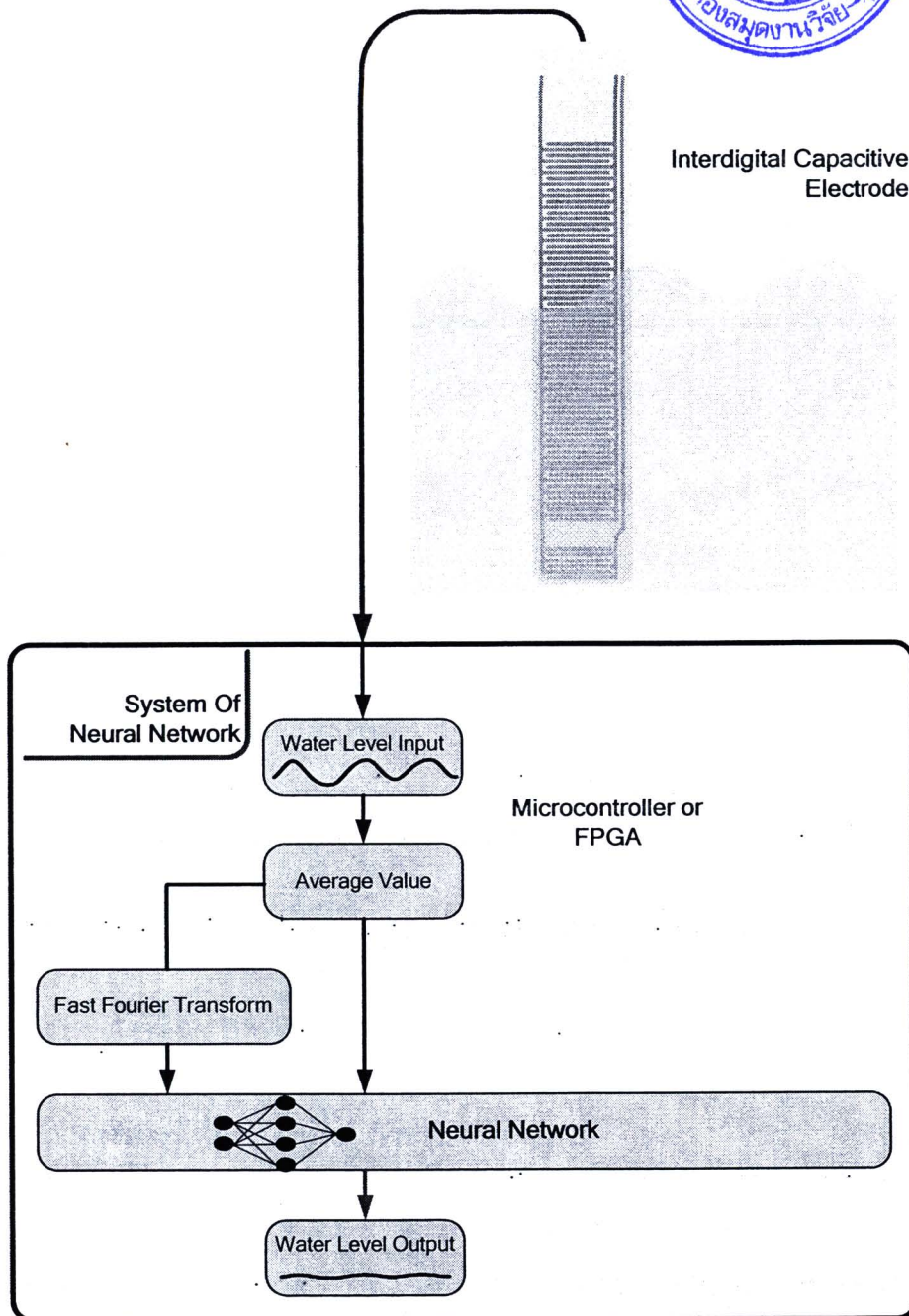


รูปที่ 8-7 การเพิ่มรีเลย์เพื่อทำหน้าที่สลับการวัดระหว่างอิเล็กทรอนิกส์วัดระดับน้ำกับอิเล็กทรอนิกส์อ่างอิง

8.3.2 การลดค่าความผิดพลาดเนื่องจากการกระเพื่อมของน้ำที่เกิดจากการไหล

โดยปกติการวัดระดับน้ำที่มีลักษณะเป็นแหล่งน้ำเปิด ผิวน้ำจะมีการกระเพื่อมตลอดเวลา เนื่องมาจากหลายสาเหตุ เช่น เกิดจากลม การไหลของน้ำ หรือจากเรือ ฯลฯ ทำให้เราไม่สามารถอ่านค่าระดับน้ำที่แท้จริงจากเซนเซอร์ได้ ที่ผ่านมาการแก้ปัญหาดังกล่าว นิยมใช้การเก็บค่าระดับน้ำในช่วงเวลาหนึ่งแล้วทำการหาค่าเฉลี่ย แม้วิธีการหาค่าเฉลี่ยจะให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือ แต่ก็ต้องใช้ระยะเวลาในการเก็บและประมวลผลข้อมูล ส่งผลให้ค่าระดับน้ำที่วัดได้ไม่เป็นข้อมูล ณ เวลาปัจจุบัน (Real Time) จากการศึกษาบทความวิจัยของ Edin Terzic [31] ที่ได้เสนอวิธีการลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดปริมาณเชื้อเพลิงในถังน้ำมันรถยนต์ขณะรถเคลื่อนที่ ส่งผลให้ไม่สามารถหาปริมาณเชื้อเพลิงในถังเก็บได้อย่างถูกต้อง โดยผลการทดลองได้พิสูจน์ให้เห็นว่าวิธีการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ (Feed forward backpropagation neural network) สามารถลดค่าความผิดพลาดจากการวัดปริมาตร จากเดิม 68% เหลือเพียง 0.11% ผู้วิจัยจึงเลือกวิธีการที่เสนอโดย Edin. Terzic มาประยุกต์ใช้เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการกระเพื่อมของน้ำที่มีการไหล สำหรับเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลรุ่นที่ 2 โดยมีผังการทำงานดังแสดงในรูปที่ 8-8

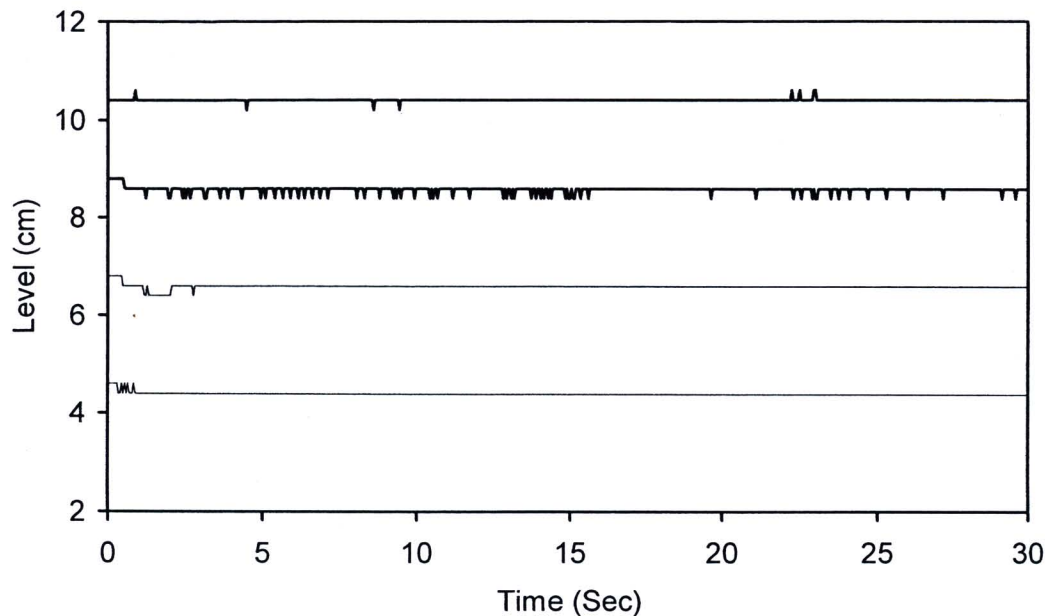




รูปที่ 8-8 การลดค่าความผิดพลาดเนื่องจากการกระเพื่อมของน้ำที่เกิดจากการไหล

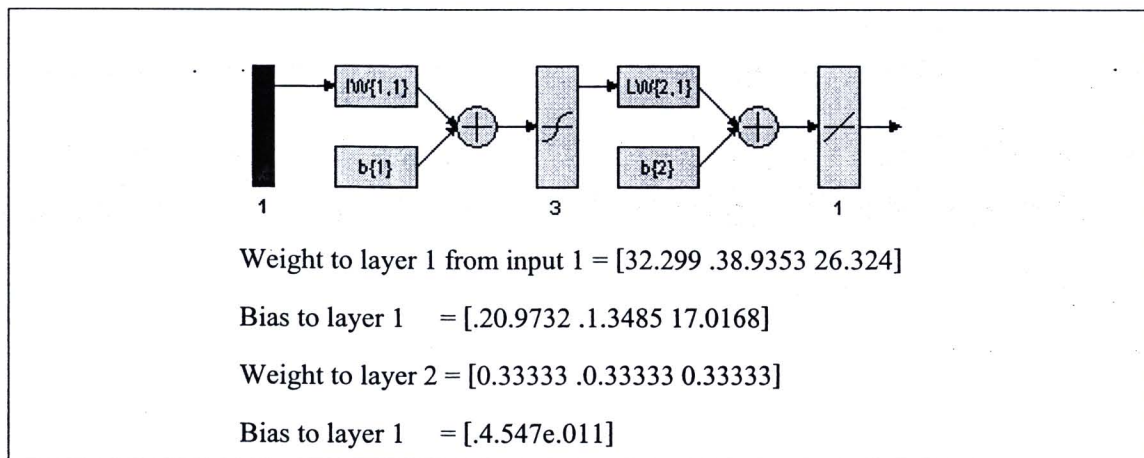
การเก็บข้อมูลเพื่อนำมาใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียม ใช้การทดลองเพื่อเก็บค่าระดับน้ำที่เกิดจากการจำลองการไหลแบบเปลี่ยนแปลงซ้ำในรางเปิดของภาควิชาวิศวกรรมโยธา โดยใช้เซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลรุ่นที่ 2 ซึ่งกำหนดการวัดระดับน้ำไว้ที่ 4 ระดับ คือ 4, 6, 8 และ 10

เซนติเมตร แล้วสุ่มเก็บค่าระดับขณะน้ำไหลทุกๆ 50 mSec เป็นเวลาประมาณ 30 วินาที มีผลการทดลองดังรูปที่ 8-9



รูปที่ 8-9 ระดับน้ำจากการทดลอง สำหรับใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียม

ข้อมูลระดับน้ำที่ได้ จะถูกนำไปใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียม โดยวิธีการเรียนรู้แบบแพร่กลับ มีโครงสร้างแบบ 1.3.1 โดยใช้ Neural Network Toolbox ภายในโปรแกรม MATLAB มีข้อมูลในการสอน (Input data) จำนวน 4000 ชุดข้อมูล และค่าเอาต์พุตเป้าหมาย (Target data) ที่ระดับ 4, 6, 8 และ 10 เซนติเมตรตามค่าระดับน้ำจริงที่ได้จากการทดลอง หลังจากได้ผลการสอนตามที่ต้องการแล้ว จะได้โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมดังรูปที่ 8-10



รูปที่ 8-10 โครงข่ายประสาทที่ได้จากการสอนด้วยค่าระดับน้ำจริง

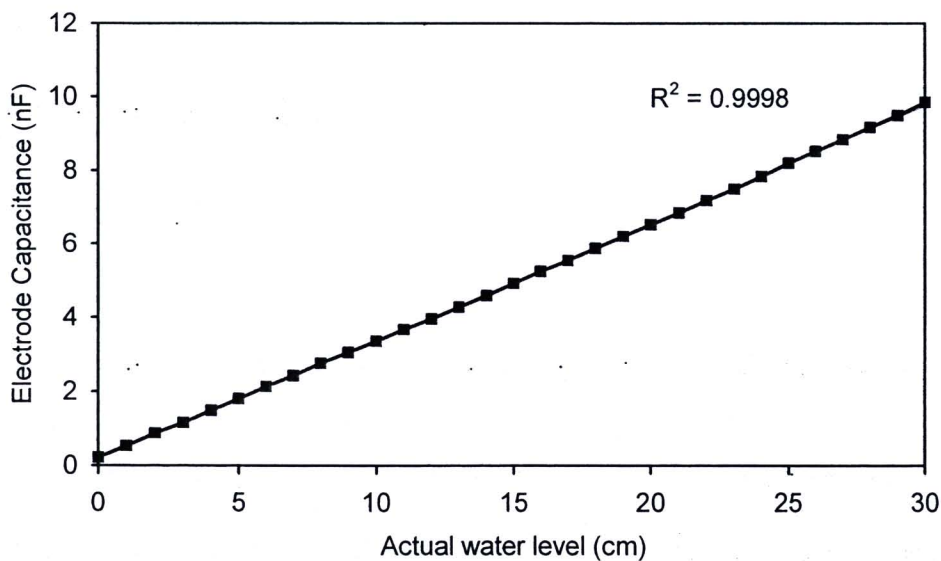
#### 8.4 การทดลอง และผลการทดลอง

หลังจากออกแบบเซนเซอร์วัดระดับแบบอินเตอร์ดิจิตอลจนได้คุณสมบัติตามที่ต้องการแล้ว จึงทำการสร้างต้นแบบตามที่ได้ออกแบบไว้ ต้นแบบที่ได้จะถูกนำมาทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ พิกัดการทำงาน และการใช้พลังงาน โดยการทดลองทั้งหมดทำภายในห้องปฏิบัติการที่มีอุณหภูมิของน้ำขณะทำการทดลองอยู่ระหว่าง 25 – 30 องศาเซลเซียส ใช้ น้ำประปาในการทดลอง มีการทดลองและผลการทดลองดังนี้

##### 8.4.1 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำ กับค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอลที่ได้จากการออกแบบ

###### วิธีการทดลอง

ทำการทดลองวัดระดับน้ำตั้งแต่ 0-30 เซนติเมตร โดยเพิ่มระดับน้ำครั้งละ 1 เซนติเมตร แล้ววัดค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดด้วยเครื่อง LRC Meter ของบริษัท HIOKI มีผลการทดลองดังรูปที่ 8-11

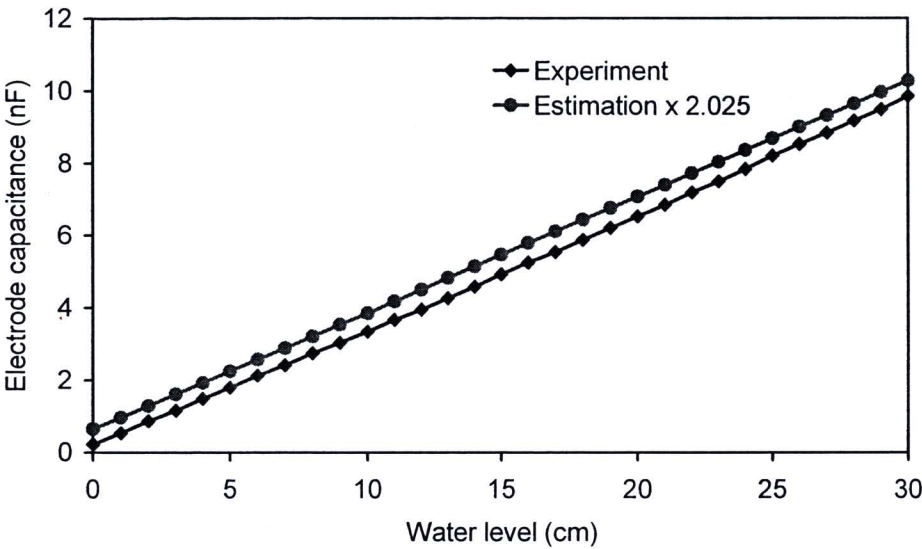


รูปที่ 8-11 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำ กับค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตลอดย่านวัด 30 เซนติเมตร โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 0.3 nF ต่อระดับน้ำ 1 เซนติเมตร แต่ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองกลับมีค่ามากกว่าการประมาณด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ แต่เมื่อชดเชย



ค่าที่ได้จากการประมาณค่าอีก 2.025 เท่า แล้วเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองอีกครั้ง จะมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 8-12



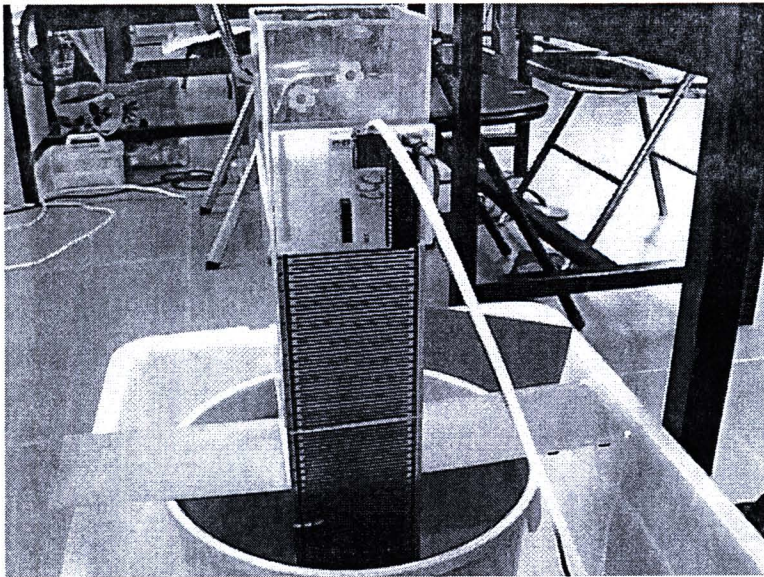
รูปที่ 8-12 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง กับค่าที่ได้จากการชดเชยค่าประมาณอีก 2.025 เท่า

รูปที่ 8-12 แสดงให้เห็นว่า ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่า หลังจากทำการชดเชยค่าที่ได้อีก 2.025 เท่า มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง สาเหตุน่าจะมาจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์วัดระดับน้ำ เป็นแบบจำลองสำหรับการประมาณค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กทรอนิกส์สำหรับตรวจวัดความชื้นในคอนกรีต[25] ที่มีการวัดวัสดุเพียงด้านเดียว แต่การวัดระดับน้ำเป็นการวัดแบบรอบตัว จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่าน้อยกว่าผลจากการทดลองประมาณ 2 เท่า

8.4.2 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำ กับระยะเวลาคายประจุของอิเล็กทรอนิกส์ ที่ได้จากการวัดด้วยวงจรควบคุมการทำงาน

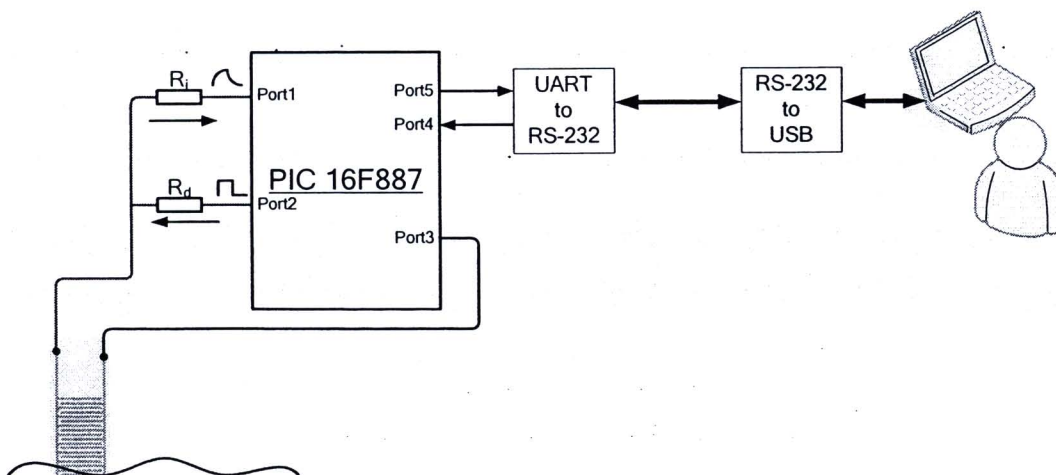
วิธีการทดลอง

ทำการทดลองวัดระดับน้ำตั้งแต่ 0-30 เซนติเมตร โดยเพิ่มระดับน้ำครั้งละ 1 เซนติเมตร ดังรูปที่ 8-13 แล้ววัดค่าระยะเวลาคายประจุของอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวงจรควบคุมการทำงานที่ได้จากการออกแบบ



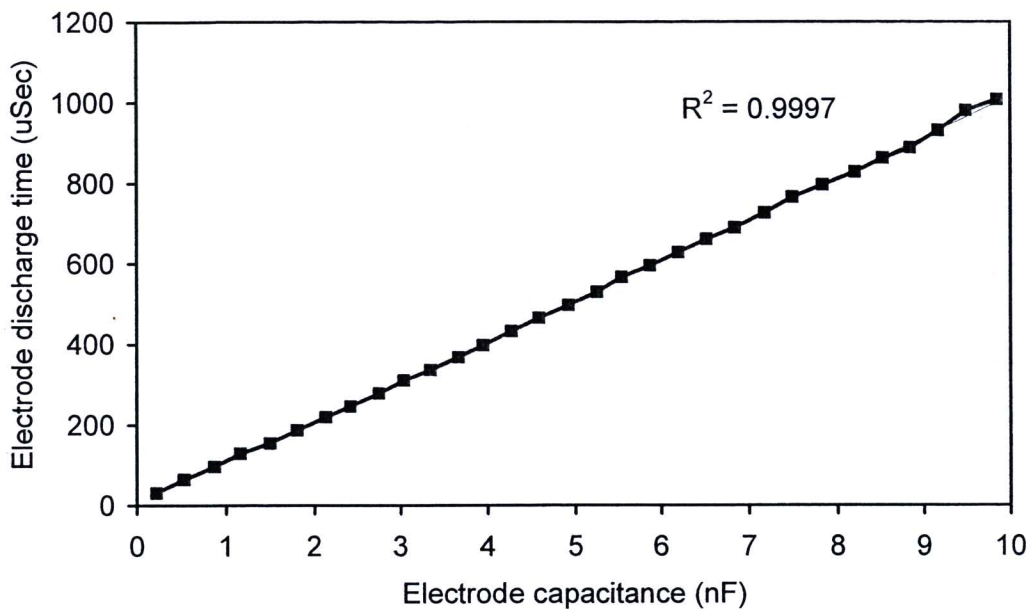
รูปที่ 8-13 วิธีการทดลองวัดระดับน้ำด้วยเซนเซอร์ โดยเพิ่มระดับน้ำครั้งละ 1 เซนติเมตร

ค่าระยะเวลาคายประจุของอิเล็กโตรดจะถูกด้วยวงจรควบคุมการทำงาน ซึ่งใช้การจับระยะเวลาคายประจุด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ระยะเวลาคายประจุที่วัดได้ จะถูกส่งออกผ่านทางพอร์ตอนุกรม UART ของไมโครคอนโทรลเลอร์ในรูปแบบรหัสแอสกี เมื่อข้อมูลถูกส่งออกทางสายจะทำการเปลี่ยนมาตรฐานสื่อจาก UART เป็น RS-232 แล้วเปลี่ยนจากมาตรฐานสื่อสาร RS-232 เป็น USB อีกครั้งเมื่อเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ โปรแกรม LabView จะรับข้อมูลผ่านทางผ่าน USB แล้วนำข้อมูลที่ได้อไปแสดงผลและบันทึกข้อมูล มีผังการทำงานดังรูปที่ 8-14



รูปที่ 8-14 ผังแสดงการเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดระดับน้ำ เข้ากับคอมพิวเตอร์

มีผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 8-15



รูปที่ 8-15 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าระยะเวลาคายประจุของอิเล็กโทรด  
ที่ได้จากการวัดด้วยวงจรควบคุมการทำงาน

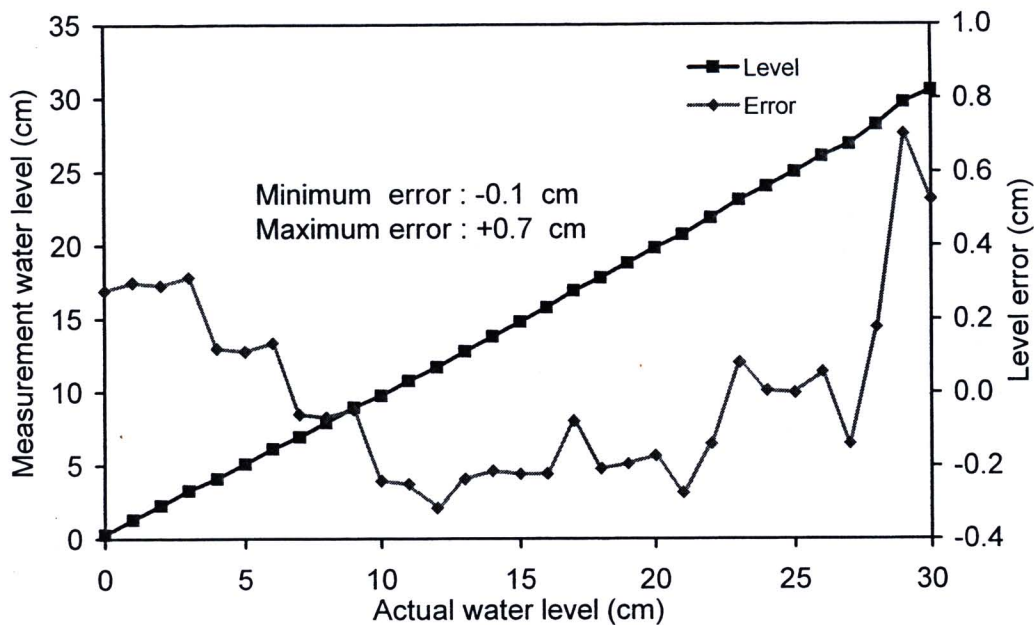
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าระยะเวลาคายประจุของอิเล็กโทรดที่ได้จากการวัดด้วยบอร์ดควบคุมการทำงาน มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าระยะเวลาคายประจุประมาณ  $34 \mu\text{Sec}$  ต่อระดับน้ำ 1 เซนติเมตร

#### 8.4.3 การทดลองเพื่อหาค่าความผิดพลาดของเซนเซอร์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าระดับน้ำที่ได้จากการวัดด้วยเซนเซอร์ กับค่าระดับน้ำจริง

##### วิธีการทดลอง

ใช้ความความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำ กับระยะเวลาคายประจุของเซนเซอร์ที่ได้จากการทดลองที่ 8.4.2 มาคำนวณหาค่าระดับน้ำ (measurement water level) แล้วเปรียบเทียบกับระดับน้ำจริงที่ได้จากการอ่านระดับด้วยสายตา (actual water level) นำผลที่ได้จากสองวิธีมาเปรียบเทียบ เพื่อหาค่าความผิดในการวัดของเซนเซอร์ (measurement error) โดยใช้ค่าระดับที่อ่านด้วยสายตาเป็นค่าอ้างอิง มีผลการทดลองดังรูปที่ 8-16





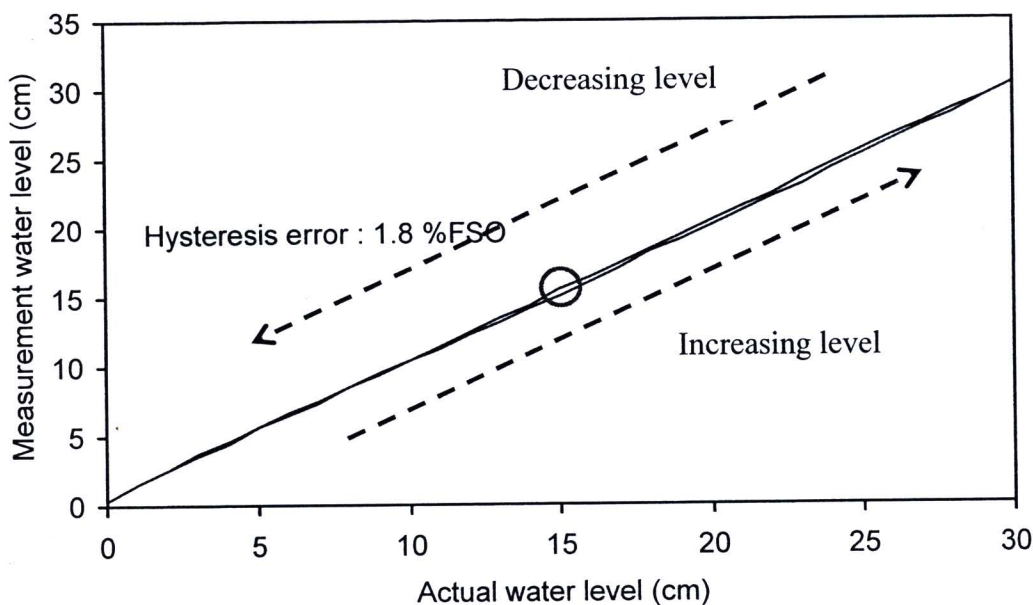
รูปที่ 8-16 ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดระดับน้ำด้วยเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดระดับน้ำด้วยเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลมีค่าความผิดพลาดสูงสุด +0.7 เซนติเมตรที่ระดับน้ำ 27 เซนติเมตร หรือคิด 2.33 %FSO และมีค่าความผิดพลาดต่ำสุด -0.1 เซนติเมตรที่ระดับน้ำ 12 เซนติเมตร หรือคิดเป็น 0.33 %FSO

8.4.4 การทดลองเพื่อหาค่าความผิดพลาดแบบฮิสเทอรีซิส (hysteresis error) ของเซนเซอร์ เมื่อวัดระดับน้ำในช่วงระดับน้ำเพิ่มขึ้นและลดลง

วิธีการทดลอง

ทำการทดลองวัดระดับน้ำตั้งแต่ 0-30 เซนติเมตร โดยเพิ่มระดับน้ำครั้งละ 1 เซนติเมตร และลดระดับน้ำลงครั้งละ 1 เซนติเมตร แล้วนำผลที่ได้จากทั้งสองช่วง มาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความผิดพลาดแบบฮิสเทอรีซิส มีผลการทดลองดังรูปที่ 8-17



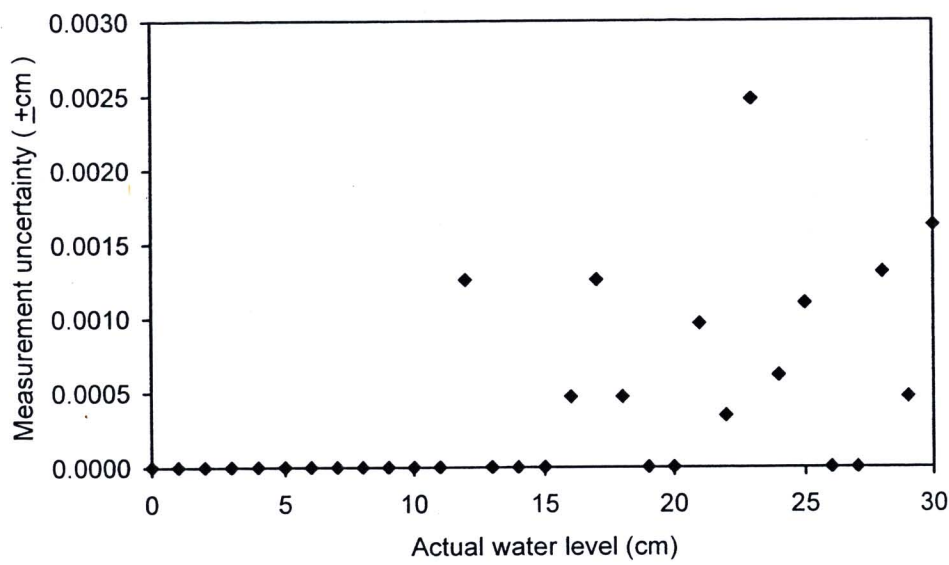
รูปที่ 8-17 ค่าความผิดพลาดแบบฮิสเทอรีซิส เมื่อเซนเซอร์วัดระดับน้ำเพิ่มขึ้น และลดลง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์ในช่วงน้ำเพิ่มขึ้นกับช่วงน้ำลดลงมีความใกล้เคียงกัน โดยมีความแตกต่างกันสูงสุดเท่ากับ 0.54 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำ 15 เซนติเมตร หรือคิดเป็นค่าความผิดพลาด 1.8 %FSO

#### 8.4.5 การทดลองเพื่อหาค่าความไม่แน่นอนในการวัดของเซนเซอร์

##### วิธีการทดลอง

วัดระดับน้ำด้วยเซนเซอร์ ตั้งแต่ระดับ 0-30 เซนติเมตร โดยเพิ่มระดับน้ำครั้งละ 1 เซนติเมตร ทำการทดลองที่ระดับเดียวกันซ้ำกัน 10 ครั้ง แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนการวัด(uncertainty measurement) ที่ระดับต่างๆ มีผลดังรูปที่ 8-18



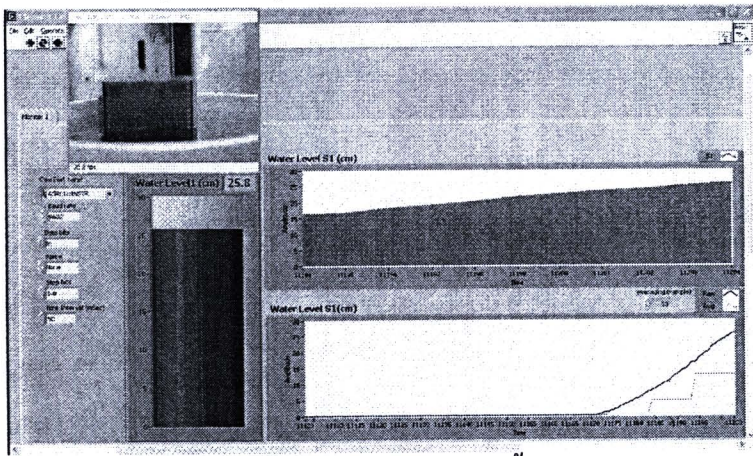
รูปที่ 8-18 ค่าความไม่แน่นอนการวัดของเซนเซอร์ (uncertainty measurement)

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความไม่แน่นอนการวัดจะเริ่มเพิ่มขึ้นเมื่อวัดระดับน้ำมากกว่า 15 เซนติเมตร และระดับน้ำที่มีค่าความไม่แน่นอนการวัดสูงสุดคือ  $\pm 0.0025$  เซนติเมตร ที่ระดับน้ำ 23 เซนติเมตร

8.4.6 การทดลองเพื่อทดสอบผลตอบสนองของเซนเซอร์ เมื่อระดับน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (dynamic response)

วิธีการทดลอง

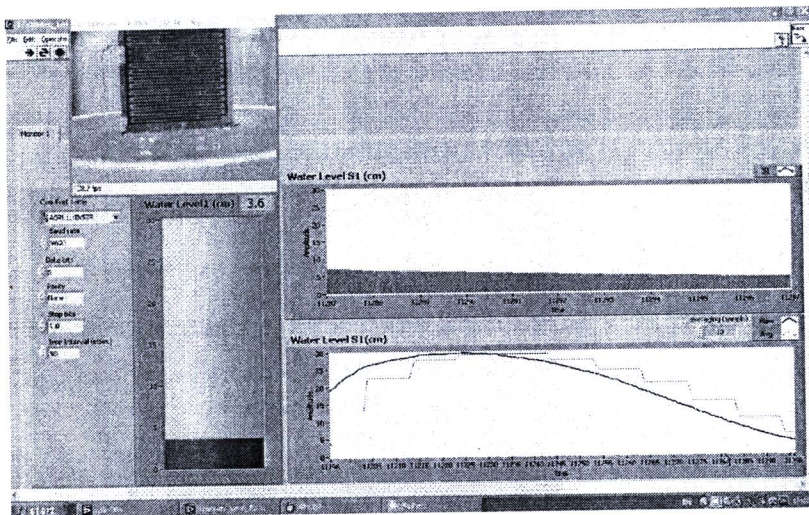
1. นำเซนเซอร์เคลื่อนที่ลงไปในน้ำ 30 เซนติเมตรอย่างทันทีทันใด และวัดระดับน้ำด้วยเซนเซอร์ โดยใช้อัตราสุ่มเก็บข้อมูล 20 sample/sec ดังแสดงในรูปที่ 8-19



รูปที่ 8-19 การนำเซนเซอร์จุ่มลงในน้ำทันทีทันใด

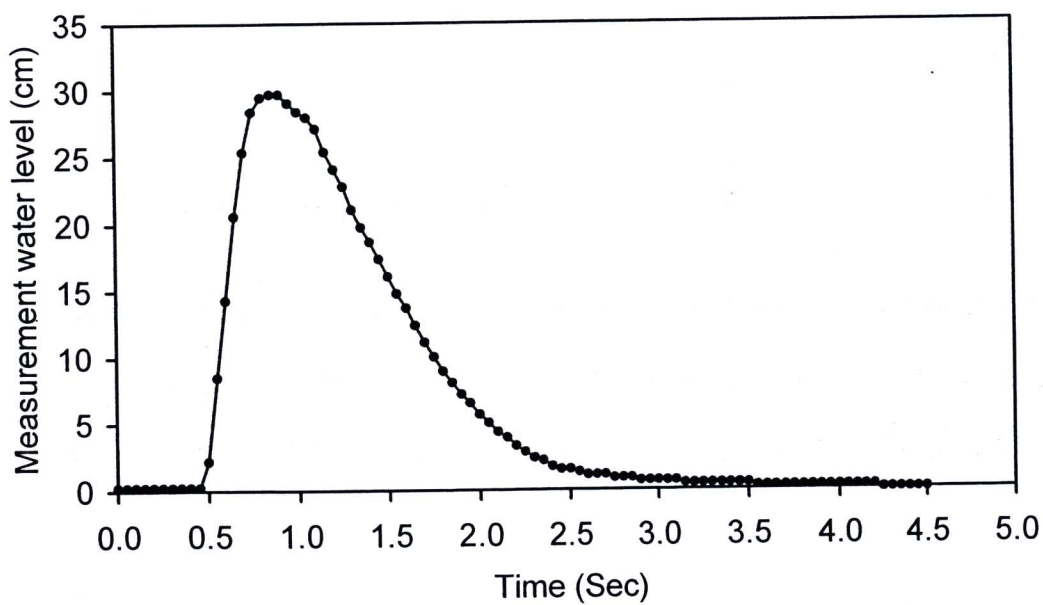


2. หลังจากนั้นนำเซนเซอร์เคลื่อนที่ขึ้นจากน้ำอย่างทันทีทันใด พร้อมวัดระดับน้ำด้วยเซนเซอร์ดังแสดงในรูปที่ 8-20



รูปที่ 8-20 การนำเซนเซอร์เคลื่อนที่ขึ้นจากน้ำอย่างทันทีทันใด

3. นำค่าที่ได้มาพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับระยะเวลา มีผลการทดลองดังรูปที่ 8-21



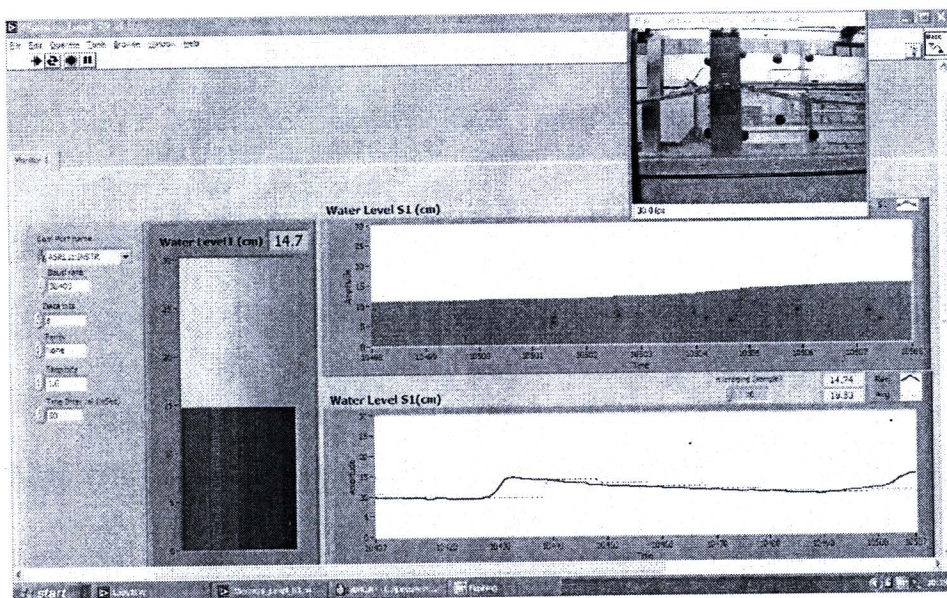
รูปที่ 8-21 ผลทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ เมื่อระดับน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในช่วงระดับน้ำเพิ่มขึ้น เซนเซอร์มีผลตอบสนองที่รวดเร็ว คือ สามารถวัดระดับน้ำเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 ถึง 30 เซนติเมตรภายในระยะเวลาไม่เกิน 500 mSec แต่ในช่วงที่น้ำลงเซนเซอร์กลับมีผลตอบสนองค่อนข้างช้า คือ วัดระดับน้ำลดลงตั้ง 30 เซนติเมตร เหลือ 0 เซนติเมตร ต้องใช้ระยะเวลาไม่น้อยกว่า 3.5 วินาที

#### 8.4.7 การทดลองเพื่อทดสอบผลตอบสนองเชิงเวลาในการวัดระดับน้ำของเซนเซอร์ เมื่อเกิดสถานะน้ำไหลท่วมฉับพลัน

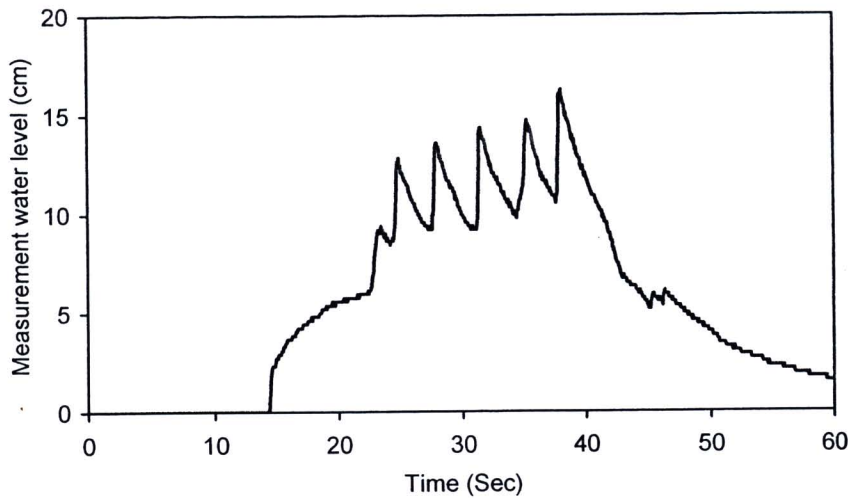
##### วิธีการทดลอง

จำลองสถานะน้ำไหลท่วมฉับพลันในรางเปิด ในห้องปฏิบัติการภาคทฤษฎีวิศวกรรมโยธา โดยติดตั้งเซนเซอร์วัดระดับน้ำในรางน้ำเปิด แล้วให้น้ำไหลผ่านเซนเซอร์ ดังรูปที่ 8-22



รูปที่ 8-22 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับทดสอบสถานะคลื่นน้ำไหลผ่าน

เมื่อระดับน้ำเพิ่มขึ้นถึงระดับ 5 เซนติเมตร จึงทำการสร้างคลื่นน้ำจำนวน 6 ลูก แล้วปล่อยให้ระดับน้ำลดลง มีผลการทดลองดังรูปที่ 8-23



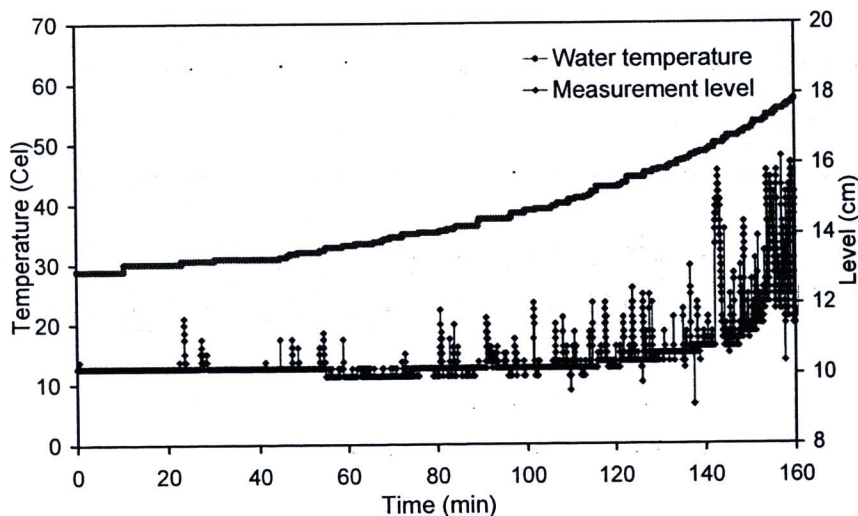
รูปที่ 8-23 ผลการทดสอบผลตอบแทนเชิงเวลาของเซนเซอร์ ในสภาวะน้ำไหลท่วมฉับพลัน

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์สามารถสนองต่อสภาวะน้ำท่วมฉับพลันได้ ทั้งในช่วงของการเริ่มต้นจากที่ระดับ 0 เซนติเมตร และช่วงที่มีระดับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

#### 8.4.8 การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบต่อการระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์ เมื่ออุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลงไป

วิธีการทดลอง

ทำการทดลองโดยกำหนดระดับน้ำ 10 เซนติเมตร แล้วเพิ่มอุณหภูมิของน้ำตั้งแต่ 30 – 60 องศาเซลเซียส บันทึกค่าทุกๆ 1 วินาที มีผลการทดลองดังรูปที่ 8-24



รูปที่ 8-24 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์



ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์ มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และเมื่ออุณหภูมิของน้ำมากกว่า 40 องศาเซลเซียส ระดับน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

#### 8.4.9 การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์ เมื่อวัดระดับน้ำที่ไม่ใช่น้ำบริสุทธิ์

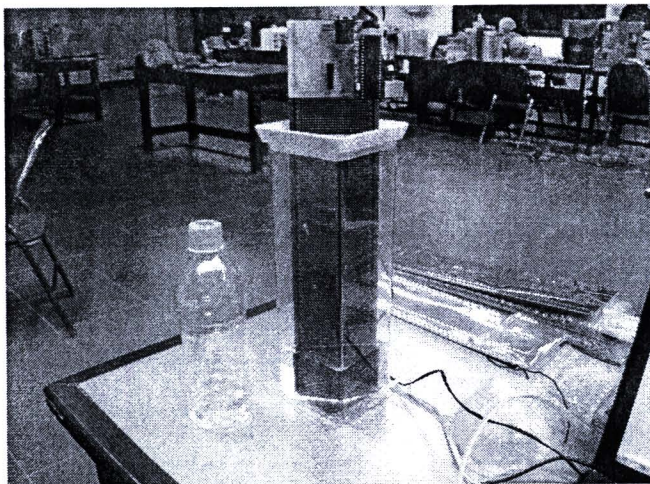
วิธีการทดลอง

1. ทดลองกับน้ำประปา และน้ำที่มีค่า PH ระหว่าง 4 – 9 เพื่อจำลองสภาพน้ำในแหล่งน้ำดังแสดงในรูปที่ 8-25
2. ทดลองกับน้ำ 500 มิลลิลิตร ผสมเกลือแกง 1 ช้อนโต๊ะเพื่อจำลองสภาพน้ำเค็มดังแสดงในรูปที่ 8-26
3. ทดลองกับน้ำอัดลม (Coke) เพื่อจำลองน้ำที่มีส่วนผสมของน้ำตาลและก๊าซ ดังแสดงในรูปที่ 8-27
4. ทดลองกับน้ำมันปาล์ม เพื่อทดสอบของเหลวที่ไม่ใช่น้ำดังแสดงในรูปที่ 8-28
5. กำหนดให้เซนเซอร์อ่านค่าระดับทุกๆ 1 วินาที นานเวลา 1 นาที

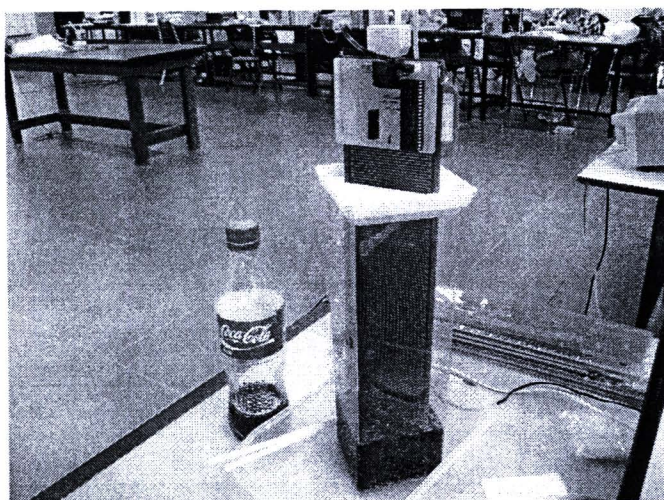


รูปที่ 8-25 น้ำที่มีการสังเคราะห์ค่า PH 4 – PH9 สำหรับใช้ในการทดลอง

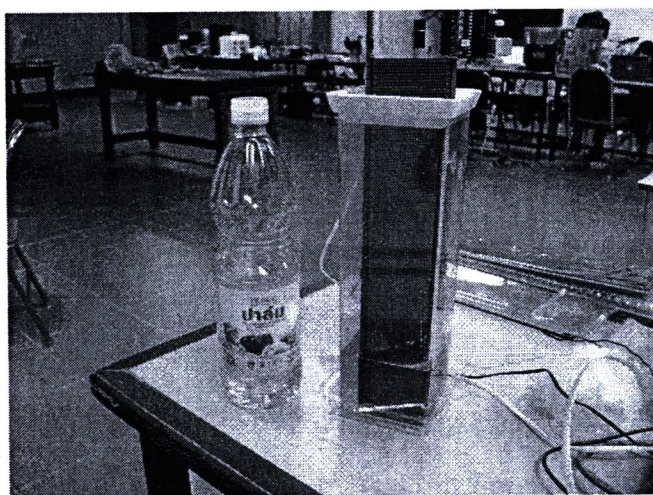




รูปที่ 8-26 การทดลองวัดระดับน้ำเกลือด้วยเซนเซอร์



รูปที่ 8-27 การวัดระดับน้ำอัดลมด้วยเซนเซอร์



รูปที่ 8-28 การวัดระดับน้ำมันปาล์มด้วยเซนเซอร์

ผลการทดลองของการวัดระดับน้ำชนิดต่างๆที่ระดับ 5 เซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 8-1

ตารางที่ 8-1 ผลการทดลองวัดของเหลวชนิดต่างๆ

| ชนิดของเหลว            | ระดับจริง (cm) | ระดับที่วัดได้ (cm) | ค่าความผิดพลาด(cm) |
|------------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| น้ำประปา               | 5              | 4.8                 | 0.2                |
| น้ำ PH 4               | 5              | 4.8                 | 0.2                |
| น้ำ PH 4.5             | 5              | 4.8                 | 0.2                |
| น้ำ PH 5               | 5              | 5.0                 | 0.0                |
| น้ำ PH 5.5             | 5              | 4.8                 | 0.2                |
| น้ำ PH 6               | 5              | 5.0                 | 0.0                |
| น้ำ PH 6.5             | 5              | 4.8                 | 0.2                |
| น้ำ PH 7               | 5              | 4.8                 | 0.2                |
| น้ำ PH 7.5             | 5              | 4.8                 | 0.2                |
| น้ำ PH 8               | 5              | 4.8                 | 0.2                |
| น้ำ PH 8.5             | 5              | 5.0                 | 0.0                |
| น้ำ PH 9               | 5              | 4.8                 | 0.2                |
| น้ำในอ่างเก็บน้ำ       | 5              | 4.8                 | 0.2                |
| น้ำอัดลม (Coke)        | 5              | 4.8                 | 0.2                |
| น้ำผสมเกลือ 1 ช้อนโต๊ะ | 5              | 5.0                 | 0.0                |
| น้ำมันปาล์ม            | 5              | 0.2                 | 4.8                |

ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่า น้ำที่มีค่า PH อยู่ระหว่าง 4 – 9 ไม่ส่งผลต่อค่าระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลเล็กโตรด ในขณะที่ น้ำในอ่างเก็บน้ำ น้ำอัดลม และน้ำเกลือ ก็ไม่ส่งผลต่อค่าระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์เช่นกัน แต่เมื่อใช้เซนเซอร์วัดระดับน้ำมันปาล์มกลับไม่สามารถวัดระดับของน้ำมันปาล์มได้ เนื่องจากน้ำมันปาล์มมีค่าไดอิเล็กตริกต่ำกว่าน้ำ 27 เท่า

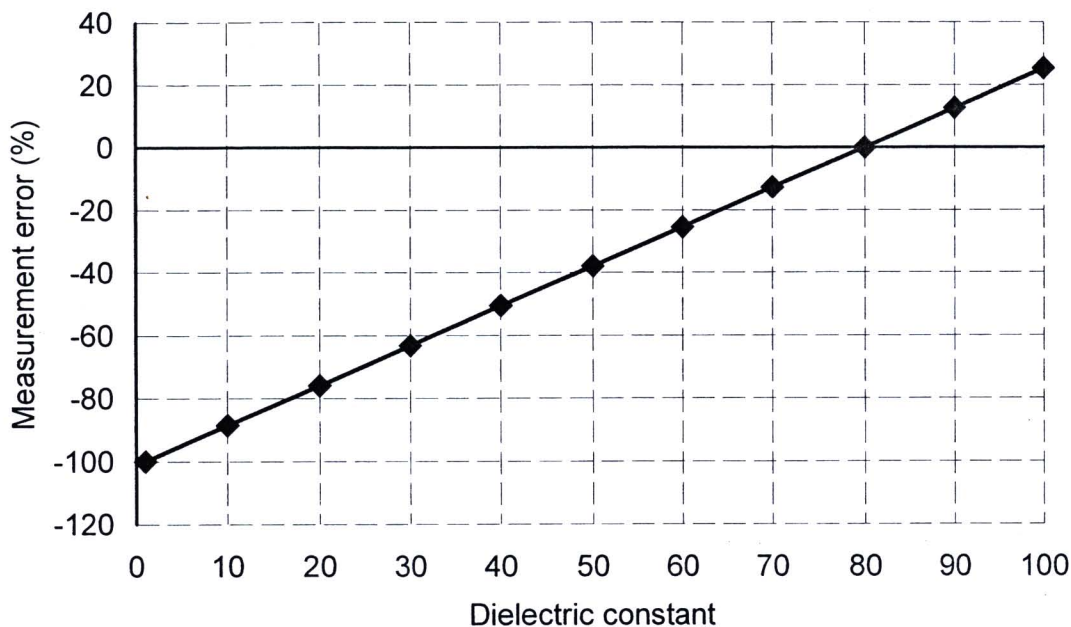
8.4.10 การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์ เมื่อค่าไดอิเล็กตริกของน้ำเปลี่ยนแปลงไป

วิธีการทดลอง

ใช้การจำลองการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโปรแกรม COMSOL โดยกำหนดให้ระดับน้ำคงที่ๆ 10 เซนติเมตร และให้ค่าไดอิเล็กตริกของน้ำเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 1 – 100 ค่าความ



จุลไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม COMSOL จะถูกคำนวณเป็นค่าระดับน้ำ โดยจะใช้ค่าระดับน้ำที่ได้จากการกำหนดค่าไดอิเล็กตริกเท่ากับ 80 เป็นค่าอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบกับค่าระดับที่ได้จากการจำลองค่าไดอิเล็กตริกอื่นๆ มีผลการจำลองดังรูปที่ 8-29



รูปที่ 8-29 ค่าความผิดพลาดจากการวัดด้วยเซนเซอร์ เมื่อค่าไดอิเล็กตริกของน้ำเปลี่ยนแปลงไป

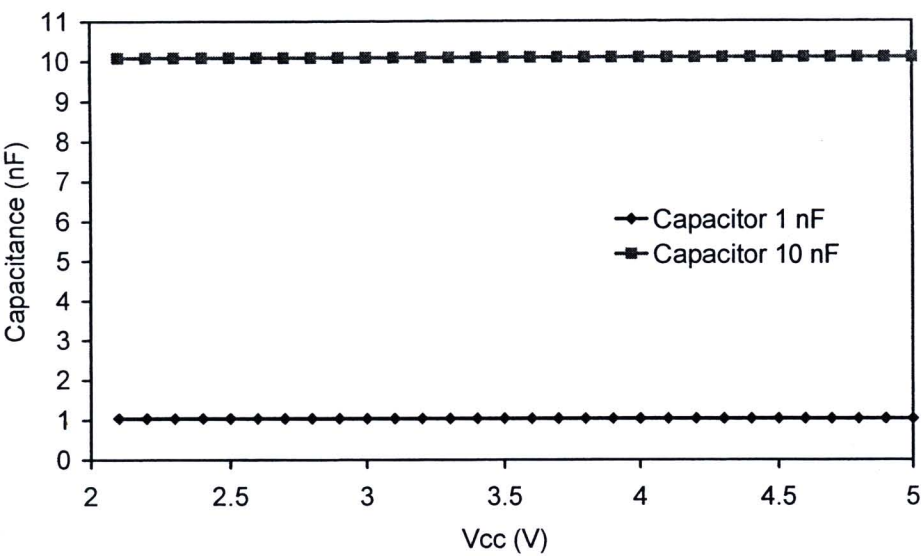
จากรูปที่ 8-29 แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าไดอิเล็กตริกของน้ำเพิ่ม ค่าระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อค่าไดอิเล็กตริกของน้ำลดลงค่าระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์ก็จะมีค่าลดลง อัตราค่าความผิดพลาดของค่าระดับน้ำ ต่อค่าไดอิเล็กตริกของน้ำ มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น

#### 8.4.11 การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าความจุไฟฟ้าที่วัดด้วยวงจรควบคุมการทำงานเมื่อแหล่งจ่ายไฟมีแรงดันไม่คงที่

##### วิธีการทดลอง

ทำการทดลองโดยให้วงจรควบคุมวัดค่าความจุไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุ 1 nF และ 10 nF โดยปรับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายระหว่าง 2.1 – 5 โวลต์ มีผลการทดลองดังรูปที่ 8-30





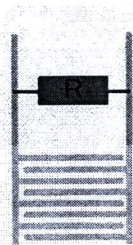
รูปที่ 8-30 ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดด้วยวงจรควบคุมการทำงาน เมื่อแหล่งจ่ายไฟมีระดับแรงดัน 2.1-5 V

จากรูปที่ 8-30 แสดงให้เห็นว่า เมื่อแหล่งจ่ายไฟของวงจรควบคุมการทำงาน มีแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 2.1 – 5 V วงจรควบคุมการทำงานยังคงวัดค่าความจุไฟฟ้าได้เท่าเดิม ดังนั้นระดับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไม่ส่งผลต่อการวัดค่าความจุไฟฟ้าของวงจรควบคุมการทำงาน

**8.4.12 การทดลองเพื่อหาค่าความผิดพลาดจากการวัดระดับน้ำด้วยเซนเซอร์ เมื่อได้รับผลกระทบจากการเสื่อมสภาพความเป็นฉนวนของวัสดุเคลือบผิวทองแดง (solder mask) ซึ่งส่งผลให้ค่าความต้านทานระหว่างขั้วของอิเล็กโตรดลดต่ำลงจนเกิดการลัดวงจรเมื่อสัมผัสกับน้ำ**

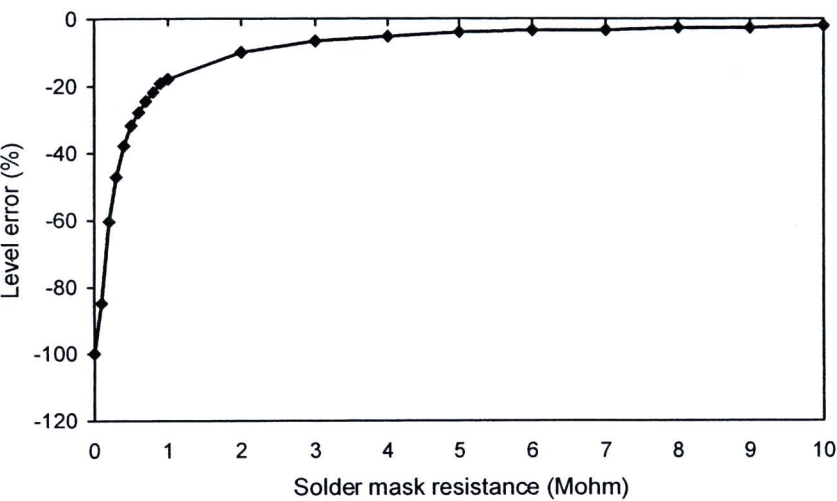
วิธีการทดลอง

จำลองการเสื่อมสภาพฉนวนเคลือบผิวทองแดงด้วยการต่อตัวต้านทานขนานกับอิเล็กโตรดดังรูปที่ 8-31



รูปที่ 8-31 การต่อตัวต้านทานขนานกับอิเล็กโตรด เพื่อจำลองการเสื่อมสภาพฉนวนของผิวเคลือบ

ค่าความต้านทานที่ใช้ในการทดลองมีค่าระหว่าง 0 - 10 MΩ โดยทำการทดลองที่ระดับน้ำคงที่ที่ 30 เซนติเมตร และใช้ระดับน้ำที่ความต้านทานของฉนวนเท่า 100 MΩ เป็นค่าอ้างอิง มีผลการทดลองดังรูปที่ 8-32



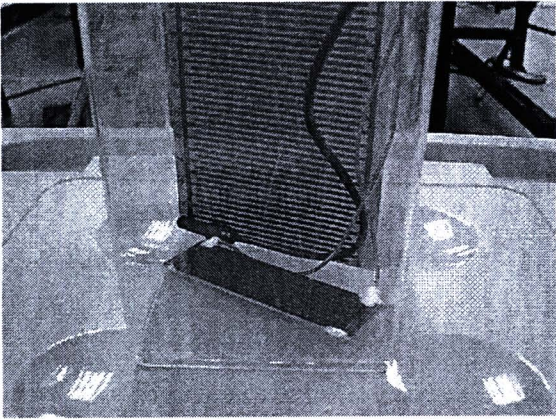
รูปที่ 8-32 ค่าความผิดพลาดจากการวัดด้วยเซนเซอร์ เมื่อเสียสภาพฉนวนเคลือบของอิเล็กทรอนิกส์

ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อฉนวนเคลือบทองแดงของอิเล็กทรอนิกส์มีความต้านทานลดลง จะส่งผลให้ค่าระดับน้ำที่วัดได้จากเซนเซอร์มีความผิดพลาดไปในแนวทางที่น้อยกว่าค่าระดับจริง

8.4.13 การทดลองวิธีชดเชยค่าความผิดพลาดในการวัดระดับน้ำของเซนเซอร์ เมื่อได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้การประมวลผลแบบอัจฉริยะ

วิธีการทดลอง

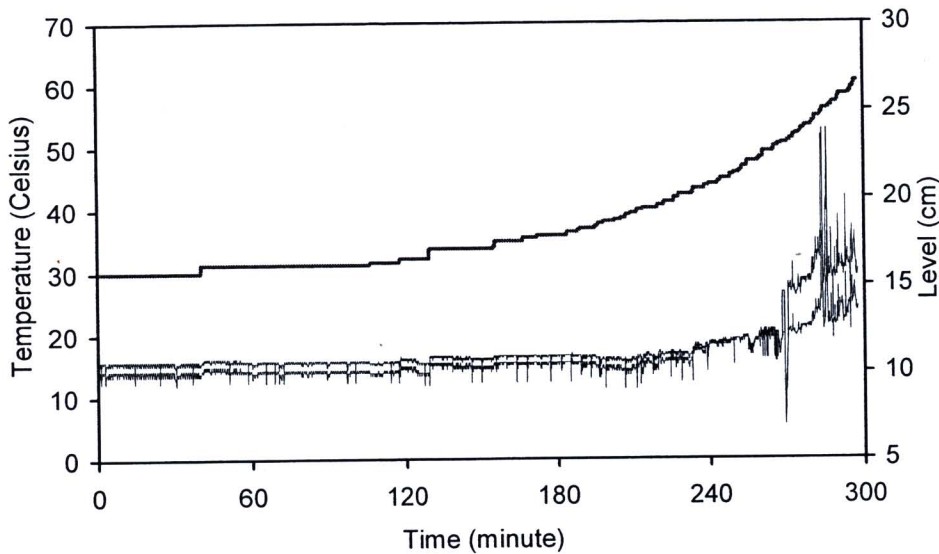
- 1. กำหนดขนาดของอิเล็กทรอนิกส์อ้างอิงมีค่าเท่ากับ 2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 8-33



รูปที่ 8-33 อิเล็กทรอนิกส์อ้างอิงที่มีความยาว 2 เซนติเมตร

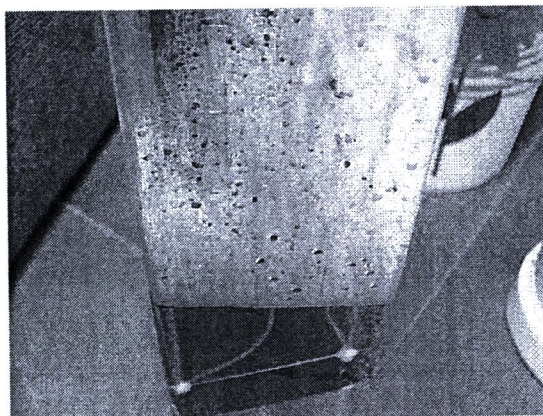


2. กำหนดค่าระดับน้ำจริงที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่า 10 เซนติเมตร แล้วเพิ่มอุณหภูมิของน้ำตั้งแต่ 30 – 60 องศาเซลเซียส บันทึกค่าอุณหภูมิและระดับน้ำที่ผ่านการประมวลผลแบบอัจฉริยะแล้ว เก็บค่าระดับน้ำและอุณหภูมิทุกๆ 1 วินาที มีผลการทดลองดังรูปที่ 8-34



รูปที่ 8-34 อุณหภูมิน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าระดับน้ำที่ผ่านการประมวลผลอัจฉริยะเพียงเล็กน้อย

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิของน้ำน้อยกว่า 40 องศาเซลเซียส ค่าระดับน้ำที่ผ่านระบบประมวลผลอัจฉริยะ (เส้นล่างสุด) จะมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่าค่าระดับที่วัดด้วยวิธีการปกติ แต่เมื่ออุณหภูมิของน้ำมากกว่า 40 องศา ระบบประมวลผลอัจฉริยะกลับไม่สามารถลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ สาเหตุเนื่องมาจากเมื่อน้ำมีอุณหภูมิมากกว่า 40 องศาเซลเซียส จะเกิดไอน้ำระเหยไปเกาะที่เซนเซอร์ดังรูปที่ 8-35 ซึ่งอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งแช่อยู่ในน้ำไม่สามารถรับรู้สถานการณ์ดังกล่าวได้ ระบบประมวลผลจึงไม่มีข้อมูลมาชดเชยค่าความผิดพลาดที่เกิดจากไอน้ำ ดังนั้นค่าระดับน้ำที่วัดได้จากเซนเซอร์จึงยังคงมีความผิดพลาดจากระดับน้ำจริง

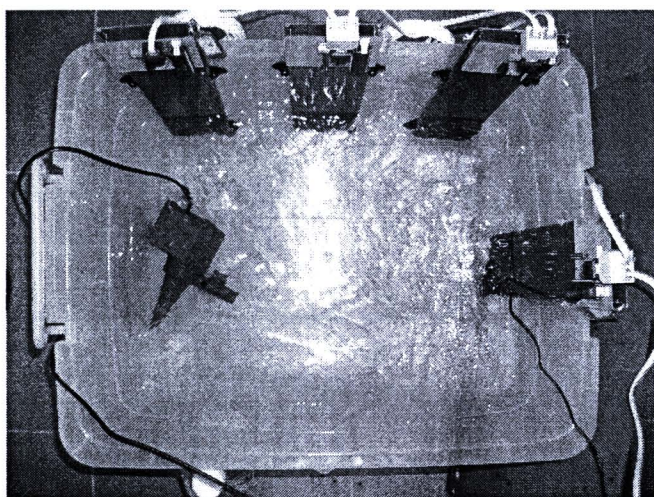


รูปที่ 8-35 ไอน้ำที่เกิดขึ้น เมื่อน้ำเริ่มมีอุณหภูมิมากกว่า 40 องศาเซลเซียส

#### 8.4.14 การทดลองวิธีลดค่าความผิดพลาดในการวัดระดับน้ำของเซนเซอร์ เมื่อได้รับผลกระทบจากการกระเพื่อมของผิวน้ำ โดยการใช้วิธีหาค่าเฉลี่ย

##### วิธีการทดลอง

ทำการทดลองในถังน้ำ โดยใช้ระดับน้ำ 10 เซนติเมตรเป็นระดับน้ำอ้างอิงในการทดลอง และใช้ปั้มน้ำขับเคลื่อนน้ำเพื่อจำลองสภาพการไหลดังแสดงในรูปที่ 8-36 และผลจากขับเคลื่อนน้ำทำให้เกิดกระเพื่อมที่ผิวของน้ำดังในรูปที่ 8-37 กำหนดให้เซนเซอร์วัดระดับน้ำ ทุกๆ 1 วินาที เป็นระยะเวลา 10 นาที แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยแบบต่างๆ



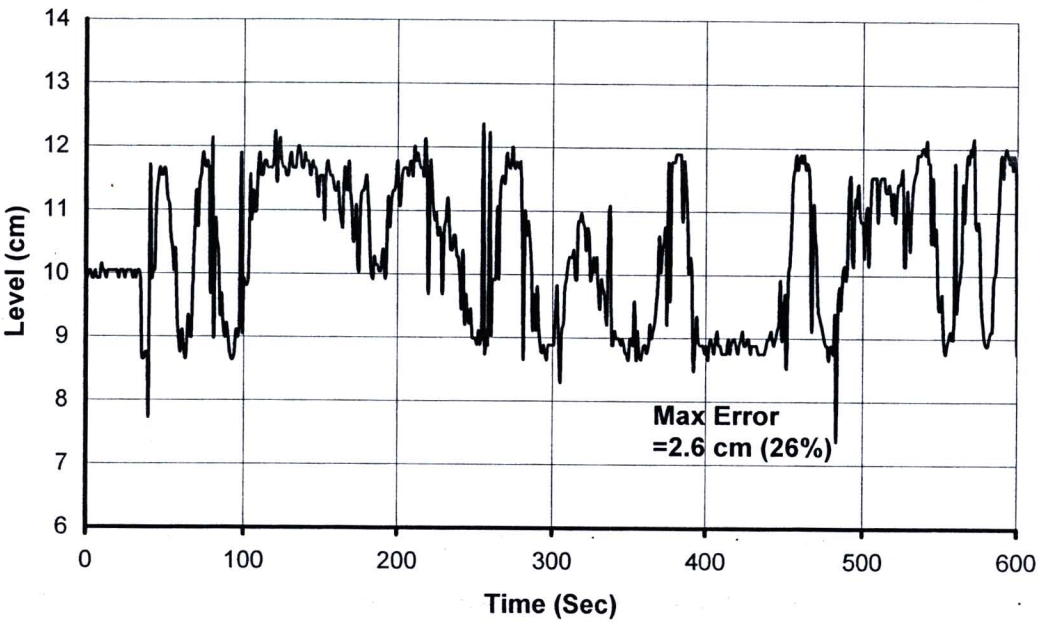
รูปที่ 8-36 การจำลองสภาพการไหลของน้ำด้วยปั้มน้ำ



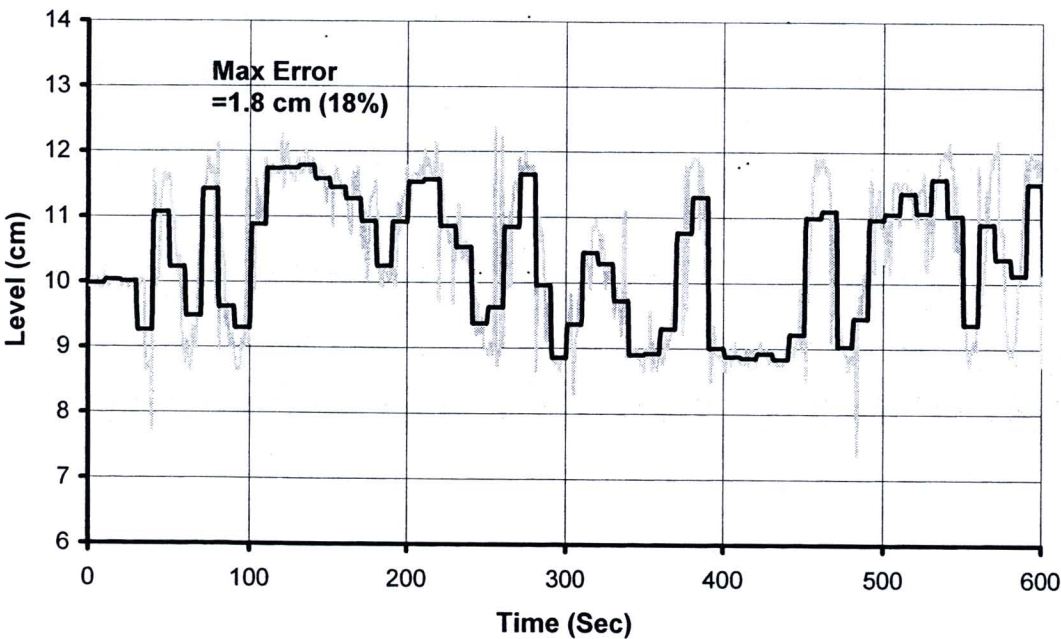
รูปที่ 8-37 การกระเพื่อมของน้ำที่เกิดจากการจำลองการไหลด้วยปั้มน้ำ



ผลการทดลองที่ได้จากการวัดระดับน้ำในสภาวะที่จำลองการไหลแสดงได้ดังในรูปที่ 8-38 เมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยของระดับน้ำที่วัดได้จากเซนเซอร์ ในช่วงเวลา 10 วินาที 60 วินาที และ 600 วินาที แสดงได้ดังในรูปที่ 8-39, 8-40 และ 8-41 ตามลำดับ

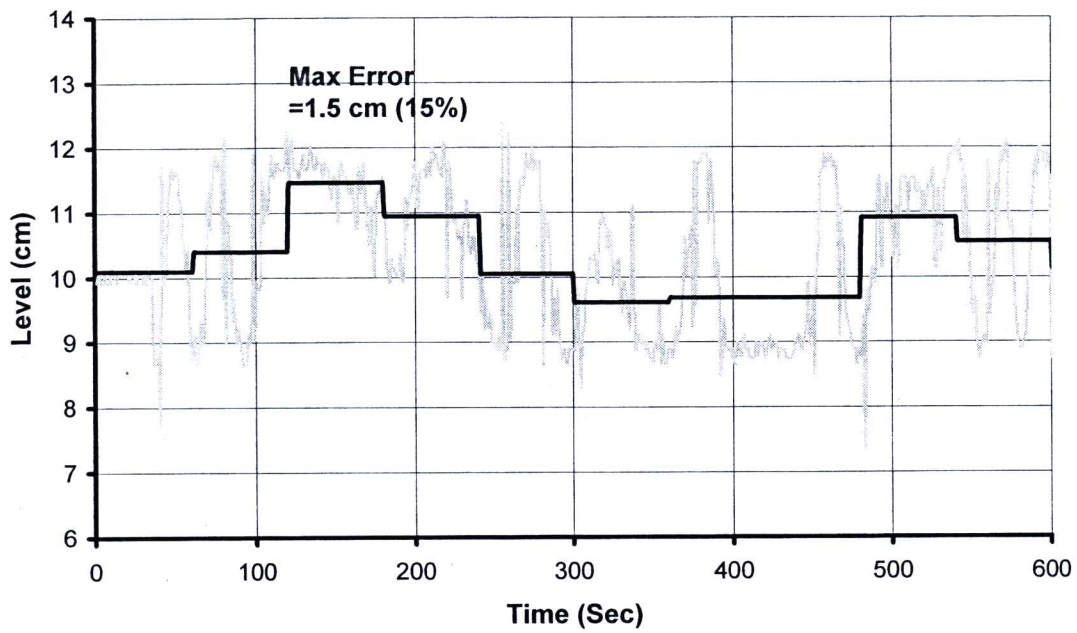


รูปที่ 8-38 ผลการวัดระดับน้ำด้วยหัววัด ในสภาวะที่มีการจำลองการไหลของน้ำ

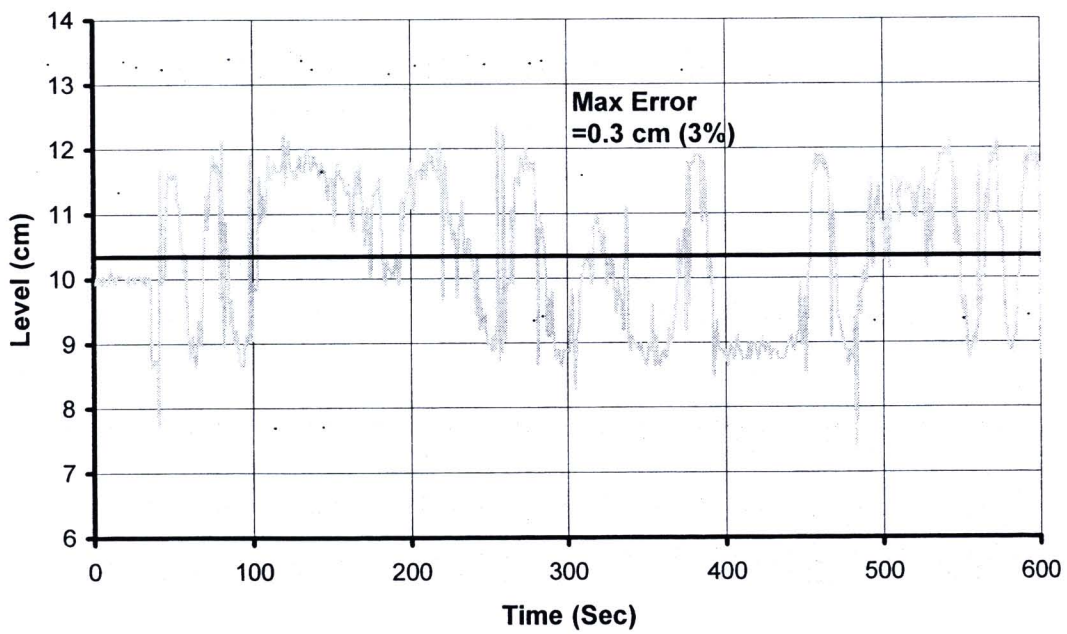


รูปที่ 8-39 ผลการเฉลี่ยค่าระดับน้ำที่วัดได้จากหัววัดทุก 10 วินาที





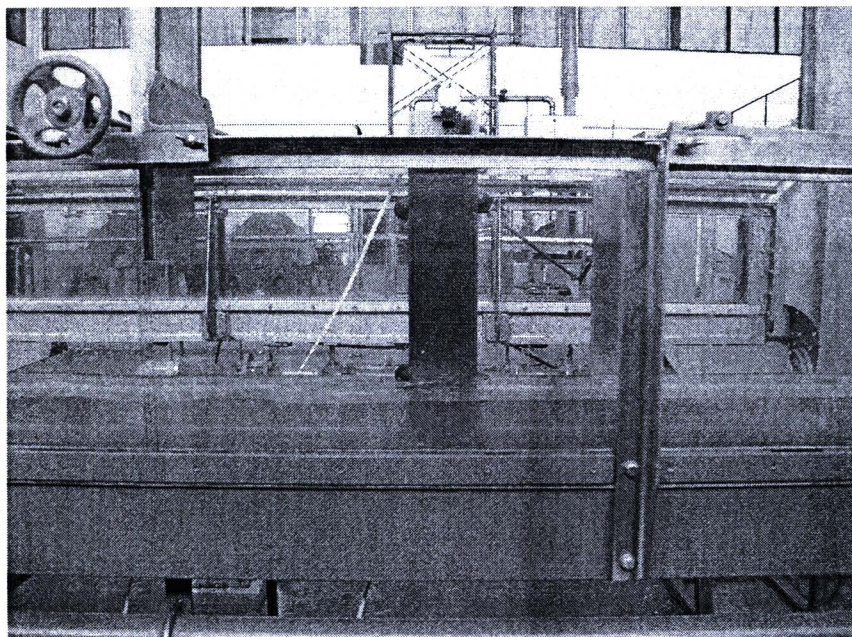
รูปที่ 8-40 ผลการเฉลี่ยค่าระดับน้ำที่วัดได้จากหัววัดทุก 60 วินาที



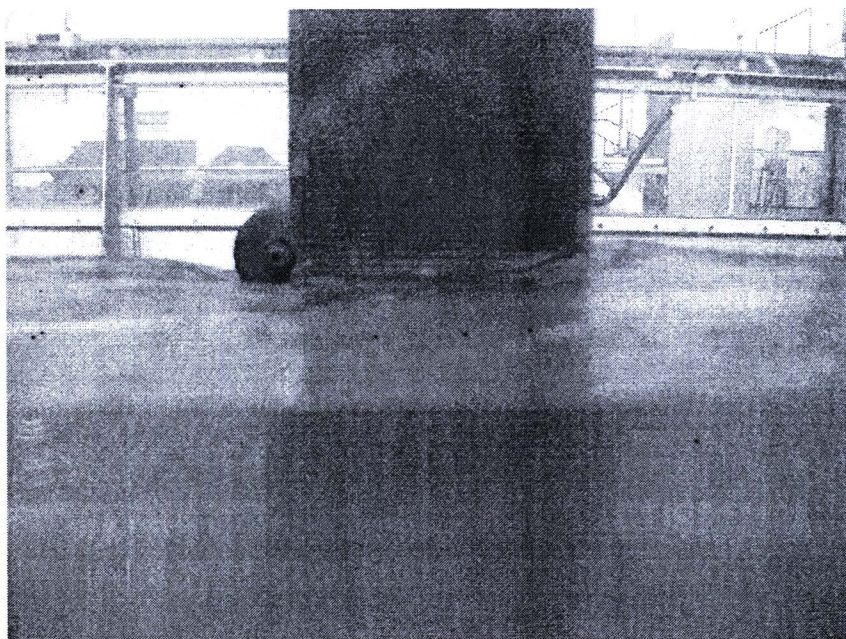
รูปที่ 8-41 ผลการเฉลี่ยค่าระดับน้ำที่วัดได้จากหัววัดใน 600 วินาที







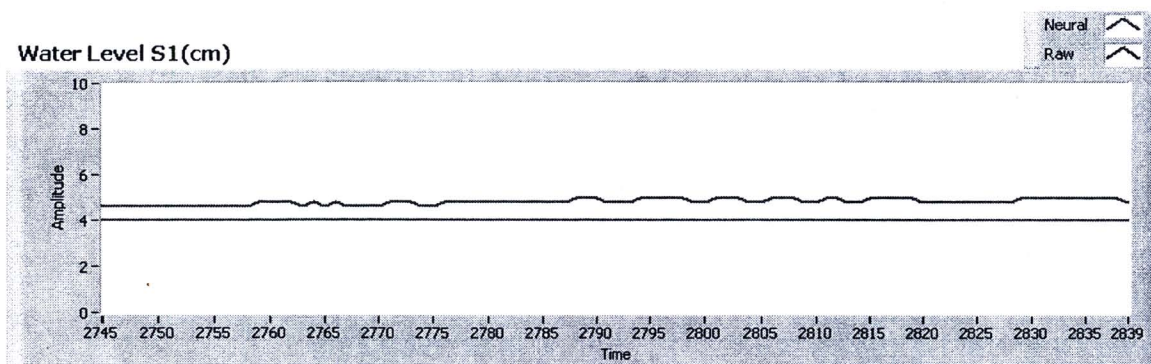
รูปที่ 8-43 การจำลองสภาพการไหลแบบเปลี่ยนแปลงช้าในรางเปิดของภาควิชาวิศวกรรมโยธา



รูปที่ 8-44 ลักษณะการกระเพื่อมของน้ำที่ไหลผ่านเซนเซอร์

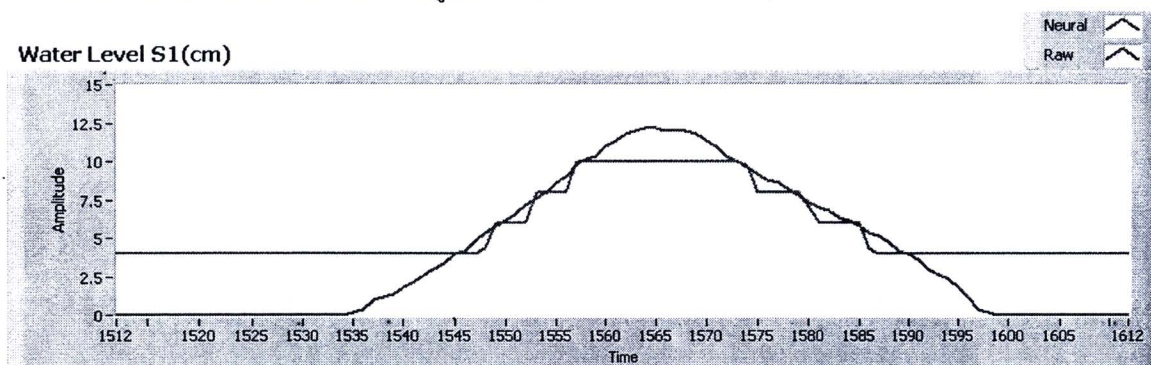


เปรียบเทียบระดับน้ำที่วัดจริง กับระดับน้ำที่ผ่าน โครงข่ายประสาทเทียม มีผลการทดลองดังรูปที่ 8-45



รูปที่ 8-45 ระดับน้ำที่วัดจริง (บน) เปรียบเทียบกับระดับน้ำที่ผ่าน โครงข่ายประสาทเทียม (ล่าง)

3. ทดลองวัดระดับน้ำที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 ถึง 12.5 เซนติเมตร และลดระดับตั้งแต่ 12.5 ถึง 0 เซนติเมตรเปรียบเทียบระดับน้ำที่วัดได้จริงจากเซนเซอร์ กับระดับน้ำที่ผ่าน โครงข่ายประสาทเทียมแล้ว มีผลการทดลองดังรูปที่ 8-46



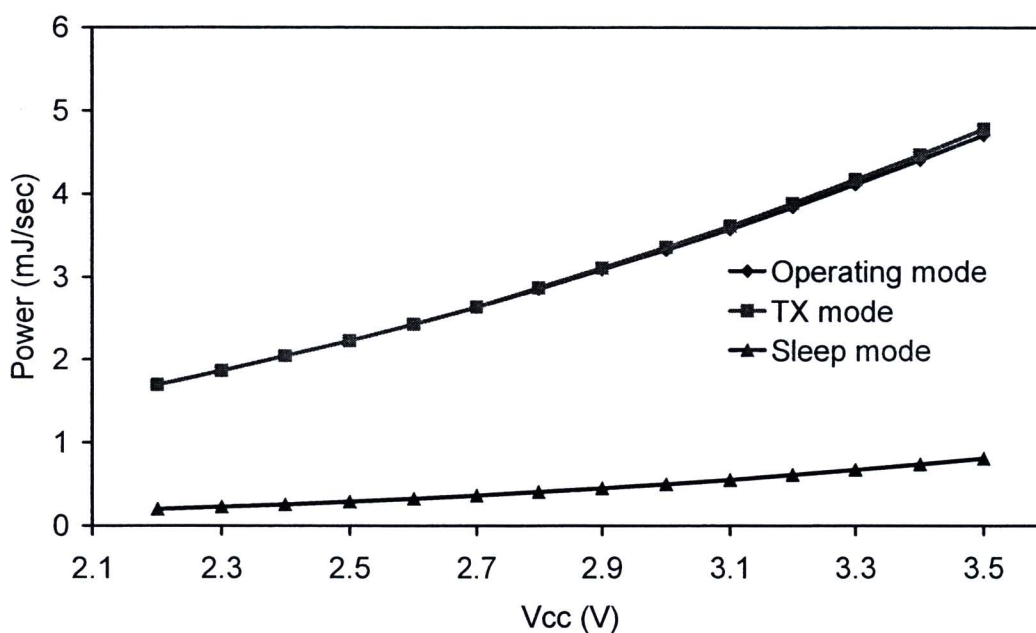
รูปที่ 8-46 ค่าระดับน้ำที่วัดจริง (บน) เปรียบเทียบกับค่าระดับน้ำที่ผ่าน โครงข่ายประสาทเทียม

ผลการทดลองพบว่า การใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) สามารถลดค่าการกระเพื่อมของน้ำได้จริง ดังรูปที่ 8-45 แต่ก็ต้องสูญเสียความละเอียดในการวัดของเซนเซอร์ไปด้วย (Resolution) ดังรูปที่ 8-46 เนื่องจากในการสอนโครงข่าย เราต้องใช้เอาต์พุตเป้าหมายจากค่าระดับจริง ซึ่งในที่นี้คือค่าระดับ 4, 6, 8 และ 10 เซนติเมตร ทำให้ค่าเอาต์พุตที่ได้จากโครงข่ายจะถูกจำกัดที่ระดับ 4, 6, 8 และ 10 เซนติเมตรด้วยเช่นกัน

#### 8.4.16 การทดลองเพื่อหาอัตราการใช้พลังงานของเซนเซอร์

##### วิธีการทดลอง

วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเซนเซอร์เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 2.2-3.5 โวลต์ โดยทำการวัดในโหมดการทำงานของวงจรควบคุมการทำงาน 3 โหมด คือ โหมดทำงานปกติ (Operating mode) , โหมดส่งข้อมูล (TX mode) และ โหมดหยุดพัก (Sleep mode) มีระดับน้ำจริงขณะทดลองเท่ากับ 30 เซนติเมตร จากนั้นนำผลของกระแสและแรงดันที่ได้ มาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละโหมด มีผลการทดลองดังรูปที่ 8-47



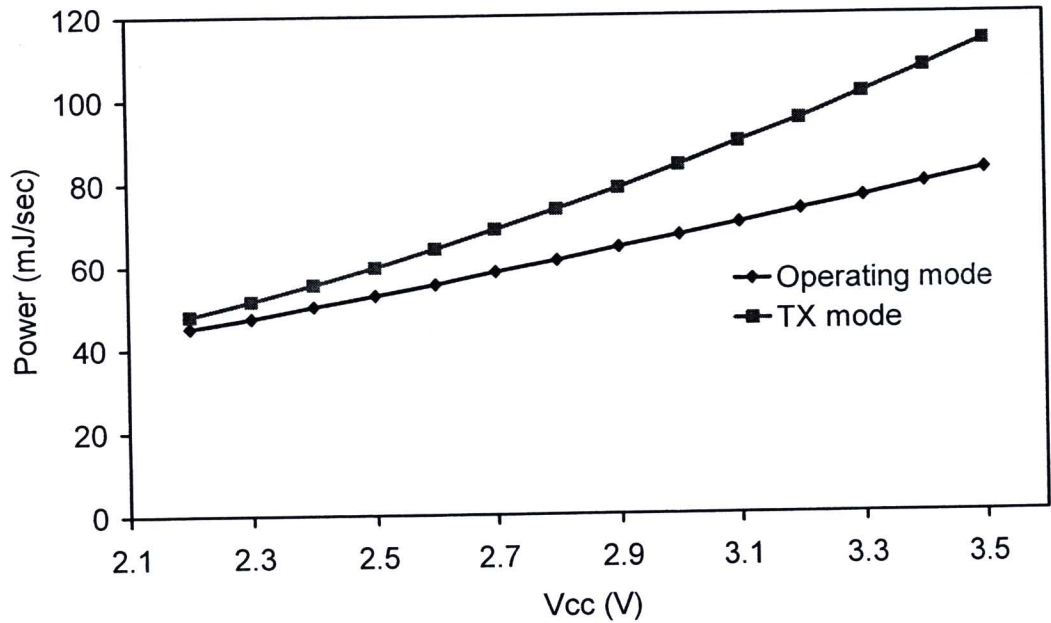
รูปที่ 8-47 อัตราการใช้พลังงานของเซนเซอร์ในแต่ละโหมด ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์มีอัตราการใช้พลังงานที่สอดคล้องกับระดับแรงดันของแหล่งจ่าย คือ การอัตราการใช้พลังงานของเซนเซอร์แปรผันตรงกับแหล่งจ่าย แต่มีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่ระดับแรงดัน 3.5 โวลต์ ซึ่งเป็นแรงดันสูงสุดสำหรับการทดลองนี้ เซนเซอร์ใช้พลังงานในโหมดทำงานปกติ (Operating mode) และโหมดส่งข้อมูล (TX mode) ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 4.7 mJ/Sec และในโหมดหยุดพัก (Sleep mode) เซนเซอร์ใช้พลังงาน 0.805 mJ/Sec ส่วนที่ระดับแรงดัน 2.2 โวลต์ซึ่งเป็นแรงดันต่ำสุดสำหรับการทดลองนี้ เซนเซอร์ใช้พลังงานในโหมดปกติ และโหมดส่งข้อมูลเท่ากัน คือ 1.694 mJ/Sec และในโหมดหยุดพักเซนเซอร์ใช้พลังงาน 0.198 mJ/Sec

8.4.17 การทดลองเพื่อหาอัตราการใช้พลังงานของเซนเซอร์เมื่อต่อใช้งานร่วมกับโมดูล  
เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย U-node Ver.2

วิธีการทดลอง

วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเซนเซอร์และโมดูลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย U-node Ver.2 เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 2.2-3.5 โวลต์ โดยทำการวัดในโหมดการทำงานของวงจรควบคุมการทำงาน 2 โหมด คือ โหมดทำงานปกติ (Operating mode) และโหมดส่งข้อมูล (TX mode) มีระดับน้ำขณะทดลองเท่ากับ 30 เซนติเมตร ผลการเชื่อมต่อระหว่างตัวรับและตัวส่ง อยู่ในสถานะเชื่อมต่อกันสมบูรณ์ จากนั้นนำผลของกระแสและแรงดันที่ได้ มาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละโหมด มีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 8-48



รูปที่ 8-48 อัตราการใช้พลังงานของเซนเซอร์ เมื่อต่อใช้งานร่วมกับโมดูลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

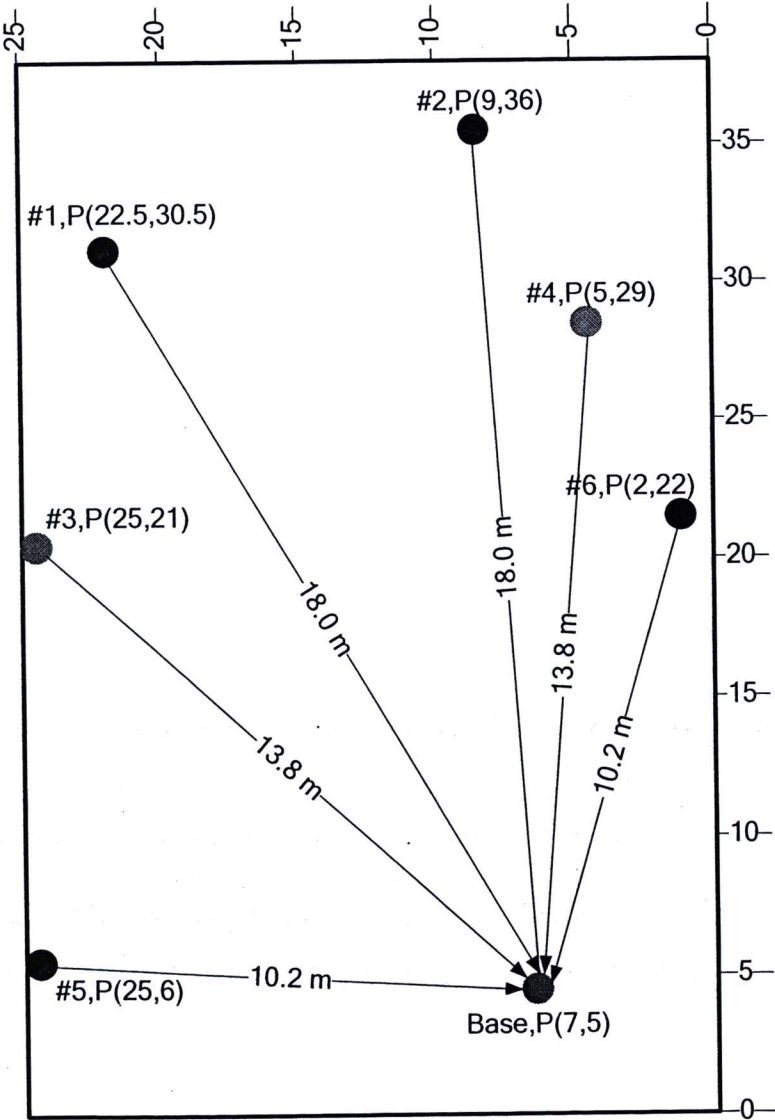
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโมดูลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายมีอัตราการใช้พลังงานที่สอดคล้องกับระดับแรงดันของแหล่งจ่าย คือ การใช้พลังงานของโมดูลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายแปรผันตรงกับแหล่งจ่าย แต่มีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่ระดับแรงดัน 3.5 โวลต์ ซึ่งเป็นแรงดันสูงสุดสำหรับการทดลองนี้โมดูลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายใช้พลังงานในโหมดปกติ 82.3 mJ/Sec และโหมดส่งข้อมูล 113.4 mJ/Sec ที่ระดับแรงดัน 2.2 โวลต์ เซนเซอร์ใช้พลังงานในโหมดปกติ 45.1 mJ/Sec และโหมดส่งข้อมูล 48 mJ/Sec



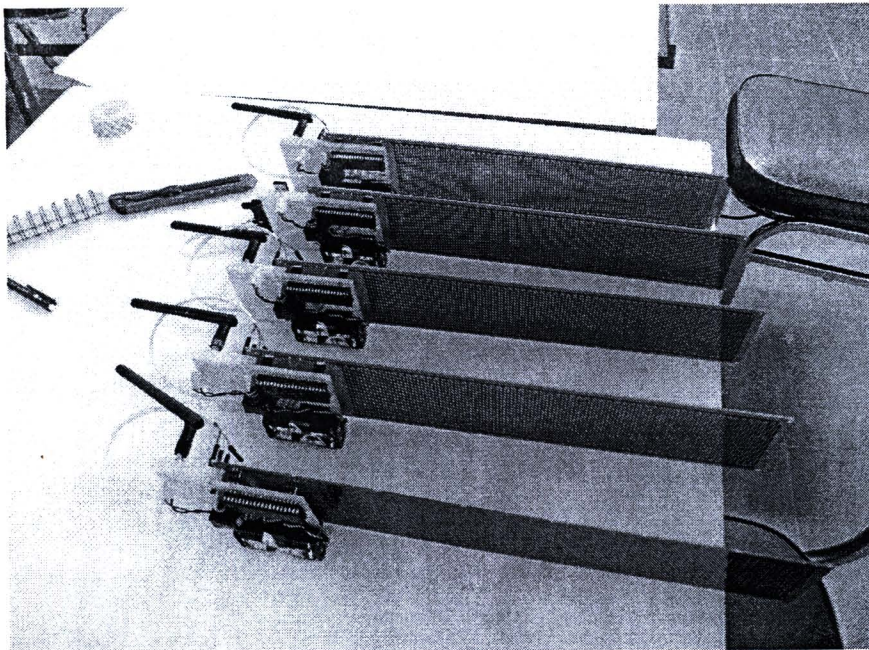
8.4.18 การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลของเซนเซอร์เมื่อต่อใช้งานร่วมกับ  
โมดูลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย U-node Ver.2

วิธีการทดลอง

กำหนดให้เซนเซอร์วางการกระจายในพื้นที่อาคาร ขนาดกว้าง 25 เมตร ยาว 38 เมตร ในตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 8-49 โดยเซนเซอร์ทั้งหมดจะส่งข้อมูลระดับน้ำเข้ามาที่สถานีฐาน (base station) ในทุกๆ 10 นาที โดยแหล่งพลังงานจากใช้แบตเตอรี่ชนิด Alkaline ยี่ห้อ Panasonic รุ่น Pro power LR6PPG ขนาด 1.5 โวลต์ จำนวน 2 ก้อนต่ออนุกรมกัน มีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 8-2.



รูปที่ 8-49 ตำแหน่งการวางเซนเซอร์โหนดในการทดลอง

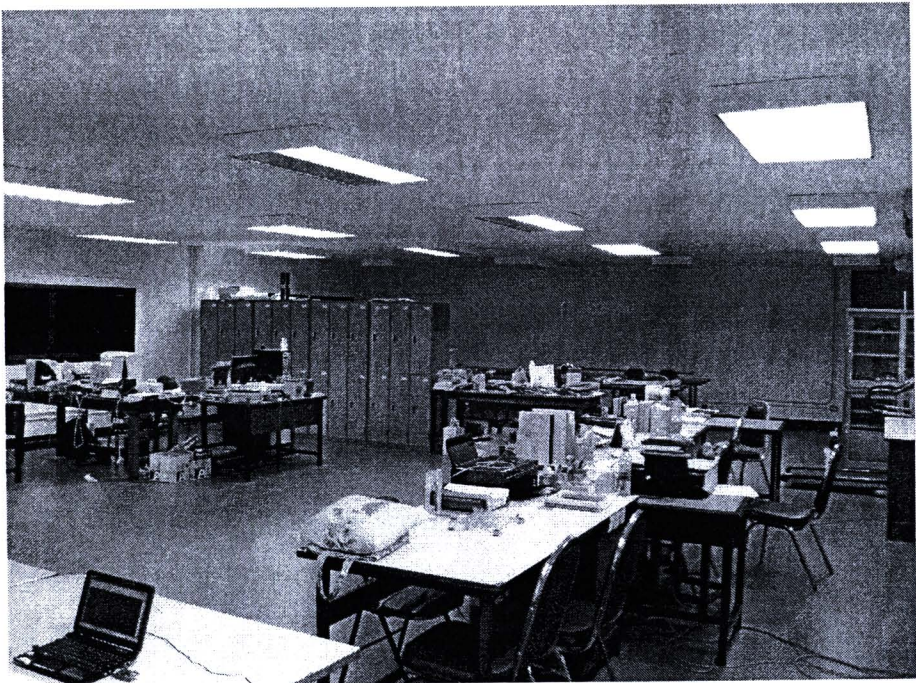


รูปที่ 8-50 การประกอบเซนเซอร์วัดระดับน้ำเข้ากับ โมดูลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย



รูปที่ 8-51 การจำลองการวัดระดับน้ำ โดยส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย





รูปที่ 8-52 สถานที่ทดสอบประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลไร้สาย

ตารางที่ 8-2 ผลการทดลองประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลของเซนเซอร์โหนดที่ตำแหน่งต่างๆ

| Sensor No. | ผลการรับส่งข้อมูล |                   | ประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูล |
|------------|-------------------|-------------------|----------------------------|
|            | สำเร็จ (ครั้ง)    | ไม่สำเร็จ (ครั้ง) | สำเร็จ / ไม่สำเร็จ (%)     |
| #1         | 184               | 178               | 51                         |
| #2         | 174               | 119               | 59                         |
| #3         | 178               | 183               | 49                         |
| #4         | 183               | 178               | 51                         |
| #5         | 174               | 118               | 60                         |
| #6         | 176               | 117               | 60                         |
| ค่าเฉลี่ย  |                   |                   | 55                         |