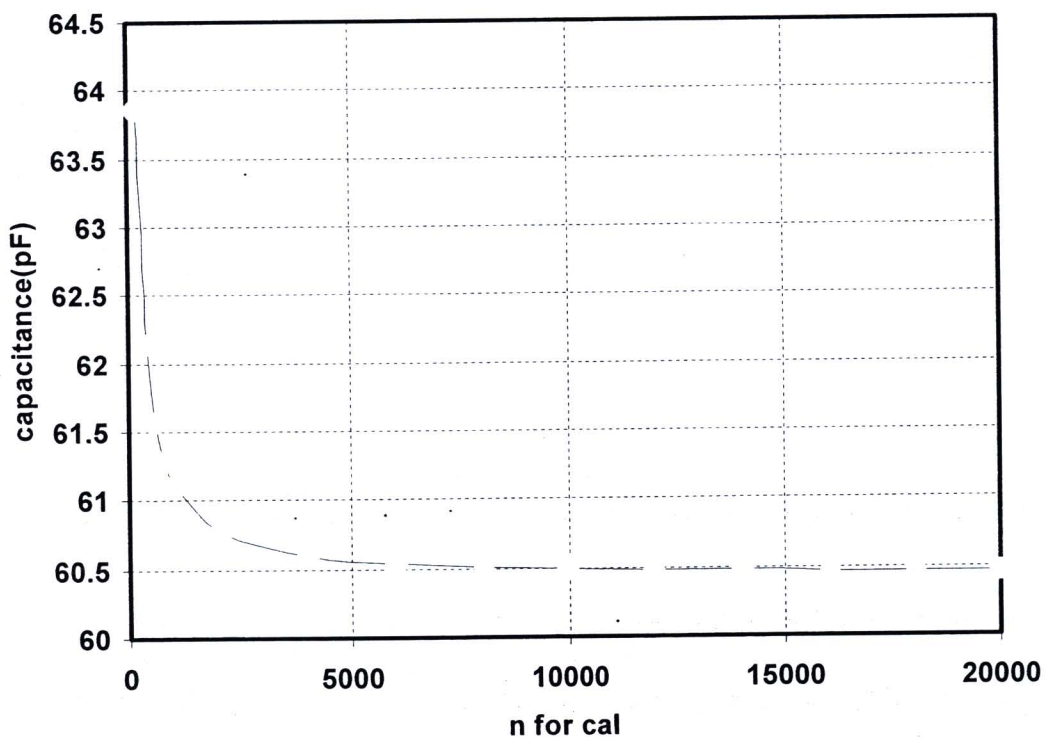


บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ศึกษาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าจำนวน n ที่เหมาะสม เมื่อกำหนดให้แผ่นอิเล็กโทรดของแบบกึ่งทรงกระบอกมีรัศมีเท่ากับ 0.0315 เมตร และมีช่องว่างน้อยที่สุดเท่ากับ 0.025 เมตร และมีความหนาของวัสดุที่ใช้ติดแผ่นอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.005 เมตร เมื่อแบ่งแผ่นอิเล็กโทรด 2 แผ่นที่อยู่ในรูปกึ่งทรงกระบอกของตัวเก็บประจุให้เป็นจำนวน 200 ถึง 20,000 แผ่น ผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม MATLAB ที่ระดับน้ำ 0.09 เมตร แสดงรูปที่ 4 -1



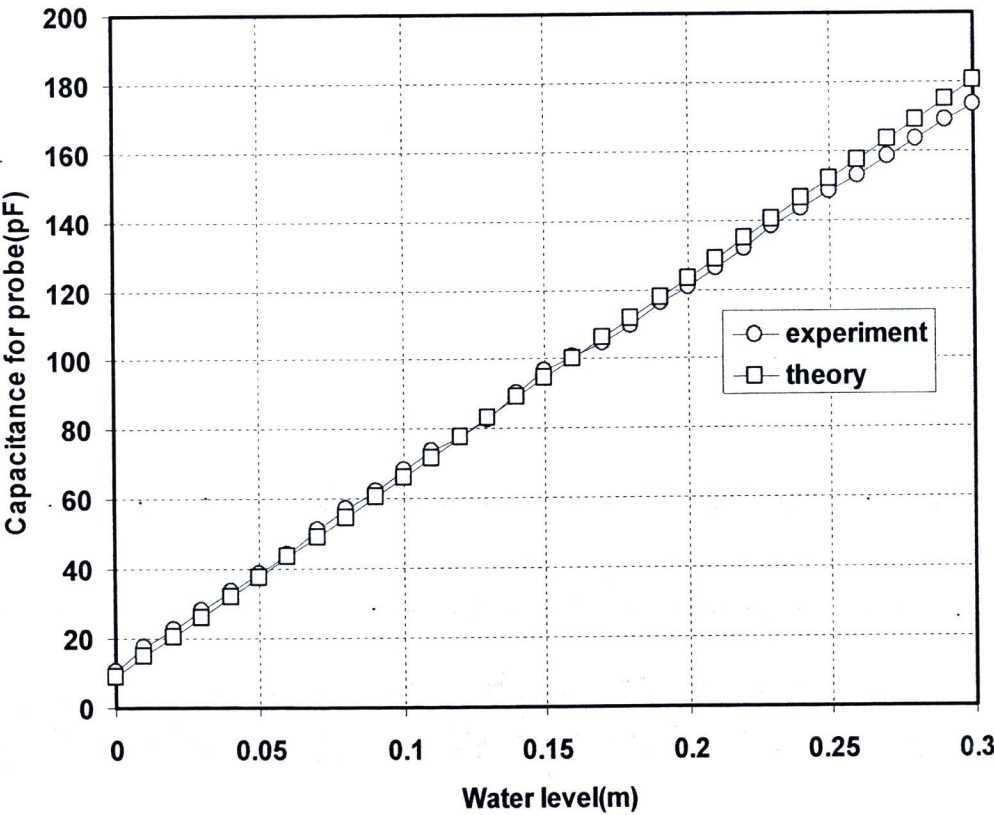
รูปที่ 4 -1 ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณเมื่อ n แตกต่างกัน

4.2 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลว

ทำการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง ของเหลวที่ใช้ในการทดลองคือน้ำ

4.2.1 เปรียบเทียบความจุไฟฟ้าจากการคำนวณกับการวัดโดยตรง

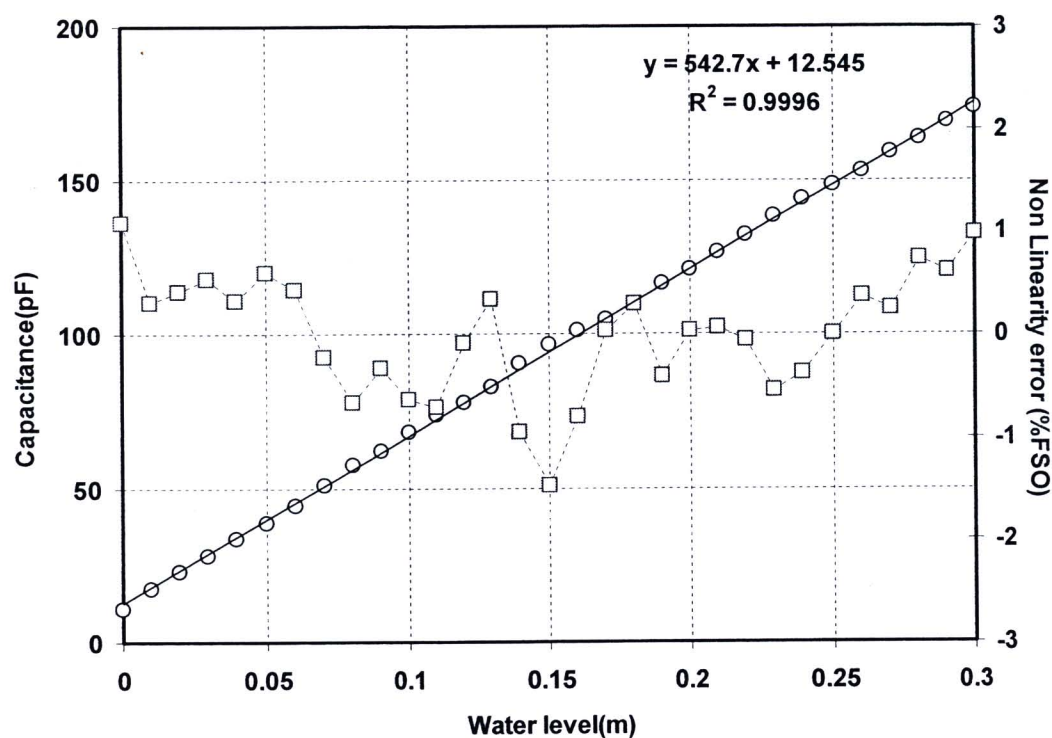
เมื่อกำหนดเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นอิเล็กโตรดเท่ากับ 0.30 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.025 เมตร วัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัด LCR ยี่ห้อ Aligent รุ่น 4284A ความถี่คงที่ 1 kHz แรงดันไฟฟ้ากระตุ้น 2 V เปรียบเทียบกับผลการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าโดยสมการที่ 2-12 เมื่อกำหนดให้ n เป็นจำนวนของแผ่นโลหะที่ถูกแบ่งย่อยเท่ากับ 10,000 ชั้น ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้แปรผันตรงกับค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนไปโดยจะอยู่ในช่วงพิโคฟารัด(pF) ดังรูปที่ 4-2 พบว่าค่าที่ได้จากผลการทดลองจะมีค่ามากกว่าจากการคำนวณเนื่องมาจากค่าความจุไฟฟ้าแฝง



รูปที่ 4-2 ผลเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณกับการวัดโดยตรง

4.2.2 ค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

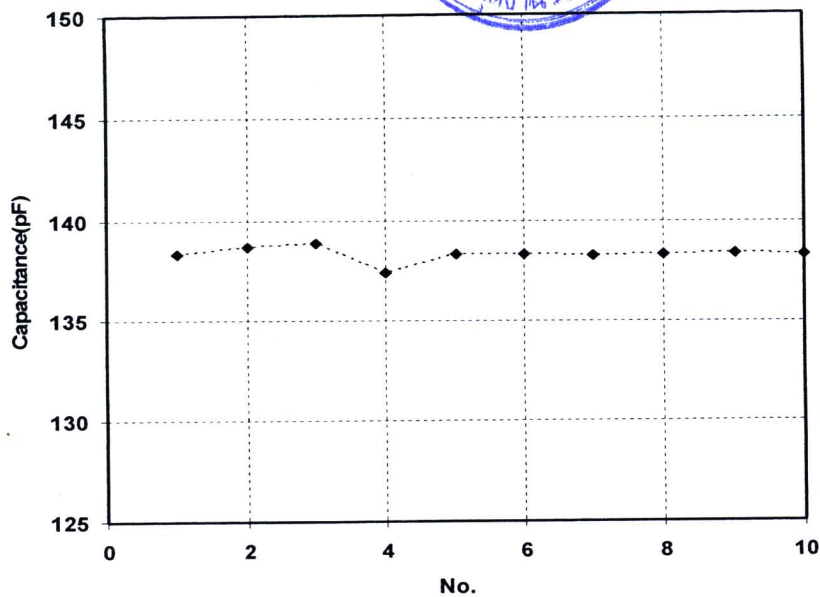
วัดความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.30 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.025 เมตร ค่าที่ได้จะแปรผันตรงกับค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนไป โดยค่าความจุไฟฟ้าอยู่ในช่วงพิโคฟารัด (pF) แสดงคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นรูปที่ 4 -3 และคำนวณผลค่าความไม่เป็นเชิงเส้นได้ค่าเป็น 1.4 % FSO



รูปที่ 4 -3 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและค่าผิดพลาด
เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นกับระดับน้ำ

4.2.3 ค่าความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

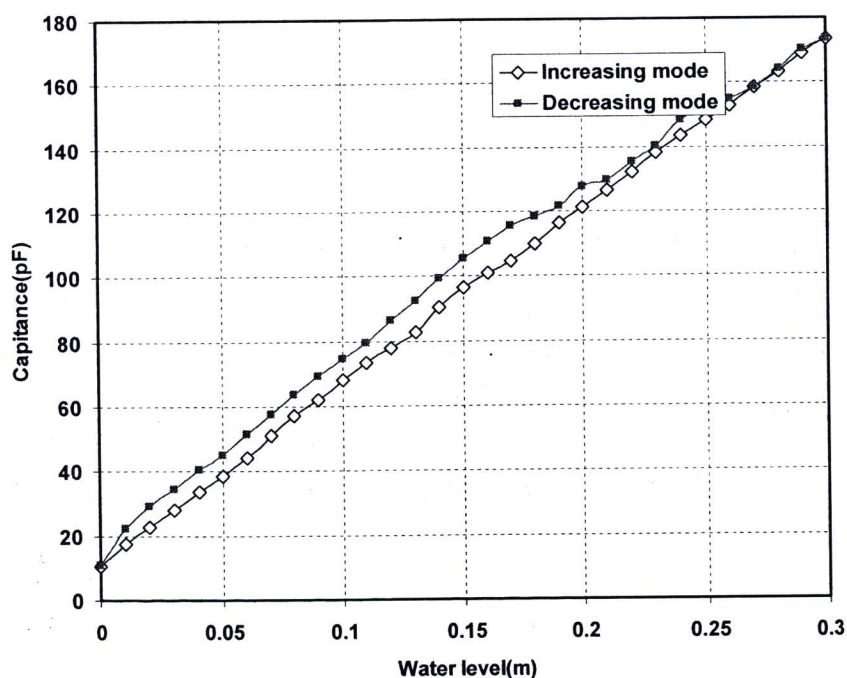
วัดความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ ตั้งแต่มวลน้ำค่า 0.01 ถึง 0.30 เมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.01 เมตร และทดลองซ้ำ 10 ครั้ง จะได้ค่าความสามารถในการทำซ้ำ 0.83 % ที่ระดับน้ำ 0.23 เมตร แสดงดังรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-4 ค่าความสามารถในการซ้ำของเซนเซอร์ที่ระดับน้ำ 0.23 เมตร

4.2.4 ค่าฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis)

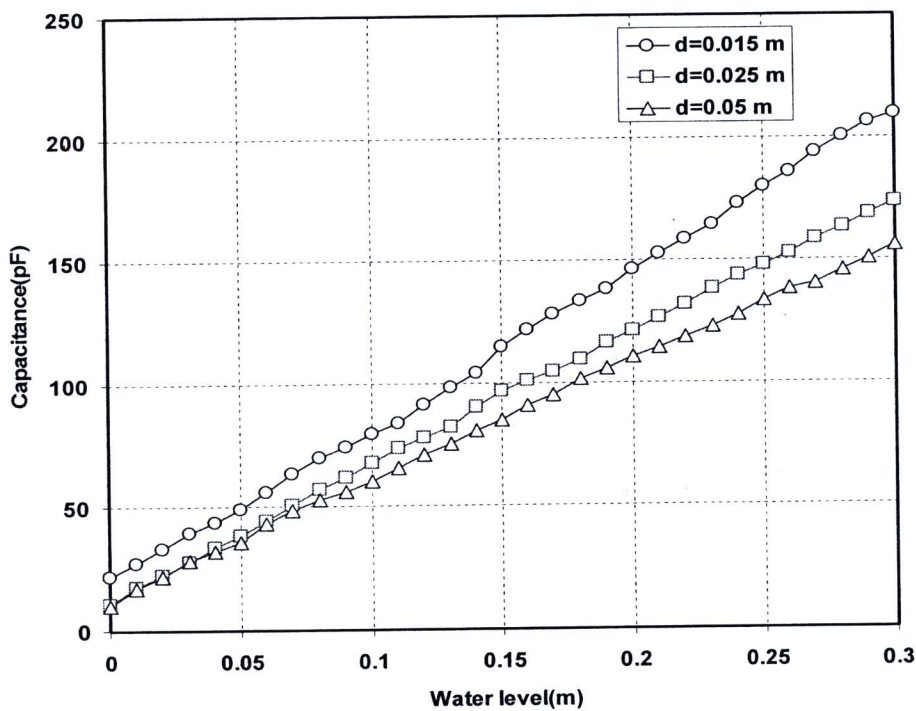
เมื่อวัดความจุไฟฟ้าที่วัดได้เทียบกับระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงในลักษณะเพิ่มและลด ระดับน้ำความสัมพันธ์ระหว่างค่าฮิสเตอร์ซิสแสดงดังรูปที่ 4-5 ได้ค่าฮิสเตอร์ซิสเท่ากับ 6.13 %FSO



รูปที่ 4-5 Hysteresis ของค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำ

4.3 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระยะห่างของแผ่นอิเล็กโตรดของเซนเซอร์

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโตรดที่แตกต่างกัน วัดโดยเครื่องมือวัด LCR ยี่ห้อ Aligent รุ่น 4284A พร้อมทั้งป้อนความถี่ที่ 1 kHz แรงดันไฟฟ้ากระตุ้น 2 V ให้กับเซนเซอร์



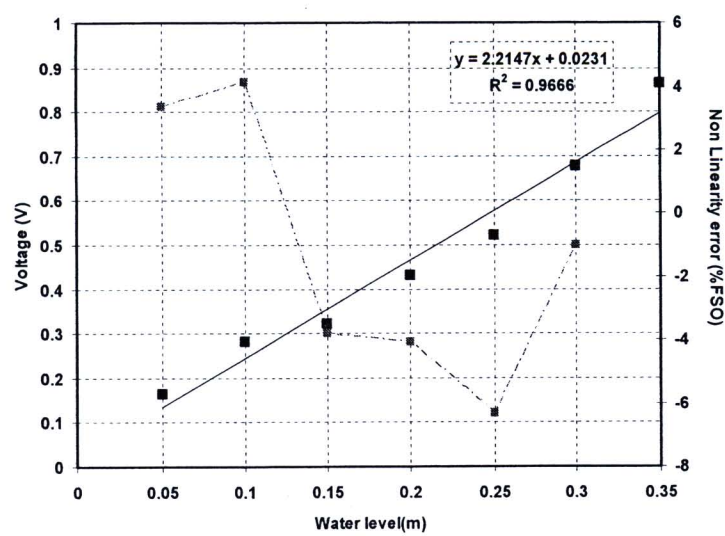
รูปที่ 4 -6 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำ
เมื่อแผ่นอิเล็กโตรดวางห่างกันเป็นระยะต่างๆ

4.4 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลว

เมื่อเซนเซอร์ทำจากวัสดุท่อ PVC และแผ่นโลหะนำไฟฟ้าทำจากแผ่นเทปอลูมิเนียม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.048 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นโลหะ 0.40 เมตร ความหนาของท่อพีวีซี เท่ากับ 0.002 เมตร และแผ่นอิเล็กโตรดวางห่างกันเป็นระยะ 0.005 เมตร วัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยการประยุกต์วงจรบริดจ์ ใช้แรงดันไฟฟ้ากระตุ้น (V_{in}) ที่ 2 V ความถี่ที่ 1 kHz แสดงค่าการวัดระดับของเหลวผ่านคอมพิวเตอร์โดยการรับค่าสัญญาณผ่าน USB 6008 และแสดงผลด้วยโปรแกรม LabVIEW ทำการวัดค่าระดับน้ำตั้งแต่ 0 ถึง 0.35 เมตร เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 เมตร

4.4.1 ค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

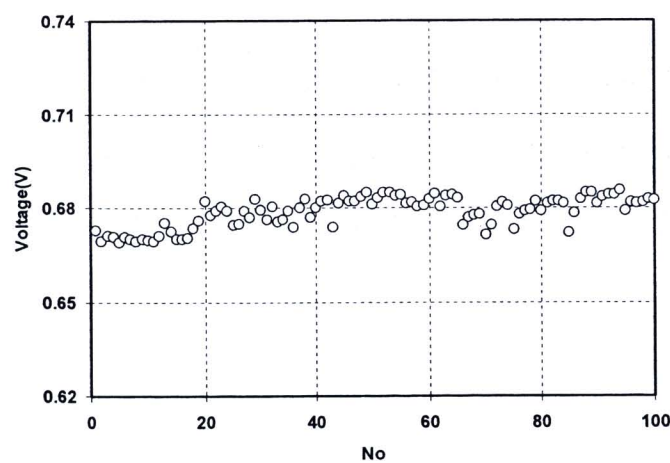
แรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ค่าที่ได้จะแปรผันตรงกับค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนไปโดยค่าที่ได้จะอยู่ในช่วงมิลลิโวลต์(mV) แสดงคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 4-7 และคำนวณผลค่าความไม่เป็นเชิงเส้นได้ค่าเป็น 7.65 % FSO และได้ค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty) 0.00218 โวลต์



รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและระดับน้ำ

4.4.2 ค่าความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

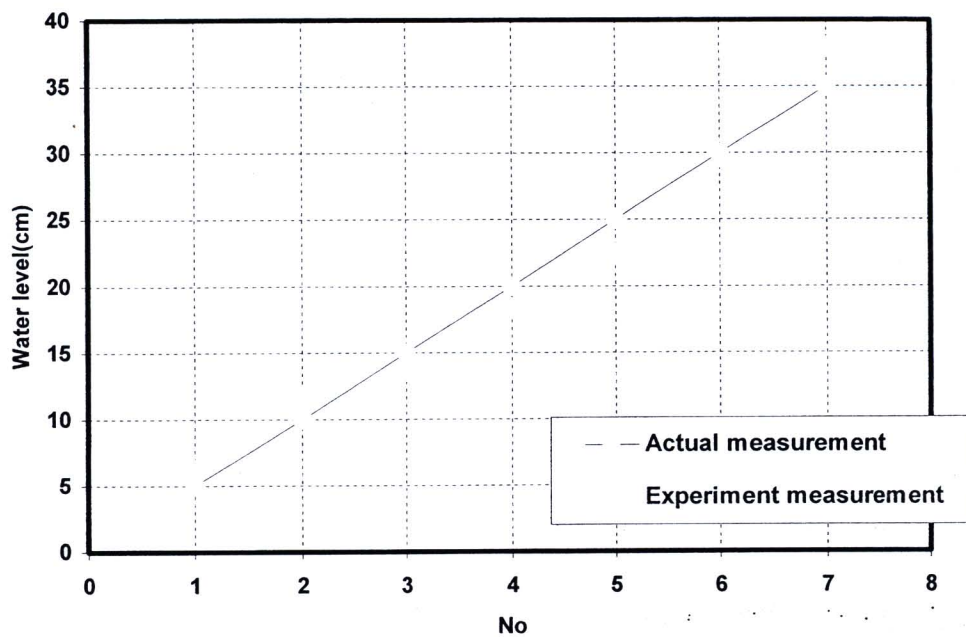
วัดแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ ตั้งแต่ระดับน้ำ 0.05 ถึง 0.35 เมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 เมตร ทดลองซ้ำ 100 ครั้ง ดังรูปที่ 4-8 ได้ค่าความสามารถในการทำซ้ำ 1.88 % ที่ระดับน้ำ 0.30 เมตร



รูปที่ 4-8 ค่าความสามารถในการทำซ้ำของแรงดันไฟฟ้าที่ระดับน้ำ 0.30 เมตร

4.3.3 เปรียบเทียบค่าระดับน้ำจริงกับค่าที่ได้จากการทดลอง

เปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์เป็นระดับน้ำ 0.05 ถึง 0.35 เมตร เปรียบเทียบค่าจริงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ดังรูปที่ 4-9 พบว่า มีค่าความผิดพลาดสูงสุด 8.54% ที่ระดับน้ำ 0.35 เมตร



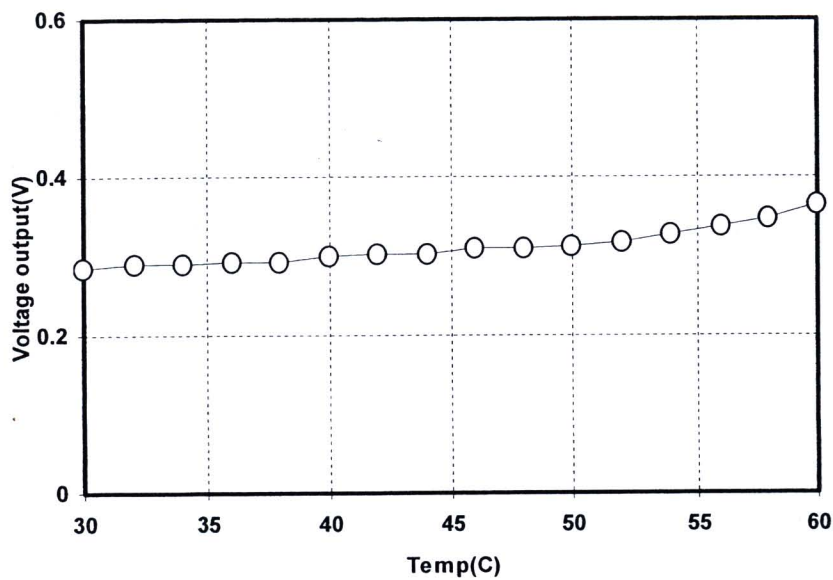
รูปที่ 4-9 เปรียบเทียบค่าระดับน้ำจริงกับค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์

4.5 สภาพแวดล้อมที่มีผลต่อเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

เซนเซอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นโลหะ 0.30 เมตร ความหนาของท่อพีวีซี เท่ากับ 0.002 เมตร และแผ่นอิเล็กทรอนิกส์วางห่างกันเป็นระยะ 0.005 เมตร ใช้แรงดันไฟฟ้ากระตุ้น (V_{in}) ที่ 2 V ความถี่ 1 kHz แสดงค่าการวัดระดับของเหลวผ่านคอมพิวเตอร์โดยการรับค่าสัญญาณผ่าน USB 6008 และแสดงผลด้วยโปรแกรม LabVIEW

4.5.1 ผลของอุณหภูมิ

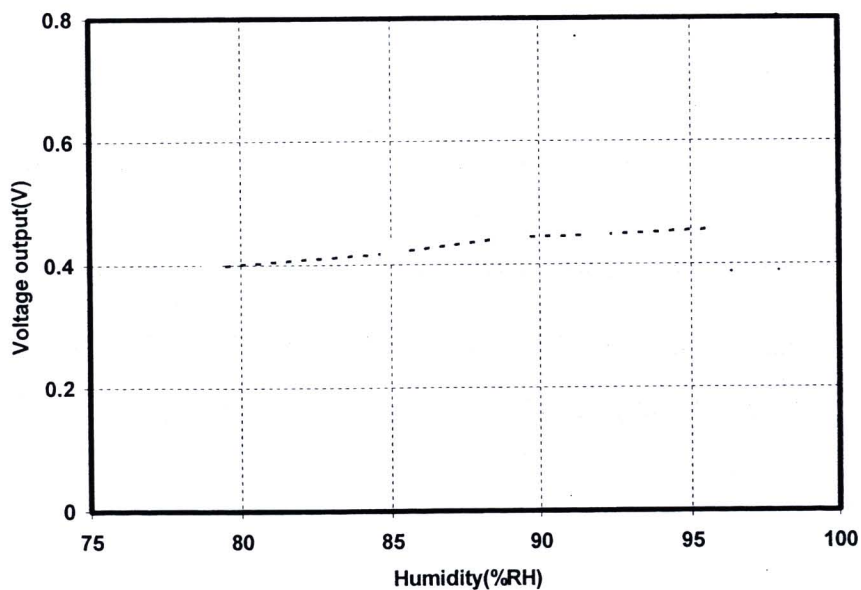
ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ ที่ระดับน้ำ 0.10 เมตร ทำการวัดตั้งแต่ระดับอุณหภูมิ 30 ถึง 60 °C โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 2 °C ดังรูปที่ 4-10



รูปที่ 4-10 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิ

4.5.2 ผลของความชื้นสัมพัทธ์

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับความชื้นสัมพัทธ์ ที่ระดับน้ำ 0.20 เมตร ในช่วงเวลาที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกันตั้งแต่ 76 จนถึง 96 %RH ดังรูปที่ 4-11



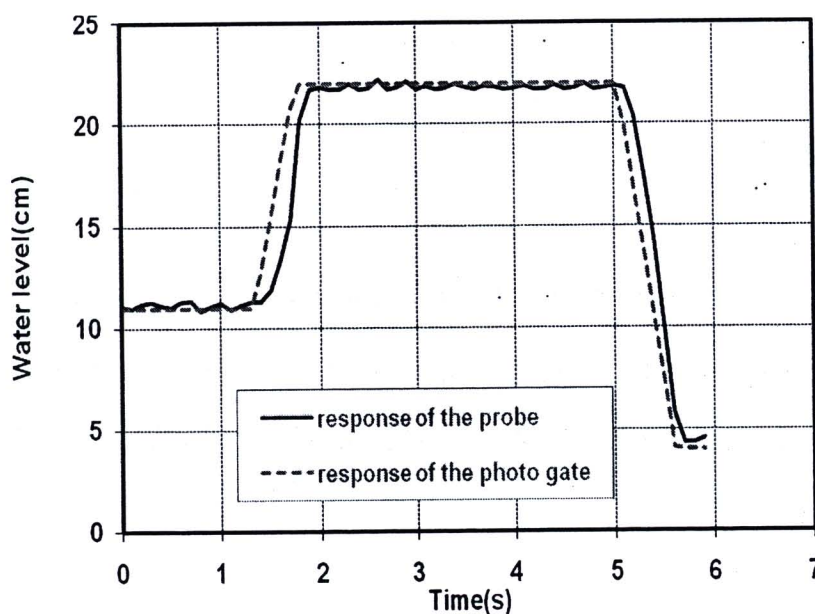
รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและความชื้นสัมพัทธ์

4.6 ผลตอบสนองของเวลาที่มิต่อเซนเซอร์

ในการศึกษาใช้เซนเซอร์วัดระดับน้ำมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.048 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นโลหะ 0.40 เมตร ความหนาของท่อพีวีซี 0.002 เมตร และแผ่นอิเล็กทรอนิกส์วางห่างกันเป็นระยะ 0.005 เมตร วัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยประยุกตวงจรบริดจ์ใช้แรงดันไฟฟ้ากระตุ้น (V_{in}) 2 V ความถี่ 1 kHz

4.6.1 การจุ่มเซนเซอร์ในระดับด้วยความเร็วคงที่

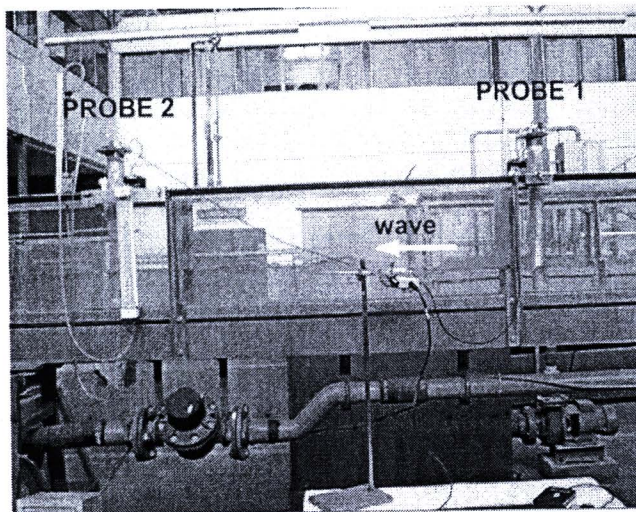
ทำการจับเวลาในการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์ผ่านโฟโต้เกต(Photogate) พร้อมทั้งวัดค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลง รูปที่ 4-12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับเวลา เมื่อให้เซนเซอร์เคลื่อนที่จุ่มลงในน้ำด้วยระยะทาง 0.10 เมตร และได้เวลาในการเคลื่อนที่โดยอ่านได้จากเครื่องจับเวลาได้เท่ากับ 0.372 วินาที ดังนั้นสามารถคำนวณความเร็วของเซนเซอร์เท่ากับ 0.269 เมตรต่อวินาที ในขณะที่การคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์โดยใช้เทคนิคที่นำเสนอนี้จะได้ 0.260 เมตรต่อวินาที สำหรับกรณีเคลื่อนที่ของเซนเซอร์ที่ยกขึ้นจากระดับน้ำเวลาในการเคลื่อนที่โดยอ่านได้จากเครื่องจับเวลาได้เท่ากับ 0.318 วินาที และความเร็วในการเคลื่อนที่คำนวณได้เป็น 0.314 เมตรต่อวินาที และในขณะที่การคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์โดยใช้เทคนิคที่นำเสนอนี้จะได้ 0.271 เมตรต่อวินาที พบว่าผลตอบสนองเชิงพลวัตของเซนเซอร์นี้มีเวลาที่ล่าหลัง(Dead time) 0.2 วินาที และเวลาสู่จุดสมดุล (Settling time) 2.1 วินาที



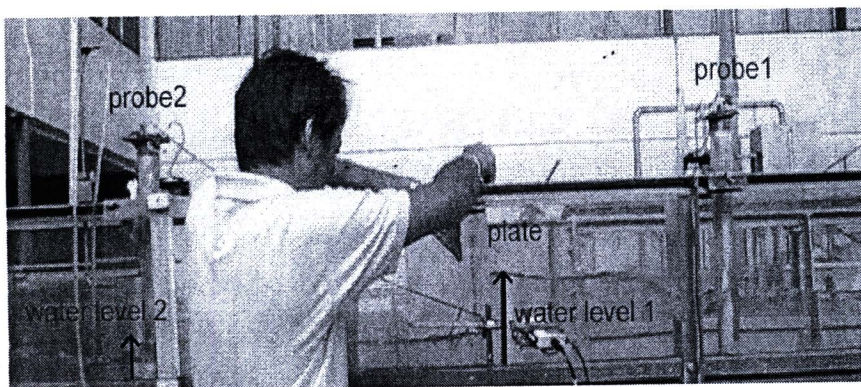
รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ของระดับน้ำกับเวลาระหว่างค่าที่ทดลองกับค่ามาตรฐาน
กรณีจุ่มลงไปและยกขึ้นจากในน้ำ

4.6.2 กรณีการทดสอบในสภาวะการเปลี่ยนแปลงของน้ำอย่างรวดเร็ว

ในการศึกษาจะใช้หลักการทางชลศาสตร์จำลองสภาวะการเปลี่ยนแปลงของน้ำในรางเปิด โดยวางเซนเซอร์จำนวน 2 หัวในรางน้ำเปิดจำลองที่ห่างกันเป็นระยะ 1 เมตร นำแผ่นกั้นทำคลื่นมาวาง วัดระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปโดยเทคนิคที่นำเสนอแสดงผลด้วยโปรแกรม LabVIEW รูปที่ 4-13 แสดงกรณีจำลองสถานการณ์น้ำหลากเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์ รูปที่ 4-13 a กรณีการคลื่นน้ำเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์ตัวที่ 1 ก่อนไหลผ่านไปยังเซนเซอร์ตัวที่ 2 รูปที่ 4-13 b นำแผ่นพลาสติกมากั้นน้ำระหว่างเซนเซอร์ทั้งสองเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำโดยฉับพลัน ทำให้ระดับน้ำของเซนเซอร์ตัวที่ 1 เพิ่มขึ้นส่วนระดับน้ำของเซนเซอร์ตัวที่ 2 ลดลง

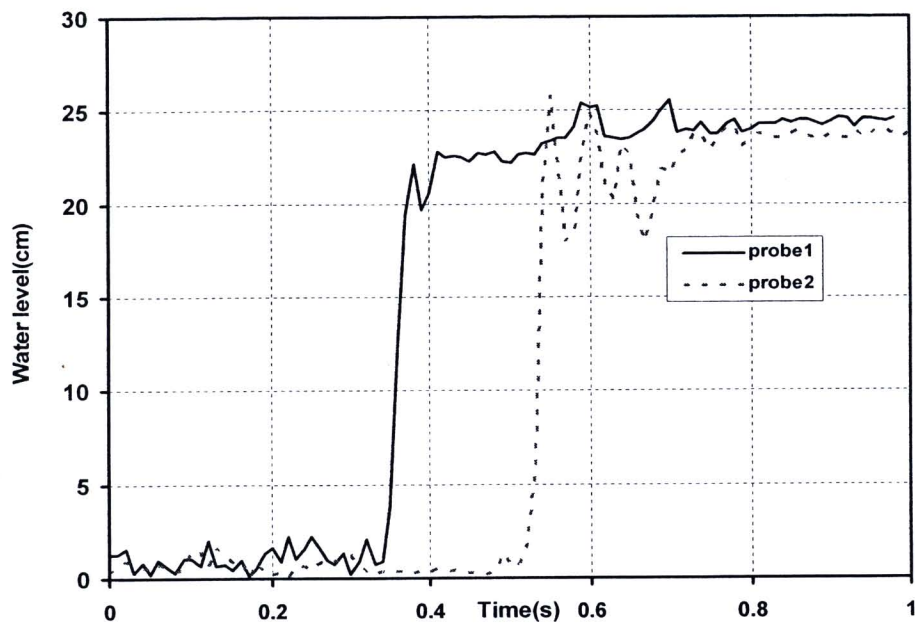


a) กรณีคลื่นน้ำเคลื่อนที่กระทบเซนเซอร์ตัวที่ 1 และ 2

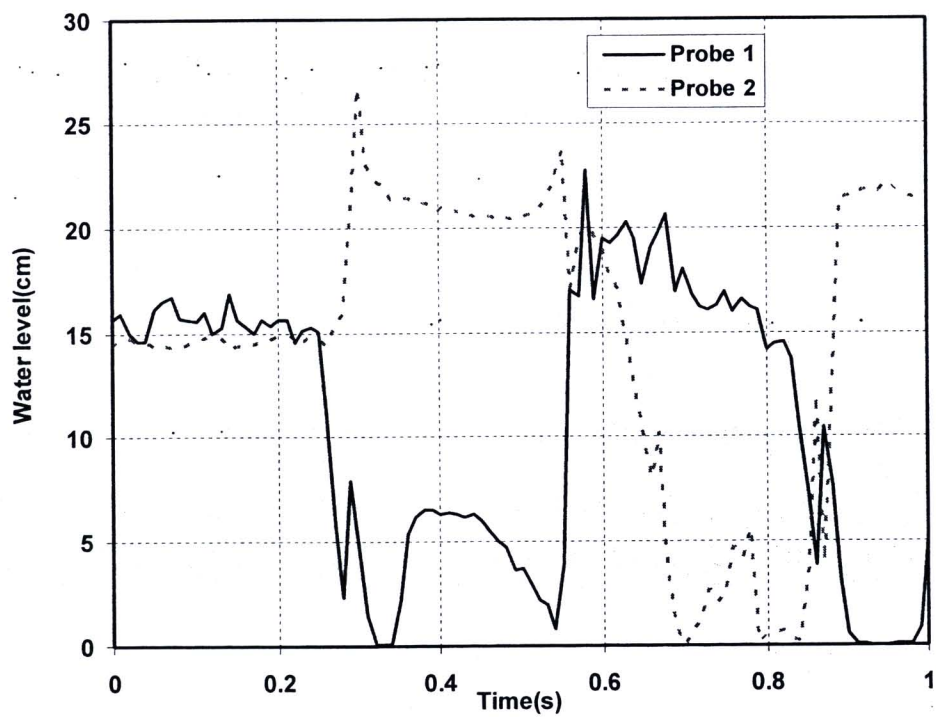


b) กรณีการทำให้เกิดคลื่นระหว่างเซนเซอร์ทั้งสอง

รูปที่ 4-13 กรณีจำลองสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์



a) กรณีคลื่นน้ำเคลื่อนที่กระทบเซนเซอร์ตัวที่ 1 และ 2

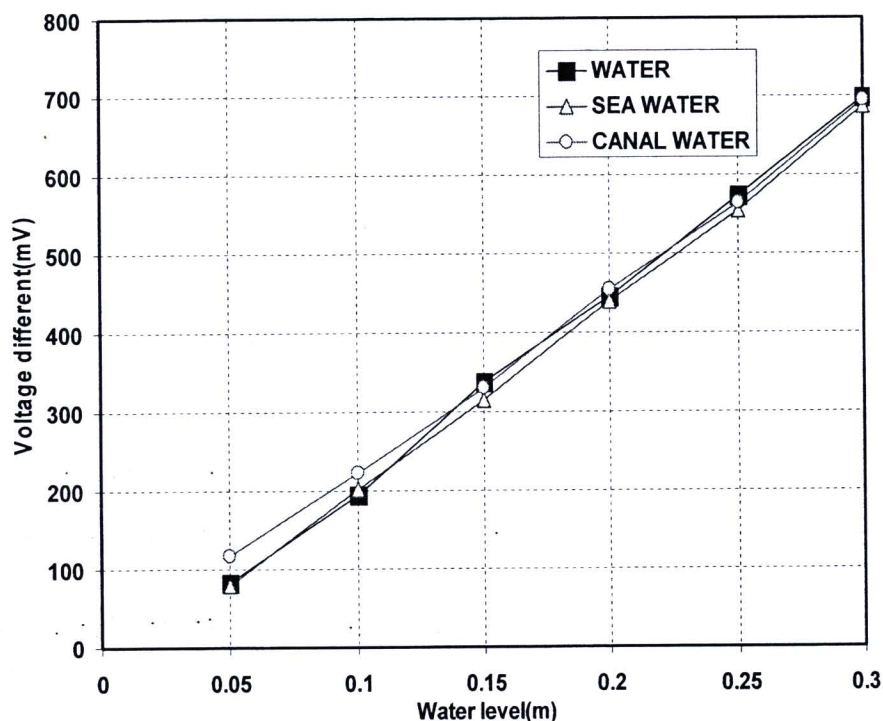


b) การทำให้เกิดคลื่นระหว่างเซนเซอร์ทั้งสอง

รูปที่ 4-14 ความสัมพันธ์ของระดับน้ำกับเวลา

4.7 ความสัมพันธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับของเหลวต่างชนิด

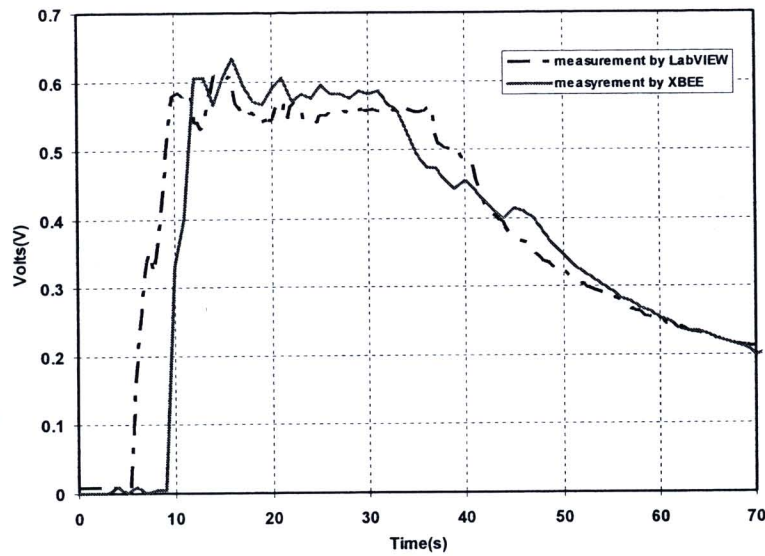
ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับน้ำต่างชนิดกัน 3 ชนิด คือ น้ำดื่ม น้ำคลอง และน้ำทะเล วัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยประยุกต์วงจรบริดจ์โดยใช้ชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอก 2 ชุด แสดงค่าการวัดระดับของเหลวผ่านคอมพิวเตอร์โดยการรับค่าสัญญาณผ่าน NI USB-6008 และแสดงผลด้วยโปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 4-15 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและระดับของเหลว เมื่อของเหลวต่างชนิดกัน

4.8 ผลกระทบจากการส่งข้อมูลของเซนเซอร์ผ่านโมดูลสื่อสารไร้สาย

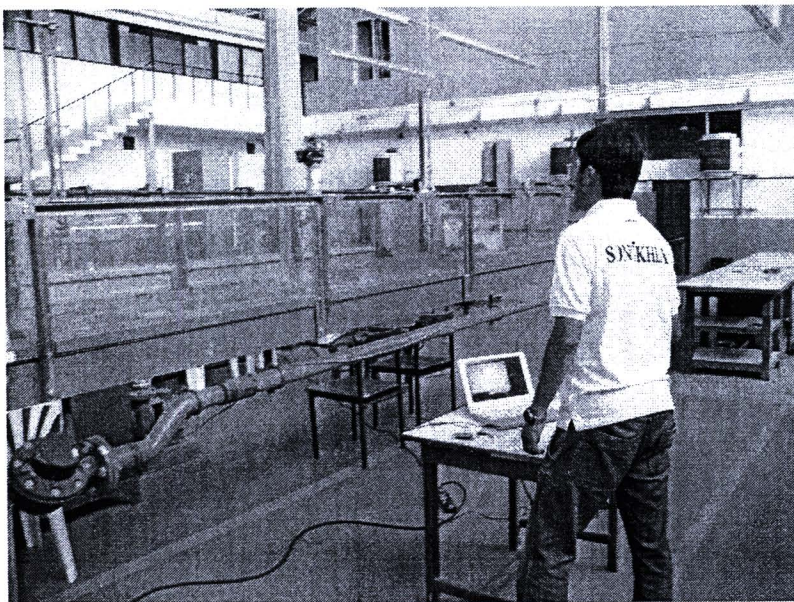
ในการศึกษาผลกระทบของการส่งผ่านข้อมูลด้วยการเลือกใช้โมดูล XBee วัดแรงดันไฟฟ้า ออกด้วยประยุกต์วงจรบริดจ์ใช้แรงดันไฟฟ้ากระตุ้น (V_{in}) 2 V ความถี่ 1 kHz โดยใช้เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.048 เมตร ความยาวของแผ่นอิเล็กโตรด 0.40 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.005 เมตร และความหนาของท่อพีวีซี 0.002 เมตร โมดูล XBee ตัวที่ 1 สำหรับอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเข้ากับหัววัด ส่วนโมดูล XBee ตัวที่ 2 ต่อผ่านพอร์ตอนุกรมกับคอมพิวเตอร์เพื่อสำหรับวัดค่าระดับน้ำ รูปที่ 4-14 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับเวลาระหว่างผลที่ได้จาก LabVIEW กับ XBee มีค่าเวลาที่ล่าช้า (Dead time) อยู่ 4.0 วินาที และเวลาสู่จุดสมดุล (Settling time) ของ XBee มีค่าเท่ากับ 10.3 วินาที



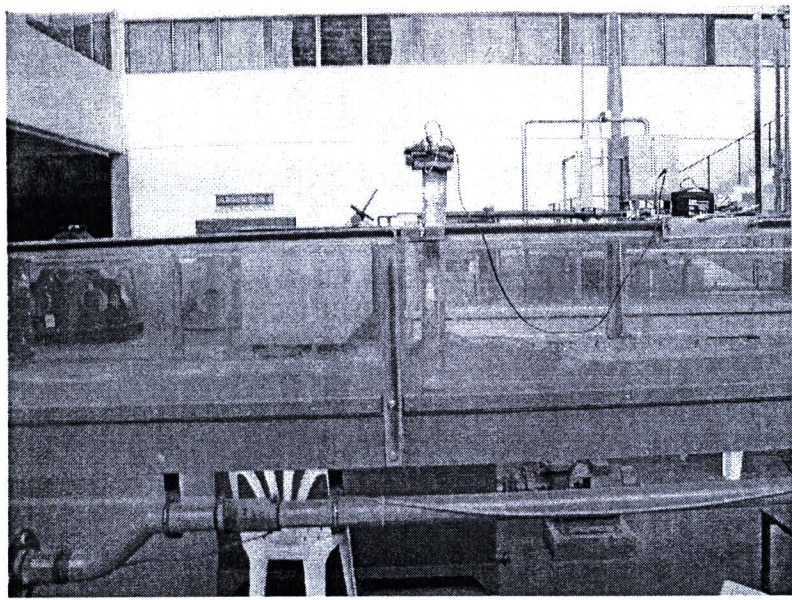
รูปที่ 4 -16 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้ากับเวลาของค่าวัดจาก LabVIEW กับ โมดูล XBee

4.8.1 กรณีการทดสอบในสถานะน้ำหลาก

ในการศึกษาจะใช้หลักการทางชลศาสตร์จำลองสถานะน้ำหลากในรางเปิด โดยวางเซนเซอร์จำนวน 1 หัวในรางน้ำเปิดจำลอง นำแผ่นกั้นทำคลื่นมาวาง วัดระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปโดยเทคนิคที่นำเสนอแสดงผลด้วยโปรแกรม LabVIEW ดังในรูปที่ 4 -16 a) และ 4-16 b) และได้ผลการตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 4 -17

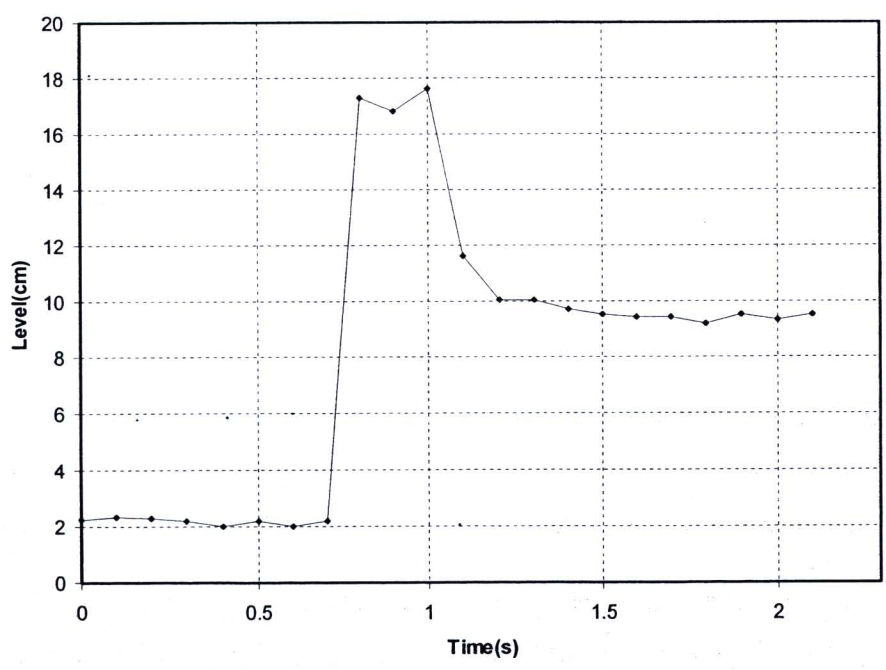


a)



b)

รูปที่ 4-17 กรณีจำลองสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์
กรณีส่งผ่านข้อมูลไร้สาย



รูปที่ 4-18 ผลของการตรวจวัดระดับน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงโดยส่งข้อมูลของเซนเซอร์ผ่าน โมดูลสื่อสารไร้สาย

จากผลการทดลองจะเห็นว่าผลการวัดระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงในขณะน้ำหลกด้วยการส่งข้อมูลของเซนเซอร์ผ่าน โมดูลสื่อสารไร้สายสามารถตรวจวัดได้ โดยช่วงสภาวะชั่วครู่จะมีค่า overshoot สูงถึง 200% ซึ่งจะเป็นสาเหตุจากความคลาดเคลื่อนของระบบส่งข้อมูล