



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ชื่อแผนงานวิจัย การพัฒนาระบบต้นแบบเฝ้าตรวจวัดระดับน้ำในคลอง  
เปิดแบบประมวลผลเวลาจริงผ่านเว็บโดยใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

ชื่อโครงการวิจัย : การพัฒนาเครื่องมือต้นแบบสำหรับวัดระดับน้ำในคลอง  
เปิดเพื่อใช้ในการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์  
รองศาสตราจารย์ บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พยอม รัตนมณี  
นายประณีต รอดแสง

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากเงินสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ  
(เงินงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์)

ประจำปี พ.ศ. 2551

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบ พัฒนาและสร้างต้นแบบเครื่องมือสำหรับวัดระดับน้ำในคลองเปิด เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายด้วยกัน 2 วิธีคือ

การวัดระดับน้ำโดยใช้เทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก โดยมีหัววัดเป็นแบบกึ่งทรงกระบอกกลวงที่ทำจากวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์(PVC) และแผ่นโลหะกึ่งทรงกระบอกทำจากเทปอลูมิเนียมห่อหุ้ม ปริมาณความจุไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนไปและแปรผกผันกับระยะห่างของแผ่นโลหะ โดยมีค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้อยู่ในช่วงพิโคฟารัด(pF) สำหรับผลตอบสนองเชิงสถิติและพลวัตของเทคนิคการวัดความจุไฟฟ้ากึ่งทรงกระบอกโดยการประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์ที่ปรับปรุงขึ้นพบว่า แรงดันไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับระดับน้ำที่เปลี่ยนไปซึ่งค่าอยู่ในช่วงมิลลิโวลต์(mV) พบว่า ค่าความไม่เป็นเชิงเส้น ความสามารถในการทำซ้ำ และผลตอบสนองเวลาของเทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกอยู่ในช่วง 0.2 วินาที และสามารถนำไปใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำได้ทันที อีกทั้งยังมีราคาถูก ใช้งานง่าย พกพาสะดวก แต่มีประสิทธิภาพและความคล่องตัวในการใช้งานสูง

การวัดระดับน้ำโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีลายวงจรที่มีลักษณะคล้ายซี่หวีที่เรียกว่า อินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ โดยที่ปริมาณความจุไฟฟ้าระหว่างซี่หวีจะแปรผันตรงกับค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนไปและแปรผกผันกับระยะห่างของซี่หวี ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จะถูกวัดและประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าแบบอนุกรม RS-232 ส่งต่อให้กับคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ที่มีมาตรฐานการสื่อสารแบบเดียวกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เซนเซอร์ที่มีย่านวัด 0-30 เซนติเมตร มีผลตอบสนองเชิงสถิติที่มีความเป็นเชิงเส้นสูง และมีค่าคลาดเคลื่อนต่ำ

**คำสำคัญ:** การวัดระดับน้ำ การวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก วงจรบริดจ์ที่ปรับปรุง อินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์

## ABSTRACT

---

This research work is proposed the development of two prototypes of water level meter in open channel to transmit data using wireless sensor networks:

The water level measurement technique based on a semicylindrical capacitance measurement consists of a hollow PVC semicylinder made of covered with a semicylindrical aluminium foil. Capacitance of the probe is proportional to the change in water level and is inversely proportional to the distance of aluminium foil. The capacitance is measured in the range of picofarad (pF). The static and dynamic responses of the proposed sensor were tested using the modified bridge circuit. Results show that the measured voltage is in the range of millivolt (mV) and is proportional to the variation in water level. In addition, the tested nonlinearity, repeatability, and time responses of the probe are in the range of 0.2 second. This technique can be efficiently used in real-time water level measurement. Moreover, it is low cost, easy to use, and portable.

The water level sensor fabricated from a simple printed circuit board. This sensor is a coplanar structure consisting of multiple parallel fingers. The capacitance between parallel fingers varied according to the water level. The varied capacitance can be measured and processed by a microcontroller. The output signal is transmitted by RS-232 to a computer or other devices with the same communication protocol. The experimental results show that this liquid level sensor is linear with  $R^2 = 0.9992$ . and precision with 0.7 cm. in error. In addition , this sensor consumes a low energy rate at 5 mJ/s for 2.2-3.5 volts supplied voltage.

**Keywords:** Water level measurement, Semicylindrical capacitance measurement, Modified bridge circuit, Interdigital sensor

## กิตติกรรมประกาศ

---

งานวิจัยนี้ดำเนินการภายใต้การสนับสนุนจากเงินงบประมาณแผ่นดินปี 2551 – 2553 (วช.) ในโครงการหมายเลข 2551A11501001 คณะวิจัยขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

## สารบัญ

บทที่	หน้า
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	10
1.4 ขอบเขตการวิจัย	10
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	11
2. ทฤษฎีและหลักการ	15
2.1 หลักการพื้นฐานของการวัดระดับ	15
2.1.1 อุปกรณ์ตรวจวัดระดับตามหลักการทางกายภาพ	15
2.2 หลักการพื้นฐานการหาค่าความจุไฟฟ้า	19
2.3 รูปแบบของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก	21
2.3.1 กรณีมีไดอิเล็กตริกเป็นอากาศ	22
2.3.2 กรณีมีไดอิเล็กตริกเป็นอากาศกับของเหลว	24
2.4 การออกแบบวงจรสำหรับเซนเซอร์	26
2.4.1 วงจรภาคแหล่งจ่ายไฟ	27
2.4.2 วงจรออสซิลเลเตอร์	28
2.4.3 การประยุกต์วงจรบริดจ์	28
2.4.4 เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้ากับค่าความจุไฟฟ้า	29
2.4.5 วัดค่าความจุไฟฟ้าของชนิดของเหลวที่แตกต่างกัน	30
3. วัสดุ อุปกรณ์และการทดลอง	33
3.1 การออกแบบเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก	33
3.1.1 รูปแบบของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก	33
3.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	34
3.2 การทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ และระดับของเหลว	34
3.3 ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระยะห่างของแผ่นอิเล็กโตรดของเซนเซอร์	37

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.4 การศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลว	37
3.5 การศึกษาผลสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อเซนเซอร์	39
3.6 การศึกษาผลตอบแทนของเวลาที่มีต่อเซนเซอร์	40
3.6.1 กรณีเซนเซอร์เคลื่อนที่ผ่านของเหลว	40
3.6.2 กรณีของเหลวเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์	42
3.7 การศึกษาความสัมพันธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับของเหลวต่างชนิด	43
3.8 การศึกษาผลกระทบจากการส่งข้อมูลของเซนเซอร์ผ่านโมดูลสื่อสารไร้สาย	45
3.9 อุปสรรคที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการวิจัยและมาตรการในการแก้ไข	46
4. ผลการทดลอง	47
4.1 ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	47
4.2 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลว	47
4.2.1 เปรียบเทียบความจุไฟฟ้าจากการคำนวณกับการวัดโดยตรง	47
4.2.2 ค่าความเป็นเชิงเส้น	48
4.2.3 ค่าความสามารถในการทำซ้ำ	49
4.2.4 ค่าฮิสเตอร์ซิส	49
4.3 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระยะห่างของแผ่นอิเล็กโตรดของเซนเซอร์	50
4.4 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลว	50
4.4.1 ค่าความเป็นเชิงเส้น	50
4.4.2 ค่าความสามารถในการทำซ้ำ	51
4.4.3 เปรียบเทียบค่าระดับน้ำจริงกับค่าที่ได้จากการทดลอง	52
4.5 สภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก	52
4.5.1 ผลของอุณหภูมิ	52
4.5.2 ผลของความชื้นสัมพัทธ์	53
4.6 ผลตอบแทนของเวลาที่มีต่อเซนเซอร์	54
4.6.1 การจุ่มเซนเซอร์ในระดับด้วยความเร็วคงที่	54
4.6.2 กรณีการทดสอบในสภาวะการเปลี่ยนแปลงของน้ำอย่างรวดเร็ว	55

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.7 ความสัมพันธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับของเหลวต่างชนิด	56
4.8 ผลกระทบจากการส่งข้อมูลของเซนเซอร์ผ่าน โมดูลสื่อสารไร้สาย	57
4.8.1 กรณีการทดสอบในสภาวะน้ำหลาก	58
5. สรุปและวิจารณ์	60
5.1 สรุปผลและวิจารณ์	60
5.1.1 สรุปผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก	60
5.1.2 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลวและความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระยะห่างของแผ่นอิเล็กโตรด	60
5.1.3 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลว	61
5.1.4 สรุปผลการศึกษาผลสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อเซนเซอร์	61
5.1.5 สรุปผลการศึกษาผลตอบสนองของเวลาที่มีต่อเซนเซอร์	61
5.1.6 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับของเหลวต่างชนิด	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	62
6. ความจุไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตอล	63
6.1 ทฤษฎีและหลักพื้นฐานการเก็บประจุไฟฟ้า	63
6.2 การประมาณค่าความจุไฟฟ้าด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์	70
6.3 การจำลองการทำงานของอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กโตรดด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics	72
7. การออกแบบเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลรุ่นที่ 1	73
7.1 อิเล็กโตรด	73
7.2 วงจรปรับแต่งสัญญาณ	76
7.3 การทดลองสภาวะน้ำหลาก	77
8. การออกแบบเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลรุ่นที่ 2	82
8.1 อิเล็กโตรด	82

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
8.2 วงจรควบคุมการทำงาน	83
8.3 ระบบประมวลผลอัจฉริยะ	85
8.4 การทดลอง และผลการทดลอง	
8.4.1 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำ กับค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบอินเตอร์คิตอลที่ได้จากการออกแบบ	90
8.4.2 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำ กับระยะเวลาคายประจุของอิเล็กโตรด ที่ได้จากการวัดด้วยวงจรควบคุมการทำงาน	92
8.4.3 การทดลองเพื่อหาค่าความผิดพลาดของเซนเซอร์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าระดับน้ำที่ได้จากการวัดด้วยเซนเซอร์ กับค่าระดับน้ำจริง	94
8.4.4 การทดลองเพื่อหาค่าความผิดพลาดแบบฮิสเทอรีซิส (hysteresis error) ของเซนเซอร์ เมื่อวัดระดับน้ำในช่วงระดับน้ำเพิ่มขึ้นและลดลง	94
8.4.5 การทดลองเพื่อหาค่าความไม่แน่นอนในการวัดของเซนเซอร์	95
8.4.6 การทดลองเพื่อทดสอบผลตอบสนองของเซนเซอร์ เมื่อระดับน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (dynamic response)	96
8.4.7 การทดลองเพื่อทดสอบผลตอบสนองเชิงเวลาในการวัดระดับน้ำของเซนเซอร์ เมื่อเกิดสถานะน้ำไหลท่วมฉับพลัน	97
8.4.8 การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์ เมื่ออุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลงไป	98
8.4.9 การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์ เมื่อวัดระดับน้ำที่ไม่ใช่น้ำบริสุทธิ์	99
8.4.10 การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์ เมื่อค่าไดอิเล็กตริกของน้ำเปลี่ยนแปลงไป	101
8.4.11 การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าความจุไฟฟ้าที่วัดด้วยวงจรควบคุมการทำงาน เมื่อแหล่งจ่ายไฟมีแรงดันไม่คงที่	102
8.4.12 การทดลองเพื่อหาค่าความผิดพลาดจากการวัดระดับน้ำด้วยเซนเซอร์ เมื่อได้รับผลกระทบจากการเสื่อมสภาพความเป็นฉนวนของวัสดุเคลือบผิวทองแดง	103

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
8.4.13 การทดลองวิธีหาค่าความผิดพลาดในการวัดระดับน้ำของเซนเซอร์ เมื่อได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการใช้การประมวลผลแบบอัจฉริยะ	104
8.4.14 การทดลองวิธีหาค่าความผิดพลาดในการวัดระดับน้ำของเซนเซอร์ เมื่อได้รับผลกระทบจากการกระเพื่อมของผิวน้ำ โดยการใช้วิธีหาค่าเฉลี่ย	105
8.4.15 การทดลองวิธีหาค่าความผิดพลาดในการวัดระดับน้ำของเซนเซอร์ เมื่อได้รับผลกระทบจากการกระเพื่อมของผิวน้ำ โดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียม	108
8.4.16 การทดลองเพื่อหาอัตราการใช้พลังงานของเซนเซอร์	111
8.4.17 การทดลองเพื่อหาอัตราการใช้พลังงานของเซนเซอร์เมื่อต่อใช้งานร่วมกับโมดูลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย U.node Ver.2	111
8.4.18 การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลของเซนเซอร์เมื่อต่อใช้งานร่วมกับโมดูลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย U.node Ver.2	112
9. สรุปผลการวิจัยเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเตอร์คิวิตอลรุ่นที่ 2	
9.1 สรุปผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเตอร์คิวิตอลรุ่นที่ 2	114
9.2 สรุปคุณสมบัติของเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเตอร์คิวิตอลรุ่นที่ 2	115
ปัญหาและข้อเสนอแนะ	
บรรณานุกรม	
ภาคผนวก	

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ปัญหาของระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาอาจส่งผลกระทบต่ออาคารดำรงชีวิตประจำวันได้ อย่างเช่น เมื่อระดับน้ำเปลี่ยนแปลงแล้วส่งผลกระทบต่อการระบายน้ำจากตัวเมืองผ่านแม่น้ำลงสู่ทะเล ซึ่งได้ประสบปัญหาอุทกภัยเกิดขึ้นซึ่งส่งผลเสียหายต่อชีวิต และเศรษฐกิจ รวมทั้งยังส่งผลให้ปริมาณน้ำกร่อยบริเวณปากแม่น้ำแล้วส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศพื้นบ้านอีกด้วย

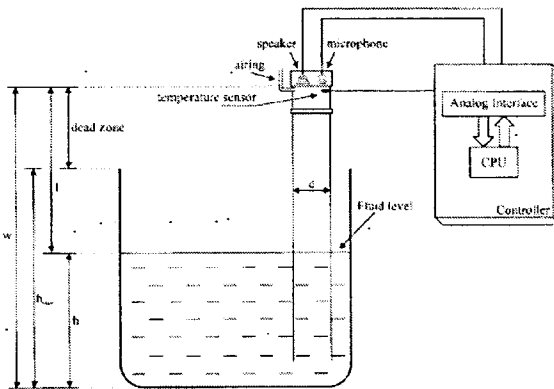
จากปัญหาดังกล่าวมา จึงจำเป็นต้องทำการตรวจวัดระดับน้ำในคลองเปิดแล้วส่งข้อมูลมาประมวลผลผ่านระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายเพื่อนำมาประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อแจ้งไปยังประชาชนผู้อยู่อาศัย หรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการเฝ้าระวัง แต่ในปัจจุบันเครื่องมือตรวจวัดระดับน้ำดังกล่าวในประเทศไทยต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศและมีราคาค่อนข้างสูง และในการวิเคราะห์ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำเพื่อให้ทราบทิศทางการไหลของกระแส น้ำต้องใช้เครื่องมือสำหรับตรวจวัดระดับน้ำจำนวนหลายตัว ก็ยังจะทำให้การวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ ในทางด้านวิศวกรรมชลศาสตร์ หรือวิศวกรรมแหล่งน้ำ และอุทกวิทยา ต้องใช้งบประมาณที่สูงขึ้นตามไปด้วย จากการศึกษาเทคนิคที่ใช้ตรวจวัดระดับน้ำในหลายประเทศพบว่ามีการใช้เทคนิคการวัดปริมาณทางฟิสิกส์ในรูปแบบต่างๆ ที่อาศัยหลักการพื้นฐานของคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด หรือคุณสมบัติทางไฟฟ้า อาทิเช่น สกานาร์ไฟฟ้า ความดัน อุณหภูมิ และการสั่นสะเทือน เป็นต้น แต่การนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์จะมีข้อจำกัดบางอย่างในการวัด เช่น เทคนิคการสร้างและการวัดที่ซับซ้อน และยังมีราคาสูง

สำหรับงานวิจัยนี้จึงเสนอการวิจัยและพัฒนาเทคนิคการวัดระดับน้ำที่อาศัยหลักการหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยกัน 2 วิธี คือ การวัดระดับน้ำโดยใช้การวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก และ การวัดระดับน้ำโดยใช้การวัดความจุไฟฟ้าของแผ่นวงจรพิมพ์ลายสี่เหลี่ยม ซึ่งทั้ง 2 เทคนิคนี้ยังไม่มีการศึกษาการนำมาประยุกต์ใช้วัดระดับน้ำมาก่อน ผลจากการวิจัยนี้จะสามารถลดปัญหาด้านเทคนิคของการสร้าง ลดข้อจำกัดทางด้านการวัด มีความเป็นเชิงเส้นสูง และง่ายต่อการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีราคาถูกและสามารถประดิษฐ์ขึ้นได้โดยการใช้เทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อน และสามารถสร้างขึ้นมาใช้เองได้ซึ่งจะเป็นการลดการนำเข้าเครื่องมือที่มีราคาแพงจากต่างประเทศได้อีกทางหนึ่ง

## 1.2 ทบทวนวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

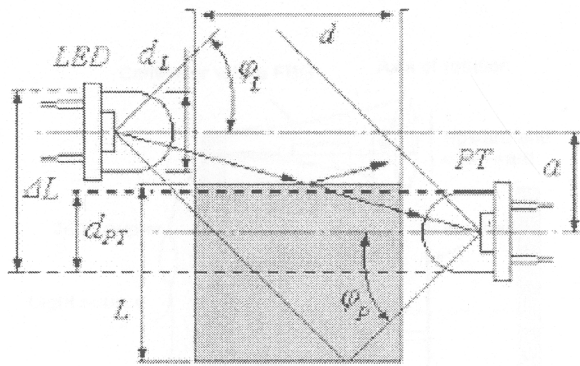
สำหรับการวิจัยและพัฒนาเครื่องมือวัดระดับของเหลว ได้ถูกคิดค้นและพัฒนามาเป็นเวลานานแล้วเทคนิคที่แตกต่างกัน โดยแต่ละวิธีก็มีข้อจำกัดในการวัดที่แตกต่างกัน ทำให้ได้ดังในเอกสารสืบค้นได้ดังนี้

เทคนิคที่ใช้หลักการวัดระดับของเหลวทางเสียงหรือแสง (Ultrasonic or Photo Detection) โดยที่ของเหลวจะไม่สัมผัสกับตัวหัววัด และใช้การรับและส่งออกของสัญญาณมาหาวิเคราะห์หาค่าระดับของเหลว อาทิเช่น เทคนิคของ Acoustical gas resonator[1] สำหรับตรวจวัดระดับของเหลวโดยวิธีดังกล่าวประกอบด้วยท่อนำคลื่นที่ปลายหนึ่งจุ่มอยู่ในของเหลว และปลายอีกด้านถูกปิดโดยมีการติดตั้งแหล่งกำเนิดคลื่น acoustical และไมโครโฟนไว้ เมื่อความถี่เรโซแนนซ์ของ resonator เป็นฟังก์ชันกับระยะทางระหว่างปลายที่ถูกปิดกับผิวของเหลว เมื่อทราบคุณลักษณะของความถี่เรโซแนนซ์ที่โหมดต่างๆ ทำให้สามารถตรวจวัดระดับของเหลวได้



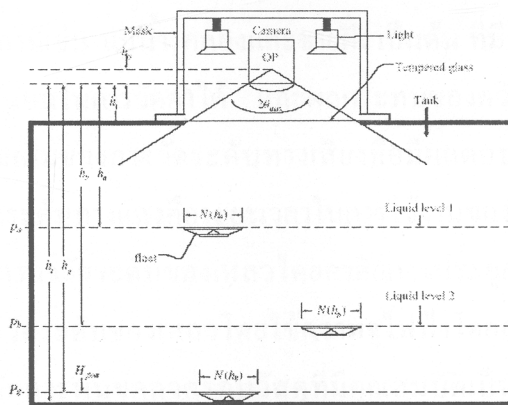
รูปที่ 1-1 รูปแบบการตรวจวัดเทคนิคของ Acoustical gas resonator[1]

เทคนิค LEDs และ โฟโตทรานซิสเตอร์ (phototransistors) วางกั้นระดับน้ำโดยทำมุมเอียงกัน เมื่อมีระดับของเหลวมีการเปลี่ยนแปลง แสงจาก LED ที่ส่องไปที่โฟโตทรานซิสเตอร์ผ่านของเหลวเกิดการเบี่ยงเบนซึ่งทำให้สามารถตรวจวัดระดับของเหลวได้ นอกจากนี้สามารถนำไปใช้ในการวัดระดับของเหลวที่เป็นน้ำยังสามารถนำไปประยุกต์วัดระดับของเหลวที่ไวไฟ เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง แอลกอฮอล์ เป็นต้น



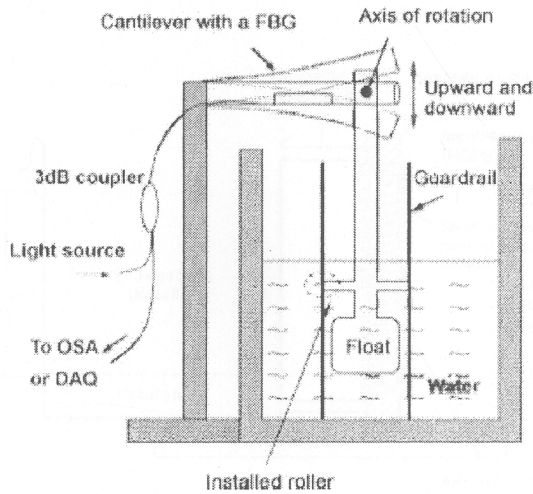
รูปที่ 1-2 รูปแบบการจัด LEDs และ phototransistors สำหรับวัดระดับของเหลว [2]

เทคนิคการวัดระดับของเหลวโดยใช้กล้องดิจิทัล ใช้หลักการถ่ายภาพลูกลอยทรงกลมในการใช้วัดระดับของเหลวในถัง [3] โดยใช้ลูกลอยที่มีสีแตกต่างกัน แล้วนำค่าพิกเซลที่ได้จากภาพมาคำนวณหาค่าระดับของเหลว สามารถนำมาวัดระดับของเหลวที่เป็นสารกักคร่อน วัดระดับของเหลวที่มีเนื้อสารแยกแตกต่างกัน หาปริมาตรของของเหลวได้ สามารถมองเห็นลักษณะของเหลวในถังได้ ภาพขณะที่ใส่ของเหลวมีรูปร่างลักษณะอย่างไรก็ไม่มีผลต่อการวัดระดับ



รูปที่ 1-3 การจัดตั้งกล้องและลูกลอยในการวัดระดับของเหลว [3]

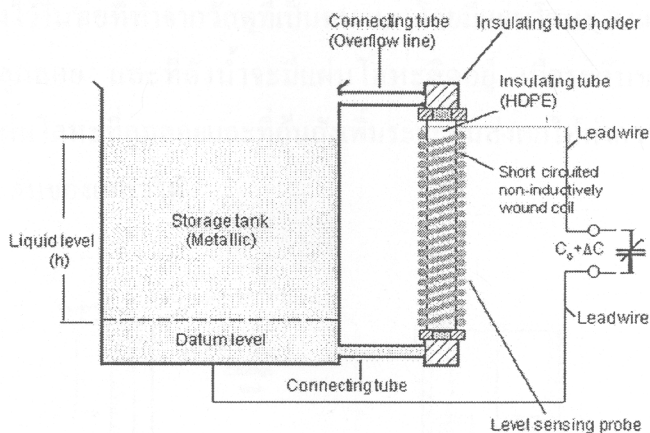
เทคนิคการใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่อาศัยหลักการพื้นฐานของ Fiber Bragg Grating (FBG) การใช้แขนกลขนาดเล็ก (Cantilever Beam) สำหรับวัดระดับน้ำ [4] เมื่อระดับน้ำมีการเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้เกิดความดันที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้แขนกลขนาดเล็กนี้เกิดการโค้งหรือเปลี่ยนรูปร่างแล้วจะทำให้ Fiber Bragg grating ที่ติดอยู่ที่แขนกลซึ่งไปทำให้แถบความถี่เชิงสเปกตรัมของการสะท้อนเกิดการเปลี่ยนแปลง มีความไวอยู่ที่ 0.1 dB/cm นอกจากนี้อุณหภูมิที่แตกต่างกันส่งผลต่อการวัดด้วย



รูปที่ 1-4 รูปแบบการจัดวาง FBG สำหรับวัดระดับน้ำ [4]

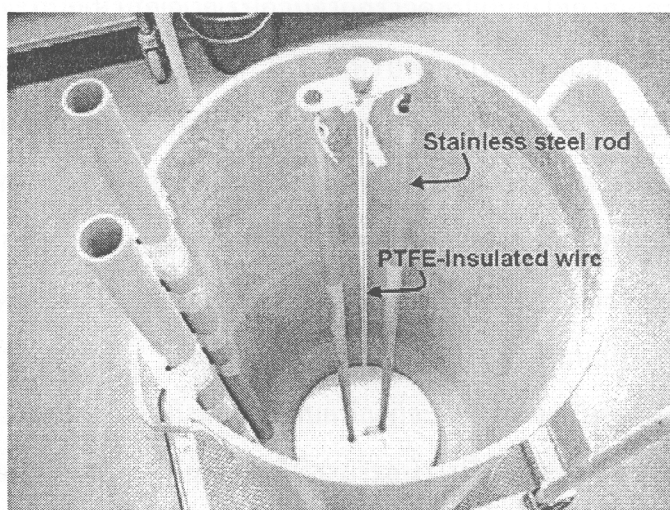
ข้อจำกัดของเทคนิคที่ใช้หลักการวัดระดับของเหลวทางเสียงหรือแสงจะมีเหมือนกันคือ ไม่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดระดับของเหลวที่ปนไปด้วยทราย ไม่สามารถนำมาใช้งานในระบบเปิด อาทิเช่น แม่น้ำ คลองและชายฝั่ง เป็นต้น ที่มีน้ำไหลหรือมีการกระเพื่อม จะส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนในการวัดค่าได้ และผลกระทบของคลื่น ผุ่นและไอน้ำจะมีผลต่อการวัด ส่วนข้อจำกัดเพิ่มเติมของการวัดระดับทางเสียงคือมีผลตอบสนองในเวลาที่ช้า ส่วนข้อจำกัดเพิ่มเติมของการวัดระดับทางแสงคือระยะเวลาในการใช้งานของวัสดุ

หลักการตรวจวัดระดับของเหลวโดยอาศัยการประยุกต์ค่าความจุไฟฟ้ามาใช้งาน อาทิเช่น เทคนิคการวัดระดับของเหลวโดยใช้ความจุไฟฟ้าโดยการวัดแบบหัววัดไม่สัมผัสของเหลว [5] โดยใช้หลักการพันขดลวดรอบวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนเชื่อมกับถังที่บรรจุของเหลว อาทิเช่น แก้ว เซรามิก พลาสติก เป็นต้น เมื่อมีระดับของเหลวในถังเปลี่ยนแปลงจะทำให้ระดับของเหลวบริเวณหัววัดเปลี่ยนแปลงไปด้วย ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป โดยวัดค่าความจุไฟฟ้าจากวงจรบริดจ์ De' Sauty ให้ผลค่าความเป็นเชิงเส้นและการทำซ้ำอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้



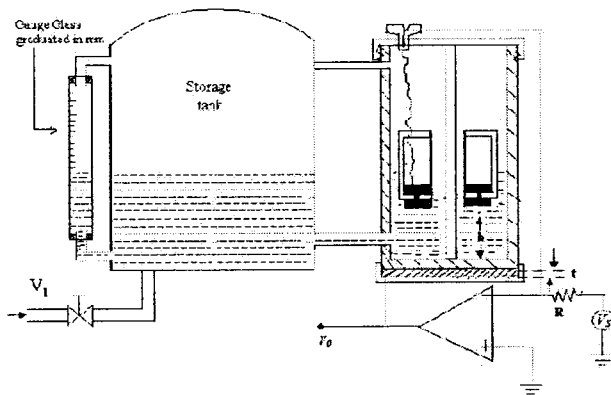
รูปที่ 1-5 รูปแบบการพันขดลวดเชื่อมกับถังที่บรรจุน้ำ [5]

เทคนิคการใช้หลักการวัดความจุไฟฟ้าโดยการต่อกราวด์กับขั้วไฟฟ้า [6] ขั้วไฟฟ้าทำจากโลหะ คือ แท่งสแตนเลสและเส้นลวดฉนวน PTEE ทดสอบวัดระดับของเหลวที่อยู่ในถังโลหะที่ต่อลงดินซึ่งจะได้ค่าที่ความจุไฟฟ้าเปลี่ยนไปตามระดับของเหลวที่เปลี่ยนไปในรูปเชิงเส้น ผลที่ได้ในวัดการระดับน้ำ 70 เซนติเมตร ความผิดพลาดของค่าความไม่เป็นเชิงเส้นน้อยกว่า 0.35 มิลลิเมตร และค่าความละเอียดมากกว่า 0.10 มิลลิเมตร



รูปที่ 1-6 การจัดวางแท่งสแตนเลสและเส้นลวดฉนวน PTEE ในถังน้ำ [6]

อีกเทคนิคการใช้การวัดระดับของเหลวอย่างต่อเนื่องในถังนำโดยการประยุกต์ใช้ลูกลอยไฟฟ้าวัดค่าความจุไฟฟ้า [7] โดยวิธีนี้จะประกอบลูกลอยมีลักษณะทรงกลมหรือทรงกระบอกถูกวางไว้ในท่อที่ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวน โดยมีแผ่นโลหะ 2 แผ่นที่ติดอยู่ด้านในและด้านนอกฐานของลูกลอย และที่ถังน้ำจะมีแผ่นโลหะติดอยู่ เมื่อระดับของเหลวเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะที่ลูกลอยและที่ก้นถังเพิ่มระยะขึ้นส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้สามารถทราบระดับของเหลวได้

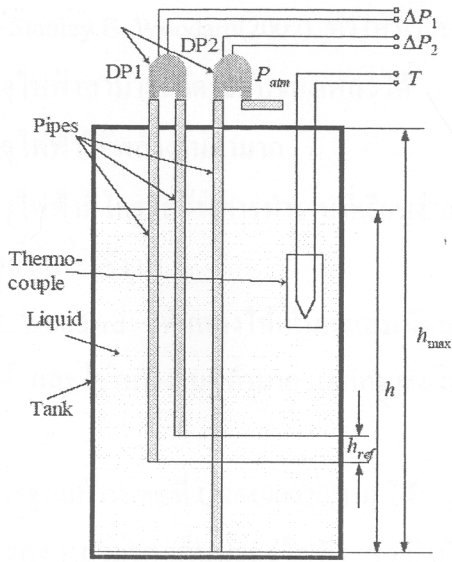


รูปที่ 1-7 รูปแบบการประยุกต์ใช้ลูกลอยไฟฟ้าวัดระดับของเหลว [7]

ข้อจำกัดของเทคนิคการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่กล่าวมาข้างต้น คือ ไม่สามารถนำไปใช้วัดระดับในระบบเปิดได้ อย่างเช่น แม่น้ำ คลอง และชายฝั่ง เป็นต้น สำหรับหลักการต่อกราวด์กับขั้วไฟฟ้าจะมีปัญหาสัญญาณรบกวนจากกราวด์ลูปและมีโอกาสเกิดการไม่เสถียรภาพได้ ถ้าออกแบบ Active shielding circuit ไม่ดี และสำหรับหลักการประยุกต์ลูกลอยวัดค่าความจุไฟฟ้าจะมีปัญหาอยู่ที่การเคลือบผิวโลหะหากทำการเคลือบไม่ดีจะส่งผลต่อค่าการวัด

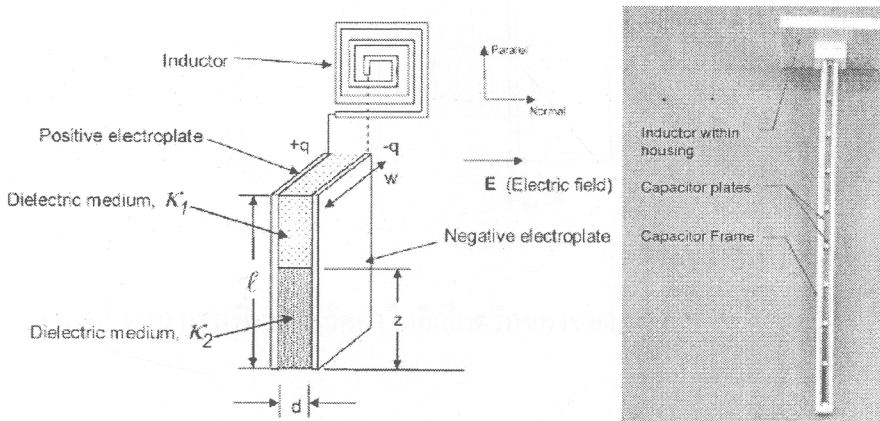
หลักการตรวจวัดระดับของเหลวแบบใช้หลักการของความดัน โดยใช้เทคนิคค่าความแตกต่างกันของความดันของเหลว [8] โดยอาศัยคุณสมบัติของความหนาแน่นและระดับของเหลว ใช้หัววัดความดัน 2 ตัว หัววัดตัวแรกสำหรับการเทียบระดับของเหลว และตัวที่สองสำหรับวัดระดับของเหลว โดยมีหัววัดอุณหภูมิสำหรับปรับเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เมื่อความดันของหัววัดทั้งสองเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้วัดระดับของเหลวในถังได้

ข้อจำกัดของเทคนิคนี้ คือ ไม่สามารถนำไปใช้วัดระดับในระบบเปิดได้ อย่างเช่น แม่น้ำ คลอง และชายฝั่ง เป็นต้น ต้องมีการปรับเทียบค่าอุณหภูมิก่อนทำการวัด



รูปที่ 1-8 การจัดวางหัววัดความดันในการวัดระดับของเหลว [8]

การตรวจสอบระดับของเหลวแบบไร้สายที่มีโครงสร้างคล้ายตัวเก็บประจุไฟฟ้า [9] โดยยกตัวอย่างการวัดของเหลวในระบบลอจิสติกส์ ซึ่งของเหลวถูกบรรจุในภาชนะที่อยู่ในตู้คอนเทนเนอร์ปิดทึบ ไม่มีแหล่งพลังงานในตัวเอง แต่ใช้วิธีสร้างพลังงานไฟฟ้าจากการเหนี่ยวนำของขดลวดวงจรกับคลื่นวิทยุที่ส่งมาจากเครื่องอ่านที่อยู่ภายนอก คล้ายกับการใช้งานระบบ RFID (Radio-frequency identification) เาท์พุทที่ได้จากเซนเซอร์จะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมา ซึ่งมีค่าความถี่แปรผกผันกับระดับของเหลว



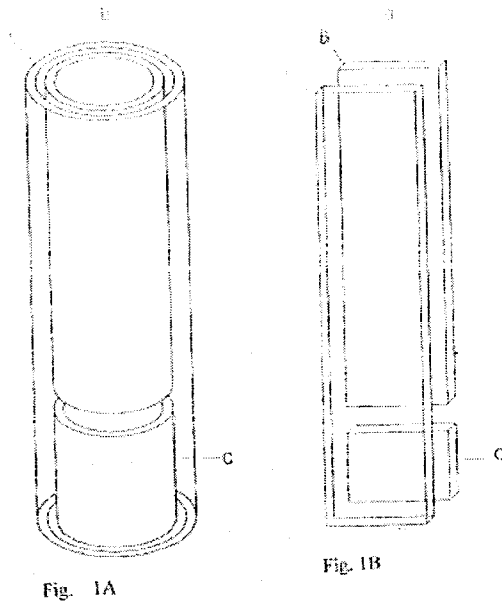
รูปที่ 1-9 เซนเซอร์วัดระดับน้ำไร้สาย ใช้หลักการเดียวกับตัวเก็บประจุไฟฟ้า [9]

จากการศึกษาผลงานวิจัยของ Stanley E. Woodard(2007) ทำให้ทราบว่า

- เซนเซอร์แบบเก็บประจุไฟฟ้าสามารถวัดระดับของเหลวได้
- เซนเซอร์แบบเก็บประจุไฟฟ้าใช้พลังงานต่ำมาก
- เซนเซอร์แบบเก็บประจุไฟฟ้ามีโครงสร้างการทำงานที่เรียบง่าย ขนาดเล็ก ไม่มีชิ้นส่วนทางกล ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและใช้งาน

แม้ผลงานวิจัยของ Stanley E. Woodard ได้แสดงให้เห็นคุณสมบัติของเซนเซอร์แบบเก็บประจุไฟฟ้าที่สามารถวัดระดับน้ำได้ และใช้พลังงานที่ต่ำมาก แต่ลักษณะโครงสร้างของโพรบยังมีความยุ่งยากในการประดิษฐ์

สิทธิบัตรสหรัฐอเมริกาเลขที่ US6490920[10] ได้รายงานให้ทราบปัญหาที่อาจเกิดจากการใช้หลักการวัดระดับของเหลวแบบเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งจำเป็นต้องมีส่วนที่ทำหน้าที่วัดค่าไดอิเล็กตริก(Dielectric) ของเหลวที่ทำการตรวจวัดด้วย ดังรูปที่ 1-10 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหรือชนิดของเหลว มีผลทำให้ค่าไดอิเล็กตริกของเหลวเปลี่ยนแปลงไป หากในระบบที่ทำการวัดไม่สามารถควบคุมให้มีค่าไดอิเล็กตริกของเหลวคงที่ได้ ค่าระดับของเหลวที่อ่านได้จากเซนเซอร์จะมีความผิดพลาด



รูปที่ 1-10 การเพิ่มส่วนวัดค่าไดอิเล็กตริกของของเหลว(ส่วน C)[10]

สำหรับการวิเคราะห์เปรียบเทียบสำหรับวงจรที่ใช้ตรวจวัดความจุไฟฟ้าอาศัยเทคนิคในการตรวจวัดหลายลักษณะ[11] เช่น เทคนิค RC oscillator เทคนิควงจร single ended

เทคนิคการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า และการใช้เทคนิค Synchronous demodulation สำหรับสัญญาณที่นำเข้ามาเทียบกับสัญญาณอ้างอิง ซึ่งได้เปรียบเทียบกับวงจรที่ใช้วัดความจุไฟฟ้า ลักษณะต่างๆเหล่านี้ดังในตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 เปรียบเทียบวงจรที่ใช้สำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้า เมื่อ 5 คือ ดีมาก 0 คือ ไม่ดี [11]

Circuit	Function	Sensitive to stray capacity	Sensitive to noise	Needs ADC	Bandpass filter available	Size	Sensitive to shunt resistor
DC	$volt=1/C$	yes	0	no	no	5	0
RC oscillator or 1-shot	$freq=1/RC$ $period=RC$	yes	0	no	no	4	0
IC oscillator (current-capacitance)	$freq=1/RC$ $period=RC$	yes	2	no	no	3	0
LC oscillator	$freq=1/\sqrt{LC}$	yes	3	no	yes	2	5
Sync., single ended	$volt \cong C_1 - C_2$ or $C_1 - C_2$	no	4	yes	yes	1	4
Sync., bridge	$volt \cong C_1 - C_2$ or $1/C_1 - C_2$	no	5	yes	yes	0	5

### สรุปการทบทวนวรรณกรรม

การทบทวนวรรณกรรมของการวัดระดับของเหลวขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่นำไปใช้ โดยสามารถที่จะจำแนกได้เป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ วิธีการตรวจวัดที่นำมาใช้ ความต่อเนื่องของสัญญาณในการวัด และการศึกษาวงจรที่นำมาใช้ตรวจวัดความจุไฟฟ้า

การตรวจวัดที่นำมาใช้ส่วนใหญ่จะจำแนกได้ 3 ส่วน คือ 1) แบบที่สัมผัสกับวัตถุ โดยที่ตัวเซนเซอร์ถูกจุ่มลงไปในวัตถุตลอดเวลา เช่น หลักการความแตกต่างของความดันของเหลว หรือเทคนิคการสร้างหัววัดเส้นใยแก้วนำแสง 2) แบบไม่สัมผัสวัตถุ ทำการวัดจากภายนอก เช่น เทคนิค Acoustical gas resonator การวัดความจุไฟฟ้าแบบหัววัดเชื่อมต่อกับตัวถัง หรือเทคนิคใช้ LEDs และโฟโตทรานซิสเตอร์ และ 3) แบบผสมเป็นการนำทั้งสองแบบมารวมกัน เช่น การใช้กล้องดิจิตอลร่วมกับลูกกลอย พบว่ามีส่วนหนึ่งที่อยู่กับวัตถุตลอดเวลาแต่อีกส่วนหนึ่งอยู่ภายนอก

สำหรับวงจรที่นำมาใช้ตรวจวัดความจุไฟฟ้ามีรูปแบบด้วยกันหลายเทคนิคด้วยกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่นำไปใช้ เช่น การประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์ De' Sauty กับหัววัดไม่สัมผัสน้ำที่ใช้หลักการพันขดลวดรอบวัสดุเชื่อมกับถังที่บรรจุน้ำ หรือการใช้เทคนิควงจรรูปแบบ switched-capacitors รวมถึงหลักการวัดค่าความจุไฟฟ้าจากเอาต์พุตของเซนเซอร์ด้วยหลัก RC Time Constance โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านค่าและประมวลผลข้อมูล เป็นต้น

สำหรับความต่อเนื่องของสัญญาณในการวัดของเซนเซอร์แบบต่างๆ แบ่งได้เป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ แบบต่อเนื่อง (continuous) โดยให้สัญญาณออกมาเป็นสัดส่วนกับความสูงของวัตถุที่อยู่ในถังตลอดเวลา เช่น การวัดค่าความจุไฟฟ้า และแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) เอาต์พุตที่ออกมาจากเซนเซอร์แบบนี้ทำงานที่สองสถานะคือ เปิดและปิด (หรือตัดกับต่อวงจร) แบบนี้จะใช้งานกับเครื่องควบคุมกระบวนการ เช่น เทคนิคใช้ LEDs และ โฟโตทรานซิสเตอร์

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- (1) วิจัยและพัฒนาเครื่องมือวัดต้นแบบสำหรับการตรวจวัดระดับน้ำที่เหมาะสมกับงาน
- (2) ศึกษาสภาวะแวดล้อมอย่างเช่น ความชื้น อุณหภูมิ การกักคร่อน เป็นต้นที่ส่งผลต่อการใช้งานเครื่องมือวัดต้นแบบ
- (3) ศึกษาสภาวะตอบสนองภาวะชั่วคราวในขณะน้ำหลากของเครื่องมือวัดต้นแบบ
- (4) ออกแบบวงจรในส่วนปรับแต่ง หรืออัลกอริทึมทางการประมวลสัญญาณ ให้เหมาะสมกับการส่งข้อมูล

### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

- (1) เซนเซอร์ต้นแบบสามารถตรวจวัดระดับของเหลวได้เป็นสัดส่วนกับค่าปริมาณความจุไฟฟ้า
- (2) เซนเซอร์ต้นแบบสามารถตรวจวัดระดับน้ำได้ถึง 35 เซนติเมตรที่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.5 เซนติเมตร
- (3) เซนเซอร์สามารถตรวจวัดระดับน้ำที่มีอุณหภูมิไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส ที่มีคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.5 เซนติเมตร
- (4) เทคนิคการตรวจวัดของเซนเซอร์ต้นแบบสามารถนำไปตรวจวัดระดับน้ำในระบบเปิดได้
- (5) การตอบสนองของเซนเซอร์สามารถนำไปตรวจวัดระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

## 1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

(1) ศึกษาข้อมูลการทำงานของเซนเซอร์วัดระดับของเหลวที่มีอยู่ในปัจจุบัน

วัตถุประสงค์ คือ ทำการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยของเซนเซอร์วัดระดับของเหลว เพื่อที่จะนำไปวางแผนในการสร้างเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก จากการศึกษาพบว่าได้มีการใช้เทคนิคตรวจวัดระดับของเหลวหลายๆ ประเภทที่มีรูปแบบการวัดปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ มาใช้ เช่น หลักการวัดความดัน คาปาซิแตนซ์ คลื่นอัลตราโซนิค เป็นต้น และตัวอย่างเซนเซอร์ที่มีใช้กันทั่วไปในปัจจุบัน เช่น เซนเซอร์ชนิดอัลตราโซนิค (Ultrasonic) และสวิตช์ลูกลอย เป็นต้น แต่อย่างไรก็ดีเซนเซอร์แบบต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วล้วนแต่มีข้อจำกัดทางด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านคุณสมบัติ ระบบการวัดระดับของเหลวที่อยู่ยาก ทั้งทางด้านราคาที่ยังค่อนข้างสูง เป็นต้น

### กรณีของการวัดระดับน้ำโดยใช้เทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

(2) ศึกษาคุณสมบัติของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

วัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาคูสมบัติพื้นฐานค่าความจุไฟฟ้าของรูปแบบของแผ่นอิเล็กโทรดที่เป็นกึ่งทรงกระบอก สร้างและออกแบบให้มีรูปแบบเป็นท่อทรงกระบอกกลวงทำจากวัสดุที่เป็นฉนวน และมีอิเล็กโทรดเป็นแผ่นกึ่งทรงกระบอกทำจากตัวนำไฟฟ้า ปัจจุบันหลักการวัดค่าความจุไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นการศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับรูปแบบของแผ่นอิเล็กโทรดที่เป็นแบบทรงกระบอกสำหรับใช้ในการตรวจวัดระดับของเหลว แต่รูปแบบแผ่นอิเล็กโทรดที่เป็นแบบกึ่งทรงกระบอกยังไม่ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ ดังนั้นเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกที่ใช้สำหรับวัดระดับของเหลวจะเป็นรูปแบบแรกที่มีโครงสร้างที่แตกต่างไปจากเดิม

(3) ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระดับของเหลว

ทำการทดสอบและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง วัดค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน นำผลที่ได้จากการวัดมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยใช้โปรแกรม MATLAB รวมทั้งการทดลองเพื่อศึกษาคูสมบัติบางประการ เช่น ค่าความเป็นเชิงเส้น ค่าการทำซ้ำ และค่า Hysteresis

(4) ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระยะห่างของแผ่นอิเล็กโทรด ทำการทดสอบและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน วัดค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบ

(5) ศึกษาออกแบบในส่วนของภาคประมวลผลสัญญาณ วัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาร่างและออกแบบในส่วนของภาคประมวลผลสัญญาณ นำมาตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้หลักการพื้นฐานของวงจรบริดจ์มาประยุกต์ใช้กับเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

(6) ศึกษาการใช้โปรแกรม LabVIEW ในการเก็บข้อมูล วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้งาน LabVIEW เพื่อนำมาวัดค่าความจุไฟฟ้าแสดงผลบนโปรแกรม LabVIEW เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง และศึกษาคุณสมบัติบางประการ เช่น ค่าความเป็นเชิงเส้น ค่าการทำซ้ำ ค่าการไม่แน่นอนของการวัด (uncertainty) และค่า Hysteresis

(7) ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้ากับของเหลวในระบบเปิด วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับของเหลวต่างชนิดกัน ในที่นี้ทำการศึกษาของเหลว 3 ชนิด คือ น้ำดื่ม น้ำคลองและน้ำทะเล

(8) ศึกษาสภาวะแวดล้อมอื่นๆที่มีผลต่อการตรวจวัด วัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาผลของสภาวะแวดล้อมต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อตรวจวัด ศึกษาผลของอุณหภูมิโดยทำการวัดค่าอุณหภูมิไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส เนื่องจากไม่ได้นำไปใช้ในส่วนของการที่ต้องการอุณหภูมิที่มีค่ามาก และศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่างๆ ในช่วงเวลาที่ต่างกัน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

(9) ศึกษาผลตอบสนองในเวลา

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลตอบสนองของเวลาที่มีต่อเซนเซอร์ เมื่อมีการเปลี่ยน

แปลงระดับของเหลวแบบจับปล้น โดยแบ่งกรณีศึกษาเป็น 2 กรณี คือ เมื่อเซนเซอร์เคลื่อนที่ผ่านของเหลว โดยนำเซนเซอร์เคลื่อนที่ขึ้นลงจากของเหลวผ่านโฟโต้เกต (Photogate) ศึกษาความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้ากับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ และเมื่อของเหลวเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์ โดยออกแบบการทดลองโดยใช้หลักการทางชลศาสตร์เพื่อจำลองสภาวะการเปลี่ยนแปลงน้ำอย่างรวดเร็วในรางเปิด ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ รวมทั้งการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติบางประการ เช่น ค่าเวลาที่ล่าช้า (Dead time) และเวลาสู่จุดสมดุล (Settling time)

(10) ตรวจสอบสรุป วิเคราะห์ผลและจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

**กรณีของการวัดระดับน้ำโดยใช้เซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอล**

(11) ศึกษาคุณสมบัติของความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเตอร์ดิจิตอล

วัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานค่าความจุไฟฟ้าของรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์อินเตอร์ดิจิตอล โดยจัดสร้างและออกแบบให้รูปแบบแผ่นพิมพ์วงจรให้มีลักษณะคล้ายซีพวี และศึกษาถึงขนาด และรูปแบบที่เหมาะสมในการตรวจวัดระดับน้ำ โดยความจุไฟฟ้าแผ่นพิมพ์คล้ายซีพวีที่ใช้สำหรับวัดระดับของเหลวจึงเป็นวิธีการใหม่ในการตรวจวัดระดับน้ำ

(12) ศึกษาความสัมพันธ์ของอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเตอร์ดิจิตอลกับระดับน้ำ

ทำการทดสอบและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเตอร์ดิจิตอลกับระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลง วัดค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ดิจิตอลที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน นำผลที่ได้จากการวัดมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยใช้โปรแกรม COMSOL และสมการทางคณิตศาสตร์ รวมทั้งการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติบางประการ เช่น ค่าความเป็นเชิงเส้น ค่าความแน่นอนการวัด และค่าความผิดในการวัด

(13) ศึกษาออกแบบในส่วนของภาคประมวลผลสัญญาณ

วัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาสร้างและออกแบบในส่วนของภาคประมวลผลสัญญาณ นำมาตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้หลักการจับเวลาคายประจุนำมาประยุกต์ใช้กับอิเล็กทรอนิกส์อินเตอร์ดิจิตอลแทนวงจรปรับสภาพสัญญาณ

(14) ศึกษาการวัดระดับน้ำในกรณีต่างๆ

วัตถุประสงค์เพื่อทำการผลกระทบจากการวัดความจุไฟฟ้าของแผ่นวงจรพิมพ์ลาย  
ซีหวี เมื่อใช้หัววัดวัดระดับน้ำที่ไม่ใช่แบบปริสสุทรี รวมถึงการนำหัววัดไปวัดระดับน้ำที่มีอุณหภูมิ  
ต่างๆเปลี่ยนแปลงไป โดยทำการศึกษาจากค่าไดอิเล็กตริกของน้ำ และหาวิธีการลดความผิดพลาด

(15) ศึกษาการวัดระดับน้ำในสถานะที่มีการไหลของน้ำ

วัตถุประสงค์เพื่อหาค่าผิดพลาดในการวัดระดับน้ำ เมื่อใช้หัววัดระดับน้ำที่มีการ  
กระเพื่อมเนื่องจากการไหลของน้ำ หาวิธีการลดความผิดพลาด รวมถึงการหาผลตอบสนองเวลา  
ของหัววัดขณะน้ำไหล

(16) ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของวัสดุ

วัตถุประสงค์เพื่อหาผลกระทบที่จะเกิดกับเซนเซอร์ เมื่อวัสดุมีการเสื่อมสภาพ  
หรือเกิดข้อผิดพลาดจากการผลิต เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์สาเหตุเมื่อเกิดข้อผิดพลาดในการ  
วัดระดับน้ำของเซนเซอร์ นำไปสู่การแก้ไขและป้องกันที่ถูกต้องต่อไป

(17) ศึกษาการใช้พลังงานของเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอล

วัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบอัตราการใช้พลังงานของเซนเซอร์ที่โหมดการทำงาน  
ต่างๆ สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการหาระยะเวลาทำงานของเซนเซอร์ เมื่อต้องใช้แหล่งจ่ายไฟจาก  
แบตเตอรี่

(18) ศึกษาผลการรับส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

วัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความเข้ากันได้ของเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเตอร์  
ดิจิตอลที่ได้การออกแบบ กับ โมดูลสื่อสารไร้สาย U-node

(19) ตรวจสอบสรุป วิเคราะห์ผลและจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

ในงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการวัดระดับน้ำที่ใช้หลักการแบบต่างๆ ในบทนี้ ผู้วิจัยได้แบ่งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังต่อไปนี้ 1) หลักการพื้นฐานของการวัดระดับของเหลว 2) หลักการพื้นฐานการหาค่าความจุไฟฟ้า 3) รูปแบบของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก 4) การออกแบบวงจรสำหรับเซนเซอร์

#### 2.1 หลักการพื้นฐานของการวัดระดับ

การวัดระดับของของเหลวมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตหลายๆ อย่าง กระบวนการทางวิทยาศาสตร์หรือแม้กระทั่งในชีวิตประจำวัน เช่น การวัดระดับน้ำในถังเก็บน้ำ การวัดระดับน้ำในแม่น้ำ การวัดปริมาณของนม เบียร์ ในประเภทอุตสาหกรรมทางอาหารและเครื่องดื่ม การวัดปริมาณของน้ำมันในประเภทอุตสาหกรรมน้ำมัน เป็นต้น จากการใช้งานในประเภทต่างๆ พบว่า ระดับของวัตถุที่ต้องการวัดไม่จำเป็นว่าต้องเป็นเนื้อเดียวกัน และสามารถแบ่งเซนเซอร์วัดระดับโดยดูความต่อเนื่องของสัญญาณต่อเวลาก็พบว่ามีอยู่ 2 แบบใหญ่ๆ ได้แก่

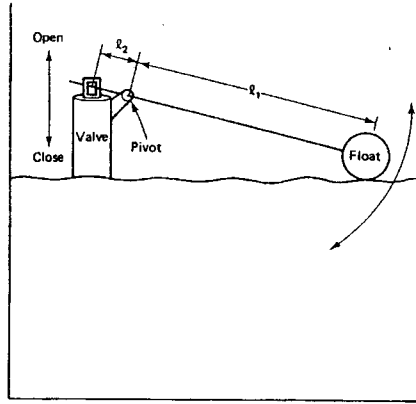
1. แบบต่อเนื่อง (continuous) จะให้สัญญาณออกมาเป็นสัดส่วนกับความสูงของวัตถุที่อยู่ในถังตลอดเวลา เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าการเก็บประจุ เป็นต้น
2. แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) เอาต์พุตที่ออกมาจากเซนเซอร์แบบนี้ทำงานที่สองสถานะ คือ เปิดและปิด (หรือตัดกับต่อวงจร) ลักษณะของงานจะนำไปใช้กับเครื่องควบคุมกระบวนการได้ง่ายกว่า ตัวอย่างของเซนเซอร์แบบนี้ ได้แก่ สวิตช์ลูกลอย หลักการอิเล็กทรอนิกส์ตัวนำ เป็นต้น

##### 2.1.1 อุปกรณ์ตรวจวัดระดับตามหลักการทางกายภาพ

ในการแบ่งอุปกรณ์เซนเซอร์แบบนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ

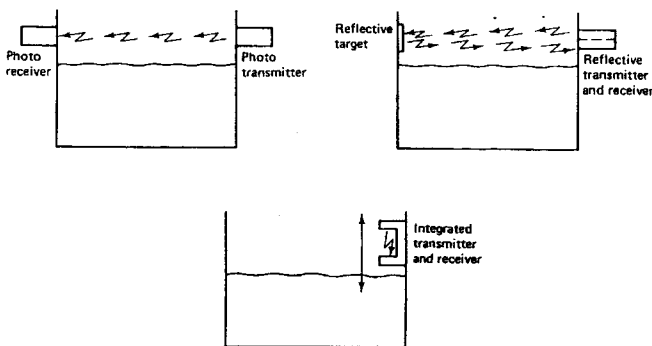
1. อุปกรณ์วัดระดับทางกล (Mechanical Sensor) โดยทั่วไปได้แก่ สวิตช์ลูกลอยตัวอย่างการใช้งานของสวิตช์แบบลูกลอย เช่น ในถังชักโครกซึ่งใช้ลูกลอยเป็นตัวปิดเปิดวาล์วถังเก็บน้ำประปา เป็นต้น หลักการทำงานของลูกลอยจะพบว่าตำแหน่งของวาล์วจะเป็นสัดส่วนกับระดับน้ำ นั่นคือ หากระดับน้ำต่ำลงลูกลอยจะตกลงและเปิดวาล์ว เมื่อระดับน้ำสูงขึ้นลูกลอยจะ

ลอยขึ้นไปผลักให้วาล์วปิด หลักการทำงานจะเห็นว่าแขนและจุดหมุน (pivot) เป็นระบบการขยายแรงทางกล แรงที่จ่ายให้กับลูกลอยแล้วมีผลต่อวาล์วจะเป็นผลมาจากแฟกเตอร์ของ  $l_1$ ,  $l_2$  ดังแสดงในรูปที่ 2-1



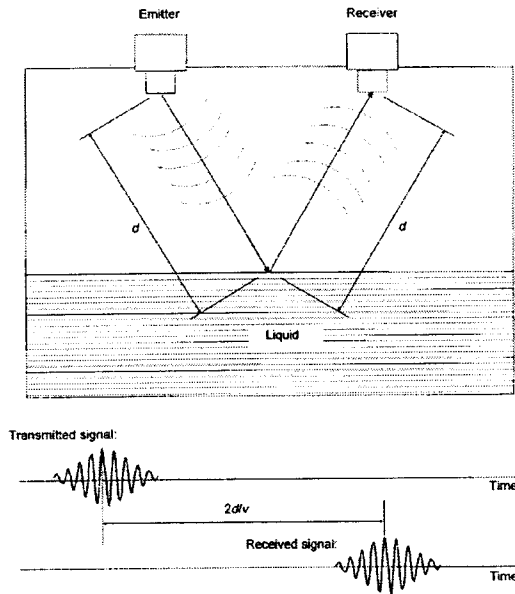
รูปที่ 2-1 การใช้ลูกลอยเพื่อขับวาล์วในระบบควบคุม [12]

2. อุปกรณ์วัดระดับทางเสียงหรือแสง (Ultrasonic or Photo Detection) ปกติ อุปกรณ์ส่งแสงจะใช้ไดโอดเปล่งแสงในการปล่อยแสงอินฟราเรดผ่านเลนส์ทำให้ลำแสงกระจายออก ส่วนอุปกรณ์ตัวรับจะเป็นอุปกรณ์ประเภททรานซิสเตอร์ไวแสง แสงที่ถูกส่งออกไปจะต้องกรองเพื่อให้ได้เฉพาะความถี่แสงที่จะทำการตรวจจับเท่านั้น เมื่อระดับวัตถุอยู่ต่ำกว่าตัวเซนเซอร์ แสงจะส่งไปกระทบกับตัวรับแสงทำให้โฟโตทรานซิสเตอร์อิ่มตัวและให้ลอจิกต่ำออกมา เมื่อระดับของวัตถุขึ้นไปบังแสง โฟโตทรานซิสเตอร์ก็จะปิด ดังรูปที่ 2-2 ในสภาวะที่ใช้กับไฟกระแสดตรงต้องต่อตัวต้านทานดึงค่าขึ้น (pull-up) ระหว่างคอลเลกเตอร์เปิด (open collector) ของโฟโตทรานซิสเตอร์ เพื่อให้ระดับของแรงเคลื่อนที่ออกมาอยู่ในสภาวะลอจิกสูงแต่โดยทั่วไปที่ตัวรับจะใช้ทรานซิสเตอร์ไวแสงมากกว่าที่จะใช้โฟโตทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2-2 เครื่องมือวัดระดับน้ำแบบไม่ต่อเนื่อง [13]

ส่วนการวัดระดับที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกมีหลักการว่าวัตถุจะไม่สัมผัสกับตัววัด ใช้หลักการในการสะท้อนของพัลส์อัลตราโซนิกที่ผิวของวัตถุ การทำงานด้วยวิธีแบบนี้คือ เมื่อสัญญาณอัลตราโซนิกถูกส่งออกไป เาต์พุตของโมดูลดังกล่าวก็จะเป็นสัญญาณพัลส์ แล้วรับเอาสัญญาณดังกล่าวที่สะท้อนกลับมาวิเคราะห์ สัญญาณพัลส์ดังกล่าวสามารถตรวจวัดได้โดยใช้ตัวนับ ซึ่งจะต้องวัดเวลาระหว่างพัลส์ที่ส่งออกไปและที่สะท้อนเข้ามายังตัวรับดังรูปที่ 2-3 พบว่าคลื่นอัลตราโซนิกจะมีความเร็วเท่ากับความเร็วของเสียง เมื่อทราบค่าความเร็วคลื่นและเวลาแล้วก็สามารถจะทราบระยะที่ไปยังผิวได้

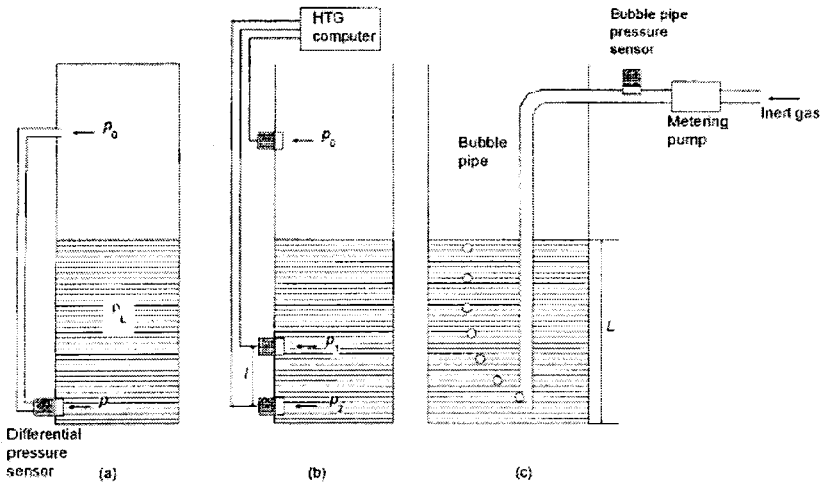


รูปที่ 2-3 วิธีการวัดระดับน้ำด้วยคลื่นอัลตราโซนิก [14]

3. อุปกรณ์วัดระดับแบบใช้หลักการของความดัน ในการควบคุมกระบวนการส่วนใหญ่ ระบบการวัดจะต้องมีความเที่ยงตรง หรือการบอกระดับในถังที่เป็นเชิงเส้น พบว่าความดันที่ก้นถังจะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับระดับของเหลวในถังที่เรียกว่า “เฮด” (pressure head or static head) ดังนั้นสามารถวัดระดับของของเหลวในถังได้โดยการวัดความดันที่ก้นถัง ข้อควรพิจารณาในการวัดระดับแบบนี้คือ

- (1) ของเหลวจะต้องมีคุณสมบัติเดียวกันตลอด (uniform) คือ มีความหนาแน่นคงที่
- (2) หากไม่สามารถติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ก้นถังได้ จะต้องใช้วงจรปรับสภาพสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อทำการบวกหรือลบค่าออฟเซตบางตัวออกเพื่อให้ได้จุดศูนย์ที่ถูกต้อง

(3) หากใช้ความดันด้านล่างของถังเป็นตัวบอกระดับ ในขณะที่ถังเปิดออกสู่บรรยากาศก็สามารถใช้สมการเสถียรพื้นฐาน หรือในขณะนี้ทรานสดิวเซอร์ก็จะกลายเป็นเกจวัดความดัน(เทียบกับความดันบรรยากาศ) แต่หากถังดังกล่าวถูกซีลหมด ความดันด้านล่างก็จะไม่แปรผันตามค่าเสถียรนั้นเพียงอย่างเดียว โดยจะแปรไปตามความดันด้านบนด้วย



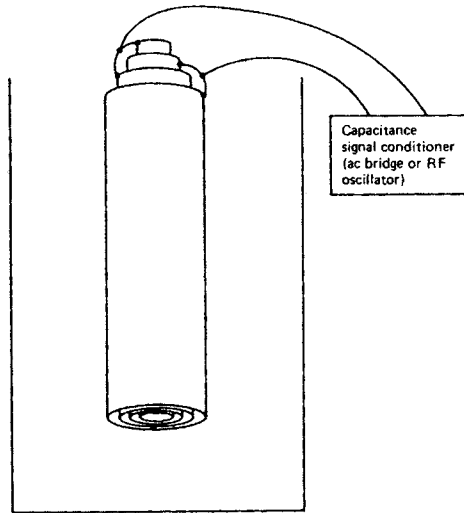
รูปที่ 2-4 การวัดระดับน้ำโดยใช้การตรวจวัดความดัน [15]

4. วิธีการวัดทางไฟฟ้าที่ให้สัญญาณต่อเนื่อง หากตัดแปลงสวิตช์ลูกลอย ซึ่งเป็น การวัดระดับน้ำทางกล แล้วแทนที่วาล์วด้วยการสไลด์ของแกน โพเทนชิโอมิเตอร์แบบเชิงเส้นเพื่อ ประยุกต์ใช้งานอื่นๆ ได้ เมื่อระดับเปลี่ยนแปลงคือเคลื่อนที่ขึ้นบนหรือลงล่างทำให้แกนของ โพเทน ชิโอมิเตอร์เลื่อนตาม หรืออาจจะใส่เฟืองเข้าไปเพื่อทำการเปลี่ยนการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแกนคือ  $I_2$  ไปเป็นการเคลื่อนที่แบบวงกลมเพื่อไปหมุนแกนของ โรตารีโพเทนชิโอมิเตอร์อีกตอนหนึ่ง

คอนดักแตนซ์โพรบ (Conductance probe) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดระดับ ของของเหลวอีกชนิดหนึ่งที่อาศัยพื้นฐานของสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตาม ระดับความสูงของของเหลว สภาพแวดล้อมภายนอกกระบวนการเช่น การกักคร่อน หรืออุณหภูมิ รอบข้าง รวมไปถึงสภาพความนำไฟฟ้าของของเหลวที่ต้องการตรวจวัดเป็นปัจจัยสำคัญที่ จำเป็นต้องพิจารณาถึงเมื่อคอนดักแตนซ์โพรบไปใช้งาน และสิ่งสำคัญที่สุดก็คือ หากของเหลวที่ ตรวจสอบมีคุณสมบัติเป็นสารจำพวกไวไฟแล้ว การใช้งานคอนดักแตนซ์โพรบจึงควรมีฝาปิด มิดชิดเพื่อป้องกันประกายฟ้าอันเกิดจากการต่อวงจรของหน้าสัมผัส

คาปาซิแตนซ์โพรบคือเซนเซอร์อีกแบบหนึ่งที่นำเอาหลักการทำงานพื้นฐานของ ตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดระดับของของเหลวในถังบรรจุ ทั่วไปพบว่านิยมใช้ ในการวัดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องบิน สำหรับคาปาซิเตอร์โพรบนี้ประกอบด้วยท่อตัวนำ

ทรงกระบอก 2 ท่อวางสอดซ้อนกันทำหน้าที่เสมือนกับตัวเก็บประจุทางไฟฟ้าดังแสดงรูปที่ 2-5 เห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนของระดับของเหลวในถัง โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน ผลจากการแปรค่าความจุไฟฟ้านี้เองสามารถนำไปสร้างให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์แสดงผล หรือเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมระบบได้



รูปที่ 2-5 ทรานสดิวเซอร์วัดระดับแบบการเก็บประจุ [16]

## 2.2 หลักการพื้นฐานการหาค่าความจุไฟฟ้า

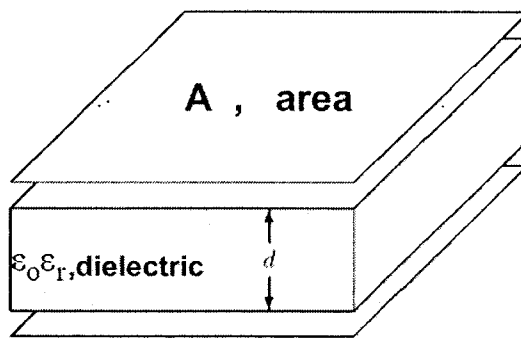
การหาค่าความจุไฟฟ้าอย่างง่ายสามารถหาได้จากแผ่นโลหะอย่างน้อยสองแผ่นมีฉนวนหรือไดอิเล็กตริกกั้นกลางอยู่ ดังรูปที่ 2-6 สามารถคำนวณหาได้จากสมการของตัวเก็บประจุแผ่นเพลตแบบขนานได้ คือ

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2-1)$$

- เมื่อ
- $\epsilon_0$  คือ ค่า permittivity of free space มีเท่ากับ 8.85 (pF/m)
  - $\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก
  - A คือ พื้นที่ของแผ่นโลหะ (ตารางเมตร)
  - d คือ ระยะห่างน้อยที่สุดของช่องว่าง (เมตร)

ตารางที่ 2-1 ตัวอย่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง ( $25^{\circ}\text{C}$ ) [11]

วัสดุ(Material)	ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant : $\epsilon_r$ )
Air	1.00054
Alumina ceramic	8-10
Benzene	2.28
Carbon tetrachloride	2.23
Paper	3.5
Polyvinyl chloride	4.55
Paraffin	2.0-2.5
Methanol	32.63
Nylon	3.5-5.4
Pyrex Glass(7070)	4.0
Rubber(silicone)	3.2
Teflon	2.04
Vacuum	1.0
Water	78.5

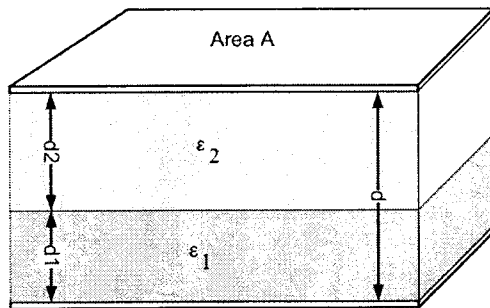


รูปที่ 2-6 ตัวเก็บประจุแผ่นเพลตแบบขนาน

สำหรับกรณีมีไดอิเล็กตริกหลายชนิดกั้นกลางอยู่ในระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า สามารถหาค่าความจุไฟฟ้าได้โดยเปรียบเสมือนว่ามีค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากไดอิเล็กตริกต่างชนิดที่ต่อแบบอนุกรม ดังรูปที่ 2-7 เมื่อมีไดอิเล็กตริก 2 ชนิดกั้นกลางระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า โดยมี

ไดอิเล็กตริกตัวแรก  $\epsilon_1$  มีความหนาเป็น  $d_1$  ส่วนไดอิเล็กตริกตัวที่สอง  $\epsilon_2$  มีความหนาเป็น  $d_2$  เมื่อความหนาทั้งหมดเท่ากับผลรวมของความหนา  $d$  ของไดอิเล็กตริกแต่ละชั้น สามารถหาค่าความจุไฟฟ้าได้จากสมการ

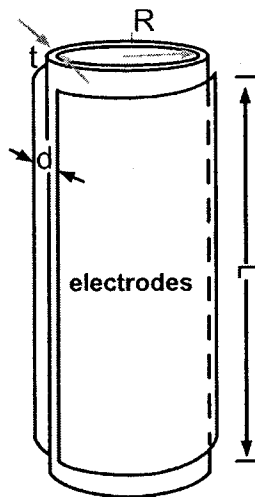
$$C = \frac{1}{\frac{d_1}{\epsilon_1 A} + \frac{d_2}{\epsilon_2 A}} \quad (2-2)$$



รูปที่ 2-7 กรณีมีไดอิเล็กตริกกั้นกลาง 2 ตัว

### 2.3 รูปแบบของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

ลักษณะของเซนเซอร์สำหรับวัดระดับของเหลวที่อาศัยเทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกแสดงดังรูปที่ 2-8 โดยรูปแบบของเซนเซอร์มีท่อทรงกระบอกกลวงที่ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวน คือ Polyvinyl chloride(PVC) , เทฟลอน เป็นต้น สำหรับแผ่นอิเล็กโตรดที่เป็นแผ่นกึ่งทรงกระบอกจะทำจากอลูมิเนียมมาห่อหุ้มท่อทรงกระบอก



รูปที่ 2-8 ลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์

### 2.3.1 กรณีมีไดอิเล็กตริกเป็นอากาศ

สำหรับการวิเคราะห์ค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกกรณีที่โครงสร้างเซนเซอร์เมื่อไม่มีของเหลวเป็นไดอิเล็กตริก แต่แผ่นกึ่งทรงกระบอกสำหรับคิดแผ่นโลหะมีความหนาของวัสดุที่ใช้คิดแผ่นโลหะเท่ากับ  $t$  ดังนั้นจากมุมมองด้านบนของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกเมื่อไม่มีของเหลวเป็นไดอิเล็กตริกดังแสดงรูปที่ 2-9 a โดยที่แผ่นโลหะทั้งสองของแบบกึ่งทรงกระบอกจะมีรัศมีเท่ากับ  $R$  และมีช่องว่างน้อยที่สุดเท่ากับ  $d$  ดังนั้นในการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกจะประยุกต์โดยใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข [17] โครงสร้างของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกที่ใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขดังแสดงรูปที่ 2-9 b โดยแบ่งแผ่นโลหะ 2 แผ่นที่อยู่ในรูปกึ่งทรงกระบอกของตัวเก็บประจุให้เป็นจำนวน  $n$  แผ่นซึ่งมีระยะห่างระหว่างแผ่นเพิ่มขึ้นเป็น  $\Delta d$  สมการวิเคราะห์หาค่าความจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะ 2 แผ่นเล็กๆมีระยะห่างกันประมาณ  $d$  และพื้นที่เล็กๆ  $A$  แสดงได้ดังสมการที่ (2-3)

$$C = \int_0^a dc = \int_0^a \frac{\epsilon_0 \times a \times dx}{d + x\theta}$$

$$= \frac{\epsilon_0 \times \epsilon_1 \times A}{d} \left[ 1 - \frac{a\theta}{d} \right] \quad (2-3)$$

ถ้าคิดเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกมีขนาดใหญ่มาก ( $d \gg \theta$ ) ความจุไฟฟ้าในสมการที่(2-3) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

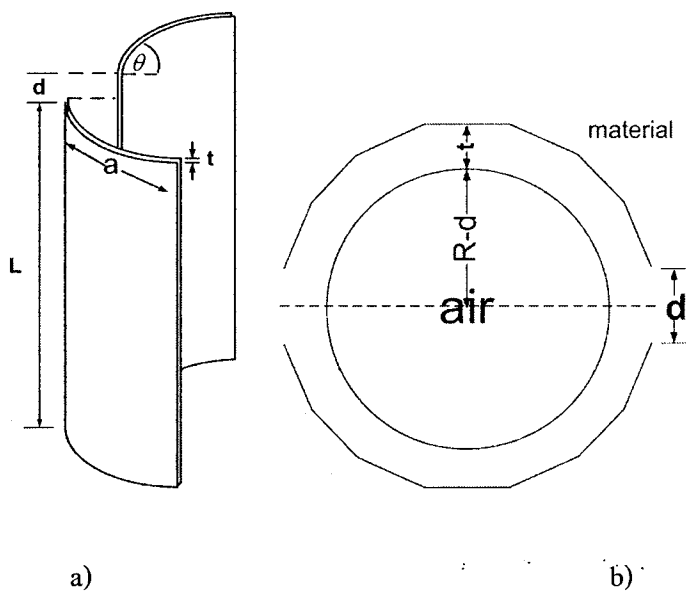
$$C = \left[ \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 A}{d} \right] \quad (2-4)$$

ดังนั้นค่าระยะห่างระหว่าง  $d$  ของแผ่นโลหะทั้งสองที่น้อยที่สุดจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการใช้ในคำนวณวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

สำหรับแผ่นคู่ขนานเล็กๆสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าได้โดยเปรียบเสมือนมีค่าความจุไฟฟ้าระหว่างตำแหน่ง A และ B ที่เกิดจากค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้ทำท่อ และค่าไดอิเล็กตริกภายในท่อซึ่งในที่นี้คือ อากาศ แสดงในรูปวงจรสมมูลของค่าความจุไฟฟ้าที่ต่ออนุกรมกันดังที่แสดงในรูปที่ 2- 10 โดยใช้สมการที่ (4) สามารถหาผลรวมของความจุไฟฟ้าจากแผ่น

คู่ขนานแบบกึ่งทรงกระบอกจำนวน  $n$  แผ่นเล็กๆที่แสดงในรูปวงจรมูลของค่าความจุไฟฟ้าดัง  
ในรูปที่ 2-11 ได้เป็น

$$C_1 = \sum_{n=1}^N \left( \frac{1}{C_{\text{air}}} + \frac{1}{C_m} \right) \quad (2-5)$$



รูปที่ 2-9 โครงสร้างการคำนวณของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

a) มุมมองด้านบนสำหรับการคำนวณ

b) โครงสร้างในการคำนวณแสดงการแบ่งแผ่นโลหะแต่ละแผ่น

โดยที่ค่าความจุไฟฟ้าส่วนของขอบ คือ

$$C_{m_1}, C_{m_2}, \dots, C_{m_{n-1}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_m A}{t}, C_{m_N} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_m A}{2t} \quad (2-6)$$

โดยที่ค่าความจุไฟฟ้าส่วนของอากาศ คือ

$$C_{\text{air}_1}, C_{\text{air}_2}, \dots, C_{\text{air}_{n-1}} = \frac{\epsilon_0 A}{\frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + \frac{d + 2(n-1)\Delta d}{\epsilon_a}}, C_{\text{air}_N} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_a A}{2(R-t)} \quad (2-7)$$

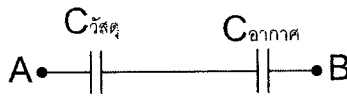
โดยที่ค่าพื้นที่หน้าตัดและระยะห่างที่เพิ่มขึ้น ( $A, \Delta d$ ) สามารถหาได้จาก

$$A = aL = \left( \frac{\pi R - d}{n} \right) L \quad \text{และ} \quad \Delta d = \left( \frac{2R - d}{2n} \right)$$

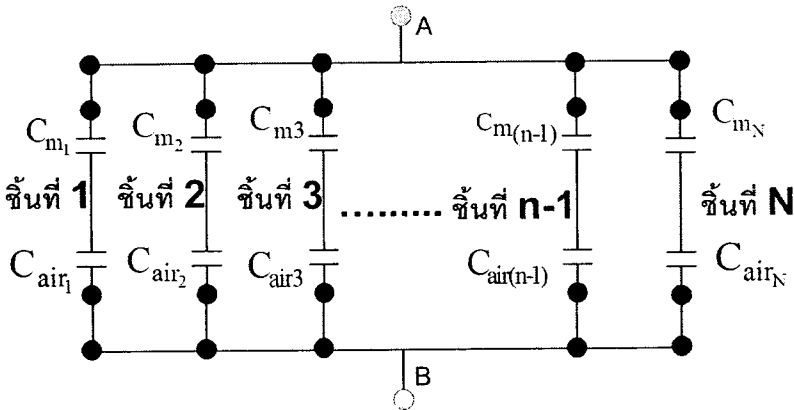
เขียนสมการที่ (2-5) ได้ใหม่

$$C_1 = \epsilon_0 \left( \frac{\pi R - d}{N} \right) (L - h) \left( 2 \sum_{n=1}^N \left( \frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + \frac{d + 2(n-1)\Delta d}{\epsilon_{air}}} \right) + \frac{1}{\frac{2t}{\epsilon_m} + \frac{2(R-t)}{\epsilon_{air}}} \right) \quad (2-8)$$

จากสมการพบว่าเมื่อกำหนดให้ค่าระยะห่างของแผ่นโลหะมีค่าคงที่ ค่าความจุไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดความสูงของเซนเซอร์



รูปที่ 2-10 วงจรของค่าความจุไฟฟ้าเล็กๆสำหรับแผ่นคู่ขนานแบบกึ่งทรงกระบอก



รูปที่ 2-11 วงจรสมมูลของค่าความจุไฟฟ้ารวมสำหรับแผ่นคู่ขนานแบบกึ่งทรงกระบอก

### 2.3.2 กรณีมีไดอิเล็กทริกเป็นอากาศกับของเหลว

โครงสร้างเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก ดังรูปที่ 2-12 พบว่าค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์จะแบ่งเป็นความจุไฟฟ้าที่ได้จากของเหลวรวมกับความจุไฟฟ้าที่เป็นอากาศ นั่นคือ ความจุไฟฟ้าของทั้งสองต่อกันแบบขนาน โครงสร้างสำหรับใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขดังแสดงรูปที่ 2-13 และแสดงการต่อกันดังวงจรสมมูลที่แสดงในรูปที่ 2-14 โดยกรณีไดอิเล็กทริกเป็นของอากาศจะมีขนาดความสูงเท่ากับ  $L - h$  และส่วนไดอิเล็กทริกที่เป็นของเหลวมีขนาดความสูงเป็น  $h$  สามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าได้จากสมการดังนี้

$$C = \sum_{n=1}^N \left[ \left( \frac{1}{C_w} + \frac{1}{C_m} \right) + \left( \frac{1}{C_{air}} + \frac{1}{C_m} \right) \right] \quad (2-9)$$

เมื่อความจุไฟฟ้าในส่วนของเหลว คือ

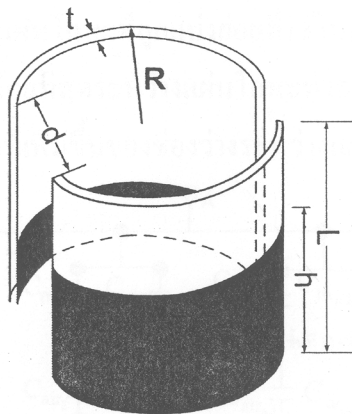
$$C_{w_1}, C_{w_2}, \dots, C_{w_{n-1}} = \frac{\epsilon_0 A}{\frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + \frac{d + 2(n-1)\Delta d}{\epsilon_w}}, \quad C_{w_N} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_w A}{2(R-t)} \quad (2-10)$$

เขียนสมการในส่วนของความจุไฟฟ้าของเหลวกับวัสดุได้เป็น

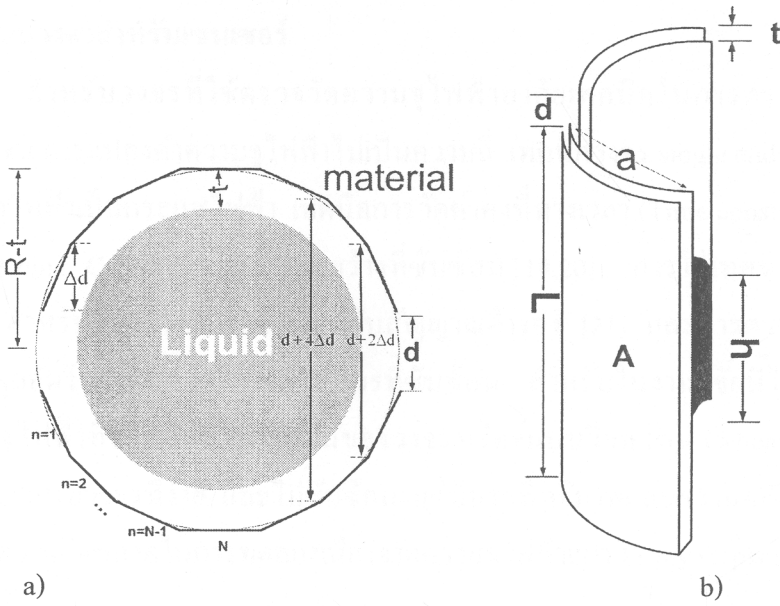
$$C_2 = \epsilon_0 \left( \frac{\pi R - d}{N} \right) (h) \left( 2 \sum_{n=1}^N \left( \frac{1}{\frac{t}{\epsilon_m} + \frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + \frac{d + 2(n-1)\Delta d}{\epsilon_w}} \right) + \frac{1}{\frac{2t}{\epsilon_m} + \frac{2(R-t)}{\epsilon_w}} \right) \quad (2-11)$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการหาค่าความจุไฟฟ้าจากสมการที่(9) ได้ดังนี้

$$C = C_1 + C_2 \quad (2-12)$$



รูปที่ 2-12 โครงสร้างของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกกรณีมีของเหลว

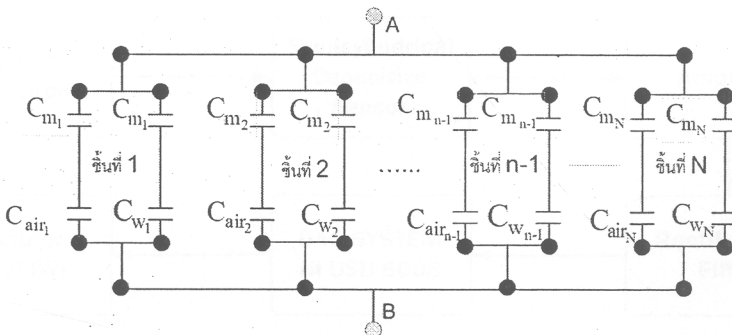


รูปที่ 2-13 โครงสร้างการคำนวณของเซนเซอร์กรณีมีน้ำและอากาศเป็นไดอิเล็กตริก

a) มุมมองด้านบนสำหรับการคำนวณ

b) โครงสร้างในการคำนวณแสดงการแบ่งแผ่นโลหะแต่ละแผ่น

- เมื่อ  $\epsilon_0$  คือ ค่า permittivity of free space มีค่าเท่ากับ  $8.85 \text{ pF/m}$
- $\epsilon_m$  คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกที่เป็นวัสดุ
- $\epsilon_{\text{air}}$  คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศ
- $\epsilon_w$  คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกแต่ละชนิดของเหลว
- $n$  คือ จำนวนของแผ่นโลหะที่ถูกแบ่งย่อยที่ใช้ในการคำนวณ(ชั้น)
- $d$  คือ ค่าช่องว่างน้อยที่สุดระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง(เมตร)
- $\Delta d$  คือ ค่าระยะห่างที่เพิ่มขึ้นของช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง

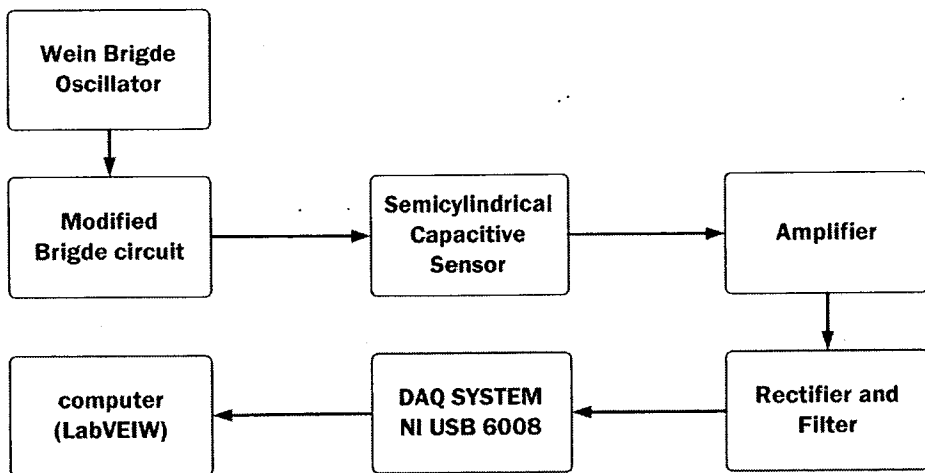


รูปที่ 2-14 วงจรสมมูลของค่าความจุไฟฟ้ารวมสำหรับแผ่นคู่ขนานแบบกึ่งทรงกระบอก  
เมื่อใช้วัสดุระดับน้ำ

## 2.4 การออกแบบวงจรสำหรับเซนเซอร์

สำหรับวงจรที่ใช้ตรวจวัดความจุไฟฟ้าอาศัยเทคนิคในการตรวจวัดได้หลายลักษณะ [11] เช่น การแปลงค่าความจุไฟฟ้าไปเป็นความถี่ เทคนิควงจร single ended เทคนิคการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า เทคนิคการวัดค่าคงที่ทางเวลา (Time constant) [18] การใช้เทคนิค Switching Capacitor ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อน [19,20] การใช้เทคนิค Synchronous demodulation สำหรับสัญญาณที่นำเข้ามาเทียบกับสัญญาณอ้างอิง [21] และการตรวจวัดด้วยวงจรบริดจ์แบบสมดุลอัตโนมัติ [22,23] ซึ่งเป็นวงจรที่ซับซ้อน สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรตรวจวัดความจุไฟฟ้าที่ใช้หลักการพื้นฐานของวงจรบริดจ์แบบวีตสโตน (wheatstone bridge circuit) ซึ่งมีรูปแบบวงจรที่ง่าย และไม่ซับซ้อน แต่มีประสิทธิภาพและความคล่องตัวในการใช้งานสูง อีกทั้งความผิดพลาดในการทดลองเนื่องจากความจุไฟฟ้าแฝง (Stray Capacitance) จะมีค่าน้อยที่สุด

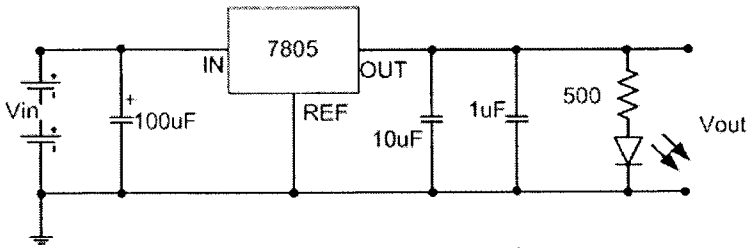
สำหรับการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณได้ประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์ พร้อมวงจรขยายมาใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าเพื่อนำมาวัดระดับของเหลว โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้ากับวงจรบริดจ์ด้วยความถี่คงที่ที่อยู่ในรูปของสัญญาณไซน์ เมื่อทำการแปลงสัญญาณขาออกจากวงจรบริดจ์ที่มีขนาดเล็กไปเป็นสัญญาณขาออกขนาดใหญ่ด้วยออปแอมป์ ระดับสัญญาณที่ได้จะเปลี่ยนไปเป็นระดับสัญญาณกระแสตรงด้วยวงจรกรองเรียงกระแส (Rectifier and filter) จากนั้นระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จะถูกส่งไปยังช่องขาเข้าของระบบ DAQ ที่เชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์สำหรับแสดงผลต่อไป ดังรูปที่ 2-15



รูปที่ 2-15 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบการทำงานของเซนเซอร์

2.4.1 วงจรภาคแหล่งจ่ายไฟ

เมื่อทำการจ่ายแรงดันขนาด 9 โวลต์ จากแบตเตอรี่ให้ไอซี 7805 เพื่อรักษาระดับแรงดันที่ 5 โวลต์ จ่ายให้กับไอซี LM 324 ของวงจรบริดจ์ และไอซีเบอร์ LM358 สำหรับวงจรออสซิลเลเตอร์รูปคลื่นไซน์ ดังรูปที่ 2-16

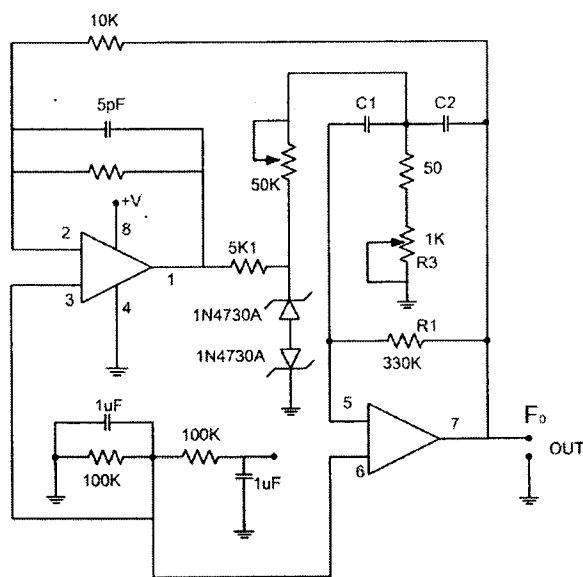


รูปที่ 2-16 วงจรแหล่งจ่ายไฟคงที่ 5 โวลต์

2.4.2 วงจรออสซิลเลเตอร์

สำหรับวงจรออสซิลเลเตอร์ได้ใช้ไอซีเบอร์ LM358 ดังรูปที่ 2-17 สำหรับสร้างรูปคลื่นไซน์โดยค่าความถี่ ( $f_0$ ) ที่ใช้ขึ้นอยู่กับความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_3$  และความจุไฟฟ้า  $C_1$  ดังสมการที่ (2-13)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi C_1 \sqrt{R_3 R_1}} \tag{2-13}$$



รูปที่ 2-17 วงจรออสซิลเลเตอร์สัญญาณไซน์

### 2.4.3 การประยุกต์วงจรบริดจ์

เมื่อนำวงจรบริดจ์ มาประยุกต์ใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้วัดระดับของเหลว ดังรูปที่ 2-18 โดยในกรณีที่วงจรมีความสมดุลจะสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าออกของวงจรที่จุด B และจุด D โดยให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้า  $V$  ความถี่  $f$  เข้าที่ออปแอมป์  $A_1$  และ  $A_2$  โดยที่มีแรงดันออกเท่ากับ  $V'$  และ  $V'_0$  ตามลำดับ กระแสไฟฟ้าที่ไหลบนแขนสาขาของวงจรบริดจ์ AB, BC, CD และ DA ค่าเท่ากับ

$$I_1 = \frac{V}{Z_1}, I_2 = \frac{V}{Z_0 + \Delta Z}, I_3 = \frac{V' - V}{Z_3}, I_4 = \frac{V' - V}{Z_4} \quad (2-14)$$

และกระแสที่ไหลย้อนกลับของวงจรออปแอมป์  $A_2$  มีค่าเท่ากับ

$$I_0 = \frac{V'_0 - V}{R_f} \quad (2-15)$$

สำหรับที่จุด D และจุด B เมื่อนำกฎของเคอร์ชอฟมาใช้จะได้

$$I_f + I_4 = I_2 \quad (2-16)$$

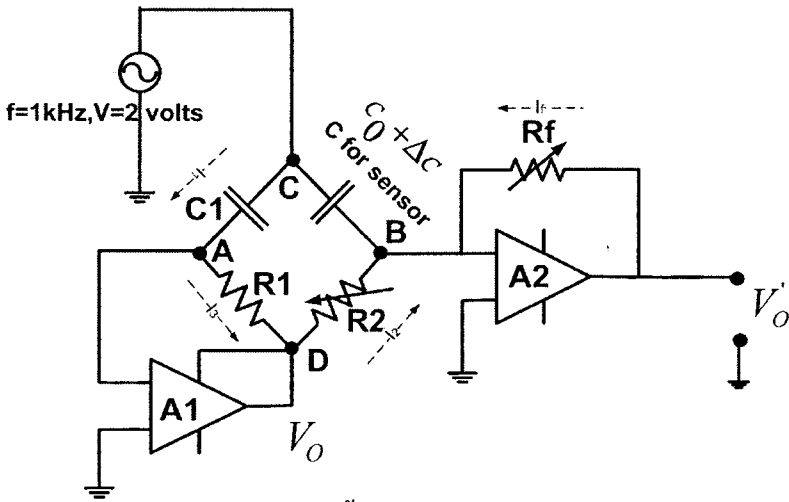
$$I_3 = I_1 \quad (2-17)$$

สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าออกที่ออปแอมป์  $A_2$  ได้เท่ากับ

$$V'_0 = V \left( 1 + \frac{R_f (Z_4 Z_1 - Z_3 Z_0 - Z_3 \Delta Z)}{Z_1 Z_4 (Z_0 + \Delta Z)} \right) \quad (2-18)$$

สำหรับที่บริดจ์สมดุลเขียนสมการใหม่ได้

$$V'_0 = V \left( 1 - \frac{R_f (Z_3 \Delta Z)}{Z_1 Z_4 (Z_0 + \Delta Z)} \right) \quad (2-19)$$



รูปที่ 2-18 รูปแบบวงจรพื้นฐานที่ใช้กับเซนเซอร์ความจุไฟฟ้า

#### 2.4.4 เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้ากับค่าความจุไฟฟ้า

เมื่อนำเซนเซอร์มาต่อลงในวงจรในกรณีที่ยังไม่ได้วัดระดับของเหลวค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าของเซนเซอร์มีค่าเท่ากับ  $C_0$  นั่นคือวงจรบริดจ์อยู่ในสภาพสมดุลสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าน้อยที่สุดได้จากสมการ

$$C_0 = \frac{R_2 C}{R_1} \quad (2-20)$$

ดังนั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าอิมพีแดนซ์ของแต่ละตัวได้ดังนี้

$$Z_1 = \frac{1}{j2\pi f C}, Z_3 = R_1, Z_0 + \Delta Z = \frac{1}{j2\pi f (C_0 + \Delta C)} \text{ และ } Z_4 = R_2 \quad (2-21)$$

นำไปแทนในสมการ(2-19) จะได้แรงดันไฟฟ้าออกเท่ากับ

$$V_o' = j2\pi f R_f V \Delta C \quad (2-22)$$

เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เข้ากับวงจรบริดจ์เป็น AC สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายอยู่ในรูป  $V = V_m \sin 2\pi f t$  ดังนั้นสามารถเขียนค่าของ  $V_o'$  ใหม่ได้ดังนี้

$$V_o' = 2\pi f R_f V \Delta C \quad (2-23)$$

เมื่อระดับของของเหลวในเซนเซอร์มีความสูงเท่ากับ  $h$  ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนไปจาก  $C_0$  ไปเท่ากับ  $C_0 + \Delta C$  แต่สำหรับค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์หาได้จากสมการ (2-8) ดังนั้นจากสมการทำให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าเริ่มต้นของเซนเซอร์  $C_0$  และค่าความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น  $\Delta C$  ดังนี้

$$C_0 = Lk_1 \text{ และ } \Delta C = (k_2 - k_1)h \quad (2-24)$$

ดังนั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและค่าแรงดันได้

$$V'_0 = 2\pi f R_f V (k_2 - k_1)h \quad (2-25)$$

เมื่อกำหนดให้  $k_3 = 2\pi f R_f V$

เขียนสมการใหม่ได้

$$\Delta V = k_3 h \quad (2-26)$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าออกของวงจรบริดจ์กับความสูงของระดับของเหลวอยู่ในรูปเชิงเส้น

#### 2.4.5 วัดค่าความจุไฟฟ้าของชนิดของเหลวที่แตกต่างกัน

นำวงจรจากรูปที่ 2-18 ประยุกต์ใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้วัดระดับของเหลวเมื่อของเหลวที่ต่างชนิดกัน ดังรูปที่ 2-19 โดยทำแผ่นโลหะแบบกึ่งทรงกระบอกเพิ่มในเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าให้ห่างจากเซนเซอร์เป็นระยะ 0.01 เมตร หลักการเพื่อใช้วัดเป็นตัวเปรียบเทียบวัดระดับของเหลวเมื่อเป็นของเหลวที่ต่างชนิดกัน โดยชุดกลางจมอยู่ใต้ระดับของเหลวตลอดเพื่อใช้วัดความจุไฟฟ้าอ้างอิงของของเหลว  $C_R$  ซึ่งแปลงไปเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_{I0}$  และชุดบนใช้วัดความจุไฟฟ้าของของเหลว  $C_S$  เมื่อระดับของของเหลวเปลี่ยนแปลงซึ่งแปลงไปเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_{20}$  โดยมีวงจรขยายสัญญาณผลต่างเพื่อหาค่าผลต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้า  $V_{20}$  และ  $V_{I0}$  ซึ่งจะได้ผลต่างของค่าแรงดันไฟฟ้าออก ( $\Delta V$ ) ของชุดอิเล็กทรอนิกส์กึ่งทรงกระบอกทั้ง 2 ชุด ยังมีค่าเท่าเดิม เมื่อนำไปวัดของเหลวต่างชนิดกันที่มีค่าไดอิเล็กตริกต่างกัน สามารถคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าออกโดยการประยุกต์สมการ (2-23) เขียนสมการดังนี้

$$\Delta V = V_{2O} - V_{1O} \quad (2-27)$$

โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าของแผ่นโลหะชุดบน คือ

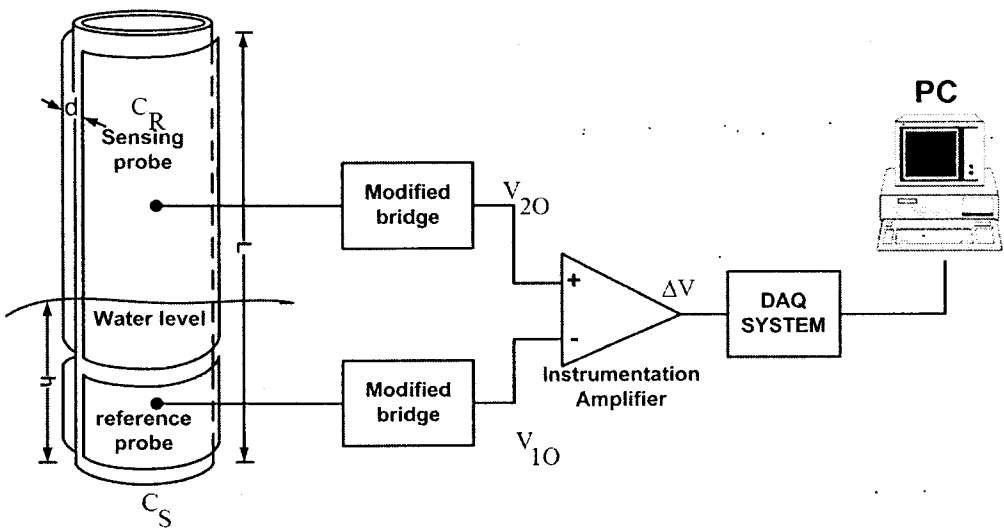
$$V_{2O} = 2\pi f R_f V C_R \quad (2-28)$$

และค่าแรงดันไฟฟ้าของแผ่นโลหะชุดล่างสำหรับอ้างอิง คือ

$$V_{1O} = 2\pi f R_f V C_S \quad (2-29)$$

ดังนั้นเขียนสมการ (27)

$$\Delta V = 2\pi f R_f V (C_R - C_S) \quad (2-30)$$



รูปที่ 2-19 รูปแบบการประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์วัดของเหลวที่ต่างชนิดกัน

### หลักการของการสร้างเซนเซอร์

งานวิจัยในส่วนนี้เป็นการศึกษาเทคนิคการวัดระดับของเหลวโดยใช้หลักการการวัดค่าความจุไฟฟ้า ได้สร้างและออกแบบเซนเซอร์ให้มีรูปแบบเป็นท่อทรงกระบอกกลวงทำจากวัสดุที่เป็นฉนวน และมีอิเล็กโทรดเป็นแผ่นกึ่งรูปทรงกระบอกทำจากตัวนำไฟฟ้า สำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้า ศึกษาทดสอบและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระดับ

ของเหลวที่เปลี่ยนแปลงและระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน โดยวัดค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องมือวัด LCR ยี่ห้อ Aligent รุ่น 4284A

จากนั้นทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง โดยใช้การประยุกต์วงจรบริดจ์และศึกษาผลของสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ที่อาจส่งผลต่อการตรวจวัด ศึกษาผลตอบสนองของเวลาที่มีต่อเซนเซอร์ โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าผ่าน NI-USB-6008 แสดงผลบนโปรแกรม LabVIEW

### บทที่ 3

## วัสดุ อุปกรณ์และการทดลอง

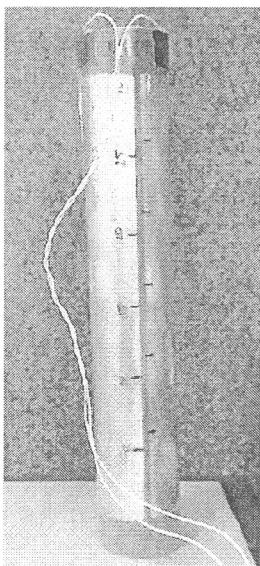
บทนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินการในการทำรายงาน โดยเริ่มจากการศึกษาออกแบบและสร้างเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก ศึกษาค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ ผลของระยะห่างของแผ่นอิเล็กโทรดของเซนเซอร์ต่อค่าความจุไฟฟ้า ผลของสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อการวัด ผลตอบสนองของเวลากับการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวที่มีต่อเซนเซอร์ การศึกษาความสัมพันธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับของเหลวต่างชนิด

### 3.1 การออกแบบเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

ศึกษาทดลองการประยุกต์ใช้คุณสมบัติของค่าความจุไฟฟ้าแบบทรงกระบอกมาปรับเปลี่ยนเป็นการใช้เทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกเพื่อวัดระดับของเหลว สร้างและศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าสำหรับวัดระดับของเหลว

#### 3.1.1 รูปแบบของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

ออกแบบสร้างเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลองมีรูปแบบเป็นท่อทรงกระบอกกลวงทำจากวัสดุที่เป็นฉนวน คือ Polyvinyl chloride (PVC) เนื่องจากเป็นวัสดุที่อยู่ใกล้ชิดในการใช้ชีวิตประจำวัน มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ คือ มีน้ำหนักเบา คงทน แข็งแรง ทำความสะอาดง่าย ไม่เป็นสนิม มีความทนทานต่อกรดและสารเคมีทั่วไปและเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี อีกทั้งมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และเมื่อหมดอายุการทำงานสามารถนำไปรีไซเคิล หรือแปรรูปไปอยู่ในส่วนของพลังงานได้ สำหรับแผ่นอิเล็กโทรดที่เป็นแผ่นกึ่งทรงกระบอกจะทำจากเทปอลูมิเนียมมาห่อหุ้มท่อทรงกระบอก เนื่องจากประสิทธิภาพสูงในการยึดเกาะ ติดตั้งง่าย อายุการใช้งานยาวนาน และทนทานต่ออุณหภูมิที่แตกต่างได้ดี แสดงดังรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกที่ใช้ในการทดลอง

### 3.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ศึกษาวิธีการคำนวณด้วยการใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขหาค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นกึ่งขนานและทรงกระบอกมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์หาค่าความจุไฟฟ้ากรณีที่โครงสร้างเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกเมื่อไม่มีของเหลวและมีของเหลวเป็น ไดอิเล็กตริก กำหนดการคำนวณโดยใช้สมการที่ 8 , 10 และ 12 ตามลำดับ โดยให้แผ่นอิเล็กโตรดของแบบกึ่งทรงกระบอกมีรัศมีเท่ากับ  $R$  และมีช่องว่างน้อยที่สุดเท่ากับ  $d$  และมีความหนาของวัสดุที่ใช้ติดแผ่นอิเล็กโตรดเท่ากับ  $t$  แบ่งแผ่นอิเล็กโตรด 2 แผ่นที่อยู่ในรูปกึ่งทรงกระบอกของตัวเก็บประจุให้เป็นจำนวน  $n$  แผ่น มีระยะห่างระหว่างแผ่นเพิ่มขึ้นเป็น  $\Delta d$  วิเคราะห์หาสมการของค่าความจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นอิเล็กโตรด 2 แผ่นเล็กๆที่มีระยะห่างกันประมาณ  $d$  และมีพื้นที่เล็กๆ  $A$  เขียนกราฟแสดงความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณกับจำนวน  $n$  แผ่น

### 3.2 การทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลว

ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง โดยศึกษาหาค่าความถี่ที่เหมาะสมในการป้อนให้กับเซนเซอร์โดยวัดค่าความต้านทาน ค่าอิมพีแดนซ์ และค่ามูฟเฟสของอิมพีแดนซ์ที่ระดับ 0.05 เมตร ดังตาราง 3-1 พบว่า

ความถี่ 1 kHz กับ 10 kHz มีค่าความต้านทานต่ำและให้ค่ามุมเฟสที่แสดงเป็นความจุไฟฟ้าที่ดีกว่าความถี่ค่าอื่น ๆ แต่ความถี่ที่ 1 kHz สามารถนำมาสร้างใช้งานได้สะดวกกว่าความถี่ 10 kHz ดังนั้นจึงเลือกความถี่ที่ 1 kHz ใช้ในการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือมาตรฐานกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับแผนภาพการทำงานดังรูปที่ 3-2 กำหนดของเหลวที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำ

ตารางที่ 3-1 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าความถี่ต่างๆ กับค่าความต้านทาน อิมพีแดนซ์และค่ามุมเฟสของเซนเซอร์

f(KHz)	R(M $\Omega$ )	Z(M $\Omega$ )	มุมเฟส(องศา)
0.2	38794.000	34.537	-33.789
0.4	14261.700	31.026	-60.315
0.6	9142.000	23.064	-66.704
0.8	6145.100	18.427	-68.349
1	0.005	0.001	-91.116
2	1550.000	8.163	-101.844
3	699.500	5.590	-102.293
4	418.800	4.223	-103.878
5	267.900	3.393	-103.344
6	197.400	2.824	-104.025
8	119.900	2.142	-102.866
10	0.002	0.154	-90.038

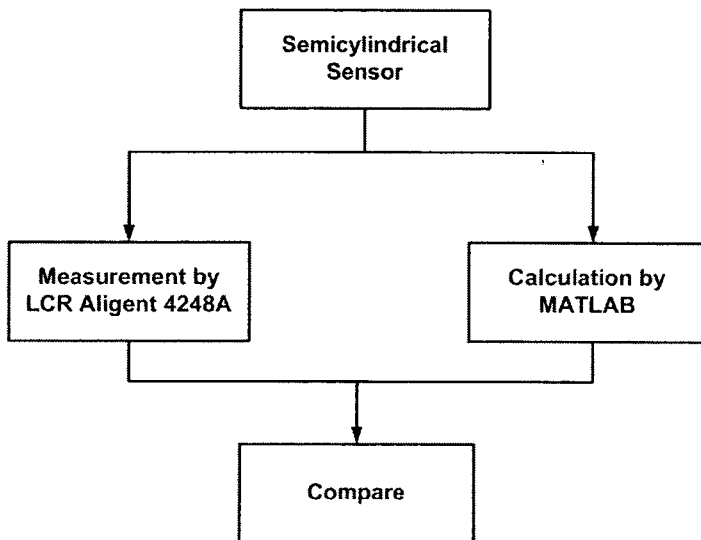
### สมมติฐาน

1. เมื่อระดับของเหลวมีการเปลี่ยนแปลงย่อมส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์
2. ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณด้วยทฤษฎี

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของเซนเซอร์น่าจะให้ผลใกล้เคียงกัน

### ขั้นตอนการทดลอง

1. สร้างเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.30 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.025 เมตร แสดงดังรูปที่ 3-1
2. นำเซนเซอร์ความจุไฟฟ้ามาต่อเข้ากับเครื่องมือวัด LCR ยี่ห้อ Aligent รุ่น 4284A พร้อมทั้งป้อนความถี่คงที่ 1 kHz แรงดันไฟฟ้ากระตุ้น 2 V ให้กับเซนเซอร์
3. ทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ระดับน้ำตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.30 เมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.01 เมตร โดยทดลองซ้ำ 10 ครั้ง บันทึกผลการทดลอง
4. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำ หาค่าความไม่เป็นเชิงเส้น (Linearity) และค่าความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)
5. ทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าเมื่อลดระดับน้ำตั้งแต่ 0.30 ถึง 0.01 เมตร โดยลดลงครั้งละ 0.01 เมตร โดยทดลองซ้ำ 10 ครั้ง บันทึกผลการทดลอง
6. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ของเซนเซอร์
7. คำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าเมื่อใช้เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก โดยใช้โปรแกรม MATLAB โดยกำหนดให้  $n$  เป็นจำนวนของแผ่นโลหะที่ถูกแบ่งย่อย เริ่มต้นในการคำนวณตั้งแต่ 2 ขึ้นขึ้นไป ที่ระดับน้ำ 0.09 เมตร
8. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับจำนวนของแผ่นโลหะที่ถูกแบ่งย่อย
9. จากกราฟในข้อ 8) หาค่าคงที่ของจำนวน  $n$  ขึ้น นำค่าที่มากำหนดหาค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ ที่ระดับน้ำตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.30 เมตร
10. เขียนกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือกับความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 3-2 แผนภาพการเปรียบเทียบผลค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัดและการคำนวณ

### 3.3 ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระยะห่างของแผ่นอิเล็กโทรดของเซนเซอร์

ทำการทดสอบและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน

#### สมมติฐาน

เมื่อขนาดระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดของเซนเซอร์เปลี่ยนแปลงย่อมส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้า เมื่อระดับน้ำและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่

#### ขั้นตอนการทดลอง

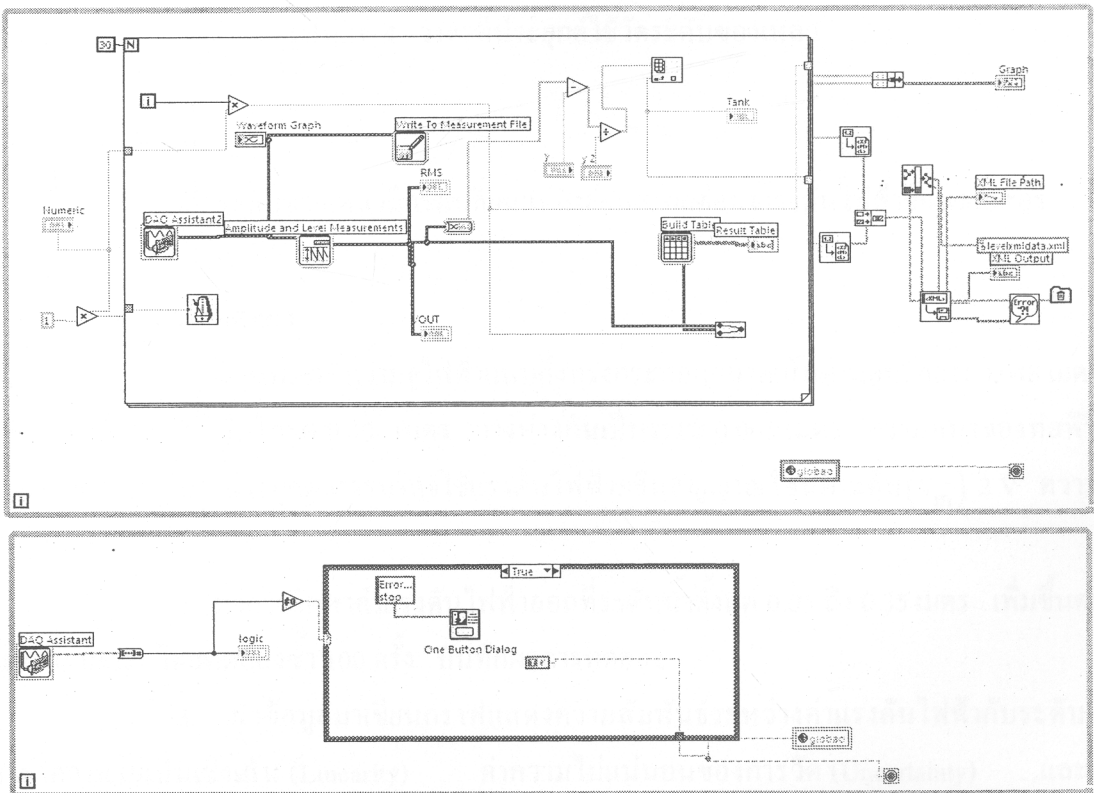
1. นำเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.30 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.025 เมตร มาต่อเข้ากับเครื่องมือวัด LCR ยี่ห้อ Aligent รุ่น 4284A พร้อมทั้งป้อนความถี่ถึงที่ 1 kHz แรงดันไฟฟ้ากระตุ้น 2 V ให้กับเซนเซอร์
2. ทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ระดับน้ำต่างๆ โดยทดลองซ้ำ 10 ครั้ง บันทึกผลการทดลอง

3. เปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กทรอนิกส์เป็นระยะ 0.015 และ 0.05 เมตร ตามลำดับ โดยให้ระยะห่างของเส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งที่ ทดลองซ้ำในข้อ 2

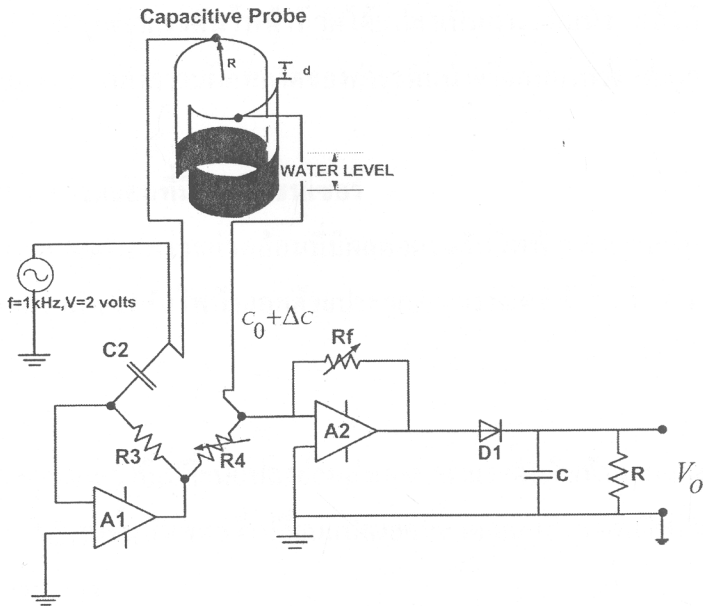
4. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความจุไฟฟ้ากับขนาดระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ของเซนเซอร์

3.4 การศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลว

ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง แสดงค่าการวัดระดับของเหลวผ่านคอมพิวเตอร์โดยรับค่าสัญญาณผ่าน NI USB-6008 หลักการทำงานดังรูปที่ 2-15 โดยเขียนโปรแกรมการทำงานของโปรแกรม LabVIEW ดังรูปที่ 3-3 ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าออกด้วยการประยุกต์วงจรรีจิด ดังรูปที่ 3-4 เมื่อของเหลวที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำ



รูปที่ 3-3 บล็อกโคอะแกรมของโปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 3-4 วงจรที่ประยุกต์ใช้วัดระดับของเหลว

### สมมติฐาน

เมื่อระดับของเหลวมีการเปลี่ยนแปลงย่อมส่งผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์

### ขั้นตอนการทดลอง

1. นำเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.048 เมตร ความยาวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ 0.40 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.005 เมตร ความหนาของท่อพีวีซี 0.002 เมตร ต่อเข้ากับประยุกต์วงจรบริดจ์ใช้แรงดันไฟฟ้าคลื่นสัญญาณไซน์กระดุน ( $V_{in}$ ) 2 V ความถี่ 1 kHz
2. ทำการวัดหาค่าแรงดันไฟฟ้าออกที่ระดับน้ำตั้งแต่ 0.05 ถึง 0.35 เมตร เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 เมตร โดยทดลองซ้ำ 100 ครั้ง บันทึกผลการทดลอง
3. นำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับระดับน้ำ หาค่าความไม่เป็นเชิงเส้น (Linearity) ค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty) และค่าความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

4. นำข้อมูลค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้แปลงเป็นค่าระดับน้ำ แล้วนำเปรียบเทียบกับค่าจริงกับค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ หาค่าความผิดพลาดของค่าระดับน้ำจริงกับค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์

### 3.5 การศึกษาผลสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อเซนเซอร์

ศึกษาผลของสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ คือ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าออกด้วยประยุกต์วงจรบริดจ์ ดังรูปที่ 3-4

#### สมมติฐาน

1. ค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงย่อมส่งผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าออกของเซนเซอร์
2. ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงย่อมส่งผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าออกของเซนเซอร์

#### ขั้นตอนการทดลอง

1. นำเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.048 เมตร ความยาวของแผ่นโลหะ 0.40 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.005 เมตร และความหนาของท่อพีวีซีเท่ากับ 0.002 เมตร เมื่อแรงดันไฟฟ้าคลื่นสัญญาณไซน์กระตุ้น ( $V_{in}$ ) 2 V ความถี่คงที่ 1 kHz
2. วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ระดับน้ำ 0.10 เมตร ตั้งแต่ระดับอุณหภูมิที่ 30 ถึง 60 °C โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 2 °C บันทึกผลการทดลอง
3. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับอุณหภูมิ
4. วัดค่าแรงดันไฟฟ้า ณ ช่วงเวลาที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกัน ที่ระดับน้ำ 0.20 เมตร บันทึกผลการทดลอง
5. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความชื้นสัมพัทธ์

### 3.6 การศึกษาผลตอบสนองของเวลาที่มีต่อเซนเซอร์

ศึกษาผลตอบสนองของเวลาที่มีต่อเซนเซอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวแบบฉับพลัน โดยแบ่งกรณีศึกษาเป็น 2 กรณี คือ เมื่อเซนเซอร์เคลื่อนที่ผ่านของเหลว และของเหลวเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์ วัดค่าแรงดันไฟฟ้าออกด้วยการประยุกต์วงจรบริดจ์ ดังรูปที่ 3-4 ใช้แรงดันไฟฟ้าคลื่นสัญญาณไซน์กระตุ้น ( $V_{in}$ ) 2 V ความถี่คงที่ 1 kHz ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก 0.048 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นอิเล็กโทรด 0.40 เมตร

วางห่างกันเป็นระยะ 0.005 เมตร และความหนาของท่อพีวีซี เท่ากับ 0.002 เมตร ของเหลวที่ใช้ในทดลองคือ น้ำ แสดงค่าการวัดระดับน้ำผ่านคอมพิวเตอร์โดยการรับค่าสัญญาณผ่าน NI USB-6008 แสดงผลด้วยโปรแกรม LabVIEW

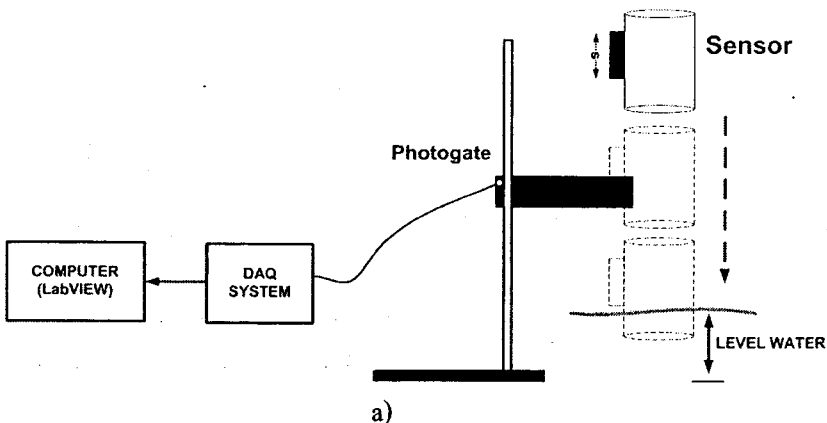
### สมมติฐาน

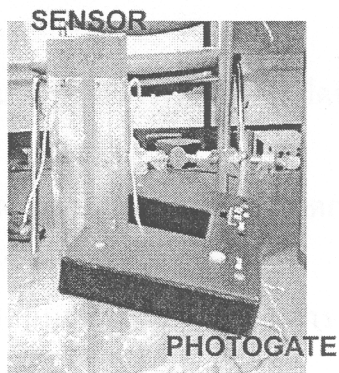
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวอย่างรวดเร็วส่งผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์โดยทันที

### 3.6.1 กรณีเซนเซอร์เคลื่อนที่ผ่านของเหลว

#### ขั้นตอนการทดลอง

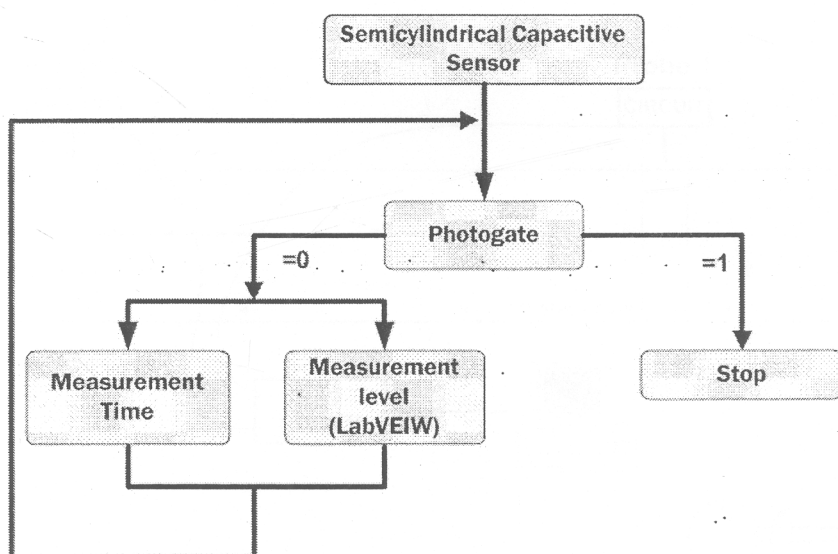
1. นำเซนเซอร์เคลื่อนที่ลงไปใต้น้ำผ่านโฟโต้เกต (Photogate) เป็นระยะทาง(S) 0.10 เมตร ดังรูปที่ 3-5 เมื่อโฟโต้เกตมีสัญญาณเท่ากับ 0 จะเริ่มจับเวลาในการเคลื่อนที่และวัดแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ แต่เมื่อโฟโต้เกตมีสัญญาณเท่ากับ 1 การวัดเวลาและแรงดันไฟฟ้าจะหยุดลงทันทีบล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานดังรูปที่ 3-6 บันทึกผลการทดลอง
2. นำเซนเซอร์เคลื่อนที่ขึ้นจากน้ำผ่านโฟโต้เกตให้เคลื่อนที่เป็นระยะทางเท่าเดิม บันทึกผลการทดลอง
3. นำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้ากับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่
4. หาค่าเวลาที่ล่าช้า (Die time) และเวลาสู่จุดสมดุล (Settling time) ของเซนเซอร์





b)

รูปที่ 3-5 รูปแบบในการศึกษาผลตอบสนองกรณีเซนเซอร์เคลื่อนที่ผ่านของเหลว



รูปที่ 3-6 แผนภาพแสดงการทำงานของเซนเซอร์เคลื่อนที่ผ่านของเหลว

### 3.6.2 กรณีของเหลวเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์

ออกแบบการทดลองโดยใช้หลักการทางชลศาสตร์ เพื่อจำลองสภาวะการเปลี่ยนแปลงของน้ำในรางเปิดที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมโยธา

### ขั้นตอนการทดลอง

1. นำเซนเซอร์จำนวน 2 อัน มาวางในรางน้ำเปิดจำลอง วางห่างกันเป็นระยะ 1 เมตร

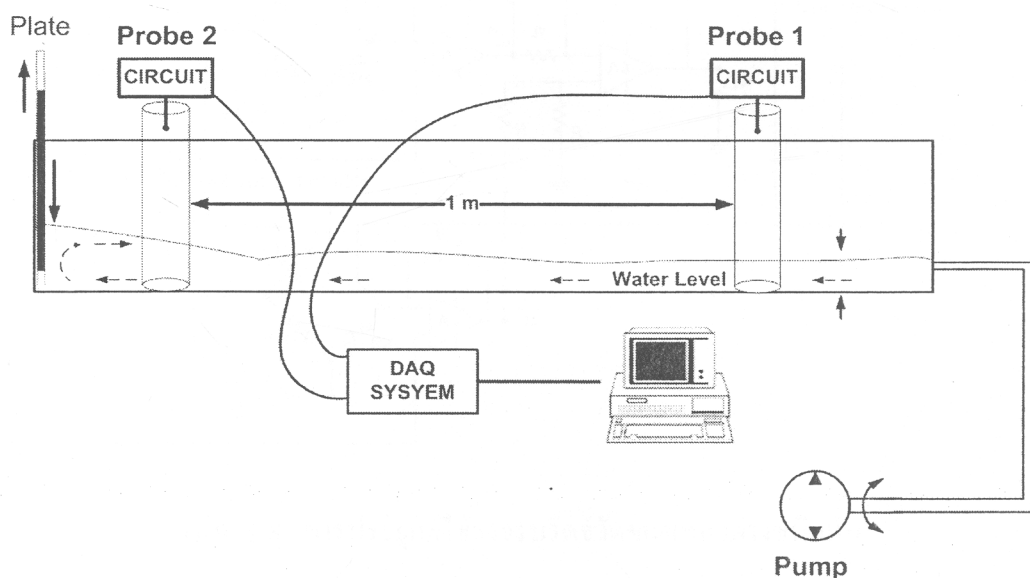
ดังรูปที่ 3-7

2. เปิดน้ำให้ไหลผ่านเซนเซอร์ทั้งสอง สังเกตการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำและวัดแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ทั้งสอง บันทึกผลการทดลอง

3. นำแผ่นกั้นทำคลื่นมาวางกั้น สังเกตการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำและวัดแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ทั้งสอง บันทึกผลการทดลอง

4. นำข้อมูลที่ได้อไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้ากับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่

5. หาค่าเวลาที่ล่าหลัง (Die time) และเวลาสู่จุดสมดุล (Settling time) ของเซนเซอร์



รูปที่ 3-7 การจัดวางอุปกรณ์และการจัดแผ่นตัวกั้นคลื่นลงในรางวางน้ำ

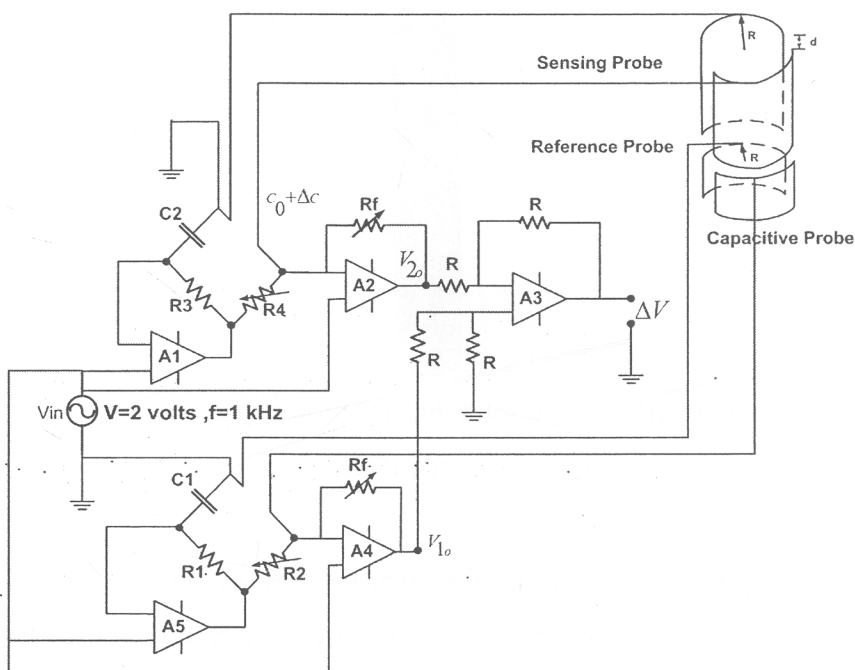
### 3.7 การศึกษาความสัมพันธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับของเหลวต่างชนิด

ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระดับน้ำในระบบเปิดต่างกัน 3 ชนิด คือ น้ำดื่ม น้ำคลอง และน้ำทะเล วัดค่าแรงดันไฟฟ้าออกด้วยการประยุกต์วงจร

บริดจ์ โดยใช้ชุดอิเล็กทรอนิกส์กึ่งทรงกระบอก 2 ชุด ดังรูปที่ 3-8 แสดงค่าการวัดระดับของเหลวผ่านคอมพิวเตอร์โดยการรับค่าสัญญาณผ่าน NI USB-6008 และแสดงผลด้วยโปรแกรม LabVIEW

### สมมติฐาน

เมื่อประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์โดยมีชุดอิเล็กทรอนิกส์กึ่งทรงกระบอก 2 ชุด วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าออกกับระดับของเหลวในระบบเปิดต่างชนิดกันยอมให้ผลการทดลองที่เหมือนกัน



รูปที่ 3-8 การประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์วัดของเหลวต่างชนิดกัน

### ขั้นตอนการทดลอง

1. นำเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกมีชุดอิเล็กทรอนิกส์กึ่งทรงกระบอก 2 ชุด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063 เมตร ความยาวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ 0.30 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.005 เมตร และความหนาของท่อพีวีซี เท่ากับ 0.002 เมตร ดังรูปที่ 3-9 ใช้แรงดันไฟฟ้าคลื่นสัญญาณไซน์กระตุ้น ( $V_{in}$ ) 2 V ความถี่ที่ 1 kHz

2. ทำการวัดหาค่าแรงดันไฟฟ้าออกที่ระดับน้ำตั้งแต่ 0 ถึง 0.30 เมตร เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 เมตร โดยทดลองซ้ำ 10 ครั้ง บันทึกผลการทดลอง
3. เปลี่ยนของเหลวจากน้ำดื่มเป็นน้ำคลองและน้ำทะเลตามลำดับ ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 2) บันทึกผลการทดลอง
4. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำชนิดต่างๆ



รูปที่ 3-9 เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกมีขูดิเล็กโตรดกึ่งทรงกระบอก 2 ชุด  
ที่ใช้ในการทดลอง

### 3.8 การศึกษาผลกระทบจากการส่งข้อมูลของเซนเซอร์ผ่านโมดูลสื่อสารไร้สาย

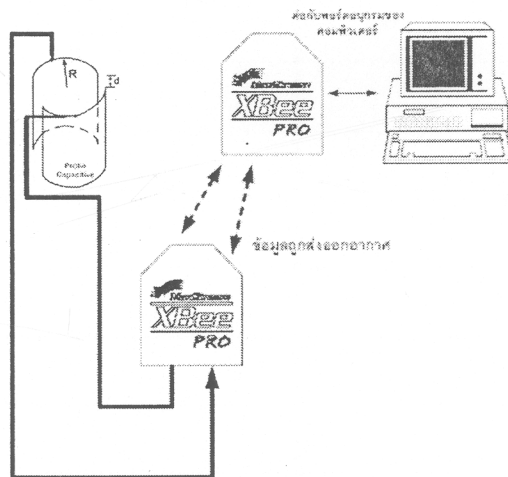
ศึกษาผลกระทบของการส่งผ่านข้อมูลด้วยการเลือกใช้โมดูล XBee ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้รับส่งข้อมูลแบบไร้สาย วัดค่าแรงดันไฟฟ้าออกด้วยประยุกต์วงจรบริดจ์ ดังรูปที่ 3-4 ใช้แรงดันไฟฟ้าคลื่นสัญญาณไซน์กระตุ้น ( $v_{in}$ ) 2 V ความถี่คงที่ 1 kHz ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก 0.048 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นอิเล็กโตรด 0.40 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.005 เมตร และความหนาของท่อพีวีซี เท่ากับ 0.002 เมตร

#### สมมติฐาน

1. การส่งผ่านข้อมูลด้วยการเลือกใช้โมดูล XBee ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์

### ขั้นตอนการทดลอง

1. นำโมดูล XBee ทั้ง 2 ตัว มาตั้งค่าพารามิเตอร์โดยต่อผ่านพอร์ตอนุกรมกับคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม X-CTU
2. โมดูล XBee ตัวแรก สำหรับการอ่านค่าระดับน้ำต่อเข้ากับเซนเซอร์ ดังรูปที่ 3-10 ส่วนโมดูล XBee ตัวที่ 2 ต่อผ่านพอร์ตอนุกรมกับคอมพิวเตอร์เพื่อสำหรับอ่านค่าระดับน้ำ ดังรูปที่ 3-10 โดยมี X-CTU หรือ Hyperterminal ในการแสดงผลข้อมูลที่รับได้
3. ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับการศึกษาผลตอบสนองของเวลา บันทึกผลการทดลอง
4. หาค่าเวลาที่ล่าหลัง (Dead time) และเวลาสู่จุดสมดุล (Settling time) ของเซนเซอร์



รูปที่ 3-10 การจัดวางโมดูลไร้สายในการติดต่อกับเซนเซอร์และคอมพิวเตอร์

### 3.9 อุปสรรคที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการวิจัยและมาตรการในการแก้ไข

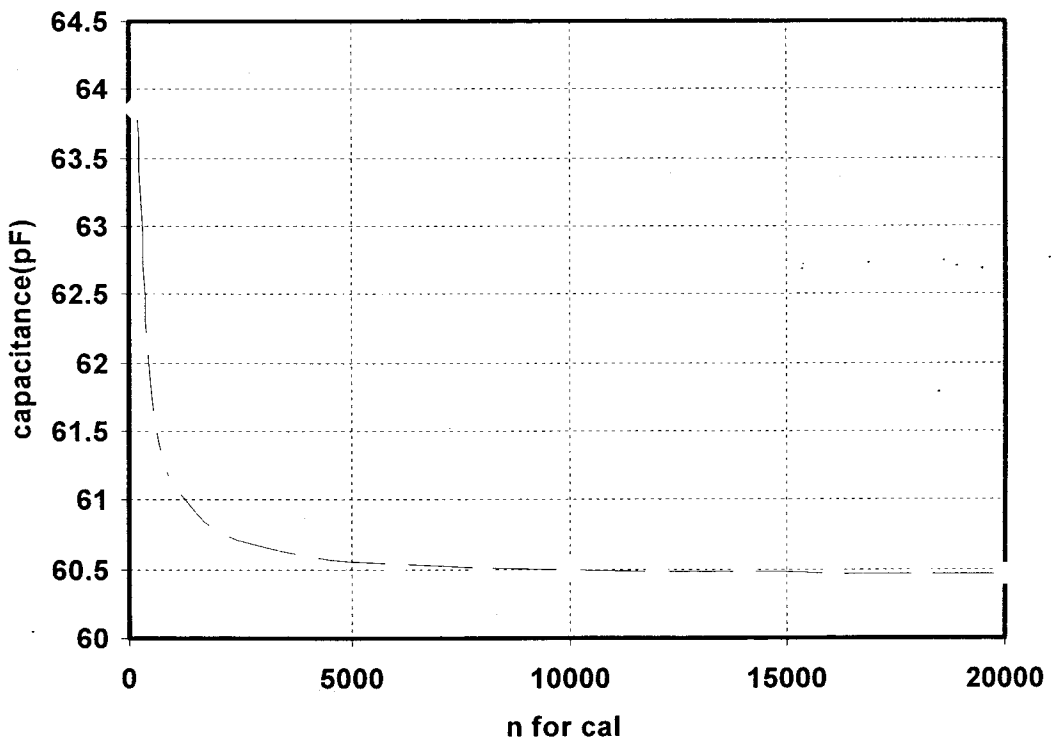
การสร้างเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กโตรด หากมีการเคลื่อนที่ไม่ดี หรือเกิดการขูดขีดขึ้นจะส่งผลต่อการวัดค่าความจุไฟฟ้าส่งผลทำให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยนไป ดังนั้นควรทำการเคลือบที่แผ่นอิเล็กโตรดหลายๆ และในการพกพาควรระวังไม่ให้เกิดการขูดขีดจากวัตถุมีคม

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ศึกษาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าจำนวน  $n$  ที่เหมาะสม เมื่อกำหนดให้แผ่นอิเล็กทรอนิกส์ของแบบกึ่งทรงกระบอกมีรัศมีเท่ากับ 0.0315 เมตร และมีช่องว่างน้อยที่สุดเท่ากับ 0.025 เมตร และมีความหนาของวัสดุที่ใช้ติดแผ่นอิเล็กทรอนิกส์เท่ากับ 0.005 เมตร เมื่อแบ่งแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ 2 แผ่นที่อยู่ในรูปกึ่งทรงกระบอกของตัวเก็บประจุให้เป็นจำนวน 200 ถึง 20,000 แผ่น ผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม MATLAB ที่ระดับน้ำ 0.09 เมตร แสดงรูปที่ 4-1



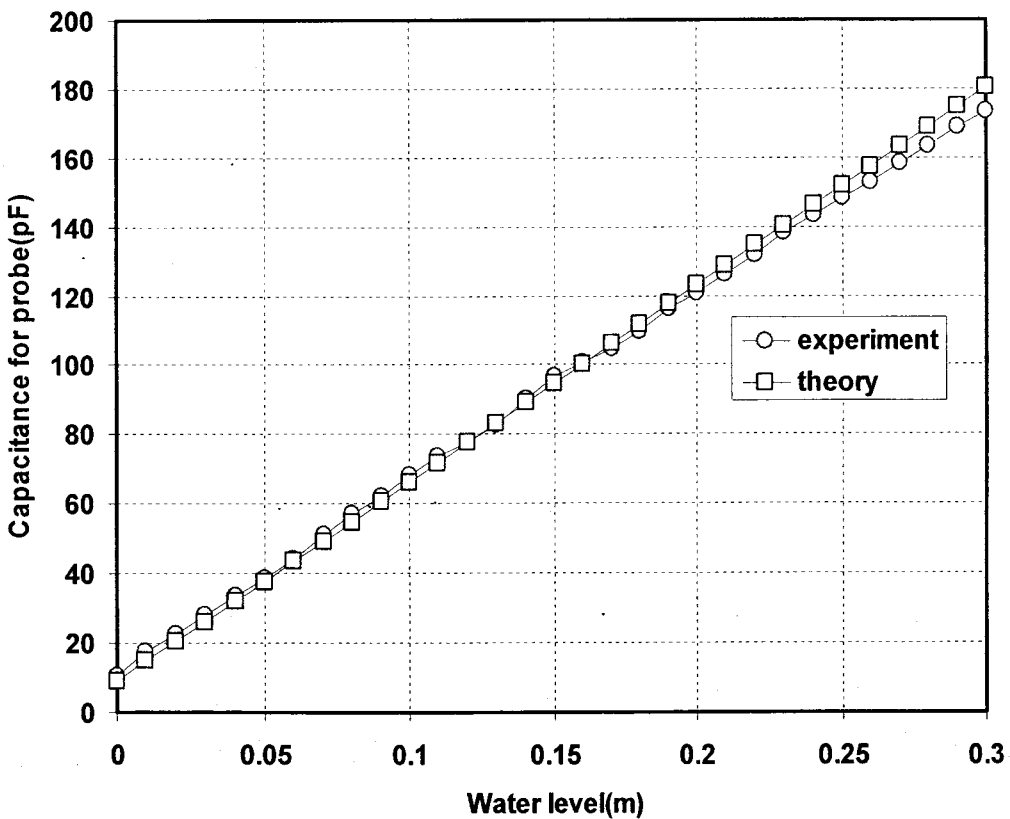
รูปที่ 4-1 ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณเมื่อ  $n$  แตกต่างกัน

## 4.2 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลว

ทำการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง ของเหลวที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำ

### 4.2.1 เปรียบเทียบความจุไฟฟ้าจากการคำนวณกับการวัดโดยตรง

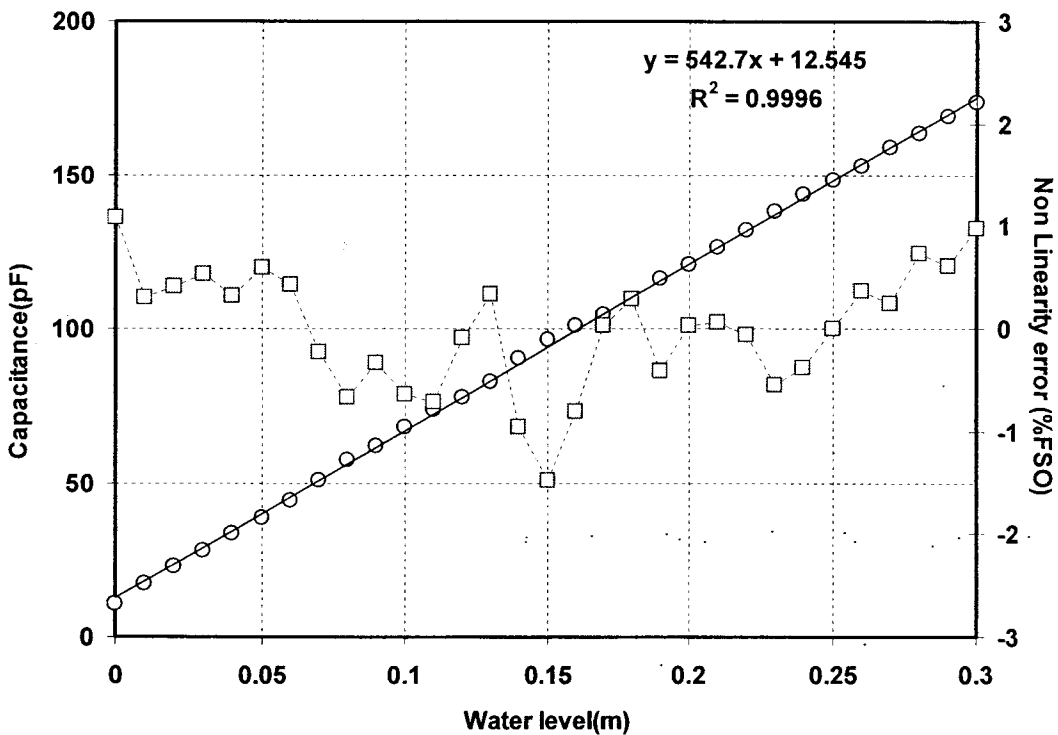
เมื่อกำหนดเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.30 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.025 เมตร วัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัด LCR ยี่ห้อ Aligent รุ่น 4284A ความถี่ที่ 1 kHz แรงดันไฟฟ้ากระตุ้น 2 V เปรียบเทียบกับผลการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าโดยสมการที่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



รูปที่ 4-2 ผลเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณกับการวัดโดยตรง

#### 4.2.2 ค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

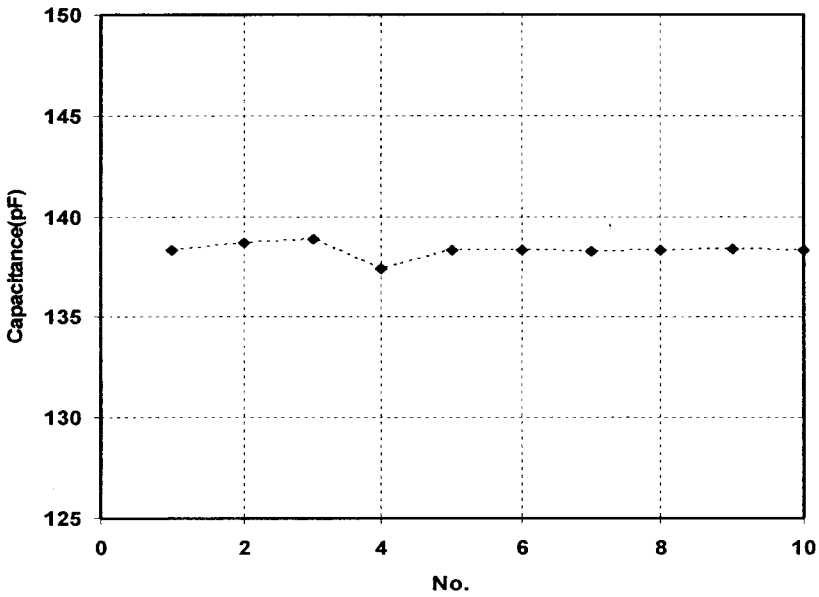
วัดความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.30 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.025 เมตร ค่าที่ได้จะแปรผันตรงกับค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนไป โดยค่าความจุไฟฟ้าอยู่ในช่วงพิโคฟารัด (pF) แสดงคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นรูปที่ 4-3 และคำนวณผลค่าความไม่เป็นเชิงเส้นได้ค่าเป็น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



รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและค่าผิดพลาดเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นกับระดับน้ำ

#### 4.2.3 ค่าความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

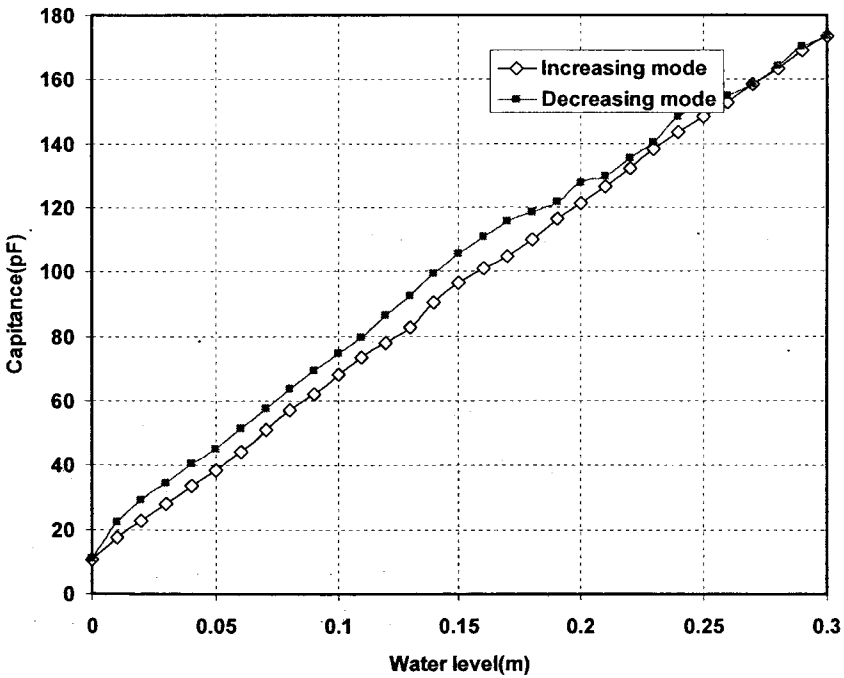
วัดความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ ตั้งแต่ระดับน้ำค่า 0.01 ถึง 0.30 เมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.01 เมตร และทดลองซ้ำ 10 ครั้ง จะได้ค่าความสามารถในการทำซ้ำ 0.83 % ที่ระดับน้ำ 0.23 เมตร แสดงดังรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-4 ค่าความสามารถในการซ้ำของเซนเซอร์ที่ระดับน้ำ 0.23 เมตร

4.2.4 ค่าฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis)

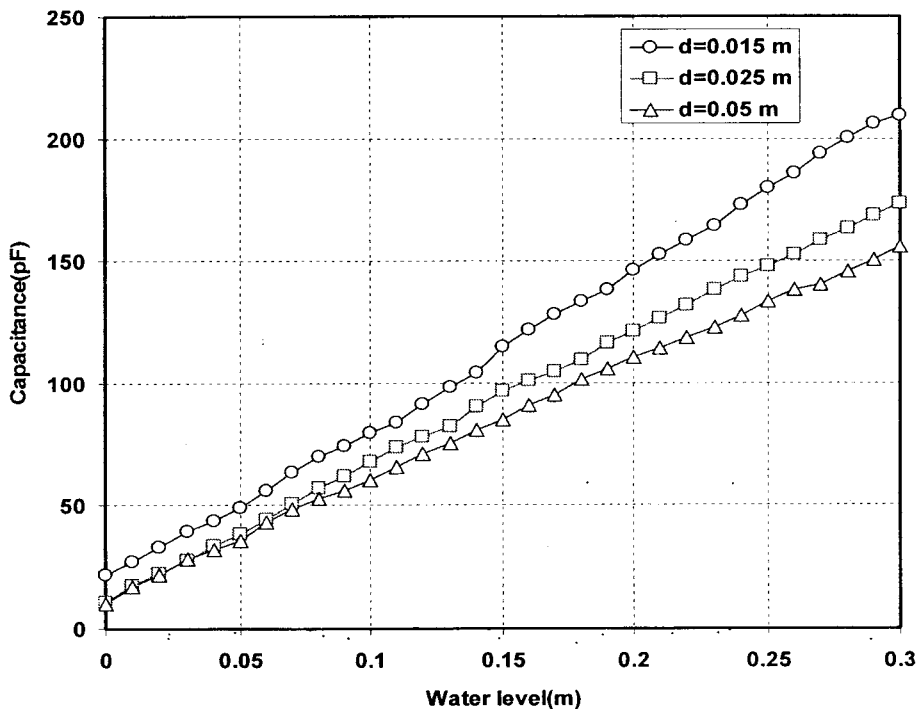
เมื่อวัดความจุไฟฟ้าที่วัดได้เทียบกับระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงในลักษณะเพิ่มและลด ระดับน้ำความสัมพันธ์ระหว่างค่าฮิสเตอร์ซิสแสดงดังรูปที่ 4-5 ได้ค่าฮิสเตอร์ซิสเท่ากับ 6.13 %FSO



รูปที่ 4-5 Hysteresis ของค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำ

#### 4.3 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระยะห่างของแผ่นอิเล็กโทรดของเซนเซอร์

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



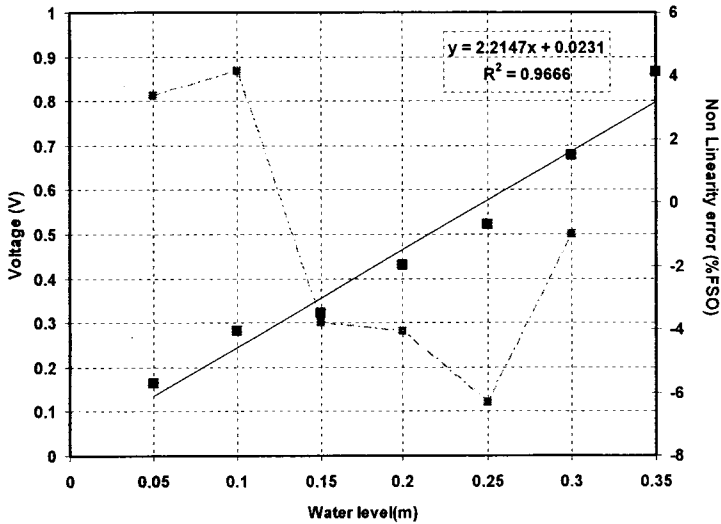
รูปที่ 4-6 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำ  
เมื่อแผ่นอิเล็กโทรดวางห่างกันเป็นระยะต่างๆ

#### 4.4 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลว

เมื่อเซนเซอร์ทำจากวัสดุท่อ PVC และแผ่นโลหะนำไฟฟ้าทำจากแผ่นเทปอลูมิเนียม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.048 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นโลหะ 0.40 เมตร ความหนาของท่อพีวีซี เท่ากับ 0.002 เมตร และแผ่นอิเล็กโทรดวางห่างกันเป็นระยะ 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)

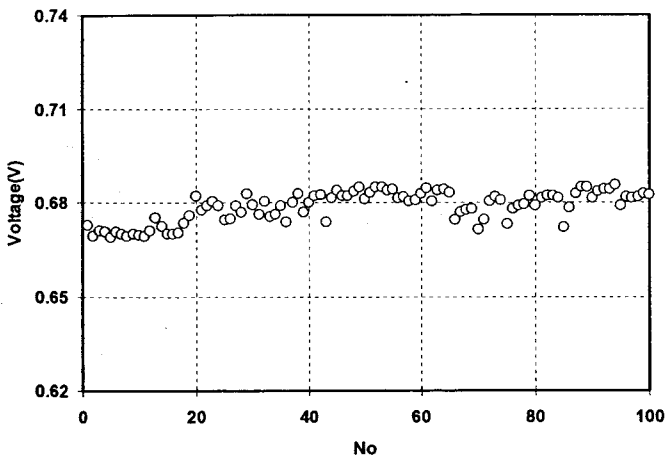
แรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ค่าที่ได้จะแปรผันตรงกับค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนไปโดยค่าที่ได้จะอยู่ในช่วงมิลลิโวลต์(mV) แสดงคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 4-7 และคำนวณผลค่าความไม่เป็นเชิงเส้นได้ค่าเป็น 7.65 % FSO และได้ค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty) 0.00218 โวลต์



รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและระดับน้ำ

#### 4.4.2 ค่าความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

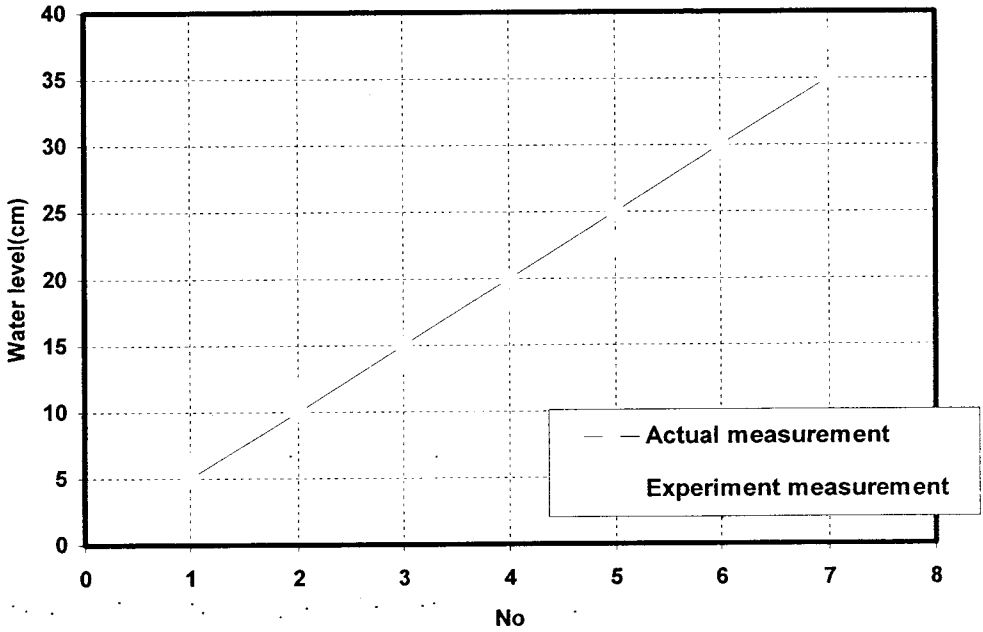
วัดแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ ตั้งแต่ระดับน้ำ 0.05 ถึง 0.35 เมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 เมตร ทดลองซ้ำ 100 ครั้ง ดังรูปที่ 4-8 ได้ค่าความสามารถในการทำซ้ำ 1.88 % ที่ระดับน้ำ 0.30 เมตร



รูปที่ 4-8 ค่าความสามารถในการซ้ำของแรงดันไฟฟ้าที่ระดับน้ำ 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



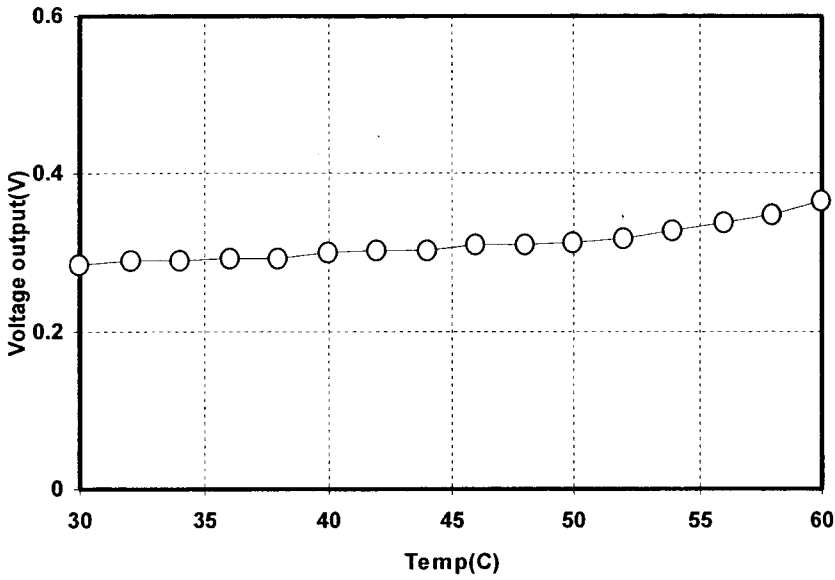
รูปที่ 4-9 เปรียบเทียบค่าระดับน้ำจริงกับค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์

### 4.5 สภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

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

#### 4.5.1 ผลของอุณหภูมิ

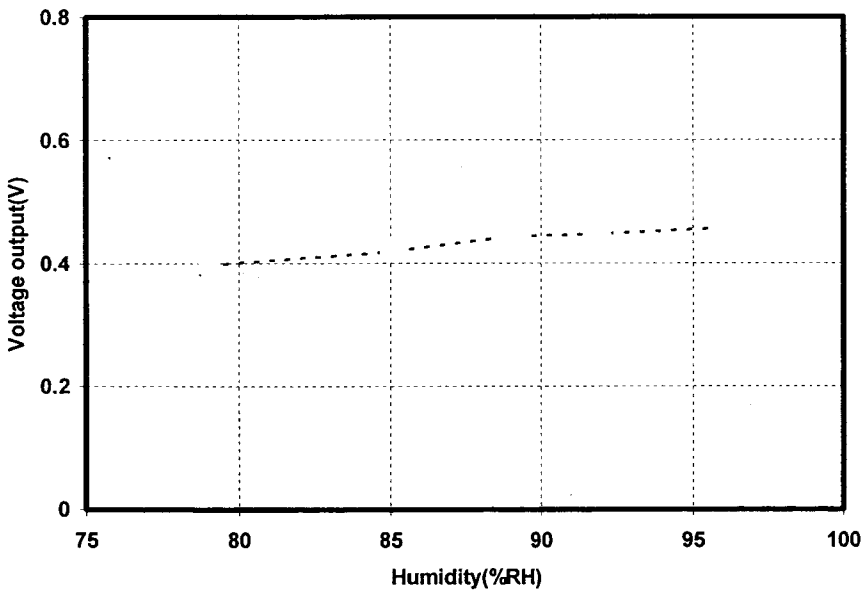
ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ ที่ระดับน้ำ 0.10 เมตร ทำการวัดตั้งแต่ระดับอุณหภูมิ 30 ถึง 60 °C โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 2 °C ดังรูปที่ 4-10



รูปที่ 4-10 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิ

#### 4.5.2 ผลของความชื้นสัมพัทธ์

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



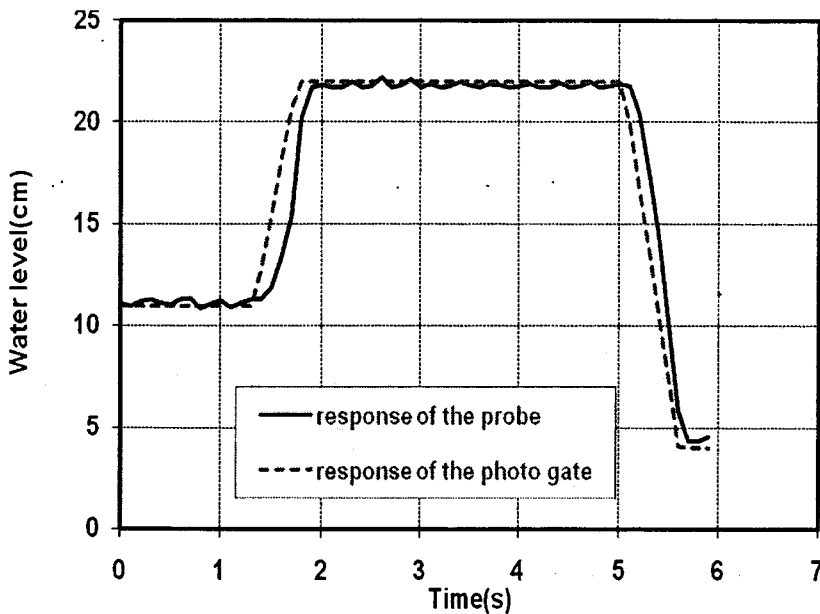
รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและความชื้นสัมพัทธ์

#### 4.6 ผลตอบสนองของเวลาที่มีต่อเซนเซอร์

ในการศึกษาใช้เซนเซอร์วัดระดับน้ำมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.048 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นโลหะ 0.40 เมตร ความหนาของท่อพีวีซี 0.002 เมตร และแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ทรงวางห่างกันเป็นระยะ 0.005 เมตร วัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยประยุกต์วงจรบริดจ์ใช้แรงดันไฟฟ้ากระตุ้น ( $v_{in}$ ) 2 V ความถี่คงที่ 1 kHz

##### 4.6.1 การจุ่มเซนเซอร์ในระดับด้วยความเร็วคงที่

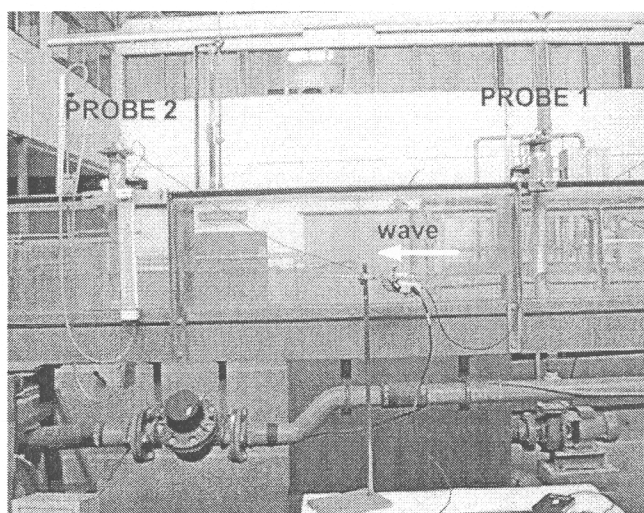
ทำการจับเวลาในการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์ผ่านโฟโต้เกต(Photogate) พร้อมทั้งวัดค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลง รูปที่ 4-12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับเวลา เมื่อให้เซนเซอร์เคลื่อนที่จุ่มลงในน้ำด้วยระยะทาง 0.10 เมตร และได้เวลาในการเคลื่อนที่โดยอ่านได้จากเครื่องจับเวลาได้เท่ากับ 0.372 วินาที ดังนั้นสามารถคำนวณความเร็วของเซนเซอร์เท่ากับ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



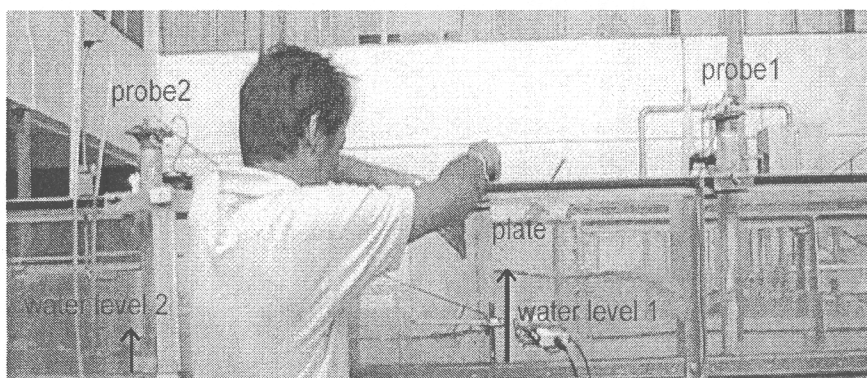
รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ของระดับน้ำกับเวลาระหว่างค่าที่ทดลองกับค่ามาตรฐาน กรณีจุ่มลงไปและยกขึ้นจากในน้ำ

#### 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

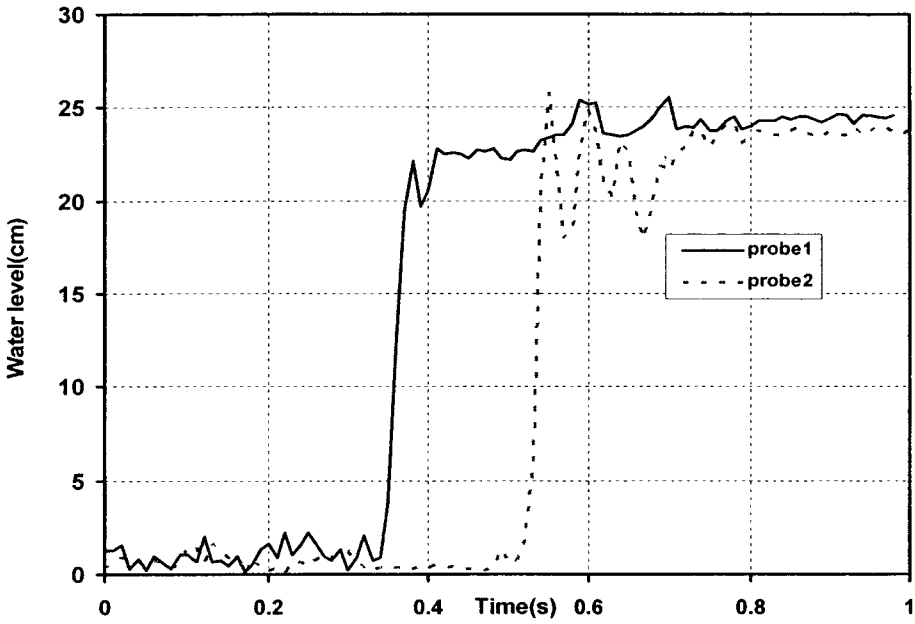


a) กรณีคลื่นน้ำเคลื่อนที่กระทบเซนเซอร์ตัวที่ 1 และ 2

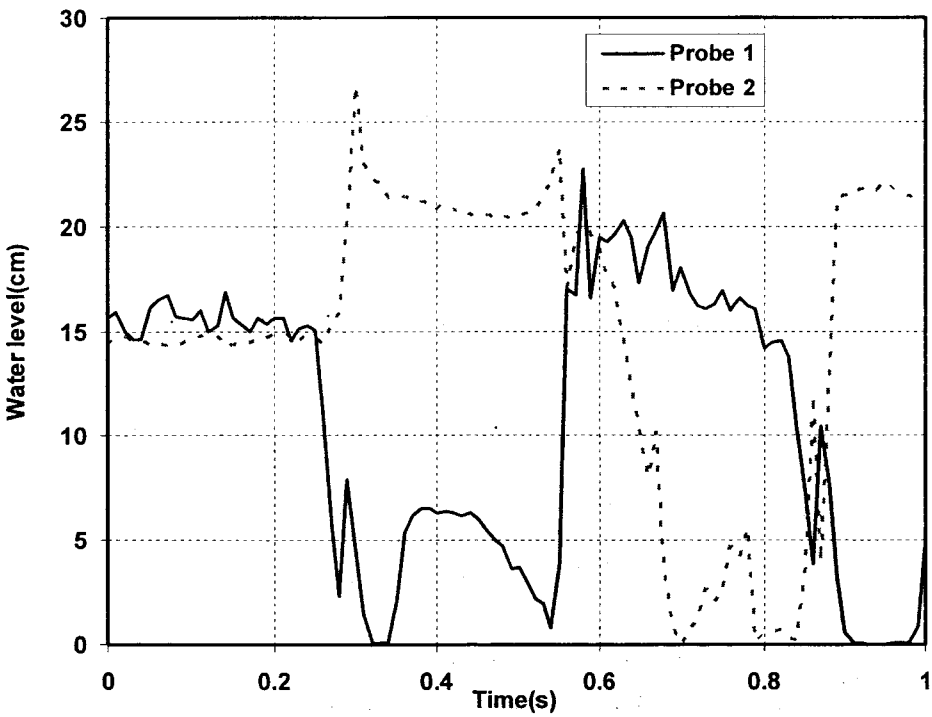


b) กรณีการทำให้เกิดคลื่นระหว่างเซนเซอร์ทั้งสอง

รูปที่ 4-13 กรณีจำลองสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์



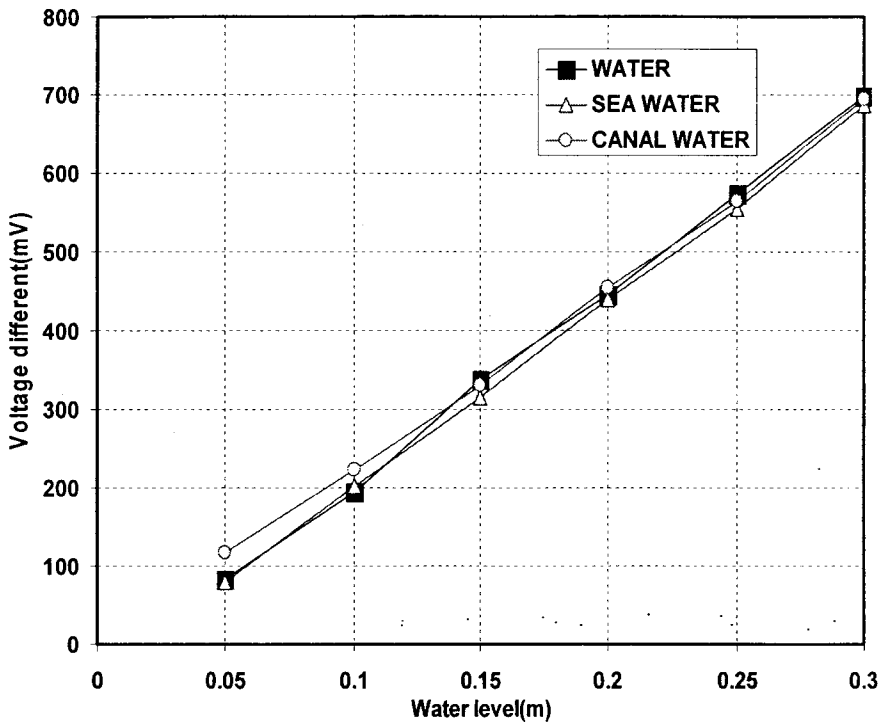
a) กรณีคลื่นน้ำเคลื่อนที่กระทบเซนเซอร์ตัวที่ 1 และ 2



b) การทำให้เกิดคลื่นระหว่างเซนเซอร์ทั้งสอง  
รูปที่ 4-14 ความสัมพันธ์ของระดับน้ำกับเวลา

#### 4.7 ความสัมพันธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับของเหลวต่างชนิด

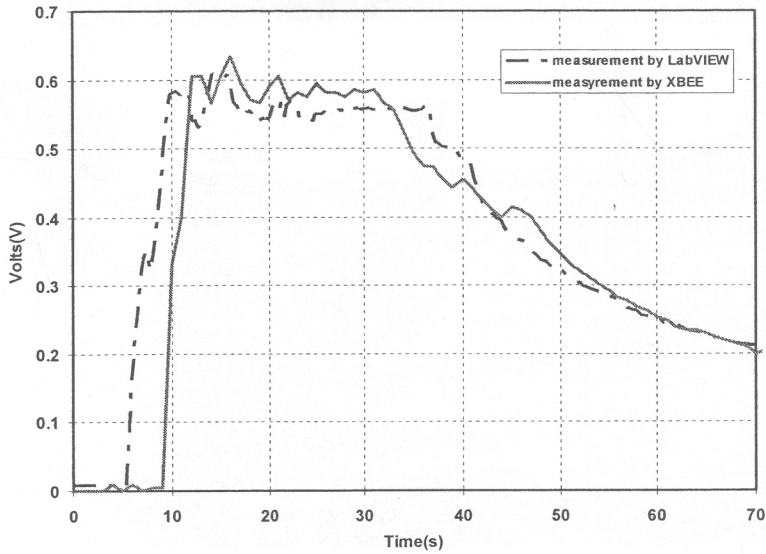
ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับน้ำต่างชนิดกัน 3 ชนิด คือ น้ำดื่ม น้ำคลอง และน้ำทะเล วัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยประยุกต์วงจรบริดจ์โดยใช้ชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอก 2 ชุด แสดงค่าการวัดระดับของเหลวผ่านคอมพิวเตอร์โดยการรับค่าสัญญาณผ่าน NI USB-6008 และแสดงผลด้วยโปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 4-15 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและระดับของเหลว เมื่อของเหลวต่างชนิดกัน

#### 4.8 ผลกระทบจากการส่งข้อมูลของเซนเซอร์ผ่านโมดูลสื่อสารไร้สาย

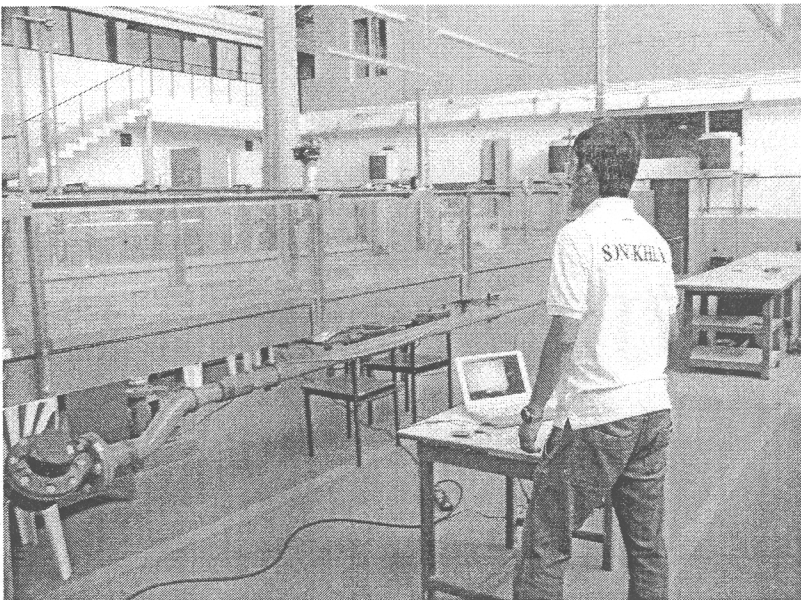
ในการศึกษาผลกระทบของการส่งผ่านข้อมูลด้วยการเลือกใช้โมดูล XBee วัดแรงดันไฟฟ้า ออกด้วยประยุกต์วงจรบริดจ์ใช้แรงดันไฟฟ้ากระตุ้น ( $V_{in}$ ) 2 V ความถี่คงที่ 1 kHz โดยใช้เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.048 เมตร ความยาวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ 0.40 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.005 เมตร 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



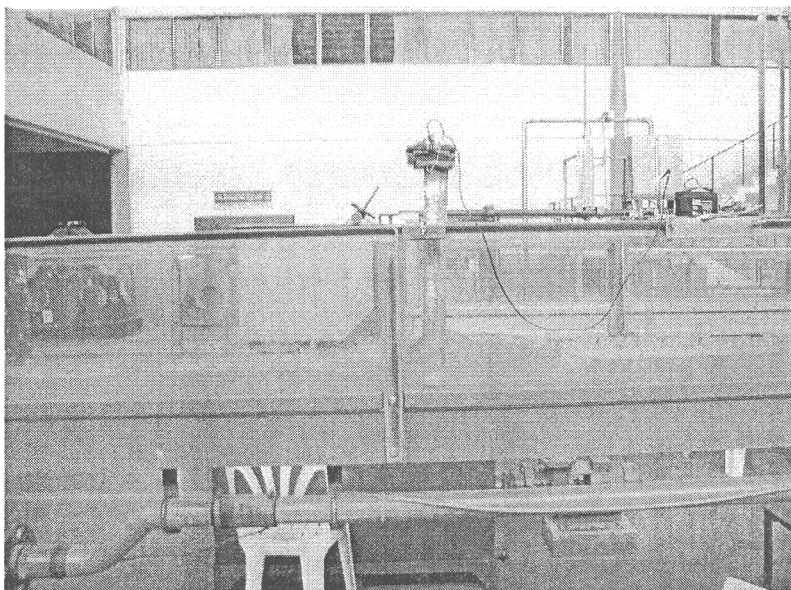
รูปที่ 4-16 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้ากับเวลาของค่าวัดจาก LabVIEW กับโมดูล XBee

#### 4.8.1 กรณีการทดสอบในสภาวะน้ำหลาก

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

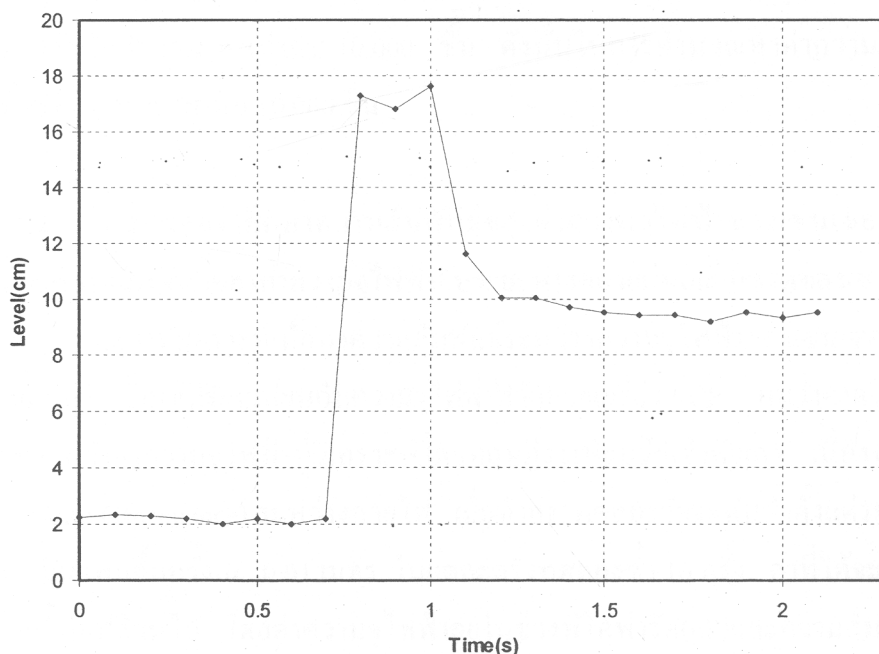


a)



b)

รูปที่ 4-17 กรณีจำลองสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์  
กรณีส่งผ่านข้อมูลไร้สาย



รูปที่ 4-18 ผลของการตรวจวัดระดับน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลง โดยส่งข้อมูลของเซนเซอร์ผ่าน โมดูลสื่อสารไร้สาย

จากผลการทดลองจะเห็นว่าผลการวัดระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงในขณะที่น้ำไหลด้วยการส่งข้อมูลของเซนเซอร์ผ่าน โมดูลสื่อสารไร้สายสามารถตรวจวัดได้ โดยช่วงสภาวะชั่วครู่จะมีค่า overshoot สูงถึง 200% ซึ่งจะเป็นสาเหตุจากความคลาดเคลื่อนของระบบส่งข้อมูล

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์

จากการศึกษาข้างต้น ในการศึกษาเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก สามารถสรุปการวิจัยได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลและวิจารณ์

##### 5.1.1 สรุปผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

ผลศึกษาวิธีการคำนวณด้วยการใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าจำนวน  $n$  ที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม MATLAB ที่ระดับน้ำ 0.09 เมตร พบว่าค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์จะมีค่าเริ่มคงที่เมื่อจำนวน  $n$  เท่ากับ 10,000 ขึ้น ดังนั้นในการคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่ใช้จำนวน  $n$  เท่ากับ 10,000 ขึ้น

##### 5.1.2 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลวและความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระยะห่างของแผ่นอิเล็กโทรดของเซนเซอร์

ผลการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลง นำมาเปรียบเทียบกับความจุไฟฟ้าที่วัดด้วยเครื่อง LCR พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้มีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้าที่วิเคราะห์โดยทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เนื่องจากมีความจุไฟฟ้าแฝง (Stray Capacitance) ระหว่างสายไฟ เมื่อทำการทดลองวัดระดับน้ำตั้งแต่ระยะ 0.01 ถึง 0.30 เมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.01 เมตร ในแต่ละครั้งทดลองซ้ำ 10 ครั้ง ค่าที่ได้จะแปรผันตรงกับค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนไป โดยค่าความจุไฟฟ้าอยู่ในช่วงพิโคฟารัด (pF) และความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระดับของเหลวแปรผันตรงกัน เมื่อขนาดระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดของเซนเซอร์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์เพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะห่างของแผ่นโลหะเป็น 0.025 เมตร ได้ค่าความไม่เป็นเชิงเส้นได้ค่าเป็น 1.4 % FSO ค่าความสามารถในการทำซ้ำได้ค่าเป็น 0.83 % FSO และค่าฮิสเตอร์ซิสเท่ากับ 6.13% FSO

### 5.1.3 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลว

สำหรับการประยุกต์วงจรบริดจ์ใช้วัดค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อระดับน้ำเปลี่ยนไปตั้งแต่ 0.05 ถึง 0.35 เมตร เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 เมตร ในแต่ละครั้งทดลองซ้ำ 100 ครั้ง พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าแปรผันตรงกับระดับน้ำและมีค่าอยู่ในช่วงมิลลิโวลต์ (mV) ได้ค่าความไม่เป็นเชิงเส้น 7.65 % FSO หรือเมื่อเปลี่ยนเป็นระดับน้ำจะได้ค่าไม่เกิน 0.027 เมตร ค่าความไม่แน่นอนของการวัด 0.00218 โวลต์ และค่าความสามารถในการทำซ้ำ 1.88 % FSO คิดเป็น 0.0065 เมตร เมื่อเปรียบเทียบค่าระดับน้ำจริงกับค่าที่ได้จากการทดลอง มีค่าความผิดพลาดสูงสุด 8.54% FSO หรือคิดเป็น 0.030 เมตร

### 5.1.4 สรุปผลการศึกษาผลสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อเซนเซอร์

เมื่อนำเซนเซอร์ไปวัดระดับน้ำที่อุณหภูมิ 30 - 60 °C พบว่า เมื่ออุณหภูมิมีค่ามากกว่า 50 °C ส่งผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์มีความผิดพลาดมากกว่า 11.66 % FSO หรือมากกว่า 0.040 เมตร และพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนไปในช่วง 78 -96 %RH ส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์มีความผิดพลาดไม่เกิน 7.66 % FSO หรือไม่เกิน 0.027 เมตร

### 5.1.5 สรุปผลการศึกษาผลตอบสนองของเวลาที่มิต่อเซนเซอร์

ผลการศึกษาผลตอบสนองเชิงพลวัตเพื่อศึกษาผลตอบสนองของเวลาได้ทำการศึกษาเป็น 2 กรณี คือ การจุ่มเซนเซอร์ในของเหลวด้วยความเร็วคงที่และสภาวะการเปลี่ยนแปลงน้ำอย่างรวดเร็ว โดยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและจับเวลาในการเคลื่อนที่โดยใช้โฟโต้เกต (Photogate) พบว่า ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัววัดที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าความเร็วที่ได้จากคำนวณ ส่วนการศึกษาโดยใช้หลักการทางชลศาสตร์เพื่อจำลองสภาวะน้ำไหลในรางเปิด พบว่า เซนเซอร์ให้ผลตอบสนองที่ดี ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้วัดระดับของเหลวที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันได้

### 5.1.6 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับของเหลวต่างชนิด

ผลการศึกษาการวัดระดับของเหลวต่างชนิดกันได้ใช้เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกชุดล่างเพื่อวัดความจุไฟฟ้าของของเหลวอ้างอิง และหัววัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกชุดบนเพื่อตรวจวัดระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง และวัดค่าความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าทั้งสองชุดทำให้สามารถตรวจวัดระดับของเหลวในระบบเปิดที่ต่างชนิดกัน ได้ค่าความ

ผิดพลาดสูงสุด 5.37 % FSO หรือผิดพลาดสูงสุดไม่เกิน 0.019 เมตร ดังนั้นเทคนิคของการวิจัยนี้สามารถนำไปวัดระดับของเหลวที่ต่างชนิดกันได้

ดังนั้นเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบต่างๆกับเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก ดังตารางที่ 5.1 เมื่อเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์วัดระดับแบบต่างๆ พบว่า ค่าความเป็นเชิงเส้น ความละเอียดให้ผลไม่ดีเท่ากับเซนเซอร์แบบต่างๆ และข่านในการใช้งานอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่แคบ แต่ข้อดีคือมีผลตอบสนองในช่วงเวลาที่ดีและมีราคาสำหรับสร้างถูกกว่าแบบต่างๆมาก

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบเซนเซอร์วัดระดับแบบต่างๆ กับเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

Sensor Types	Remote grounded Capacitive	Acoustical gas resonator	Float Celesco PT420	Ultrasonic badger 2500	Semicylindrical Capacitive
Measuring range (m)	0.70	6.5	1.1	30	0.35
Non-linearity(mm)	0.35	5	-	-	27
Accuracy (mm)	-	20	1.8	20	30
Hysteresis (mm)	0.90	< 6.5	-	-	19
Repeatability (mm)	-	-	-	-	6.5
Lag time	-	-	-	8	0.2
Temperature(°C)	23 - 28	-	-40 ...+82	-40 ...+65	28 - 50
Cost (\$)	-	-	485 -606	1,600	20

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การสร้างเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนผิวของอิเล็กโทรด ในการทดลองทำการเคลื่อนด้วยการเคลื่อนอะคิลิกหนา 0.2 มิลลิเมตร เพื่อลดปัญหาการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ต้องคิดความหนาของผิวเคลื่อน แต่หากมีการเคลื่อนไม่ดี หรือเกิดการขูดขีดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อการวัดค่าความจุไฟฟ้าส่งผลทำให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยนไป และในการพกพาควรระวังไม่ให้เกิดการขูดขีดจากวัตถุมีคม

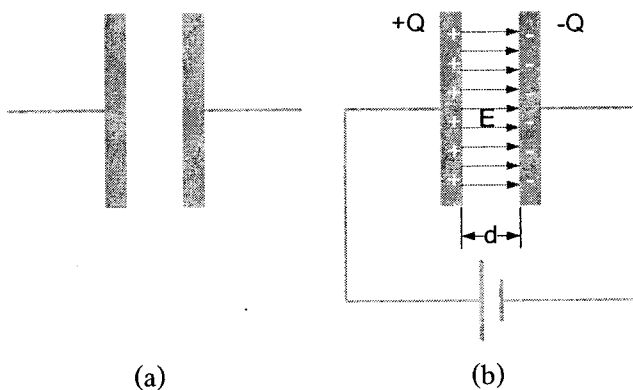
2. ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องระยะเวลาอายุการใช้งานของเซนเซอร์ เนื่องจากในการทดลองไม่ได้ทำการจุ่มเซนเซอร์ทิ้งในน้ำเป็นเวลานานๆ

## บทที่ 6

### ความจุไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตอล

#### 6.1 ทฤษฎีและหลักพื้นฐานการเก็บประจุไฟฟ้า

เมื่อเรานำแผ่นตัวนำสองแผ่นวางขนานกันในสุญญากาศ แล้วป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับแผ่นตัวนำทั้งสอง ผลที่เกิดขึ้นคือ เกิดการสะสมประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันบนแผ่นตัวนำแต่ละแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 6-1(ข)



รูปที่ 6-1 การเก็บประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน

จำนวนประจุไฟฟ้าที่สะสมบนแผ่นตัวนำแต่ละแผ่นจะมีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) และแรงดันไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำ ( $\Delta V$ ) ดังสมการที่ (6-1)

$$Q = C\Delta V \quad (6-1)$$

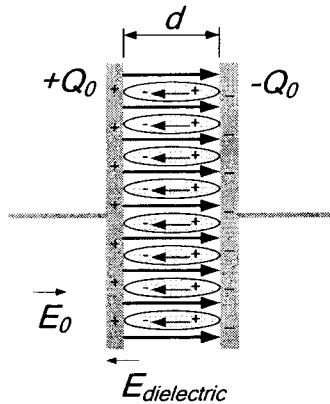
ในสุญญากาศ ค่าความจุไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวเก็บประจุ (capacitor) เปรียบเสมือนการสร้างภาชนะสำหรับบรรจุปริมาตรหนึ่ง กรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน (parallel plate capacitor) ค่าความจุไฟฟ้า ( $C$ ) จะมีความสัมพันธ์กับค่าสภาพยอมให้เกิดประจุไฟฟ้าของสุญญากาศ (permittivity of free space) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $8.85 \text{ (pF/m)}$ , พื้นที่ผิวของแผ่นตัวนำ ( $A$ ) และ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ ( $d$ ) ดังสมการที่ (6-2)

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (6-2)$$

ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานที่มีประจุไฟฟ้าต่างกัน จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำที่มีทิศทางออกจากแผ่นที่มีประจุบวกไปหาแผ่นที่มีประจุลบ โดยมีความสัมพันธ์กับ จำนวนประจุไฟฟ้า ( $Q$ ) ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ ( $d$ ) และค่าความจุไฟฟ้า ( $C$ ) ดังสมการที่ (6-3)

$$\bar{E} = \frac{Q}{Cd} \quad (6-3)$$

ที่กล่าวมา เป็นการพิจารณาเฉพาะกรณีที่แรงสนามไฟฟ้าของตัวเก็บประจุตัดผ่านสุญญากาศเท่านั้น ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จึงขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวเก็บประจุเป็นหลัก แต่หากเราเปลี่ยนจากสุญญากาศไปเป็นวัสดุอื่นที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า “วัสดุไดอิเล็กตริก” จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นจากเดิม เนื่องจากแรงของสนามไฟฟ้าที่ตัดผ่านวัสดุไดอิเล็กตริก จะพยายามแยกอิเล็กตรอนและโปรตอนของวัสดุไดอิเล็กตริกออกจากกัน ในขณะที่อิเล็กตรอนและโปรตอนก็พยายามดึงตัวเองกลับสู่สถานะเดิมเช่นกัน ความพยายามดังกล่าวทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในอะตอมของวัสดุไดอิเล็กตริก ( $E_{\text{dielectric}}$ ) เรียกว่า “สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ” ดังแสดงในรูปที่ 6-2



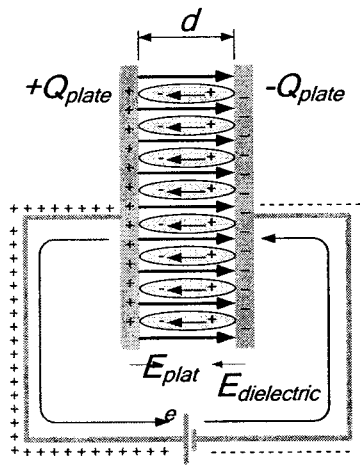
รูปที่ 6-2 สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่มีทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าเดิม

หากตัวเก็บประจุดังกล่าวไม่ได้ต่อกับแหล่งจ่ายไฟ จำนวนประจุไฟฟ้าบนแผ่นตัวนำจะมีเท่าเดิม สนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำก็จะมีจำนวนเท่าเดิมตามไปด้วย ( $E_0$ ) ดังนั้นผลรวมของสนามไฟฟ้าทั้งสองจะลดลง (เนื่องจากมีทิศทางที่ตรงข้ามกัน) สนามไฟฟ้ารวมที่ลดลงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของ

ตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น โดยค่าความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น จะมีความสัมพันธ์กับจำนวนประจุไฟฟ้าเดิม ( $Q_0$ ) ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ ( $d$ ) และผลรวมของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}_0 + \vec{E}_{dielectric}$ ) ดังสมการที่ (6-4)

$$C_{dielectric} = \frac{Q_0}{(\vec{E}_0 + \vec{E}_{dielectric})d} \quad (6-4)$$

ในกรณีที่ตัวเก็บประจุต่อกับแหล่งจ่ายไฟ สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำให้จำนวนประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยการดึงประจุไฟฟ้าเพิ่มเติมจากแหล่งจ่าย เพื่อรักษาสถาณภาพไฟฟ้ารวมให้มีค่าเท่าเดิม ( $\vec{E}_{total} = \vec{E}_0$ ) ดังแสดงในรูปที่ 6-3



รูปที่ 6-3 ประจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากวัสดุไดอิเล็กตริก ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

ค่าความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับผลรวมของจำนวนประจุไฟฟ้าใหม่ ( $Q_0 + Q_{dielectric}$ ) ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ ( $d$ ) และค่าสนามไฟฟ้าเดิม ( $\vec{E}_0$ ) ดังสมการที่ (6-5)

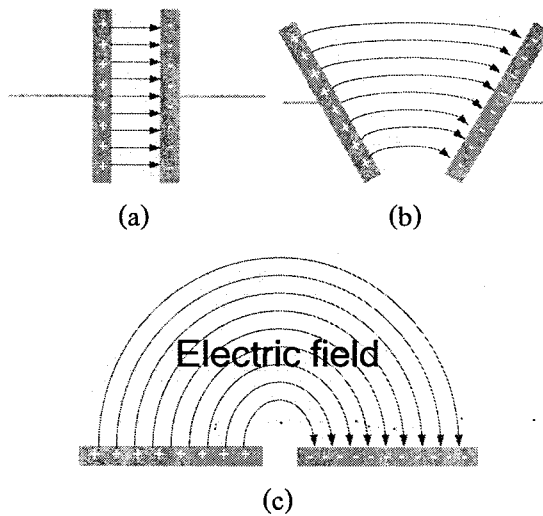
$$C_{dielectric} = \frac{Q_0 + Q_{dielectric}}{\vec{E}_0 d} \quad (6-5)$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน ค่าความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากวัสดุไดอิเล็กตริก จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) กับค่าความจุไฟฟ้าในสุญญากาศ ( $C_0$ ) ดังสมการที่ (6-6)

$$C_{dielectric} = \epsilon_r C_0 \quad (6-6)$$

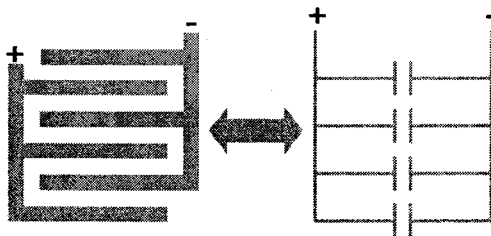
จากสมการที่ (6-6) จะสังเกตได้ว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุใดๆ ( $\epsilon_r$ ) จะไม่มีหน่วย แต่ใช้การเปรียบเทียบกับค่าสภาพยอมให้เกิดประจุไฟฟ้าของสุญญากาศ ( $\epsilon_0$ ) ซึ่งมีเท่ากับ 8.85 (pF/m) ดังนั้น ในกรณีที่ไดอิเล็กตริกเป็นสุญญากาศ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) จะมีค่าเท่ากับ 1

จากหลักการพื้นฐานของตัวเก็บประจุตั้งที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อเรานำตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานที่มีประจุไฟฟ้าต่างกัน มาแยกออกจากกันในแนวระนาบ สิ่งที่เกิดขึ้นคือ ยังคงเกิดการสะสมประจุไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำ แต่จะมีค่าความจุไฟฟ้าลดตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น ผลจากการแยกแผ่นตัวนำออกจากกัน ทำให้สามารถวางวัสดุไดอิเล็กตริกได้หลากหลายขนาด โดยไม่ต้องเปลี่ยนโครงสร้างของตัวเก็บประจุใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 6-4(ค)



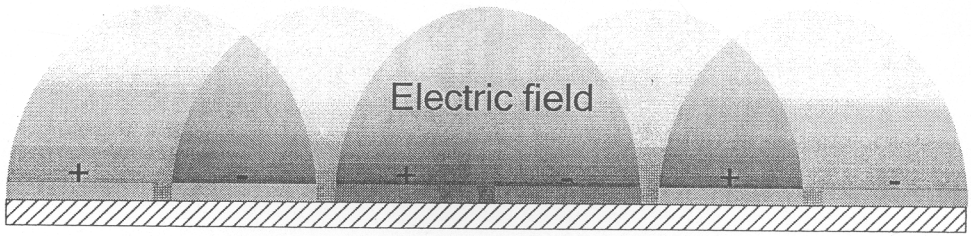
รูปที่ 6-4 สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการแยกแผ่นตัวนำออกในแนวระนาบ

เมื่อเรานำแผ่นตัวนำที่ถูกแยกออกจากกันในแนวระนาบ มาต่อสลับไปมาระหว่างขั้วบวกและลบ ผลที่เกิดขึ้นคือ จะได้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วน เหมือนการนำตัวเก็บประจุมารต่อขนานกัน เรียกรูปแบบนี้ว่า “อิเล็กโตรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล” (Interdigital Electrode) ดังรูปที่ 6-5



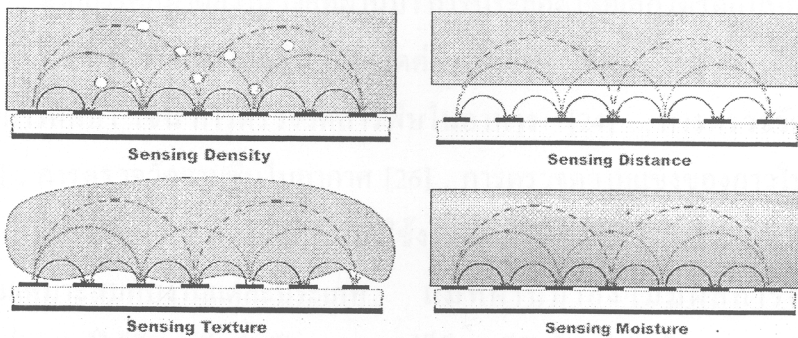
รูปที่ 6-5 โครงสร้างอิเล็กโตรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล เหมือนการนำตัวเก็บประจุมารต่อขนานกัน

ผลของการสะสมประจุบนอิเล็กโทรดแบบอินเทอร์ดิจิตอล ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างซี่ตลอด ความยาวของอิเล็กโทรด ดังแสดงในรูปที่ 6-6



รูปที่ 6-6 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อมีการสะสมประจุ

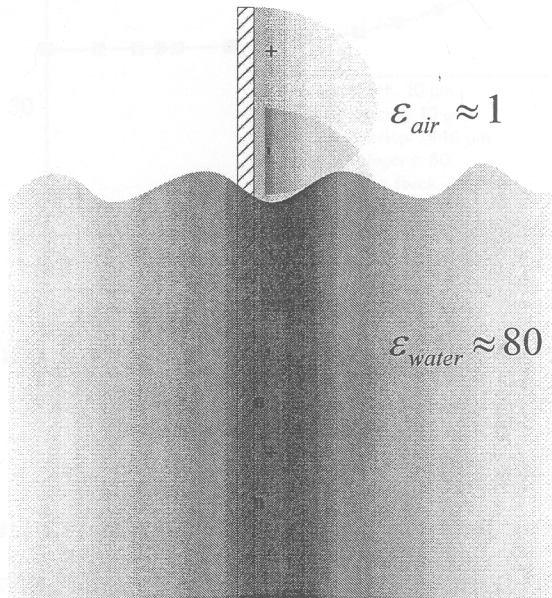
เมื่อเรานำวัสดุไดอิเล็กตริกวางบนอิเล็กโทรดแบบอินเทอร์ดิจิตอล สนามไฟฟ้าจากอิเล็กโทรดที่ตัดผ่านวัสดุไดอิเล็กตริก จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงไปตามคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ จากหลักการนี้ เราจึงสามารถนำอิเล็กโทรดแบบอินเทอร์ดิจิตอลมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดค่าต่างๆ โดยอาศัยคุณสมบัติที่แตกต่างกันของวัสดุ เช่น การวัดความหนาแน่นของวัสดุ การวัดระยะห่างของวัสดุ การทดสอบความราบเรียบของวัสดุ และการวัดความชื้นในวัสดุ ดังตัวอย่างในรูปที่ 6-7



รูปที่ 6-7 การประยุกต์ใช้อิเล็กโทรดแบบอินเทอร์ดิจิตอล สำหรับการตรวจวัดวัสดุแบบต่างๆ [24]

ด้วยความแตกต่างกันของน้ำและอากาศซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ต่างกันมาก (น้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 80 อากาศมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 1) งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำอิเล็กโทรดแบบอินเทอร์ดิจิตอลมาประยุกต์ใช้วัดระดับน้ำดังแสดงในรูปที่ 6-8 ภายใต้สมมุติฐานที่ว่า เมื่อระดับน้ำเปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงตามระดับน้ำด้วย ซึ่งหากความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าความจุไฟฟ้าเป็นไปใน

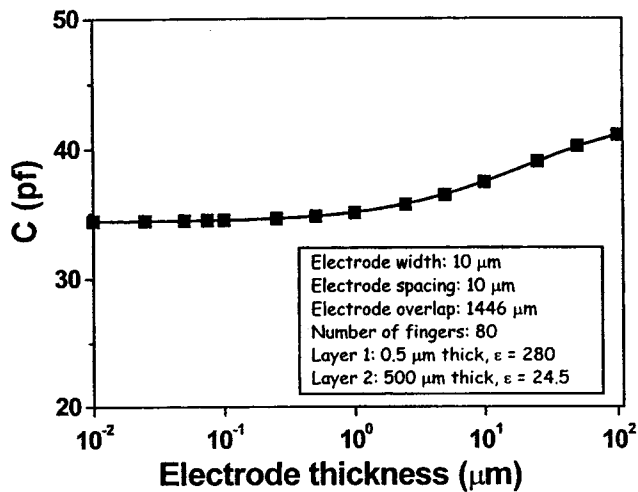
ลักษณะที่มีนัยสำคัญ ก็จะนำไปสู่การพัฒนาเซนเซอร์วัดระดับน้ำอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งแตกต่างจากที่เคยมีการใช้งานทั่วไป



รูปที่ 6-8 การใช้ใยแก้วนำแสงแบบอินเตอร์ดิฟฟิรอนซ์วัดระดับน้ำ โดยใช้คุณสมบัติที่ไดอิเล็กตริกของน้ำที่มากกว่าอากาศ

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา การประยุกต์ใยแก้วนำแสงแบบอินเตอร์ดิฟฟิรอนซ์สำหรับนำมาทำเป็นเซนเซอร์ จะเน้นไปที่การวัดค่าคุณสมบัติเพื่อจำแนกชนิดหรือส่วนประกอบของวัสดุที่ทำการศึกษา เช่น การตรวจวัดสารพิษในอาหาร [24] , การตรวจวัดความชื้นของคอนกรีต [25] , การตรวจวัดความชื้นในอากาศ [26] , การตรวจความแข็งของกาวในอุตสาหกรรม [27] เป็นต้น การออกแบบใยแก้วนำแสงเพื่อนำมาใช้ในงาน จำเป็นต้องศึกษาลักษณะโครงสร้าง รวมถึงวัสดุ ให้มีความเหมาะสมกับงานแต่ละประเภท แม้ที่ผ่านมายังไม่มีผลการศึกษานำใยแก้วนำแสงไปประยุกต์ใช้วัดระดับน้ำ (ปี 2553) แต่ก็มีงานวิจัยที่นำใยแก้วนำแสงแบบอินเตอร์ดิฟฟิรอนซ์ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่นๆ ซึ่งได้ให้รายละเอียดเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของขนาด และวัสดุ ที่จะส่งผลกระทบต่อค่าความจุไฟฟ้า อันมีส่วนสำคัญสำหรับเป็นแนวทางในการออกแบบเพื่อนำไปประยุกต์ใช้วัดระดับน้ำ มีผลการศึกษาเบื้องต้นดังนี้

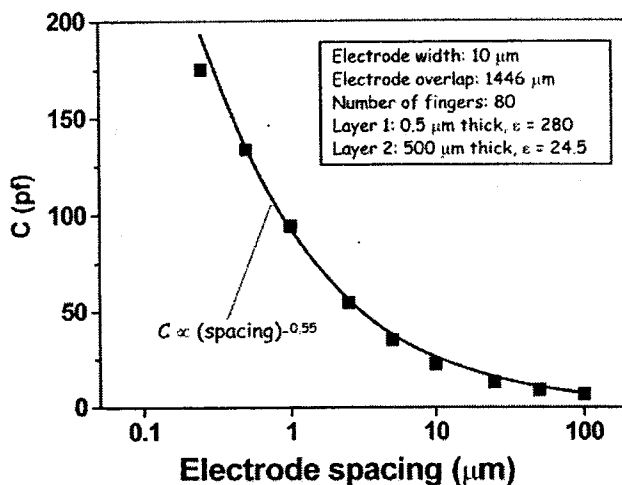
Y. Wang et al. [28] ได้ทำการศึกษาระยะห่าง ความกว้าง ความหนาของใยแก้วนำแสง และความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับความหนาของใยแก้วนำแสง ดังแสดงในรูปที่ 6-9



รูปที่ 6-9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล และความหนาของอิเล็กโทรด [28]

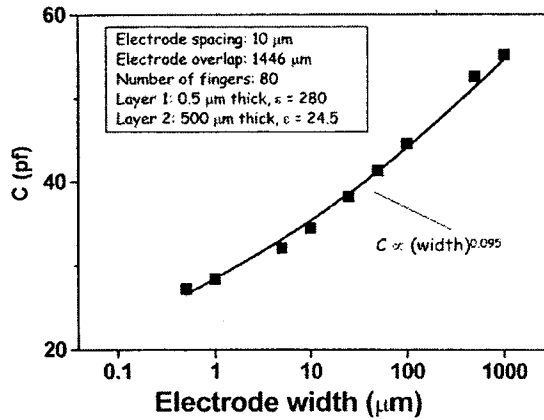
จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อความหนาของอิเล็กโทรดอยู่ระหว่าง 10 nm ถึง 1  $\mu\text{m}$  ความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปมาก และเมื่อความหนาของอิเล็กโทรดมีค่ามากกว่า 1  $\mu\text{m}$  ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 20% เมื่อความหนานี้มีค่าเป็น 100  $\mu\text{m}$

ในส่วนความสัมพันธ์ของระยะห่างของอิเล็กโทรด และความจุไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 6-10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระยะห่างของอิเล็กโทรดส่งผลต่อความจุไฟฟ้ามาก โดยความจุไฟฟ้ามีค่าแปรผันไปตาม (ระยะห่าง) $^{\alpha}$  โดยที่  $\alpha < 1$



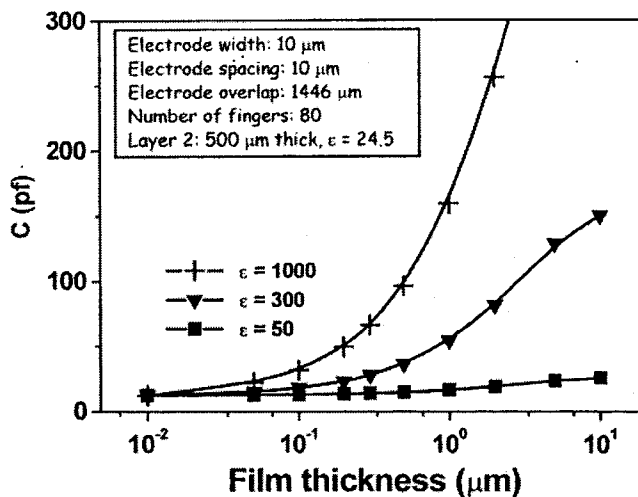
รูปที่ 6-10 ความสัมพันธ์ของระยะห่างของอิเล็กโทรด และค่าความจุไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตอล[28]

สำหรับความสัมพันธ์ของความกว้างของอิเล็กโทรด และค่าความจุไฟฟ้าดังแสดง  
 ในรูปที่ 6-11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความกว้างของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้า  
 เพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่น้อยลงเรื่อยๆ โดยค่าความจุไฟฟ้ามีค่าแปรผันไปตาม (ความกว้าง) <sup>$\beta$</sup>  โดยที่  
 $\beta \ll 1$  โดยในที่นี้  $\beta \approx 0.095$



รูปที่ 6-11 ความสัมพันธ์ของความกว้างของอิเล็กโทรด และค่าความจุไฟฟ้า[28]

ความสัมพันธ์ของความหนาสารเคลือบผิวของอิเล็กโทรดที่มีค่าไดอิเล็กตริกต่างๆ  
 กับค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแสดงได้ดังแสดงในรูปที่ 6-12 ซึ่งเห็นว่าอิทธิพลของความหนา  
 ในสารที่เคลือบผิวอิเล็กโทรดแบบอินเทอร์ดิจิตอลจะแปรไปตามคุณสมบัติของสารเคลือบผิว ถ้าค่า  
 ไดอิเล็กตริกมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับวัสดุฐานรอง ค่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามความหนาอย่าง  
 เป็นเชิงเส้น เมื่อค่าไดอิเล็กตริกมีขนาดใหญ่เทียบกับวัสดุฐานรอง ความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่าง  
 ยี่งรวดเร็วเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น



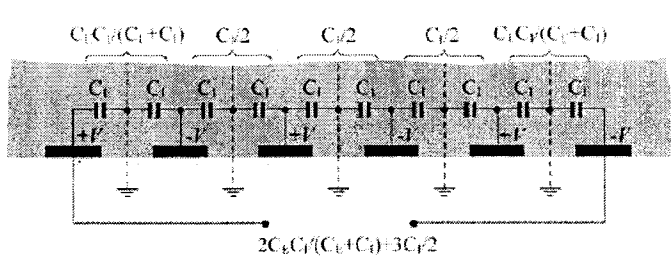
รูปที่ 6-12 ความสัมพันธ์ของความหนาสารเคลือบผิวของอิเล็กโทรด  
 ที่มีค่าไดอิเล็กตริกต่างๆกับค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรด[28]

ผลการศึกษาของ Y. Wang et al. จึงมีประโยชน์ต่อการออกแบบ และสร้างแผ่นพิมพ์วงจรที่มีลายซ้ำหิว หรืออิเล็กทรอนิกส์แบบอินเตอร์ดิจิตอล มีรูปลักษณะความหนา ความกว้าง และระยะห่างที่เหมาะสมได้เช่นไร

### 6.2 การประมาณค่าความจุไฟฟ้าด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์

ในการสร้างต้นแบบอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเตอร์ดิจิตอลสำหรับวัดระดับน้ำ ได้เลือกใช้วิธีการประมาณค่าด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ เป็นแนวทางในการหาขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าอยู่ในช่วง 100 .500 pF ต่อการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ 1 เซนติเมตร ซึ่งมากพอที่จะลดผลกระทบจากค่าความจุไฟฟ้าแฝง และง่ายในการออกแบบวงจรอ่านค่าความจุไฟฟ้า แต่ในการคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าสำหรับอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเตอร์ดิจิตอลที่มีแผ่นตัวนำวางในแนวระนาบ จึงไม่สามารถใช้รูปแบบของตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานได้ เนื่องจากสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำไม่สม่ำเสมอเท่ากันทุกจุด จากการศึกษาบทความวิจัยที่ได้เคยอธิบายวิธีการประมาณค่าทางคณิตศาสตร์สามารถแบ่งหลักการพิจารณาได้ 2 วิธี คือ

Rui Igreja [29] ได้ทำการศึกษาวงจรสมมูลของอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเตอร์ดิจิตอลที่แสดงให้เห็นได้ว่าอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเตอร์ดิจิตอลเป็นตัวเก็บประจุหลายๆตัวนำมาต่ออนุกรมกันดังที่แสดงในรูปที่ 6-13 สำหรับการคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าได้จากการส่งคงรูป (conformal mapping) โดยอาศัยการแปลงฟังก์ชันเชิงวิเคราะห์ 2 มิติ (two.dimensional analytical function) ในโดเมนเชิงซ้อน โดยการส่งคงรูปจะแปลงความจุไฟฟ้าระหว่างอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเตอร์ดิจิตอลไปเป็นความจุไฟฟ้าของแผ่นขนานได้ซึ่งทำให้สามารถประมาณค่าความจุไฟฟ้าได้ต่อไป

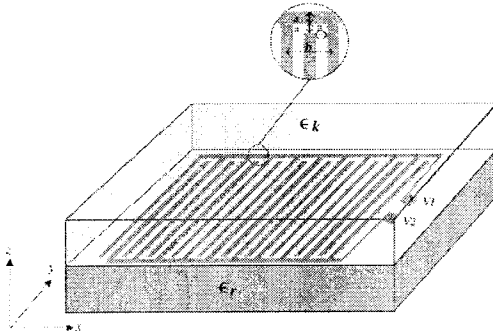


รูปที่ 6-13 วงจรสมมูลของอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเตอร์ดิจิตอล[29]

Md. Nazmul Alam [25] ได้เลือกใช้การประมาณค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการหาค่าความชื้นในเนื้อคอนกรีต ค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วย ( $C_{pu}$ ) มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6-7)

$$C_{PUC} = \epsilon_0 \frac{(\epsilon_m + \epsilon_s) K \left[ \sqrt{1 - (a/b)^2} \right]}{2 K[a/b]} + \epsilon_0 \epsilon_a \frac{h}{a} \quad (6-7)$$

โดยที่  $\epsilon_0$   $\epsilon_m$   $\epsilon_s$  และ  $\epsilon_a$  เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอากาศว่าง วัสดุทดสอบ วัสดุฐานรอง และอากาศตามลำดับ  $a$  เป็นขนาดความกว้างของลายซี่  $b$  เป็นขนาดช่องห่างระหว่างซี่ และ  $h$  เป็นขนาดความหนาของซี่ตามแสดงในรูปที่ 6-14



รูปที่ 6-14 ลักษณะทางกายภาพของอิล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล [25]

สำหรับ  $K[a/b]$  เป็นปริพันธ์เชิงวงรีของมอดูลัส (elliptic integrals of modulus) เพื่อใช้หาค่าความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าเนื่องจากแนวของสนามไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายวงรีดังรูปที่ 6-15



รูปที่ 6-15 รูปแบบของสนามไฟฟ้าของอิล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอลที่มีลักษณะคล้ายวงรี[30]

โดยปริพันธ์เชิงวงรีของมอดูลัสมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6-8)

$$K(k) = \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{(1-v^2)(1-k^2v^2)}} dv \quad (6-8)$$

ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมดของอิล็กโทรด  $C_{electrode}$  หาได้จากสมการที่ (6-9)

$$C_{electrode} = NLC_{PUC} \quad (6-9)$$

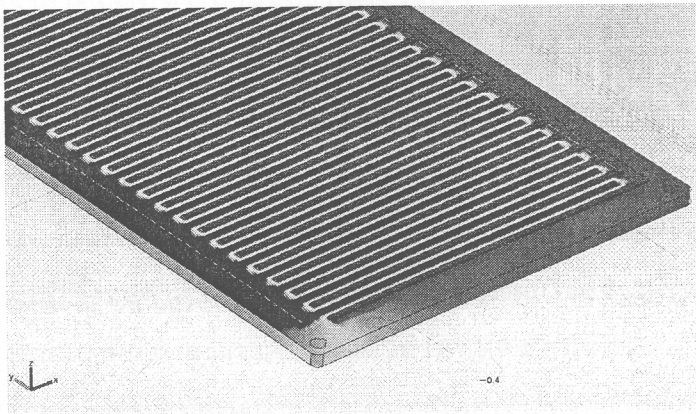
โดย  $L$  เป็นความยาวของลายซี่และ  $N$  เป็นจำนวนซี่ทั้งหมดของอิล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล

### 6.3 การจำลองการทำงานของอินเตอร์ดิจิตอลเล็กโทรดด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics

หลังจากหาขนาดอิเล็กทรอนิกส์โทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอลด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์จนได้ขนาดอิเล็กทรอนิกส์โทรดตามค่าความจุไฟฟ้าตามที่ต้องการแล้ว การสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ (Simulation) เพื่อทดสอบและหาข้อผิดพลาดเบื้องต้นก่อนการสร้างต้นแบบจริง (Prototype) โดยในที่นี้เลือกใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics ในการจำลองการทำงาน ซึ่งจะใช้หลักการของ Finite element ในการพิจารณาแต่ละส่วนย่อย (Mesh) เพื่อหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเคลื่อนย้ายประจุ จากนั้นนำค่าพลังงานที่ได้ ไปคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าจากสมการที่ (6-10)

$$C = \frac{Q^2}{2W_e} = \frac{C^2 \Delta V^2}{2W_e} \Rightarrow C = \frac{2W_e}{\Delta V^2} \quad (6-10)$$

$\Delta V$  คือแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายประจุที่ถูกกำหนดภายในโปรแกรมโดยผู้ใช้ ซึ่งการจำลองการทำงานจะต้องทำการเขียนแบบของอิเล็กทรอนิกส์โทรดตามขนาดจริง และต้องกำหนดชนิดของวัสดุ และคุณสมบัติให้ใกล้เคียงกับวัสดุที่ใช้จริงมากที่สุด แต่เนื่องโปรแกรม COMSOL ต้องใช้ทรัพยากรจากคอมพิวเตอร์ในการประมวลแต่ละครั้งสูงมาก และใช้เวลานาน ในการจำลองการทำงานครั้งนี้ จึงลดขนาดของอิเล็กทรอนิกส์โทรดให้เหลือเพียง 10 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6-16 เพื่อให้เหมาะสมกับประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้งาน เมื่อผลที่ได้จากการจำลองการทำงานเป็นไปตามคุณสมบัติที่ต้องการแล้ว ก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการจัดทำต้นแบบต่อไป



รูปที่ 6-16 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม COMSOL เพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าของอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์โทรดขนาด 10 เซนติเมตร

## บทที่ 8

### การออกแบบเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอลรุ่นที่ 2

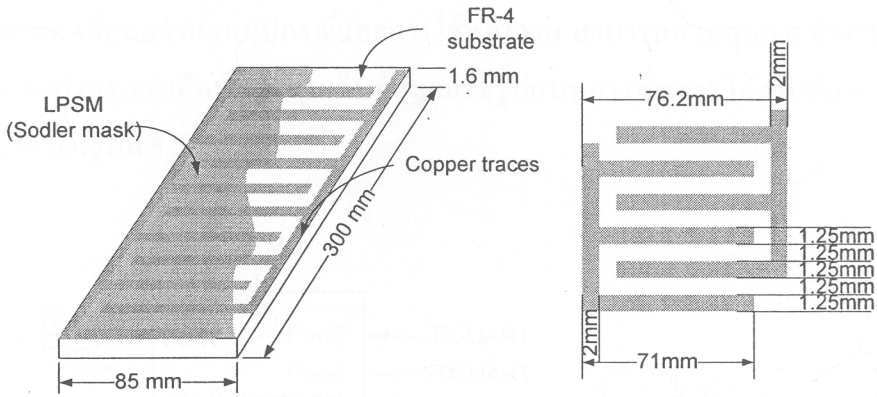
การออกแบบเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอลรุ่นที่ 2 เป็นการออกแบบเซนเซอร์วัดระดับน้ำเพื่อรองรับการใช้งานร่วมกับโมดูลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ซึ่งต้องการคุณสมบัติของเซนเซอร์วัดระดับน้ำที่กินพลังงานต่ำ และมีราคาถูก สามารถปรับการทำงานให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมได้ด้วยตัวเอง การพัฒนาจึงแบ่งออกเป็น 3 ส่วน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

#### 8.1 อิเล็กทรอนิกส์

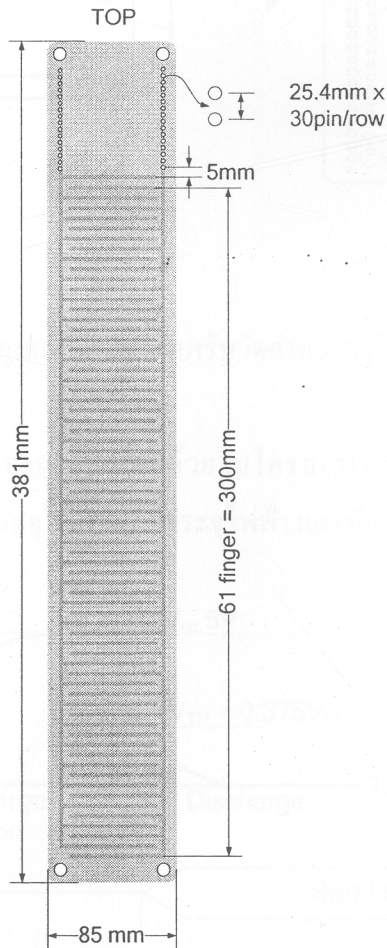
วัสดุสำหรับนำมาสร้างอิเล็กทรอนิกส์ คือ แผ่นวงจรพิมพ์ (print circuit board) เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย สามารถทำได้เอง หรือสั่งผลิตตามแบบได้จากโรงงานภายในประเทศ ซึ่งรองรับการผลิตตั้งแต่อุปกรณ์ต้นแบบ จนถึงระดับผลิตภัณฑ์โดยไม่กำหนดจำนวนขั้นต่ำในการสั่งผลิต การผลิตจากโรงงานทำให้ได้ชิ้นงานที่รวดเร็ว และมีมาตรฐานสม่ำเสมอทุกชิ้น 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 ผลจากการแทนค่าตัวแปรต่างๆในแบบจำลองคณิตศาสตร์ในสมการที่ (6-2) - (6-4) จะได้ขนาดของลายวงจรถอดรูปที่ 8-1



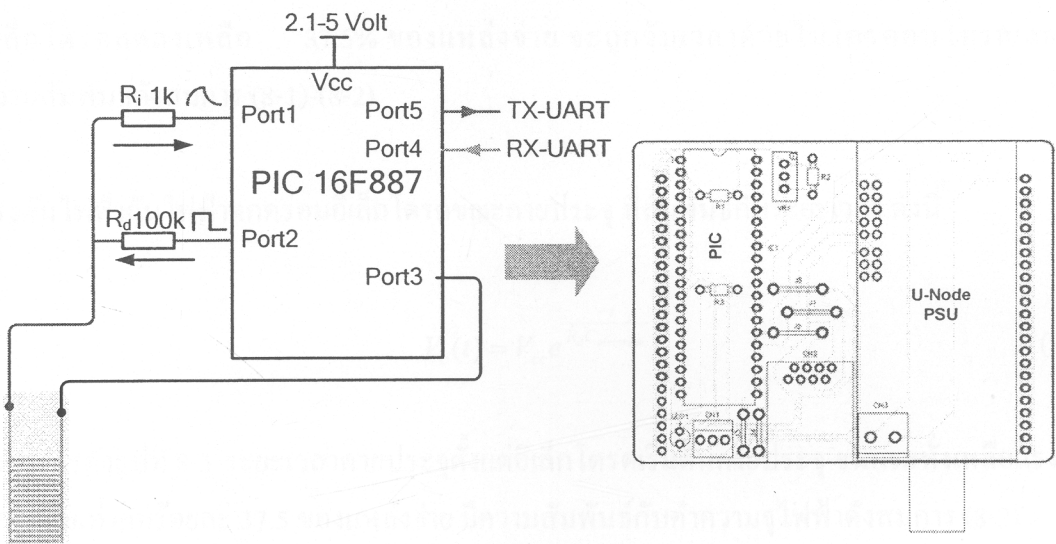
รูปที่ 8-1 ขนาดของลายวงจรถอดรูปที่ได้จากการออกแบบโดยใช้การประมาณค่าด้วยสมการคณิตศาสตร์



รูปที่ 8-2 ต้นแบบอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเทอร์ดิจิตอลที่ได้รับการปรับปรุงในรุ่นที่ 2

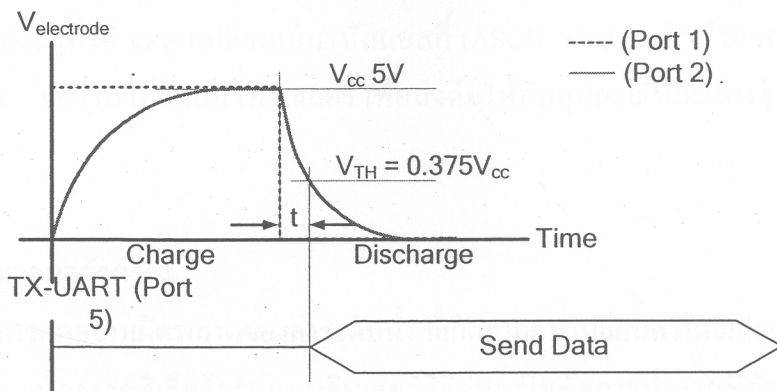
## 8.2 วงจรควบคุมการทำงาน

ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กทรอนิกส์ จะถูกวัดด้วยวงจรควบคุมการทำงาน ซึ่งใช้หลักการจับเวลาคายประจุ ออกแบบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงตัวเดียวทำหน้าที่ควบคุมการทำงานทั้งหมด เพื่อลดจำนวนอุปกรณ์และการใช้พลังงาน สามารถควบคุมการทำงานได้ง่ายด้วยโปรแกรม จึงกำหนดค่าอัตราการสุ่มเก็บข้อมูลและรูปแบบการสื่อสารได้ตามต้องการ มีผลการออกแบบวงจรดังรูปที่ 8-3



รูปที่ 8-3 วงจรควบคุมการทำงานสำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กทรอนิกส์

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



รูปที่ 8-4 การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กทรอนิกส์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ขั้นตอนการเก็บประจุไฟฟ้า ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้างสัญญาณพัลส์ผ่าน  $R_d$  แล้วส่งต่อไปลายวงจรซึ่งบวกของแผ่นอิเล็กโทรด ส่วนที่ลบถูกต่อเข้ากับขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีสถานะเป็นโลว์ดังแสดงในรูปที่ 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 มีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้างดังสมการ (8-2)

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

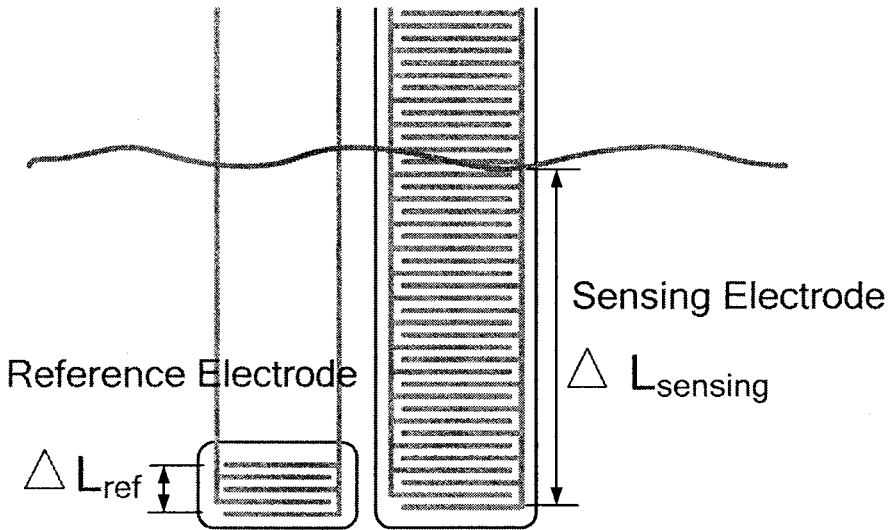
สมการที่ (8-2) แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการคายประจุก็จะมากขึ้นตามไปด้วย โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับระยะเวลาคายประจุเป็นเชิงเส้น ระยะเวลาคายประจุที่ได้ จะถูกเปลี่ยนเป็นรหัสแอสกี (ASCII Code) แล้วส่งออกผ่านทางพอร์ตอนุกรม UART ของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อส่งต่อไปให้กับอุปกรณ์ที่มีมาตรฐานสื่อสารแบบเดียวกันต่อไป

## 8.3 ระบบประมวลผลอัจฉริยะ

### 8.3.1 การลดความผิดพลาดของค่าระดับน้ำ ที่เกิดจากการเปลี่ยนค่าไดอิเล็กตริก

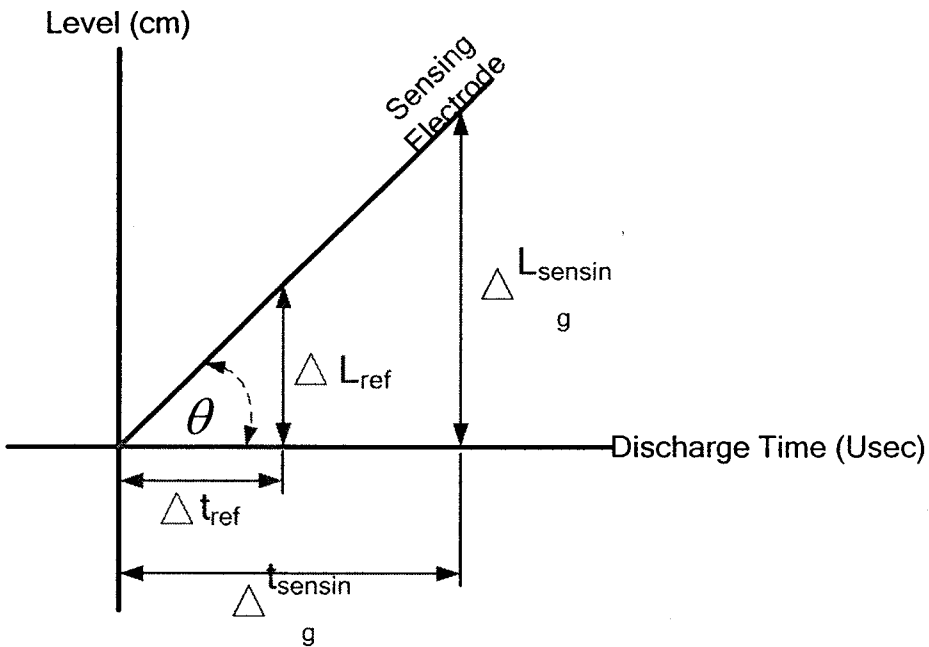
เนื่องจากอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล มีหลักการทำงานที่ต้องอาศัยการเก็บประจุไฟฟ้าเสมือนตัวเก็บประจุตัวหนึ่ง ซึ่งนอกจากขนาดโครงสร้างของอิเล็กโทรดแล้ว ค่าไดอิเล็กตริกของน้ำก็เป็นปัจจัยสำคัญต่อความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรด เมื่อค่าไดอิ-

เล็กน้อยของน้ำเปลี่ยนแปลงไป อันเนื่องจากอุณหภูมิหรือสิ่งเจือปนในน้ำ ย่อมส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัดของเซนเซอร์ด้วย การเพิ่มอิเล็กโทรดสำหรับวัดความเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กตริกของน้ำขณะที่ทำการตรวจวัด เพื่อนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงในการปรับสูตรการคำนวณให้เหมาะสมกับสภาพน้ำขณะทำการวัด จะช่วยลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและสิ่งเจือปนในน้ำได้ ดังมีหลักการแสดงในรูปที่ 8-5



รูปที่ 8-5 การเพิ่มอิเล็กโทรดอ้างอิงสำหรับชดเชยค่าความผิดพลาดขณะตรวจวัดด้วยเซนเซอร์

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



รูปที่ 8-6 การชดเชยผลกระทบจากอุณหภูมิ และสิ่งเจือปนในน้ำ

โดยการปรับค่าความสัมพันธ์ของอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำ ตามค่าความสัมพันธ์ของอิเล็กโทรดอ้างอิง จากรูปที่ 8-7 เมื่อ  $\Delta L_{ref}$  เป็นค่าความยาวของอิเล็กโทรดอ้างอิง และ  $\Delta t_{ref}$  เป็นค่าระยะเวลาคายประจุของอิเล็กโทรดอ้างอิงที่ได้จากการวัดด้วยวงจรควบคุม จากรูปที่ 8-6 มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (8-3)

$$\tan \theta = \frac{\Delta L_{ref}}{\Delta t_{ref}} \quad (8-3)$$

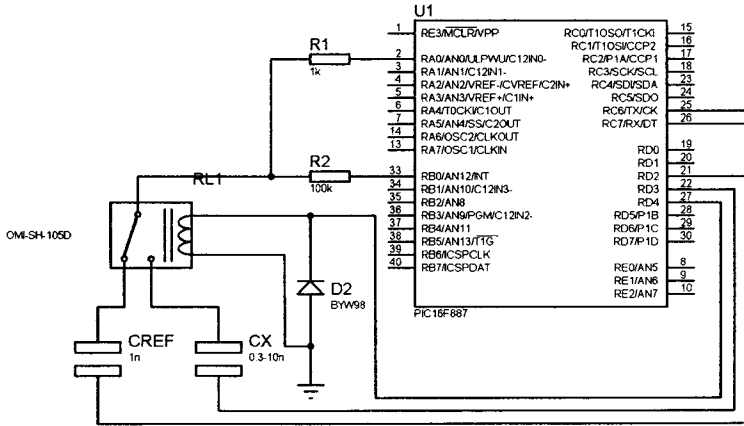
เนื่องจากอิเล็กโทรดอ้างอิงมีส่วนที่เหมือนกับอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำ และด้วยความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างระดับน้ำกับค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรด (การทดลองที่ 8.4.1) ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำกับอิเล็กโทรดอ้างอิงจึงเท่ากันดังสมการที่ (8-4)

$$\tan \theta = \frac{\Delta L_{ref}}{\Delta t_{ref}} = \frac{\Delta L_{sensin g}}{\Delta t_{sensin g}} \quad (8-4)$$

จึงสามารถหาค่าระดับน้ำของอิเล็กโทรดวัดระดับได้จาก

$$\Delta L_{sensin g} = t_{sensin g} \tan \theta \quad (8-5)$$

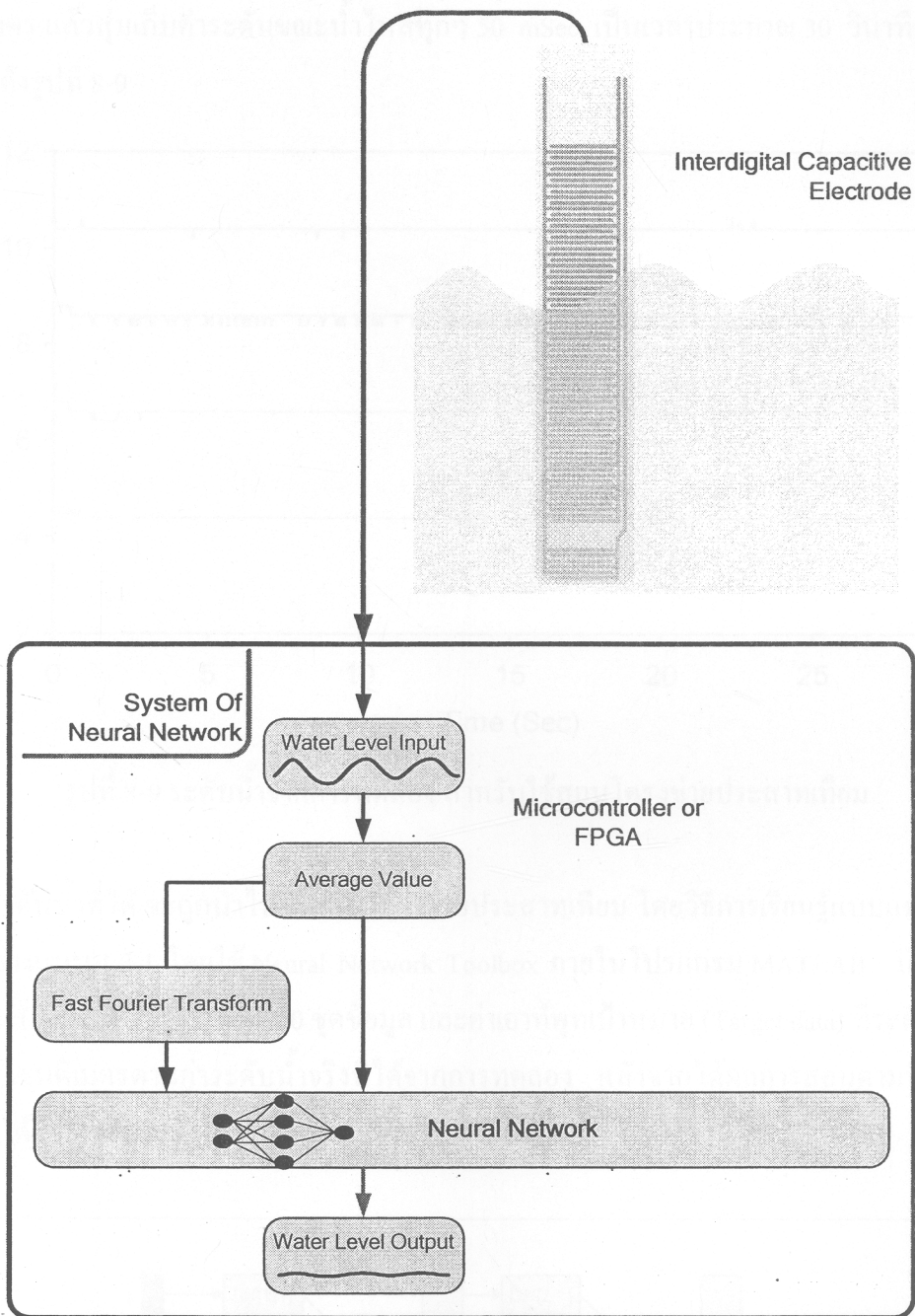
ในทางปฏิบัติ การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กทรอนิกส์วัดระดับน้ำ กับอิเล็กทรอนิกส์อย่างอื่นไม่สามารถทำการวัดพร้อมกันได้ เพราะจะเกิดการรบกวนทางสนามไฟฟ้าระหว่างกันเมื่ออยู่ในน้ำ เนื่องจากกรวดของอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสองต่อร่วมกัน จำเป็นต้องใช้วิธีการสลับกันวัด โดยใช้รีเลย์และพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่สลับกันวัดระหว่างอิเล็กทรอนิกส์วัดระดับน้ำกับอิเล็กทรอนิกส์อย่างอื่น มีวงจรดังรูปที่ 8-7



รูปที่ 8-7 การเพิ่มรีเลย์เพื่อทำหน้าที่สลับการวัดระหว่างอิเล็กทรอนิกส์วัดระดับน้ำกับอิเล็กทรอนิกส์อย่างอื่น

### 8.3.2 การลดค่าความผิดพลาดเนื่องจากการกระเพื่อมของน้ำที่เกิดจากการไหล

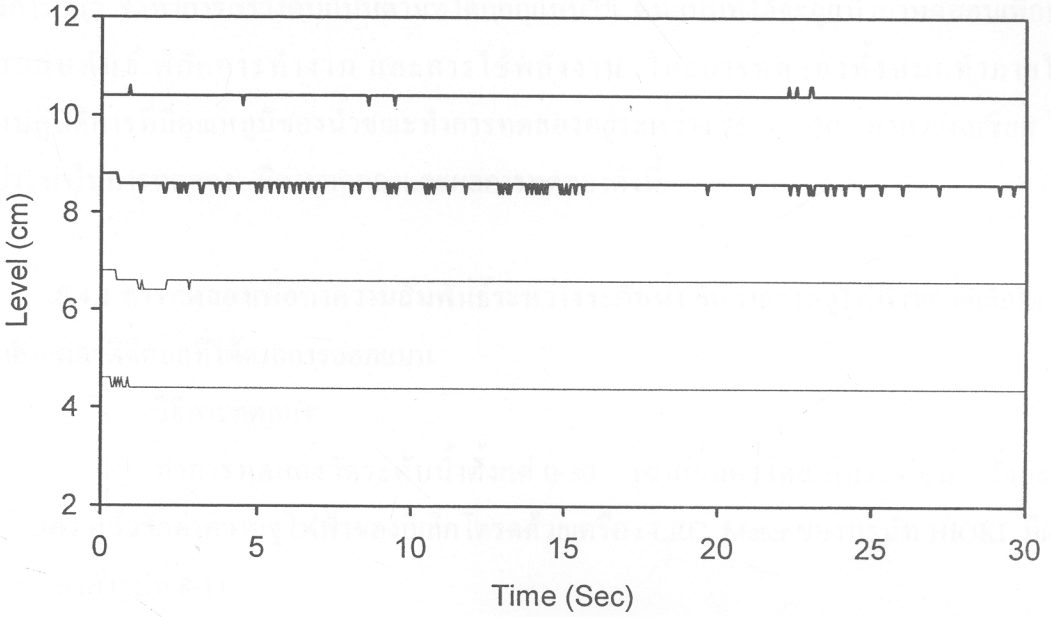
โดยปกติการวัดระดับน้ำที่มีลักษณะเป็นแหล่งน้ำเปิด ผิวน้ำจะมีการกระเพื่อมตลอดเวลา เนื่องมาจากหลายสาเหตุ เช่น เกิดจากลม การไหลของน้ำ หรือจากเรือ ฯลฯ ทำให้เราไม่สามารถอ่านค่าระดับน้ำที่แท้จริงจากเซนเซอร์ได้ ที่ผ่านมาการแก้ปัญหาดังกล่าว นิยมใช้การเก็บค่าระดับน้ำในช่วงเวลาหนึ่งแล้วทำการหาค่าเฉลี่ย แม้วิธีการหาค่าเฉลี่ยจะให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือ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



รูปที่ 8-8 การลดค่าความผิดพลาดเนื่องจากการกระเพื่อมของน้ำที่เกิดจากการไหล

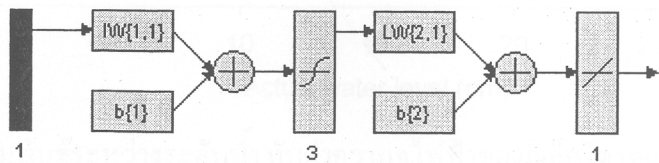
การเก็บข้อมูลเพื่อนำมาใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียม ใช้การทดลองเพื่อเก็บค่าระดับน้ำที่เกิดจากการจำลองการไหลแบบเปลี่ยนแปลงซ้ำในรางเปิดของภาควิชาวิศวกรรมโยธา โดยใช้เซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิทัลรุ่นที่ 2 ซึ่งกำหนดการวัดระดับน้ำไว้ที่ 4 ระดับ คือ 4, 6, 8 และ 10

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



Weight to layer 1 from input 1 = [32.299 .38.9353 26.324]

Bias to layer 1 = [.20.9732 .1.3485 17.0168]

Weight to layer 2 = [0.33333 .0.33333 0.33333]

Bias to layer 1 = [.4.547e.011]

รูปที่ 8-10 โครงข่ายประสาทที่ได้จากการสอนด้วยค่าระดับน้ำจริง

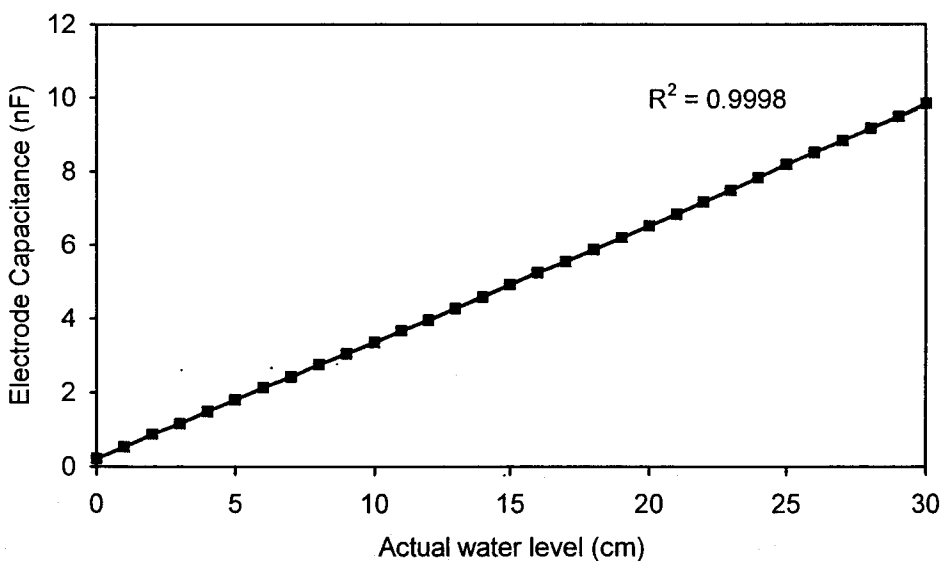
## 8.4 การทดลอง และผลการทดลอง

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

### 8.4.1 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำ กับค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเตอร์ดิจิตอลที่ได้จากการออกแบบ

วิธีการทดลอง

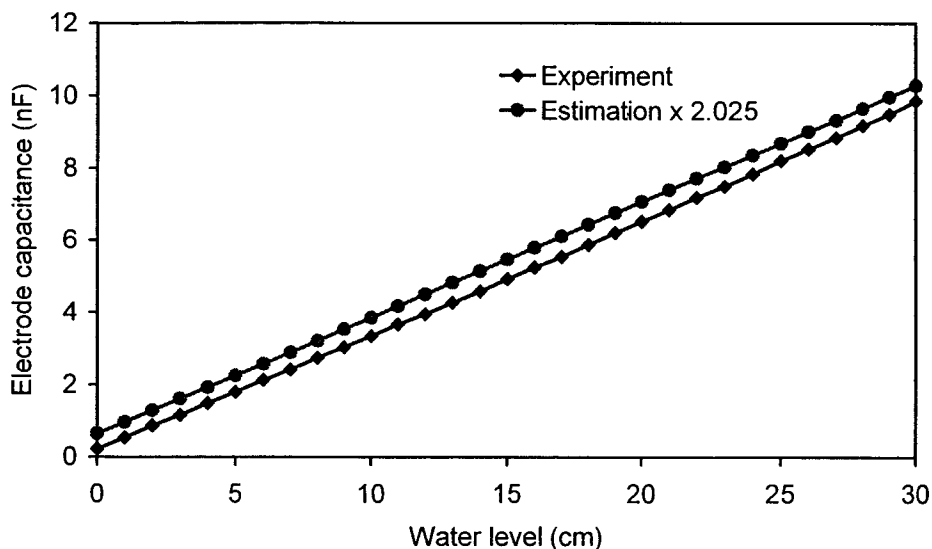
ทำการทดลองวัดระดับน้ำตั้งแต่ 0-30 เซนติเมตร โดยเพิ่มระดับน้ำครั้งละ 1 เซนติเมตร แล้ววัดค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่อง LRC Meter ของบริษัท HIOKI มีผลการทดลองดังรูปที่ 8-11



รูปที่ 8-11 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำ กับค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเตอร์ดิจิตอล

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

ค่าที่ได้จากการประมาณค่าอีก 2.025 เท่า แล้วเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองอีกครั้ง จะมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 8-12



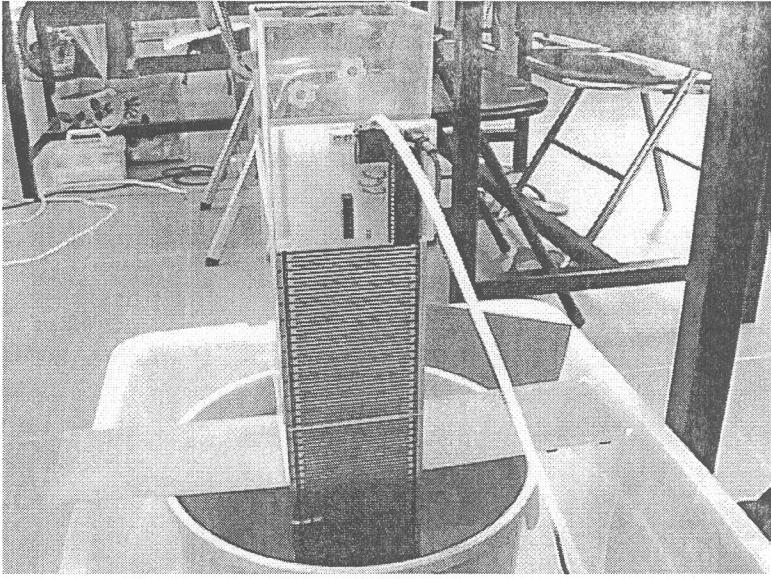
รูปที่ 8-12 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง กับค่าที่ได้จากการชดเชยค่าประมาณอีก 2.025 เท่า

รูปที่ 8-12 แสดงให้เห็นว่า ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่า หลังจากทำการชดเชยค่าที่ได้ไปอีก 2.025 เท่า มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง สาเหตุน่าจะมาจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการออกแบบอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำ เป็นแบบจำลองสำหรับการประมาณค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กโทรดสำหรับตรวจวัดความชื้นในคอนกรีต[25] ที่มีการวัดวัสดุเพียงด้านเดียว แต่การวัดระดับน้ำเป็นการวัดแบบรอบตัว จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่าน้อยกว่าผลจากการทดลองประมาณ 2 เท่า

#### 8.4.2 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำ กับระยะเวลาคายประจุของอิเล็กโทรด ที่ได้จากการวัดด้วยวงจรควบคุมการทำงาน

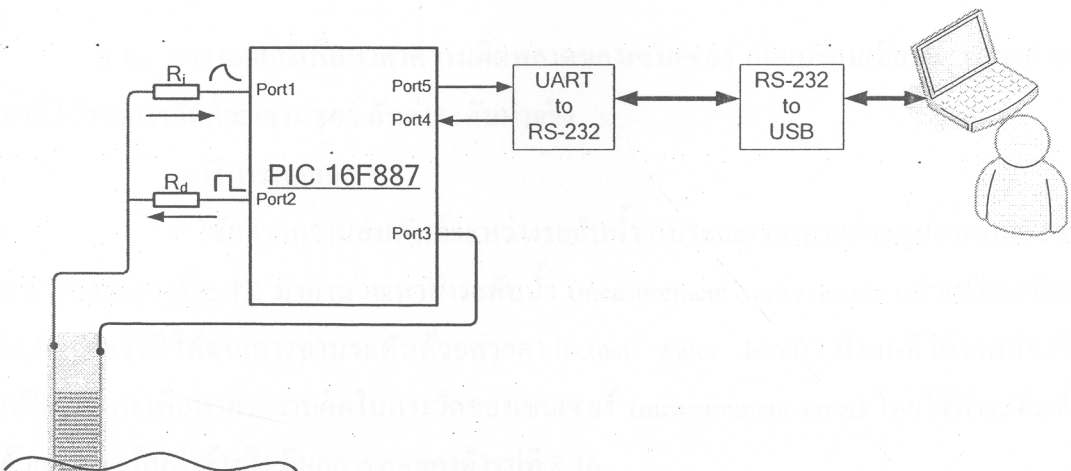
##### วิธีการทดลอง

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



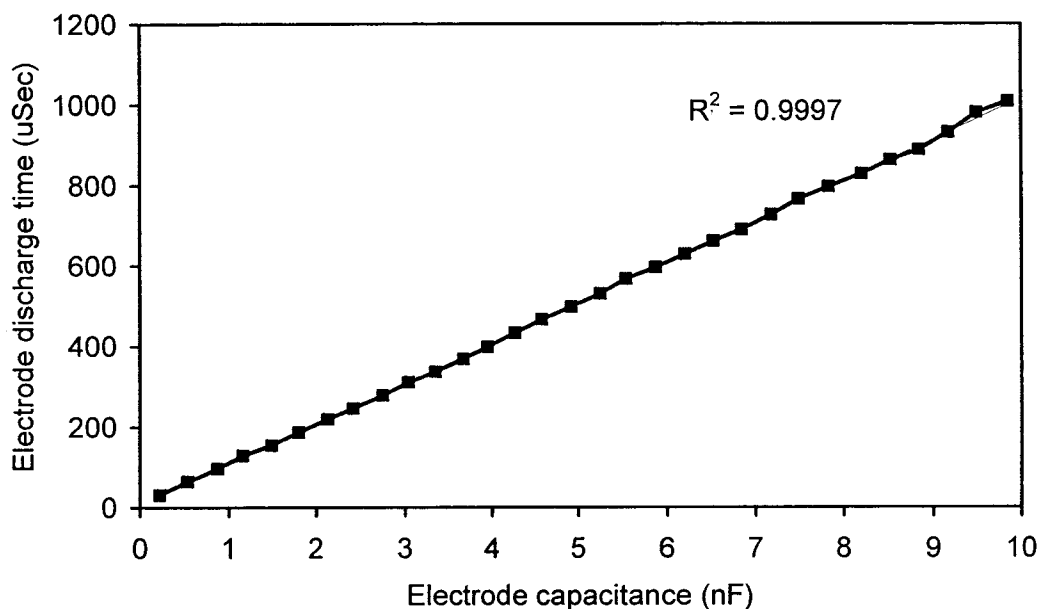
รูปที่ 8-13 วิธีการทดลองวัดระดับน้ำด้วยเซนเซอร์ โดยเพิ่มระดับน้ำครั้งละ 1 เซนติเมตร

ค่าระยะเวลาคายประจุของอิเล็กโทรดจะถูกด้วยวงจรควบคุมการทำงาน 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



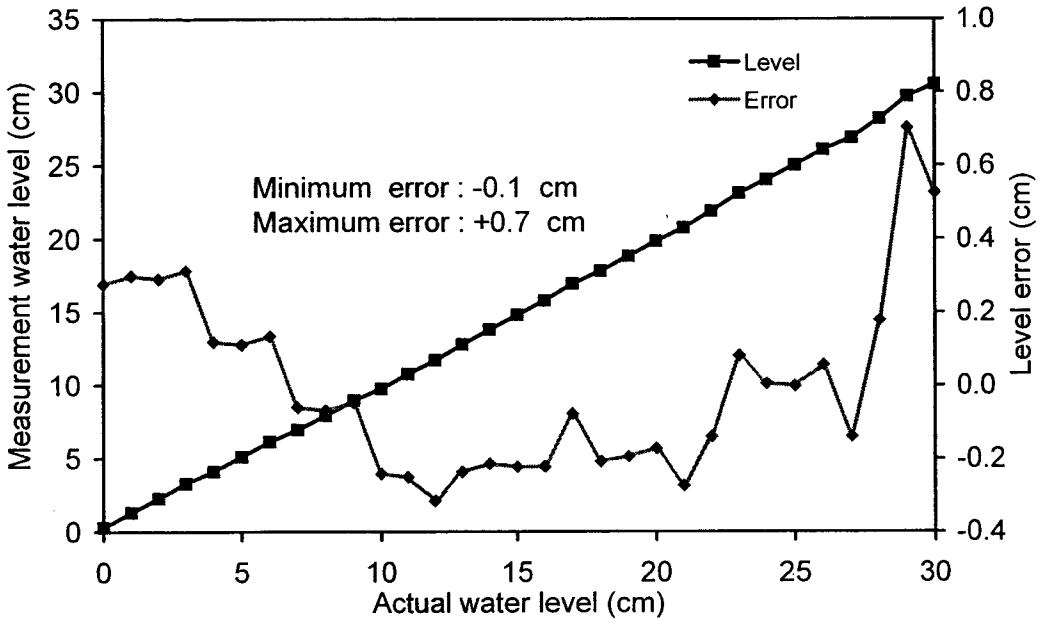
รูปที่ 8-15 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าระยะเวลาคายประจุของอิเล็กโตรด  
ที่ได้จากการวัดด้วยวงจรควบคุมการทำงาน

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

#### 8.4.3 การทดลองเพื่อหาค่าความผิดพลาดของเซนเซอร์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าระดับน้ำที่ได้จากการวัดด้วยเซนเซอร์ กับค่าระดับน้ำจริง

##### วิธีการทดลอง

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



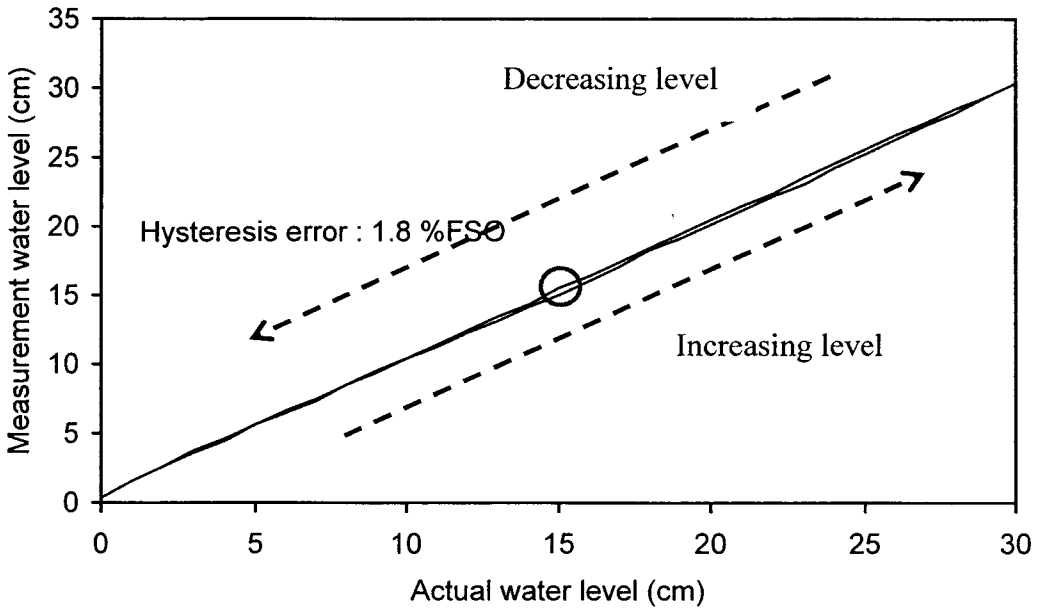
รูปที่ 8-16 ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดระดับน้ำด้วยเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดระดับน้ำด้วยเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลมีค่าความผิดพลาดสูงสุด +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



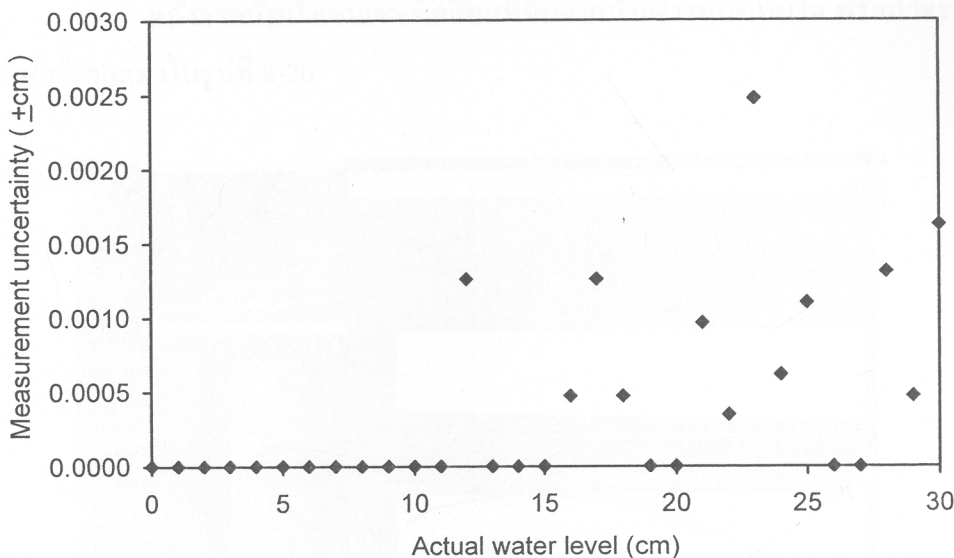
รูปที่ 8-17 ค่าความผิดพลาดแบบฮิสเทอรีซิส เมื่อเซนเซอร์วัดระดับน้ำเพิ่มขึ้น และลดลง

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



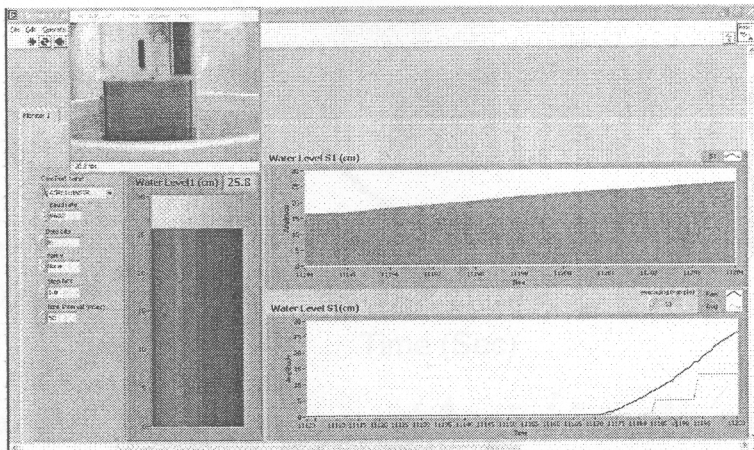
รูปที่ 8-18 ค่าความไม่แน่นอนการวัดของเซนเซอร์ (uncertainty measurement)

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

8.4.6 การทดลองเพื่อทดสอบผลตอบสนองของเซนเซอร์ เมื่อระดับน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (dynamic response)

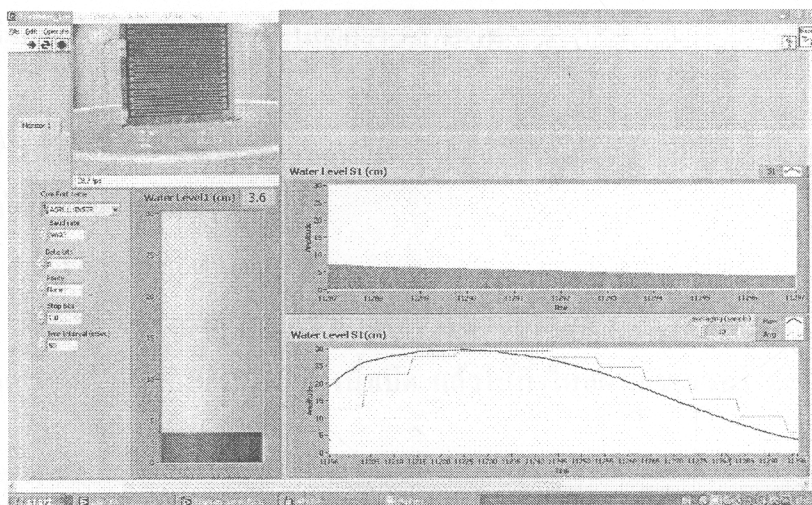
วิธีการทดลอง

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



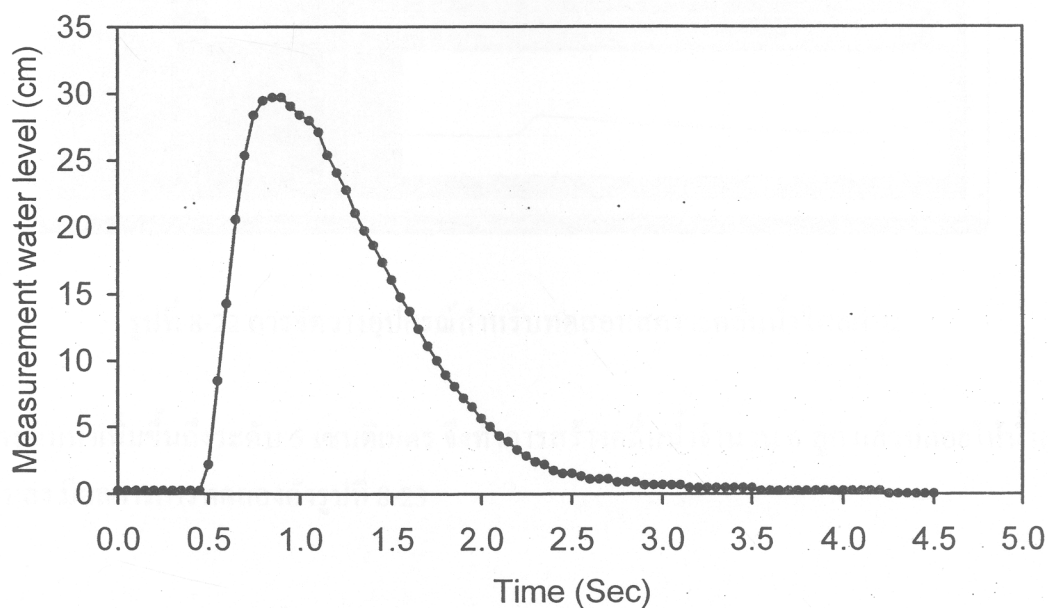
รูปที่ 8-19 การนำเซนเซอร์จุ่มลงในน้ำทันทีทันใด

2. หลังจากนั้นนำเซนเซอร์เคลื่อนที่ขึ้นจากน้ำอย่างทันทีทันใด พร้อมวัดระดับน้ำด้วยเซนเซอร์ดังแสดงในรูปที่ 8-20



รูปที่ 8-20 การนำเซนเซอร์เคลื่อนที่ขึ้นจากน้ำอย่างทันทีทันใด

3. นำค่าที่ได้มาพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับระยะเวลา มีผลการทดลองดังรูปที่ 8-21



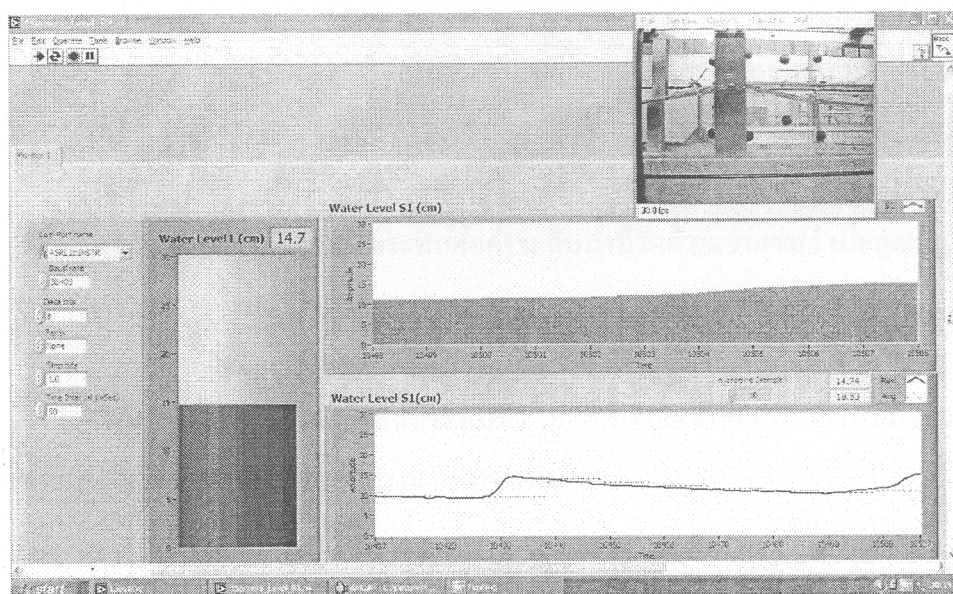
รูปที่ 8-21 ผลทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ เมื่อระดับน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

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

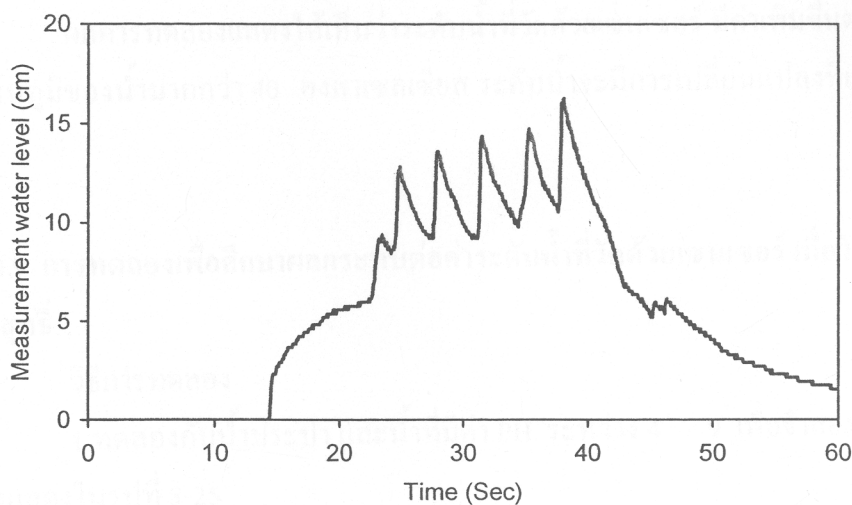
##### วิธีการทดลอง

จำลองสถานะน้ำไหลท่วมฉับพลันในรางเปิด ในห้องปฏิบัติการภาคทฤษฎีวิศวกรรมโยธา โดยติดตั้งเซนเซอร์วัดระดับน้ำในรางน้ำเปิด แล้วให้น้ำไหลผ่านเซนเซอร์ ดังรูปที่ 8-22



รูปที่ 8-22 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับทดสอบสถานะคลื่นน้ำไหลผ่าน

เมื่อระดับน้ำเพิ่มขึ้นถึงระดับ 5 เซนติเมตร จึงทำการสร้างคลื่นน้ำจำนวน 6 ลูก แล้วปล่อยให้ระดับน้ำลดลง มีผลการทดลองดังรูปที่ 8-23



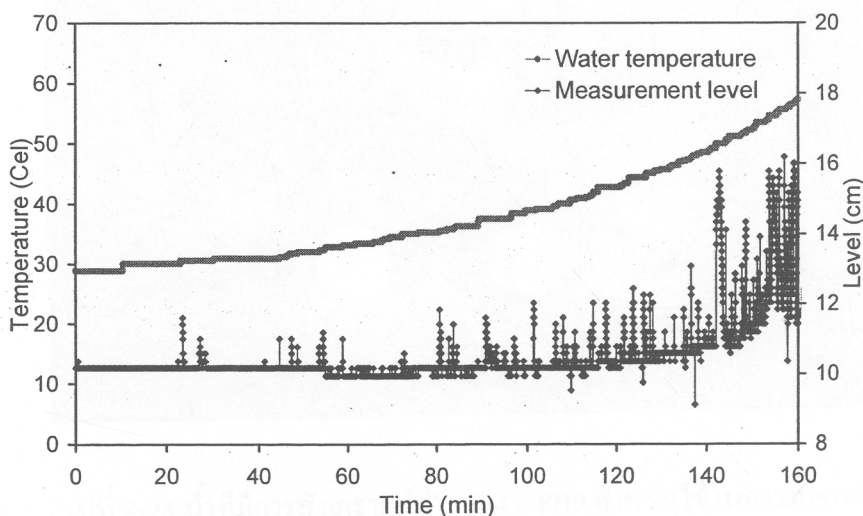
รูปที่ 8-23 ผลการทดสอบผลตอบแทนเชิงเวลาของเซนเซอร์ ในสภาวะน้ำไหลท่วมฉับพลัน

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์สามารถสนองต่อสภาวะน้ำท่วมฉับพลันได้ ทั้งในช่วงของการเริ่มต้นจากที่ระดับ 0 เซนติเมตร และช่วงที่มีระดับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

#### 8.4.8 การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์ เมื่ออุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลงไป

วิธีการทดลอง

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



รูปที่ 8-24 อุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์ มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และเมื่ออุณหภูมิของน้ำมากกว่า 40 องศาเซลเซียส ระดับน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

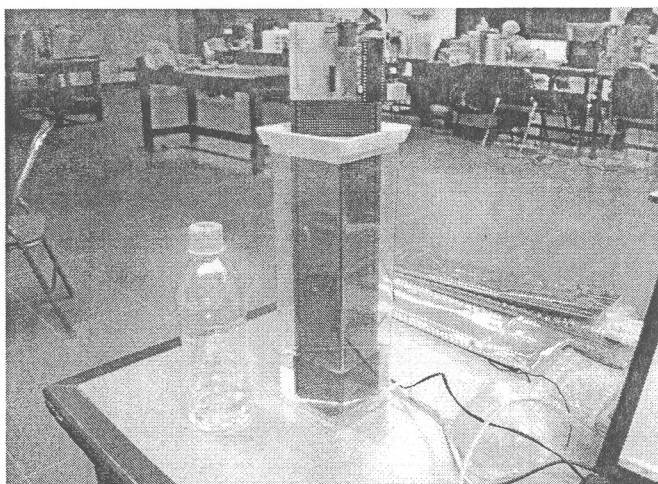
#### 8.4.9 การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์ เมื่อวัดระดับน้ำที่ไม่ใช่น้ำบริสุทธิ์

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



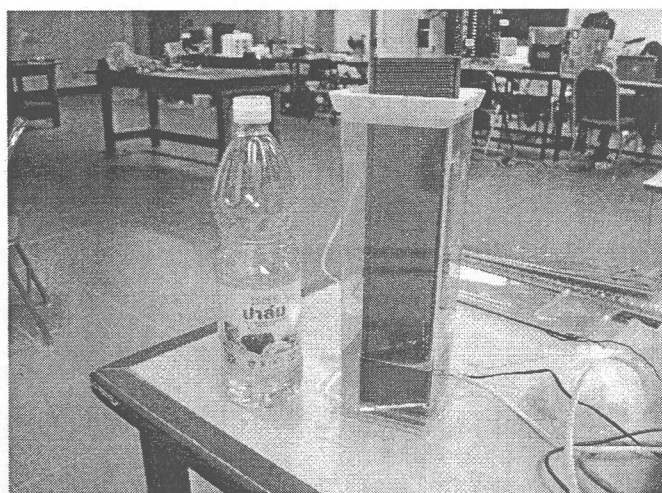
รูปที่ 8-25 น้ำที่มีการสังเคราะห์ค่า PH 4 – PH9 สำหรับใช้ในการทดลอง



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

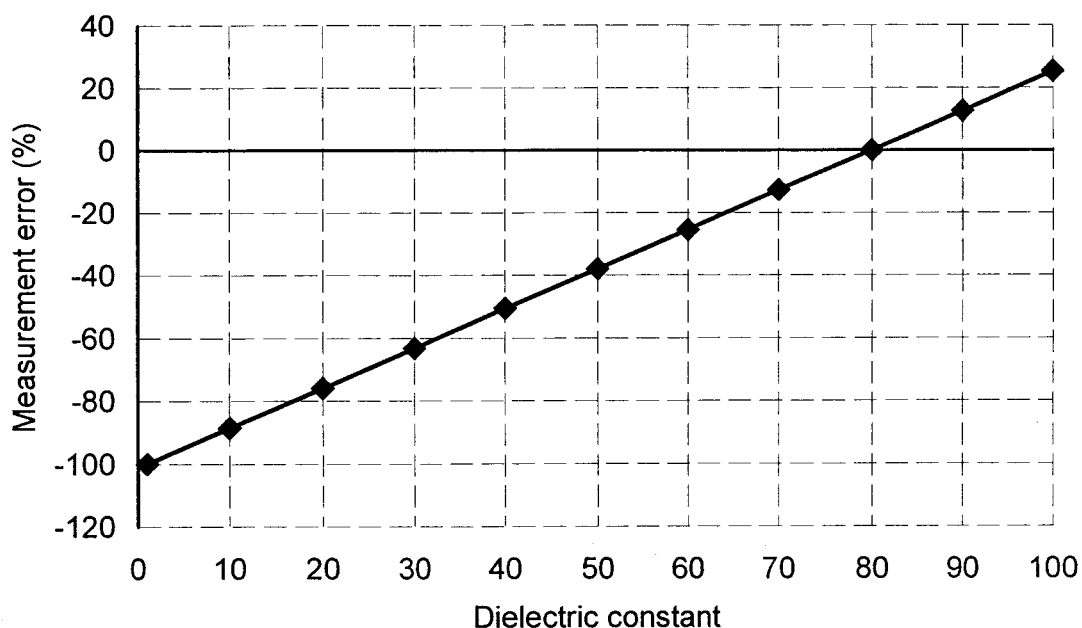
ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่า น้ำที่มีค่า PH อยู่ระหว่าง 4 – 9 ไม่ส่งผลต่อค่าระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ ในขณะที่ น้ำในอ่างเก็บน้ำ น้ำอัดลม และน้ำเกลือก็ไม่ส่งผลต่อค่าระดับน้ำที่วัดด้วยเซนเซอร์เช่นกัน แต่เมื่อใช้เซนเซอร์วัดระดับน้ำมันปาล์มกลับไม่สามารถวัดระดับของน้ำมันปาล์มได้ 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



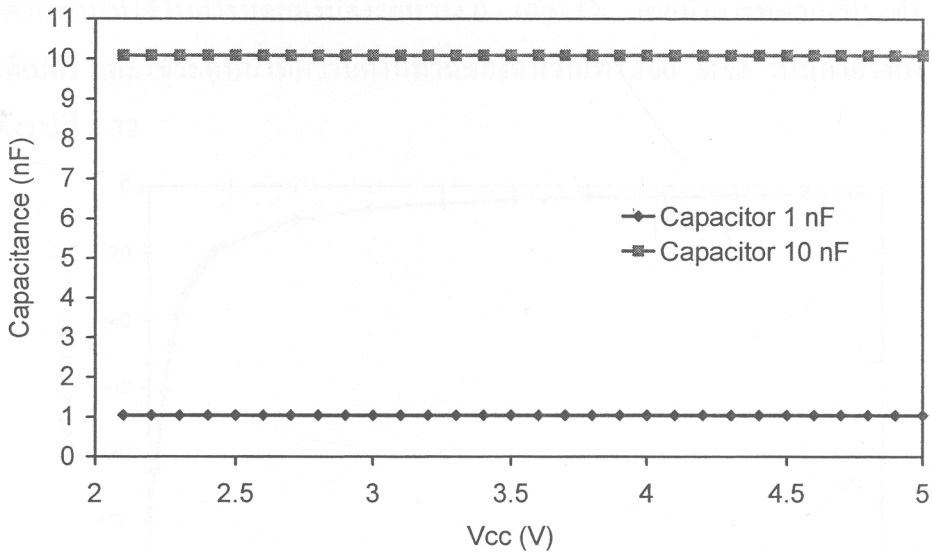
รูปที่ 8-29 ค่าความผิดพลาดจากการวัดด้วยเซนเซอร์ เมื่อค่าไดอิเล็กตริกของน้ำเปลี่ยนแปลงไป

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



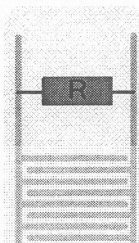
รูปที่ 8-30 ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดด้วยวงจรถวลการทำงาน เมื่อแหล่งจ่ายไฟมีระดับแรงดัน 2.1-5 V

จากรูปที่ 8-30 แสดงให้เห็นว่า เมื่อแหล่งจ่ายไฟของวงจรถวลการทำงาน มีแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 2.1 – 5 V วงจรถวลการทำงานยังคงวัดค่าความจุไฟฟ้าได้เท่าเดิม ดังนั้นระดับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไม่ส่งผลต่อการวัดค่าความจุไฟฟ้าของวงจรถวลการทำงาน

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

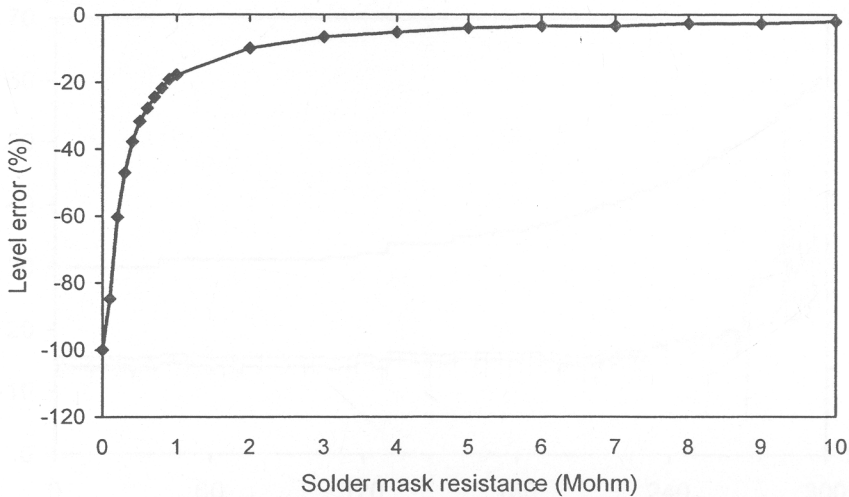
วิธีการทดลอง

จำลองการเสื่อมสภาพฉนวนเคลือบผิวทองแดงด้วยการต่อตัวต้านทานขนานกับอิเล็กทรอนิกส์ดังรูปที่ 8-31



รูปที่ 8-31 การต่อตัวต้านทานขนานกับอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อจำลองการเสื่อมสภาพฉนวนของผิวเคลือบ

ค่าความต้านทานที่ใช้ในการทดลองมีค่าระหว่าง 0 - 10 M $\Omega$  โดยทำการทดลองที่ระดับน้ำคงที่ที่ 30 เซนติเมตร และใช้ระดับน้ำที่ความต้านทานของฉนวนเท่า 100 M $\Omega$  เป็นค่าอ้างอิง มีผลการทดลองดังรูปที่ 8-32



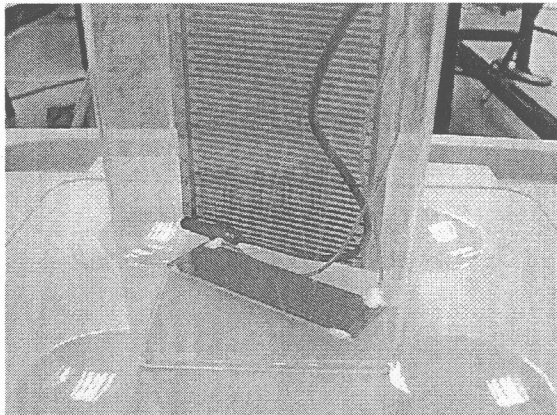
รูปที่ 8-32 ค่าความผิดพลาดจากการวัดด้วยเซนเซอร์ เมื่อเทียบสภาพฉนวนเคลือบของอิเล็กโตรด

ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อฉนวนเคลือบทองแดงของอิเล็กโตรดมีความต้านทานลดลง จะส่งผลให้ค่าระดับน้ำที่วัดได้จากเซนเซอร์มีความผิดพลาดไปในแนวทางที่น้อยกว่าค่าระดับจริง

**8.4.13 การทดลองวิธีชดเชยค่าความผิดพลาดในการวัดระดับน้ำของเซนเซอร์ เมื่อได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้การประมวลผลแบบอัจฉริยะ**

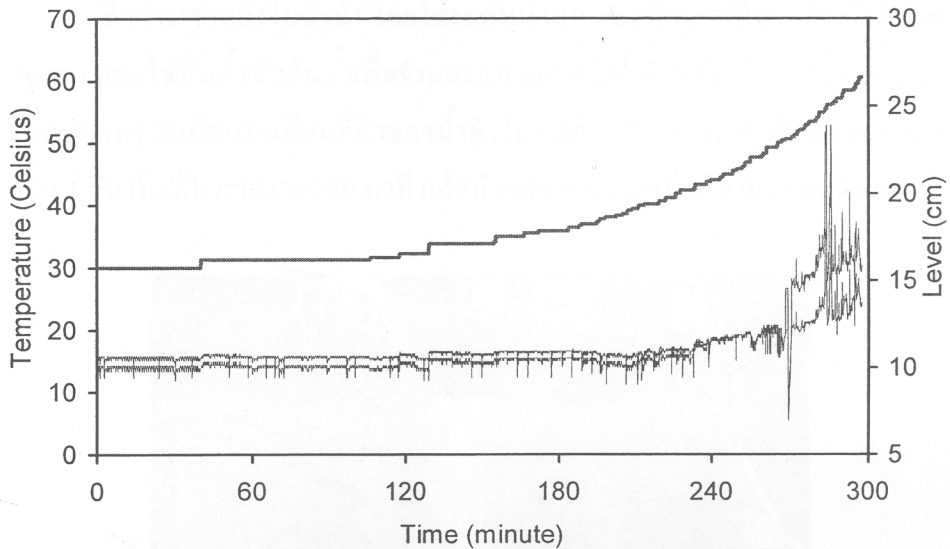
วิธีการทดลอง

1. กำหนดขนาดของอิเล็กโตรดอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 8-33



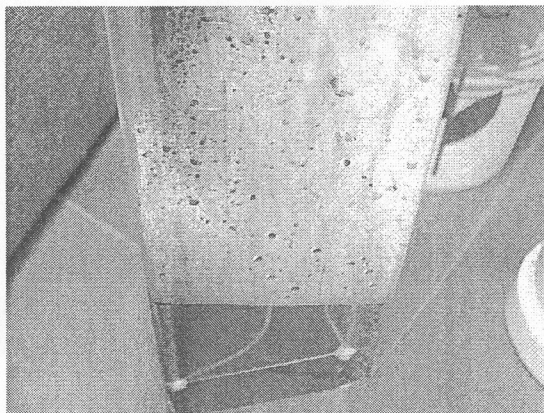
รูปที่ 8-33 อิเล็กโตรดอ้างอิงที่มีความยาว 2 เซนติเมตร

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



รูปที่ 8-34 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าระดับน้ำที่ผ่านการประมวลผลอัจฉริยะเพียงเล็กน้อย

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

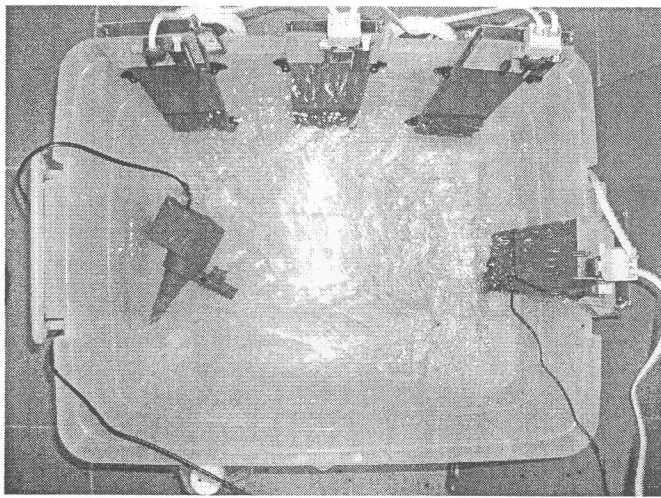


รูปที่ 8-35 ไอน้ำที่เกิดขึ้น เมื่อน้ำเริ่มมีอุณหภูมิมากกว่า 40 องศาเซลเซียส

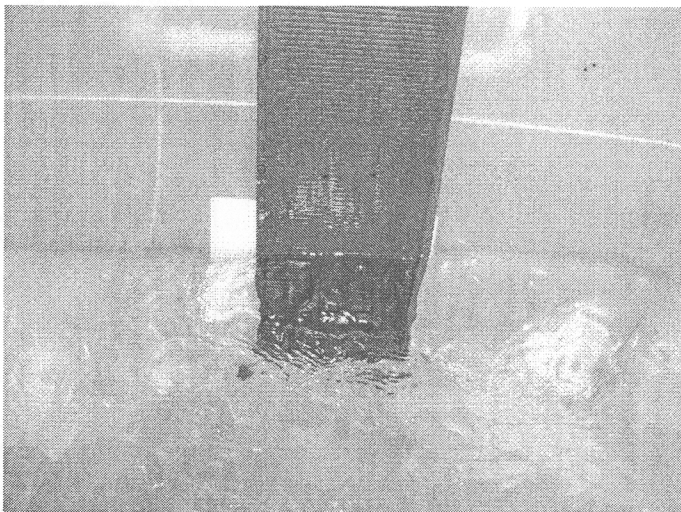
8.4.14 การทดลองวิธีลดค่าความผิดพลาดในการวัดระดับน้ำของเซนเซอร์ เมื่อได้รับผลกระทบจากการกระเพื่อมของผิวน้ำ โดยการใช้วิธีหาค่าเฉลี่ย

วิธีการทดลอง

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

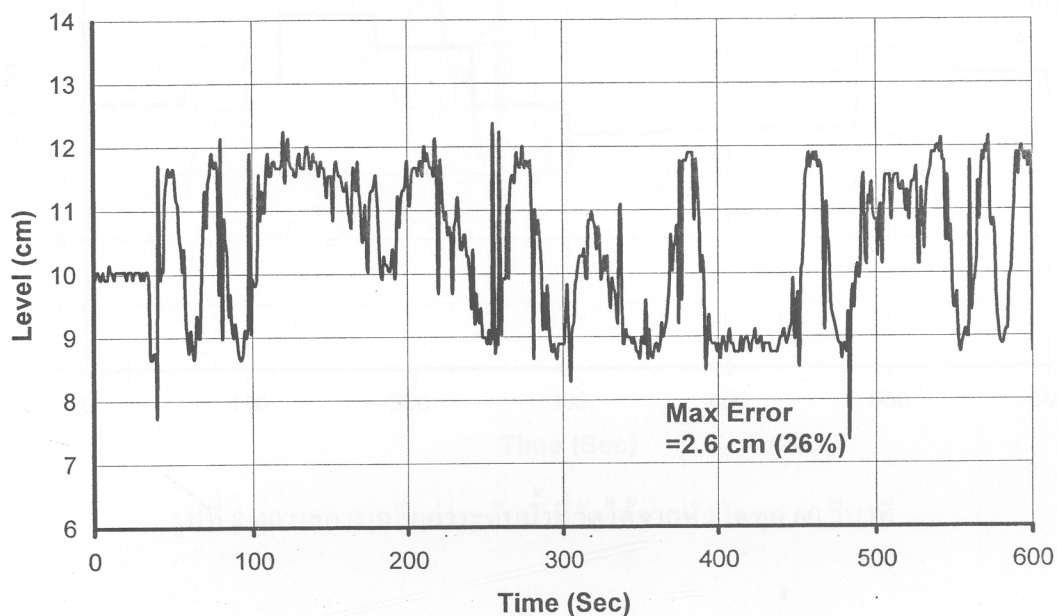


รูปที่ 8-36 การจำลองสภาพการไหลของน้ำด้วยปั้มน้ำ

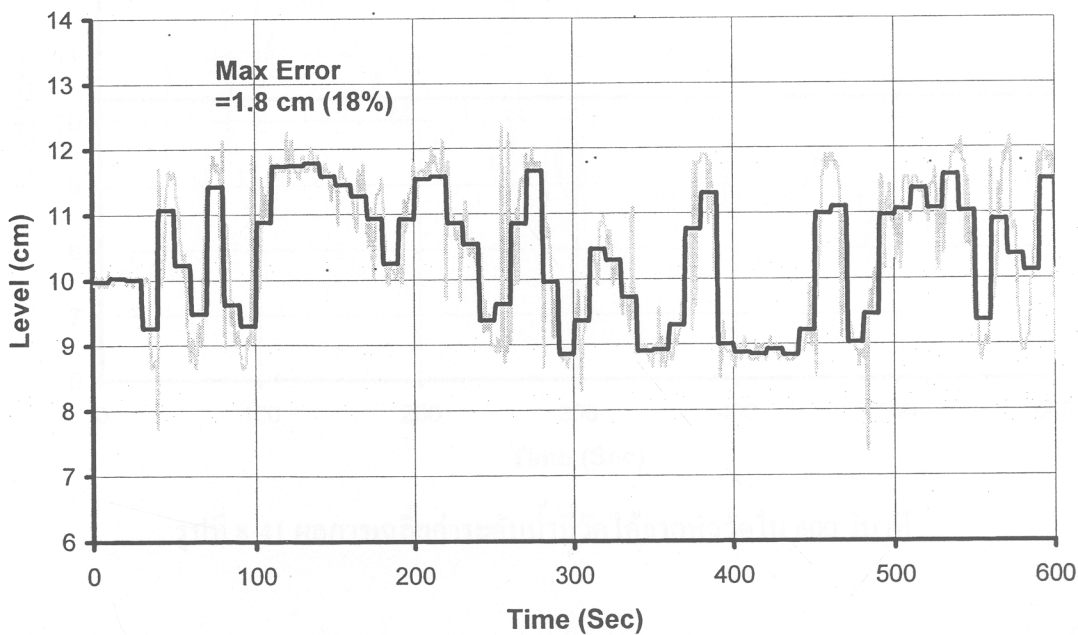


รูปที่ 8-37 การกระเพื่อมของน้ำที่เกิดจากการจำลองการไหลด้วยปั้มน้ำ

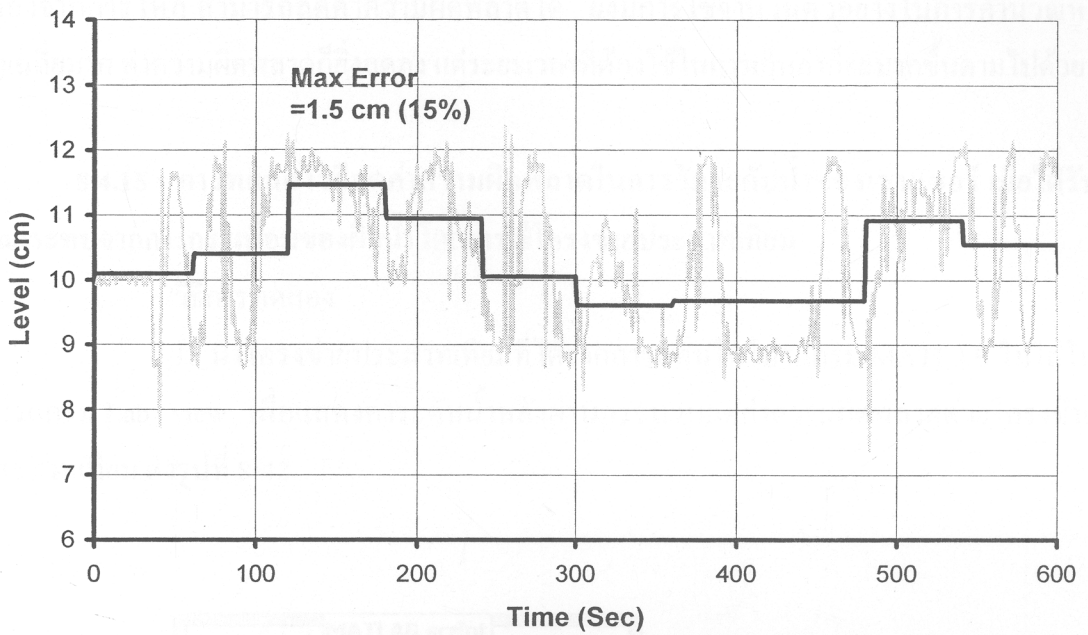
ผลการทดลองที่ได้จากการวัดระดับน้ำในสถานะที่จำลองการไหลแสดงได้ดังในรูปที่ 8-38 เมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยของระดับน้ำที่วัดได้จากเซนเซอร์ ในช่วงเวลา 10 วินาที 60 วินาที และ 600 วินาที แสดงได้ดังในรูปที่ 8-39, 8-40 และ 8-41 ตามลำดับ



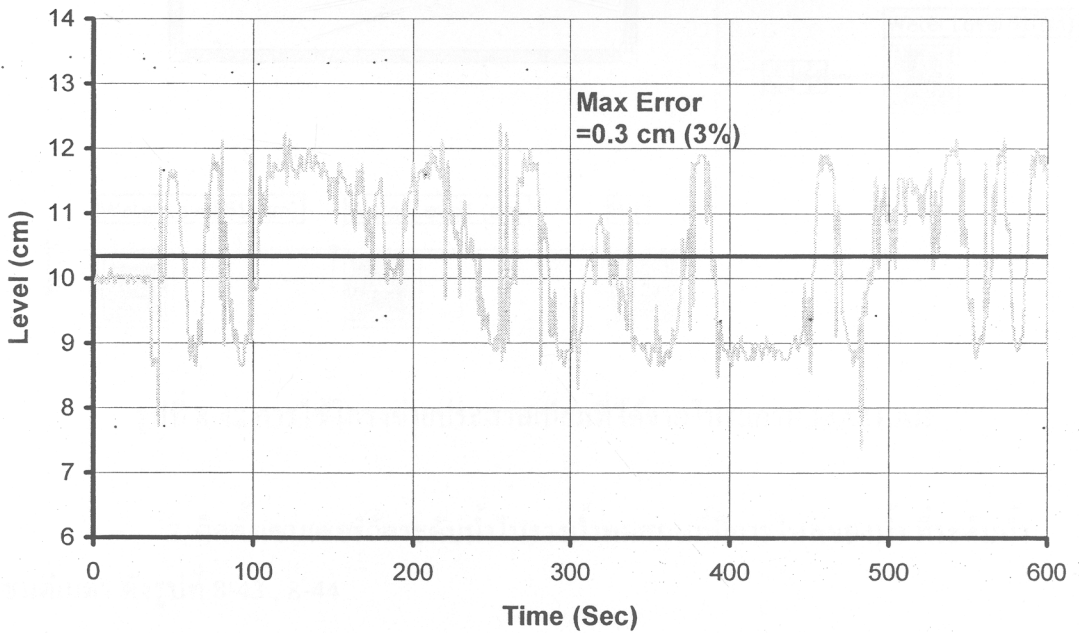
รูปที่ 8-38 ผลการวัดระดับน้ำด้วยหัววัด ในสถานะที่มีการจำลองการไหลของน้ำ



รูปที่ 8-39 ผลการเฉลี่ยค่าระดับน้ำที่วัดได้จากหัววัดทุก 10 วินาที



รูปที่ 8-40 ผลการเฉลี่ยค่าระดับน้ำที่วัดได้จากหัววัดทุก 60 วินาที



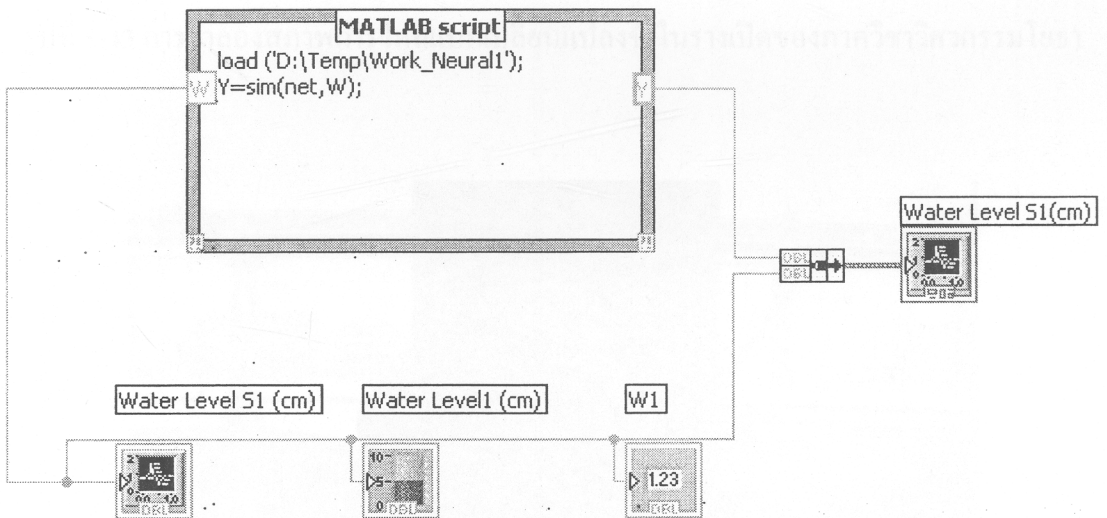
รูปที่ 8-41 ผลการเฉลี่ยค่าระดับน้ำที่วัดได้จากหัววัดใน 600 วินาที

ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีหาค่าเฉลี่ยจากระดับน้ำที่มีการกระเพื่อม เนื่องจากการไหล สามารถลดค่าความผิดพลาดได้ ยิ่งมีการใช้จำนวนตัวอย่างในการคำนวณหาค่าเฉลี่ยมาก ค่าความผิดพลาดก็ยิ่งลดลง แต่ระยะเวลาที่ต้องใช้ในการเก็บค่าก็จะมากขึ้นตามไปด้วย

**8.4.15 การทดลองวิธีลดค่าความผิดพลาดในการวัดระดับน้ำของเซนเซอร์ เมื่อได้รับผลกระทบจากการกระเพื่อมของผิวน้ำ โดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียม**

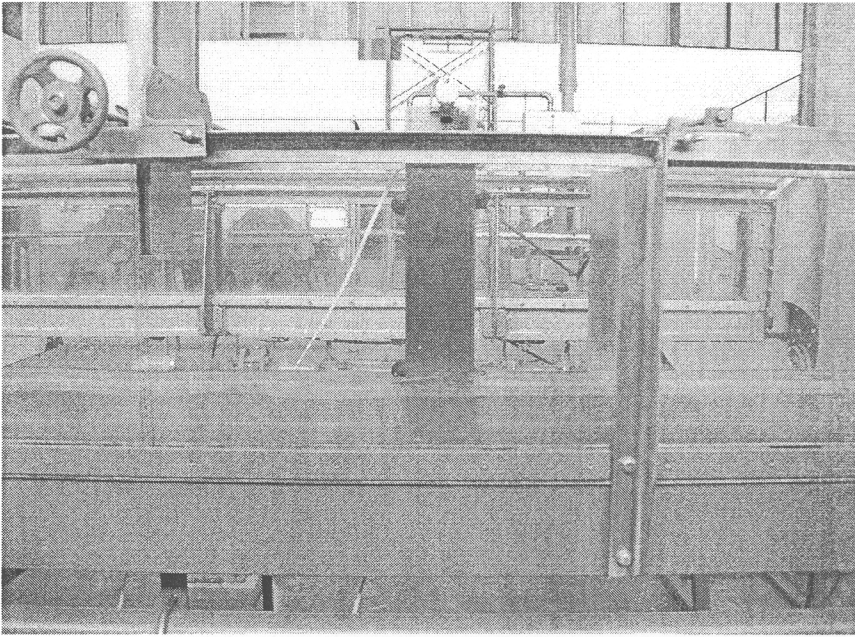
วิธีการทดลอง

1. นำโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้จากการสอนในโปรแกรม MATLAB ไปใส่ในโปรแกรม Lab view เพื่อแสดงค่าระดับน้ำหลังผ่านกระบวนการลดค่าความผิดพลาดด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ดังรูปที่ 8-42

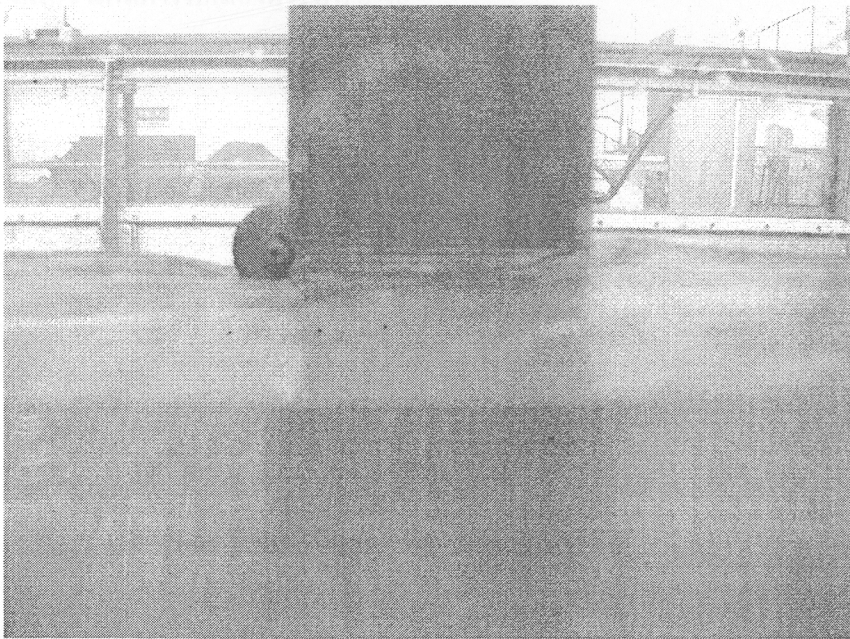


รูปที่ 8-42 การใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้จากโปรแกรม MATLAB

2. ติดตั้งเซนเซอร์วัดระดับน้ำในรางน้ำทดสอบที่มีการไหลของน้ำ ที่ระดับน้ำ 4 เซนติเมตร ดังรูปที่ 8-43 , 8-44

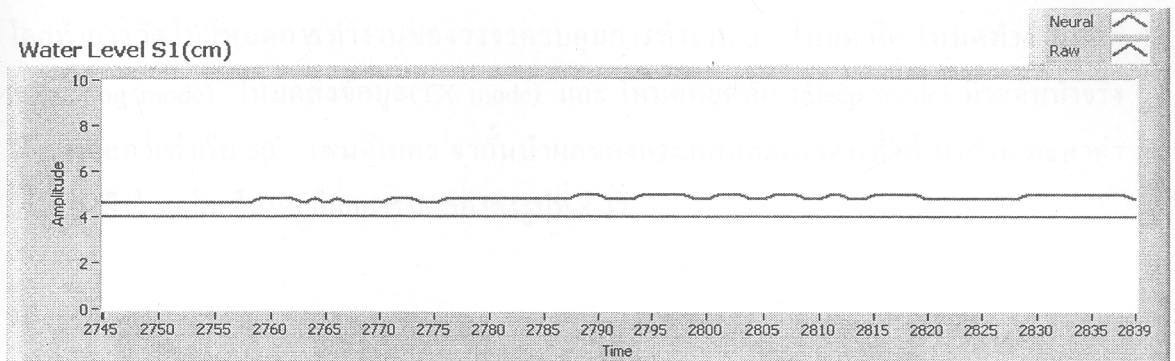


รูปที่ 8-43 การจำลองสภาพการไหลแบบเปลี่ยนแปลงช้าในรางเปิดของภาควิชาวิศวกรรมโยธา



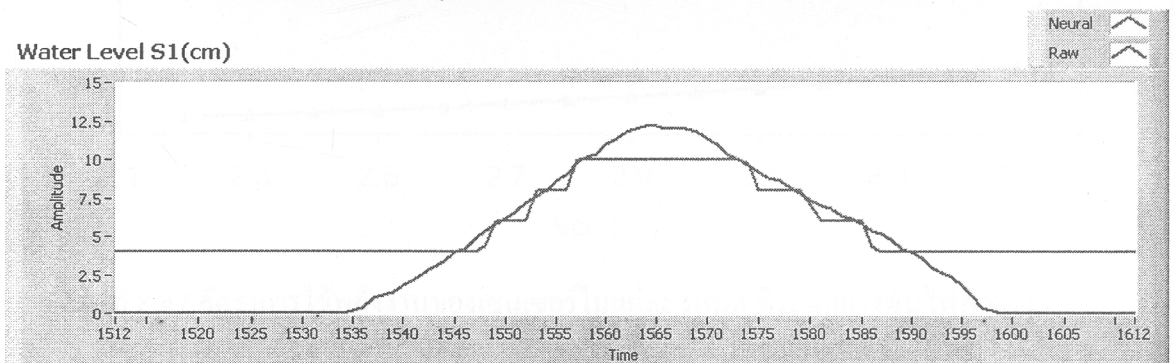
รูปที่ 8-44 ลักษณะการกระเพื่อมของน้ำที่ไหลผ่านเซนเซอร์

เปรียบเทียบระดับน้ำที่วัดจริง กับระดับน้ำที่ผ่านโครงข่ายประสาทเทียม มีผลการทดลองดังรูปที่ 8-45



รูปที่ 8-45 ระดับน้ำที่วัดจริง (บน) เปรียบเทียบกับระดับน้ำที่ผ่านโครงข่ายประสาทเทียม (ล่าง)

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



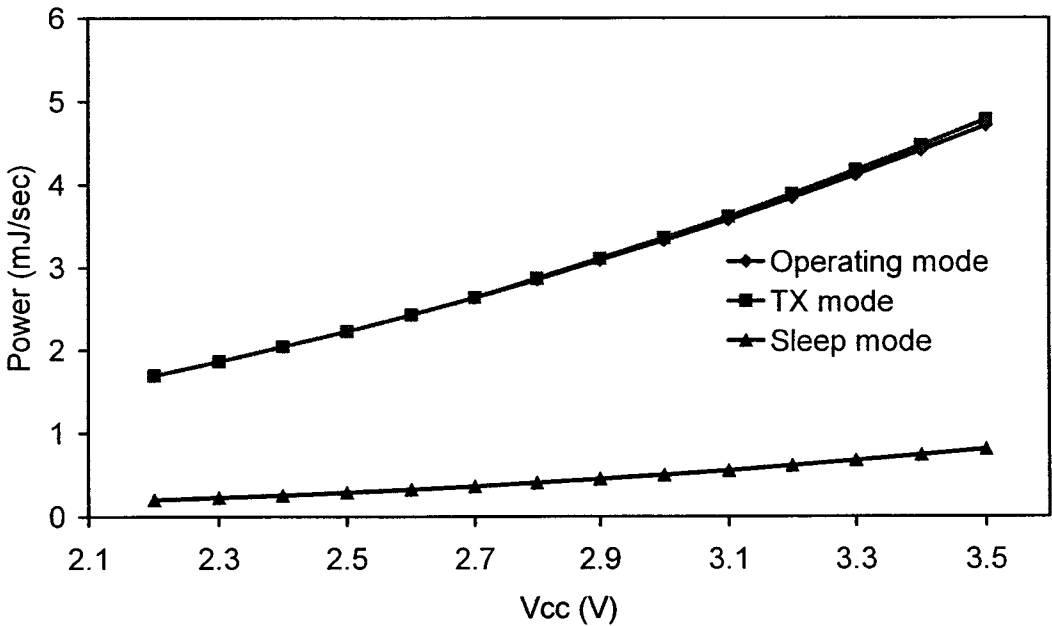
รูปที่ 8-46 ค่าระดับน้ำที่วัดจริง (บน) เปรียบเทียบกับค่าระดับน้ำที่ผ่านโครงข่ายประสาทเทียม

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



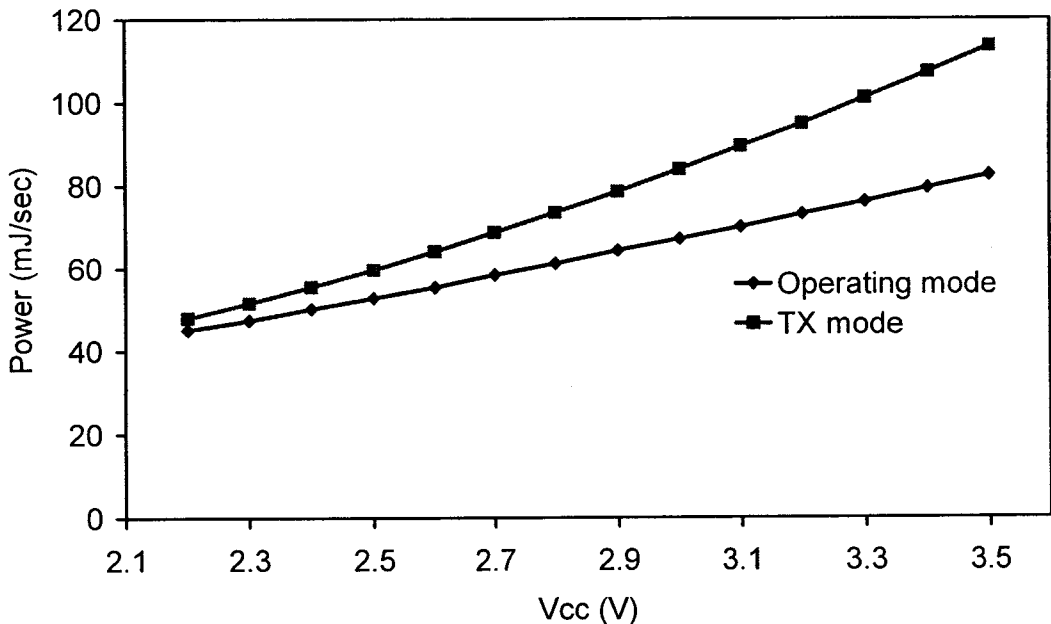
รูปที่ 8-47 อัตราการใช้พลังงานของเซนเซอร์ในแต่ละโหมด ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ

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 การทดลองเพื่อหาอัตราการใช้พลังงานของเซนเซอร์เมื่อต่อใช้งานร่วมกับโมดูลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย 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) มีระดับน้ำหนักรวมทดลองเท่ากับ 30 เซนติเมตร ผลการเชื่อมต่อระหว่างตัวรับและตัวส่ง อยู่ในสถานะเชื่อมต่อกันสมบูรณ์ จากนั้นนำผลของกระแสและแรงดันที่ได้ มาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละโหมด มีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 8-48



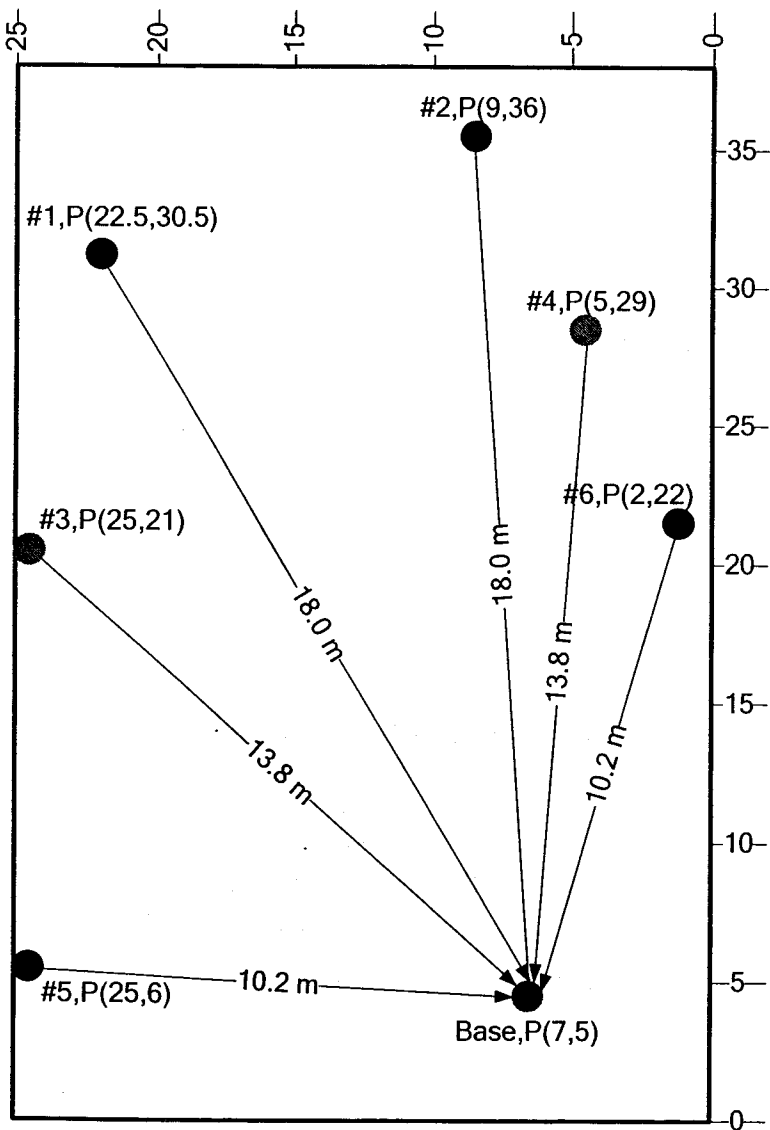
รูปที่ 8-48 อัตราการใช้พลังงานของเซนเซอร์ เมื่อต่อใช้งานร่วมกับโมดูลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า โมดูลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายมีอัตราการใช้พลังงานที่สอดคล้องกับระดับแรงดันของแหล่งจ่าย คือ การใช้พลังงานของโมดูลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายแปรผันตรงกับแหล่งจ่าย แต่มีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่ระดับแรงดัน 3.5 โวลต์ ซึ่งเป็นแรงดันสูงสุดสำหรับการทดลองนี้ โมดูลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายใช้พลังงานในโหมดปกติ 82.3 mJ/Sec และโหมดส่งข้อมูล 113.4 mJ/Sec ที่ระดับแรงดัน 2.2 โวลต์ เซนเซอร์ใช้พลังงานในโหมดปกติ 45.1 mJ/Sec และโหมดส่งข้อมูล 48 mJ/Sec

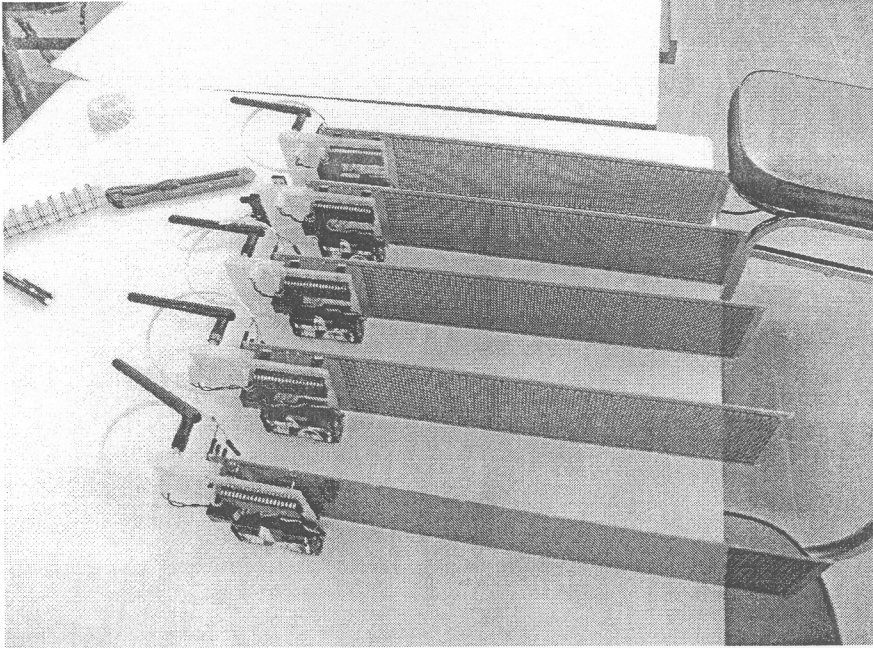
#### 8.4.18 การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลของเซนเซอร์เมื่อต่อใช้งานร่วมกับ โมดูลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย U-node Ver.2

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



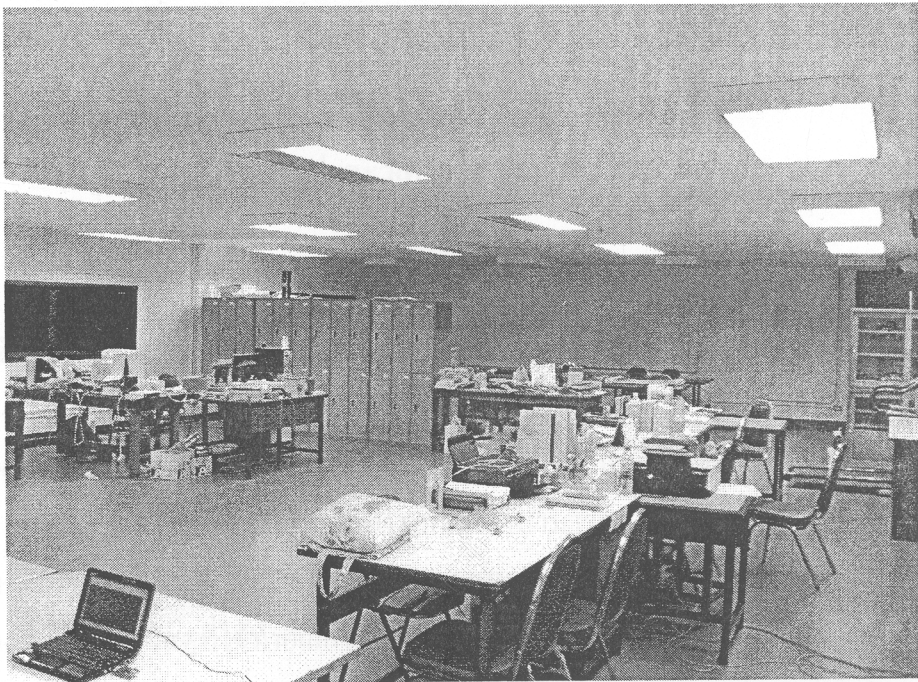
รูปที่ 8-49 ตำแหน่งการวางเซนเซอร์โหนดในการทดลอง



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

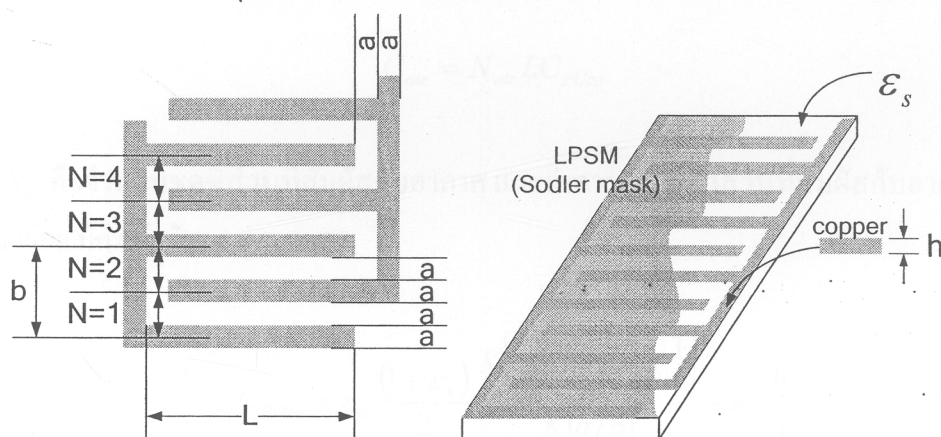
## บทที่ 9

### สรุปและวิเคราะห์ประเด็นวิจัย

ผลการศึกษาเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอลอิเล็กโทรด สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

#### 9.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอล

ผลการศึกษาและทดลองพบว่า เราสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับประมาณค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบอินเทอร์ดิจิตอลเพื่อใช้วัดระดับน้ำ ได้จากขนาดของอิเล็กโทรด วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด และระดับน้ำ ซึ่งความสัมพันธ์กันดังนี้



รูปที่ 9-1 โครงสร้างของอิเล็กโทรดแบบอินเทอร์ดิจิตอลที่ผลิตจากแผ่นวงจรรูปพิมพ์

ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรด มีค่าเท่ากับผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าส่วนที่สัมผัสกับน้ำ และค่าความจุไฟฟ้าส่วนที่สัมผัสกับอากาศ ดังสมการ (9-1)

$$C_{\text{electrode}} = C_{\text{water}} + C_{\text{air}} \quad (9-1)$$

เมื่อ  $N_{\text{water}}$  คือจำนวนชุดชี้ส่วนที่สัมผัสกับน้ำ ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าส่วนที่สัมผัสกับน้ำ มีค่าเท่ากับ

$$C_{\text{water}} = 2(N_{\text{water}} LC_{\text{PUcw}}) \quad (9-2)$$

เมื่อค่าความจุไฟฟ้าส่วนที่สัมผัสกับน้ำต่อหนึ่งหน่วยย่อย มีค่าเท่ากับ

$$C_{PUcw} = \varepsilon_0 \frac{(\varepsilon_{water} + \varepsilon_s) K \left[ \sqrt{1 - (a/b)^2} \right]}{2 K[a/b]} + \varepsilon_0 \varepsilon_{water} \frac{h}{a} \quad (9-3)$$

เมื่อ  $K(k)$  เป็นปริพันธ์เชิงวงรีของมอดุลัส (elliptic integrals of modulus) มีค่าเท่ากับ

$$K(k) = \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{(1-V^2)(1-k^2V^2)}} dv \quad (9-4)$$

ค่าความจุไฟฟ้าส่วนที่สัมผัสกับอากาศ มีค่าเท่ากับ

$$C_{air} = N_{air} LC_{PUca} \quad (9-5)$$

เมื่อ  $N_{air}$  คือจำนวนชุดซึ่งส่วนที่สัมผัสกับอากาศ และค่าความจุไฟฟ้าส่วนที่สัมผัสกับอากาศต่อหนึ่งหน่วยย่อย มีค่าเท่ากับ

$$C_{PUca} = \varepsilon_0 \frac{(1 + \varepsilon_s) K \left[ \sqrt{1 - (a/b)^2} \right]}{2 K[a/b]} + \varepsilon_0 \frac{h}{a} \quad (9-6)$$

## 9.2 สรุปคุณสมบัติของเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลรุ่นที่ 2

ผลการออกแบบและทดลอง สามารถสรุปคุณสมบัติของเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์รุ่นที่ 2 ดังนี้

ชนิดของเซนเซอร์	เซนเซอร์แบบค่าความจุไฟฟ้า
รูปแบบของโครงสร้าง	อินเตอร์ดิจิตอล
ชนิดของเหลวที่ใช้วัด	น้ำ
วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กทรอนิกส์	แผ่นวงจรพิมพ์หน้าเดียวชนิด FR-4
ความหนาของวัสดุฐานรอง (PCB)	1.6 มิลลิเมตร
ความหนาของแผ่นทองแดง	0.005 มิลลิเมตร

ชนิดของฉนวนเคลือบผิวทองแดง	Liquid photoimageable solder mask
ขนาดของเซนเซอร์	85 x 381 x 15 (ก. x ย. x ส.) มิลลิเมตร
ย่านวัดระดับน้ำ	0 ถึง 30 เซนติเมตร
อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าต่อระดับน้ำ	0.3 nF ต่อระดับน้ำ 1 เซนติเมตร
อัตราการเปลี่ยนแปลงเวลาคายประจุต่อระดับน้ำ	34 $\mu$ Sec ต่อระดับน้ำ 1 เซนติเมตร
หลักการวัดค่าความจุไฟฟ้า	R-C Time constant
วงจรควบคุมการทำงาน	ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์
สัญญาณเอาต์พุต	แบบอนุกรม มาตรฐาน UART
อัตราการส่งข้อมูล	9600 – 38400 บิตต่อวินาที
ความละเอียดในการวัด	0.2 เซนติเมตร
อัตราเร็วสูงสุดการสุ่มเก็บระดับน้ำ	20 ตัวอย่างต่อ 1 วินาที
อัตราเร็วต่ำสุดการสุ่มเก็บระดับน้ำ	1 ตัวอย่างต่อ 1 ชั่วโมง
ระดับแรงดันไฟฟ้าทำงาน	2.1 – 5 โวลต์
ช่วงอุณหภูมิน้ำใช้งาน	20 ถึง 40 องศาเซลเซียส
ความต้านทานฉนวนไฟฟ้าต่ำสุด	1 M $\Omega$
อัตราการใช้พลังงาน	Operating Mode: 3.35 mJ/Sec @Vcc 3.0 V TX Mode: 3.35 mJ/Sec @Vcc 3.0 V Sleep Mode 0.50 mJ/Sec @Vcc 3.0 V
ค่าความผิดพลาดสูงในการวัดระดับน้ำ	2.33 %FSO
ค่าความผิดพลาดต่ำสุดในการวัดระดับน้ำ	0.33 %FSO
ค่าความผิดพลาดแบบฮิสเทอรีซิส	1.80 %FSO
ค่าความไม่แน่นอนในการวัดสูงสุด	$\pm$ 0.0025 เซนติเมตร
ค่าความไม่แน่นอนในการวัดต่ำสุด	0 เซนติเมตร
ราคาต้นทุนวัสดุ	500 บาท ต่อย่านวัด 30 เซนติเมตร

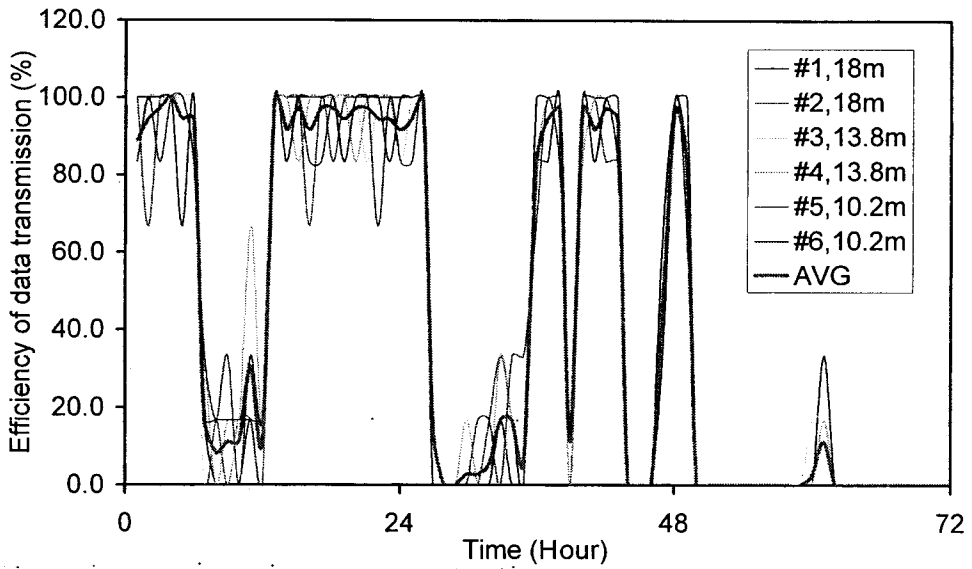
### 9.3 สรุปการใช้งานเซนเซอร์วัดระดับน้ำร่วมกับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

#### 9.3.1 คุณสมบัติของระบบสื่อสารไร้สายที่นำมาใช้ร่วมกับเซนเซอร์วัดระดับน้ำ

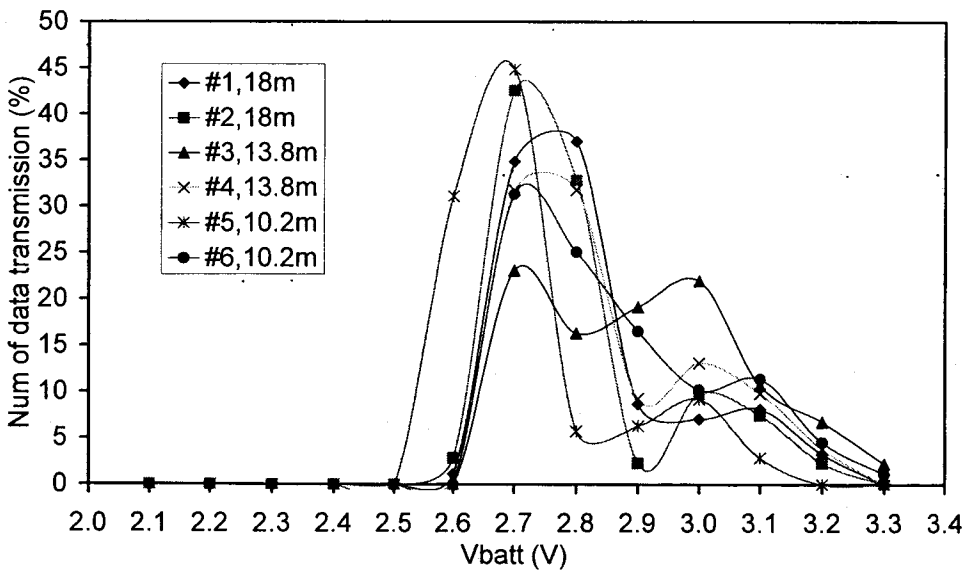
โมดูลสื่อสารไร้สาย	>>U-node Ver.2
มาตรฐานสื่อสารไร้สาย	>>IEEE 802.15.4

ความถี่วิทยุ	>>2.4 GHz
กำลังส่งสูงสุด	>>1 mW
ระดับแรงดันไฟฟ้าทำงาน	>>2.1 – 3.6 โวลต์
อัตราการใช้พลังงาน	>>Operating Mode: 63.58 mJ/Sec @Vcc 3.0 V
	>>TX Mode: 80.35 mJ/Sec @Vcc 3.0 V

9.3.2 ประสิทธิภาพการรับ-ส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย



รูปที่ 9-2 ประสิทธิภาพการรับ-ส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายในแต่ละช่วงเวลาทดสอบ



รูปที่ 9-3 ประสิทธิภาพการรับ-ส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย  
ในแต่ละระดับแรงดันของแบตเตอรี่

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการรับ-ส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายในแต่ละช่วงเวลาดังรูปที่ 9-2 พบว่า เซนเซอร์โหนดแต่ละตัว มีประสิทธิภาพการรับ-ส่งข้อมูลที่เกาะกลุ่มใกล้เคียงกันในแต่ละช่วงเวลา จึงมีสมมุติฐานที่เป็นไปได้ว่าเซนเซอร์ตัวรับ (Base station) อาจมีปัญหาการรับข้อมูลในแต่ละช่วงเวลาทำให้ประสิทธิภาพสื่อสารทั้งหมดลดลง ในขณะที่เมื่อพิจารณาจำนวนข้อมูลต่อระดับแรงดันของแบตเตอรี่ดังรูปที่ 9-3 พบว่าที่ระดับแรงดัน 2.7 โวลต์มีความสำเร็จในการส่งข้อมูลมากที่สุด จึงมีสมมุติฐานที่เป็นไปได้ว่าเซนเซอร์โหนดอาจมีประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลสูงสุดที่ระดับแรงดันของแบตเตอรี่เท่ากับ 2.7 โวลต์ โดยสมมุติฐานดังกล่าวเป็นเพียงข้อสังเกตของผู้วิจัย ที่เกิดขึ้นจากพื้นฐานของข้อมูลเพียง 2 ปัจจัย คือ ช่วงเวลา และระดับแรงดันของแบตเตอรี่ อาจมีปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมอย่างอื่นที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลเช่น อุณหภูมิ ความชื้น หรือจำนวนคนในห้อง ซึ่งต้องทำการศึกษาวิจัย เพื่อปรับปรุงให้ประสิทธิภาพสื่อสารดียิ่งขึ้นต่อไป

## บรรณานุกรม

- [1] D Donlagic , M Završnik , I Sirotić . “The use of one-dimensional acoustical gas resonator for fluid level measurements”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol 49, Issue 5, pp.1095 – 1100,2000.
- [2] E Musayev and S. E. Karlik. “A novel liquid level detection method and its implementation”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol 109, Issue 1, pp.21-24, 2003.
- [3] T.H. Wang, M. C. Lu, C.C. Hsu, C.C. Chen, J.D. Tan. “Liquid-level measurement using a single digital camera”, *Measurement*, Vol 42, pp 604–610, 2009.
- [4] K.R. Sohn, J.H. Shim. “Liquid-level monitoring sensor systems using fiber Bragg grating embedded in cantilever”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol 52, Issue1, pp 248-251, 2009.
- [5] S.C. Bera, J.K. Ray, S. Chattopadhyay. “A low-cost noncontact capacitance- type level transducer for a conducting liquid” , *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol 55, no.3, pp.778–786, 2006.
- [6] F Reverter , X Li and Gerard C.M. Meijer. “Liquid- Level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor”, *Sensors and Actuators* , Vol 138 , pp1- 8, 2007.
- [7] S.C. Bera, N. Mandal and R. Sarkar. “A Modified Design of an Electronic Float Transducer for Measurement of Liquid Level”, *Sensors and Actuators* , Vol 92 , pp 10- 15, 2008.
- [8] G Nikolov and B Nikolova. “Virtual techniques for liquid level monitoring using differential pressure sensors, *RECENT*, Vol 9, No.2(23), 2008.
- [9] Stanley E. Woodard, Bryant D. Taylor, A wireless fluid-level measurement technique , *Sensors and Actuators A* 137 (2007) 268–278
- [10] Yishay Netzer, Yuvalim (IL), Compensated Capacitive Liquid Level Sensor US PATENT US6490920 B2, (2002)
- [11] L.K. Baxter, *Capacitive Sensors Design and Application*. New York: IEEE Press, 1997.
- [12] E.O. Doebelin. “*Measurement System Application and Design*”, 4th ed. New York: McGraw- Hill, 1990.

- [13] B.G. Liptak. "*Process Measurement and Analysis*", 3rd ed. Oxford, U.K.: Butterworth Heinman, 1999.
- [14] D. M. Considine. "*Process Instruments and Control Hand Book*", 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1974.
- [15] J. P. Bently. "*Principles of Measurement Systems*", 3rd ed. Singapore: Longman Singapore Publishers (Pte) Ltd., 1995.
- [16] J. Michael Jacob. "*Industrial Control Electronics*", Singapore: Prentice Hall International Editions, 1995.
- [17] C. -T. Chiang and Y.- C. Huang. "A semicylindrical capacitive sensor with interface circuit used for flow rate measurement", *IEEE sensors journal*, Vol 6, no.6 , 2006.
- [18] Suchera L, Panote T, Punnee A, Booncharoen W, Chusak L, Proespichaya K. "Label-free capacitive immunosensor for microcystin-LR using self-assembled thiourea monolayer incorporated with Ag nanoparticles on gold electrode" ,*Biosensors and Bioelectronics*, Vol 24, Issue 1, 15,pp. 78-86, 2008.
- [19] H Matsumoto and K.A. Watanabe. "switched-capacitor digital capacitance meter", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1986.
- [20] D D Denton, M A S Jaafar and A R K Ralston. "The long term reliability of a switched-capacitor relative humidity sensor system" , *IEEE Int. Symp. on Circuits and System* (San Diego) (New York: IEEE), pp. 1840-3, 1992.
- [21] C Kollé and P O'Leary. " Low-cost high-precision measurement system for capacitive sensors", *Measurement Sci. Technol.* 9, pp. 510-517, 1998.
- [22] W Helbach, P Marczinowski and G Trenkler. "High precision automatic digital AC bridge" , *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1983.
- [23] M Dutta, A Rakshit, S N Bhattacharyya and J K Choudhury. " An application of an LMS adaptive algorithm for a digital AC bridge" , *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1997.
- [24] Mohd Syaifudin Bin Abdul Rahman, Subhas C. Mukhopadhyay, Pak Lam Yu, Novel Sensors for Food Inspections, *Sensors & Transducers Journal*, Vol. 114, Issue 3, pp. 1-40, March 2010
- [25] Md. Nazmul Alam, Rashed H. Bhuiyan, Roger A. Dougal, and Mohammad Ali, "Concrete Moisture Content Measurement Using Interdigitated Near-Field Sensors", *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 10, NO. 7, JULY 2010

- [26] P. Fürjes, A. Kovács, Cs. Dücs"o, M. Ádáma, B. Müller b, U. Mescheder, Porous silicon-based humidity sensor with interdigital electrodes and internal heaters, *Sensors and Actuators*, B 95, P140–144, 2003
- [27] Tomas Blecha, Iosef Pihera, Epoxy Resin Curing Process Evaluation Based on Signal Frequency Analysis from Interdigital Structure Sensor
- [28] Y. Wang, N. Chong, Y.L. Cheng, H.L.W. Chan, and C.L. Choy, “Dependence of capacitance on electrode configuration for ferroelectric films with interdigital electrodes”, *Microelectronic Engineering*, Vol 66, pp 880–886, 2003.
- [29] R. Igreja and C. J. Dias, Analytical evaluation of the inter-digital electrodes capacitance for a multi-layered structure, *Sensors and Actuators A* 112, pp. 291-301, 2004
- [30] A. V. Mamishev, K. S. Rajan, Y. Du and M. Zahn, “Inter-digital Sensors and Transducers”, in *IEEE Proceedings*, 92, No. 5, pp. 808-845, 2004
- [31] Edin Terzic, C.R.Nagarajah, MuhammadAlamgir, Capacitive sensor-based fluid level measurement in a dynamic environment using neural network, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 23, pp. 614–619, 2010

## เป้าหมาย ผลผลิต ตัวชี้วัด และผลการดำเนินงานโครงการวิจัย

สำหรับโครงการวิจัยเรื่องการพัฒนาเครื่องมือต้นแบบสำหรับวัดระดับน้ำในคลองเปิดเพื่อใช้ในการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ได้สรุปเป้าหมาย ผลผลิต ตัวชี้วัด และผลการดำเนินงานโครงการวิจัย รวมทั้งอุปสรรคในการทำงานวิจัยได้ดังนี้

โครงการวิจัยนี้ได้ผลิตบัณฑิตในระดับปริญญาตรี 1 คนคือ นายวรสิน เขื่อนแย้ม และบัณฑิตในระดับปริญญาโทได้ 2 คนคือ นายสุภกร กตาทิการกุล และนายธิตินันท์ ตะเกาน้อย ได้ผลิตเชิงองค์ความรู้ดังนี้

1. ผลงานตีพิมพ์ในระดับชาติ 1 บทความตามเอกสารที่แนบ และคาดว่าจะได้ผลงานตีพิมพ์ในระดับนานาชาติ 1 บทความ และผลงานตีพิมพ์ในระดับชาติอีก 1 บทความ (ยังอยู่ระหว่างการร่าง manuscript เพราะนายธิตินันท์ ตะเกาน้อย นศ.บัณฑิตในระดับปริญญาโท คาดว่าจะสำเร็จการศึกษาในเดือนเมษายน 2555 รวมทั้งกำลังดำเนินการนำผลงานพัฒนาเป็นประโยชน์ในเชิงพาณิชย์จึงไม่ยักนำผลงานตีพิมพ์ออกไปก่อน)
2. ผลงานที่นำเสนอในที่ประชุมวิชาการในระดับนานาชาติ 1 บทความ และในระดับชาติ 3 บทความตามเอกสารที่แนบ โดยมี 2 บทความที่ได้รางวัลชนะเลิศบทความดีเด่นประเภทการวิจัยพื้นฐาน และรางวัลชนะเลิศบทความดีเด่นประเภทการวิจัยประยุกต์พร้อมกันในการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ครั้งที่ 7 (PEC 7) ในวันที่ 21-22 พ.ค. 2552 และคาดว่าจะได้ผลงานที่นำเสนอในที่ประชุมวิชาการในระดับนานาชาติอีก 1 บทความจากนายธิตินันท์ ตะเกาน้อย

ในแง่ผลผลิตเชิงผลิตภัณฑ์ และนวัตกรรม สำหรับในส่วนขอของเทคนิคการวัดระดับโดยใช้การวัดความจุไฟฟ้ากึ่งทรงกระบอกในโครงการวิจัยนี้ได้นำไปต่อยอดในโครงการเรื่อง “การวัดน้ำฝนแบบอัตโนมัติ” ซึ่งยื่นขอทุนจากสกว.แล้ว โดยมี นายสุภกร กตาทิการกุล เป็นหัวหน้าโครงการ และ ผศ.คณิต เจริญพัฒนานนท์เป็นที่ปรึกษาโครงการ และโครงการวิจัยเรื่องเครื่องเฝ้าระวังการเกิดอุทกภัยสำหรับชุมชนซึ่งกำลังยื่นขอทุนวิจัยจากสกว. โดยมี ผศ.คณิต เจริญพัฒนานนท์เป็นหัวหน้าโครงการ พร้อมกันนี้ได้นำไปถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับชาวบ้านในจังหวัดนครศรีธรรมราช ในการประชุมเชิงวิชาการ “อยู่กับน้ำ” ในวันที่ 25 มิถุนายน 2554 และยังนำไปร่วมสัมมนา "หาดใหญ่เข้มแข็ง...สู้ภัยน้ำท่วม" ครั้งที่ 2 (การจัดทำแผนปฏิบัติการ Hat Yai Model) วันเสาร์ที่ 30 ก.ค. 54 ณ ห้อง Conference ศูนย์ประชุมนานาชาติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี ร่วมกับหน่วยงานภาครัฐและภาคเอกชนในการจัดทำแผนปฏิบัติการ Hat Yai Model

ในส่วนของการวัดระดับน้ำโดยใช้การวัดความจุไฟฟ้าของอินเทอร์ดิจิตออลิเล็กโตรดได้ยื่นจดสิทธิบัตรการประดิษฐ์ชื่อ "เครื่องมือวัดระดับของเหลวด้วยหลักการวัดค่าความจุไฟฟ้าผลิตจากแผ่นวงจรพิมพ์" เลขที่คำขอ 1101000005 ลงวันที่รับคำขอ 4 ม.ค. 2554 ตามเอกสารที่ได้แนบและคาดว่าจะยื่นจดอนุสิทธิบัตรอีก 1 เรื่อง รวมทั้งอยู่ระหว่างการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์โดยมีบริษัท Mobillis automata สนใจที่จะนำผลงานวิจัยนี้พัฒนาต่อไปตามเอกสารที่ได้แนบมา พร้อมกับได้เผยแพร่ผลงานผ่านหนังสือพิมพ์ มติชน ลงวันที่ 15 สิงหาคม 2554 และหนังสือพิมพ์สมิหลาไทม์ ประจำวันที่ 13-19 สิงหาคม 2554 ตามเอกสารที่ได้แนบมาด้วย

## ปัญหา และอุปสรรคในการทำงานวิจัย

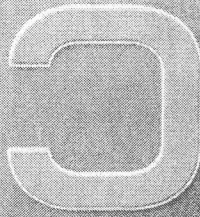
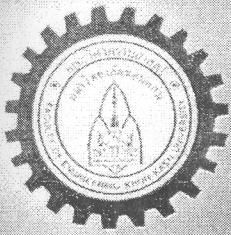
เนื่องจากหัวหน้าโครงการไม่ได้จบปริญญาเอก ดังนั้นจึงไม่สามารถเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของวิทยานิพนธ์ในระดับบัณฑิตศึกษาได้ ดังนั้นหัวหน้าโครงการจำเป็นต้องให้หัวหน้าโครงการวิจัยย่อยอื่นๆของแผนวิจัยนี้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และผู้ร่วมวิจัยเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้งานวิจัยนี้จึงมีความล่าช้าไปจากเดิม 2 ปี

นอกจากนี้ในปีที่ผ่านมาจากผู้ช่วยวิจัยในระดับปริญญาโทที่สามารถทำงานได้เต็มเวลา (เนื่องจากไม่มีใครสนใจในหัวข้อวิทยานิพนธ์นี้) และในปีที่ผ่านมาได้อาศัยนักศึกษาปริญญาตรี แต่ไม่สามารถช่วยงานวิจัยได้เต็มที่เนื่องจากการเรียนที่หนัก รวมทั้งตัวนักศึกษาเองจำเป็นต้องสำเร็จการศึกษาเพื่อหางานทำ ดังนั้นนักวิจัยในโครงการ และผู้ร่วมวิจัยในโครงการจึงต้องลงมาทำกันเอง และได้จ้างช่างประกอบวงจรมาช่วยในการทำต้นแบบเริ่มต้นมาช่วยงานระยะหนึ่ง ทำให้การทำงานมีความล่าช้า และล่าช้าไปบ้าง เนื่องจากนักวิจัยในโครงการ และผู้ร่วมวิจัยในโครงการยังมีภาระทั้งงานสอน และงานวิจัยที่มีมากอยู่แล้วด้วย ซึ่งเป็นปัญหา และอุปสรรคอย่างมากโดยเฉพาะหัวหน้าโครงการวิจัยแบกรับภาระงานในตำแหน่งหัวหน้าภาควิชาฯ ในระยะเวลา 1 ปี 4 เดือน อย่างไรก็ตามก็ได้มีนักศึกษาทั้งปริญญาโท และปริญญาตรีให้ความสนใจที่จะมาช่วยวิจัย

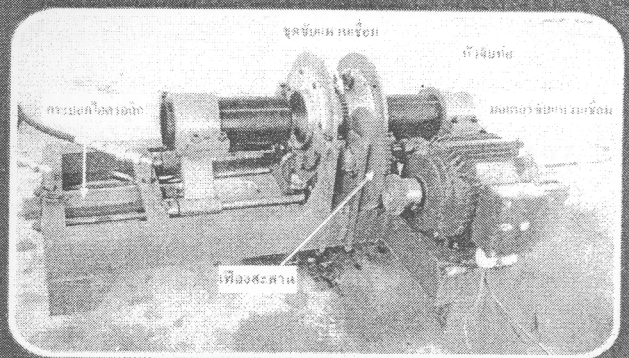
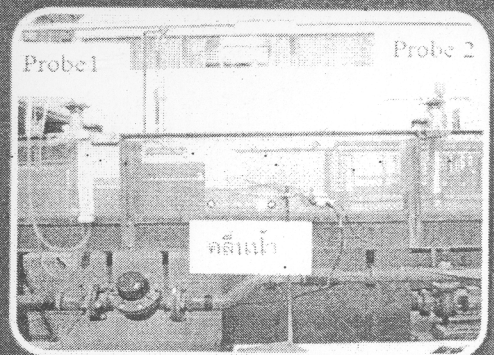
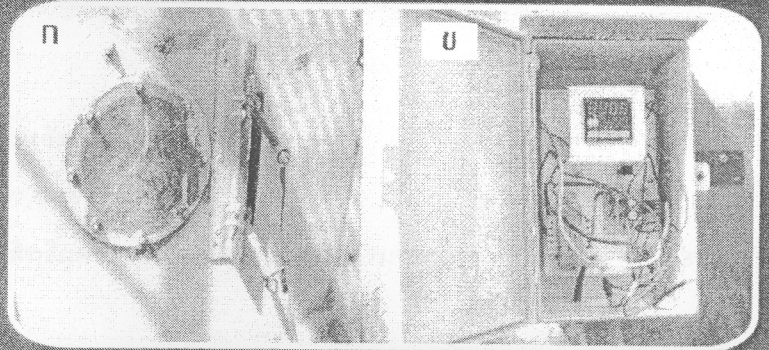
ถ้าได้ผู้ช่วยวิจัยที่สามารถช่วยนักวิจัยการสร้างและออกแบบเครื่องต้นแบบ และตรวจวัดข้อมูลของระดับน้ำด้วยเทคนิคที่คิดค้นมาใหม่นี้ได้เต็มเวลา ก็จะทำให้ตัวนักวิจัยหลักเองมีเวลาที่จะศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำที่วัดได้ และคุณสมบัติทางไฟฟ้าในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้เพื่อนำไปสู่การตีพิมพ์ในบทความทางวิชาการต่อไปได้ เพื่อจะได้นำมาประกอบในแบบประวัติของนักวิจัยเอง และเป็นการเพิ่ม KPI ให้มหาวิทยาลัยและคณะฯ ได้ ดังนั้นงานในส่วนหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำที่วัดได้ และคุณสมบัติทางไฟฟ้าในรูปสมการคณิตศาสตร์จึงต้องใช้เวลามากพอสมควร เนื่องจากนักวิจัยเองมีภาระงานหลายๆด้านที่ต้องทำในเวลาพร้อมๆกัน และยังต้องศึกษาการใช้คณิตศาสตร์ขั้นสูงที่จะมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยเฉพาะการหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ของ Interdigital capacitor กับระดับน้ำเป็นเรื่องที่ยากมากๆ ยิ่งไปกว่านั้นในปัจจุบันทางมหาวิทยาลัยยังไม่มีโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์อย่างเช่น FEM (ที่มี License) สำหรับวิเคราะห์งานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอิเล็กทรอนิกส์ ความจุไฟฟ้าที่ประดิษฐ์ขึ้น ดังนั้นการออกแบบรูปลักษณะที่เหมาะสมของเครื่องมือวัดระดับน้ำที่อาศัยการวัดความจุไฟฟ้าจากแผ่นวงจรพิมพ์จึงเป็นไปได้ลำบาก

**ภาคผนวก**

**บทความตีพิมพ์ในวารสารวิจัยระดับชาติ**



# คทศรนาทศร นพ. KKU ENGINEERING JOURNAL



การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารร่วมกับกลีเซอรินดิบที่ได้จากระบวนการผลิตไบโอดีเซล <i>สมจินตนา ลิ้มสุข ปุณยวี เพียรธรรม และ อนุรักษ์ ปิตรีักษ์สกุล</i>	101
การพัฒนาเครื่องผลิตไอน้ำความดันต่ำสำหรับอุตสาหกรรมครัวเรือน <i>พรประสิทธิ์ คงบุญ จีระศักดิ์ เพียรเจริญ และ สุเทพ ชูกั่น</i>	111
การประยุกต์ใช้วิธีพีชชีสำหรับปัญหาการมอบหมายงานหลายวัตถุประสงค์ของเครื่องจักรในโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ <i>กัลยา เขมกมล และ วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร</i>	117
การศึกษาตัวแบบการกระจายสินค้าในจังหวัดสุราษฎร์ธานี <i>จิระเดช ดิษฐอำไพ นิกร ศิริวงศ์ไพศาล และ เสกสรร สุธรรมานนท์</i>	129
อัตราส่วนขนาดของท่อที่มีผลต่อค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น <i>สาธิต ทูลไธสง บัณฑิต กัญดาคม และ สัมฤทธิ์ จำเพยพัล</i>	139
อิทธิพลของเวลาเสียดทานและมุมหน้าสัมผัสในการเชื่อมท่อพลาสติกกลมชนิดพอลิเอทิลีนด้วยความเสียดทาน <i>สุรชัย จันทร์ชนะ และ วุฒิต อินวงศ์พิทักษ์</i>	147
รูปแบบทางคณิตศาสตร์ในการจัดตารางการผลิตในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนสารพัดistikไดร์ฟ <i>ทพร จากตะวีธี และ คุณชัย ปทุมนากุล</i>	155
การพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติในการปรับความเร็วยรอบของระบบลำเลียงฝุ่นชานอ้อยเพื่อการประหยัดพลังงาน <i>สิทธิพร สมทรัพย์ และ รัชพล สันติวารการ</i>	165
การวัดระดับน้ำโดยใช้เทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก <i>คุณกร กตาทิการกุล และ ศเนติฉิ เจริญพัฒนานนท์</i>	179
การออกแบบระบบการตัดสินใจเลือกเส้นทางขนส่งต่อเนื่องหลายรูปแบบระหว่างไทยกับเวียดนาม <i>วรพงษ์ มีถม และ สมชาย พรชัยวิวัฒน์</i>	187
การใช้เทคโนโลยีการรับรู้ระยะไกลสำหรับการประเมินความเสียหายจากน้ำท่วม : การทบทวนวรรณกรรม <i>ชาติชาย ไวยสุระสิงห์</i>	197
On-Chip Transformer: Overview, Applications and Modeling <i>วิศว์ บานชื่น</i>	211

# KKU Engineering Journal

## Volume 38 Number 2

### April - June, 2011

---

Biogas production from food waste added with crude glycerin produced from biodiesel production <i>Sornjintana Limsuk Poonyawee peantum and Anurak peliraksakul</i>	101
Development of low rpressure steam generator for gousehold industry <i>Pornprasit kongboon jeerasak Peanjaroon and Sulep Chooklin</i>	111
Applying Fuzzy Technique for Multi-objective Machine Assignment Problem in Electronic part Factory <i>Kanlaya Hemakorn and Wuthichai Wongthatsaneakorn</i>	117
A Study of Physical Distribution Model in Suratthani Province <i>Jiradai Ditamapai Nikorn Sirivongpaisal and Sakesun Suthummanon</i>	129
The effect of the diameter ratios on the effectiveness of the concentric tube heat exehanger <i>Sarith Toolthaisong Bundit Kritacorn and Sunchai Rampeepad</i>	139
The influence of friction time and contact angles in friction welding for Polyethylene pipes <i>Surachai Junchana and Chawalit Thirvongpituk</i>	147
A mathematical model for production scheduling in a hard disk drive component industry <i>Pachara Chatavithree and Supachai Pathumnakul</i>	155
The Development of Automatic Control System to Adjust a Cycle Speed of a Bagasse Dust Conveyor System for Energy Saving <i>Sittiporn Somsap and Ratchaphon Suntivarakon</i>	165
Water Level Measurement using Semicylindrical Capacitance measurement Technique <i>Supagorn dalathikamkul and Kanadit Chetpattananondh</i>	179
Design of Decision Support System for Multimodal Transportation Route Selecting between Thai and Vietnam <i>Warapoj Meethom and Sornchai Pornchaivivat</i>	187
The Use of Remote Sensing Technology for Evaluation of Flood Damages: A Review Literature <i>Chattichai Waisurasingha</i>	197
On-Chip Transformer: Overview, Aplications and Modeling <i>Rawid Benchuin</i>	211

---

## การวัดระดับน้ำโดยใช้เทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

ศุภกร กตาทิการกุล<sup>1)</sup> และ คนดิด เจษฎ์พัฒนานนท์<sup>2)</sup>

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวัดระดับน้ำโดยใช้เทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก โดยมีหัววัดเป็นแบบกึ่งทรงกระบอกกึ่งวงที่ทำจากวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์(PVC) และแผ่นโลหะกึ่งทรงกระบอกทำจากเทปอลูมิเนียมห่อหุ้ม ปริมาณความจุไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนไปและแปรผกผันกับระยะห่างของแผ่นโลหะ โดยมีค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้อยู่ในช่วงพิโคฟารัด(pF) สำหรับผลตอบสนองเชิงสถิติและพลวัตของเทคนิคการวัดความจุไฟฟ้ากึ่งทรงกระบอกโดยการประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์ที่ปรับปรุงขึ้นพบว่า แรงดันไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับระดับน้ำที่เปลี่ยนไปซึ่งค่าอยู่ในช่วงมิลลิโวลต์(mV) พบว่า ค่าความไม่เชิงเส้น ความสามารถในการทำซ้ำ และผลตอบสนองเวลาของเทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกอยู่ในช่วง 0.2 วินาที และสามารถนำไปใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำได้ทันที อีกทั้งยังมีราคาถูก ใช้งานง่าย พกพาสะดวก แต่มีประสิทธิภาพและความคล่องตัวในการใช้งานสูง

คำสำคัญ : การวัดระดับน้ำ การวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก วงจรบริดจ์ที่ปรับปรุง

---

<sup>1)</sup> นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90110  
อีเมล: supagone@hotmail.com

<sup>2)</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90110  
อีเมล: kanadit.c@psu.ac.th

\*Corresponding author

## Water Level Measurement using Semicylindrical Capacitance measurement Technique

Supagorn katathikarnkul<sup>1)</sup> and Kanadit Chetpattananondh<sup>\*2)</sup>

### Abstract

This paper presents the water level measurement technique using a semicylindrical capacitance measurement. The probe consists of a hollow PVC semicylinder made of covered with a semicylindrical aluminium foil. Capacitance of the probe is proportional to the change in water level and is inversely proportional to the distance of aluminium foil. The measured capacitance is in the range of picofarad (pF). The static and dynamic responses of the proposed sensor were tested using the modified bridge circuit. Results show that the measured voltage is in the range of millivolt (mV) and is proportional to the variation in water level. In addition, the tested nonlinearity, repeatability, and time responses of the probe are in the range of 0.2 second. This technique can be efficiently used in real-time water level measurement. Moreover, it is low cost, easy to use, and portable.

Keywords: water level measurement, semicylindrical capacitance measurement, modified bridge circuit

---

<sup>1)</sup> Post graduated Students, Department of Electrical Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla 90110, E-mail: supagone@hotmail.com

<sup>2)</sup> Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla 90110  
E-mail: kanadit.c@psu.ac.th

## 1. บทนำ

ปัจจุบันการวัดระดับของเหลวได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตรประจำวันและมีส่วนสำคัญในทางด้านอุตสาหกรรม และกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ตัวอย่างเช่น การวัดปริมาณในประเภทอุตสาหกรรมทางอาหารและเครื่องดื่ม การวัดปริมาณของน้ำมันในประเภทอุตสาหกรรมน้ำมัน การวัดระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ เป็นต้น การตรวจวัดเหล่านี้จะใช้หลักการพื้นฐานของคุณสมบัติชนิดของวัสดุ หรือคุณสมบัติทางไฟฟ้า อาทิ เช่น สภาพนำไฟฟ้า ความดัน อุณหภูมิ การสึกกร่อน เป็นต้น (S.C. Bera et al., 2006) (F. Reverter et al., 2007) (S.E. Woodard et al., 2007) ทำให้ได้เทคนิคที่แตกต่างกันในการตรวจวัดระดับของเหลวมากกว่า 20 วิธีที่มีอยู่ตามท้องตลาดในปัจจุบัน โดยในแต่ละวิธีก็มีข้อจำกัดในการวัดที่แตกต่างกัน (G. Nikolov and B.Nikolova., 2008) เทคนิคหนึ่งที่ได้นำมาใช้ตรวจวัดระดับของเหลว คือ การวัดค่าความจุไฟฟ้า เนื่องจากสามารถที่จะลดปัญหาเกี่ยวกับเทคนิคการสร้างต้นแบบ ข้อจำกัดด้านราคา มีผลตอบสนองเป็นเชิงเส้น และง่ายต่อการใช้งาน โดยมีหลักการพื้นฐานคือการใช้ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วจุ่มลงไปลงในของเหลวเพื่อวัดระดับของเหลวด้วยการวัดปริมาณไดอิเล็กตริกของเหลวซึ่งมีอยู่ในคุณสมบัติของเหลว อาทิเช่น ความเข้มข้น สารแขวนลอย และ การเจือปน อย่างไรก็ตามเมื่อค่าไดอิเล็กตริกเปลี่ยนจะส่งผลต่อค่าที่ตรวจวัดได้ (F. Reverter et al., 2007)

สำหรับรูปแบบของวงจรตรวจวัดที่ใช้สำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากระดับของเหลวมีอยู่หลายประเภทด้วยกัน อาทิเช่น วงจรแปลงแปลงค่าความจุไฟฟ้าไปเป็นความถี่ วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า วงจรการวัดค่าคงที่ทางเวลา (Time constant) วงจรตีมือเลดแบบซิงโครนัส เป็นต้น (L.K. Baxter, 1997) จากการศึกษาพบว่าเทคนิคต่างๆ เหล่านี้มีรูปแบบโครงสร้าง และอุปกรณ์จำนวนมาก

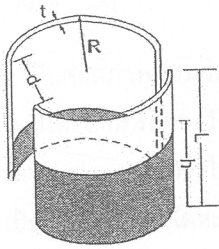
ดังนั้นแนวคิดในการปรับปรุงเทคนิคการวัดระดับของเหลวแบบต่อเนื่องโดยมีการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกจึงมีความจำเป็นเพื่อเป็นการลดข้อจำกัด

ทางด้านต่างๆ สำหรับเทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบกึ่งทรงกระบอกเพื่อวัดระดับของเหลว (S. Katathikarnkul et al., 2009) ได้มีการประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์ปรับปรุงขึ้น (S.C. Bera et al., 2006) เพื่อวัดความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเนื่องอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ และทำการบันทึกโดยใช้เครื่องมือวัดเสมือนโดยหัววัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกสร้างจากท่อทรงกระบอกกลวงที่ทำจากวัสดุ พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride ,PVC) และอิเล็กโตรดเป็นแผ่นกึ่งทรงกระบอกทำจากเทปอลูมิเนียม สำหรับเทคนิคที่นำเสนอนี้บทความนี้สามารถตรวจวัดระดับของเหลวได้ให้ผลตอบสนองที่มีความละเอียดและผลตอบสนองเป็นเชิงเส้นที่ดีโดยการอธิบายด้วยวงจรมูลของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก (S. Katathikarnkul et al., 2009) พร้อมกับประยุกต์ใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าภายในอิเล็กโตรดกึ่งทรงกระบอก และระดับของเหลว นอกจากนี้วงจรตรวจวัดดังกล่าวยังมีราคาถูก ใช้งานง่าย พกพาสะดวก แต่มีประสิทธิภาพและความคล่องตัวในการใช้งานสูง

## 2. ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

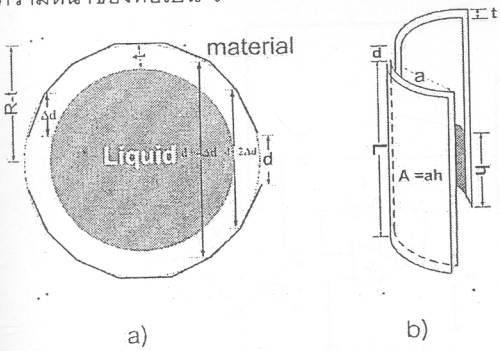
### 2.1 ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

การวัดระดับน้ำที่อาศัยเทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกมีลักษณะแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นท่อทรงกระบอกกลวงที่มีรัศมีเท่ากับ R ความยาวเป็น L ความหนาเป็น  $t$  ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวนอย่างเช่นพอลิไวนิลคลอไรด์ และมีอิเล็กโตรดที่เป็นแผ่นกึ่งทรงกระบอกทำจากเทปอลูมิเนียมมาห่อหุ้มท่อฉนวนทรงกระบอก โดยมีระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโตรดเป็น  $d$  สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าภายในทรงกระบอก และระดับน้ำได้ด้วยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (S. Katathikarnkul et al., 2009) โดยการแบ่งแผ่นโลหะ 2 แผ่นที่อยู่ในรูปกึ่งทรงกระบอกของตัวเก็บประจุให้เป็นจำนวน  $n$  แผ่นเล็กๆที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นที่เพิ่มขึ้นเป็น  $\Delta d$



รูปที่ 1 โครงสร้างของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

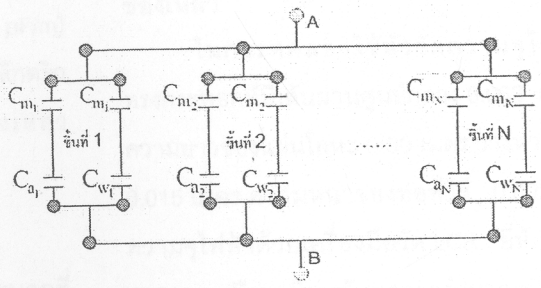
รูปที่ 2a แสดงเป็นมุมมองด้านบนบนแผ่นโลหะทั้งสองของแบบกึ่งทรงกระบอก และรูปที่ 2b ที่แสดงแผ่นโลหะ 2 แผ่นเล็กๆที่ถูกแบ่งจากแผ่นโลหะกึ่งทรงกระบอก ในการวัดระดับน้ำ พบว่าค่าความจุไฟฟ้าแบ่งได้เป็นความจุไฟฟ้าเนื่องจากส่วนที่จุ่มลงในน้ำซึ่งมีขนาดความสูงเป็น h รวมกับความจุไฟฟ้าเนื่องจากส่วนที่เป็นอากาศซึ่งมีความสูงที่เหลือเท่ากับ L-h เมื่อ L คือความยาวของท่อ ความจุไฟฟ้าของทั้งสองนี้ต่อกันแบบขนาน และหัววัดแบบกึ่งทรงกระบอกที่สร้างขึ้นนี้มีขอบความหนาของท่อเป็น t



รูปที่ 2 รูปแบบสำหรับการวิเคราะห์ a) มุมมองด้านบน b) แผ่นโลหะกึ่งทรงกระบอกที่ถูกแบ่งเป็นแผ่นเล็กๆ

ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากความหนาของท่อด้วย ซึ่งสามารถแสดงวงจรมูลของค่าความจุไฟฟ้ารวมดังรูปที่ 3 โดยที่หาค่าความจุไฟฟ้ารวมได้ดังนี้

$$C = \frac{C_{m1} C_{a1}}{C_{a1} + C_{m1}} + \frac{C_{m1} C_{w1}}{C_{w1} + C_{m1}} + \dots + \frac{C_{mN} C_{aN}}{C_{aN} + C_{mN}} + \frac{C_{mN} C_{wN}}{C_{wN} + C_{mN}} \quad (1)$$



รูปที่ 3 วงจรมูลของค่าความจุไฟฟ้ารวม

โดยวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เมื่อกำหนดให้ ความจุไฟฟ้ารวมส่วนของเหลวกับวัสดุ ( $C_1$ ) และค่าความจุไฟฟ้ารวมส่วนของอากาศกับวัสดุ ( $C_2$ ) เมื่อ

$$C_1 = \frac{C_{m1} C_{w1}}{C_{w1} + C_{m1}} + \dots + \frac{C_{mN} C_{wN}}{C_{wN} + C_{mN}} \quad (2)$$

โดยที่  $C_{w1}, C_{w2}, \dots, C_{w_{n-1}} = \frac{\epsilon_0 A}{\frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + d + 2(n-1)\Delta d}$ ,  $C_{wN} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_w A}{2(R-l)}$

และ  $C_{m1}, C_{m2}, \dots, C_{m_{n-1}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_m A}{t}$ ,  $C_{mN} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_m A}{2t}$

เมื่อ  $\Delta d = \frac{2R-d}{2N}$ ,  $A = ah = \left(\frac{\pi R-d}{N}\right)h$

ดังนั้น

$$C_1 = \epsilon_0 \left(\frac{\pi R-d}{N}\right)h \left( 2 \sum_{n=1}^N \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\epsilon_w}}}} \right) + \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\epsilon_w}} \quad (3)$$

และ  $C_2 = \frac{C_{a1} C_{a1}}{C_{a1} + C_{m1}} + \dots + \frac{C_{aN} C_{aN}}{C_{aN} + C_{mN}} \quad (4)$

โดยที่

$$C_{a1}, C_{a2}, \dots, C_{a_{n-1}} = \frac{\epsilon_0 A}{\frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + d + 2(n-1)\Delta d}$$

$$C_{aN} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_a A}{2(R-l)}$$

$$C_2 = \epsilon_0 \left(\frac{\pi R-d}{N}\right)(L-h) \left( 2 \sum_{n=1}^N \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1}{\epsilon_w}}}} \right) + \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\epsilon_a}} \quad (5)$$

เมื่อกำหนดให้

$$k_1 = \frac{\epsilon_0 (\pi R-d)}{N} \left[ 2 \sum_{n=1}^N \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\epsilon_w}}}} \right] + \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\epsilon_w}}$$

และ

$$k_2 = \frac{\epsilon_0 (\pi R-d)}{N} \left[ 2 \sum_{n=1}^N \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1}{\epsilon_w}}}} \right] + \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\epsilon_a}}$$

ดังนั้นเขียนสมการใหม่ได้คือ

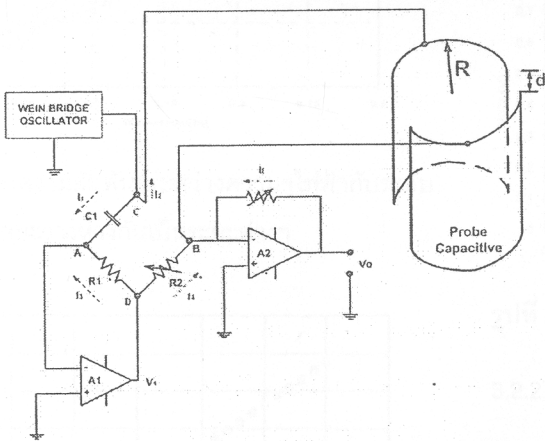
$$C = (L-h)k_2 + hk_1 \quad (6)$$

เมื่อ  $\epsilon_0$  เป็นค่าสภาพยอมของอากาศว่าง (8.85 pF/m)  $\epsilon_m$  เป็นค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุ  $\epsilon_a$  เป็นค่าไดอิเล็กตริกของอากาศ  $\epsilon_w$  เป็นค่าไดอิเล็กตริกของของเหลว และ A เป็นพื้นที่ของแผ่นโลหะ

### 2.2 วงจรที่ใช้วัดความจุไฟฟ้า

การวัดความจุไฟฟ้าของหัววัดกึ่งทรงกระบอกที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำจะใช้วงจรบริดจ์ที่ปรับปรุงขึ้นพร้อมวงจรรายละเอียดแสดงในรูปที่ 4 โดยที่ออปแอมป์ตัวที่ 1 ทำให้อุปกรณ์ A และจุด D เป็นกราวด์เสมือน และออปแอมป์ตัวที่ 2 ทำหน้าที่ขยายสัญญาณในที่นี้ให้แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายคงที่ (V) 2 โวลต์ และความถี่คงที่ (f) 1 kHz เมื่อระดับน้ำมีการเปลี่ยนแปลงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันด้านออกและระดับน้ำได้จาก

$$V_o = 2\pi f R_f V(k_1 - k_2)h \quad (7)$$

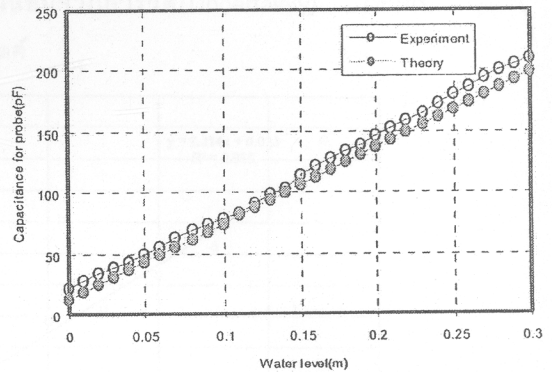


รูปที่ 4 วงจรบริดจ์ที่ปรับปรุงเพื่อประยุกต์ใช้วัดความจุไฟฟ้าของหัววัดกึ่งทรงกระบอกเมื่อระดับของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง

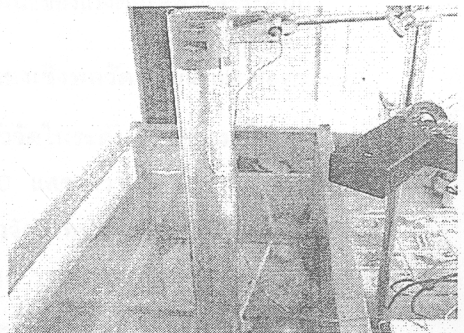
### 3. วิธีการทดลองและผลการทดลอง

#### 3.1 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระดับของเหลว

ในการทดลองใช้หัววัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นโลหะ 0.30 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.015 เมตร ความหนาของท่อพีวีซี 0.005 เมตร วัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัด LCR ยี่ห้อ Aligent รุ่น 4284A เปรียบเทียบกับผลการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าโดยสมการที่ 6 กำหนดให้ h เป็นจำนวนของแผ่นโลหะที่ถูกแบ่งย่อยเท่ากับ 10,000 ชั้น ค่าความจุไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนไป โดยจะอยู่ในช่วงพิโคฟารัด (pF) แสดงดังในรูปที่ 5 พบว่าค่าที่ได้จากผลการทดลองจะมีค่ามากกว่าจากการคำนวณเนื่องมาจากค่าความจุไฟฟ้าแฝงในสายไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากับ 6.31 %FSO



รูปที่ 5 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณกับการวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยตรง



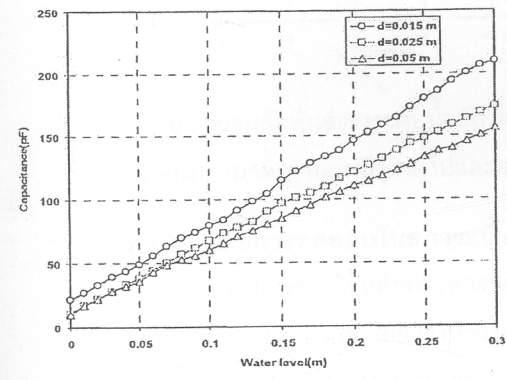
รูปที่ 6 รูปแบบหัววัดใช้ในการทดลองกับระดับน้ำเมื่อแผ่นโลหะวางห่างกัน 0.015 เมตร

จากรูปที่ 6 เป็นการวัดความจุไฟฟ้าของหัววัดกึ่งทรงกระบอกโดยให้ระดับน้ำเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.30 เมตร และเพิ่มขึ้นทุกๆ 0.01 เมตร พร้อมกับทดลองซ้ำ 10 ครั้ง เมื่อให้หัววัดมีขนาดความยาวของแผ่นอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.30 เมตร และวางห่างกันเป็นระยะต่างๆ กัน 0.015, 0.025 และ 0.05 เมตรตามลำดับ จะได้ผลตอบสนองเชิงสถิตที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 7 และความสามารถในการทำซ้ำ(Repeatability) ได้เป็น 1.02 % FSO และค่าความไม่เป็นเชิงเส้นได้ค่าเป็น 1.31 % FSO เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในทางเพิ่มขึ้นและลดลง พร้อมกับวัดความจุไฟฟ้าของหัววัดกึ่งทรงกระบอกที่มีแผ่นโลหะที่วางห่างกัน 0.015 เมตร แสดงดังรูปที่ 8 และได้ค่าฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis) เท่ากับ 6.04 %FSO

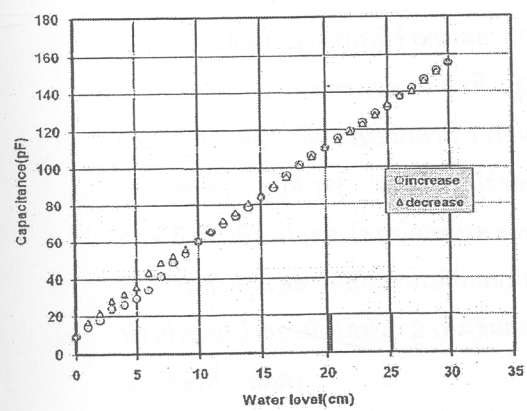
### 3.2 ศึกษาผลตอบสนองในเวลา

#### 3.2.1 ผลตอบสนองเชิงสถิต(Static Response)

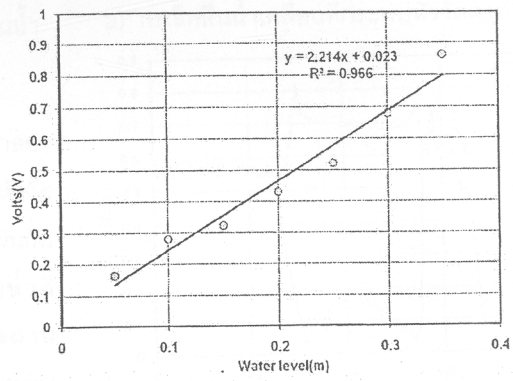
การวัดระดับของเหลวแสดงผลผ่านเครื่องมือวัดเสมือน (Virtual instrumentation) เมื่อแผ่นโลหะทำจากแผ่นเทปอลูมิเนียมขนาดความยาว 0.40 เมตร ระยะห่างระหว่างโลหะ 0.005 เมตร ความหนาของท่อ 0.002 เมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.048 เมตร วงจรบริดจ์ใช้วัดค่าแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.00 ถึง 0.35 เมตร โดยเพิ่มขึ้นทุกๆ 0.05 เมตร และให้แรงดันไฟฟ้ากระตุ้น ( $V_{in}$ ) ที่ 2 V ความถี่ 1 kHz พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าออกจะแปรผันตรงกับระดับน้ำที่เปลี่ยนไปและค่าที่ได้จะอยู่ในช่วงมิลลิโวลต์ (mV) รูปที่ 9 แสดงคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น คำนวนค่าความไม่เป็นเชิงเส้นได้เท่ากับ 4.13 % FSO และมีค่าความไม่แน่นอนจากการวัด(Uncertainty) เท่ากับ 0.00218 โวลต์



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำเมื่อแผ่นโลหะวางห่างกันเป็นระยะต่างๆ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของฮิสเตอร์ซิสในค่าความจุไฟฟ้า



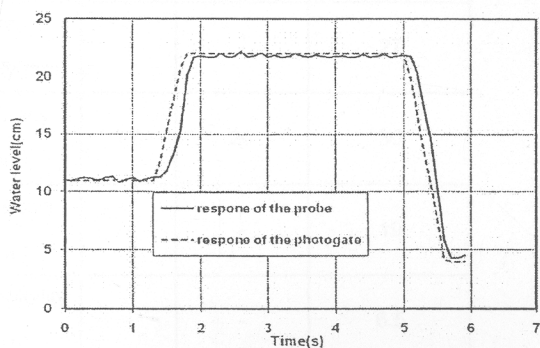
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและระดับน้ำ

#### 3.2.2 ผลตอบสนองเชิงพลวัต (Dynamic Response)

##### 3.2.2.1 การจุ่มหัววัดในระดับด้วยความเร็วคงที่

จากรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับเวลา เมื่อให้หัววัดกึ่งทรงกระบอกเคลื่อนที่จุ่มลงในน้ำด้วยระยะทาง 0.10 เมตร และได้เวลาในการเคลื่อนที่โดยอ่านได้จากเครื่องจับเวลาได้เท่ากับ 0.372 วินาที ดังนั้นสามารถคำนวณความเร็วของหัววัดเท่ากับ 0.269 เมตรต่อวินาที ในขณะที่การคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัววัดโดยใช้เทคนิคที่น่าเสนอนี้จะได้ 0.260 เมตรต่อวินาที สำหรับกรณีเคลื่อนที่ของหัววัดที่ยกขึ้น

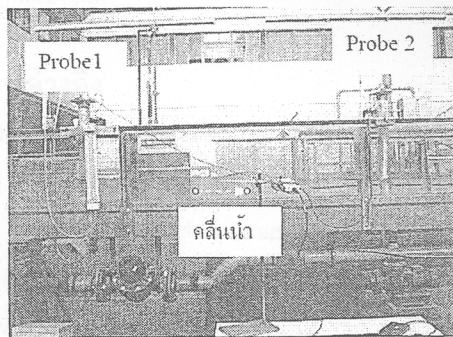
จากระดับน้ำเวลาในการเคลื่อนที่โดยอ่านได้จากเครื่องจับเวลาได้เท่ากับ 0.318 วินาที และความเร็วในการเคลื่อนที่คำนวณได้เป็น 0.314 เมตรต่อวินาที และในขณะที่การคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัววัดโดยใช้เทคนิคที่นำเสนอนี้จะได้ 0.271 เมตรต่อวินาที พบว่าผลตอบสนองเชิงพลวัตของหัววัดนี้มีเวลาที่ล่าช้า(Dead time) 0.2 วินาที และเวลาสู่จุดสมดุล (Settling time) 2.1 วินาที



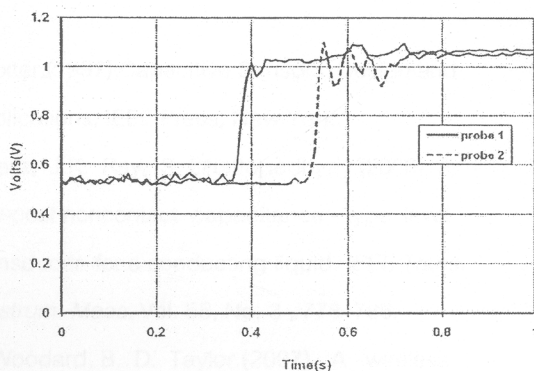
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของระดับน้ำกับเวลาระหว่างค่าที่ทดลองกับค่ามาตรฐานกรณีจุ่มลงไปและยกขึ้นจากในน้ำ

### 3.2.2.2 กรณีการทดสอบในสภาวะน้ำหลาก

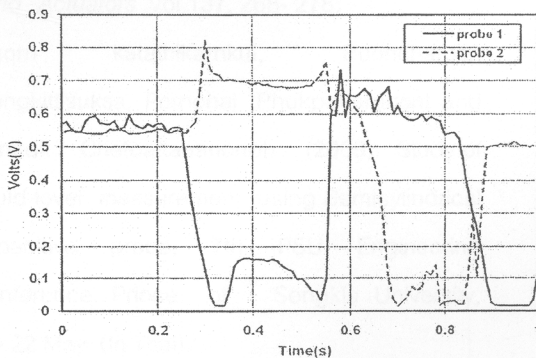
ในการศึกษาจะใช้หลักการทางชลศาสตร์จำลองสภาวะน้ำหลากในรางเปิด โดยวางหัววัดจำนวน 2 หัววัดในรางน้ำเปิดจำลองที่ห่างกันเป็นระยะ 1 เมตร นำแผ่นกั้นทำคลื่นมาวาง ดังแสดงในรูปที่ 11 วัดระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปโดยเทคนิคที่นำเสนอแสดงผลผ่านเครื่องมือวัดเสมือน รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำที่วัดได้กับเวลากรณีจำลองสถานการณ์น้ำหลากเคลื่อนที่ผ่านหัววัดในช่วงเวลา 1 นาที รูปที่ 12a กรณีการคลื่นน้ำเคลื่อนที่ผ่านหัววัดตัวที่ 1 ก่อนไหลผ่านไปยังหัววัดตัวที่ 2 รูปที่ 12b แสดงกรณีจำลองสถานการณ์การเกิดน้ำขึ้น-น้ำลง โดยนำแผ่นพลาสติกมากั้นน้ำระหว่างหัววัดทั้งสองให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทำให้ระดับน้ำของหัววัดตัวที่ 2 เพิ่มขึ้นส่วนระดับน้ำของหัววัดตัวที่ 1 ลดลง



รูปที่ 11 การจัดวางอุปกรณ์กรณีน้ำเคลื่อนที่ผ่านหัววัด



a) กรณีคลื่นน้ำเคลื่อนที่กระทบหัววัดตัวที่ 1 และ 2



b) การทำให้เกิดคลื่นระหว่างหัววัดทั้งสอง

รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับเวลา

จากผลการทดลองค่าความไม่เป็นเชิงเส้นความสามารถในการทำซ้ำ และผลตอบสนองเวลา และราคา เปรียบเทียบระหว่างเทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกกับการวัดระดับน้ำแบบต่างๆ ได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบการวัดระดับแบบต่างๆ กับ เทคนิคความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

Sensor Types	Float sensor	Ultrasonic sensor	Semi-cylindrical Capacitive Probe
range (m)	1.1	30	0.35
Non-linearity(mm)	-	-	27
Accuracy (mm)	1.8	20	30
Hysteresis (mm)	-	-	19
Repeatability (mm)	-	-	6.5
Lag time(s)	-	8	0.2
Cost (\$)	485 - 606	1,600	20

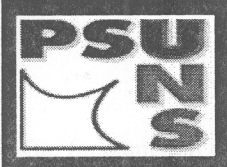
#### 4. สรุป

ในการศึกษาการวัดระดับน้ำโดยใช้เทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกพบว่าปริมาณความจุไฟฟ้าแปรผันตรงกับค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนไปและแปรผันผกผันกับระยะห่างของแผ่นโลหะ ค่าที่ได้อยู่ในช่วงพิโคฟารัด(pF) ได้ค่าความไม่เชิงเส้น 1.31 % FSO ความสามารถในการทำซ้ำ 1.02 % ค่าฮิสเตอรีซิส 6.04 % FSO สำหรับผลตอบสนองเชิงสถิติมีค่าความไม่แน่นอน 0.00218 โวลต์ ส่วนการศึกษาโดยใช้หลักการทางชลศาสตร์เพื่อจำลองสภาวะน้ำหลากในรางเปิด พบว่าให้ผลตอบสนองที่ดี ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้วัดระดับของเหลวที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันได้ พบว่า มีผลตอบสนองในช่วงเวลาที่ดีและมีราคาสำหรับสร้างถูกกว่าแบบต่างๆมาก

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- F. Reverter, X. Li and G. C. M. Meijer. (2007). Liquid – Level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor. *Sensors and Actuators*. Vol.138 ,1- 8.
- G. Nikolov and B.Nikolova.(2008).Virtual techniques for liquid level monitoring using differential pressure sensors. *RECENT*. Vol 9, No. 2(23), July.
- L.K. Baxter.(1997).Capacitive Sensors. Design and Applications, IEEE Press, New York.
- S.C. Bera, J.K. Ray, S. Chattopadhyay.(2006). A low-cost noncontact capacitance - type level transducer for a conducting liquid. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* Vol. 55, No. 3 , 778–786.
- S. E. Woodard, B. D. Taylor.(2007). A wireless fluid-level Measurement technique. *Sensors and Actuators* .Vol.137, 268- 278.
- Supagorn katathikarnkul, Booncharoen Wongkittisuksa, Pornchai Phukpattaranont and Kanadit Chetpattananondh (2009). Study of liquid level measurement using Semicylindrical capacitive probe, 7th PSU Engineering Conference, Prince of Songkla University, 21- 22 May. (In Thai).
- Supagorn katathikarnkul, Booncharoen Wongkittisuksa , Pornchai Phukpattaranont and Kanadit Chetpattananondh (2009). Semicylindrical capacitive transducer for liquid Level measurement, 32 nd Electrical Engineering Conference, Prachinburi, by Mahidol University 26- 30 Oct.(In Thai).

**บทความตีพิมพ์ในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ และ ระดับชาติ**



# A LOW-COST CAPACITIVE WATER LEVEL TRANSDUCER

**Kanadit Chetpattananondh, Booncharoen Wongkittisuksa  
and Pornchai Phukpattaranont**

Prince of Songkla University, Faculty of Engineering, Thailand

\*Authors to correspondence should be addressed via email: kanadit.c@psu.ac.th

**Abstract:** *A low-cost, repeatability, and linearity water level measurement technique using cylindrical capacitance is proposed with an explanation of experimental results. The sensor is in the form of a uniform hollow cylinder made of insulating material (like PVC, Teflon, etc.) which is covered with 5 segments of two hemi-cylindrical electrodes. The change in capacitance due to the change of liquid level inside an insulating hollow cylinder is detected by capacitance-controlled oscillator and a microcontroller. The sensor is able to measure absolute levels of liquid with 5 cm resolution over 1 m range.*

**Key Words:** *Capacitive sensor; Water level sensors; Liquid level measurement; Cylindrical capacitance*

## 1. INTRODUCTION

Water level in a river or a channel is one of the important variables that was required to be measured and control in any warning and monitoring system. The liquid properties [1-5] like buoyancy, pressure at a depth, relative electrical permittivity, electrical conductivity, thermal conductivity, absorption of radiation, liquid surface reflection of sound or light wave, etc., are related with the water level. These properties of liquid are used to design the different inferential types of liquid level transducers [1]-[3] such as float, displacer, pressure sensor, capacitance probe, partially immersed resistance wire probes, etc. Of these, the contact-type level-sensing probes [1], [2] like float, displacer, etc., have the disadvantage that their characteristic properties with liquid level may change due to the physical or chemical reaction between the liquid and the probe material, and hence, their life period may be limited. The non contact-type level-sensing probes [1], [3] like ultrasonic probe, absorption probe, etc., may have longer life period, and experimental precautions during the measurement.

Most present acoustic level gauges are based on the sound reflection phenomena, and operate in the ultrasound region [6]-[9]. The use of ultrasound is limited due to the problems of parasitic reflections

caused by the foams, residues, surface ripples, deposits, etc. However, there are some improvements that reduce those problems [7], [9]-[11]. For an acoustical gas resonance fluid level measurement [12] is not useful when measuring the level of sandy or grainy materials; and the system has relatively slow dynamic response.

Several optical fiber liquid-level sensors have been developed in the past few years [13]-[15]. For example, a liquid-level sensor with high precision but micrometer range based on the refractive-index sensitivity of long-period gratings [13]; a microbending optical fiber sensor with a resolution of 10 mm for meter range measurement [14]; an intensity modulation method using a pair of fibers to transmit the source light and receive the light partially reflected by the liquid surface through a glass prism, which is restricted by the fluctuation of source light power and the cleanness of prism surface [15]. And all of the above mentioned methods need temperature compensation for practical applications. Other optical fiber liquid level transducers [16-17] is the contact-type transducer, which produces optical pulses when the liquid level moves along the cladding and uncladding zones of the optical fiber. This transducer has the further advantage that it can be used with intrinsic safety in explosive or inflammable liquids. However, this type of measuring system is much costlier than the other similar instruments.

In this paper, a low-cost contact capacitance-type water level measuring technique has been designed and fabricated. The difference between the liquid and air dielectric constant of water is sufficient to be used as a basic for the measurement of water level. This technique can also be appropriate for water level monitoring in an open-channel or a river. The experiment is performed to sense water level in both increased level condition and decreased level condition. The experimental results are found to have good repeatability, linearity, and resolution.

## 2. PHYSICAL ASPECTS

The fundamental concept underlying the proportional capacitive water level sensor is the transduction of water level via the change in effective capacitance of an electrode pair resembling a parallel-plate capacitor. The capacitive water level-sensing probe in this work consists of a 1" outer diameter PVC pipe with 1 m length which is covered with 5 identical segments of two hemi-cylindrical aluminum electrodes as shown in Fig. 1a). The electrodes are shielded by 1½" outer diameter PVC pipe for water proof. The cross section of the level sensor in this work is shown in Fig. 1b). The water level inside  $\phi$  1" PVC pipe is taken as the dielectric of the cylindrical capacitor. When the water level is changed, the capacitances of this  $\phi$  1" PVC pipe also are changed. The equivalent circuit of the sensor is shown in Fig. 1c). The first segment ( $C_1$ ) of cylindrical capacitor is the reference capacitor which is immersed in water with 20 cm height. The other segments ( $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ , and  $C_5$ ) are used to detect water level range of 21-40 cm, 41-60 cm, 61-80 cm, and 81-100 cm, respectively.

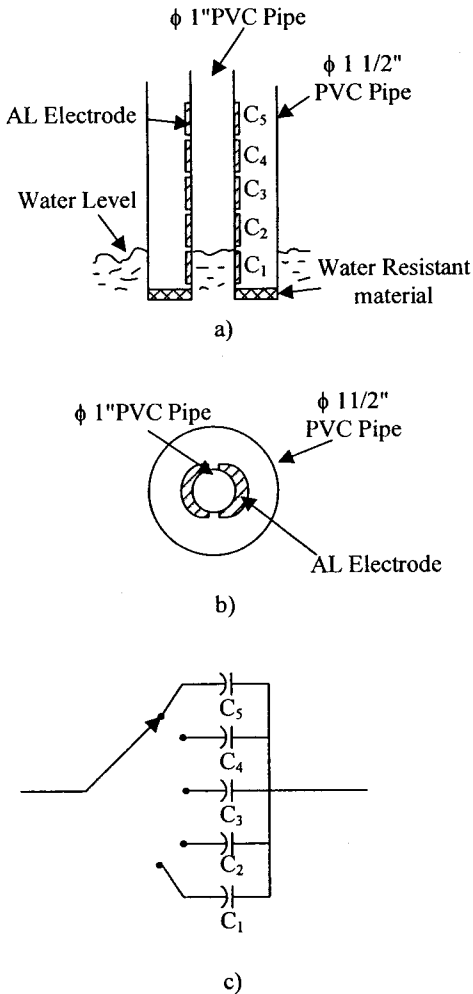


Fig.1 a) Physical aspects of cylindrical capacitive-type liquid level sensor in this works b) The cross section of the level sensor in this work c) The equivalent circuit of this sensor

For water level measurement, an RC oscillator (RCO) using an integrated circuit has been designed as shown in Fig.2 to measure each segment of cylindrical capacitance of the proposed level transducer in term of frequency.

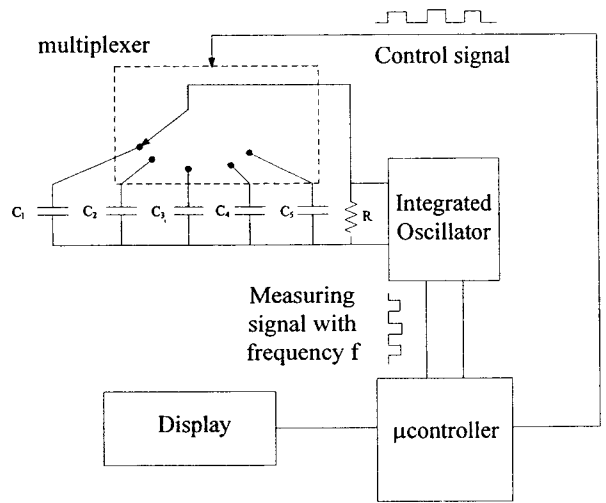


Fig.2 The instrumentation circuit for the measurement of each segment of cylindrical capacitance of the liquid level measurement

Microcontroller is used to control a selective switch to connect each segment of cylindrical capacitor and calculate the frequency of oscillator. Let the frequency of RCO that connected to the first segment ( $C_1$ ) be  $f_1$  and the other ones of oscillator connected to other segments ( $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ , and  $C_5$ ) is represented by  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$  and  $f_5$ , respectively. The step for measuring the level in each segment is illustrated as shown in Fig.3.

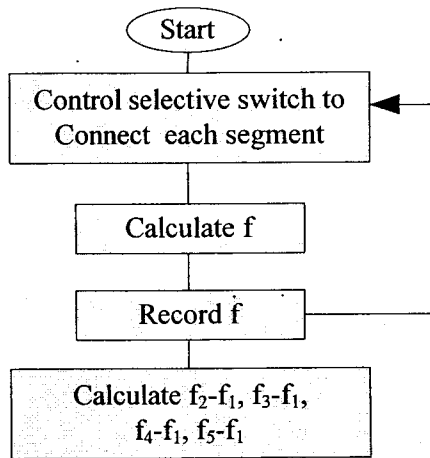


Fig.3 The flow chart of the level measurement

## 3. EXPERIMENTAL SETUP

This proposed level transducer was used to set up the water level measurement in "Increasing level" and "Decreasing level" condition of a channel with 1.5 m depth. Data was recorded in microcontroller, And hence, experimental result of the level measurement in term of

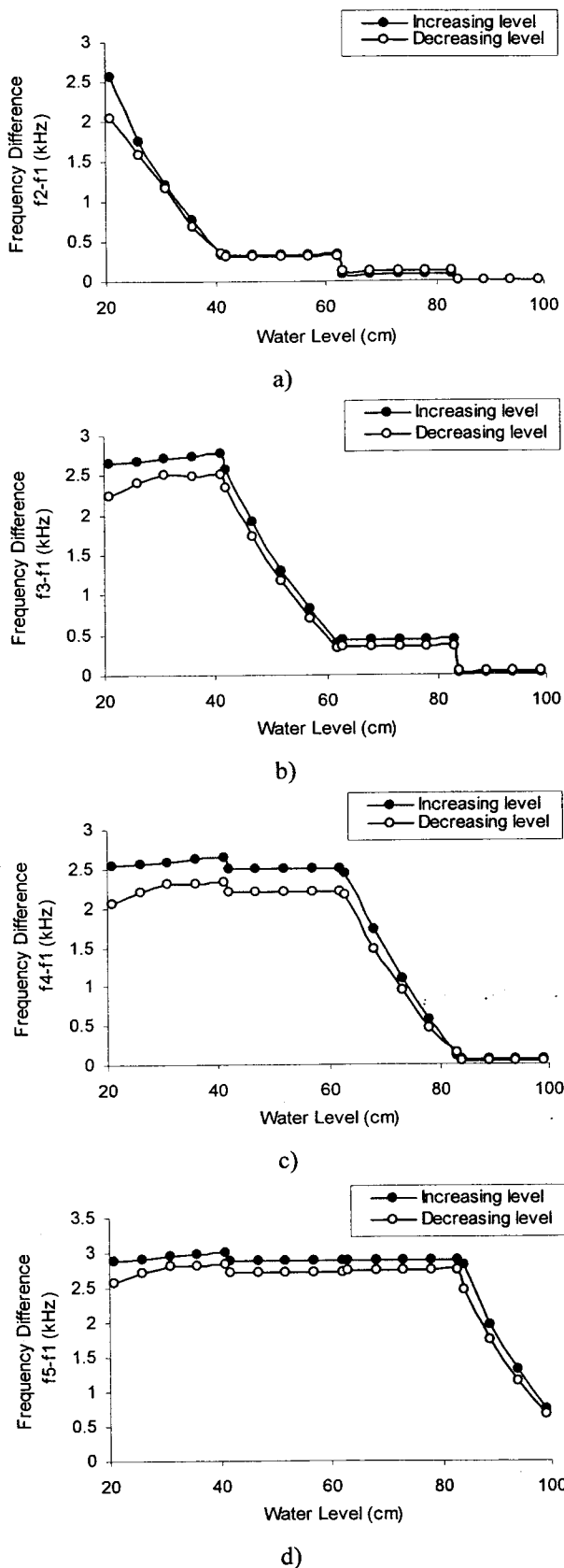


Fig.4 Experimental results of a) the difference of frequency of RCO connected to 2<sup>nd</sup> segment and 1<sup>st</sup> segment b) the difference of frequency of RCO connected to 3<sup>rd</sup> segment and 1<sup>st</sup> segment c) the difference of frequency of RCO connected to 4<sup>th</sup> segment and 1<sup>st</sup> segment d) the difference of frequency of RCO connected to 5<sup>th</sup> segment and 1<sup>st</sup> segment

the difference of frequency of RCO connected to each segments ( $f_2-f_1$ ,  $f_3-f_1$ ,  $f_4-f_1$ , and  $f_5-f_1$ ) for both of conditions was shown as Fig.4.

Fig. 4a) shows that frequency difference  $f_2-f_1$  was linearly related with water level in the range of 20-40 cm. However, when water level was over 40 cm the frequency difference  $f_2-f_1$  was nearly zero since capacitor  $C_2$  was below the water level. These results suggest that a sensing range of  $C_2$  was 20-40 cm.

From Fig. 4 b), the frequency difference  $f_3-f_1$  was nearly constant when the water level increased from 20 to 40 cm according to a dielectric constant inside a capacitor  $C_3$  was air because the water level was below capacitor  $C_3$ . With the water level of 40-60 cm the frequency difference  $f_3-f_1$  was linearly decreased and with the water level higher than 60 cm there was no change in the frequency difference  $f_3-f_1$  since a capacitor  $C_3$  was already below the water level. Therefore, the sensing range of  $C_3$  was 40-60 cm. Similarly, these results were also observed at higher water level as shown in Fig. 4 c) and Fig. 4 d).

For these results as shown in Fig.4, they were indicated that there were no significant deviations for both "Increasing level" and "Decreasing level" conditions as illustrated in Fig. 4. Therefore this level sensing probe proposed in this paper was appropriate to detect a tidal recorder. For water monitoring could also be carried out by this proposed technique.

#### 4. CONCLUSIONS

An effective capacitive water level transducer for the measurement range of 20-100 cm with 5 cm resolution has been proposed, designed and realized. Experimental results confirm that this capacitive water level transducer described in this paper has linear sensitivity (0.1 kHz/cm approximately) and good repeatability. In addition, this water level transducer can be used to detect the water level regardless of water condition. Since the measuring water level value is the frequency difference of a sensing capacitance compare to a reference capacitance, therefore the environmental condition of water is not complicated problem. The overall uncertainly in measurement of level with this developed water level sensing probe in both the short-term and long-term bases has been studied, keeping supply voltage, frequency, humidity and temperature constant, and further studies are needed to better the processing time of measuring water level in case of turbulent flow.

#### 5. REFERENCE

- [1] E. O. Doebelin, *Measurement System Application and Design*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [2] B. G. Liptak, *Process Measurement and Analysis*, 3rd ed. Oxford, U.K.: Butterworth Heinman, 1999.
- [3] D. M. Considine, *Process Instruments and Control Hand Book*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1974.
- [4] J. P. Bently, *Principles of Measurement Systems*, 3rd ed. Singapore: Longman Singapore Publishers (Pte) Ltd., 1995.

- [5] *Level Measurement*, p. 27, Dec. 1993. Control Instrum. (UK), Survey Directory.
- [6] B. Blitzer and U. Lamotte, "Ultrasonic sensors for an energy-saving system," *Sens. Actuators A, Phys.*, vol. 32, pp. 545–549, 1992.
- [7] S. Ros, J. M. M. Abreu, T. Freire, and L. Calderon, "Digital techniques improve range measurement with ultrasound sensor," *Sens. Actuators A, Phys.*, vol. 32, pp. 550–555, 1992.
- [8] W. Burda and W.-J. Becker, "Ultraschall-Resonanz-Messgerat fuer die Fluid-Prozessmesstechnik," *Technisches Messen*, vol. 60, pp. 375–382, 1993.
- [9] J. S. Haynes, "Tank sonic gauging system and methods," U.S. Patent 4 805 453, 1989.
- [10] C. E. Stapleton and J. T. Numata, "Ultrasonic liquid measuring device for use in storage tanks containing liquids having a nonuniform vapor density," U.S. Patent 5 085 077, 1992.
- [11] E. M. Gregory and T. B. Williams, "Sonic tank monitoring system," U.S. Patent 5 095 748, 1992.
- [12] D. Donlagic, M. Zavrsnik, and I. Sirotic, "The use of one-dimensional measurement resonator for fluid level measurements," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 49, no. 5, pp. 1095–1100, Oct. 2000.
- [13] S. Khaliq, S. W. James, and R. P. Tatam, "Fiber-optic liquid-level sensor using a long-period grating," *Opt. Lett.*, vol. 26, pp. 1224–1226, 2001.
- [14] S. F. Knowles, B. E. Jones, S. Purdy, and C. M. France, "Multiple microbending optical-fiber sensors for measurement of fuel quantity in aircraft fuel tanks," *Sens. Actuators A*, vol. 68, pp. 230–323, 1998.
- [15] C. N. Yang, S. P. Chen, and G. G. Yang, "Fiber optic liquid level sensor under cryogenic environment," *Sens. Actuators A*, vol. 94, pp. 69–75, 2001.
- [16] G. Betta, A. Pietrosanto, and A. Scaglione, "A Gray code based fiber optic liquid level transducer," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 47, no. 1, pp. 174–178, Feb. 1998.
- [17] G. Betta, A. Pietrosanto, A. Scaglione, "Microcontroller-based performance enhancement of an optical fiber level transducer," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 47, no. 2, pp. 489–493, Apr. 1998.

## การศึกษาห้วงวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก เพื่อวัดระดับของของเหลว

### STUDY OF LIQUID LEVEL MEASUREMENT USING SEMICYLINDRICAL CAPACITIVE PROBE

ศุภกร กตาทิการกุล<sup>1</sup> บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา พรชัย พุทธรักษ์ภัทรานนท์ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

<sup>1</sup>E-mail: supagone@hotmail.com

Supakorn katathikamkul<sup>1</sup> Boonchareon wongkittisuksa Pornchai phukpattaranont  
and Kanadit chetpattananondh

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90112

<sup>1</sup>E-mail: supagone@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาคุณลักษณะการวัดระดับของของเหลวโดยใช้รูปแบบของห้วงวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก โดยรูปแบบของห้วงเป็นแบบกึ่งทรงกระบอกกลวงทำจากวัสดุที่เป็นฉนวน (PVC, Teflon เป็นต้น) เมื่อขั้วไฟฟ้าของแผ่นกึ่งทรงกระบอกทำจากอลูมิเนียม ค่าความจุไฟฟ้าของห้วงจะวัดด้วยเครื่องมือวัด LCR และได้ทำการทดลองวัดความจุไฟฟ้าตั้งแต่ระดับน้ำค่า 1 ถึง 30 เซนติเมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 เซนติเมตร และทดลองซ้ำ 10 ครั้ง ผลของปริมาณความจุไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนไปโดยค่าที่ได้อยู่ในช่วงพิโคฟารัด (pF) และได้ผลค่าความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ในช่วง 1.31 % ค่าความสามารถในการทำซ้ำอยู่ในช่วง 1.02 % และค่าฮิสเทอรีซิส 6.04 % ผลที่ได้จากเครื่องมือพบว่ามีการทำซ้ำอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้

คำหลัก : การวัดระดับของเหลว , ห้วงวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก , ความจุไฟฟ้า

#### Abstract

This paper presents a study for static characteristics of a liquid-level measurement technique based on a semicylindrical capacitive probe. The probe consists of a uniform hollow cylinder made of insulating material (like PVC, Teflon, etc.), which is covered with a segment of two semicylindrical aluminum electrodes. The pF-range capacitive variation of this probe due to the change of liquid level inside an insulating hollow cylinder was measured by LCR meter. This probe was able to measure absolute levels of liquid with 1.0 cm resolution over 30 cm range with 1.31 %FSO non-linearity, range with 1.02 % repeatability and 6.04 %FSO hysteresis error. For each of the 30 measuring values of liquid level in the experiments, 10 replication tests were performed in order to ascertain reliability of the probe under identical conditions. These experimental results are found to have good repeatability within acceptable limits.

**Key Words:** Liquid level measurement , Semicylindrical capacitive probe , Capacitance

## 1. บทนำ

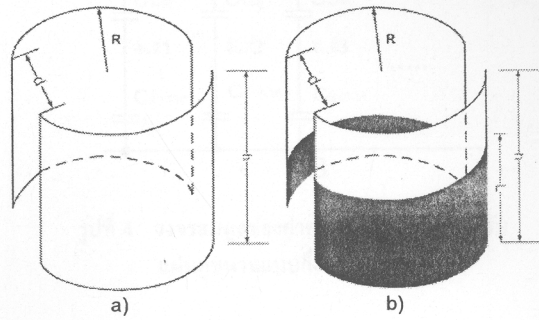
ปัจจุบันการตรวจวัดระดับของเหลวได้เข้ามาเกี่ยวข้องกับการดำรงชีวิตประจำวันและในงานทางด้านอุตสาหกรรมที่มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตหลาย ๆ อย่าง เช่น การวัดระดับน้ำในถังเก็บน้ำ การวัดระดับน้ำในแม่น้ำ การวัดระดับของน้ำมันที่ก้นถัง เป็นต้น จากการศึกษาเทคนิคที่ใช้ตรวจวัดระดับของเหลวหลายๆ ประเภท ไม่ว่าจะเป็นอาทิเช่น การใช้เทคนิค Acoustical gas resonator[1] เทคนิคของเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber-optic) เทคนิคการใช้แขนกลขนาดเล็ก (Cantilever Beam)[2] เทคนิคการใช้ LEDs และ phototransistors [3] เทคนิคใช้ความจุไฟฟ้าโดยการวัดแบบหัววัดไม่สัมผัสน้ำ [4] หรือใช้หลักการวัดความจุไฟฟ้าโดยการต่อกรวดกับขั้วไฟฟ้า[5] พบว่าการใช้เทคนิคด้านต่างๆ มาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์จะมีข้อจำกัดบางอย่างในการวัด เทคนิคการสร้างการวัดที่ยู่งยากและยังมีราคาสูง

ดังนั้นจากการศึกษาวิธีตรวจวัดระดับของเหลวที่อาศัยหลักการหาค่าความจุไฟฟ้า สามารถที่จะลดปัญหาด้านเทคนิคการสร้าง ข้อจำกัดทางด้านราคา หรือข้อจำกัดทางด้านกรวดหลักการของเซนเซอร์ที่วัดค่าความจุไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับชนิดของของเหลวที่เป็นของเหลวที่นำไฟฟ้า และของเหลวที่ไม่นำไฟฟ้า[4] หลักการนี้ทำให้ได้เซนเซอร์ที่ใช้วัดระดับของเหลวสามารถแบ่งประเภทออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ Floating Capacitive Sensors สำหรับใช้วัดของเหลวที่ไม่นำไฟฟ้า คือ จะไม่มีขั้วไฟฟ้าขั้วใดขั้วหนึ่งต่อลงดิน และ Grounded Capacitive Sensors จะใช้ขั้วของเหลวที่นำไฟฟ้า คือ จะมีขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งต่อลงดิน เพื่อป้องกันการลัดวงจร จากหลักการทั้งสองเมื่อระดับของเหลวเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตาม ในปัจจุบันมีการศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นแบบรูปแผ่นคู่ขนานหรือรูปทรงกระบอก

งานวิจัยนี้จึงเสนอการศึกษาคุณลักษณะการวัดระดับของเหลวโดยใช้รูปแบบของหัววัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกเทคนิคการวัดระดับของเหลวที่สามารถวัดของเหลวได้ทั้งสองแบบโดยใช้ลักษณะของเซนเซอร์เป็นแบบกึ่งทรงกระบอกซึ่งเป็นเทคนิคที่นำมาประยุกต์ใช้สำหรับวัดระดับของเหลวที่ยังไม่ได้มีการศึกษามาก่อน และยังมีข้อดีคือการติดตั้งที่ไม่ยุ่งยาก มีความละเอียดดี และมีผลตอบสนองเป็นเชิงเส้น

## 2. รูปแบบของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้า

ลักษณะของเซนเซอร์สำหรับวัดระดับของเหลวที่อาศัยเทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกแสดงได้ โดยรูปแบบของหัววัดมีท่อทรงกระบอกกลางที่หุ้มจากวัสดุที่เป็นฉนวนอย่างเช่น PVC, Teflon เป็นต้น และมีอิเล็กโทรดที่เป็นแผ่นกึ่งทรงกระบอกจะทำจากอลูมิเนียมมาห่อหุ้มท่อทรงกระบอก สำหรับการวิเคราะห์ค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกในกรณีที่โครงสร้างเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกเมื่อไม่มีของเหลวเป็นไดอิเล็กตริก แสดงดังรูปที่ (1)



รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของหัววัด

a) กรณีไดอิเล็กตริกเป็นอากาศ

b) กรณีไดอิเล็กตริกเป็นอากาศและน้ำ

จากมุมมองด้านบนของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกเมื่อไม่มีของเหลวเป็น ไดอิเล็กตริก แผ่นโลหะทั้งสองของแบบกึ่งทรงกระบอกจะมีรัศมีเท่ากับ  $R$  และมีช่องว่างน้อยที่สุดเท่ากับ  $d$  และมีความหนาของวัสดุที่ใช้ติดแผ่นโลหะเท่ากับ  $d$  ดังนั้นการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกจะประยุกต์โดยใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข[6]

โครงสร้างของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกที่ใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะแสดงในรูปที่ (2) โดยแบ่งแผ่นโลหะ 2 แผ่นที่อยู่ในรูปกึ่งทรงกระบอกของตัวเก็บประจุให้เป็นจำนวน  $n$  แผ่นซึ่งมีระยะห่างระหว่างแผ่นเพิ่มขึ้นเป็น  $\Delta d$  สมการวิเคราะห์หาค่าความจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะ 2 แผ่นเล็กๆที่มีระยะห่างกันประมาณ  $d$  และมีพื้นที่เล็กๆ  $A$  แสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$C = \int_0^a dc = \int_0^a \frac{\epsilon_0 \cdot a \cdot dx}{d + x\theta} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_1 \cdot A}{d} \left[ 1 - \frac{a\theta}{d} \right] \quad (1)$$

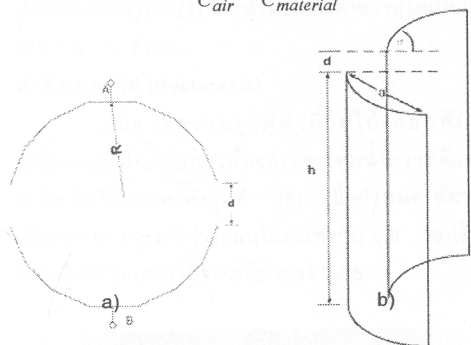
ถ้าคิดเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกมีขนาดใหญ่มาก ( $d \gg \theta$ ) ความจุไฟฟ้า สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$C \cong \left[ \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 A}{d} \right] \quad (2)$$

ดังนั้นค่าระยะห่างระหว่าง  $d$  ของแผ่นโลหะทั้งสองที่น้อยที่สุดจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการใช้หาค่าอนุวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

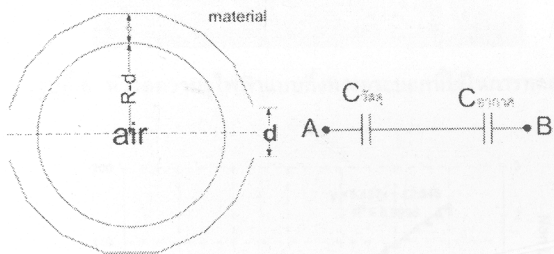
สำหรับแผ่นคู่ขนานเล็กๆสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าได้โดยเปรียบเทียบมีค่าความจุไฟฟ้าระหว่างตำแหน่ง A และ B ที่เกิดจากค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้ทำท่อ และค่าไดอิเล็กตริกภายในท่อซึ่งในที่นี้คือ อากาศ โดยแสดงในรูปวงจรมูลของค่าความจุไฟฟ้าที่ต่ออนุกรมกันดังที่แสดงในรูปที่ (3) โดยใช้สมการที่ (3) สามารถหาผลรวมของความจุไฟฟ้าจากแผ่นคู่ขนานแบบกึ่งทรงกระบอกจำนวน  $n$  แผ่นเล็กๆที่แสดงในรูปวงจรมูลของค่าความจุไฟฟ้าดังในรูปที่ (4)

$$C = \left( \frac{1}{C_{air}} + \frac{1}{C_{material}} \right) \quad (3)$$



รูปที่ 2 รูปแบบสำหรับการวิเคราะห์  
a) มุมมองด้านบน b) โครงสร้างในการคำนวณ

จากสมการพบว่าเมื่อกำหนดให้ค่าระยะห่างของแผ่นโลหะมีค่าคงที่ ค่าความจุไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดความสูงของหัววัด



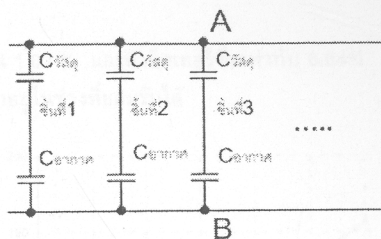
รูปที่ 3 วงจรสมมูลของค่าความจุไฟฟ้าเล็กๆสำหรับแผ่นคู่ขนานแบบกึ่งทรงกระบอก

ในกรณีที่มีไดอิเล็กทริกเป็นอากาศกับของเหลว โครงสร้างเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก แสดงดังรูปที่ (5a) พบว่าค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดจะแบ่งเป็นความจุไฟฟ้าที่ได้จากของเหลวรวมกับความจุไฟฟ้าที่เป็นอากาศ นั่นคือความจุไฟฟ้าของทั้งสองต่อกันแบบขนาน โดยกรณีไดอิเล็กทริกเป็นของอากาศจะมีขนาดความสูงเท่ากับ  $h-L$  และส่วนไดอิเล็กทริกที่เป็นของเหลวมีขนาดความสูงเป็น  $L$  คำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าได้จากสมการดังนี้

$$C = C_{liquid} + C_{air} \quad (4)$$

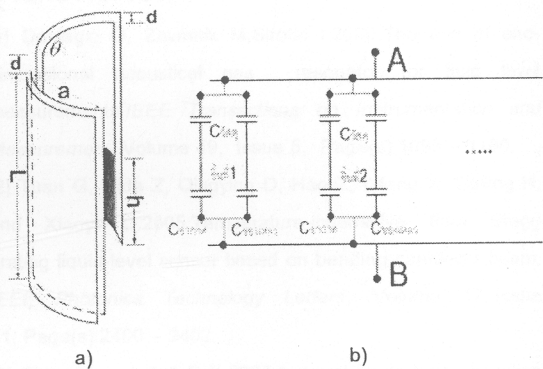
แต่วัสดุที่ใช้ทำหัววัดมีค่าไดอิเล็กทริกด้วย ดังนั้นต้องคิดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุด้วย แสดงการต่อกันดังวงจรสมมูลที่แสดงในรูปที่ (5b) สามารถหาค่าความจุไฟฟ้ารวมได้เป็น

$$C = \left( \frac{1}{C_{liquid}} + \frac{1}{C_{material}} \right) + \left( \frac{1}{C_{air}} + \frac{1}{C_{material}} \right) \quad (5)$$



รูปที่ 4 วงจรสมมูลของค่าความจุไฟฟ้ารวมสำหรับแผ่นคู่ขนานแบบกึ่งทรงกระบอก

เมื่อ  $\epsilon_0$  เป็นค่า permittivity of free space ( $8.85 pF/m$ )  $\epsilon_{material}$  เป็นค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุ  $\epsilon_{air}$  เป็นค่าไดอิเล็กทริกของอากาศ  $\epsilon_{liquid}$  เป็นค่าไดอิเล็กทริกของของเหลว  $n$  เป็นจำนวนของแผ่นโลหะที่ถูกแบ่งย่อยในการคำนวณ  $d$  เป็นค่าช่องว่างน้อยที่สุดระหว่างแผ่นโลหะ  $\Delta d$  เป็นค่าระยะห่างที่เพิ่มขึ้นของช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง และ  $A$  เป็นพื้นที่ของแผ่นโลหะ



รูปที่ 5 โครงสร้างกรณีมีน้ำเป็นไดอิเล็กทริก  
a) โครงสร้างในการคำนวณแผ่นโลหะ  
b) วงจรสมมูลของค่าความจุไฟฟ้ารวม

### 3. ผลการวิจัย

ผลการทดลองโดยใช้หัววัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกที่สร้างขึ้นมาด้วยเครื่องมือวัด LCR รุ่น Agilent 4284A แสดงดังรูปที่ (6) เมื่อแผ่นโลหะนำไฟฟ้าทำจากวัสดุท่อ PVC เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.3 เซนติเมตร ติดด้วยแผ่นอลูมิเนียมขนาดความยาวของแผ่นโลหะเท่ากับ 30 เซนติเมตรและวางห่างกันเป็นระยะ 5.0 เซนติเมตร

#### ค่าความสามารถในการทำซ้ำ(Repeatability)

วัดความจุไฟฟ้าของหัววัด ตั้งแต่ระดับน้ำค่า 1 ถึง 30 เซนติเมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 เซนติเมตร และทดลองซ้ำ 10 ครั้ง จะได้ค่าความสามารถในการทำซ้ำ เมื่อระยะห่างของแผ่นโลหะ 5.0 เซนติเมตร จะได้ค่าความสามารถในการทำซ้ำ 1.02 %

#### ค่าความเป็นเชิงเส้น(Linearity)

วัดความจุไฟฟ้าของหัววัดค่าที่ได้จะแปรผันตรงกับค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนไปโดยค่าความจุไฟฟ้าอยู่ในช่วงพิโคฟารัด(pF)

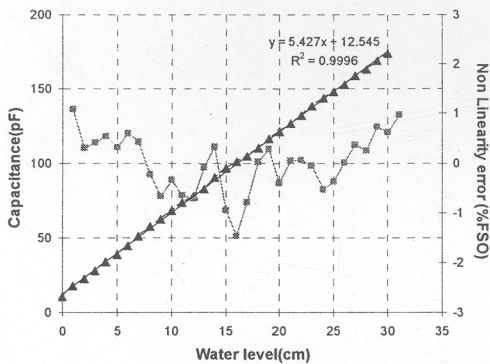
เมื่อระยะห่างของแผ่นโลหะ 5.0 เซนติเมตร แสดงคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นดังรูปที่ (7) และคำนวณผลค่าความไม่เป็นเชิงเส้นได้ค่าเป็น 1.31 % FSO

**ค่าฮีสเทอรีซิส (Hysteresis)**

เมื่อวัดความจุไฟฟ้าที่วัดได้เทียบกับระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงในลักษณะเพิ่มและลดระดับน้ำความสัมพันธ์ระหว่างค่าฮีสเทอรีซิสแสดงดังรูปที่ (8) เมื่อกำหนดให้ค่าความถี่คงที่เมื่อค่าระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะเท่ากับ 5.0 เซนติเมตร จากกราฟได้ค่าฮีสเทอรีซิสเท่ากับ 6.04 %FSO



รูปที่ 6 หัววัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกที่ใช้ในการทดลอง

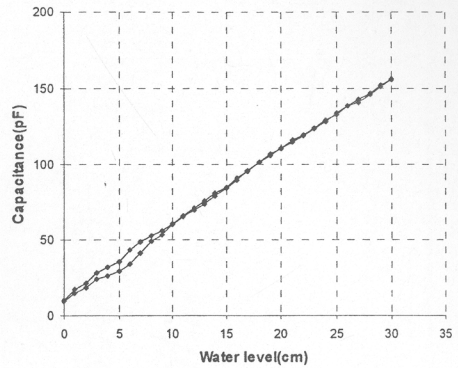


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและค่าผิดพลาดเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นกับระดับน้ำ เมื่อระยะห่างของแผ่นโลหะ 5 cm

**4. สรุปผลการวิจัย**

จากผลการใช้หัววัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำ โดยทำการวัดด้วยเครื่อง LCR และได้ทำการทดลองวัดระดับน้ำตั้งแต่ระยะ 1 ถึง 30 เซนติเมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 เซนติเมตร ในแต่ละครั้งทดลองซ้ำ 10 ครั้ง ค่าที่ได้จะแปรผันตรงกับค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนไปโดยค่าความจุไฟฟ้าอยู่ในช่วงพิโคฟารัด (pF) เมื่อระยะห่างของแผ่นโลหะเป็น 5.0 เซนติเมตร ได้ผลค่าความไม่เป็นเชิงเส้นได้ค่าเป็น 1.31 % FSO ค่าความสามารถในการทำซ้ำ

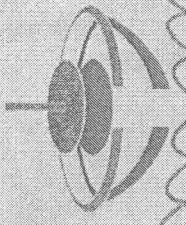
ได้ค่าเป็น 1.02 % และค่าฮีสเทอรีซิสเท่ากับ 6.04% ค่าที่ได้ของการทำซ้ำอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของ Hysteresis ของค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำ เมื่อระยะห่างของแผ่นโลหะ 5.0 cm

**5. เอกสารอ้างอิง**

- [1] Donlagic D, Zavrnsnik M, Sirotic I. 2000. The use of one-dimensional acoustical gas resonator for fluid level measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Volume 49, Issue 5, Page(s):1095 – 1100.
- [2] Tuan G, Qida Z, Qingying D, Hao Z, Lifang X, Guiling H, and Xiaoyi D. 2005. Temperature-insensitive fiber Bragg grating liquid-level sensor based on bending cantilever beam. *IEEE Photonics Technology Letters*, Volume 17, Issue 11, Page(s):2400 – 2402.
- [3] Eldar M and Sait E K. 2003. A novel liquid level detection method and its implementation. *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 109, Issue 1, Page(s):21-24.
- [4] Bera S C, Ray J K and Chattopadhyay S. 2006. A low-cost noncontact capacitance-type level transducer for a conducting liquid. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Volume 55, Issue 3, Page(s):778 – 786.
- [5] Ferren Reverter, Xiujun Li and Gerard C.M. Meijer. 2007. Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor. *ScienceDirect Sensors and Actuators A* 138, Page(s):1-8.
- [6] Cheng-Ta Chiang and Yu-Chung Huang. 2006. A Semicylindrical Capacitive Sensor With Interface Circuit Used for Flow Rate Measurement. *IEEE SENSORS JOURNAL*, Volume 6, NO. 6.
- [7] L. K. Baxter. 1997. *Capacitive Sensors Design and Applications*. New York : IEEE Press.



คณะสัตวบาล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
 ขอมอบเกียรติบัตรฉบับนี้ให้ไว้เพื่อแสดงอา

วรณ์ ใช้สอนแถม วัสดุอุปกรณ์ ของกักตักศึกษา

และผลิตชนิดถัก เข็มพัฒนาชนบท

ได้รับรางวัลดีเด่น ระดับภาคสามใต้

ประเภท การวิจัยประยุกต์

จากบทความเรื่อง เทคนิคการวัดระดับน้ำที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์

ในการประชุมวิชาการทางสัตวบาล ครั้งที่ 7

วันที่ 21 - 22 พฤษภาคม 2552

(รศ.ดร.สุทัศน์ คุ้มฤๅณ)

คณบดีคณะสัตวบาล

## เทคนิคการวัดระดับน้ำที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชี้หวี

### Water Level Measurement Technique based on Interdigital Electrode

วรสิน เยื่อนรัมย์\* บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา คณดิด เจษฎ์พัฒนานนท์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ. สงขลา 90112

E-mail: Vorasinjoe@hotmail.com

Vorasin Yuanyam\* Boonchareon Wongkittisuksa and Kanadit Chelpattanondh

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90112

E-mail: Vorasinjoe@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอเทคนิคการวัดระดับน้ำด้วยการประยุกต์ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชี้หวี โดยนำขั้วอิเล็กโทรดชี้หวีไปจุ่มน้ำเมื่อระดับน้ำเปลี่ยนไปค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดภายในเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยแล้วแปลงออกมาในรูปแรงดัน ส่งผ่านไปแสดงผลยังคอมพิวเตอร์ทางพอร์ตอนุกรม (RS232) สำหรับผลการทดลองพบว่าความเป็นเชิงเส้นมีค่าความคลาดเคลื่อน เป็น 1.42%FSO และมีค่าคลาดเคลื่อนฮิสเทอรีซิสเป็น 3.87 %FSO

คำสำคัญ ขั้วอิเล็กโทรดชี้หวี, เครื่องวัดระดับน้ำ, เซนเซอร์ความจุไฟฟ้า

#### Abstract

This paper is proposed an application of Interdigital Electrode for water level measurement. The electrode was immersed in water as liquid level was changed, a capacitance of electrode was changed as well. The change of capacitance due to the change of liquid level was converted to the voltage by a bridge circuit with microcontroller. The output was transmitted to the computer display with series port (RS 232). The experiment results found that the non-linearity error was 1.42 %FSO and the hysteresis error was 3.87 %FSO

**Key Words:** Interdigital Electrode, Water Level Measurement, Capacitive Sensor

#### 1. บทนำ

ปัญหาการวัดระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของชีวิตประจำวันได้ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อระดับน้ำเปลี่ยนแปลงแล้วส่งผลกระทบต่อการระบายน้ำจากตัวเมืองผ่านแม่น้ำลงสู่ทะเล ซึ่งได้ประสบปัญหาอุทกภัยเกิดขึ้นซึ่งส่งผลเสียหายต่อชีวิตและเศรษฐกิจ รวมทั้งยังส่งผลให้ปริมาณน้ำกร่อยบริเวณปากแม่น้ำและกระทบต่อระบบนิเวศพื้นบ้านอีกด้วย การระวังภัยก็ต้องมีเครื่องมือเพื่อตรวจวัดและเตือนภัย ที่ผ่านมามีการสร้างเครื่องวัดระดับของเหลวด้วยหลากหลายวิธี อาทิเช่น โดยวิธีการใช้คลื่นอัลตราโซนิก[1],[2] เทคนิคของเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber-optic) [3],[4] จากข้างต้นยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น วัสดุการผลิต ราคา ความซับซ้อน

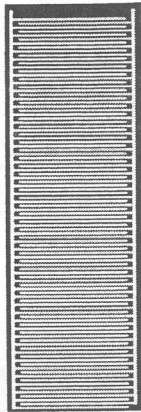
เพื่อลดความเสียหายทั้งชีวิตและทรัพย์สินจากอุทกภัย และการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ และออกแบบเครื่องวัดระดับน้ำในคลองเปิด โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดชี้หวี ทำให้ชีวิตความเป็นอยู่ของประชาชนดีขึ้น โดยเครื่องวัดระดับน้ำที่สร้างขึ้น มีความเป็นเชิงเส้นที่ดี มีความน่าเชื่อถือ มีราคาถูกและสามารถหาวัสดุได้ในประเทศ

#### 2. หลักการทำงานและการออกแบบ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การออกแบบและสร้างหัววัดอิเล็กโทรดชี้หวีที่ใช้วัดระดับน้ำเป็นหลักแล้วจึงส่งค่าที่ได้ไปแสดงผลยังจอคอมพิวเตอร์ ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลและส่งค่าผ่านทางพอร์ตอนุกรม (RS232) เพื่อนำไปวิเคราะห์และประมวลผลเพื่อประโยชน์ด้านต่างๆ เช่นการวิเคราะห์ระดับน้ำเพื่อป้องกันน้ำหลาก เป็นต้น

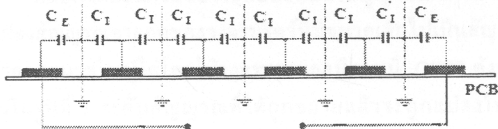
2.1 ลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์หวี

ลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์หวีได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 เป็นแผ่นพิมพ์ลายวงจรที่กัดเป็นลายซี่หวี โดยอาศัยหลักการของการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าระหว่างซี่หวีเมื่อระดับสารไดอิเล็กทริกที่เกาะบนอิเล็กทรอนิกส์เปลี่ยนไป สำหรับสารไดอิเล็กทริกในที่นี้คือน้ำ และอากาศ เมื่อระดับน้ำเพิ่มขึ้นคือไดอิเล็กทริกในส่วนของน้ำก็จะไปแทนพื้นที่ที่เป็นอากาศอยู่เดิม ค่าความจุทางไฟฟ้าก็เปลี่ยนไป โดยมีความสัมพันธ์คือ เมื่อระดับน้ำเพิ่มมากขึ้นค่าความจุก็เพิ่มขึ้น



รูปที่ 1 ลาย PCB ของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์หวี

โดยค่าความจุทางไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์หวีถูกมองเป็นตัวเก็บประจุหลายตัวนำมาต่อขนานกัน ดังที่แสดงไว้ในลักษณะของวงจรมุมในรูปที่ 2



รูปที่ 2 รูปแสดงวงจรมุมค่าความจุของอิเล็กทรอนิกส์หวีพิจารณาค่าความจุทางไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการ ที่ (1) โดยค่า  $C_E$  กับ  $C_I$  เป็นค่าความจุไฟฟ้าระหว่างลายซี่หวีที่อยู่ด้านนอก และด้านในตามลำดับ ค่าความจุไฟฟ้ารวมหาได้จาก

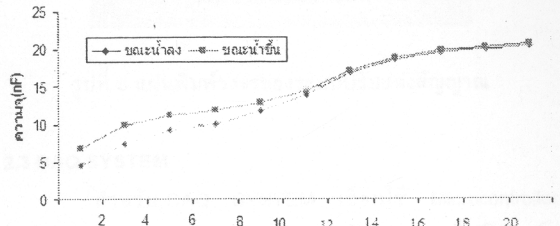
$$C = (n - 3) \frac{C_I}{2} + 2 \frac{C_E C_I}{C_E + C_I}, n > 3 \quad (1)$$

และค่าความจุทางไฟฟ้าที่วัดได้จากอิเล็กทรอนิกส์หวีเกิดจากผลรวมของค่าความจุส่วนที่จมน้ำ และส่วนที่อยู่ในอากาศดังสมการที่ 2

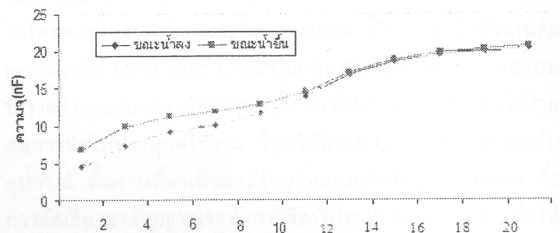
$$C_x = C_w + C_a \quad (2)$$

- $C_x$  = ค่าความจุไฟฟ้ารวมที่วัดได้
- $C_w$  = ค่าความจุไฟฟ้ารวมของส่วนที่จมน้ำ
- $C_a$  = ค่าความจุไฟฟ้ารวมที่ลอยอยู่ในอากาศ

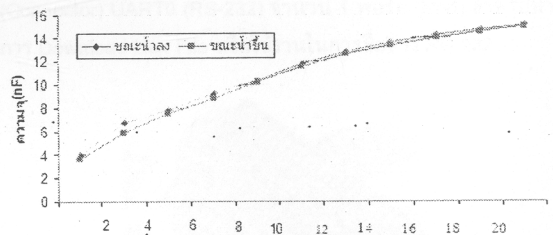
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์หวีที่มีขนาดความกว้างต่างกัน(ขนาด 1 นิ้ว, 2 นิ้ว, และ 3 นิ้ว) และระดับน้ำขณะที่น้ำขึ้น และลงตามลำดับ ได้แสดงดังรูปที่ 3-4 (สำหรับการทดลองนี้ใช้เครื่องมือวัด LCR รุ่น Agilent 4284A วัดค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์หวี)



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของค่า C ต่อระดับน้ำของอิเล็กทรอนิกส์หวี 1 นิ้ว



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของค่า C ต่อระดับน้ำของอิเล็กทรอนิกส์หวี 2 นิ้ว



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของค่า C ต่อระดับน้ำของอิเล็กทรอนิกส์หวี 3 นิ้ว

จากผลการทดลองพบว่าขนาดอิเล็กทรอนิกส์หวีมีผลต่อความไวของเครื่องมือวัดโดยที่อิเล็กทรอนิกส์หวีที่มีขนาด 3 นิ้ว มีค่าความไวเชิงเส้นมากกว่า และมีค่าคลาดเคลื่อนฮิสเทอรีซิสต่ำกว่านั้นคือ 3.87%FSO ดังนั้นในการพัฒนาครั้งนี้จึงเลือกอิเล็กทรอนิกส์หวีที่มีขนาด 3 นิ้ว

2.2 วงจรปรับแต่งสัญญาณ

สำหรับในรายละเอียดของวงจรปรับแต่งสัญญาณได้ประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์แบบ De' Sauty [5] พร้อมวงจรมอดูเลชันที่แสดงไว้ในรูปที่ 6 จากวงจรในรูปที่ 6 ออปแอมป์ตัวที่ 1 ทำให้จุด B และจุด D เป็นกราวด์เสมือน และ ออปแอมป์ตัวที่ 2 ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ โดยการจ่ายแรงดัน V (4.5 V) ให้กับบริดจ์ด้วยความถี่คงที่ f (1 kHz) กระแสที่ไหลในกิ่ง AB, AD, BC, and CD เป็นดังนี้

$$I_1 = jVC_1\omega \quad (3)$$

$$I_2 = jVC_x\omega \tag{4}$$

$$I_3 = V_1 / R_1 \tag{5}$$

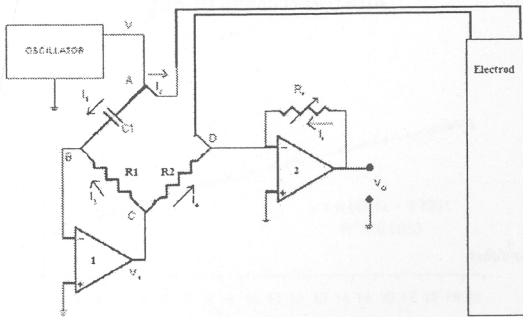
$$I_4 = V_1 / R_2 \tag{6}$$

$$I_f = V_o / R_f \tag{7}$$

$$I_3 + I_1 = 0 \tag{8}$$

$$V_1 = jVC_x\omega R_1 \tag{9}$$

$$I_4 + I_2 + I_f = 0 \tag{10}$$

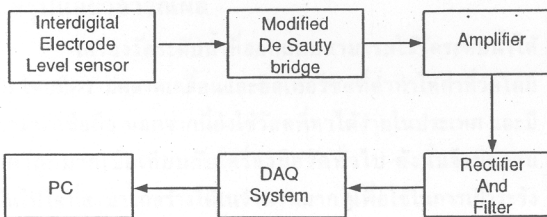


รูปที่ 6 วงจรปรับแต่งที่ใช้งาน

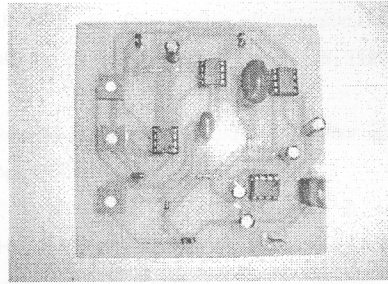
เมื่อระดับน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความจุทางไฟฟ้าก็เปลี่ยนแปลงเท่ากับ  $dC_x$  จะได้แรงดันต้านออก  $V_o$  ดังสมการที่ 11

$$V_o = j\omega R_f V dC_x \tag{11}$$

บล็อกไดอะแกรมของระบบปรับแต่งสัญญาณสำหรับในการแปลงสัญญาณขาออกของวงจรบริดจ์ที่มีขนาดเล็กไปเป็นสัญญาณขาออกขนาดใหญ่ได้โดยใช่วงจรขยายออปิแอมป์ OP07 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7 ระดับสัญญาณที่ได้ถูกขยายแล้วจะถูกแปลงไปเป็นระดับสัญญาณกระแสตรงด้วยวงจรกรองเรียงกระแส (Rectifier and filter) หลังจากนั้นระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้แปลงแล้วก็จะถูกส่งไปยังช่องขาเข้าของระบบ DAQ ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์สำหรับแสดงผลต่อไป และแผ่นพิมพ์วงจรของระบบปรับแต่งสัญญาณดังที่ได้กล่าวข้างต้นแสดงได้ดังในรูปที่ 8



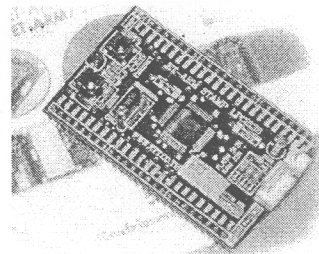
รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมของระบบปรับแต่งสัญญาณ



รูปที่ 8 แผ่นพิมพ์วงจรของระบบปรับแต่งสัญญาณ

### 2.3 DAQ SYSTEM

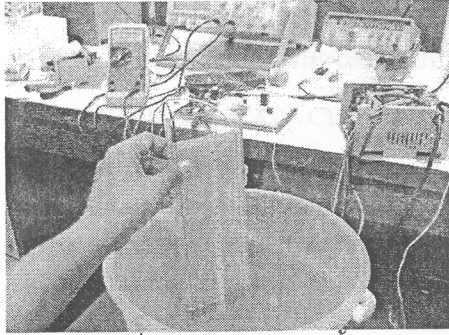
สำหรับ DAQ SYSTEM เลือกใช้ Microcontroller ARM-7 STAMP LPC2138 ซึ่งแสดงดังรูป 9 ซึ่งเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูลARM7TDMI-S Core เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 16/32บิต ขนาด64 ขา แบบใช้พลังงานต่ำ และเลือกใช้ MCU เบอร์ LPC2138 ของPhilips โดยการออกแบบโครงสร้างของบอร์ดเน้นการจัดวางบอร์ดให้มีขนาดเล็กเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยได้นำMCU มาจัดวางร่วมกับอุปกรณ์ พื้นฐานที่จำเป็นและจัดขาออกมาให้ใช้งานภายนอก ซึ่งการจัดเรียงขาสัญญาณจะทำการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบเพื่อให้สามารถต่อใช้งานได้โดยสะดวกตัวบอร์ดใช้ไฟ +3.3 โวลต์ สามารถรองรับ I/O ที่เป็นสัญญาณ 5 โวลต์ ได้ ตัวบอร์ดมีชุดเชื่อมต่อ (Connector) UART0 (RS-232) จำนวน 1 พอร์ต (Port) สำหรับทำการ Download Hex File หรือใช้งานในการสื่อสาร RS-232



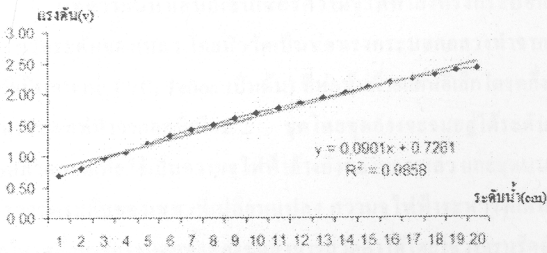
รูปที่ 9 ARM 7

### 3. การทดลองและผลการทดลอง

สำหรับในการทดสอบระบบในที่นี่ได้ทำการทดลองวัดระดับน้ำในถังระหว่างช่วงระดับ 0 - 22 cm ด้วยเครื่องวัดระดับน้ำที่ใช้หัววัดแบบอเล็กโตรดซีวีที่ออกแบบและพัฒนาติดตั้งแสดงในรูปที่ 10 สำหรับผลการทดลองที่เกิดจากการวัดระดับน้ำที่ระดับเดียวกันเป็นจำนวน 10 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันทางไฟฟ้า และระดับน้ำได้ดังในรูปที่ 11 จากรูปที่ 11 จะพบว่าระดับแรงดันเอาท์พุทที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นที่ค่อนข้างสูง

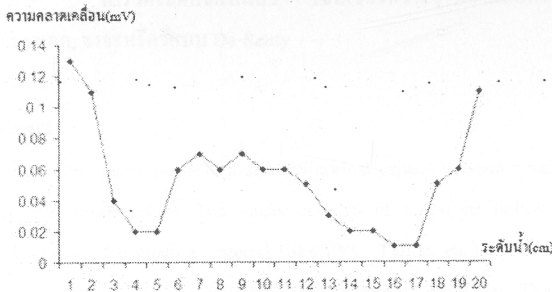


รูปที่ 10 แสดงการวัดระดับน้ำ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและระดับน้ำ

เมื่อนำมาพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นจะแสดงผลแสดงดังในรูปที่ 8 ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นต่ำนั้นคือ 1.42%FSO



รูปที่ 8 ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงเส้น

#### 4. สรุปและวิจารณ์ผล

เครื่องวัดระดับน้ำที่ออกแบบสามารถใช้วัดระดับน้ำได้จริง โดยมีความคลาดเคลื่อนและฮิสเทอรีซิสที่ต่ำทำให้ค่าที่วัดได้มีความน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ยังใช้วัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศ และมีราคาถูกมากเมื่อเทียบกับเครื่องมือวัดทั่วไป ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่สามารถสร้างได้ในจำนวนมากๆเพื่อใช้ในการเฝ้าระวังอุทกภัย รวมทั้งระบบตรวจเฝ้าระวังระดับในแม่น้ำ และทะเลได้

#### เอกสารอ้างอิง

[1] L.C. Lynnworth, Ultrasonic measurements for process control, Academic Press, New York, 1989.

[2] S.G. Joshi, Y. Jin, Propagation of ultrasonic Lamb waves in piezoelectric plates, *J. Appl. Phys.* 70 (8) (1991) 4113–4120

[3] K. Iwamoto, I. Kamata, Liquid-level sensor with optical fibers, *Appl. Opt.* 31(1992) 51–54.

[4] Tuan, G., Qida, Z., Qingying, D., Hao, Z., Lifang, X., Guiling, H., and Xiaoyi, D. 2005. Temperature-insensitive fiber Bragg grating liquid-level sensor based on bending cantilever beam. *IEEE Photonics Technology Letters*, Volume 17, Issue 11, Page(s):2400 – 2402.

[5] Bera, S.C., Ray, J.K., and Chattopadhyay, S., 2006, "A low-cost noncontact capacitance- type level transducer for a conducting liquid", *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* Volume 55, Issue 3, Page(s):778 – 786

[6] Dieulesaint, E., Royer, D., Legras, O., and Boubenider, F., 1987, "A Guided Acoustic Wave Liquid Level Sensor", *Ultrasonic Symposium, IEEE*, Page(s):569 – 572.

[7] Royer, D., Levin, L., and Legras, O., 1993, "A liquid level sensor using the absorption of guided acoustic waves", *Transactions on* Volume 40, Issue 4, Page(s):418 – 421.

[8] โอภาส ศิริครรชิตถาวร. 2548. เรียนรู้ และ พัฒนา ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 ด้วยภาษาซี. สำนักพิมพ์ห้างหุ้นส่วน จำกัด กราฟิกเมลอน, ปทุมธานี, หน้า 1-10

# เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกสำหรับวัดระดับของเหลว

## SEMICYLINDRICAL CAPACITIVE TRANSDUCER FOR LIQUID LEVEL MEASUREMENT

ศุภกร กตธิดารกุล<sup>1</sup> บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา พรชัย พฤกษ์ภัทรานันต์ คณดิศ เจษฎ์พัฒนานนท์  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ. สงขลา 90112

<sup>1</sup>E-mail: supagone@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเซนเซอร์ความจุไฟฟ้ากึ่งทรงกระบอกสำหรับวัดระดับของเหลว โดยหัววัดเป็นท่อทรงกระบอกกลวงทำจากวัสดุที่เป็นฉนวน (PVC, Teflon เป็นต้น) ที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นอิเล็กโทรดกึ่งทรงกระบอกที่ทำจากอลูมิเนียม 2 ชุด โดยชุดล่างจะจมอยู่ใต้ระดับของเหลวตลอดเพื่อใช้เป็นความจุไฟฟ้าอ้างอิงของของเหลว และชุดบนใช้ตรวจวัดระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง ความจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดกึ่งทรงกระบอกทั้งสองชุดสามารถวัดค่าได้โดยใช้วงจรบริดจ์แบบ De-Sauty ให้อยู่ในรูปแบบแรงดันทางไฟฟ้า โดยที่ระดับของเหลวต่างชนิดกันสามารถตรวจวัดได้จากผลต่างของแรงดันไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโทรดกึ่งทรงกระบอกทั้งสองชุด ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขได้ถูกนำมาใช้วิเคราะห์ และอธิบายถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความจุไฟฟ้าของหัววัดและระดับของเหลว

คำสำคัญ : การวัดระดับของเหลว, เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก, วงจรบริดจ์แบบ De-Sauty

### Abstract

This paper presents a semicylindrical capacitive sensor for liquid level measurement. The sensor consists of a uniform hollow cylinder made of insulating material (like PVC, Teflon, etc.) covered with two segments of two semicylindrical aluminum electrodes. The bottom segment of semicylindrical electrodes is the reference capacitor, which is sunk into liquid. The top segment of semicylindrical electrodes is the sensing capacitor for liquid level measurement. The capacitive variation of this transducer is in pF-range due to the change of liquid level inside an insulating hollow cylinder, which can be measured by De-Sauty bridge circuit. The level measurement from different liquid can be detected by voltage difference of two segments of semicylindrical electrodes. The linear relation between the capacitance of this probe and the liquid level is analyzed and discussed using the numerical method.

Keyword : liquid level measurement, semicylindrical capacitive transducer, De-Sauty bridge circuit.

### 1. บทนำ

ปัจจุบันการวัดระดับของเหลวได้เข้ามามีบทบาทในการแก้ปัญหาระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการใช้งานประจำวันได้ และมีส่วนสำคัญในทางกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เทคนิคหนึ่งที่ได้นำมาใช้ตรวจวัดระดับของเหลว คือ การวัดค่าความจุไฟฟ้า [1-3] เนื่องจากสามารถที่จะลดปัญหาเกี่ยวกับเทคนิคการสร้าง ข้อจำกัดทางด้านราคา มีผลตอบสนองเชิงเส้นและง่ายต่อการใช้งาน โดยมีหลักการพื้นฐานคือการให้ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว จุ่มลงไปลงในของเหลวเพื่อวัดระดับของเหลวด้วยการวัดปริมาณไดอิเล็กตริกของของเหลวซึ่งมีอยู่ในคุณสมบัติของของเหลว อาทิเช่น ความเข้มข้น สารแขวนลอย และการเจือปน อย่างไรก็ตามเมื่อค่าไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลงจะส่งผลกระทบต่อค่าที่ตรวจวัดได้ สำหรับเทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบกึ่งทรงกระบอกซึ่งมีข้อดีในด้านรูปทรงที่ไม่ด้านการไหลของน้ำได้ถูกนำเสนอเพื่อวัดระดับของเหลวชนิดที่แตกต่างกันได้ [4] โดยเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ให้อยู่ในรูปแบบดีและใช้ชุดอิเล็กโทรดกึ่งทรงกระบอก 2 ชุด โดยให้ชุดล่างจมอยู่ในระดับของเหลวตลอดเพื่อใช้เป็นความจุไฟฟ้าอ้างอิง และอีกชุดใช้สำหรับตรวจวัดระดับของเหลว จากนั้นวัดค่าความแตกต่างของความดีทั้งสองทำให้สามารถตรวจวัดระดับของเหลวที่ต่างชนิดกันได้อย่างไรก็ตามการแปลงค่าความจุไฟฟ้าในรูปแบบดียังให้ผลตอบสนองที่ช้า ดังนั้นจึงได้แนวคิดในการประยุกต์สร้างวงจรสำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากระดับของเหลวเปลี่ยนแปลงที่มีความคล่องตัว ราคาถูก ใช้งานง่าย และพกพาสะดวก

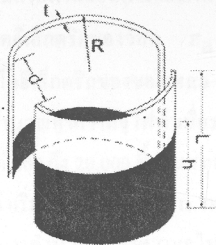
วงจรที่ใช้วัดค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากระดับของเหลวมีอยู่หลายประเภทด้วยกัน อาทิเช่น การแปลงค่าความจุไฟฟ้าไปเป็นความดี เทคนิคแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า เทคนิคการวัดค่าคงที่ทางเวลา (Time constant) เทคนิควงจรดีมอดูเลตแบบซิงโครนัส เป็นต้น [5] จากการศึกษาพบว่าเทคนิคต่างๆ เหล่านี้มีรูปแบบโครงสร้าง และอุปกรณ์จำนวนมากไม่เหมาะสมในการใช้งาน

งานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคสำหรับตรวจวัดระดับของเหลวโดยวัดค่าความจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดแบบกึ่งทรงกระบอกด้วยการใช้วงจรบริดจ์แบบ De-Sauty เพื่อใช้ตรวจวัดระดับของเหลวต่างชนิดกัน ซึ่งเป็นวงจรอย่างง่าย ราคาถูกและไม่ซับซ้อน ความละเอียดและผลตอบสนองเป็นเชิงเส้นที่ดีของอิเล็กโทรดแบบกึ่งทรงกระบอกนี้

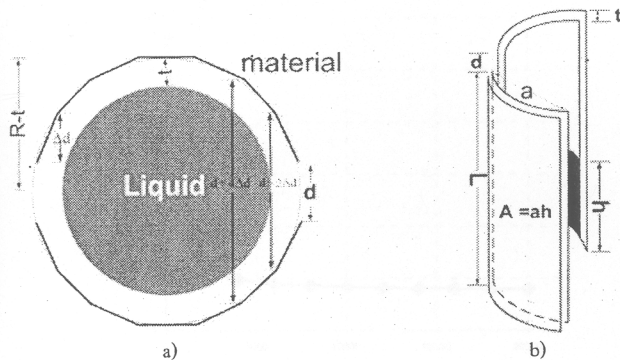
ได้อธิบายและทดลองในการศึกษาห้วงวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก [6] สำหรับบทความนี้เป็นกรขึ้นอันความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความจุไฟฟ้าภายในอิเล็กโตรดกึ่งทรงกระบอก และระดับของเหลว โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

## 2. เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าสำหรับวัดระดับของเหลวที่อาศัยเทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 1 โดยมีรูปแบบเป็นท่อทรงกระบอกกลวงที่มีรัศมีเท่ากับ R ความยาวเป็น L มีความหนาเป็น t ซึ่งทำจากวัสดุที่เป็นฉนวน อย่างเช่น พีวีซี, เทฟลอน เป็นต้น และมีอิเล็กโตรดที่เป็นแผ่นกึ่งทรงกระบอกทำจากอลูมิเนียม หรือแผ่นโลหะที่นำไฟฟ้ามาห่อหุ้มท่อฉนวนทรงกระบอก โดยมีระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโตรดเป็น d สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าภายในทรงกระบอกและระดับของเหลวได้ด้วยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข [7] ด้วยการแบ่งแผ่นโลหะ 2 แผ่นที่อยู่ในรูปกึ่งทรงกระบอกของตัวเก็บประจุให้เป็นจำนวน n แผ่นเล็กที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นที่เพิ่มขึ้นเป็น  $\Delta d$  ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 โดยรูปที่ 2a แสดงเป็นมุมมองด้านบนบนแผ่นโลหะทั้งสองของแบบกึ่งทรงกระบอก และ รูปที่ 2b แสดงถึงแผ่นโลหะ 2 แผ่นเล็กที่ถูกแบ่งจากแผ่นอิเล็กโตรดกึ่งทรงกระบอก



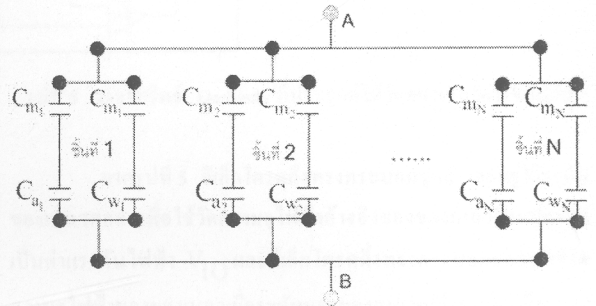
รูปที่ 1 โครงสร้างของห้วงวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก



รูปที่ 2 รูปแบบสำหรับกรวิเคราะห์ a) มุมมองด้านบน b) แผ่นอิเล็กโตรดกึ่งทรงกระบอกที่ถูกแบ่งเป็นแผ่นเล็ก ๆ

ในการวัดระดับของเหลว พบว่าค่าความจุไฟฟ้าแบ่งได้เป็นความจุไฟฟ้าเนื่องจากส่วนที่จุ่มลงของเหลวซึ่งมีขนาดความสูงเป็น h รวมกับความจุไฟฟ้าเนื่องจากส่วนที่เป็นอากาศซึ่งมีความสูงที่เหลือเท่ากับ L-h เมื่อ L คือความยาวของท่อ ความจุไฟฟ้าของทั้งสองนี้ต่อกันแบบขนาน แต่ห้วงวัดแบบกึ่งทรงกระบอกที่สร้างขึ้นนี้มีขอบความหนาของท่อเป็น t ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากความหนาของท่อด้วย ซึ่งสามารถแสดงวงจรมูลของค่าความจุไฟฟ้ารวมดังรูปที่ 3 โดยที่หาค่าความจุไฟฟ้ารวมได้ดังนี้

$$C = \frac{C_{m1} C_{a1}}{C_{a1} + C_{m1}} + \frac{C_{m1} C_{w1}}{C_{w1} + C_{m1}} + \dots + \frac{C_{mN} C_{aN}}{C_{aN} + C_{mN}} + \frac{C_{mN} C_{wN}}{C_{wN} + C_{mN}} \quad (1)$$



รูปที่ 3 วงจรมูลของค่าความจุไฟฟ้ารวม

เมื่อกำหนดให้ ความจุไฟฟ้ารวมส่วนของเหลวกับวัสดุ ( $C_1$ ) และค่าความจุไฟฟ้ารวมส่วนของอากาศกับวัสดุ ( $C_2$ ) เมื่อ

$$C_1 = \frac{C_{m1} C_{w1}}{C_{w1} + C_{m1}} + \dots + \frac{C_{mN} C_{wN}}{C_{wN} + C_{mN}} \quad (2)$$

โดยที่  $C_{m1}, C_{m2}, \dots, C_{m(n-1)} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_m A}{t}, C_{mN} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_m A}{2t}$

$$C_{w1}, C_{w2}, \dots, C_{w(n-1)} = \frac{\epsilon_0 A}{2(n-1)\Delta d + d + 2(n-1)\Delta d}, C_{wN} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_w A}{2(R-t)}$$

$$\text{และ } \Delta d = \frac{2R-d}{2N}, A = ah = \left(\frac{\pi R-d}{N}\right) h$$

ดังนั้น

$$C_1 = \epsilon_0 \left(\frac{\pi R-d}{N}\right) h \left( 2 \sum_{n=1}^N \left[ \frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\epsilon_m \left( \frac{1}{2(n-1)\Delta d + d + 2(n-1)\Delta d} \right)} \right] + \frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\epsilon_w} \right) \quad (3)$$

และ

$$C_2 = \frac{C_{m1} C_{a1}}{C_{a1} + C_{m1}} + \dots + \frac{C_{mN} C_{aN}}{C_{aN} + C_{mN}} \quad (4)$$

โดยที่  $C_{a1}, C_{a2}, \dots, C_{a_{n-1}} = \frac{\epsilon_0 A}{\frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + \frac{d+2(n-1)\Delta d}{\epsilon_a}}$ ,  $C_{aN} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_a A}{2(R-t)}$

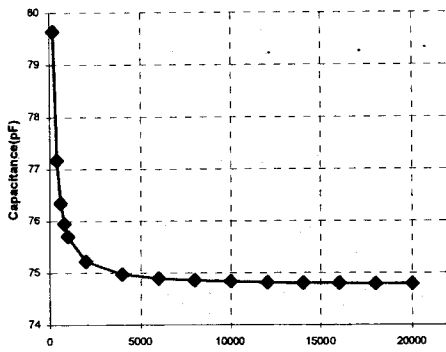
ดังนั้น 
$$C_2 = \epsilon_0 \left( \frac{\pi R - d}{N} \right) (L-h) \left( 2 \sum_{n=1}^N \left( \frac{1}{\frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + \frac{d+2(n-1)\Delta d}{\epsilon_a}} \right) + \frac{1}{\frac{2t}{\epsilon_m} + \frac{2(R-t)}{\epsilon_a}} \right) \quad (5)$$

เมื่อกำหนดให้ 
$$k_1 = \frac{\epsilon_0 (\pi R - d)}{N} \left[ 2 \sum_{n=1}^N \left( \frac{1}{\frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + \frac{d+2(n-1)\Delta d}{\epsilon_w}} \right) + \frac{1}{\frac{2t}{\epsilon_m} + \frac{2(R-t)}{\epsilon_w}} \right]$$

และ 
$$k_2 = \frac{\epsilon_0 (\pi R - d)}{N} \left[ 2 \sum_{n=1}^N \left( \frac{1}{\frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + \frac{d+2(n-1)\Delta d}{\epsilon_a}} \right) + \frac{1}{\frac{2t}{\epsilon_m} + \frac{2(R-t)}{\epsilon_a}} \right]$$

ดังนั้นเขียนสมการใหม่ได้คือ 
$$C = (L-h)k_2 + hk_1 \quad (6)$$

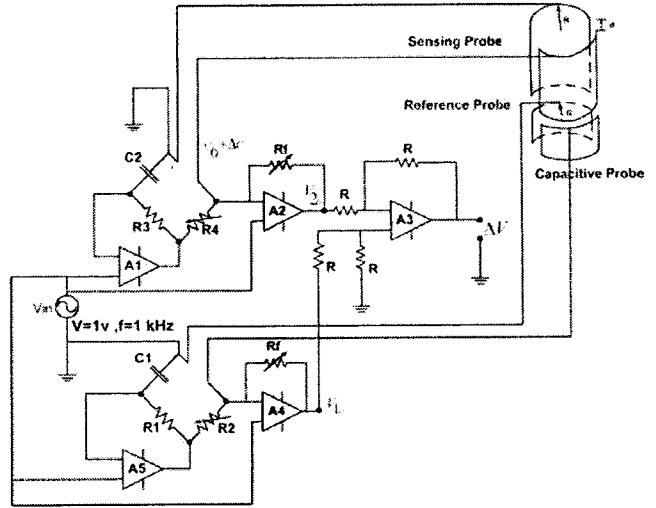
เมื่อ  $\epsilon_0$  เป็นค่าสภาพยอม (Permittivity) ของอากาศว่าง (8.85 pF/m)  $\epsilon_m$  เป็นค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุ  $\epsilon_a$  เป็นค่าไดอิเล็กตริกของอากาศ  $\epsilon_w$  เป็นค่าไดอิเล็กตริกของของเหลว และ A เป็นพื้นที่ของแผ่นโลหะ ผลการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าเมื่อระดับน้ำเป็น 0.10 เมตร โดยการแทน  $n$  ตั้งแต่ 200 ถึง 20,000 ขึ้นในสมการที่ 6 พบว่าค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดจะมีค่าเริ่มที่เมื่อจำนวน  $n$  เท่ากับ 10,000 ขึ้น แสดงดังรูปที่ 4 ดังนั้นในการคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดที่นั่นเสนอในบทความนี้จะใช้จำนวน  $n$  เท่ากับ 10,000 ขึ้น



รูปที่ 4 ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณเมื่อ  $n$  แดกต่างกัน

รูปที่ 5 แสดงถึงเทคนิคการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป เนื่องจากระดับของของเหลวที่เปลี่ยนไป เพื่อให้สามารถตรวจวัดระดับ

ของเหลวต่างชนิดกันได้โดยใช้ชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกรวม 2 ชุด และใช้วงจรบริดจ์ De-Sauty [1] เป็นวงจรปรับแต่งสัญญาณ



รูปที่ 5 วงจรบริดจ์ De-Sauty ที่ประยุกต์ใช้วัดของเหลวต่างชนิดกัน

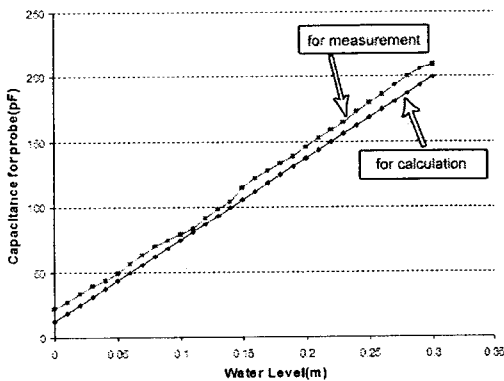
จากรูปที่ 5 อิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกรวม 2 ชุดต่างจอยู่ในระดับของเหลวตลอดเพื่อใช้วัดความจุไฟฟ้าอ้างอิงของของเหลวซึ่งแปลงไปเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_{10}$  และอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกรวมใช้วัดความจุไฟฟ้าของของเหลวเมื่อระดับของของเหลวเปลี่ยนแปลงซึ่งแปลงไปเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_{20}$  โดยมีวงจรขยายสัญญาณผลต่าง  $A_3$  เพื่อหาค่าผลต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้า  $V_{20}$  และ  $V_{10}$  ซึ่งจะได้ผลต่างของค่าแรงดันไฟฟ้าออก ( $\Delta V$ ) ของชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกรวมทั้ง 2 ชุด ยังมีค่าเท่าเดิม ถึงแม้จะวัดของเหลวต่างชนิดกันที่มีค่าไดอิเล็กตริกต่างกัน

### 3. วิธีการและการทดลอง

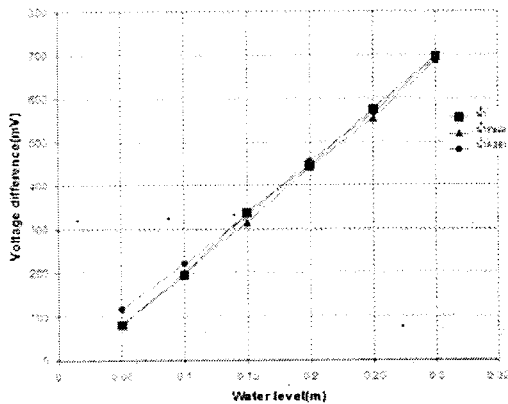
ในการทดลองได้ใช้เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกิ่งทรงกระบอกรวมระดับของเหลว เมื่อมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นโลหะเท่ากับ 0.30 เมตร ความหนาของท่อพีวีซีเท่ากับ 0.005 เมตร วัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัด LCR ซีหรือ Agilent รุ่น 4284A เปรียบเทียบกับผลการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าโดยสมการที่ 6 เมื่อกำหนดให้  $n$  เป็นจำนวนของแผ่นโลหะที่ถูกแบ่งย่อยเท่ากับ 10,000 ขึ้น แผ่นอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกรวมเป็นระยะ 0.015 เมตร ค่าความจุไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนไปโดยจะอยู่ในช่วงพิโคฟารัด (pF) แสดงดังรูปที่ 6 พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองจะมีค่ามากกว่าค่าจากการคำนวณเนื่องมาจากค่าความจุไฟฟ้าแฝง

สำหรับการตรวจวัดระดับของเหลวต่างชนิดกัน 3 ชนิด คือน้ำดื่ม น้ำคลอง และน้ำทะเล (ค่าไดอิเล็กตริกเท่ากับ 76.97, 76.62 และ 38-66 ตามลำดับที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส) เมื่อการวัดค่าระดับ

น้ำตั้งแต่ 0 ถึง 0.30 เมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 เมตร และการประยุกต์ใช้เทคนิควัดค่าความจุไฟฟ้าที่นำเสนอโดยให้แรงดันไฟฟ้ากระตุ้น ( $V_{in}$ ) เป็น 1 V ความถี่ 1 kHz พบว่าผลต่างแรงดันไฟฟ้าออก ( $\Delta V$ ) ของของเหลวต่างชนิดกันมีค่าใกล้เคียงกัน และค่าแปรผันตรงกับระดับของเหลวที่เปลี่ยนไปดังที่แสดงในรูปที่ 7 ผลต่างแรงดันไฟฟ้าออกที่ได้จะอยู่ในช่วงมิลลิโวลต์(mV) ค่าความผิดพลาดเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นได้ค่าเท่ากับ 2.49 % FSO เมื่อทำการวัดค่าระดับของของเหลวทั้ง 3 ชนิดตั้งแต่ 0 ถึง 0.30 เมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 เมตร และทดลองซ้ำ 10 ครั้ง ได้ค่าความสามารถในการทำซ้ำได้เท่ากับ 6.02 % FSO



รูปที่ 6 ผลเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกที่ได้จากการคำนวณกับการวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยตรง



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและระดับของเหลวเมื่อของเหลวต่างชนิดกัน

#### 4. สรุปและอภิปราย

ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่ง

ทรงกระบอกและระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลงได้ และได้นำมาเปรียบเทียบกับความจุไฟฟ้าที่วัดด้วยเครื่อง LCR พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้มีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้าที่วิเคราะห์โดยทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เนื่องจากมีความจุไฟฟ้าแฝง (Stray Capacitance) ระหว่างสายไฟและความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระดับของเหลวแปรผันตรงกัน ซึ่งมีค่าความจุไฟฟ้าอยู่ในช่วงพิโคฟารัด (pF) เมื่อระยะของแผ่นอิเล็กโทรดเป็น 0.015 เมตร

การประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์ De-Sauty เพื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกที่เปลี่ยนแปลงเมื่อระดับของเหลวเปลี่ยนไปให้อยู่ในรูปแบบแรงดันทางไฟฟ้า สำหรับการวัดระดับของเหลวต่างชนิดกันได้ใช้หัววัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกชุดล่างเพื่อวัดความจุไฟฟ้าของของเหลวอ้างอิง และหัววัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกชุดบนเพื่อตรวจวัดระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง และวัดค่าความแตกต่างแรงดันไฟฟ้าทั้งสองชุดทำให้สามารถตรวจวัดระดับของเหลวต่างชนิดกันได้ค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นเทคนิคของการวิจัยนี้สามารถนำไปวัดระดับของเหลวที่ต่างชนิดกันได้ และค่าที่ได้อยู่ในช่วงที่อมรับได้

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] S.C. Bera, J.K. Ray, S. Chattopadhyay, " A low-cost noncontact capacitance- type level transducer for a conducting liquid," IEEE Trans. Instrum. Meas.,Vol.55 ,no. 3 ,PP.778-786, 2006
- [2] Ferren Reverter , Xiujun Li and Gerard C.M. Meijer, " Liquid-Level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor," Sensors and Actuators ,Vol.138 , PP.1- 8,2007.
- [3] Stanley E. Woodard , Bryant D. Taylor , " A wireless fluid-level Measurement technique,"Sensors and Actuators ,Vol.137, PP.268-278, 2007.
- [4] Kanadit Chetpattanondh , Boonchareon Wongkittisuksa, and Pornchai Phukpattaranont , " A low-cost capacitive water level transducer," PSU- UNS International Conference on Engineering and Environment - ICEE-2007, Phuket, May 10-11, 2007.
- [5] L.K. Baxter, *Capacitive Sensors Design and Application*. New York: IEEE Press, 1997.
- [6] สุภกร กตธิตการกุล และคณะ , " การศึกษาหัววัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกเพื่อวัดระดับของของเหลว ," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7, สงขลา , 21-22 พ.ค.,2552.
- [7] C.-T. Chiang and Y.-C. Huang, " A semicylindrical capacitive sensor with interface circuit used for flow rate measurement," IEEE sensors journal, Vol. 6, no.6 ,

# การศึกษาผลตอบสนองเชิงพลวัตของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกเพื่อวัดระดับของเหลว

## STUDY OF DYNAMIC RESPONSE OF LIQUID LEVEL MEASUREMENT USING SEMICYLINDRICAL CAPACITIVE SENSOR

ศุภกร กตาทิการกุล<sup>1</sup> บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา พรชัย พงษ์ภักทรานันต์ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานันท์  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ. สงขลา 90112

<sup>1</sup>E-mail: supagone@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลตอบสนองเชิงสถิตและพลวัตของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้ากึ่งทรงกระบอกสำหรับวัดระดับของเหลว โดยใช้วงจรบริดจ์ De-Sauty วัดค่าความจุไฟฟ้า พบว่าแรงดันไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับระดับของเหลวที่เปลี่ยนไปซึ่งค่าอยู่ในช่วงมิลลิโวลต์(mV) ผลตอบสนองเวลาของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และสามารถนำไปใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวได้ทันที อีกทั้งยังมีราคาถูก ใช้งานง่าย พกพาสะดวก และมีประสิทธิภาพและความคล่องตัวในการใช้งานสูง

คำสำคัญ : เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก, การวัดระดับของเหลว, วงจรบริดจ์แบบ De-Sauty, ผลตอบสนองเวลา

### Abstract

The objective of this paper is to study the static and dynamic response of semicylindrical capacitive sensor for liquid level measurement. De-Sauty Bridge circuit is applied to measure the change of capacitive due to liquid level variation in milliVolt-range. Time response of this capacitive sensor is acceptable and can be used to monitor the change in liquid level. In addition, this sensor is cost effective, easy to use, and portable.

Key Words : Liquid level measurement , Semicylindrical capacitive probe , Time response , De-Sauty bridge circuit

### 1. บทนำ

ปัจจุบันการตรวจวัดระดับของเหลวเข้ามามีบทบาทเพื่อใช้ในการควบคุมการประมวลผลในทางอุตสาหกรรมและกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ตัวอย่างเช่น การวัดปริมาณของนม เบียร์ ในประเภทอุตสาหกรรมทางอาหารและเครื่องดื่ม การวัดปริมาณของน้ำมันใน

ประเภทอุตสาหกรรมน้ำมัน การวัดระดับน้ำมันอ่างเก็บน้ำ เป็นต้น การตรวจวัดเหล่านี้จะใช้หลักการพื้นฐานของคุณสมบัติชนิดของวัสดุหรือคุณสมบัติทางไฟฟ้า อาทิเช่น สกาน่าไฟฟ้า ความดัน อุณหภูมิ การสีกกร่อน เป็นต้น[1,4,5] ทำให้ได้เทคนิคที่แตกต่างกันในการตรวจวัดระดับของเหลวมากกว่า 20 วิธีที่มีอยู่ตามท้องตลาดในปัจจุบัน โดยในแต่ละวิธีก็มีข้อจำกัดในการวัดที่แตกต่างกัน[2] อย่างไรก็ตามในปัจจุบันเทคนิคที่ใช้หลักการต่างมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกันตามแต่ลักษณะการใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น การวัดโดยใช้หลักการของฟองอากาศ(Bubbler-type sensor) [2] มีการออกแบบที่ไม่ซับซ้อนและราคาถูก แต่มีข้อเสียคือไม่เหมาะกับการนำไปใช้กับภาชนะที่ไม่มีช่องระบาย และก๊าซบางชนิดจะส่งผลต่อภาชนะที่บรรจุ การวัดโดยใช้หลักการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิตอลและลูกลอย[3] สามารถที่นำมาวัดระดับของเหลวโดยไม่ต้องสัมผัส สามารถมองเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเหลวในถังและภาชนะที่ใสของเหลวไม่มีผลต่อการวัดระดับ แต่ก็มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถวัดระดับของเหลวได้ในกรณีมีเนื้อสารเดียวกัน และในกรณีที่ถูกลอยเคลื่อนอยู่นอกเหนือมุมมองการถ่ายภาพ นอกจากนี้ในกรณีที่มีผลการกระจายของหมอกควัน หรือ ฝุ่น ก็จะมีผลต่อการเบี่ยงเบนของแสงในการรับส่งสัญญาณทำให้ได้ผลการวัดที่ไม่แน่นอน เทคนิคการวัดระดับน้ำโดยใช้ความจุไฟฟ้าโดยการวัดแบบหัววัดไม่สัมผัสน้ำ[1] โดยใช้หลักการพันขลวดครอบวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนเชื่อมกับถังที่บรรจุน้ำ เมื่อมีระดับน้ำในถังเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้ระดับน้ำก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถนำไปใช้วัดระดับในระบบเปิดได้อย่างเช่น แม่น้ำ คลอง และชายฝั่ง เป็นต้น

ดังนั้นได้แนวคิดในการปรับปรุงเทคนิคการวัดระดับของเหลวโดยใช้สัญญาณในการอ่านแบบต่อเนื่องโดยมีเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกเพื่อเป็นการลดข้อจำกัดทางด้านต่างๆ สำหรับเทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบกึ่งทรงกระบอกเพื่อวัดระดับของเหลว[6,7] ซึ่งมีคุณลักษณะการวัดระดับของเหลวโดยใช้รูปแบบของหัววัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก เป็นเทคนิคที่นำมาประยุกต์ใช้สำหรับวัดระดับของเหลวที่ข้อดีคือการติดตั้งที่ไม่ยุ่งยาก ราคาถูก มีความละเอียดดี และมีผลตอบสนองเป็นเชิงเส้น

CT 002

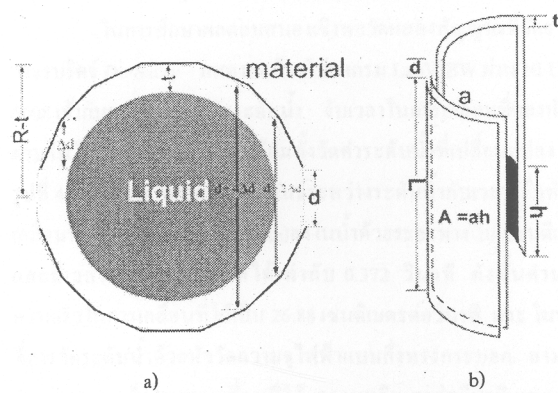


บทความนี้เสนอเทคนิคสำหรับตรวจวัดระดับของเหลวโดยวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยการประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์แบบ De-Sauty [1] ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW และการส่งข้อมูลไร้สายด้วยโมดูล XBee เพื่อศึกษาผลตอบสนองของเวลา โดยที่เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกสร้างจากท่อทรงกระบอกกลวงที่ทำจากวัสดุ polyvinyl chloride (PVC) และมีอิเล็กโทรดเป็นแผ่นกึ่งทรงกระบอกทำจากเทปอลูมิเนียม [7] ที่มีราคาถูก ใช้งานง่าย พกพาสะดวก และมีประสิทธิภาพและความคล่องตัวในการใช้งานสูง

## 2. เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

ลักษณะของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าสำหรับวัดระดับของเหลวที่อาศัยเทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกแสดงโดยมีรูปแบบของหัววัดเป็นท่อทรงกระบอกกลวงที่ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวนคือ PVC (Polyvinyl chloride) และมีอิเล็กโทรดที่เป็นแผ่นกึ่งทรงกระบอกทำจากเทปอลูมิเนียมมาห่อหุ้มท่อทรงกระบอก สำหรับการวิเคราะห์ค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดความจุไฟฟ้าในกรณีที่โครงสร้างหัววัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกเมื่อมีของเหลวเป็นไดอิเล็กตริก จากรูปที่ 1a แสดงมุมมองด้านบนของแผ่นโลหะทั้งสองของแบบกึ่งทรงกระบอก และรูปที่ 1b แสดงแผ่นโลหะ 2 แผ่นเล็ก ๆ ที่ถูกแบ่งจากแผ่นอิเล็กโทรดกึ่งทรงกระบอก โดยแผ่นโลหะทั้งสองของแบบกึ่งทรงกระบอกจะมีรัศมีเท่ากับ  $R$  และมีช่องว่างน้อยที่สุดเท่ากับ  $d$  และมีความหนาของวัสดุที่ใช้ฉลิตแผ่นโลหะเท่ากับ  $t$

ดังนั้นการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกจะประยุกต์ใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยแบ่งแผ่นโลหะ 2 แผ่นที่อยู่ในรูปกึ่งทรงกระบอกของตัวเก็บประจุให้เป็นจำนวน  $n$  แผ่นซึ่งมีระยะห่างระหว่างแผ่นเพิ่มขึ้นเป็น  $\Delta d$  สามารถวิเคราะห์หาค่าความจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะ 2 แผ่นเล็ก ๆ ที่มีระยะห่างกันประมาณ  $d$  และมีพื้นที่เล็ก ๆ  $A$  เมื่อทำการวัดระดับของเหลวโดยทั่วไปค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับ ความจุไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าที่



รูปที่ 1 รูปแบบสำหรับการวิเคราะห์

a) มุมมองด้านบน b) โครงสร้างในการคำนวณ

อยู่ต่ำกว่าของเหลว- อากาศที่เชื่อมต่อสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าโดยแบ่งได้เป็นความจุไฟฟ้าเนื่องจากส่วนที่จุ่มลงของเหลวซึ่งมีขนาดความสูงเป็น  $h$  รวมกับความจุไฟฟ้าเนื่องจากส่วนที่เป็นอากาศซึ่งมีความสูงที่เหลือเท่ากับ  $L-h$  เมื่อ  $L$  คือความยาวของท่อ ความจุไฟฟ้าของทั้งสองต่อกันแบบขนาน แต่หัววัดที่สร้างขึ้นมีขอบความหนาของท่อเป็น  $t$  ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากความหนาของท่อด้วย เมื่อกำหนดให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมส่วนของเหลวกับวัสดุ ( $C_1$ ) และค่าความจุไฟฟ้ารวมส่วนของอากาศกับวัสดุ ( $C_2$ ) โดยที่หาค่าความจุไฟฟ้ารวมได้ดังนี้ [8]

$$C = (L-h)k_2 + hk_1 \quad (1)$$

$$\text{โดยที่ } \Delta d = \frac{2R-d}{2N}, A = ah = \left( \frac{\pi R-d}{N} \right) h$$

เมื่อกำหนดให้

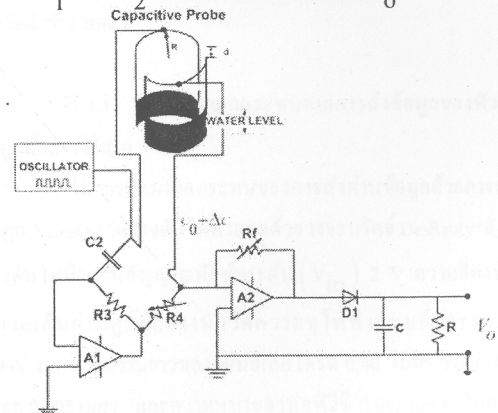
$$k_1 = \frac{\epsilon_0(\pi R-d)}{N} \left[ 2 \sum_{n=1}^N \left( \frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + \frac{d+2(n-1)\Delta d}{\epsilon_w}} \right) + \frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\epsilon_w} \right]$$

และ

$$k_2 = \frac{\epsilon_0(\pi R-d)}{N} \left[ 2 \sum_{n=1}^N \left( \frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + \frac{d+2(n-1)\Delta d}{\epsilon_a}} \right) + \frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\epsilon_a} \right]$$

เมื่อ  $\epsilon_0$  เป็นค่าสภาพยอม (Permittivity) ของอากาศว่าง (8.85 pF/m)  $\epsilon_m$  เป็นค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุ  $\epsilon_a$  เป็นค่าไดอิเล็กตริกของอากาศ  $\epsilon_w$  เป็นค่าไดอิเล็กตริกของของเหลว และ  $A$  เป็นพื้นที่ของแผ่นโลหะ

วงจรบริดจ์ De-Sauty [1] ได้นำประยุกต์ใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเนื่องจากระดับของเหลวที่เปลี่ยนไปแสดงในรูปที่ 2 กรณีวงจรบริดจ์ไม่สมดุลสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าออกของวงจรที่จุด B และจุด D โดยสัญญาณแรงดันไฟฟ้า  $V$  ความถี่  $f$  เข้าที่ออปแอมป์  $A_1$  และ  $A_2$  โดยมีแรงดันออกเท่ากับ  $V_0$

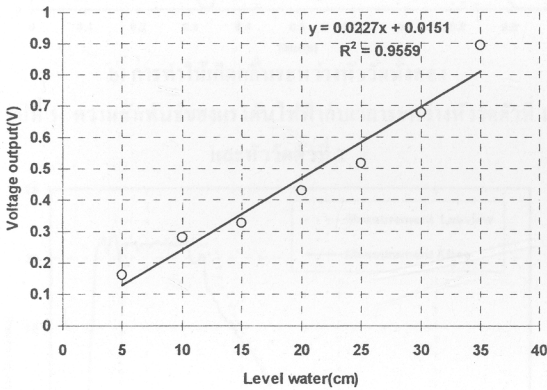


รูปที่ 2 วงจรบริดจ์ De-Sauty ที่ประยุกต์ใช้วัดของเหลว

### 3. วิธีการและการทดลอง

#### 3.1 ผลตอบสนองเชิงสถิต(Static Response)

การวัดระดับของเหลวโดยหัววัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกที่สร้างขึ้นมาจะแสดงผลผ่านโปรแกรม LabVIEW เมื่อหัววัดทำจากวัสดุท่อ PVC และแผ่นอิเล็กโทรดทำจากแผ่นเทปอลูมิเนียมมีขนาดความยาว 0.40 เมตร ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 0.005 เมตร ความหนาของท่อ 0.002 เมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.048 เมตร วงจรบริดจ์ De-Sauty จะถูกใช้วัดค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0 ถึง 0.35 เมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 เมตร โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าพัลส์กระแสต้น ( $V_{in}$ ) ที่ 2 V ความถี่ 1 kHz พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าออกจะแปรผันตรงกับระดับของเหลวที่เปลี่ยนไปและค่าที่ได้จะอยู่ในช่วงมิลลิโวลต์(mV) แสดงคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 3 คำนวณผลค่าความไม่แน่นอนเชิงเส้นได้ค่าเป็น 4.13 % FSO และมีค่าความไม่แน่นอนจากการวัด (Uncertainty) เท่ากับ 0.00218 โวลต์



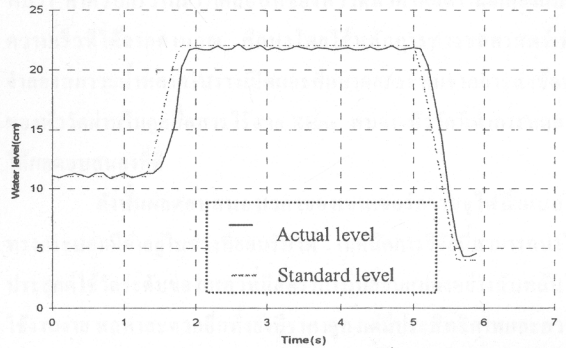
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและระดับของเหลว

#### 3.2 ผลตอบสนองเชิงพลวัต(Dynamic Response)

##### 3.2.1 การจุ่มหัววัดในระดับด้วยความเร็วคงที่

ในการศึกษาผลตอบสนองเชิงพลวัตแสดงสัญญาณที่วัดจากวงจรบริดจ์ De-Sauty แสดงผลด้วยโปรแกรม LabVIEW ผ่าน NI USB-6008 เข้ากับคอมพิวเตอร์วัดระดับน้ำ จับเวลาในการเคลื่อนที่ของหัววัดผ่านโฟโต้เกต(Photogate) พร้อมทั้งวัดค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงจากรูปที่ 4 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับเวลา เมื่อหัววัดเคลื่อนที่ผ่านโฟโต้เกต(Photogate)ลงในน้ำด้วยระยะทาง 10 เซนติเมตร และมีเวลาในการเคลื่อนที่ได้เท่ากับ 0.372 วินาที ดังนั้นคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ได้เป็น 26.88 เซนติเมตรต่อวินาที และในขณะที่การวัดระดับน้ำด้วยหัววัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก สามารถคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ได้ 26 เซนติเมตรต่อวินาที และกรณีหัววัดเคลื่อนที่ขึ้นจากน้ำ เวลาในการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.318 วินาที และคำนวณหาความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัววัดได้ 31.44 เซนติเมตรต่อ

วินาที และแสดงผลด้วยโปรแกรม LabVIEW คำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ได้ 27.14 เซนติเมตรต่อวินาที และพบว่าความสัมพันธ์ของระดับน้ำกับเวลาจากค่าที่ทำการทดลองกับค่ามาตรฐานมีค่าเวลาที่ล่าช้า (Dead time) 0.2 วินาที และเวลาสู่จุดสมดุล (Settling time) 2.1 วินาที



รูปที่ 4 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของระดับน้ำกับเวลาาระหว่างค่าที่ทดลองกับค่ามาตรฐานกรณีจุ่มลงไปและยกขึ้นจากในน้ำ

#### 3.2.3 กรณีการทดสอบในสภาวะน้ำไหล

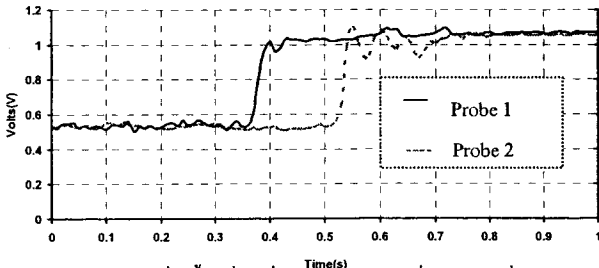
ในการศึกษาผลตอบสนองเชิงพลวัตจะใช้หลักการทางชลศาสตร์เพื่อจำลองสภาวะน้ำไหลในรางเปิด โดยปล่อยน้ำให้ไหลผ่านหัววัดทั้งสอง นำหัววัดจำนวน 2 อัน มาวางในรางน้ำเปิดจำลอง วางห่างกันเป็นระยะ 1 เมตร นำแผ่นกั้นทำคลื่นมาวางและสังเกตการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำและแรงดันไฟฟ้าของหัววัดทั้งสองที่ได้จากวงจรบริดจ์ De-Sauty แสดงผลด้วยโปรแกรม LabVIEW ผ่าน NI USB-6008 เข้ากับคอมพิวเตอร์วัดระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลง

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเวลา กรณีจำลองสถานการณ์น้ำไหลคือน้ำเคลื่อนที่ผ่านหัววัดทั้งสอง ในช่วงเวลา 1 นาที รูปที่ 5a เป็นกรณีการคลื่นน้ำเคลื่อนที่ผ่านหัววัดตัวที่ 1 ก่อนไหลผ่านไปยังหัววัดตัวที่สอง รูปที่ 5b กรณีการนำแผ่นพลาสติกมากั้นน้ำระหว่างหัววัดทั้งสองเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำโดยจับคลื่น ทำให้ระดับน้ำของหัววัดตัวที่ 1 เพิ่มขึ้นส่วนระดับน้ำของหัววัดตัวที่ 2 ลดลง

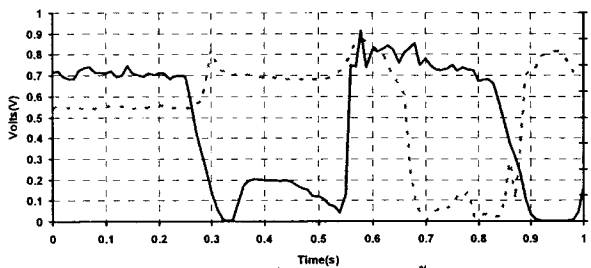
#### 3.2.3 การศึกษาผลกระทบจากการส่งข้อมูลของหัววัดผ่านโมดูลสื่อสารไร้สาย

ในการศึกษาผลกระทบของการส่งผ่านข้อมูลด้วยการเลือกใช้โมดูล XBee[8] วัดแรงดันไฟฟ้าออกด้วยวงจรบริดจ์ De-Sauty ดังรูปที่ 2 แรงดันไฟฟ้าคลื่นสัญญาณพัลส์กระแสต้น ( $V_{in}$ ) 2 V ความถี่ 1 kHz ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัววัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก 0.048 เมตร ความยาวของแผ่นอิเล็กโทรด 0.40 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.005 เมตร และความหนาของท่อที่วัด 0.002 เมตร โมดูล XBee ตัวที่ 1 สำหรับอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC

16F877 พร้อมหัววัด ส่วนโมดูล XBee ตัวที่ 2 คือผ่านพอร์ตอนุกรมกับคอมพิวเตอร์เพื่อสำหรับวัดค่าระดับน้ำ

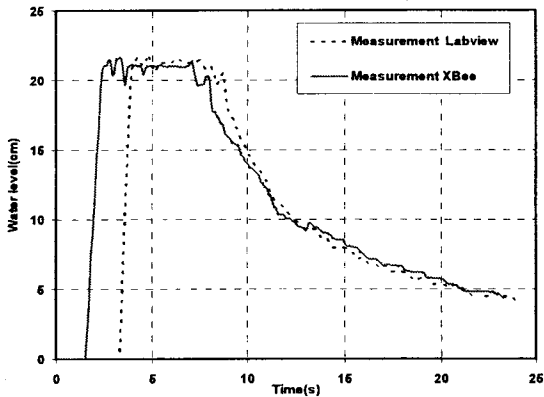


า) กรณีสืบค้นน้ำเคลื่อนที่กระทบหัววัดตัวที่ 1 และตัวที่ 2



บ) การทำให้เกิดคลื่นระหว่างหัววัดทั้งสอง

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับเวลาระหว่างหัววัดตัวที่ 1 และหัววัดตัวที่ 2



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับเวลาระหว่างค่าวัดจาก LabVIEW กับค่าโมดูล XBee

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับเวลาระหว่างผลที่ได้จาก LabVIEW กับ XBee มีค่าเวลาที่ล่าช้า (Dead time) อยู่ 2.0 วินาที และเวลาสู่จุดสมดุล (Settling time) ของ XBee มีค่าเท่ากับ 1.5 วินาที

#### 4. สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกและระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลงได้ การประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์ De-Sauty ติดต่อกับโปรแกรม LabVIEW

เพื่อศึกษาผลตอบสนองเชิงสถิต พบว่า ความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้ากับระดับของเหลวแปรผันตรงกันมีค่าอยู่ในช่วงมิลลิโวลต์ (mV) ผลตอบสนองเชิงพลวัตเพื่อศึกษาผลตอบสนองของเวลาโดยการใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าและจับเวลาในการเคลื่อนที่โดยใช้โฟโต้เกต (Photogate) พบว่า ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัววัดที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าความเร็วที่ได้จากคำนวณ ศึกษาโดยใช้หลักการทางชลศาสตร์เพื่อจำลองสภาวะน้ำที่ไหลในรางเปิดและศึกษาผลกระทบจากการส่งข้อมูลของหัววัดผ่านโมดูลสื่อสารไร้สาย XBee พบว่า หัววัดที่ทำการทดลองให้ผลตอบสนองที่ดี

ดังนั้นผลตอบสนองเวลาของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกมีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ เทคนิคการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้วัดระดับของเหลวที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันได้ ใช้งานง่าย ทกพาสะดวกอีกทั้งยังมีราคาถูก แต่มีประสิทธิภาพและความคล่องตัวในการใช้งานสูง

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] S.C. Bera, J.K. Ray, S. Chattopadhyay, "A low-cost noncontact capacitance-type level transducer for a conducting liquid," IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol.55, no. 3, PP.778-786, 2006.
- [2] Georgi Nikolov and Boyanka Nikolova, "Virtual techniques for liquid level monitoring using differential pressure sensors", RECENT, Vol 9, no. 2(23), July, 2008.
- [3] Ti-Ho Wang, Ming-Chih Lu, Chen-Chien Hsu, Cheng-Chuan Chen, Jia-Dong Fan, "Liquid-level measurement using a single digital camera," Measurement, Vol 42, Page(s): 604-610, 2009.
- [4] L.K. Baxter, Capacitive Sensors Design and Application. New York: IEEE Press, 1997.
- [5] Kanadit Chetpattananondh, Boonchareon Wongkittisuksa, and Pornchai Phukpattaranont, "A low-cost capacitive water level transducer," PSU - UNS International Conference on Engineering and Environment - ICEE-2007, Phuket, May 10-11, 2007.
- [6] ศุภกร กตริการกุล และคณะ, "การศึกษาหัววัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกเพื่อวัดระดับของเหลว," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7, สงขลา, 21-22 พ.ค., 2552.
- [7] ศุภกร กตริการกุล และคณะ, "เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกเพื่อวัดระดับของเหลว," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32, ปราณบุรี, 26-30 ค.ค., 2552.
- [8] Digi International, "Xbee/XBee-PRO OEM RF Modules Product Manual v1.xCx-802.15.4 Protocol," Digi International Inc., 2007.



**สิทธิบัตร**



## คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

 การประดิษฐ์ การออกแบบผลิตภัณฑ์ อนุสิทธิบัตร

ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้  
ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ.2522  
แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 2) พ.ศ.2535  
และพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ.2542

สำหรับเจ้าหน้าที่

วันรับคำขอ - 4 มิ.ย. 2554

เลขที่คำขอ

1101000005

วันยื่นคำขอ 30 ธ.ค. 53

สัญลักษณ์จำแนกการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ

ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์

ประเภทผลิตภัณฑ์

วันประกาศโฆษณา

เลขที่ประกาศโฆษณา

วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่

1. ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์

เครื่องมือวัดระดับของเหลวด้วยหลักการวัดค่าความจุไฟฟ้าผลิตจากแผ่นวงจรพิมพ์

2. คำขอรับสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้เป็นคำขอสำหรับแบบผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันและเป็นคำขอลำดับที่

ในจำนวน คำขอ ที่ยื่นในคราวเดียวกัน

3. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ)

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(ฝ่ายจัดการทรัพย์สินทางปัญญาและถ่ายทอดเทคโนโลยี ศูนย์บ่มเพาะวิสาหกิจฯ)

15 ถนนกาญจนาภิเษย

อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

3.1 สัญชาติ ไทย

3.2 โทรศัพท์ 0-7428-9322

3.3 โทรสาร 0-7428-9339

3.4 อีเมล worawut-w@psu.ac.th

4. สิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

 ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบ ผู้รับโอน ผู้ขอรับสิทธิโดยเหตุอื่น

5. ตัวแทน (ถ้ามี) ที่อยู่ (เลขที่ ถนน จังหวัด ประเทศ รหัสไปรษณีย์)

5.1 ตัวแทนเลขที่

5.2 โทรศัพท์

5.3 โทรสาร

5.4 อีเมล

6. ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ)

1) ผศ.ดร.คณิต เจษฎ์พัฒนานนท์ 2) นายธิตินันท์ ตะเกาน้อย 3) ผศ.ดร.พรชัย พฤษภักทรานนท์ 4) ผศ.ดร.วรรณรัช สันติอมรทัต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เลขที่ 15 ถ.กาญจนาภิเษย ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

7. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม

ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอให้ถือว่าได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ในวันเดียวกับคำขอรับสิทธิบัตรเลขที่

วันยื่น

เพราะคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิมเพราะ

 คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หลายอย่าง ถูกคัดค้านเนื่องจากผู้ขอไม่มีสิทธิ ขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ

หมายเหตุ ในกรณีที่ไม่วางระบุงรายละเอียดได้ครบถ้วน ให้จัดทำเป็นเอกสารแนบท้ายแบบพิมพ์นี้ โดยระบุหมายเลขกำกับข้อและหัวข้อที่  
แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมดังกล่าวด้วย



**หลักฐานการต่อยอดเชิงพาณิชย์**



## บันทึกข้อความ

ส่วนราชการ ศูนย์ทรัพย์สินทางปัญญา อุทยานวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โทร. ๙๓๒๑-๓

ที่ มอ ๑๖๔.๓/๐๔๗

วันที่ ๒๗ กรกฎาคม ๒๕๕๔

เรื่อง หนังสือรับรองการประดิษฐ์ที่ได้ดำเนินการยื่นขอรับการคุ้มครองทรัพย์สินทางปัญญาแล้ว  
เรียน คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

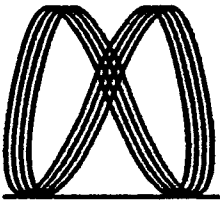
ตามที่นายธิดินันท์ ตะเกาน้อย นักศึกษาสังกัดหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งมี  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์คือ ผศ.ดร.พรชัย พฤษภัทรานนต์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลักและ ผศ.ดร.  
วรรณรัช สันติอมรทัต เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมนั้น ได้พัฒนาสิ่งประดิษฐ์ใหม่ขึ้นภายใต้ หัวข้อวิทยานิพนธ์ชื่อ  
ว่า "ระบบเฝ้าตรวจวัดระดับน้ำ โดยใช้หัววัดอัจฉริยะแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิทีฟอิเล็กโตรด" ชื่อ  
ภาษาอังกฤษคือ "Water Level Monitoring Systems using Intelligent Sensor based on  
Interdigital Capacitive Electrode" ได้ดำเนินการยื่นขอรับการคุ้มครองทรัพย์สินทางปัญญาประเภท  
สิทธิบัตรและได้รับเลขที่คำขอตั้งแต่วันที่ ๔ ม.ค. ๒๕๕๔

ในการนี้ศูนย์ทรัพย์สินทางปัญญาฯ จึงขอให้การรับรองว่าการประดิษฐ์ดังกล่าวได้ดำเนินการยื่น  
ขอรับการคุ้มครองทรัพย์สินทางปัญญาแล้ว และผลงานดังกล่าวอยู่ในระหว่างการพัฒนาเพื่อนำไปสู่การใช้  
ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

ขอแสดงความนับถือ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัศววิทย์ กาญจนโอภาส)  
รักษาการผู้อำนวยการอุทยานวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์





Mobilis Automata Co., Ltd.  
บริษัท โบบิลิส ออโตมาต้า จำกัด

**Mobilis Automata Co., Ltd.**

บริษัท โบบิลิส ออโตมาต้า จำกัด

เลขที่ 50/136 หมู่ 7 ต.คลองสอง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

Tel: 0-2153-4526 Fax: 0-2153-4525

เลขประจำตัวผู้เสียภาษี 3030869814

วันที่ 26 กันยายน พ.ศ. 2554

เรื่อง ขอความร่วมมือเพื่อต่อยอดเทคโนโลยีสู่เชิงพาณิชย์  
เรียน รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและบัณฑิตศึกษา

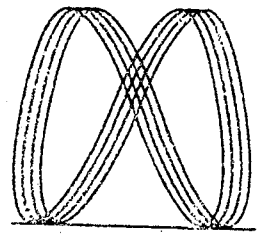
ตามที่ผลงานสิ่งประดิษฐ์ของผศ.คณิต เจษฎ์พัฒนานนท์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในชื่อเรื่อง "เครื่องมือวัดระดับของเหลวด้วยหลักการวัดค่าความจุไฟฟ้าผลิตจากแผ่นวงจรพิมพ์" ได้มีการดำเนินการยื่นขอรับการคุ้มครองทรัพย์สินทางปัญญาประเภทสิทธิบัตรและได้รับเลขที่คำขอแล้วตั้งแต่วันที่ 4 ม.ค. 2554 นั้น ทางบริษัท Mobilis Automata จำกัดมีความสนใจและเล็งเห็นว่าเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีศักยภาพสูง ในการพัฒนาต่อยอดเพื่อนำไปสู่การใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ ทั้งในด้านการประยุกต์ใช้ทางอุตสาหกรรม และการประยุกต์ใช้เพื่อเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดด้านสิ่งแวดล้อมและระบบเตือนภัยธรรมชาติต่างๆ

ทางบริษัท Mobilis Automata จำกัดจึงใคร่ขอความร่วมมือจากทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อให้บริษัทฯ ได้ดำเนินการต่อยอดเพื่อนำไปสู่การใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ต่อไป

ขอแสดงความนับถือ

ดร.กฤษณ์ จงสฤษดิ์

กรรมการผู้จัดการ



Mobilis Automata Co., Ltd.  
บริษัท โบบิลิส ออโตมาต้า จำกัด

**การเผยแพร่สื่อมวลชน**

# วิศวะฯ ม.อ. พัฒนาเซนเซอร์วัดระดับน้ำราคาถูก ป้องกันน้ำท่วม

เหตุการณ์น้ำท่วมซ้ำเื่อ  
หนักใหญ่เฉียดปลายปี 2553 ที่ถ่วงเวลา  
เป็นเหตุการระดมประชาชนที่นับไม่ถ้วน  
ไม่ว่าคิดว่าจะเกิดขึ้นอีกหลังจาก  
เหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่เมื่อปี 2553  
เนื่องจากในครั้งนั้น หน่วยงาน  
ราชการต่างๆ ได้มีการออกแบบ และ  
ปรับปรุงระบบป้องกันน้ำท่วมครั้งใหญ่  
เป็น ลมพัดลอกขอยกยอดตลิ่ง และ  
เพิ่มทางระบายน้ำตลอดได้ดนมให้  
มากขึ้น จนมั่นใจได้ว่าจะสามารถ  
ป้องกันน้ำท่วมใหญ่ในอนาคตได้  
อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เหตุการณ์  
น้ำท่วมเมื่อปี 2554 ที่ผ่านมานี้ ได้แสดงให้เห็น  
แล้วว่า แม้เราจะมีการขุด  
ป้องกันน้ำท่วม ขุดลอกแม่น้ำเป็น  
อย่างดี ก็ยังไม่สามารถรับมือกับ  
สภาพอากาศที่ผันผวนในปัจจุบันนี้ได้  
เมื่อระบบป้องกันไม่เสถียรก็ยังมี  
กับสถานการณ์ได้ วิธีการลดความ  
สูญเสียให้น้อยที่สุดคือ การประเมินค่า  
ให้ประมาทจนเพียงพอ ไปอยู่ที่นั่น  
ปลอดภัยก่อนที่ระดับน้ำจะท่วมสูง  
ระบบเตือนภัยน้ำท่วมจึงเป็นสิ่ง  
จำเป็น ที่คิดได้ทันการพัฒนาระบบ



นายอภิวัฒน์ ตะพานน้อย นศ.ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และ  
นศ.ศด.คิด เจริญพัฒนานนท์ อจ.จารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

ป้องกันระบบป้องกันน้ำท่วมเสมอ ที่  
ผ่านมาของเซนเซอร์วัดระดับน้ำสำหรับ  
ระบบเตือนภัยน้ำท่วม คือได้ใช้  
เซนเซอร์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ  
ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง ที่ไม่อาจคิด  
ตั้งระบบเตือนภัยยังไม่สามารถทำได้  
ครอบคลุมทั่วทุกพื้นที่ และมัก  
มีระบบปัญหาการบำรุงรักษา  
เนื่องจากขาดแคลนอะไหล่ที่มีต้อง  
ใช้โดยธรรมชาติ

นายอภิวัฒน์ ตะพานน้อย นัก  
ศึกษาปริญญาโท และศด.คิด เจริญ  
พัฒนานนท์ อาจารย์ประจำ ภาควิ

ชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย  
สงขลานครินทร์ จึงได้พัฒนา  
เซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบใหม่ซึ่งมี  
ความเหมาะสมสำหรับระบบเตือน  
ภัยน้ำท่วม โดยเน้นการใช้วัสดุที่หา  
ได้ง่ายในประเทศไทย ทำให้ได้ต้นแบบ  
เซนเซอร์วัดระดับน้ำที่มีราคาไม่เกิน  
200 บาท ตัวเซนเซอร์ทำมาจาก  
แผ่นวงจรพิมพ์ที่ผลิตได้ภายใน  
ประเทศ จึงไม่มีปัญหาเรื่องการ  
ลำโพงส่งให้สำนักบริหารการวิจัย  
ในระยงภาค เช่นเซนเซอร์หลักการ

วัดความจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่  
เปลี่ยนแปลงตามค่าระดับน้ำ  
สามารถวัดระดับน้ำได้ตั้งแต่ 1  
เซนติเมตรจนถึง 1 เมตร และใช้  
พลังงานเพียง 0.5 วัตต์ ในการติดตั้ง  
จะเน้นที่การวัดระดับน้ำอย่างถาวร  
ถาวรนั้น เนื่องจากท่อระบายน้ำมัก  
จะอยู่ตามแนวถนน เมื่อน้ำไม่  
สามารถระบายได้ทัน น้ำจะเริ่มท่วม  
จากฝั่งถนนก่อน เช่นเซนเซอร์จะ  
ทำการวัดระดับน้ำที่ถนน แล้วส่งข้อ  
มูลไปยังศูนย์เตือนภัย เพื่อใช้เป็น  
ข้อมูลประกอบการแจ้งเตือนภัยใน  
พื้นที่น้ำท่วมไป หน่วยงานวิจัยได้ยื่น  
จดสิทธิบัตรเป็นที่เรียบร้อยแล้ว และ  
กำลังอยู่ระหว่างการทำทดสอบส่ง  
ข้อมูลแบบเรียลไทม์สำหรับพื้นที่ที่อยู่  
ห่างไกล

ส่งเอกสารผลงานวิจัยขอ  
เพิ่มเติมได้ที่ นศ.ศด.คิด เจริญ  
พัฒนานนท์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย  
สงขลานครินทร์ โทร: 074-257045  
หรือ e-mail : kanadit.c@psu.ac.th

จากหนังสือพิมพ์ สีทิลาใหม่ ฉบับที่ 478 วันที่ 13-19 สิงหาคม 2554



ผศ.คณดิด เจษฎ์พัฒนานนท์

น้ำท่วม อนาคตใหญ่  
จ.สงขลา เมื่อปลายปี  
2553 เป็นเหตุการณ์  
ที่ไม่คาดคิดว่าจะเกิดขึ้น  
อีก หลังจากเหตุน้ำท่วม  
ใหญ่เมื่อปี 2543 เนื่อง  
จากหน่วยงานต่างๆ ได้  
ออกแบบและปรับปรุง  
ระบบป้องกันน้ำท่วม  
จนมั่นใจได้ว่าจะ  
สามารถป้องกันน้ำท่วม  
ใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



อิตินันท์ ตะพานน้อย

แต่เหตุการณ์น้ำท่วมเมื่อปี 2553 แสดงให้เห็นว่าแม้จะมีระบบ  
ป้องกันน้ำท่วมอย่างดี ก็ยังไม่สามารถรับมือกับสภาพอากาศที่ผันผวนใน  
ปัจจุบันนี้ได้

ต่อมา อิตินันท์ ตะพานน้อย นักศึกษาปริญญาโท ผศ.คณดิด เจษฎ์  
พัฒนานนท์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรม  
ศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้พัฒนาเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำ  
แบบใหม่สำหรับเตือนภัยน้ำท่วม โดยเน้นการใช้วัสดุที่หาได้ง่ายใน  
ประเทศ

ทำให้ได้ต้นแบบเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำที่มีราคาไม่เกิน 2,000 บาท  
โดยตัวเซ็นเซอร์ทำมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ที่ผลิตได้ภายในประเทศ จึง  
ไม่มีปัญหาเรื่องสำรองอะไหล่สำหรับการบำรุงรักษาในระยะยาว

สอบถามรายละเอียดได้ที่ ผศ.คณดิด โทร.0-7428-7045 หรือ  
e-mail : kanadit.c@psu.ac.th

**การนำผลงานต่อยอดโครงการวิจัย**



สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย  
THE THAILAND RESEARCH FUND

ที่ นร 6804/0011/2555

11 มกราคม 2554

เรื่อง ขอเรียนเชิญร่วมประชุมพิจารณาข้อเสนอโครงการวิจัย

เรียน ผศ.ดร.ไชยวรรณ วัฒนจันทร์

สิ่งที่ส่งมาด้วย กำหนดการประชุม

ด้วย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ได้กำหนดจัดประชุมเพื่อพิจารณาข้อเสนอโครงการวิจัย จำนวน 2 โครงการ ได้แก่ โครงการ “เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนอัตโนมัติสำหรับการเตือนภัยชุมชน” ซึ่งมี อาจารย์ศุภกร กตาทิการกุล สังกัด คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ เป็นผู้เสนอโครงการ และ โครงการ “ต้นแบบเครื่องเฝ้าระวังการเกิดอุทกภัยสำหรับชุมชน” ซึ่งมี ผศ.คณิต เจษฎ์พัฒนานนท์ สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เป็นผู้เสนอโครงการ ในวันที่ 18 มกราคม 2555 เวลา 12.30 น. เป็นต้นไป ณ ห้องประชุม 1 ชั้น 22 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) อาคาร เอส เอ็ม ทาวเวอร์ ถนนพหลโยธิน กทม. รายละเอียดคั้งสิ่งที่ส่งมาด้วย นั้น

สำหรับข้อเสนอโครงการนี้อยู่ในกลุ่มวิจัยเพื่อพัฒนาพื้นที่ (Area-Based Collaborative Research : ABC) ซึ่งเน้นการแก้ปัญหาที่ประชาชนประสบอยู่และสร้างทางเลือก โอกาสใหม่เพื่อการพัฒนาทั้งในด้านเศรษฐกิจ สังคม ทรัพยากร และการเมืองการปกครอง และเน้นให้กลไกพัฒนาในพื้นที่เป็นตัวขับเคลื่อนการสร้างการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่เอง โดยใช้การวิจัยเป็นเครื่องมือสร้างกระบวนการเรียนรู้ร่วมกันระหว่างนักวิชาการซึ่งเป็น “คนนอก” กับชุมชนและหน่วยงานรัฐในจังหวัดและท้องถิ่น ซึ่งเป็น “คนใน” หน่วยพื้นที่ในการทำงานคือ “จังหวัด” ทั้งนี้ กรณีพื้นที่ภาคใต้ตอนกลาง (นครศรีธรรมราช พัทลุง สงขลา สตูล) โจทย์ปัญหาของพื้นที่ให้ความสำคัญ คือ ผลกระทบจากปัญหาภาวะโลกร้อนและพิบัติภัยที่เกิดขึ้นบ่อยครั้ง และสำนักประสานงานวิจัยเพื่อพัฒนาเชิงพื้นที่ภาคใต้ตอนกลาง (ผศ.ดร.ไชยวรรณ วัฒนจันทร์ ผู้ประสานงานชุดโครงการ) ได้มีการพัฒนาข้อเสนอโครงการร่วมกับภาคีพัฒนาในพื้นที่เพื่อตอบโจทย์ดังกล่าว

จึงขอเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาเป็นประธานและร่วมประชุมดังกล่าว และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอแสดงความนับถือ

(ดร. สีลากรณ์ บัวสาย)

รองผู้อำนวยการสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ฝ่ายชุมชนและสังคม (ดวงพร)

โทรศัพท์ 02-278-8200 ต่อ 8341

โทรสาร 02-278-8225

E-mail : tuangpom@trf.or.th

"ถ้าคุณต้องการทำวิจัย...biodata ให้โอกาส เชิญลงทะเบียนรับทราบโจทย์วิจัย ที่ <http://biodata.trf.or.th>"

ชั้น 14 อาคาร เอส เอ็ม ทาวเวอร์ 979/17-21 ถนนพหลโยธิน แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400  
14th Floor, S M Tower, 979/17-21 Phaholyothin Road, Samsennai, Phayathai, Bangkok 10400, Thailand  
Tel : +66 (0) 2278-8200 Fax : +66 (0) 2298-0476 <http://www.trf.or.th> E-mail : [trf-info@trf.or.th](mailto:trf-info@trf.or.th)

สร้างสรรค์ปัญญา เพื่อพัฒนาประเทศ



สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย  
THE THAILAND RESEARCH FUND

ที่ นร 6804/0012/2555

11 มกราคม 2554

เรื่อง ขอเรียนเชิญนำเสนอข้อเสนอโครงการวิจัย

เรียน คุณศุภกร กตาทิการกุล

สิ่งที่ส่งมาด้วย กำหนดการประชุม

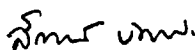
สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ได้เห็นความสำคัญของเพื่อพัฒนาพื้นที่ (Area-Based Collaborative Research : ABC) ซึ่งเน้นการแก้ปัญหาที่ประชาชนประสบอยู่และสร้างทางเลือก โอกาสใหม่เพื่อการพัฒนาทั้งในด้าน เศรษฐกิจ สังคม ทรัพยากร และการเมืองการปกครอง และเน้นให้กลไกพัฒนาในพื้นที่เป็นตัวขับเคลื่อนการสร้างการ เปลี่ยนแปลงในพื้นที่เอง โดยใช้การวิจัยเป็นเครื่องมือสร้างกระบวนการเรียนรู้ร่วมกันระหว่างนักวิชาการซึ่งเป็น “คนนอก” กับชุมชนและหน่วยงานรัฐในจังหวัดและท้องถิ่น ซึ่งเป็น “คนใน” หน่วยงานที่ในการทำงานคือ “จังหวัด” ทั้งนี้ กรณีพื้นที่ ภาคใต้ตอนกลาง (นครศรีธรรมราช พัทลุง สงขลา สตูล) โจทย์ปัญหาของพื้นที่ให้ความสำคัญ คือ ผลกระทบจากปัญหาภาวะ โลกร้อนและพิบัติภัยที่เกิดขึ้นบ่อยครั้ง และสำนักประสานงานวิจัยเพื่อพัฒนาเชิงพื้นที่ภาคใต้ตอนกลาง (ผศ.ดร.ไชยวรรณ วัฒนจันทร์ ผู้ประสานงานชุดโครงการ) ได้มีการประกาศรับข้อเสนอโครงการ และได้พัฒนาข้อเสนอโครงการร่วมกับภาคี พัฒนาในพื้นที่เพื่อตอบใจหทัยดังกล่าว ดังที่ท่านได้ส่งข้อเสนอโครงการ “เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนอัตโนมัติสำหรับการเตือนภัย ชุมชน” มายัง สกว. เพื่อขอรับทุนสนับสนุนการวิจัย

สกว. ได้เล็งเห็นความสำคัญของปัญหานี้ จึงเห็นควรให้มีการจัดประชุมเพื่อพิจารณาข้อเสนอโครงการนี้ ในวันพุธ ที่ 18 มกราคม 2555 เวลา 12.30 น. เป็นต้นไป ณ ห้องประชุม 1 ชั้น 22 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) อาคาร เอส เอ็ม ทาวเวอร์ ถนนพหลโยธิน กทม.

สกว. จึงขอเรียนเชิญท่านมานำเสนอโครงการวิจัยดังกล่าว ในการประชุมเพื่อพิจารณาข้อเสนอโครงการ พร้อมรับ ฟังข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อแนวทางในการวิจัยของโครงการวิจัย ในวัน และเวลาดังกล่าว

จึงขอเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณา

ขอแสดงความนับถือ



(ดร. สีลากรณ์ บัวสาย)

รองผู้อำนวยการสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ฝ่ายชุมชนและสังคม (ดวงพร)

โทรศัพท์ 02-278-8200 ต่อ 8341

โทรสาร 02-278-8225

E-mail : tuangporm@trf.or.th

**"ถ้าคุณต้องการทำวิจัย...biodata ให้โอกาส เชิญลงทะเบียนหรือทราบโจทย์วิจัย ที่ <http://biodata.trf.or.th>"**

ชั้น 14 อาคาร เอส เอ็ม ทาวเวอร์ 979/17-21 ถนนพหลโยธิน แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400  
14th Floor, S M Tower, 979/17-21 Phaholyothin Road, Samsennai, Phayathai, Bangkok 10400, Thailand  
Tel : +66 (0) 2278-8200 Fax : +66 (0) 2298-0476 [http:// www.trf.or.th](http://www.trf.or.th) E-mail : [trf-info@trf.or.th](mailto:trf-info@trf.or.th)

สร้างสรรค์ปัญญา เพื่อพัฒนาประเทศ



สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย  
THE THAILAND RESEARCH FUND

ที่ นร 6804/0013/2555

11 มกราคม 2554

เรื่อง ขอเรียนเชิญนำเสนอข้อเสนอโครงการวิจัย

เรียน ผศ.คณิต เจษฎ์พัฒนานนท์

สิ่งที่ส่งมาด้วย กำหนดการประชุม

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ได้เห็นความสำคัญของการพัฒนาพื้นที่ (Area-Based Collaborative Research : ABC) ซึ่งเน้นการแก้ปัญหาที่ประชาชนประสบอยู่และสร้างทางเลือก โอกาสใหม่เพื่อการพัฒนาทั้งในด้าน เศรษฐกิจ สังคม ทรัพยากร และการเมืองการปกครอง และเน้นให้กลไกพัฒนาในพื้นที่เป็นตัวขับเคลื่อนการสร้างการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่เอง โดยใช้การวิจัยเป็นเครื่องมือสร้างกระบวนการเรียนรู้ร่วมกันระหว่างนักวิชาการซึ่งเป็น “คนนอก” กับชุมชนและหน่วยงานรัฐในจังหวัดและท้องถิ่น ซึ่งเป็น “คนใน” หน่วยงานที่ในการทำงานคือ “จังหวัด” ทั้งนี้ กรณีพื้นที่ ภาคใต้ตอนกลาง (นครศรีธรรมราช พัทลุง สงขลา สตูล) โจทย์ปัญหาของพื้นที่ให้มีความสำคัญ คือ ผลกระทบจากปัญหาภาวะ โลกร้อนและพิบัติภัยที่เกิดขึ้นบ่อยครั้ง และสำนักประสานงานวิจัยเพื่อพัฒนาเชิงพื้นที่ภาคใต้ตอนกลาง (ผศ.ดร.ไชยวรรณ วัฒนจันทร์ ผู้ประสานงานชุดโครงการ) ได้มีการประกาศรับข้อเสนอโครงการและได้พัฒนาข้อเสนอโครงการร่วมกับภาคี พัฒนาในพื้นที่เพื่อตอบโจทย์ดังกล่าว ดังที่ท่านได้ส่งข้อเสนอโครงการ “ต้นแบบเครื่องเฝ้าระวังการเกิดอุทกภัยสำหรับชุมชน” มายัง สกว. เพื่อขอรับทุนสนับสนุนการวิจัย

สกว. ได้เล็งเห็นความสำคัญของปัญหานี้ จึงเห็นควรให้มีการจัดประชุมเพื่อพิจารณาข้อเสนอโครงการนี้ ในวันพุธ ที่ 18 มกราคม 2555 เวลา 12.30 น. เป็นต้นไป ณ ห้องประชุม 1 ชั้น 22 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) อาคาร เอส เอ็ม ทาวเวอร์ ถนนพหลโยธิน กทม.

สกว. จึงขอเรียนเชิญท่านมานำเสนอโครงการวิจัยดังกล่าว ในการประชุมเพื่อพิจารณาข้อเสนอโครงการ พร้อมรับ ฟังข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อแนวทางในการวิจัยของโครงการวิจัย ในวัน และเวลาดังกล่าว

จึงขอเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณา

ขอแสดงความนับถือ

(ดร. สีลาภรณ์ บัวสาย)

รองผู้อำนวยการสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ฝ่ายชุมชนและสังคม (ดวงพร)

โทรศัพท์ 02-278-8200 ต่อ 8341

โทรสาร 02-278-8225

E-mail : tuangpom@trf.or.th

"ถ้าคุณต้องการทำวิจัย...biodata ให้โอกาส เสิร์ชลงทะเบียนรับทราบโจทย์วิจัย ที่ <http://biodata.trf.or.th>"

ชั้น 14 อาคาร เอส เอ็ม ทาวเวอร์ 979/17-21 ถนนพหลโยธิน แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400  
14th Floor, S M Tower, 979/17-21 Phaholyothin Road, Samsennai, Phayathai, Bangkok 10400, Thailand  
Tel : +66 (0) 2278-8200 Fax : +66 (0) 2298-0476 [http:// www.trf.or.th](http://www.trf.or.th) E-mail : [trf-info@trf.or.th](mailto:trf-info@trf.or.th)

สร้างสรรค์ปัญญา เพื่อพัฒนาประเทศ