



เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกสำหรับการวัดระดับของเหลว
Semicylindrical Capacitive Sensor For Liquid Level Measurement

ศุภกร กตาศิการกุล

Supagorn Katathikarnkul

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Prince of Songkla University**

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกสำหรับการวัดระดับของเหลว

ผู้เขียน นายสุภกร กตาทิการกุล

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรัช สันติอมรทัต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

..... กรรมการ

(ดร.ฉัตรชัย สุภพิทักษ์สกุล)

.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย พลฤกษ์ภัทรานนต์)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย พลฤกษ์ภัทรานนต์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....

(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์คารา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกสำหรับการวัดระดับของเหลว
ผู้เขียน นายศุภกร กตาศิการกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาคุณลักษณะการวัดระดับของเหลวโดยใช้รูปแบบของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก โดยรูปแบบของเซนเซอร์เป็นแบบกึ่งทรงกระบอกกลวงที่ทำจากวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และแผ่นโลหะกึ่งทรงกระบอกทำจากเทปอลูมิเนียม จากผลการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง โดยนำมาเปรียบเทียบกับความจุไฟฟ้าที่วัดด้วยเครื่อง LCR ซึ่งพบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้มีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้าที่วิเคราะห์โดยทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เนื่องจากมีความจุไฟฟ้าแฝง (Stray Capacitance) ระหว่างสายไฟ โดยที่ปริมาณความจุไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่าระดับของเหลวและแปรผกผันกับระยะห่างของแผ่นโลหะ โดยค่าที่ได้อยู่ในช่วงพิโคฟารัด(pF)

การวัดระดับของเหลวโดยประยุกต์วงจรบริดจ์เพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้า เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่าระดับของเหลวที่เปลี่ยนไป โดยมีค่าอยู่ในช่วงมิลลิโวลต์(mV) ได้ค่าความไม่แน่นอนเชิงเส้นเท่ากับ 7.65 % FSO ค่าความไม่แน่นอนของการวัด 0.00218 โวลต์ ค่าความสามารถในการทำซ้ำ 1.88 % FSO และค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 8.54% FSO อุณหภูมิที่มากกว่า 50 °C ส่งผลต่อค่าความผิดพลาดในการวัดมากกว่า 11.66 % FSO และค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนไปส่งผลต่อค่าความผิดพลาดในการวัดไม่เกิน 7.66 % FSO และผลตอบสนองเวลาของเซนเซอร์อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังนั้นเทคนิคของการวิจัยนี้สามารถนำไปวัดระดับของเหลว และสามารถนำไปใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ทัน อีกทั้งยังมีราคาถูก ใช้งานง่าย พกพาสะดวก แต่มีประสิทธิภาพและความคล่องตัวในการใช้งานสูง

คำสำคัญ การวัดระดับของเหลว , ความจุไฟฟ้า, เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก, การประยุกต์วงจรบริดจ์

Thesis Title Semicylindrical Capacitive Sensor For Liquid Level Measurement
Author Mr. Supagorn Katathikarnkul
Major Program Electrical Engineering
Academic Year 2010

ABSTRACT

This paper presents a study for static characteristics of a liquid level measurement technique based on a semicylindrical capacitive sensor. The sensor consists of a hollow PVC semicylinder made of covered with a semicylindrical aluminium foil. Capacitance of the sensor is proportional to the change in liquid level and is inversely proportional to the distance of aluminium foil. The linear relation between the capacitance of this sensor and the liquid level is analyzed and discussed using the numerical method. 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.

Study of a liquid level measurement tested using the modified bridge circuit. Results show that the measured voltage is in the range of millivolt (mV) and is proportional to the change in liquid level. In addition, the tested range with 7.65%FSO non-linearity, range with 1.88%FSO repeatability, uncertainty 0.00218 volts and largest error as a percent of reading is 8.54%FSO. The effect of temperature on the sensor when the temperature is over 50 °C, error as a percent of reading is 11.66 %FSO and humidity changes percent of reading is 7.66 %FSO on the sensor. In addition, Time responses of the sensor are in an acceptable. This technique can be efficiently used in real-time liquid level measurement. These experimental results are found to within acceptable limits. Moreover, it is low cost, easy to use, and portable.

Keywords: Liquid level measurement, Capacitance, Semicylindrical capacitive sensor,
Time response, Modified bridge circuit

กิตติกรรมประกาศ

ขอแสดงคำขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา ประธานกรรมการที่ปรึกษางานวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรชัย พุกฤษฏ์ทรานนต์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์ กรรมการสอบโครงร่างและกรรมการสอบความก้าวหน้างานวิจัยที่ได้กรุณาให้การสนับสนุนและฝึกฝนการทำวิจัย ให้คำปรึกษา แนะนำความรู้ในด้านการทำวิจัย เอกสาร ข้อมูลต่างๆเป็นอย่างดี รวมทั้งขัดเกลากระบวนการคิดและให้กำลังใจในการแก้ปัญหาตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรัช สันติอมรทัต ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัย และตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งเป็นที่ศึกษาหาความรู้และที่ยึดเหนี่ยวจิตใจตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆมาโดยตลอด จนกระทั่งงานสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการประสานงานต่าง ๆ

ขอขอบคุณ พี่ๆ และเพื่อน ๆ รวมทั้งน้องๆ นักศึกษามหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์และบุคลากรในภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยทักษิณทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆมาโดยตลอด จนกระทั่งงานสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ ครอบครัว ที่เข้าใจและสละเวลาให้กระผมได้มาศึกษาเล่าเรียนตลอดระยะเวลาจนจบ

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขออน้อมรำลึกถึงพระคุณของบิดาที่ล่วงลับไปแล้วที่เป็นกำลังใจดีเยี่ยม แก่ข้าพเจ้าตลอดมาจนกระทั่งทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จ

ศุภกร กตาริการกุล

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ.....	(6)
รายการตาราง.....	(9)
รายการภาพประกอบ.....	(11)
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	1
1.2 ทบทวนวรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	1
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	8
1.4 ขอบเขต งานวิจัย.....	8
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	9
2. ทฤษฎีและหลักการ.....	12
2.1 หลักการพื้นฐานของการวัดระดับ.....	12
2.1.1 อุปกรณ์ตรวจวัดระดับตามหลักการกายภาพ.....	12
2.2 หลักการพื้นฐานการหาค่าความจุไฟฟ้า.....	16
2.3 รูปแบบของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก.....	18
2.3.1 กรณีมีไดอิเล็กตริกเป็นอากาศ.....	19
2.3.2 กรณีมีไดอิเล็กตริกเป็นอากาศกับของเหลว.....	21
2.4 การออกแบบวงจรสำหรับเซนเซอร์.....	23
2.4.1 วงจรภาคแหล่งจ่ายไฟ.....	24
2.4.2 วงจรออสซิลเลเตอร์.....	25
2.4.3 การประยุกต์วงจรวจรบริดจ์.....	25
2.4.4 เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้ากับค่าความจุไฟฟ้า.....	26
2.4.5 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของชนิดของเหลวที่แตกต่างกัน.....	27
2.4.6 หลักการของการสร้างเซนเซอร์.....	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. วัสดุ อุปกรณ์และการทดลอง.....	30
3.1 การออกแบบเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก.....	30
3.1.1 รูปแบบของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก.....	30
3.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	31
3.2 การทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ และระดับของเหลว.....	31
3.3 ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระยะห่างของแผ่นอิเล็กโตรด ของเซนเซอร์.....	34
3.4 การศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลว.....	35
3.5 การศึกษาผลสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อเซนเซอร์.....	36
3.6 การศึกษาผลตอบสนองของเวลาที่มีต่อเซนเซอร์.....	37
3.6.1 กรณีเซนเซอร์เคลื่อนที่ผ่านของเหลว.....	37
3.6.2 กรณีของเหลวเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์.....	38
3.7 การศึกษาความสัมพันธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับของเหลวต่างชนิด.....	39
4. ผลการทดลอง.....	42
4.1 ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	42
4.2 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลว.....	42
4.2.1 เปรียบเทียบความจุไฟฟ้าจากการคำนวณกับการวัดโดยตรง.....	42
4.2.2 ค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity).....	43
4.2.3 ค่าความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability).....	44
4.2.4 ค่าฮิสเทอรีซิส (Hysteresis).....	44
4.3 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระยะห่างของแผ่นอิเล็กโตรดของเซนเซอร์....	45
4.4 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลว.....	45
4.4.1 ค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity).....	45
4.4.2 ค่าความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability).....	46
4.4.3 เปรียบเทียบค่าระดับน้ำจริงกับค่าที่ได้จากการทดลอง.....	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 สภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก.....	47
4.5.1 ผลของอุณหภูมิ.....	47
4.5.2 ผลของความชื้นสัมพัทธ์.....	48
4.6 ผลตอบสนองของเวลาที่มีต่อเซนเซอร์.....	49
4.6.1 การจุ่มเซนเซอร์ในระดับด้วยความเร็วคงที่.....	49
4.6.2 กรณีการทดสอบในสภาวะน้ำหลาก.....	50
4.7 ความสัมพันธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับของเหลวต่างชนิด.....	51
5. สรุปและวิจารณ์.....	53
5.1 สรุปและวิจารณ์.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	55
บรรณานุกรม.....	56
ภาคผนวก.....	59
ภาคผนวก ก.....	60
ภาคผนวก ข.....	77
ภาคผนวก ค.....	80
ภาคผนวก ง.....	87
ภาคผนวก จ.....	92
ภาคผนวก ฉ.....	96
ภาคผนวก ช.....	105
ภาคผนวก ซ.....	109
ประวัติผู้เขียน	119

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1-1	เปรียบเทียบวงจรที่ใช้สำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้า..... 7
2-1	ตัวอย่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง (25 ° C) 17
3-1	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความถี่ค่าต่างๆ กับค่าความต้านทาน อิมพีแดนซ์ และค่ามูมเฟสของเซนเซอร์..... 32
5-1	เปรียบเทียบเซนเซอร์วัดระดับแบบต่างๆกับเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก..... 55
ข-1	ผลการคำนวณค่าความจุไฟฟ้า เมื่อกำหนดให้แผ่นอิเล็กโตรดแบบกึ่งทรงกระบอก มีรัศมี 0.0315 เมตร และมีช่องว่างน้อยที่สุด 0.025 เมตร และความหนาของวัสดุที่ใช้ติดแผ่นอิเล็กโตรด 0.005 เมตร ที่ระดับน้ำ 0.09 เมตร..... 79
ค-1	เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำ เมื่อแผ่นอิเล็กโตรดวางห่างกัน 0.025 เมตร 82
ค-2	ค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำ เมื่อแผ่นอิเล็กโตรดวางห่างกัน 0.025 เมตร..... 84
ค-3	เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก เมื่อแผ่นอิเล็กโตรดวางห่างกันเป็นระยะต่างๆ..... 86
ง-1	แรงดันไฟฟ้ากับระดับน้ำ เมื่อเซนเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063 เมตร ความยาวของแผ่นโลหะ 0.30 เมตร วางห่างกัน 0.002 เมตร..... 89
จ-1	ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์และค่าอุณหภูมิค่าต่างๆ..... 94
จ-2	ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์และค่าความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่างๆ..... 95
ฉ-1	ผลตอบสนองของเวลาที่มีต่อเซนเซอร์ของความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับเวลา กรณีจุ่มลงไปและยกขึ้นจากในน้ำ..... 98
ฉ-2	กรณีการทดสอบในสภาวะน้ำไหลของความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับเวลาของเซนเซอร์ เมื่อคลื่นน้ำเคลื่อนที่กระทบเซนเซอร์ตัวที่ 1 และ 2 99
ฉ-3	กรณีการทดสอบในสภาวะน้ำไหลของความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับเวลาของเซนเซอร์ เมื่อคลื่นน้ำเคลื่อนที่กระทบเซนเซอร์ตัวที่ 1 และ 2 กรณีเกิดคลื่นระหว่างเซนเซอร์..... 102
ช-1	แรงดันไฟฟ้ากับระดับน้ำ เมื่อวัดระดับน้ำคตอง..... 107
ช-2	แรงดันไฟฟ้ากับระดับน้ำ เมื่อวัดระดับน้ำทะเล..... 107
ช-3	แรงดันไฟฟ้ากับระดับน้ำ เมื่อวัดระดับน้ำดื่ม..... 108

รายการภาพประกอบ

	ภาพประกอบ	หน้า
1-1	รูปแบบการตรวจวัดเทคนิคของ Acoustical gas resonator.....	2
1-2	รูปแบบการจัด LEDs และ phototransistors สำหรับวัดระดับของเหลว.....	2
1-3	การจัดตั้งกล้องและลูกลอยในการวัดระดับของเหลว.....	3
1-4	รูปแบบการจัดวาง FBG สำหรับวัดระดับน้ำ.....	3
1-5	รูปแบบการพันขดลวดเชื่อมกับถังที่บรรจุน้ำ.....	4
1-6	การจัดวางแท่งสแตนเลสและเส้นลวดจนวน PTEE ในถังน้ำ.....	5
1-7	รูปแบบการประยุกต์ใช้ลูกลอยไฟฟ้าวัดระดับของเหลว.....	5
1-8	การจัดวางหัววัดความดันในการวัดระดับของเหลว.....	6
2-1	การใช้ลูกลอยเพื่อขั้ววาล์วในระบบควบคุม	13
2-2	เครื่องมือวัดระดับน้ำแบบไม่ต่อเนื่อง	13
2-3	วิธีการวัดระดับน้ำด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	14
2-4	การวัดระดับน้ำโดยใช้การตรวจวัดความดัน.....	15
2-5	ทรานสดิวเซอร์วัดระดับแบบการเก็บประจุ.....	16
2-6	ตัวเก็บประจุแผ่นเพลตแบบขนาน.....	17
2-7	กรณีมีไดอิเล็กตริกกึ่งกลาง 2 ตัว	18
2-8	ลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์.....	18
2-9	โครงสร้างการคำนวณของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก a) มุมมองด้านบนสำหรับการคำนวณ b) โครงสร้างในการคำนวณแสดงการแบ่ง แผ่นโลหะแต่ละแผ่น.....	20
2-10	วงจรสมมูลของค่าความจุไฟฟ้าเล็กๆสำหรับแผ่นคู่ขนานแบบกึ่งทรงกระบอก.....	21
2-11	วงจรสมมูลของค่าความจุไฟฟ้ารวมสำหรับแผ่นคู่ขนานแบบกึ่งทรงกระบอก.....	21
2-12	โครงสร้างของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกกรณีของเหลว.....	22
2-13	โครงสร้างการคำนวณของเซนเซอร์กรณีมีน้ำและอากาศเป็นไดอิเล็กตริก a) มุมมองด้านบนสำหรับการคำนวณ b) โครงสร้างในการคำนวณแสดงการ แบ่งแผ่นโลหะแต่ละแผ่น.....	22

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
2-14	วงจรมุมูลของค่าความจุไฟฟ้ารวมสำหรับแผ่นคู่ขนานแบบกึ่งทรงกระบอก เมื่อใช้วัดระดับน้ำ.....	23
2-15	บล็อกไดอะแกรมของระบบวงจรปรับแต่งสัญญาณ.....	24
2-16	วงจรแหล่งจ่ายไฟคงที่ 5 โวลต์.....	24
2-17	วงจรรอสซิลเลเตอร์สัญญาณไอเซน.....	25
2-18	รูปแบบวงจรพื้นฐานที่ใช้กับเซนเซอร์ความจุไฟฟ้า.....	26
2-19	รูปแบบการประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์วัดของเหลวที่ต่างชนิดกัน.....	28
3-1	เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3-2	แผนภาพการเปรียบเทียบผลค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัดและการคำนวณ.....	33
3-3	Block diagram ของโปรแกรม LabVIEW.....	35
3-4	วงจรที่ประยุกต์ใช้วัดระดับของเหลว.....	35
3-5	รูปแบบในการศึกษาผลตอบสนองกรณีเซนเซอร์เคลื่อนที่ผ่านของเหลว.....	38
3-6	แผนภาพแสดงการทำงานของเซนเซอร์เคลื่อนที่ผ่านของเหลว.....	38
3-7	การจัดวางอุปกรณ์และการจัดแผ่นตัวกันคลื่นลงในรางวางน้ำ.....	39
3-8	การประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์วัดของเหลวต่างชนิดกัน.....	40
3-9	เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกมีชุดอิเล็กทรอนิกส์ ที่ใช้ในการทดลอง.....	41
4-1	ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณเมื่อ n แตกต่างกัน.....	42
4-2	ผลเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณกับการวัดโดยตรง.....	43
4-3	ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและค่าผิดพลาดเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น กับระดับน้ำ.....	43
4-4	ค่าความสามารถในการซ้่าของเซนเซอร์ที่ระดับน้ำ 0.23 เมตร.....	44
4-5	Hysteresis ของค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำ.....	44
4-6	ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำ เมื่อแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ ห่างกันเป็นระยะต่างๆ.....	45
4-7	ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและระดับน้ำ.....	46

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4-8 ค่าความสามารถในการซ้ําของแรงดันไฟฟ้าที่ระดับน้ำ 0.30 เมตร.....	46
4-9 เปรียบเทียบค่าระดับน้ำจริงกับค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์.....	47
4-10 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิ.....	48
4-11 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและความชื้นสัมพัทธ์.....	48
4-12 ความสัมพันธ์ของระดับน้ำกับเวลาระหว่างค่าที่ทดลองกับค่ามาตรฐาน กรณีจุ่มลงไปและยกขึ้นจากในน้ำ.....	49
4-13 กรณีจำลองสถานการณ์น้ำไหลเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์ a) กรณีคลื่นน้ำเคลื่อนที่ กระทบเซนเซอร์ตัวที่ 1 และ 2 b) กรณีการทำให้เกิดคลื่นระหว่างเซนเซอร์ทั้งสอง...	50
4-14 ความสัมพันธ์ของระดับน้ำกับเวลา a) กรณีคลื่นน้ำเคลื่อนที่กระทบ เซนเซอร์ตัวที่ 1 และ 2 b) กรณีการทำให้เกิดคลื่นระหว่างเซนเซอร์ทั้งสอง.....	51
4-15 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและระดับของเหลว เมื่อของเหลวต่างชนิดกัน.....	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ปัจจุบันการตรวจวัดระดับของเหลวมีความเกี่ยวข้องกับงานทางด้านอุตสาหกรรมและกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ อย่างเช่น การวัดระดับน้ำในถังเก็บน้ำ การวัดระดับน้ำในแม่น้ำ การวัดปริมาณของเหลวในประเภทอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม การวัดปริมาณของน้ำมันในอุตสาหกรรมน้ำมัน เป็นต้น จากการศึกษาเทคนิคที่ใช้ตรวจวัดระดับของเหลวในหลายประเภทพบว่ามีการใช้เทคนิคการวัดปริมาณทางฟิสิกส์ในรูปแบบต่างๆ ที่อาศัยหลักการพื้นฐานของคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด หรือคุณสมบัติทางไฟฟ้า อาทิเช่น สภาพนำไฟฟ้า ความดันออสโมมิ และการสีกกร่อน เป็นต้น แต่การนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์จะมีข้อจำกัดบางอย่างในการวัด เช่น เทคนิคการสร้างและการวัดที่ซับซ้อน และยังมีราคาสูง

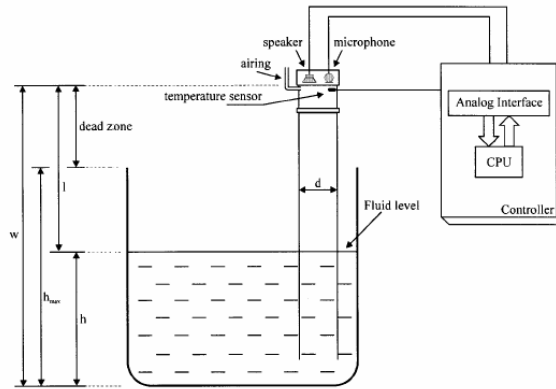
สำหรับงานวิจัยนี้จึงเสนอการวิจัยและพัฒนาเทคนิคการวัดระดับของเหลวที่อาศัยหลักการหาค่าความจุไฟฟ้า โดยใช้แผ่นอิเล็กโตรดเป็นแบบกึ่งทรงกระบอกซึ่งเป็นเทคนิคที่ยังไม่มีการศึกษาการนำมาประยุกต์ใช้วัดระดับของเหลวมาก่อน ผลจากการวิจัยนี้จะสามารถลดปัญหาด้านเทคนิคของการสร้าง ลดข้อจำกัดทางด้านการวัด มีความเป็นเชิงเส้นสูง และง่ายต่อการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีราคาถูกและสามารถประดิษฐ์ขึ้นได้โดยการใช้เทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อน และสามารถสร้างขึ้นมาใช้เองได้ซึ่งจะเป็นการลดการนำเข้าเครื่องมือที่มีราคาแพงจากต่างประเทศได้อีกทางหนึ่ง

1.2 ทบทวนวรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับการวิจัยและพัฒนาเครื่องมือวัดระดับของเหลวได้ถูกคิดค้นและพัฒนามาเป็นเวลานานแล้วเทคนิคที่แตกต่างกัน โดยแต่ละวิธีก็มีข้อจำกัดในการวัดที่แตกต่างกัน ทำให้ได้ดังในเอกสารสืบค้นได้ดังนี้

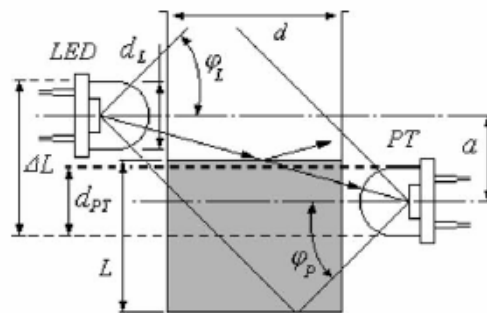
เทคนิคที่ใช้หลักการวัดระดับของเหลวทางเสียงหรือแสง (Ultrasonic or Photo Detection) โดยที่ของเหลวจะไม่สัมผัสกับตัวหัววัด และใช้การรับและส่งออกของสัญญาณมาหาวิเคราะห์หาค่าระดับของเหลว อาทิเช่น เทคนิคของ Acoustical gas resonator[1] สำหรับตรวจวัดระดับของเหลวโดยวิธีดังกล่าวประกอบด้วยท่อแนวลึ้นที่ปลายหนึ่งจมอยู่ในของเหลว และปลายอีกด้านถูกปิดโดยมีการติดตั้งแหล่งกำเนิดคลื่น acoustical และไมโครโฟนไว้ เมื่อความถี่โซแนนซ์

ของ resonator เป็นฟังก์ชันกับระยะทางระหว่างปลายที่ถูกปิดกับผิวของเหลว เมื่อทราบคุณลักษณะของความถี่โซแนนซ์ที่โหมดต่างๆ ทำให้สามารถตรวจวัดระดับของเหลวได้



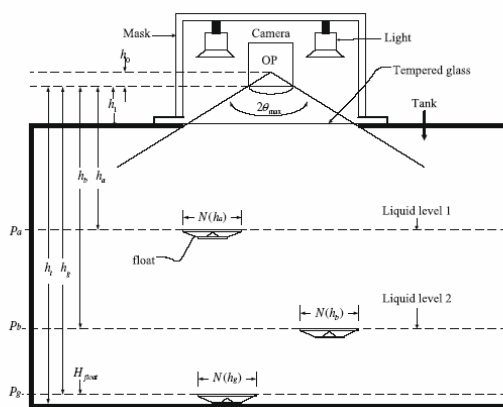
ภาพประกอบ 1-1 รูปแบบการตรวจวัดเทคนิคของ Acoustical gas resonator[1]

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



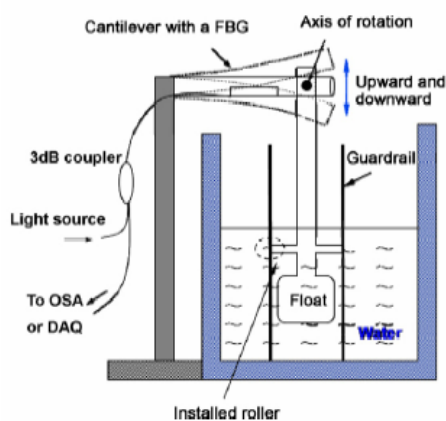
ภาพประกอบ 1-2 รูปแบบการจัด LEDs และ phototransistors สำหรับวัดระดับของเหลว [2]

เทคนิคการวัดระดับของเหลวโดยใช้กล้องดิจิทัล ใช้หลักการถ่ายภาพลูกลอยทรงกลมในการใช้วัดระดับของเหลวในถัง [3] โดยใช้ลูกลอยที่มีสีแตกต่างกัน แล้วนำค่าพิกเซลที่ได้จากภาพมาคำนวณหาตำแหน่งระดับของเหลว สามารถนำมาวัดระดับของเหลวที่เป็นสารกัดกร่อน วัดระดับของเหลวที่มีเนื้อสารแยกแตกต่างกัน หาปริมาตรของของเหลวได้ สามารถมองเห็นลักษณะของเหลวในถังได้ ภาพขณะที่ใส่ของเหลวมีรูปร่างลักษณะอย่างไรก็ไม่มีผลต่อการวัดระดับ



ภาพประกอบ 1-3 การจัดตั้งกล้องและลูกลอยในการวัดระดับของเหลว [3]

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

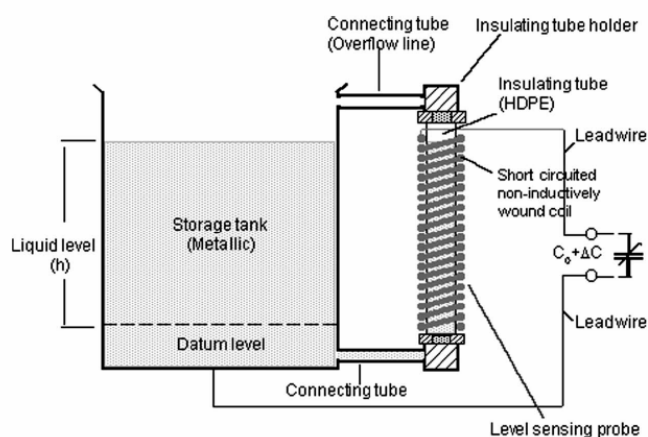


ภาพประกอบ 1-4 รูปแบบการจัดวาง FBG สำหรับวัดระดับน้ำ [4]

ข้อจำกัดของเทคนิคที่ใช้หลักการวัดระดับของเหลวทางเสียงหรือแสงจะมีเหมือนกันคือ ไม่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดระดับของเหลวที่ปนไปด้วยทราย ไม่สามารถนำมาใช้งานในระบบเปิด อาทิเช่น แม่น้ำ คลองและชายฝั่ง เป็นต้น ที่มีน้ำไหลหรือมีการกระเพื่อม จะส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนในการวัดค่าได้ และผลกระทบของควัน ฝุ่นและไอน้ำจะมีผลต่อ

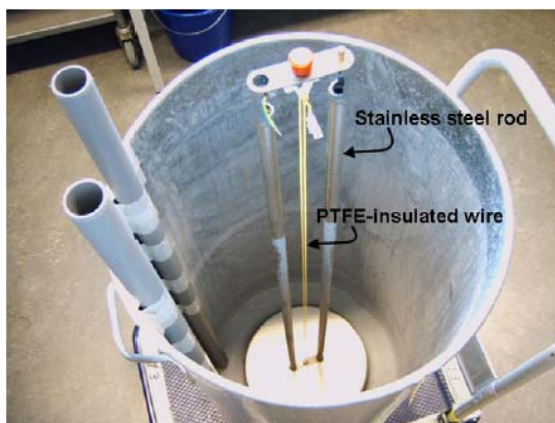
การวัด ส่วนข้อจำกัดเพิ่มเติมของการวัดระดับทางเสียงคือมีผลตอบสนองในเวลาที่ยาว ส่วนข้อจำกัดเพิ่มเติมของการวัดระดับทางแสงคือระยะเวลาในการใช้งานของวัสดุ

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



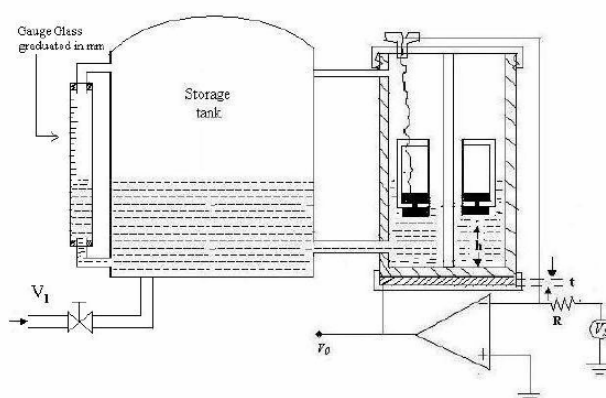
ภาพประกอบ 1-5 รูปแบบการพันขดลวดเชื่อมกับถังที่บรรจุน้ำ [5]

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



ภาพประกอบ 1-6 การจัดวางแท่งสแตนเลสและเส้นลวดฉนวน PTFE ในถังน้ำ [6]

อีกเทคนิคการใช้การวัดระดับของเหลวอย่างต่อเนื่องในถังน้ำโดยการประยุกต์ใช้ลูกลอยไฟฟ้าวัดค่าความจุไฟฟ้า [7] โดยวิธีนี้จะประกอบลูกลอยมีลักษณะทรงกลมหรือทรงกระบอกถูกวางไว้ในท่อที่ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวน โดยมีแผ่นโลหะ 2 แผ่นที่ติดอยู่ด้านในและด้านนอกฐานของลูกลอย และที่ถึงน้ำจะมีแผ่นโลหะติดอยู่ เมื่อระดับของเหลวเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะที่ลูกลอยและที่กั้นถึงเพิ่มระยะขึ้นส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้สามารถทราบระดับของเหลวได้



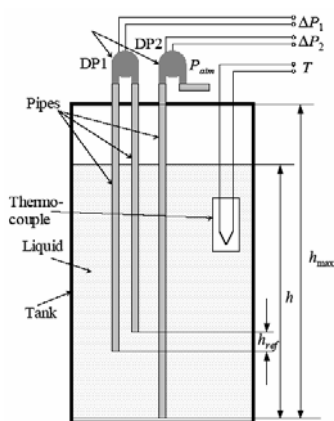
ภาพประกอบ 1-7 รูปแบบการประยุกต์ใช้ลูกลอยไฟฟ้าวัดระดับของเหลว [7]

ข้อจำกัดของเทคนิคการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่กล่าวมาข้างต้น คือ ไม่สามารถนำไปใช้วัดระดับในระบบเปิดได้ อย่างเช่น แม่น้ำ คลอง และชายฝั่ง เป็นต้น สำหรับหลักการต่อกราวด์กับขั้วไฟฟ้าจะมีปัญหาสัญญาณรบกวนจากกราวด์ลูปและมีโอกาสเกิดการไม่เสถียรภาพได้

ถ้าออกแบบ Active shielding circuit ไม่ดี และสำหรับหลักการประยุกต์ลูกถ้วยวัดค่าความจุไฟฟ้า จะมีปัญหาอยู่ที่การเคลื่อนผิวโลหะหากทำการเคลื่อนไม่ก็จะส่งผลต่อค่าการวัด

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

ข้อจำกัดของเทคนิคนี้ คือ ไม่สามารถนำไปใช้วัดระดับในระบบเปิดได้ อย่างเช่น แม่น้ำ คลอง และชายฝั่ง เป็นต้น ต้องมีการปรับเทียบค่าอุณหภูมิก่อนทำการวัด



ภาพประกอบ 1-8 การจัดวางหัววัดความดันในการวัดระดับของเหลว [8]

สำหรับการวิเคราะห์เปรียบเทียบสำหรับวงจรที่ใช้ตรวจวัดความจุไฟฟ้าอาศัยเทคนิคในการตรวจวัดหลายลักษณะ[9] 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 [9]

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 โดยสมารถที่จะจำแนกได้เป็น 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 กับหัววัดไม่สัมผัสน้ำ ที่ใช้หลักการพันขดลวดรอบวัสดุเชื่อมกับถังที่บรรจุน้ำ หรือการใช้เทคนิควงจรรูปแบบ switched-capacitors เป็นต้น

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

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- (1) ออกแบบต้นแบบหัววัดระดับของเหลวโดยใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบกึ่งทรงกระบอก
- (2) วิจัยและพัฒนาเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก สำหรับการตรวจวัดระดับของเหลวที่เหมาะสม
- (3) ศึกษาวิเคราะห์สภาวะแวดล้อมอย่างเช่น ความชื้น อุณหภูมิ ที่ส่งผลต่อการใช้งานเซนเซอร์ต้นแบบ
- (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 คลื่นอัลตราโซนิก เป็นต้น และตัวอย่างเซนเซอร์ที่มีใช้กันทั่วไปในปัจจุบัน เช่น เซนเซอร์ชนิดอัลตราโซนิก (Ultrasonic) และสวิตช์ลูลอย เป็นต้น แต่อย่างไรก็ดีเซนเซอร์แบบต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วล้วนแต่มีข้อจำกัดทางด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านคุณสมบัติ ระบบการวัดระดับของเหลวที่ยุ่งยาก ทั้งทางด้านราคาที่ยังสูง เป็นต้น

(2) ศึกษาคุณสมบัติของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

วัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานค่าความจุไฟฟ้าของรูปแบบของแผ่นอิเล็กโทรดที่เป็นกึ่งทรงกระบอก สร้างและออกแบบให้มีรูปแบบเป็นท่อทรงกระบอกกลวงทำจากวัสดุที่เป็นฉนวน และมีอิเล็กโทรดเป็นแผ่นกึ่งทรงกระบอกทำจากตัวนำไฟฟ้า ปัจจุบันหลักการวัดค่าความจุไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นการศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับรูปแบบของแผ่นอิเล็กโทรดที่เป็นแบบทรงกระบอกสำหรับใช้ในการตรวจวัดระดับของเหลว แต่รูปแบบแผ่นอิเล็กโทรดที่เป็นแบบกึ่งทรงกระบอกยังไม่ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ ดังนั้นเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกที่ใช้สำหรับวัดระดับของเหลวจะเป็นรูปแบบแรกที่มีโครงสร้างที่แตกต่างไปจากเดิม

(3) ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระดับของเหลว

ทำการทดสอบและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง วัดค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน นำผลที่ได้จากการวัดมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม MATLAB รวมทั้งการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติบางประการ เช่น ค่าความเป็นเชิงเส้น ค่าการทำซ้ำ และค่า Hysteresis

(4) ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระยะห่างของแผ่นอิเล็กโทรด

ทำการทดสอบและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์กับ

ระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน 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) ศึกษาสภาวะแวดล้อมอื่น ๆ ที่มีผลต่อการตรวจวัด

วัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาผลของสภาวะแวดล้อมต่างๆ ที่อาจส่งผลต่อการตรวจวัด ศึกษาผลของอุณหภูมิโดยทำการวัดค่าอุณหภูมิไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส เนื่องจากไม่ได้นำไปใช้ในส่วนของการวัดอุณหภูมิที่มีค่ามาก และศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่างๆ ในช่วงเวลาที่ต่างกัน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

(9) ศึกษาผลตอบสนองในเวลา

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลตอบสนองของเวลาที่มีต่อเซนเซอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวแบบฉับพลัน โดยแบ่งกรณีศึกษาเป็น 2 กรณี คือ เมื่อเซนเซอร์เคลื่อนที่ผ่านของเหลว โดยนำเซนเซอร์เคลื่อนที่ขึ้นลงจากของเหลวผ่านโฟโต้เกต (Photogate) ศึกษาความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้ากับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ และเมื่อของเหลวเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์

โดยออกแบบการทดลองโดยใช้หลักการทางชลศาสตร์เพื่อจำลองสภาวะการเปลี่ยนแปลงน้ำอย่างรวดเร็วในรางเปิด ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ รวมทั้งการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติบางประการ เช่น ค่าเวลาที่ล่าช้า (Dead time) และเวลาสู่จุดสมดุล (Settling time)

(10) ตรวจสอบสรุป วิเคราะห์ผลและจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการวัดระดับน้ำที่ใช้หลักการแบบต่างๆ ในบทนี้ผู้วิจัยได้แบ่งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังต่อไปนี้ 1) หลักการพื้นฐานของการวัดระดับของเหลว 2) หลักการพื้นฐานการหาค่าความจุไฟฟ้า 3) รูปแบบของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก 4) การออกแบบวงจรสำหรับเซนเซอร์

2.1 หลักการพื้นฐานของการวัดระดับ

การวัดระดับของของเหลวมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตหลาย ๆ อย่าง กระบวนการทางวิทยาศาสตร์หรือแม้กระทั่งในชีวิตประจำวัน เช่น การวัดระดับน้ำในถังเก็บน้ำ การวัดระดับน้ำในแม่น้ำ การวัดปริมาณของนม เบียร์ ในประเภทอุตสาหกรรมทางอาหารและเครื่องดื่ม การวัดปริมาณของน้ำมันในประเภทอุตสาหกรรมน้ำมัน เป็นต้น จากการใช้งานในประเภทต่างๆ พบว่า ระดับของวัตถุที่ต้องการวัดไม่จำเป็นต้องเป็นเนื้อเดียวกัน และสามารถแบ่งเซนเซอร์วัดระดับโดยดูความต่อเนื่องของสัญญาณต่อเวลาที่พบว่ามีอยู่ 2 แบบใหญ่ ๆ ได้แก่

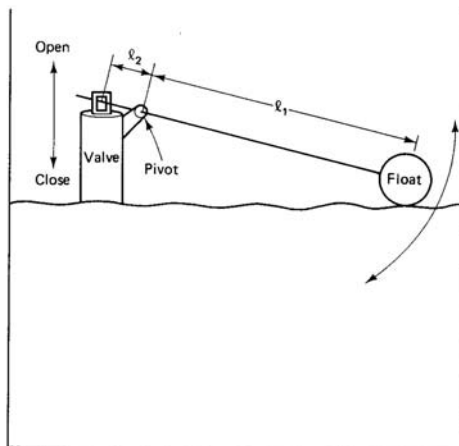
1. แบบต่อเนื่อง (continuous) จะให้สัญญาณออกมาเป็นสัดส่วนกับความสูงของวัตถุที่อยู่ในถังตลอดเวลา เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าการเก็บประจุ เป็นต้น
2. แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) เอาต์พุตที่ออกมาจากเซนเซอร์แบบนี้ทำงานที่สองสถานะ คือ เปิดและปิด (หรือตัดกับต่อวงจร) ลักษณะของงานจะนำไปใช้กับเครื่องควบคุมกระบวนการได้ง่ายกว่า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

2.1.1 อุปกรณ์ตรวจวัดระดับตามหลักการทางกายภาพ

ในการแบ่งอุปกรณ์เซนเซอร์แบบนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ

1. อุปกรณ์วัดระดับทางกล (Mechanical Sensor) โดยทั่วไปได้แก่ สวิตช์ลูกลอยตัวอย่างการใช้งานของสวิตช์แบบลูกลอย เช่น ในถังชักโครกซึ่งใช้ลูกลอยเป็นตัวปิดเปิดวาล์วถังเก็บน้ำประปา เป็นต้น หลักการทำงานของลูกลอยจะพบว่าตำแหน่งของวาล์วจะเป็นสัดส่วนกับระดับน้ำ นั่นคือ หากระดับน้ำต่ำลงลูกลอยจะตกลงและเปิดวาล์ว เมื่อระดับน้ำสูงขึ้นลูกลอยจะลอยขึ้นไปผลักให้วาล์วปิด หลักการทำงานของเห็นว่าแกนและจุดหมุน (pivot) เป็นระบบการขยาย

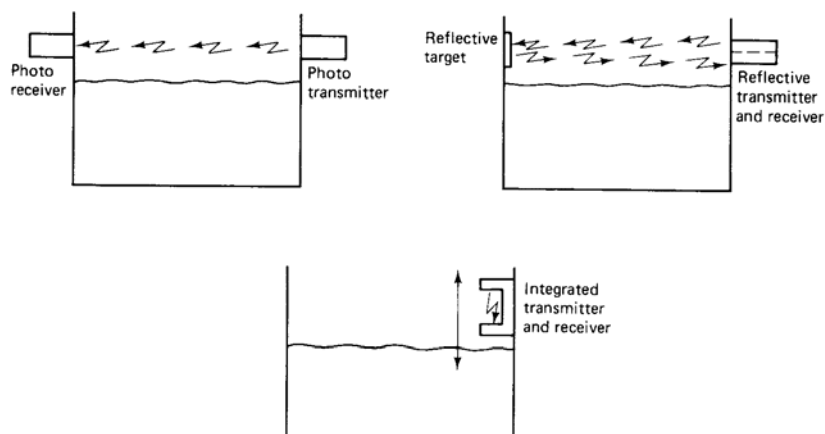
แรงทางกล แรงที่จ่ายให้กับลูกกลอยแล้วมีผลต่อวาล์วจะเป็นผลมาจากแฟกเตอร์ของ l_1 , l_2 ดังภาพประกอบ 2-1



ภาพประกอบ 2-1 การใช้ลูกกลอยเพื่อขับวาล์วในระบบควบคุม [10]

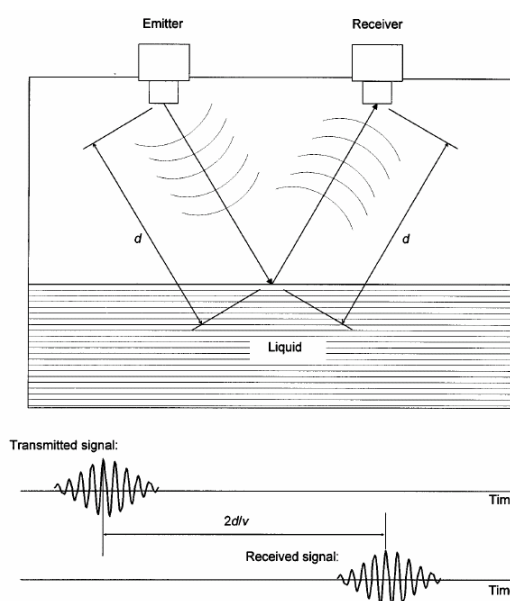
2. อุปกรณ์วัดระดับทางเสียงหรือแสง (Ultrasonic or Photo Detection) ปกติ

อุปกรณ์ส่งแสงจะใช้ไดโอดเปล่งแสงในการปล่อยแสงอินฟราเรดผ่านเลนส์ทำให้ลำแสงกระจายออก ส่วนอุปกรณ์ตัวรับจะเป็นอุปกรณ์ประเภททรานซิสเตอร์ไวแสง แสงที่ถูกส่งออกไปจะต้องกรองเพื่อให้ได้เฉพาะความถี่แสงที่จะทำการตรวจจับเท่านั้น เมื่อระดับวัตถุอยู่ต่ำกว่าตัวเซนเซอร์แสงจะส่งไปกระทบกับตัวรับแสงทำให้โฟโตทรานซิสเตอร์อิ่มตัวและให้ลอจิกต่ำออกมา เมื่อระดับของวัตถุขึ้นไปบังแสง โฟโตทรานซิสเตอร์ก็จะปิด ดังภาพประกอบ 2-2 ในสภาวะที่ใช้กับไฟกระแสตรงต้องต่อตัวต้านทานดึงค่าขึ้น (pull-up) ระหว่างคอลเลกเตอร์เปิด (open collector) ของโฟโตทรานซิสเตอร์ เพื่อให้ระดับของแรงเคลื่อนที่ออกมาอยู่ในสภาวะลอจิกสูงแต่โดยทั่วไปที่ตัวรับจะใช้ทรานซิสเตอร์ไวแสงมากกว่าที่จะใช้โฟโตทรานซิสเตอร์



ภาพประกอบ 2-2 เครื่องมือวัดระดับน้ำแบบไม่ต่อเนื่อง [11]

ส่วนการวัดระดับที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกมีหลักการว่าวัตถุจะไม่สัมผัสกับตัววัด ใช้หลักการในการสะท้อนของพัลส์อัลตราโซนิกที่ผิวของวัตถุ การทำงานด้วยวิธีแบบนี้คือ เมื่อสัญญาณอัลตราโซนิกถูกส่งออกไป เอคโค่พุดของโมดูลดังกล่าวก็จะเป็นสัญญาณพัลส์ แล้วรับเอาสัญญาณดังกล่าวที่สะท้อนกลับมาวิเคราะห์ สัญญาณพัลส์ดังกล่าวสามารถตรวจวัดได้โดยใช้ตัวนับ ซึ่งจะต้องวัดเวลาระหว่างพัลส์ที่ส่งออกไปและที่สะท้อนเข้ามายังตัวรับดังภาพประกอบ 2-3 พบว่าคลื่นอัลตราโซนิกจะมีความเร็วเท่ากับความเร็วของเสียง เมื่อทราบค่าความเร็วคลื่นและเวลาแล้วก็สามารถจะทราบระยะที่ไปยังผิวได้

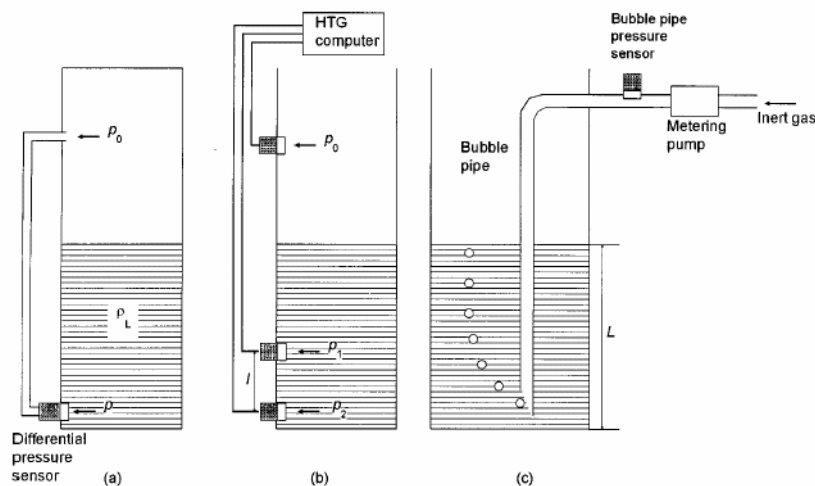


ภาพประกอบ 2-3 วิธีการวัดระดับน้ำด้วยคลื่นอัลตราโซนิก [12]

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 ในขณะที่ถังเปิดออกสู่อากาศก็สามารถใช้สมการเฮดพื้นฐาน หรือในขณะนี้ทรานสดิวเซอร์ก็จะกลายเป็นเกจวัดความดัน(เทียบกับความดันบรรยากาศ) แต่หากถังตั้งกล่าวถูกซีลหมด ความดันด้านล่างก็จะไม่แปรผันตามค่าเฮดนั้นเพียงอย่างเดียว โดยจะแปรไปตามความดันด้านบนด้วย



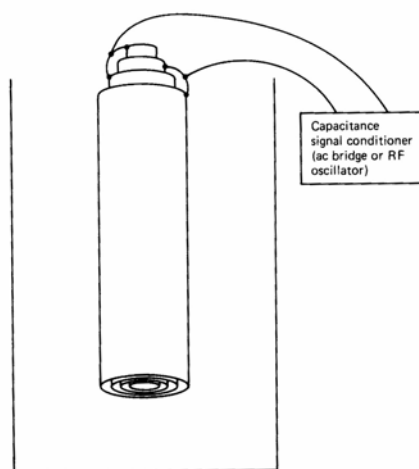
ภาพประกอบ 2-4 การวัดระดับน้ำโดยใช้การตรวจวัดความดัน [13]

4. วิธีการวัดทางไฟฟ้าที่สำคัญต่อเนื่อง หากตัดแปลงสวิตช์ลูกลอย ซึ่งเป็นการวัดระดับน้ำทางกล แล้วแทนที่วาล์วด้วยการสไลด์ของแขนโพเทนชิโอมิเตอร์แบบเชิงเส้นเพื่อประยุกต์ใช้งานอื่นๆได้ เมื่อระดับเปลี่ยนแปลงคือเคลื่อนที่ขึ้นบนหรือลงล่างทำให้แขนของโพเทนชิโอมิเตอร์เลื่อนตาม หรืออาจจะใส่เฟืองเข้าไปเพื่อทำการเปลี่ยนการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแขนคือ I_2 ไปเป็นการเคลื่อนที่แบบวงกลมเพื่อไปหมุนแกนของโรตารีโพเทนชิโอมิเตอร์อีกตอนหนึ่ง

คอนดักแตนซ์โพรบ (Conductance probe) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดระดับของของเหลวอีกชนิดหนึ่งที่อาศัยพื้นฐานของสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับความสูงของของเหลว สภาพแวดล้อมภายนอกกระบวนการเช่น การกัดกร่อน หรืออุณหภูมิรอบข้าง รวมไปถึงสภาพความนำไฟฟ้าของของเหลวที่ต้องการตรวจวัดเป็นปัจจัยสำคัญที่จำเป็นต้องพิจารณาถึงเมื่อคอนดักแตนซ์โพรบไปใช้งาน และสิ่งสำคัญที่สุดก็คือ หากของเหลวที่ตรวจสอบมีคุณสมบัติเป็นสารจำพวกไวไฟแล้ว การใช้งานคอนดักแตนซ์โพรบจึงควรมีฝาปิดมิดชิดเพื่อป้องกันประกายไฟอันเกิดจากการต่อวงจรของหน้าสัมผัส

คาปาซิแตนซ์โพรบคือเซนเซอร์อีกแบบหนึ่งที่น่าเอาหลักการทำงานพื้นฐานของตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดระดับของของเหลวในถังบรรจุทั่วไปพบว่ามีนิยมนำใช้

ในการวัดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องบิน สำหรับคาปาซิเตอร์โพรงนี้ประกอบด้วยท่อตัวนำทรงกระบอก 2 ท่อวางสอดซ้อนกันทำหน้าที่เสมือนกับตัวเก็บประจุทางไฟฟ้าดังแสดงภาพประกอบ 2-5 เห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนของระดับของเหลวในถัง โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน ผลจากการแปรค่าความจุไฟฟ้านี้เองสามารถนำไปสร้างให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์แสดงผลหรือเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมระบบได้



ภาพประกอบ 2-5 ทรานสดิวเซอร์วัดระดับแบบการเก็บประจุ [14]

2.2 หลักการพื้นฐานการหาค่าความจุไฟฟ้า

การหาค่าความจุไฟฟ้าอย่างง่ายสามารถหาได้จากแผ่นโลหะอย่างน้อยสองแผ่นมีฉนวนหรือไดอิเล็กตริกกั้นกลางอยู่ ดังภาพประกอบ 2-6 สามารถคำนวณหาได้จากสมการของตัวเก็บประจุแผ่นเพลตแบบขนานได้ คือ

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

เมื่อ ϵ_0 คือ ค่า permittivity of free space มีเท่ากับ 8.85 (pF/m)

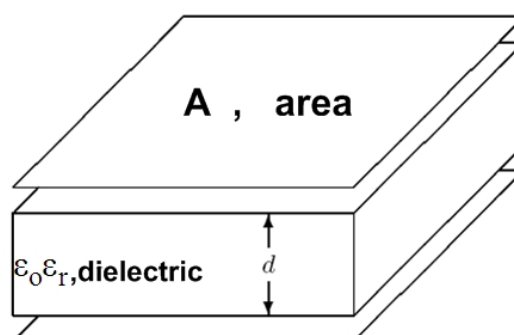
ϵ_r คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก

A คือ พื้นที่ของแผ่นโลหะ (ตารางเมตร)

d คือ ระยะห่างน้อยที่สุดของช่องว่าง (เมตร)

ตารางที่ 2-1 ตัวอย่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง (25 ° C) [9]

วัสดุ(Material)	ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant : ϵ_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

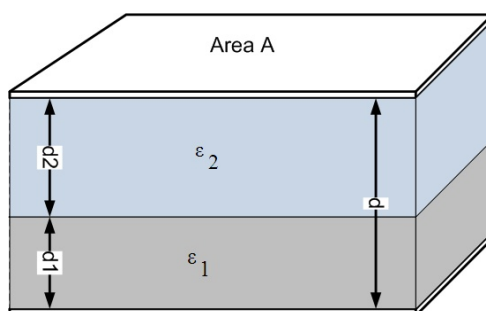


ภาพประกอบ 2-6 ตัวเก็บประจุแผ่นเพลตแบบขนาน

สำหรับกรณีมีไดอิเล็กตริกหลายชนิดกั้นกลางอยู่ในระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า สามารถหาค่าความจุไฟฟ้าได้โดยเปรียบเทียบว่ามีค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากไดอิเล็กตริกต่างชนิดที่ ต่อแบบอนุกรม ดังภาพประกอบ 2-7 เมื่อมีไดอิเล็กตริก 2 ชนิดกั้นกลางระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า โดยมีไดอิเล็กตริกตัวแรก ϵ_1 มีความหนาเป็น d_1 ส่วนไดอิเล็กตริกตัวที่สอง ϵ_2 มีความหนาเป็น

d_2 เมื่อความหนาทั้งหมดเท่ากับผลรวมของความหนา d ของไดอิเล็กตริกแต่ละชั้น สามารถหาค่าความจุไฟฟ้าได้จากสมการ

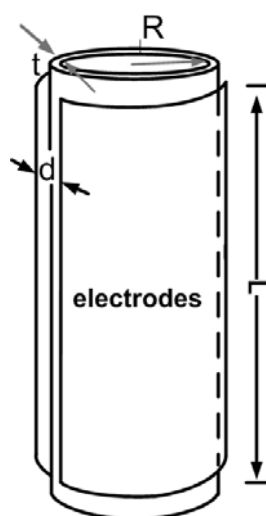
$$C = \frac{1}{\frac{d_1}{\epsilon_1 A} + \frac{d_2}{\epsilon_2 A}} \quad (2)$$



ภาพประกอบ 2-7 กรณีมีไดอิเล็กตริกกั้นกลาง 2 ตัว

2.3 รูปแบบของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

ลักษณะของเซนเซอร์สำหรับวัดระดับของเหลวที่อาศัยเทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกแสดงดังภาพประกอบ 2-8 โดยรูปแบบของเซนเซอร์มีท่อทรงกระบอกกลวงที่ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวน คือ Polyvinyl chloride (PVC) , เทฟลอน เป็นต้น สำหรับแผ่นอิเล็กโทรดที่เป็นแผ่นกึ่งทรงกระบอกจะทำจากอลูมิเนียมมาห่อหุ้มท่อทรงกระบอก



ภาพประกอบ 2-8 ลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์

2.3.1 กรณีมีไดอิเล็กตริกเป็นอากาศ

สำหรับการวิเคราะห์ค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกกรณีที่มีโครงสร้างเซนเซอร์เมื่อไม่มีของเหลวเป็นไดอิเล็กตริก แต่แผ่นกึ่งทรงกระบอกสำหรับติดแผ่นโลหะมีความหนาของวัสดุที่ใช้ติดแผ่นโลหะเท่ากับ t ดังนั้นจากมุมมองด้านบนของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกเมื่อไม่มีของเหลวเป็นไดอิเล็กตริกดังแสดงภาพประกอบ 2-9 a โดยที่แผ่นโลหะทั้งสองของแบบกึ่งทรงกระบอกจะมีรัศมีเท่ากับ R และมีช่องว่างน้อยที่สุดเท่ากับ d ดังนั้นในการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกจะประยุกต์โดยใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข[15] โครงสร้างของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกที่ใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขดังแสดงภาพประกอบ 2-9 b โดยแบ่งแผ่นโลหะ 2 แผ่นที่อยู่ในรูปกึ่งทรงกระบอกของตัวเก็บประจุให้เป็นจำนวน n แผ่นซึ่งมีระยะห่างระหว่างแผ่นเพิ่มขึ้นเป็น Δd สมการวิเคราะห์หาค่าความจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะ 2 แผ่นเล็กๆมีระยะห่างกันประมาณ d และพื้นที่เล็กๆ A แสดงได้ดังสมการที่ 3

$$C = \int_0^a dc = \int_0^a \frac{\epsilon_0 \times a \times dx}{d + x\theta} = \frac{\epsilon_0 \times \epsilon_1 \times A}{d} \left[1 - \frac{a\theta}{d} \right] \quad (3)$$

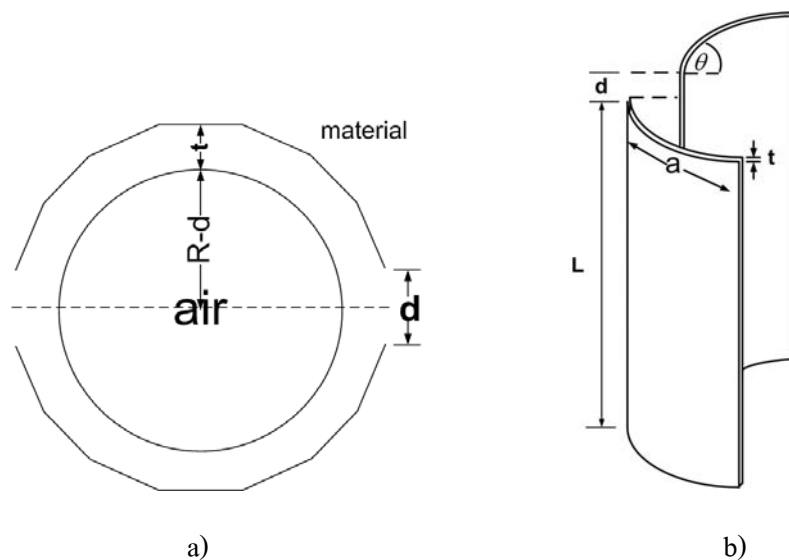
ถ้าคิดเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกมีขนาดใหญ่มาก ($d \gg \theta$) ความจุไฟฟ้าในสมการที่(3) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

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

ดังนั้นค่าระยะห่างระหว่าง d ของแผ่นโลหะทั้งสองที่น้อยที่สุดจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการใช้ในการคำนวณวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

สำหรับแผ่นคู่ขนานเล็กๆสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าได้โดยเปรียบเสมือนมีค่าความจุไฟฟ้าระหว่างตำแหน่ง A และ B ที่เกิดจากค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้ทำท่อ และค่าไดอิเล็กตริกภายในท่อซึ่งในที่นี้คือ อากาศ แสดงในรูปวงจรมุมของค่าความจุไฟฟ้าที่ต่ออนุกรมกันดังที่แสดงในภาพประกอบ 2- 10 โดยใช้สมการที่ (4) สามารถหาผลรวมของความจุไฟฟ้าจากแผ่นคู่ขนานแบบกึ่งทรงกระบอกจำนวน n แผ่นเล็กๆที่แสดงในรูปวงจรมุมของค่าความจุไฟฟ้าดังในภาพประกอบ 2- 11 ได้เป็น

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



ภาพประกอบ 2-9 โครงสร้างการคำนวณของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

a) มุมมองด้านบนสำหรับการคำนวณ

b) โครงสร้างในการคำนวณแสดงการแบ่งแผ่นโลหะแต่ละแผ่น

โดยที่ค่าความจุไฟฟ้าส่วนของขอบ คือ

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

โดยที่ค่าความจุไฟฟ้าส่วนของอากาศ คือ

$$C_{air_1}, C_{air_2}, \dots, C_{air_{n-1}} = \frac{\epsilon_0 A}{\frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + \frac{d + 2(n-1)\Delta d}{\epsilon_a}}, C_{air_N} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_a A}{2(R-t)} \quad (7)$$

โดยที่ค่าพื้นที่หน้าตัดและระยะห่างที่เพิ่มขึ้น ($A, \Delta d$) สามารถหาได้จาก

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

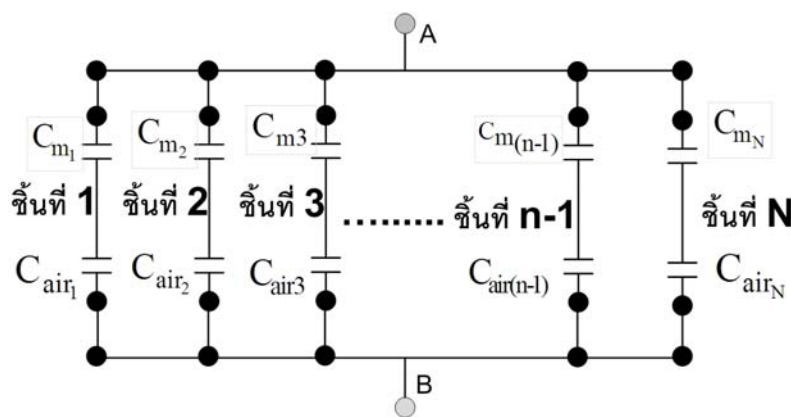
เขียนสมการที่ (5) ได้ใหม่

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

จากสมการพบว่าเมื่อกำหนดให้ค่าระยะห่างของแผ่นโลหะมีค่าคงที่ ค่าความจุไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดความสูงของเซนเซอร์



ภาพประกอบ 2-10 วงจรของค่าความจุไฟฟ้าเล็กๆสำหรับแผ่นคู่ขนานแบบกึ่งทรงกระบอก



ภาพประกอบ 2-11 วงจรสมมูลของค่าความจุไฟฟ้ารวมสำหรับแผ่นคู่ขนานแบบกึ่งทรงกระบอก

2.3.2 กรณีมีไดอิเล็กตริกเป็นอากาศกับของเหลว

โครงสร้างเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก ดังภาพประกอบ 2-12 พบว่าค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์จะแบ่งเป็นความจุไฟฟ้าที่ได้จากของเหลวรวมกับความจุไฟฟ้าที่เป็นอากาศ นั่นคือ ความจุไฟฟ้าของทั้งสองต่อกันแบบขนาน โครงสร้างสำหรับใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขดังแสดงภาพประกอบ 2-13 และแสดงการต่อกันดังวงจรสมมูลที่แสดงในภาพประกอบ 2-14 โดยกรณีไดอิเล็กตริกเป็นของอากาศจะมีขนาดความสูงเท่ากับ $L-h$ และส่วนไดอิเล็กตริกที่เป็นของเหลวมีขนาดความสูงเป็น h สามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าได้จากสมการดังนี้

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

เมื่อความจุไฟฟ้าในส่วนของเหลว คือ

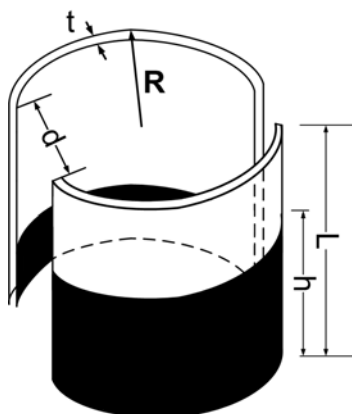
$$C_{w_1}, C_{w_2}, \dots, C_{w_{n-1}} = \frac{\epsilon_0 A}{\frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + \frac{d + 2(n-1)\Delta d}{\epsilon_w}}, \quad C_{w_N} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_w A}{2(R-t)} \quad (10)$$

เขียนสมการในส่วนของความจุไฟฟ้าของเหลวกับวัสดุได้เป็น

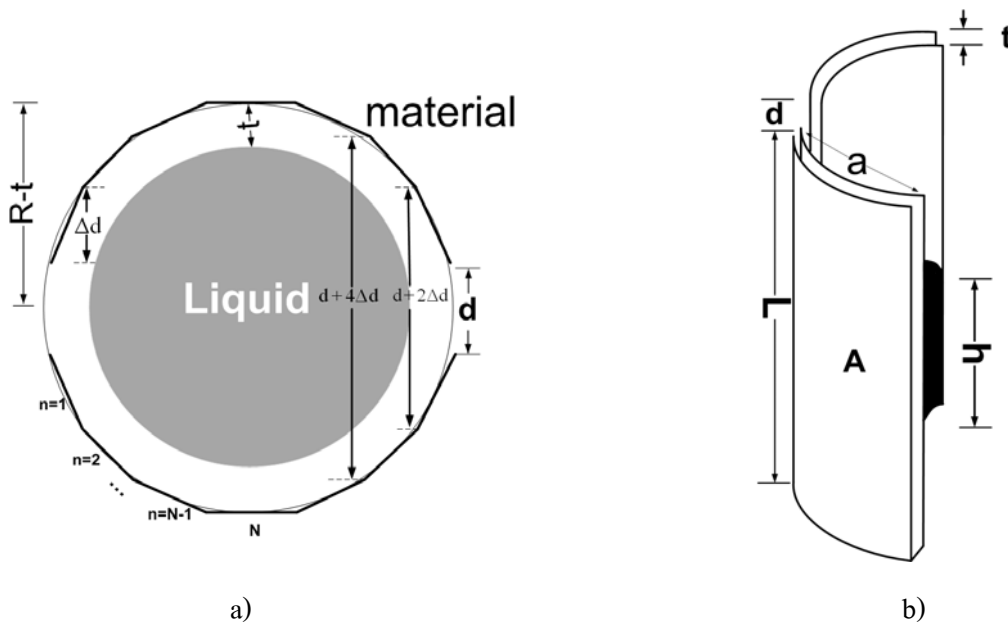
$$C_2 = \epsilon_0 \left(\frac{\pi R - d}{N} \right) (h) \left(2 \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\frac{2(n-1)\Delta d}{\epsilon_m} + \frac{d + 2(n-1)\Delta d}{\epsilon_w}} \right) + \frac{1}{\frac{2t}{\epsilon_m} + \frac{2(R-t)}{\epsilon_w}} \right) \quad (11)$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการหาค่าความจุไฟฟ้าจากสมการที่(9) ได้ดังนี้

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



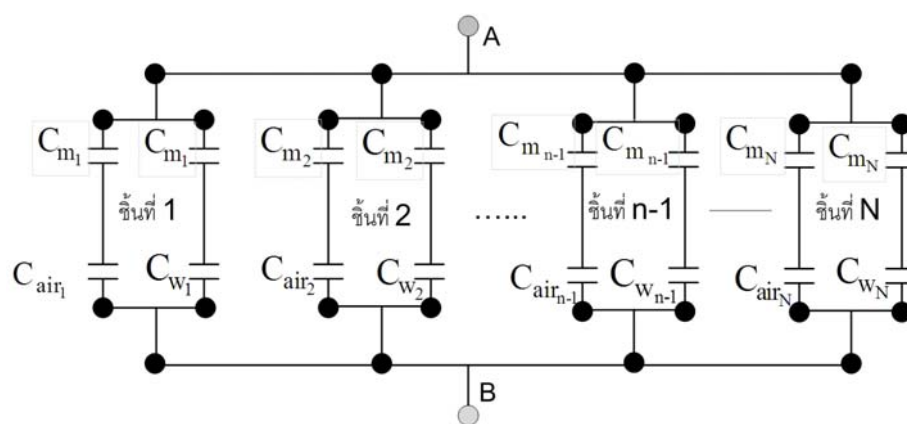
ภาพประกอบ 2- 12 โครงสร้างของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกกรณีมีของเหลว



ภาพประกอบ 2-13 โครงสร้างการคำนวณของเซนเซอร์กรณีมีน้ำและอากาศเป็นไดอิเล็กตริก

- a) มุมมองด้านบนสำหรับการคำนวณ
- b) โครงสร้างในการคำนวณแสดงการแบ่งแผ่นโลหะแต่ละแผ่น

เมื่อ	ϵ_0	คือ ค่า permittivity of free space มีค่าเท่ากับ 8.85pF / m
	ϵ_m	คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกที่เป็นวัสดุ
	ϵ_{air}	คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศ
	ϵ_w	คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกแต่ละชนิดของเหลว
	n	คือ จำนวนของแผ่นโลหะที่ถูกแบ่งย่อยที่ใช้ในการคำนวณ(ชั้น)
	d	คือ ค่าช่องว่างน้อยที่สุดระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง(เมตร)
	Δd	คือ ค่าระยะห่างที่เพิ่มขึ้นของช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง

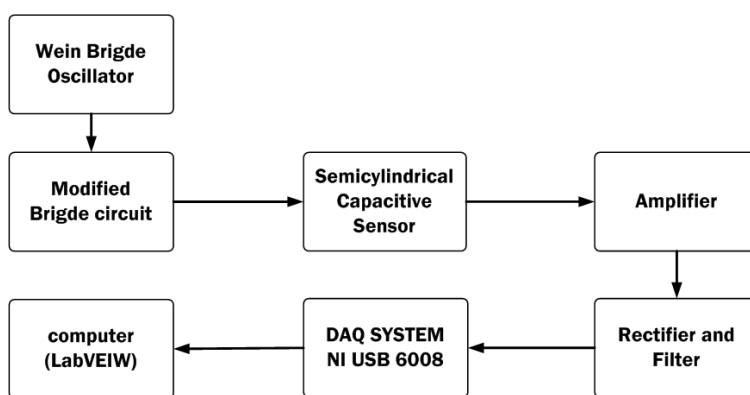


ภาพประกอบ 2-14 วงจรสมมูลของค่าความจุไฟฟ้ารวมสำหรับแผ่นคู่ขนานแบบกึ่งทรงกระบอก
เมื่อใช้วัสดุระดับน้ำ

2.4 การออกแบบวงจรสำหรับเซนเซอร์

สำหรับวงจรที่ใช้ตรวจวัดความจุไฟฟ้าอาศัยเทคนิคในการตรวจวัดได้หลายลักษณะ[9] เช่น การแปลงค่าความจุไฟฟ้าไปเป็นความถี่ เทคนิควงจร single ended เทคนิคการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า เทคนิคการวัดค่าคงที่ทางเวลา (Time constant)[16] การใช้เทคนิค Switching Capacitor ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อน [17,18] การใช้เทคนิค Synchronous demodulation สำหรับสัญญาณที่นำเข้ามาเทียบกับสัญญาณอ้างอิง [19] และการตรวจวัดด้วยวงจรบริดจ์แบบสมดุลอัตโนมัติ [20,21] ซึ่งเป็นวงจรที่ซับซ้อน สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรตรวจวัดความจุไฟฟ้าที่ใช้หลักการพื้นฐานของวงจรบริดจ์แบบวีตสโตน (wheatstone bridge circuit) ซึ่งมีรูปแบบวงจรที่ง่าย และไม่ซับซ้อน แต่มีประสิทธิภาพและความคล่องตัวในการทำงานสูง อีกทั้งความผิดพลาดในการทดลองเนื่องจากความจุไฟฟ้าแฝง (Stray Capacitance) จะมีค่าน้อยที่สุด

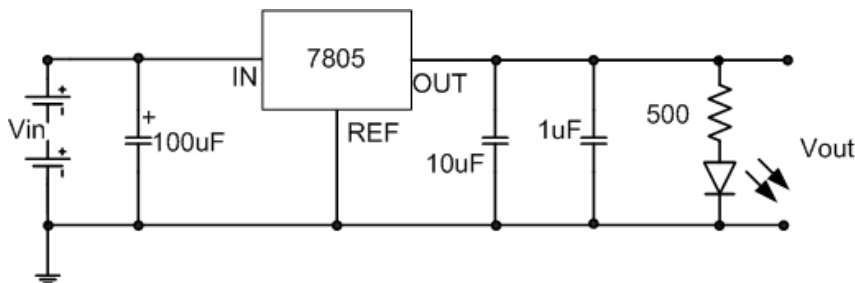
สำหรับการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณได้ประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์ [5] พร้อมวงจรขยายมาใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าเพื่อนำมาวัดระดับของเหลว โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้ากับวงจรบริดจ์ด้วยความถี่คงที่อยู่ในรูปของสัญญาณไซน์ เมื่อทำการแปลงสัญญาณขาออกจากรวงจรบริดจ์ที่มีขนาดเล็กไปเป็นสัญญาณขาออกขนาดใหญ่ด้วยออปแอมป์ ระดับสัญญาณที่ได้จะแปลงไปเป็นระดับสัญญาณกระแสตรงด้วยวงจรกรองเรียงกระแส (Rectifier and filter) จากนั้นระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จะถูกส่งไปยังช่องขาเข้าของระบบ DAQ ที่เชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์สำหรับแสดงผลต่อไป ดังภาพประกอบ 2.15



ภาพประกอบ 2.15 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบการทำงานของเซนเซอร์

2.4.1 วงจรภาคแหล่งจ่ายไฟ

เมื่อทำการจ่ายแรงดันขนาด 9 โวลต์ จากแบตเตอรี่ให้ไอซี 7805 เพื่อรักษาระดับแรงดันที่ 5 โวลต์ จ่ายให้กับไอซี LM 324 ของวงจรบริดจ์ และไอซีเบอร์ LM358 สำหรับวงจรออสซิลเลเตอร์รูปคลื่นไซน์ ดังภาพประกอบ 2.16

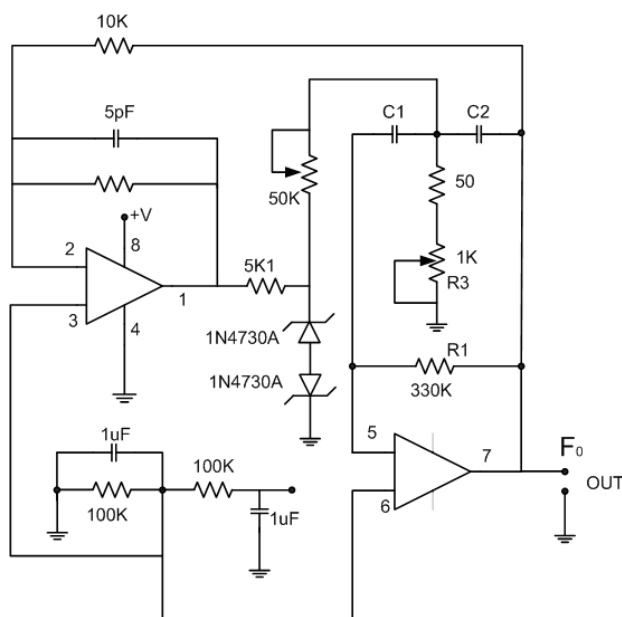


ภาพประกอบ 2.16 วงจรแหล่งจ่ายไฟคงที่ 5 โวลต์

2.4.2 วงจรออสซิลเลเตอร์

สำหรับวงจรออสซิลเลเตอร์ได้ใช้ไอซีเบอร์ LM358 ดังภาพประกอบ 2.17 สำหรับสร้างรูปคลื่นไซน์โดยค่าความถี่ (f_0) ที่ใช้ขึ้นอยู่กับความต้านทาน R_1 และ R_3 และความจุไฟฟ้า C_1 ดังสมการที่ (13)

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



ภาพประกอบ 2.17 วงจรออสซิลเลเตอร์สัญญาณไซน์

2.4.3 การประยุกต์วงจรบริดจ์

เมื่อนำวงจรบริดจ์ มาประยุกต์ใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้วัดระดับของเหลว ดังภาพประกอบ 2.18 โดยในกรณีที่วงจรบริดจ์ไม่สมดุลจะสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าออกของวงจรที่จุด 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

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

และกระแสที่ไหลย้อนกลับของวงจรรออปแอมป์ A_2 มีค่าเท่ากับ

$$I_o = \frac{V_o' - V}{R_f} \tag{15}$$

สำหรับที่จุด D และจุด B เมื่อนำกฎของเคอร์ชอฟมาใช้จะได้

$$I_f + I_4 = I_2 \tag{16}$$

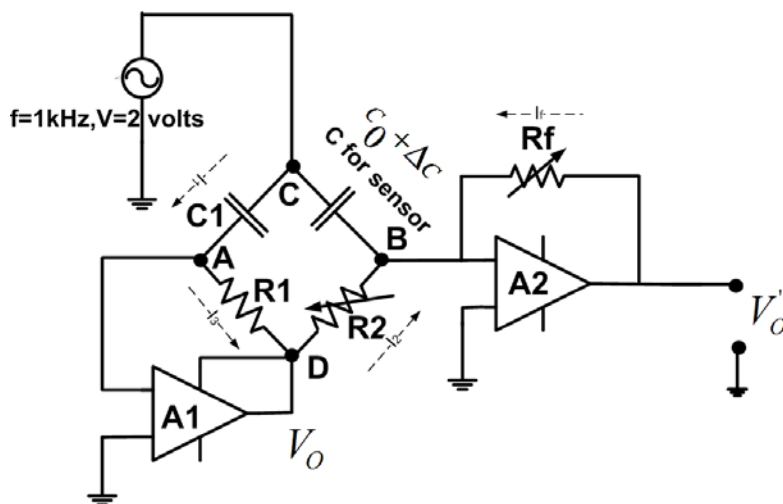
$$I_3 = I_1 \tag{17}$$

สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าออกที่ออปแอมป์ A₂ ได้เท่ากับ

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

สำหรับที่บริดจ์สมดุลเขียนสมการใหม่ได้

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



ภาพประกอบ 2-18 รูปแบบวงจรพื้นฐานที่ใช้กับเซนเซอร์ความจุไฟฟ้า

2.4.4 เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้ากับค่าความจุไฟฟ้า

เมื่อนำเซนเซอร์มาต่อลงในวงจรในกรณีที่ยังไม่ได้วัดระดับของเหลวค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าของเซนเซอร์มีค่าเท่ากับ C₀ นั่นคือวงจรบริดจ์อยู่ในสภาพสมดุลสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าน้อยที่สุดได้จากสมการ

$$C_0 = \frac{R_2 C}{R_1} \tag{20}$$

ดังนั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าอิมพีแดนซ์ของแต่ละตัวได้ดังนี้

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

นำไปแทนในสมการ(19) จะได้แรงดันไฟฟ้าออกเท่ากับ

$$V'_0 = j2\pi fR_f V \Delta C \quad (22)$$

เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เข้ากับวงจรบริดจ์เป็น AC สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายอยู่ในรูป

$V = V_m \sin 2\pi ft$ ดังนั้นสามารถเขียนค่าของ V'_0 ใหม่ได้ดังนี้

$$V'_0 = 2\pi fR_f V \Delta C \quad (23)$$

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

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

ดังนั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและค่าแรงดันได้

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

เมื่อกำหนดให้ $k_3 = 2\pi fR_f V$

เขียนสมการใหม่ได้

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

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าออกของวงจรบริดจ์กับความสูงของระดับของเหลวอยู่ในรูปเชิงเส้น

2.4.5 วัดค่าความจุไฟฟ้าของชนิดของเหลวที่แตกต่างกัน

นำวงจรจากภาพประกอบ 2.18 ประยุกต์ใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้วัดระดับของเหลวเมื่อของเหลวที่ต่างชนิดกัน ดังภาพประกอบ 2.19 โดยทำแผ่นโลหะแบบกึ่งทรงกระบอกเพิ่มในเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าให้ห่างจากเซนเซอร์เป็นระยะ 0.01 เมตร หลักการเพื่อใช้วัดเป็นตัวเปรียบเทียบวัดระดับของเหลวเมื่อเป็นของเหลวที่ต่างชนิดกัน โดยชุดล่างจมอยู่ใต้ระดับของเหลวตลอดเพื่อใช้วัดความจุไฟฟ้าอ้างอิงของของเหลว C_R ซึ่งแปลงไปเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า V_{I0} และชุดบนใช้วัดความจุไฟฟ้าของของเหลว C_S เมื่อระดับของของเหลวเปลี่ยนแปลงซึ่งแปลงไปเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า V_{20} โดยมีวงจรขยายสัญญาณผลต่างเพื่อหาค่า

ผลต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้า V_{2O} และ V_{1O} ซึ่งจะได้ผลต่างของค่าแรงดันไฟฟ้าออก (ΔV) ของชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิตเตอร์ทั้งสองชุด ยังมีค่าเท่าเดิม เมื่อนำไปวัดของเหลวต่างชนิดกันที่มีค่าไดอิเล็กตริกต่างกัน สามารถคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าออกโดยการประยุกต์สมการ (23) เขียนสมการดังนี้

$$\Delta V = V_{2O} - V_{1O} \tag{27}$$

โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าของแผ่นโลหะชุดบน คือ

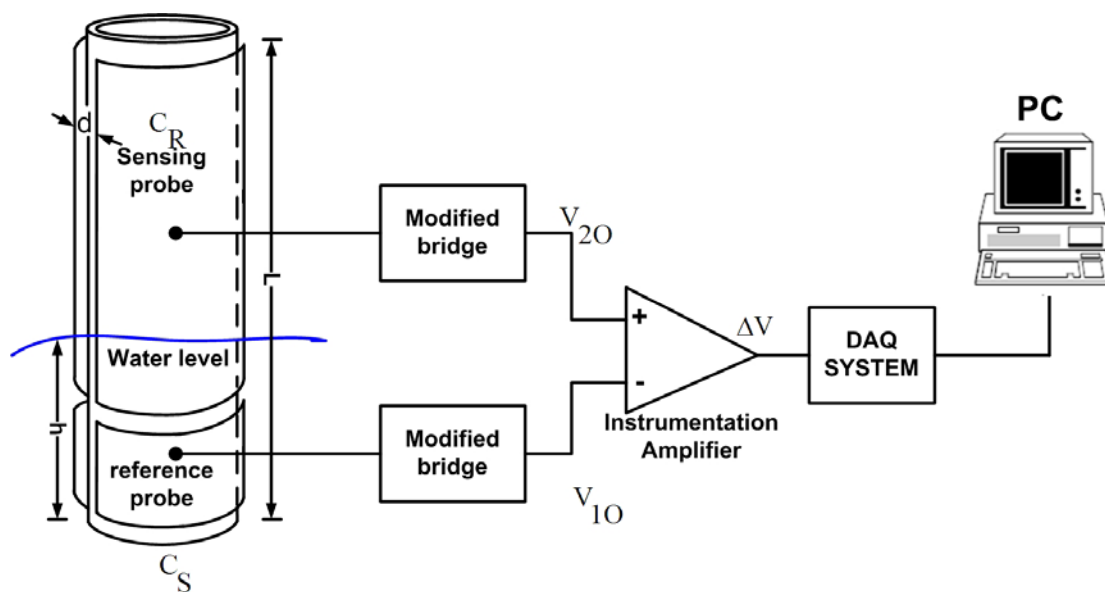
$$V_{2O} = 2\pi f R_f V C_R \tag{28}$$

และค่าแรงดันไฟฟ้าของแผ่นโลหะชุดล่างสำหรับอ้างอิง คือ

$$V_{1O} = 2\pi f R_f V C_S \tag{29}$$

ดังนั้นเขียนสมการ (27)

$$\Delta V = 2\pi f R_f V (C_R - C_S) \tag{30}$$



ภาพประกอบ 2.19 รูปแบบการประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์วัดค่าของเหลวที่ต่างชนิดกัน

หลักการของการสร้างเซนเซอร์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเทคนิคการวัดระดับของเหลวโดยใช้หลักการการวัดค่าความจุไฟฟ้า ได้สร้างและออกแบบเซนเซอร์ให้มีรูปแบบเป็นท่อทรงกระบอกกลวงทำจากวัสดุที่เป็นฉนวน และมีอิเล็กโทรดเป็นแผ่นกึ่งรูปทรงกระบอกทำจากตัวนำไฟฟ้า สำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้า ศึกษาทดสอบและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระดับ

ของเหลวที่เปลี่ยนแปลงและระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน โดยวัดค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องมือวัด LCR ยี่ห้อ Aligent รุ่น 4284A

จากนั้นทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง โดยใช้การประยุกต์วงจรถอดจี้และศึกษาผลของสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ที่อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของ เซลล์ศึกษาผลตอบสนองของเวลาที่วัดต่อเซนเซอร์ โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าผ่าน NI-USB-6008 แสดงผลบนโปรแกรม LabVIEW

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และการทดลอง

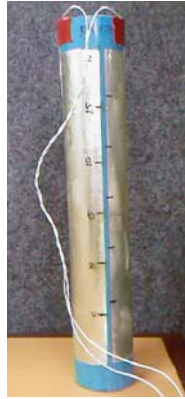
บทนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินการในการทำวิทยานิพนธ์ โดยเริ่มจากการศึกษาออกแบบและสร้างเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก ศึกษาค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ ผลของระยะห่างของแผ่นอิเล็กโทรดของเซนเซอร์ต่อค่าความจุไฟฟ้า ผลของสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อการวัด ผลตอบสนองของเวลากับการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวที่มีต่อเซนเซอร์ การศึกษาความสัมพันธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับของเหลวต่างชนิด

3.1 การออกแบบเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

ศึกษาทดลองการประยุกต์ใช้คุณสมบัติของค่าความจุไฟฟ้าแบบทรงกระบอกมาปรับเปลี่ยนเป็นการใช้เทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกเพื่อวัดระดับของเหลว สร้างและศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าสำหรับวัดระดับของเหลว

3.1.1 รูปแบบของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก

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



ภาพประกอบ 3-1 เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ศึกษาวิธีการคำนวณด้วยการใช้ทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขอาศัยหลักการหาค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นคู่ขนานและทรงกระบอกมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์หาค่าความจุไฟฟ้ากรณีที่โครงสร้างเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกเมื่อไม่มีของเหลวและมีของเหลวเป็นไดอิเล็กตริก กำหนดการคำนวณโดยใช้สมการที่ 8 , 10 และ 12 ตามลำดับ โดยให้แผ่นอิเล็กโทรดของแบบกึ่งทรงกระบอกมีรัศมีเท่ากับ R และมีช่องว่างน้อยที่สุดเท่ากับ d และมีความหนาของวัสดุที่ใช้ติดแผ่นอิเล็กโทรดเท่ากับ t แบ่งแผ่นอิเล็กโทรด 2 แผ่นที่อยู่ในรูปกึ่งทรงกระบอกของตัวเก็บประจุให้เป็นจำนวน n แผ่น มีระยะห่างระหว่างแผ่นเพิ่มขึ้นเป็น Δd วิเคราะห์หาสมการของค่าความจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด 2 แผ่นเล็กๆที่มีระยะห่างกันประมาณ d และมีพื้นที่เล็กๆ A เขียนกราฟแสดงความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณกับจำนวน n แผ่น

3.2 การทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลว

ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง โดยศึกษาหาค่าความถี่ที่เหมาะสมในการป้อนให้กับเซนเซอร์โดยวัดค่าความต้านทาน ค่าอิมพีแดนซ์ และค่ามุมเฟสของอิมพีแดนซ์ที่ระดับ 0.05 เมตร ดังตาราง 3-1 พบว่าความถี่ 1 kHz กับ 10 kHz มีค่าความต้านทานต่ำและให้ค่ามุมเฟสที่แสดงเป็นความจุไฟฟ้าที่ดีกว่าความถี่ค่าอื่น ๆ แต่ความถี่ที่ 1 kHz สามารถนำมาสร้างใช้งานได้สะดวกกว่าความถี่ 10 kHz ดังนั้นจึงเลือกความถี่ที่ 1 kHz ใช้ในการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือมาตรฐานกับ

ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับแผนภาพการทำงานดังภาพประกอบ 3.2 กำหนดของเหลวที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำ

ตารางที่ 3-1 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ กับค่าความต้านทาน อิมพีแดนซ์และค่ามุมเฟสของเซนเซอร์

f(KHz)	R(M Ω)	Z(M Ω)	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

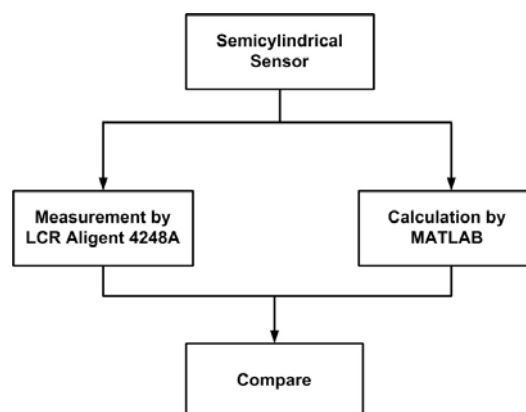
สมมติฐาน

1. เมื่อระดับของเหลวมีการเปลี่ยนแปลงย่อมส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์
2. ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณด้วยทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของเซนเซอร์น่าจะให้ผลใกล้เคียงกัน

ขั้นตอนการทดลอง

1. สร้างเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.30 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.025 เมตร แสดงดังภาพประกอบ 3-1

2. นำเซนเซอร์ความจุไฟฟ้ามาต่อเข้ากับเครื่องมือวัด LCR ยี่ห้อ Aligent รุ่น 4284A พร้อมทั้งป้อนความถี่คงที่ 1 kHz แรงดันไฟฟ้ากระแสคูล์น 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. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟฮิสเตอรีซิส (Hysteresis) ของเซนเซอร์
7. คำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าเมื่อใช้เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก โดยใช้โปรแกรม MATLAB โดยกำหนดให้ n เป็นจำนวนของแผ่นโลหะที่ถูกแบ่งย่อย เริ่มต้นในการคำนวณตั้งแต่ 2 ขึ้นขึ้นไป ที่ระดับน้ำ 0.09 เมตร
8. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับจำนวนของแผ่นโลหะที่ถูกแบ่งย่อย
9. จากกราฟในข้อ 8) หาค่าคงที่ของจำนวน n ขึ้น นำค่าที่มากำหนดหาความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ ที่ระดับน้ำตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.30 เมตร
10. เขียนกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือกับความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ



ภาพประกอบ 3-2 แผนภาพการเปรียบเทียบผลค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัดและการคำนวณ

3.3 ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระยะห่างของแผ่นอิเล็กโทรดของเซนเซอร์

ทำการทดสอบและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน

สมมติฐาน

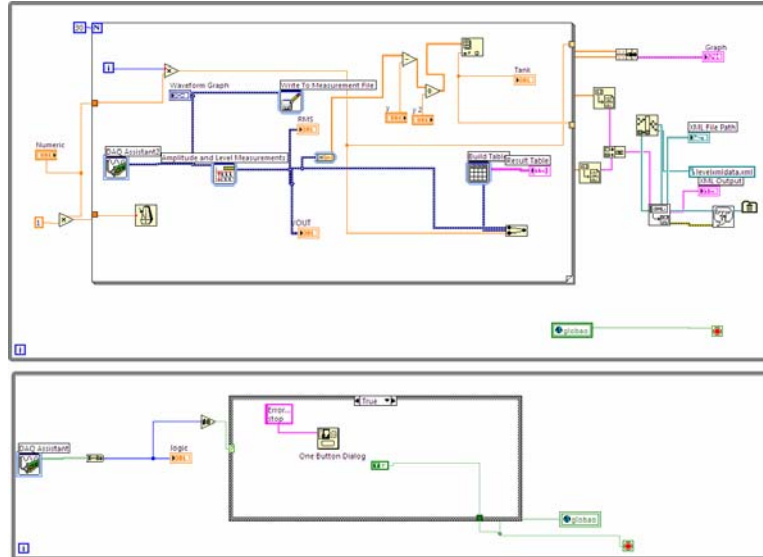
เมื่อขนาดระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดของเซนเซอร์เปลี่ยนแปลงย่อมส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้า เมื่อระดับน้ำและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่

ขั้นตอนการทดลอง

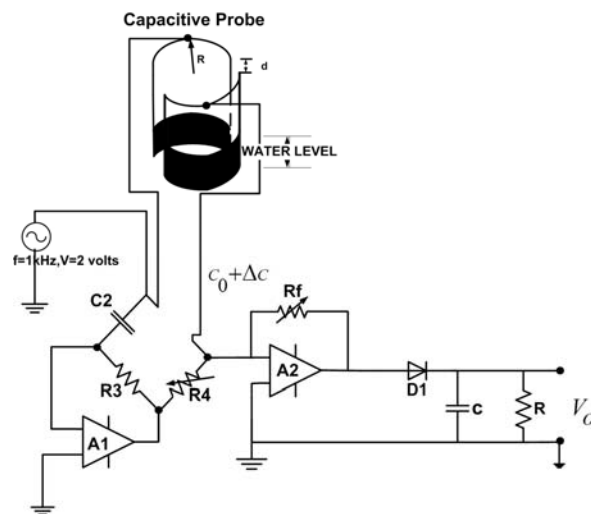
1. นำเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.30 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.025 เมตร มาต่อเข้ากับเครื่องมือวัด LCR ยี่ห้อ Aligent รุ่น 4284A พร้อมทั้งป้อนความถี่คงที่ 1 kHz แรงดันไฟฟ้ากระตุ้น 2 V ให้กับเซนเซอร์
2. ทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ระดับน้ำต่างๆ โดยทดลองซ้ำ 10 ครั้ง บันทึกผลการทดลอง
3. เปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดเป็นระยะ 0.015 และ 0.05 เมตร ตามลำดับ โดยให้ระยะห่างของเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ ทดลองซ้ำในข้อ 2
4. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความจุไฟฟ้ากับขนาดระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดของเซนเซอร์

3.4 การศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลว

ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง แสดงค่าการวัดระดับของเหลวผ่านคอมพิวเตอร์โดยรับค่าสัญญาณผ่าน NI USB-6008 หลักการทำงานดังภาพประกอบ 2-15 โดยเขียนโปรแกรมการทำงานของโปรแกรม LabVIEW ดังภาพประกอบ 3-3 ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าออกด้วยการประยุกต์วงจรบริดจ์ ดังภาพประกอบ 3-4 เมื่อของเหลวที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำ



ภาพประกอบ 3-3 Block diagram ของโปรแกรม LabVIEW



ภาพประกอบ 3-4 วงจรที่ประยุกต์ใช้วัดระดับของเหลว

สมมติฐาน

เมื่อระดับของเหลวมีการเปลี่ยนแปลงย่อมส่งผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์

ขั้นตอนการทดลอง

1. นำเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.048 เมตร ความยาวของแผ่นอิเล็กโทรด 0.40 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.005 เมตร ความหนาของท่อพีวีซี 0.002 เมตร ต่อเข้ากับประยุคต์วงจรบริดจ์ใช้แรงดันไฟฟ้าคลื่นสัญญาณไซน์กระตุ่น (V_{in}) 2 V ความถี่ 1 kHz
2. ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าออกที่ระดับน้ำตั้งแต่ 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 หาความผิดพลาดของค่าระดับน้ำจริงกับค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์

3.5 การศึกษาผลสถานะแวดล้อมที่มีผลต่อเซนเซอร์

ศึกษาผลของสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ คือ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าออกด้วยประยุคต์วงจรบริดจ์ ดังภาพประกอบ 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 เมื่อแรงดันไฟฟ้าคลื่นสัญญาณไซน์กระตุ่น (V_{in}) 2 V ความถี่ 1 kHz
2. วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ระดับน้ำ 0.10 เมตร ตั้งแต่ระดับอุณหภูมิที่ 30 ถึง 60 °C โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 2 °C บันทึกผลการทดลอง
3. นำข้อมูลที่ได้อมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับอุณหภูมิ

- วัดค่าแรงดันไฟฟ้า ณ ช่วงเวลาที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกัน ที่ระดับน้ำ 0.20 เมตร บันทึกผลการทดลอง
- นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความชื้นสัมพัทธ์

3.6 การศึกษาผลตอบสนองของเวลาที่มีต่อเซนเซอร์

ศึกษาผลตอบสนองของเวลาที่มีต่อเซนเซอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวแบบฉับพลัน โดยแบ่งกรณีศึกษาเป็น 2 กรณี คือ เมื่อเซนเซอร์เคลื่อนที่ผ่านของเหลว และของเหลวเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์ วัดค่าแรงดันไฟฟ้าออกด้วยการประยุกต์วงจรบริดจ์ ดังภาพประกอบ 3-4 ใช้แรงดันไฟฟ้าคลื่นสัญญาณไซน์กระตุ้น (V_{in}) 2 V ความถี่คงที่ 1 kHz ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก 0.048 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ 0.40 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.005 เมตร และความหนาของท่อพีวีซี เท่ากับ 0.002 เมตร ของเหลวที่ใช้ในทดลองคือ น้ำ แสดงค่าการวัดระดับน้ำผ่านคอมพิวเตอร์โดยการรับค่าสัญญาณผ่าน NI USB-6008 แสดงผลด้วยโปรแกรม LabVIEW

สมมติฐาน

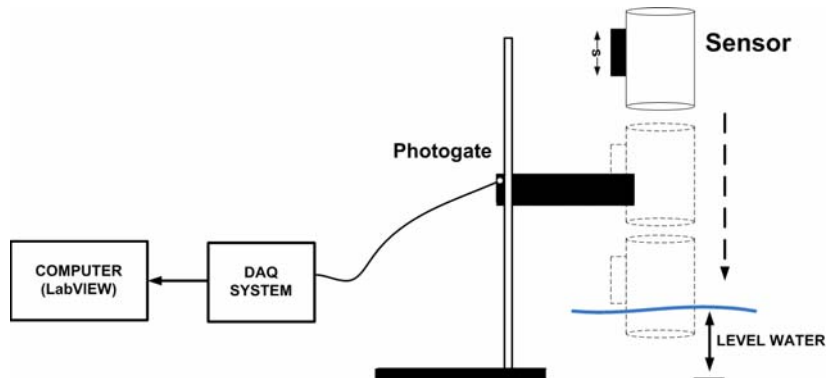
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวอย่างรวดเร็วย่อมส่งผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์โดยทันที

3.6.1 กรณีเซนเซอร์เคลื่อนที่ผ่านของเหลว

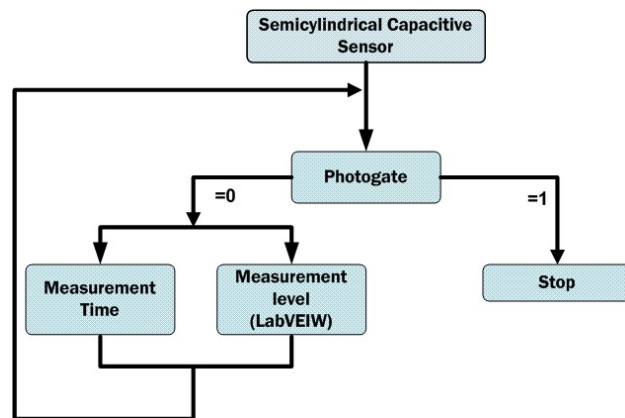
ขั้นตอนการทดลอง

- นำเซนเซอร์เคลื่อนที่ลงไปใต้น้ำผ่านโฟโต้เกต (Photogate) เป็นระยะทาง(S) 0.10 เมตร ดังภาพประกอบ 3-5 เมื่อโฟโต้เกตมีสัญญาณเท่ากับ 0 จะเริ่มจับเวลาในการเคลื่อนที่และวัดแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ แต่เมื่อโฟโต้เกตมีสัญญาณเท่ากับ 1 การวัดเวลาและแรงดันไฟฟ้าจะหยุดลงทันทีบล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานดังภาพประกอบ 3-6 บันทึกผลการทดลอง
- นำเซนเซอร์เคลื่อนที่ขึ้นจากน้ำผ่านโฟโต้เกตให้เคลื่อนที่เป็นระยะทางเท่าเดิม บันทึกผลการทดลอง

3. นำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้ากับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่
4. หาค่าเวลาที่ล่าช้า (Die time) และเวลาสู่จุดสมดุล (Settling time) ของเซนเซอร์



ภาพประกอบ 3-5 รูปแบบในการศึกษาผลตอบสนองของเซนเซอร์เคลื่อนที่ผ่านของเหลว



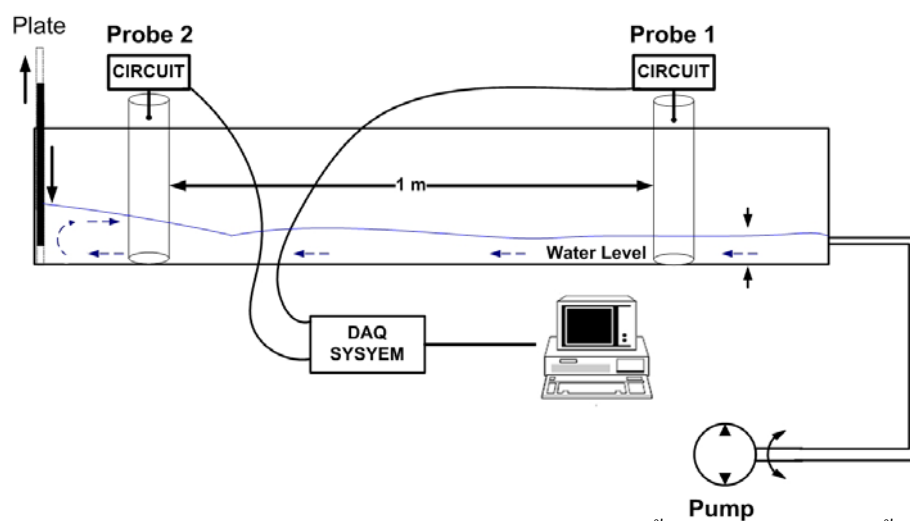
ภาพประกอบ 3-6 แผนภาพแสดงการทำงานของเซนเซอร์เคลื่อนที่ผ่านของเหลว

3.6.2 กรณีของเหลวเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์

ออกแบบการทดลองโดยใช้หลักการทางชลศาสตร์ เพื่อจำลองสภาวะการเปลี่ยนแปลงของน้ำในรางเปิดที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมโยธา

ขั้นตอนการทดลอง

1. นำเซนเซอร์จำนวน 2 อัน มาวางในรางน้ำเปิดจำลอง วางห่างกันเป็นระยะ 1 เมตร ดังภาพประกอบ 3-7
2. เปิดน้ำให้ไหลผ่านเซนเซอร์ทั้งสอง สังเกตการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำและวัดแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ทั้งสอง บันทึกผลการทดลอง
3. นำแผ่นกั้นทำคลื่นมาวางกั้น สังเกตการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำและวัดแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ทั้งสอง บันทึกผลการทดลอง
4. นำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้ากับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่
5. หาค่าเวลาที่ล่าช้า (Die time) และเวลาสู่จุดสมดุล (Settling time) ของเซนเซอร์



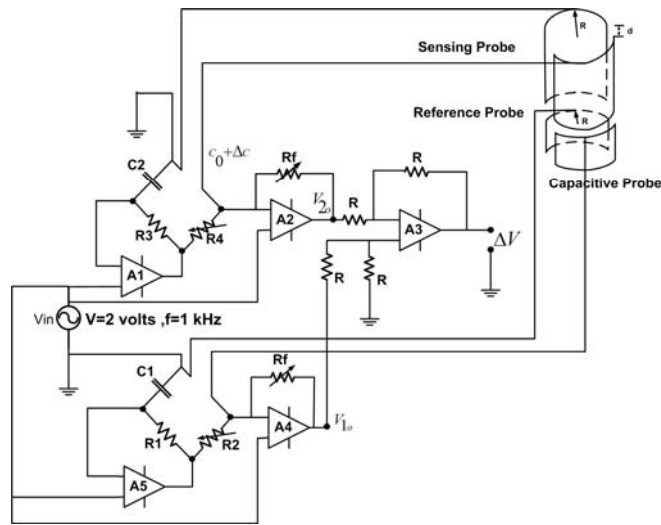
ภาพประกอบ 3-7 การจัดวางอุปกรณ์และการจัดแผ่นตัวกั้นคลื่นลงในรางวางน้ำ

3.7 การศึกษาความสัมพันธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับของเหลวต่างชนิด

ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระดับน้ำในระบบเปิดต่างกัน 3 ชนิด คือ น้ำดื่ม น้ำคลอง และน้ำทะเล วัดค่าแรงดันไฟฟ้าออกด้วยการประยุกต์วงจรบริดจ์ โดยใช้ชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอก 2 ชุด ดังภาพประกอบ 3-8 แสดงค่าการวัดระดับของเหลวผ่านคอมพิวเตอร์โดยการรับค่าสัญญาณผ่าน NI USB-6008 และแสดงผลด้วยโปรแกรม LabVIEW

สมมติฐาน

เมื่อประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์โดยมีชุดอิเล็กโทรดกึ่งทรงกระบอก 2 ชุด วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าออกกับระดับของเหลวในระบบเปิดต่างชนิดกันยอมให้ผลการทดลองที่เหมือนกัน



ภาพประกอบ 3-8 การประยุกต์ใช้วงจรบริดจ์วัดของเหลวต่างชนิดกัน

ขั้นตอนการทดลอง

1. นำเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกมีชุดอิเล็กโทรดกึ่งทรงกระบอก 2 ชุด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063 เมตร ความยาวของแผ่นอิเล็กโทรด 0.30 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.005 เมตร และความหนาของท่อพีวีซี เท่ากับ 0.002 เมตร ดังภาพประกอบ 3-9 ใช้แรงดันไฟฟ้าคลื่นสัญญาณไซน์กระตุ้น (V_{in}) 2 V ความถี่ 1 kHz
2. ทำการวัดหาค่าแรงดันไฟฟ้าออกที่ระดับน้ำตั้งแต่ 0 ถึง 0.30 เมตร เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 เมตร โดยทดลองซ้ำ 10 ครั้ง บันทึกผลการทดลอง
3. เปลี่ยนของเหลวจากน้ำดื่มเป็นน้ำคลองและน้ำทะเลตามลำดับ ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 2) บันทึกผลการทดลอง
4. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำชนิดต่างๆ



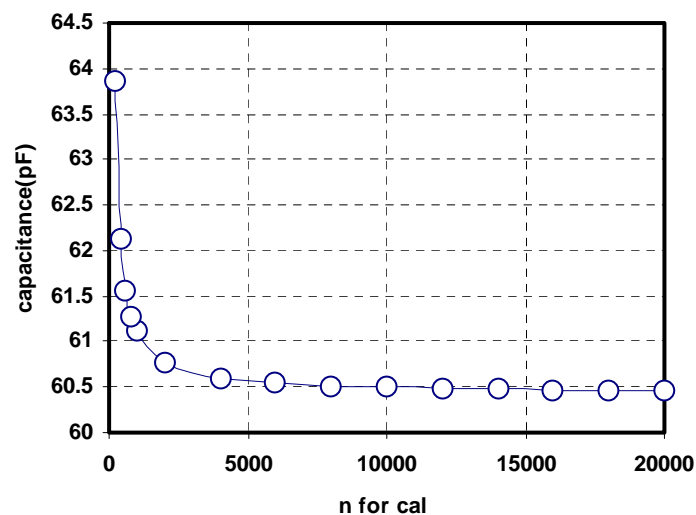
ภาพประกอบ 3-9 เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกมีชุดอิเล็กทรอนิกส์ 2 ชุด
ที่ใช้ในการทดลอง

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 แสดงภาพประกอบ 4.1



ภาพประกอบ 4.1 ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณเมื่อ n แตกต่างกัน

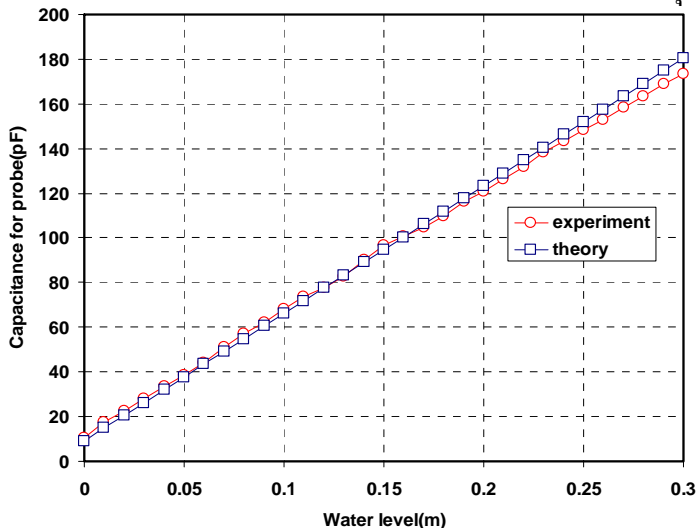
4.2 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลว

ทำการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์กับระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง ของเหลวที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำ

4.2.1 เปรียบเทียบความจุไฟฟ้าจากการคำนวณกับการวัดโดยตรง

เมื่อกำหนดเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์เท่ากับ 0.30 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.025 เมตร วัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัด LCR ยี่ห้อ Aligent รุ่น 4284A ความถี่ที่ 1 kHz แรงดันไฟฟ้ากระตุ้น 2 V เปรียบเทียบกับผลการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าโดยสมการที่ เมื่อกำหนดให้ n เป็นจำนวนของแผ่นโลหะที่ถูกแบ่งย่อยเท่ากับ 10,000 ชิ้น ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้แปร

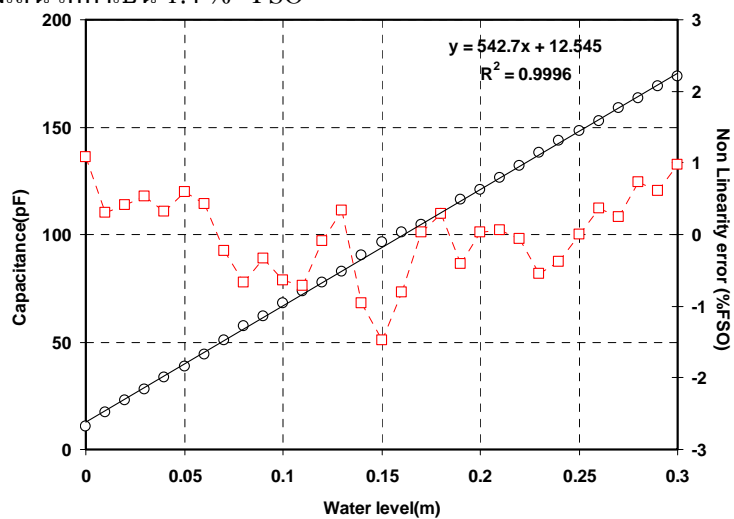
ผันตรงกับค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนไปโดยจะอยู่ในช่วงพิโคฟาร์ด(pF) ดังภาพประกอบ 4.2 พบว่าค่าที่ได้จากผลการทดลองจะมีค่ามากกว่าจากการคำนวณเนื่องมาจากค่าความจุไฟฟ้าแฝง



ภาพประกอบ 4.2 ผลเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณกับการวัดโดยตรง

4.2.2 ค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

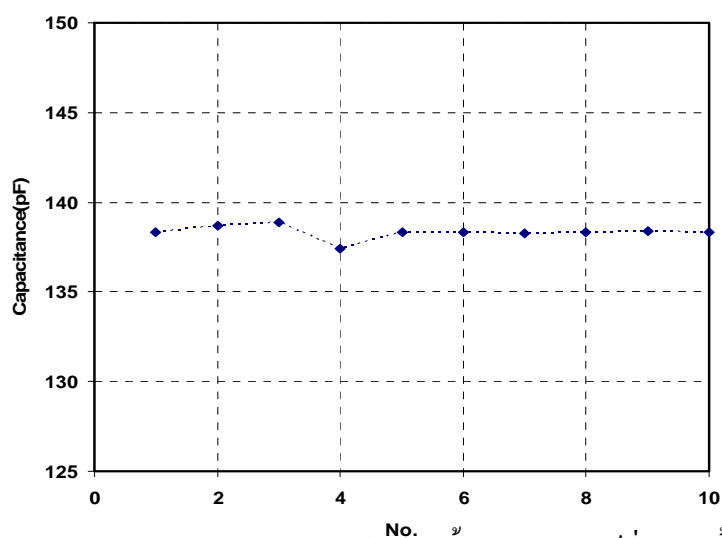
วัดความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063 เมตร ขนาดความยาวของแผ่นอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.30 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 0.025 เมตร ค่าที่ได้จะแปรผันตรงกับค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนไป โดยค่าความจุไฟฟ้าอยู่ในช่วงพิโคฟาร์ด (pF) แสดงคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นภาพประกอบ 4.3 และคำนวณผลค่าความไม่เป็นเชิงเส้นได้ค่าเป็น 1.4 % FSO



ภาพประกอบ 4.3 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและค่าผิดพลาดเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นกับระดับน้ำ

4.2.3 ค่าความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

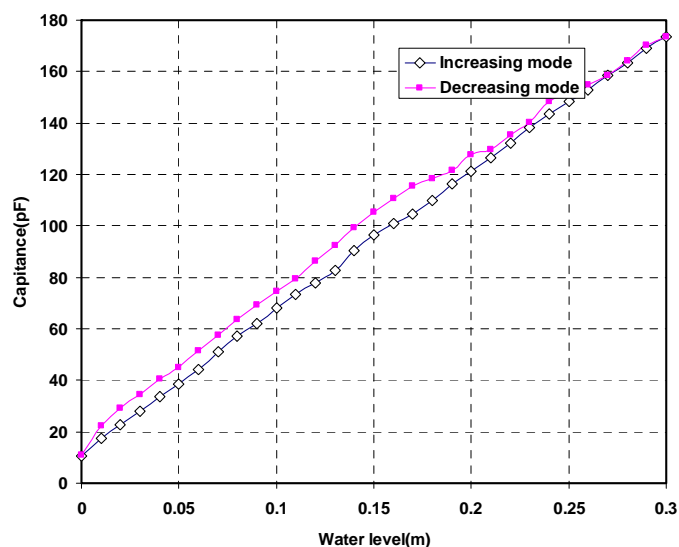
วัดความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ ตั้งแต่ระดับน้ำค่า 0.01 ถึง 0.30 เมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.01 เมตร และทดลองซ้ำ 10 ครั้ง จะได้ค่าความสามารถในการทำซ้ำ 0.83 % ที่ระดับน้ำ 0.23 เมตร แสดงดังภาพประกอบที่ 4.4



ภาพประกอบ 4.4 ค่าความสามารถในการทำซ้ำของเซนเซอร์ที่ระดับน้ำ 0.23 เมตร

4.2.4 ค่าฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

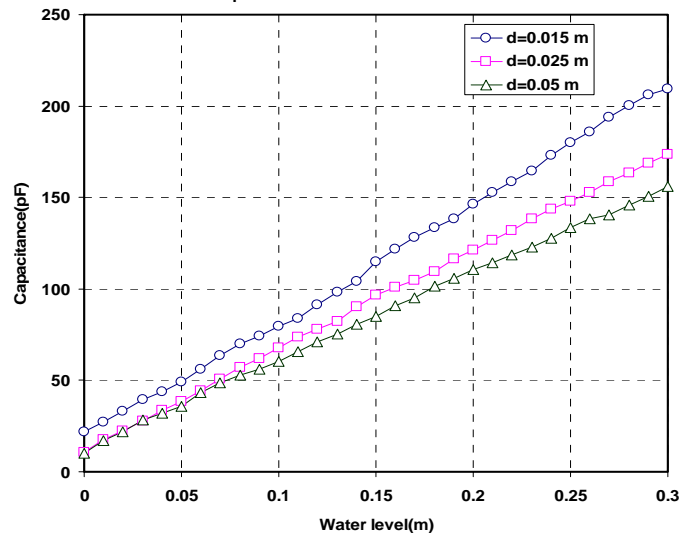
เมื่อวัดความจุไฟฟ้าที่วัดได้เทียบกับระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงในลักษณะเพิ่มและลด ระดับน้ำความสัมพันธ์ระหว่างค่าฮิสเทอรีซิสแสดงดังภาพประกอบ 4.5 ได้ค่าฮิสเทอรีซิสเท่ากับ 6.13 %FSO



ภาพประกอบ 4.5 Hysteresis ของค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำ

4.3 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระยะห่างของแผ่นอิเล็กโทรดของเซนเซอร์

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



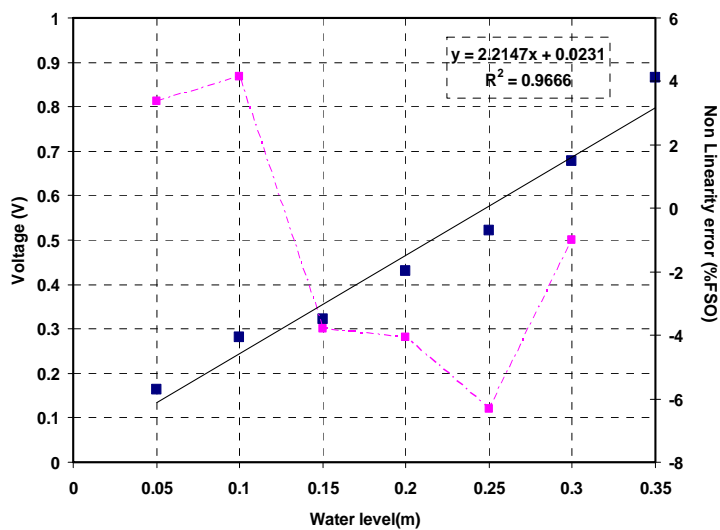
ภาพประกอบ 4.6 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำเมื่อแผ่นอิเล็กโทรดวางห่างกันเป็นระยะต่างๆ

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 ความถี่คงที่ 1 kHz แสดงค่าการวัดระดับของเหลวผ่านคอมพิวเตอร์โดยการรับค่าสัญญาณผ่าน USB 6008 และแสดงผลด้วยโปรแกรม LabVIEW ทำการวัดค่าระดับน้ำตั้งแต่ 0 ถึง 0.35 เมตร เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 เมตร

4.4.1 ค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

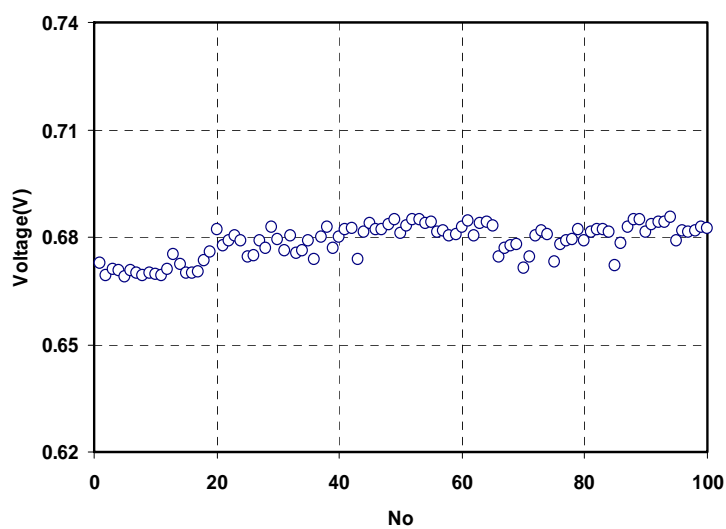
แรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ค่าที่ได้จะแปรผันตรงกับค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนไปโดยค่าที่ได้จะอยู่ในช่วงมิลลิโวลต์ (mV) แสดงคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นดังภาพประกอบ 4.7 และคำนวณผลค่าความไม่เป็นเชิงเส้นได้ค่าเป็น 7.65 % FSO และได้ค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty) 0.00218 โวลต์



ภาพประกอบ 4.7 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและระดับน้ำ

4.4.2 ค่าความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

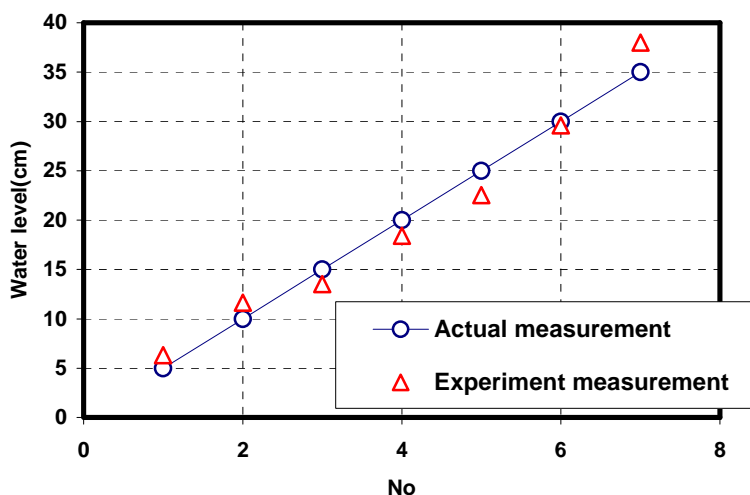
วัดแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ ตั้งแต่ระดับน้ำ 0.05 ถึง 0.35 เมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 เมตร ทดลองซ้ำ 100 ครั้ง ดังภาพประกอบ 4.8 ได้ค่าความสามารถในการทำซ้ำ 1.88 % ที่ระดับน้ำ 0.30 เมตร



ภาพประกอบ 4.8 ค่าความสามารถในการทำซ้ำของแรงดันไฟฟ้าที่ระดับน้ำ 0.30 เมตร

4.4.3 เปรียบเทียบค่าระดับน้ำจริงกับค่าที่ได้จากการทดลอง

เปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์เป็นระดับน้ำ 0.05 ถึง 0.35 เมตร เปรียบเทียบค่าจริงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ดังภาพประกอบ 4.9 พบว่า มีค่าความผิดพลาดสูงสุด 8.54% ที่ระดับน้ำ 0.35 เมตร



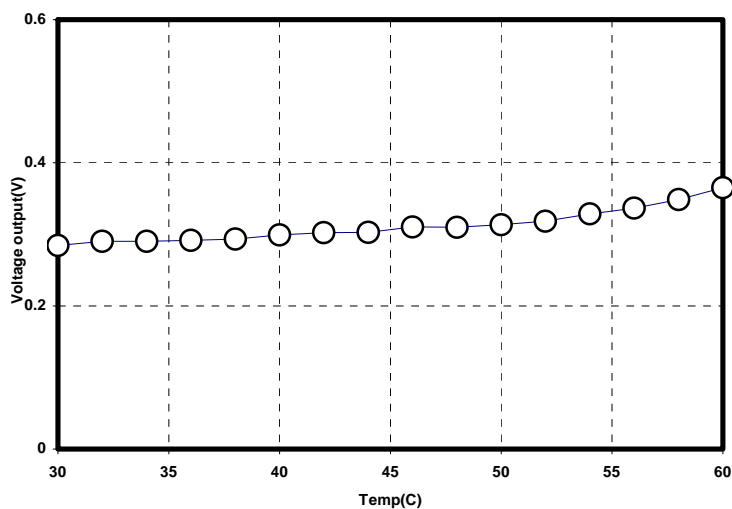
ภาพประกอบ 4.9 เปรียบเทียบค่าระดับน้ำจริงกับค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์

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 ความถี่ที่ 1 kHz แสดงค่าการวัดระดับของเหลวผ่านคอมพิวเตอร์โดยการรับค่าสัญญาณผ่าน USB 6008 และแสดงผลด้วยโปรแกรม LabVIEW

4.5.1 ผลของอุณหภูมิ

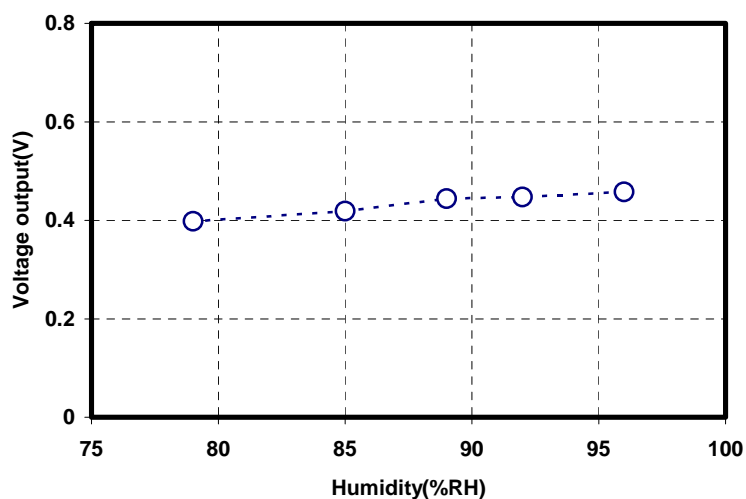
ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ ที่ระดับน้ำ 0.10 เมตร ทำการวัดตั้งแต่ระดับอุณหภูมิ 30 ถึง 60 °C โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 2 °C ดังภาพประกอบ 4.10



ภาพประกอบ 4.10 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิ

4.5.2 ผลของความชื้นสัมพัทธ์

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับความชื้นสัมพัทธ์ ที่ระดับน้ำ 0.20 เมตร ในช่วงเวลาที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกันตั้งแต่ 76 จนถึง 96 %RH ดังภาพประกอบ 4.11



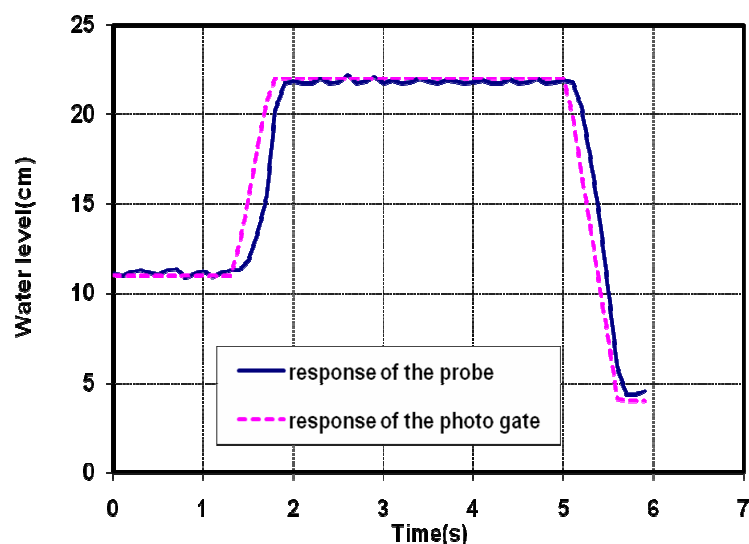
ภาพประกอบ 4.11 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและความชื้นสัมพัทธ์

4.6 ผลตอบสนองของเวลาที่มิติต่อเซนเซอร์

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

4.6.1 การจุ่มเซนเซอร์ในระดับด้วยความเร็วคงที่

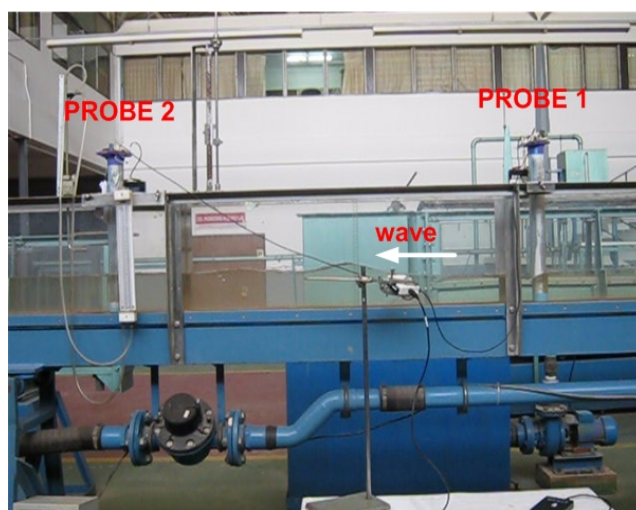
ทำการจับเวลาในการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์ผ่านโฟโต้เกต(Photogate) พร้อมทั้งวัดค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลง ภาพประกอบ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับเวลาเมื่อให้เซนเซอร์เคลื่อนที่จุ่มลงในน้ำด้วยระยะทาง 0.10 เมตร และได้เวลาในการเคลื่อนที่โดยอ่านได้จากเครื่องจับเวลาได้เท่ากับ 0.372 วินาที ดังนั้นสามารถคำนวณความเร็วของเซนเซอร์เท่ากับ 0.269 เมตรต่อวินาที ในขณะที่การคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์โดยใช้เทคนิคที่นำเสนอนี้จะได้ 0.260 เมตรต่อวินาที สำหรับกรณีเคลื่อนที่ของเซนเซอร์ที่ยกขึ้นจากระดับน้ำเวลาในการเคลื่อนที่โดยอ่านได้จากเครื่องจับเวลาได้เท่ากับ 0.318 วินาที และความเร็วในการเคลื่อนที่คำนวณได้เป็น 0.314 เมตรต่อวินาที และในขณะที่การคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์โดยใช้เทคนิคที่นำเสนอนี้จะได้ 0.271 เมตรต่อวินาที พบว่าผลตอบสนองเชิงพลวัตของเซนเซอร์นี้มีเวลาที่ล่าหลัง(Dead time) 0.2 วินาที และเวลาสู่จุดสมดุล (Settling time) 2.1 วินาที



ภาพประกอบ 4.12 ความสัมพันธ์ของระดับน้ำกับเวลาระหว่างค่าที่ทดลองกับค่ามาตรฐานกรณีจุ่มลงไปและยกขึ้นจากในน้ำ

4.6.2 กรณีการทดสอบในสภาวะการเปลี่ยนแปลงของน้ำอย่างรวดเร็ว

ในการศึกษาจะใช้หลักการทางชลศาสตร์จำลองสภาวะการเปลี่ยนแปลงของน้ำในรางเปิด โดยวางเซนเซอร์จำนวน 2 หัวในรางน้ำเปิดจำลองที่ห่างกันเป็นระยะ 1 เมตร นำแผ่นกั้นทำคลื่นมาวาง วัดระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปโดยเทคนิคที่นำเสนอแสดงผลด้วยโปรแกรม LabVIEW ภาพประกอบ 4.13 แสดงกรณีจำลองสถานการณ์น้ำไหลเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์ ภาพประกอบ 4.13 a กรณีการคลื่นน้ำเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์ตัวที่ 1 ก่อนไหลผ่านไปยังเซนเซอร์ตัวที่ 2 ภาพประกอบ 4.13 b นำแผ่นพลาสติกมากั้นน้ำระหว่างเซนเซอร์ทั้งสองเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำโดยฉับพลัน ทำให้ระดับน้ำของเซนเซอร์ตัวที่ 1 เพิ่มขึ้นส่วนระดับน้ำของเซนเซอร์ตัวที่ 2 ลดลง

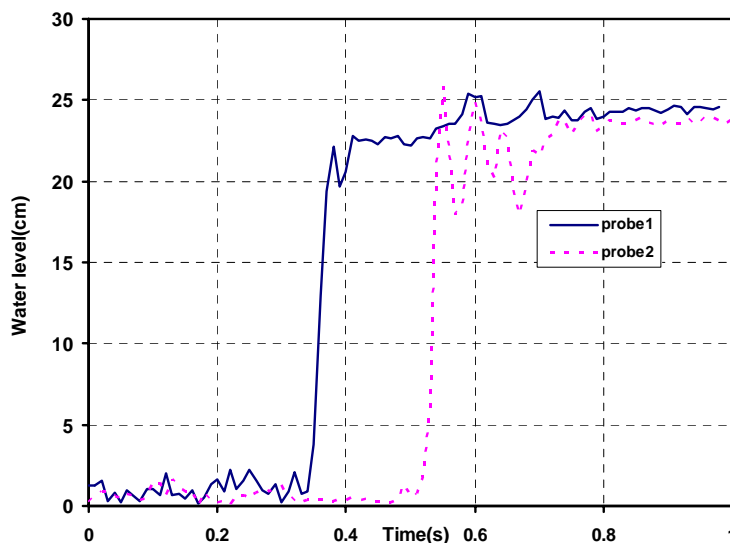


a) กรณีคลื่นน้ำเคลื่อนที่กระทบเซนเซอร์ตัวที่ 1 และ 2

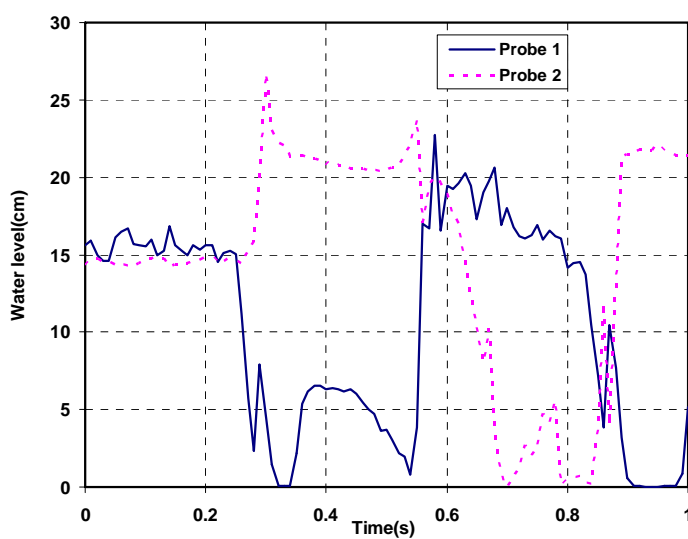


b) กรณีการทำให้เกิดคลื่นระหว่างเซนเซอร์ทั้งสอง

ภาพประกอบ 4.13 กรณีจำลองสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์



a) กรณีคลื่นน้ำเคลื่อนที่กระทบเซนเซอร์ตัวที่ 1 และ 2

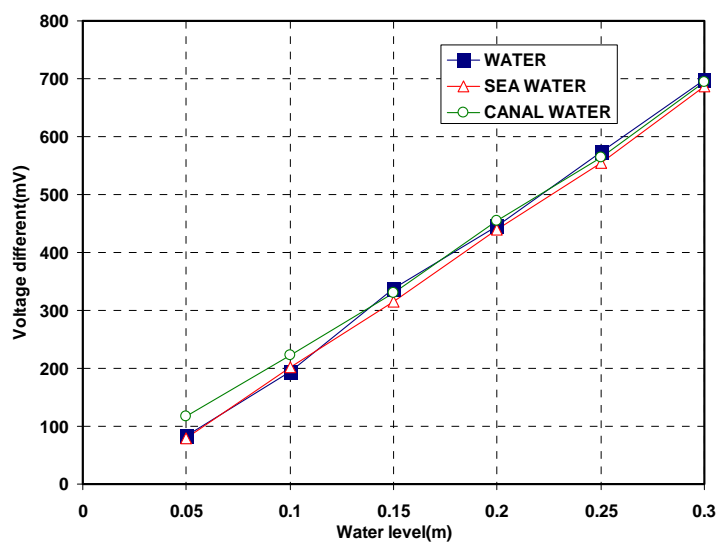


b) การทำให้เกิดคลื่นระหว่างเซนเซอร์ทั้งสอง

ภาพประกอบ 4.14 ความสัมพันธ์ของระดับน้ำกับเวลา

4.7 ความสัมพันธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับของเหลวต่างชนิด

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



ภาพประกอบ 4.15 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและระดับของเหลว เมื่อของเหลวต่างชนิดกัน

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 ได้ค่าความไม่เชิงเส้นได้ค่าเป็น 1.4 % FSO ค่าความสามารถในการทำซ้ำได้ค่าเป็น 0.83 % FSO และค่าฮิสเตอร์ีซิสเท่ากับ 6.13% FSO

5.1.3 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์และระดับของเหลว

สำหรับการประยุกต์วงจรมัลติไมเตอร์ใช้วัดค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อระดับน้ำเปลี่ยนไปตั้งแต่ 0.05 ถึง 0.35 เมตร เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 เมตร ในแต่ละครั้งทดลองซ้ำ 100 ครั้ง พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าแปรผันตรงกับระดับน้ำและมีค่าอยู่ในช่วงมิลลิโวลต์(mV) ได้ค่าความไม่แน่นอนเชิงเส้น 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 สรุปผลการศึกษาผลสถานะแวดล้อมที่มีผลต่อเซนเซอร์

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 สรุปผลการศึกษาผลตอบสนองของเวลาที่วัดต่อเซนเซอร์

ผลการศึกษาผลตอบสนองเชิงพลวัตเพื่อศึกษาผลตอบสนองของเวลาได้ทำการศึกษาเป็น 2 กรณี คือ การจุ่มเซนเซอร์ในของเหลวด้วยความเร็วคงที่และสถานะการเปลี่ยนแปลงน้ำอย่างรวดเร็ว โดยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและจับเวลาในการเคลื่อนที่โดยใช้โฟโตเกต(Photogate) พบว่า ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัววัดที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าความเร็วที่ได้จากคำนวณ ส่วนการศึกษาโดยใช้หลักการทางชลศาสตร์เพื่อจำลองสถานะน้ำไหลในรางเปิด พบว่า เซนเซอร์ให้ผลตอบสนองที่ดี ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้วัดระดับของเหลวที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันได้

5.1.6 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์กับของเหลวต่างชนิด

ผลการศึกษาการวัดระดับของเหลวต่างชนิดกัน ได้ใช้เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกชุดล่างเพื่อวัดความจุไฟฟ้าของของเหลวอ้างอิง และหัววัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกชุดบนเพื่อตรวจวัดระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง และวัดค่าความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าทั้งสองชุดทำให้สามารถตรวจวัดระดับของเหลวในระบบเปิดที่ต่างชนิดกัน ได้ค่าความ

ผิดพลาดสูงสุด 5.37 % FSO หรือผิดพลาดสูงสุดไม่เกิน 0.019 เมตร ดังนั้นเทคนิคของการวิจัยนี้สามารถนำไปวัดระดับของเหลวที่ต่างชนิดกันได้

ดังนั้นเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบต่างๆกับเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก ดังตารางที่ 5.1 เมื่อเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์วัดระดับแบบต่างๆ พบว่า ค่าความเป็นเชิงเส้น ความละเอียดให้ผลไม่ดีเท่ากับเซนเซอร์แบบต่างๆ และย่านในการใช้งานอุณหภูมียู่ในช่วงที่แคบ 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. การสร้างเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเคลือบผิวของอิเล็กโทรด ในการทดลองทำการเคลือบด้วยการเคลือบอะคิลิกหนา 0.2 มิลลิเมตร เพื่อลดปัญหาการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ต้องคิดความหนาของผิวเคลือบ แต่หากมีการเคลือบไม่ดี หรือเกิดการขูดขีดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อารวัดค่าความจุไฟฟ้าส่งผลทำให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยนไป และในการพกพาควรระวังไม่ให้เกิดการขูดขีดจากวัตถุมีคม

2. ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องระยะเวลาอายุการใช้งานของเซนเซอร์ เนื่องจากในการทดลองไม่ได้ทำการจุ่มเซนเซอร์ทิ้งในน้ำเป็นเวลานานๆ

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] L.K. Baxter, *Capacitive Sensors Design and Application*.NewYork: IEEE Press,1997.

- [10] E.O. Doebelin. “*Measurement System Application and Design*”, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [11] B.G. Liptak. “*Process Measurement and Analysis*”, 3rd ed. Oxford, U.K.: Butterworth Heinman, 1999.
- [12] D. M. Considine. “*Process Instruments and Control Hand Book*”, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1974.
- [13] J. P. Bently. “*Principles of Measurement Systems*”, 3rd ed. Singapore: Longman Singapore Publishers (Pte) Ltd., 1995.
- [14] J. Michael Jacob. “*Industrial Control Electronics*”, Singapore: Prentice Hall International Editions, 1995.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] H Matsumoto and K.A. Watanabe. “switched-capacitor digital capacitance meter”,*IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1986.
- [18] 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.

- [19] C Kolle and P O'Leary. "Low-cost high-precision measurement system for capacitive sensors", *Measurement Sci. Technol.* 9, pp 510–517, 1998.
- [20] W Helbach, P Marczinowski and G Trenkler. "High precision automatic digital AC bridge", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1983.
- [21] 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.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33
1 - 3 ธันวาคม 2552 จังหวัดเชียงใหม่

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าเมื่อจำนวน n แตกต่างกัน

ตารางที่ ข-1 ผลการคำนวณค่าความจุไฟฟ้า เมื่อกำหนดให้แผ่นอิเล็กโทรดของแบบกึ่งทรงกระบอกมีรัศมีเท่ากับ 0.0315 เมตร และมีช่องว่างน้อยที่สุด 0.025 เมตร และมีความหนาของวัสดุที่ใช้ติดแผ่นอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.005 เมตร ที่ระดับน้ำ 0.09 เมตร

จำนวนแผ่นโลหะย่อยที่ใช้ในการคำนวณ(แผ่น)	ความจุไฟฟ้า(pF)
20000	60.4611
18000	60.4649
16000	60.4696
14000	60.4757
12000	60.4838
10000	60.4952
8000	60.5123
6000	60.5407
4000	60.5977
2000	60.7685
1000	61.1104
800	61.2815
600	61.5669
400	62.1383
200	63.8582

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณกับการวัดโดยตรงวัด

ตารางที่ ค-1 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำ เมื่อแผ่นอิเล็กโตรดวางห่างกัน 0.025 เมตร

ระดับน้ำ (เมตร)	ความจุไฟฟ้า (pF)	
	จากการคำนวณ	จากการวัด
0.00	9.0884	10.648
0.01	14.8003	17.448
0.02	20.5122	22.686
0.03	26.224	27.879
0.04	31.9359	33.696
0.05	37.6477	38.635
0.06	43.3596	44.349
0.07	49.0715	50.944
0.08	54.7833	57.129
0.09	60.4952	61.985
0.10	66.2071	67.947
0.11	71.9189	73.492
0.12	77.6308	77.830
0.13	83.3427	82.504
0.14	89.0545	90.205
0.15	94.7664	96.530
0.16	100.4783	100.785
0.17	106.1901	104.750
0.18	111.902	109.735
0.19	117.6139	116.388
0.20	123.3257	121.026
0.21	129.0376	126.413
0.22	134.7495	132.050
0.23	140.4613	138.324
0.24	146.1732	143.470
0.25	151.8851	148.210
0.26	157.5969	153.017
0.27	163.3088	158.639
0.28	169.0207	163.214
0.29	174.7325	168.853
0.30	180.4444	173.653

ผลการทดลองค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำเมื่ออิเล็กทรอนิกส์ดวงเป็นระยะต่างๆ

ตารางที่ ค-2 ค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำ เมื่อแผ่นอิเล็กโตรดวางห่างกัน 0.025 เมตร

ระดับน้ำ (cm)	ความจุไฟฟ้า (pF) / ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	10.641	10.140	10.494	10.615	10.932	10.388	10.835	10.858	10.820	10.756	10.648
1	17.463	17.445	17.478	17.487	17.457	17.456	17.449	17.422	17.382	17.441	17.448
2	22.767	22.753	22.741	22.756	22.379	22.446	22.773	22.745	22.755	22.743	22.686
3	27.711	27.687	27.919	27.976	27.877	27.832	27.941	27.976	27.945	27.926	27.879
4	33.863	33.836	33.757	33.710	33.241	33.815	33.738	33.732	33.729	33.539	33.696
5	38.631	38.617	38.677	38.639	38.633	38.590	38.619	38.675	38.594	38.671	38.635
6	44.206	43.936	44.632	44.389	44.423	44.378	44.401	44.388	44.361	44.3732	44.349
7	50.989	50.953	50.957	50.988	50.954	50.929	50.755	50.948	50.978	50.991	50.944
8	57.189	57.153	57.194	57.123	57.151	57.200	57.149	57.180	56.948	57.004	57.129
9	62.006	61.978	61.974	61.966	62.117	61.965	61.972	61.900	61.989	61.981	61.985
10	67.945	67.973	67.939	67.907	67.9402	67.916	67.943	67.973	67.994	67.939	67.947
11	73.574	73.575	73.537	73.371	73.519	73.364	73.576	73.261	73.615	73.528	73.492
12	78.065	77.861	77.888	77.883	77.871	77.854	77.863	77.834	77.851	77.334	77.830
13	82.492	82.492	82.488	82.515	82.472	82.481	82.450	82.582	82.510	82.555	82.504
14	90.313	89.865	89.804	90.305	90.299	90.267	90.291	90.317	90.315	90.271	90.205
15	96.837	96.067	96.621	96.592	96.571	96.002	96.646	96.625	96.666	96.669	96.530
16	100.825	100.773	100.771	100.780	100.867	100.827	100.766	100.656	100.817	100.768	100.785
17	104.731	104.768	104.715	104.732	104.785	104.798	104.752	104.787	104.700	104.729	104.750
18	109.749	110.049	109.854	109.105	109.197	109.880	109.850	109.871	109.891	109.907	109.735
19	116.291	116.328	116.357	116.383	116.377	116.592	116.372	116.391	116.419	116.371	116.388
20	121.107	121.086	121.022	120.984	121.034	120.796	121.086	121.095	121.023	121.028	121.026
21	126.344	126.245	126.263	126.305	126.231	126.231	126.2	126.923	126.976	126.395	126.413
22	132.074	132.021	132.097	132.072	132.074	132.059	132.022	132.052	131.997	132.029	132.050
23	138.331	138.676	138.881	137.431	138.333	138.295	138.282	138.315	138.383	138.317	138.324
24	143.866	143.383	143.425	143.436	143.452	143.402	143.459	143.444	143.383	143.445	143.470
25	148.231	148.171	148.179	148.192	148.245	148.238	148.242	148.209	148.245	148.152	148.210
26	153.045	153.016	153.016	153.017	152.981	153.089	152.971	153.029	153.016	152.992	153.017
27	158.663	158.567	158.655	158.673	158.676	158.642	158.695	158.641	158.606	158.571	158.639
28	163.183	163.198	163.223	163.213	163.188	163.223	163.291	163.220	163.192	163.208	163.214
29	168.846	168.797	168.782	168.858	168.861	169.009	168.829	168.863	168.892	168.789	168.853

30	173.695	173.605	173.551	173.642	173.601	173.664	173.671	173.769	173.621	173.708	173.653
29	170.602	170.132	170.068	170.051	170.016	170.048	170.871	170.793	170.711	170.879	170.417
28	164.133	164.489	164.168	164.089	164.288	164.211	164.068	164.258	164.264	164.159	164.213
27	158.231	158.127	158.885	158.392	159.793	158.746	158.717	158.361	158.163	158.142	158.556
26	154.938	154.966	154.455	154.926	154.934	154.891	154.733	154.828	154.998	154.851	154.852
25	151.596	151.256	151.195	151.634	150.816	151.178	151.182	151.148	151.117	151.159	151.228
24	148.331	148.443	148.339	148.356	148.319	148.305	148.253	148.264	148.265	148.280	148.316
23	140.181	140.355	140.351	140.204	140.186	140.213	140.171	140.083	140.131	140.197	140.207
22	135.287	135.394	135.314	135.241	135.241	136.319	135.333	135.335	135.279	135.283	135.403
21	129.752	129.718	129.659	129.668	129.728	129.701	129.231	129.628	129.432	129.334	129.585
20	127.152	127.541	128.533	127.503	126.305	126.316	128.280	128.156	128.209	128.325	127.632
19	121.726	121.008	122.891	121.799	122.735	121.652	121.283	121.127	121.286	121.226	121.673
18	119.232	118.924	118.6767	118.662	118.503	118.399	118.371	118.171	118.266	118.328	118.553
17	114.827	114.937	115.227	114.601	115.312	116.029	115.847	115.751	115.748	115.629	115.391
16	110.642	110.512	110.786	110.421	110.336	110.124	110.996	110.921	110.913	110.726	110.638
15	105.195	105.135	105.017	105.626	105.009	105.704	105.596	106.488	105.337	105.311	105.442
14	99.345	99.463	99.362	99.882	99.273	99.786	99.278	99.278	99.562	99.273	99.450
13	91.789	91.593	92.698	92.732	92.604	92.783	92.071	91.905	91.912	92.814	92.290
12	86.211	86.962	86.872	86.742	86.814	86.197	86.078	86.181	86.157	86.082	86.430
11	79.453	79.427	79.234	79.239	79.232	79.763	79.231	79.393	79.309	79.375	79.366
10	74.433	74.587	74.543	74.398	74.341	75.437	74.345	74.432	74.493	74.474	74.548
9	69.324	69.266	69.211	69.221	69.284	69.319	69.116	69.194	69.263	69.314	69.251
8	63.583	63.525	63.473	63.435	63.764	63.973	63.941	63.943	63.943	63.907	63.749
7	57.376	57.342	57.432	57.367	57.038	57.437	57.873	57.345	57.326	57.321	57.386
6	51.541	51.539	51.493	51.451	51.453	51.426	51.421	51.354	51.348	51.346	51.437
5	46.123	46.436	46.036	46.076	46.432	46.122	46.332	46.237	46.048	46.126	46.197
4	41.325	41.235	41.434	41.478	41.455	41.475	41.332	41.344	41.597	41.235	41.391
3	37.332	37.332	37.332	37.332	37.332	37.267	37.332	37.332	37.332	37.332	37.326
2	33.459	33.322	33.332	33.235	33.342	33.241	33.221	33.236	33.373	33.213	33.297
1	27.278	27.236	27.983	27.223	26.988	26.345	27.232	27.231	27.367	27.338	27.222
0	20.335	20.321	19.875	23.236	23.389	23.234	22.289	22.283	22.381	22.373	21.972

ตารางที่ ค-3 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก
เมื่อแผ่นอิเล็กโทรดวางห่างกันเป็นระยะต่างๆ

ระดับน้ำ (เมตร)	ความจุไฟฟ้า (pF)		
	ระยะห่างของแผ่นโลหะ(เมตร)		
	0.015	0.025	0.005
0.00	12.4378	9.0884	4.8265
0.01	18.6775	14.8003	10.5574
0.02	24.9171	20.5122	16.3065
0.03	31.1567	26.224	22.0465
0.04	37.3964	31.9359	27.7865
0.05	43.636	37.6477	33.5265
0.06	49.8757	43.3596	39.2665
0.07	56.1153	49.0715	45.0065
0.08	62.355	54.7833	50.7465
0.09	68.5946	60.4952	56.4864
0.10	74.8342	66.2071	62.2265
0.11	81.0739	71.9189	67.9664
0.12	87.3135	77.6308	73.7064
0.13	93.5532	83.3427	79.4464
0.14	99.7928	89.0545	85.1864
0.15	106.0324	94.7664	90.9264
0.16	112.2721	100.4783	96.6664
0.17	118.5117	106.1901	102.4064
0.18	124.7514	111.902	108.1464
0.19	138.422	116.388	105.608
0.20	146.167	121.026	110.612
0.21	152.747	126.413	114.417
0.22	158.742	132.05	118.758
0.23	164.665	138.324	123.011
0.24	172.903	143.47	127.773
0.25	179.883	148.21	133.505
0.26	186.005	153.017	138.198
0.27	193.695	158.639	140.643
0.28	200.371	163.214	145.865
0.29	205.965	168.853	150.706
0.30	209.504	173.653	156.136

ตารางที่ ง-1 แรงดันไฟฟ้ากับระดับน้ำ เมื่อเซนเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063 เมตร
ความยาวของแผ่นโลหะ 0.30 เมตร วางห่าง 0.025 เมตร

ครั้งที่	แรงดันไฟฟ้า(โวลต์)						
	ระดับน้ำ(เมตร)						
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
0	0.16436	0.2839	0.32722	0.43361	0.52935	0.67265	0.86786
1	0.16256	0.28196	0.32499	0.42941	0.52681	0.66938	0.86856
2	0.16276	0.28151	0.32448	0.42981	0.52681	0.67091	0.86672
3	0.16265	0.28012	0.32326	0.42999	0.52527	0.67071	0.86754
4	0.16326	0.28135	0.32326	0.42847	0.52466	0.66907	0.87203
5	0.16165	0.27929	0.32173	0.42922	0.52517	0.67061	0.87234
6	0.16366	0.28298	0.32275	0.42901	0.52599	0.66977	0.87081
7	0.16416	0.27888	0.32214	0.42809	0.52637	0.66938	0.87192
8	0.16446	0.28063	0.32091	0.4281	0.52497	0.66987	0.86928
9	0.16616	0.28272	0.32275	0.42839	0.52589	0.66956	0.86724
10	0.16475	0.2796	0.32443	0.42869	0.52568	0.66913	0.86673
11	0.16495	0.28231	0.32367	0.42839	0.52527	0.67111	0.867
12	0.16466	0.2793	0.32244	0.43024	0.52404	0.67498	0.86877
13	0.16396	0.28094	0.32234	0.43023	0.52445	0.67224	0.8693
14	0.16316	0.27816	0.32173	0.43064	0.52445	0.66989	0.86693
15	0.16466	0.28073	0.32244	0.43023	0.52476	0.66989	0.86455
16	0.16386	0.28217	0.3207	0.42962	0.5265	0.67041	0.86755
17	0.16376	0.28043	0.32236	0.42961	0.52609	0.67326	0.86346
18	0.16216	0.28309	0.32358	0.43257	0.52701	0.67599	0.86272
19	0.1626	0.28094	0.32377	0.43421	0.52549	0.68194	0.86619
20	0.16426	0.28258	0.32389	0.4338	0.52384	0.67742	0.86387
21	0.16376	0.27868	0.32234	0.43483	0.52384	0.67888	0.86795
22	0.16357	0.28063	0.32091	0.43371	0.52292	0.68019	0.86459
23	0.16356	0.28174	0.32132	0.43309	0.52333	0.67907	0.86224
24	0.16346	0.27816	0.32029	0.43329	0.52291	0.67438	0.86439
25	0.16175	0.28237	0.31946	0.43307	0.52486	0.67488	0.86121
26	0.16216	0.27888	0.32173	0.43539	0.52397	0.67907	0.85916
27	0.16266	0.28105	0.32338	0.4338	0.52284	0.67693	0.86193
28	0.16436	0.28084	0.32347	0.42946	0.52394	0.68289	0.86387
29	0.16426	0.27888	0.32306	0.42861	0.52221	0.67928	0.86581
30	0.16376	0.28166	0.32183	0.42993	0.5222	0.67621	0.86233
31	0.16426	0.27888	0.32306	0.42861	0.52221	0.67928	0.86581
32	0.16376	0.28166	0.32183	0.42993	0.5222	0.67621	0.86233

เครื่องที่	แรงดันไฟฟ้า(โวลต์) (ต่อ)						
	ระดับน้ำ(เมตร)						
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
33	0.16386	0.28278	0.32244	0.42769	0.5263	0.67632	0.8606
34	0.16215	0.28084	0.32265	0.42849	0.52231	0.67886	0.86111
35	0.16356	0.28414	0.32459	0.4289	0.52558	0.67367	0.85998
36	0.16396	0.27981	0.32518	0.43033	0.52282	0.67988	0.8655
37	0.16495	0.28207	0.3258	0.42982	0.52221	0.68294	0.86492
38	0.16525	0.2808	0.32459	0.42962	0.52079	0.67682	0.86285
39	0.16459	0.27919	0.32285	0.42972	0.5217	0.67989	0.86573
40	0.16506	0.28186	0.32184	0.42942	0.52028	0.68192	0.86111
41	0.16344	0.27774	0.32244	0.42911	0.52189	0.68233	0.86203
42	0.16436	0.28278	0.32387	0.4294	0.52017	0.67367	0.86143
43	0.16436	0.27858	0.32449	0.4293	0.52169	0.68141	0.86029
44	0.16376	0.28073	0.32367	0.43104	0.5211	0.68385	0.86151
45	0.16306	0.27991	0.32326	0.43196	0.52264	0.68203	0.86643
46	0.16296	0.28022	0.32214	0.4336	0.52058	0.68204	0.86172
47	0.1649	0.28298	0.32275	0.43309	0.5214	0.68345	0.86234
48	0.16326	0.27837	0.32255	0.43147	0.52058	0.68487	0.86335
49	0.16316	0.28166	0.32121	0.43278	0.51997	0.68091	0.85919
50	0.16386	0.28247	0.3207	0.43104	0.51895	0.68295	0.86141
51	0.16326	0.28073	0.32111	0.43103	0.52048	0.68477	0.86111
52	0.16195	0.28073	0.32469	0.43026	0.52088	0.68489	0.86264
53	0.16236	0.2797	0.32479	0.43237	0.52149	0.68366	0.86734
54	0.16226	0.28155	0.32244	0.43308	0.51895	0.68426	0.86623
55	0.16326	0.27878	0.32224	0.43406	0.52058	0.681518	0.865
56	0.16316	0.27817	0.32163	0.4282	0.51865	0.68159	0.86458
57	0.16286	0.27774	0.32327	0.42647	0.51967	0.6805	0.85927
58	0.16229	0.28022	0.32316	0.42707	0.51946	0.68081	0.85998
59	0.16205	0.27909	0.32159	0.42596	0.52139	0.68284	0.86509
60	0.16276	0.28063	0.32255	0.42626	0.51956	0.68443	0.86141
61	0.16336	0.28138	0.32111	0.42922	0.52119	0.6805	0.86294
62	0.16316	0.28094	0.32193	0.4289	0.52192	0.68375	0.86826
63	0.16236	0.28237	0.32327	0.42982	0.52119	0.68411	0.86469
64	0.16216	0.28022	0.32275	0.43104	0.52119	0.68304	0.86213
65	0.16246	0.27982	0.32224	0.43003	0.51977	0.674285	0.86431
66	0.16286	0.28268	0.32336	0.43084	0.52109	0.67704	0.86643

ครั้งที่	แรงดันไฟฟ้า(โวลต์) (ต่อ)						
	ระดับน้ำ(เมตร)						
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
67	0.16316	0.28137	0.32275	0.43095	0.52058	0.67764	0.86346
68	0.16326	0.28155	0.32132	0.43034	0.51732	0.67804	0.86438
69	0.16216	0.27889	0.32214	0.43064	0.51936	0.67143	0.86325
70	0.16296	0.27971	0.32029	0.4294	0.51881	0.67447	0.86326
71	0.16344	0.28207	0.32039	0.43191	0.51885	0.68019	0.86551
72	0.16256	0.27755	0.32091	0.43165	0.52088	0.68172	0.86081
73	0.16189	0.27863	0.32358	0.43259	0.52098	0.68081	0.86325
74	0.16145	0.28084	0.32204	0.43467	0.52149	0.67306	0.86223
75	0.16205	0.27795	0.32074	0.43574	0.52078	0.67775	0.861
76	0.16155	0.28288	0.32239	0.43351	0.52041	0.67886	0.86621
77	0.16185	0.2796	0.32193	0.4338	0.51967	0.67947	0.86509
78	0.16195	0.28319	0.32183	0.43288	0.5222	0.68212	0.86204
79	0.16256	0.28532	0.32132	0.43329	0.52068	0.67888	0.86531
80	0.16216	0.27929	0.32091	0.43533	0.5218	0.68152	0.86551
81	0.16276	0.28094	0.32132	0.43554	0.52191	0.68213	0.86438
82	0.16185	0.2789	0.32336	0.43605	0.52191	0.68202	0.86243
83	0.16185	0.27815	0.32469	0.43727	0.5216	0.68151	0.86478
84	0.16185	0.28155	0.32261	0.43226	0.52099	0.67208	0.86693
85	0.16316	0.27815	0.32215	0.4278	0.51977	0.67815	0.86734
86	0.16236	0.2842	0.32163	0.42994	0.52139	0.68273	0.86755
87	0.16246	0.28217	0.3207	0.4313	0.52048	0.68487	0.86417
88	0.16206	0.2797	0.32029	0.42991	0.52129	0.6847	0.86438
89	0.16195	0.28196	0.31988	0.43124	0.52221	0.68131	0.86264
90	0.16216	0.27909	0.32169	0.43237	0.5218	0.68338	0.85993
91	0.16135	0.28155	0.32275	0.43257	0.5213	0.68429	0.86304
92	0.16135	0.27919	0.32244	0.43258	0.52118	0.6842	0.86489
93	0.16074	0.27878	0.32326	0.43216	0.5214	0.68548	0.86371
94	0.16074	0.28298	0.32244	0.43134	0.52242	0.67884	0.86469
95	0.16043	0.27888	0.32183	0.43298	0.52189	0.68187	0.86571
96	0.16209	0.28032	0.32204	0.43206	0.52169	0.681548	0.86621
97	0.16175	0.27787	0.32234	0.43052	0.52079	0.68161	0.86376
98	0.16043	0.27879	0.32387	0.43052	0.51977	0.68289	0.86437
99	0.16033	0.27706	0.32459	0.43206	0.51905	0.68233	0.8657
100	0.16033	0.27706	0.32459	0.43206	0.51905	0.68233	0.8657

ตารางที่ ง-1 แรงดันไฟฟ้ากับระดับน้ำ เมื่อเซนเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063 เมตร
ความยาวของแผ่นโลหะ 0.30 เมตร วางห่าง 0.025 เมตร

ครั้งที่	แรงดันไฟฟ้า(โวลต์)						
	ระดับน้ำ(เมตร)						
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
0	0.16436	0.2839	0.32722	0.43361	0.52935	0.67265	0.86786
1	0.16256	0.28196	0.32499	0.42941	0.52681	0.66938	0.86856
2	0.16276	0.28151	0.32448	0.42981	0.52681	0.67091	0.86672
3	0.16265	0.28012	0.32326	0.42999	0.52527	0.67071	0.86754
4	0.16326	0.28135	0.32326	0.42847	0.52466	0.66907	0.87203
5	0.16165	0.27929	0.32173	0.42922	0.52517	0.67061	0.87234
6	0.16366	0.28298	0.32275	0.42901	0.52599	0.66977	0.87081
7	0.16416	0.27888	0.32214	0.42809	0.52637	0.66938	0.87192
8	0.16446	0.28063	0.32091	0.4281	0.52497	0.66987	0.86928
9	0.16616	0.28272	0.32275	0.42839	0.52589	0.66956	0.86724
10	0.16475	0.2796	0.32443	0.42869	0.52568	0.66913	0.86673
11	0.16495	0.28231	0.32367	0.42839	0.52527	0.67111	0.867
12	0.16466	0.2793	0.32244	0.43024	0.52404	0.67498	0.86877
13	0.16396	0.28094	0.32234	0.43023	0.52445	0.67224	0.8693
14	0.16316	0.27816	0.32173	0.43064	0.52445	0.66989	0.86693
15	0.16466	0.28073	0.32244	0.43023	0.52476	0.66989	0.86455
16	0.16386	0.28217	0.3207	0.42962	0.5265	0.67041	0.86755
17	0.16376	0.28043	0.32236	0.42961	0.52609	0.67326	0.86346
18	0.16216	0.28309	0.32358	0.43257	0.52701	0.67599	0.86272
19	0.1626	0.28094	0.32377	0.43421	0.52549	0.68194	0.86619
20	0.16426	0.28258	0.32389	0.4338	0.52384	0.67742	0.86387
21	0.16376	0.27868	0.32234	0.43483	0.52384	0.67888	0.86795
22	0.16357	0.28063	0.32091	0.43371	0.52292	0.68019	0.86459
23	0.16356	0.28174	0.32132	0.43309	0.52333	0.67907	0.86224
24	0.16346	0.27816	0.32029	0.43329	0.52291	0.67438	0.86439
25	0.16175	0.28237	0.31946	0.43307	0.52486	0.67488	0.86121
26	0.16216	0.27888	0.32173	0.43539	0.52397	0.67907	0.85916
27	0.16266	0.28105	0.32338	0.4338	0.52284	0.67693	0.86193
28	0.16436	0.28084	0.32347	0.42946	0.52394	0.68289	0.86387
29	0.16426	0.27888	0.32306	0.42861	0.52221	0.67928	0.86581
30	0.16376	0.28166	0.32183	0.42993	0.5222	0.67621	0.86233
31	0.16426	0.27888	0.32306	0.42861	0.52221	0.67928	0.86581
32	0.16376	0.28166	0.32183	0.42993	0.5222	0.67621	0.86233

ภาคผนวก จ

ผลการทดลองของสถานะแวดล้อมที่มีผลต่อเซนเซอร์
เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.060 เมตร ความยาวของแผ่นโลหะ 0.30 เมตร
ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะนำไฟฟ้า 0.005 เมตร ที่ระดับน้ำ 0.20 เมตร

ตารางที่ จ-1 ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์และค่าอุณหภูมิค่าต่างๆ

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	แรงดันไฟฟ้า(โวลต์)										ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
30	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.383	0.383	0.386	0.384	0.386	0.3842
32	0.391	0.393	0.389	0.39	0.39	0.39	0.389	0.39	0.391	0.39	0.3903
34	0.391	0.391	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.389	0.391	0.39	0.3902
36	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.392	0.392	0.392	0.392	0.3914
38	0.396	0.393	0.392	0.395	0.392	0.392	0.392	0.392	0.394	0.393	0.3931
40	0.399	0.399	0.4	0.399	0.399	0.399	0.399	0.399	0.399	0.4	0.3992
42	0.399	0.402	0.402	0.4	0.411	0.402	0.403	0.401	0.401	0.402	0.4023
44	0.404	0.401	0.401	0.401	0.401	0.403	0.403	0.403	0.406	0.404	0.4027
46	0.412	0.413	0.411	0.414	0.412	0.406	0.408	0.408	0.408	0.411	0.4103
48	0.411	0.411	0.411	0.411	0.411	0.408	0.408	0.408	0.408	0.411	0.4098
50	0.413	0.413	0.414	0.414	0.414	0.414	0.414	0.414	0.413	0.413	0.4136
52	0.415	0.422	0.422	0.422	0.422	0.422	0.415	0.415	0.415	0.415	0.4185
54	0.428	0.428	0.428	0.428	0.432	0.432	0.432	0.426	0.426	0.426	0.4286
56	0.437	0.437	0.437	0.437	0.433	0.443	0.437	0.437	0.437	0.431	0.4366
58	0.452	0.446	0.446	0.451	0.451	0.446	0.448	0.449	0.448	0.448	0.4485
60	0.468	0.468	0.468	0.468	0.462	0.464	0.469	0.459	0.459	0.469	0.4654

ตารางที่ จ-2 ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์และค่าความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่างๆ

เวลา	16.00 น.	19.00 น.	23.00 น.	01.00 น.	06.00 น.
ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	79	85	89	93	96
ครั้งที่	แรงดันไฟฟ้า(โวลต์)				
1	0.438	0.438	0.493	0.522	0.432
2	0.438	0.438	0.493	0.523	0.442
3	0.451	0.439	498	0.512	0.454
4	0.443	0.443	0.497	0.533	0.446
5	0.439	0.437	0.493	0.524	0.437
6	0.443	0.443	0.493	0.542	0.444
7	0.438	0.439	0.496	0.535	0.445
8	0.443	0.443	0.492	0.525	0.444
9	0.444	0.436	0.498	0.535	0.435
10	0.443	0.441	0.491	0.532	0.436
11	0.439	0.451	0.497	0.538	0.435
12	0.442	0.443	0.493	0.527	0.436
13	0.439	0.438	0.491	0.522	0.446
14	0.443	0.443	0.492	0.523	0.434
15	0.437	0.439	0.497	0.526	0.432
16	0.443	0.442	0.492	0.533	0.433
17	0.436	0.444	0.493	0.524	0.435
18	0.441	0.443	0.493	0.532	0.434
19	0.45	0.45	0.496	0.532	0.435
20	0.45	0.45	0.492	0.523	0.444

เครื่องที่	แรงดันไฟฟ้า(โวลต์) (ต่อ)						
	ระดับน้ำ(เมตร)						
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
33	0.16386	0.28278	0.32244	0.42769	0.5263	0.67632	0.8606
34	0.16215	0.28084	0.32265	0.42849	0.52231	0.67886	0.86111
35	0.16356	0.28414	0.32459	0.4289	0.52558	0.67367	0.85998
36	0.16396	0.27981	0.32518	0.43033	0.52282	0.67988	0.8655
37	0.16495	0.28207	0.3258	0.42982	0.52221	0.68294	0.86492
38	0.16525	0.2808	0.32459	0.42962	0.52079	0.67682	0.86285
39	0.16459	0.27919	0.32285	0.42972	0.5217	0.67989	0.86573
40	0.16506	0.28186	0.32184	0.42942	0.52028	0.68192	0.86111
41	0.16344	0.27774	0.32244	0.42911	0.52189	0.68233	0.86203
42	0.16436	0.28278	0.32387	0.4294	0.52017	0.67367	0.86143
43	0.16436	0.27858	0.32449	0.4293	0.52169	0.68141	0.86029
44	0.16376	0.28073	0.32367	0.43104	0.5211	0.68385	0.86151
45	0.16306	0.27991	0.32326	0.43196	0.52264	0.68203	0.86643
46	0.16296	0.28022	0.32214	0.4336	0.52058	0.68204	0.86172
47	0.1649	0.28298	0.32275	0.43309	0.5214	0.68345	0.86234
48	0.16326	0.27837	0.32255	0.43147	0.52058	0.68487	0.86335
49	0.16316	0.28166	0.32121	0.43278	0.51997	0.68091	0.85919
50	0.16386	0.28247	0.3207	0.43104	0.51895	0.68295	0.86141
51	0.16326	0.28073	0.32111	0.43103	0.52048	0.68477	0.86111
52	0.16195	0.28073	0.32469	0.43026	0.52088	0.68489	0.86264
53	0.16236	0.2797	0.32479	0.43237	0.52149	0.68366	0.86734
54	0.16226	0.28155	0.32244	0.43308	0.51895	0.68426	0.86623
55	0.16326	0.27878	0.32224	0.43406	0.52058	0.681518	0.865
56	0.16316	0.27817	0.32163	0.4282	0.51865	0.68159	0.86458
57	0.16286	0.27774	0.32327	0.42647	0.51967	0.6805	0.85927
58	0.16229	0.28022	0.32316	0.42707	0.51946	0.68081	0.85998
59	0.16205	0.27909	0.32159	0.42596	0.52139	0.68284	0.86509
60	0.16276	0.28063	0.32255	0.42626	0.51956	0.68443	0.86141
61	0.16336	0.28138	0.32111	0.42922	0.52119	0.6805	0.86294
62	0.16316	0.28094	0.32193	0.4289	0.52192	0.68375	0.86826
63	0.16236	0.28237	0.32327	0.42982	0.52119	0.68411	0.86469
64	0.16216	0.28022	0.32275	0.43104	0.52119	0.68304	0.86213
65	0.16246	0.27982	0.32224	0.43003	0.51977	0.674285	0.86431
66	0.16286	0.28268	0.32336	0.43084	0.52109	0.67704	0.86643

ครั้งที่	แรงดันไฟฟ้า(โวลต์) (ต่อ)						
	ระดับน้ำ(เมตร)						
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
67	0.16316	0.28137	0.32275	0.43095	0.52058	0.67764	0.86346
68	0.16326	0.28155	0.32132	0.43034	0.51732	0.67804	0.86438
69	0.16216	0.27889	0.32214	0.43064	0.51936	0.67143	0.86325
70	0.16296	0.27971	0.32029	0.4294	0.51881	0.67447	0.86326
71	0.16344	0.28207	0.32039	0.43191	0.51885	0.68019	0.86551
72	0.16256	0.27755	0.32091	0.43165	0.52088	0.68172	0.86081
73	0.16189	0.27863	0.32358	0.43259	0.52098	0.68081	0.86325
74	0.16145	0.28084	0.32204	0.43467	0.52149	0.67306	0.86223
75	0.16205	0.27795	0.32074	0.43574	0.52078	0.67775	0.861
76	0.16155	0.28288	0.32239	0.43351	0.52041	0.67886	0.86621
77	0.16185	0.2796	0.32193	0.4338	0.51967	0.67947	0.86509
78	0.16195	0.28319	0.32183	0.43288	0.5222	0.68212	0.86204
79	0.16256	0.28532	0.32132	0.43329	0.52068	0.67888	0.86531
80	0.16216	0.27929	0.32091	0.43533	0.5218	0.68152	0.86551
81	0.16276	0.28094	0.32132	0.43554	0.52191	0.68213	0.86438
82	0.16185	0.2789	0.32336	0.43605	0.52191	0.68202	0.86243
83	0.16185	0.27815	0.32469	0.43727	0.5216	0.68151	0.86478
84	0.16185	0.28155	0.32261	0.43226	0.52099	0.67208	0.86693
85	0.16316	0.27815	0.32215	0.4278	0.51977	0.67815	0.86734
86	0.16236	0.2842	0.32163	0.42994	0.52139	0.68273	0.86755
87	0.16246	0.28217	0.3207	0.4313	0.52048	0.68487	0.86417
88	0.16206	0.2797	0.32029	0.42991	0.52129	0.6847	0.86438
89	0.16195	0.28196	0.31988	0.43124	0.52221	0.68131	0.86264
90	0.16216	0.27909	0.32169	0.43237	0.5218	0.68338	0.85993
91	0.16135	0.28155	0.32275	0.43257	0.5213	0.68429	0.86304
92	0.16135	0.27919	0.32244	0.43258	0.52118	0.6842	0.86489
93	0.16074	0.27878	0.32326	0.43216	0.5214	0.68548	0.86371
94	0.16074	0.28298	0.32244	0.43134	0.52242	0.67884	0.86469
95	0.16043	0.27888	0.32183	0.43298	0.52189	0.68187	0.86571
96	0.16209	0.28032	0.32204	0.43206	0.52169	0.681548	0.86621
97	0.16175	0.27787	0.32234	0.43052	0.52079	0.68161	0.86376
98	0.16043	0.27879	0.32387	0.43052	0.51977	0.68289	0.86437
99	0.16033	0.27706	0.32459	0.43206	0.51905	0.68233	0.8657
100	0.16033	0.27706	0.32459	0.43206	0.51905	0.68233	0.8657

ภาคผนวก จ

ผลการทดลองผลตอบสนองของเวลาที่มีต่อเซนเซอร์

ตารางที่ ๑-1 ผลตอบสนองของเวลาที่เมื่อเซ็นเซอร์ของความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับเวลา
กรณีจุ่มลงไปและยกขึ้นจากในน้ำ

เวลา (วินาที)	ระดับน้ำ(เซนติเมตร)	
	จุ่มลงในน้ำ	ยกขึ้นจากน้ำ
0	11.103	21.853
0.1	10.951	21.687
0.2	11.194	21.75
0.3	11.284	21.997
0.4	11.154	21.822
0.5	11.012	21.687
0.6	11.284	21.853
0.7	11.343	21.781
0.8	10.859	21.687
0.9	11.093	21.75
1	11.264	21.843
1.1	10.931	21.708
1.2	11.123	21.708
1.3	11.304	21.894
1.4	11.304	21.667
1.5	11.867	21.739
1.6	13.317	21.977
1.7	15.346	21.677
1.8	20.217	21.76
1.9	21.687	21.874
2	21.791	21.739
2.1	21.677	20.346
2.2	21.687	17.361
2.3	21.997	14.296
2.4	21.677	9.924
2.5	21.739	5.82875
2.6	22.192	4.33496
2.7	21.687	4.33496
2.8	21.812	4.5827
2.9	22.069	4.5554
3.0	21.708	4.4355

ตารางที่ จ-2 กรณีการทดสอบในสภาวะน้ำไหลของความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับเวลาของเซนเซอร์ เมื่อคลื่นน้ำเคลื่อนที่กระทบเซนเซอร์ตัวที่ 1 และ 2

เวลา (วินาที)	ระดับน้ำ(เซนติเมตร)	
	เซนเซอร์ตัวที่ 1	เซนเซอร์ตัวที่ 2
0.00	0.773128	0.251101
0.01	0.131718	0.525551
0.02	1.273568	0.886344
0.03	1.237445	0.885903
0.04	1.586344	0.586784
0.05	0.317621	0.418943
0.06	0.823789	0.722467
0.07	0.194273	0.667401
0.08	0.954185	0.345374
0.09	0.588987	0.493392
0.1	0.313216	1.448458
0.11	1.020705	1.445374
0.12	1.044053	0.698678
0.13	0.689427	1.662555
0.14	2.040969	1.123348
0.15	0.657269	0.903965
0.16	0.747577	0.890749
0.17	0.423789	-0.01013
0.18	0.967401	0.802643
0.19	0.142731	0.303084
0.2	0.523348	0.213216
0.21	1.335683	0.388987
0.22	1.662996	0.037445
0.23	0.861674	0.617621
0.24	2.215419	0.648899
0.25	1.056828	0.437004
0.26	1.537885	0.837445
0.27	2.215419	1.138326
0.28	1.53304	0.856388
0.29	0.970925	1.07533
0.3	0.760352	1.291189
0.31	1.372247	0.577974
0.32	0.228194	0.320705
0.33	0.886344	0.235683
0.34	2.054185	0.362115

เวลา (วินาที)	ระดับน้ำ(เซนติเมตร) (ต่อ)	
	เซนเซอร์ตัวที่ 1	เซนเซอร์ตัวที่ 2
0.35	0.713656	0.385903
0.36	0.869604	0.399119
0.37	3.763436	0.419383
0.38	12.89736	0.273128
0.39	19.34537	0.415859
0.4	22.14581	0.392511
0.41	19.68238	0.514097
0.42	20.56784	0.295595
0.43	22.77841	0.447577
0.44	22.52687	0.335683
0.45	22.57621	0.269604
0.46	22.52203	0.339648
0.47	22.27577	0.213216
0.48	22.72863	0.403524
0.49	22.67048	1.3
0.5	22.81982	0.531278
0.51	22.24802	0.7163
0.52	22.17577	1.764758
0.53	22.64802	6.011894
0.54	22.71101	20.77093
0.55	22.66564	25.82555
0.56	23.22687	21.90617
0.57	23.41145	17.98722
0.58	23.51013	18.38546
0.59	23.56388	22.81894
0.6	24.0978	24.8533
0.61	25.37181	23.58943
0.62	25.1630	21.0630
0.63	25.26256	20.22291
0.64	23.57753	23.1837
0.65	23.52026	22.53789
0.66	23.43833	19.60441
0.67	23.55066	17.97137
0.68	23.72599	19.87489
0.69	24.00044	21.88811
0.7	24.40661	21.62731
0.71	25.02026	22.57489
0.72	25.55507	22.8674
0.73	23.86564	23.73392

เวลา (วินาที)	ระดับน้ำ(เซนติเมตร) (ต่อ)	
	เซนเซอร์ตัวที่ 1	เซนเซอร์ตัวที่ 2
0.74	23.96476	23.67137
0.75	23.91894	22.88943
0.76	24.34581	23.50529
0.77	23.78414	24.00793
0.78	23.77093	24.20573
0.79	24.24714	23.1185
0.8	24.4859	23.41013
0.81	23.863	23.78282
0.82	24.00044	23.6978
0.83	24.29207	23.51762
0.84	24.28811	23.53128
0.85	24.30529	23.77401
0.86	24.49427	23.94053
0.87	24.35507	23.61674
0.88	24.5348	23.54009
0.89	24.53921	23.48634
0.9	24.35066	23.72907
0.91	24.21586	23.52247
0.92	24.4674	23.54493
0.93	24.63348	23.88194
0.94	24.56608	23.55374
0.95	24.16211	23.59868
0.96	24.60661	23.99427
0.97	24.5793	23.93172
0.98	24.49868	23.66167
0.99	24.45374	23.57181
1.00	24.57974	23.81013

ตารางที่ ฉ-3 กรณีการทดสอบในสภาวะน้ำไหลของความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับเวลาของเซนเซอร์ เมื่อคลื่นน้ำเคลื่อนที่กระทบเซนเซอร์ตัวที่ 1 และ 2 กรณีเกิดคลื่นระหว่างเซนเซอร์

เวลา (วินาที)	ระดับน้ำ(เซนติเมตร)	
	เซนเซอร์ตัวที่ 1	เซนเซอร์ตัวที่ 2
0.00	15.64846	14.32291
0.01	15.90969	14.71806
0.02	14.94449	14.77181
0.03	14.62026	14.54273
0.04	14.61189	14.54714
0.05	16.0978	14.39471
0.06	16.48546	14.34978
0.07	16.73348	14.28238
0.08	15.70661	14.31366
0.09	15.64626	14.43084
0.1	15.55551	14.84846
0.11	15.97753	14.78062
0.12	14.93877	14.87137
0.13	15.24185	14.70969
0.14	16.82687	14.2511
0.15	15.60617	14.34934
0.16	15.27709	14.39427
0.17	14.99163	14.46608
0.18	15.6348	14.59648
0.19	15.32863	14.70881
0.2	15.62907	14.91586
0.21	15.62907	14.91586
0.22	14.54317	14.47974
0.23	15.08678	14.49295
0.24	15.24229	14.82599
0.25	15.0489	14.68634
0.26	11.18855	14.3815
0.27	5.732599	15.30617
0.28	2.297357	15.81013
0.29	7.936123	19.89427
0.3	4.437445	26.71454
0.31	1.418128	23.07665
0.32	0.070626	22.24097
0.33	0.057628	22.02996
0.34	0.057628	21.34229

เวลา (วินาที)	ระดับน้ำ(เซนติเมตร) (ต่อ)	
	เซนเซอร์ตัวที่ 1	เซนเซอร์ตัวที่ 2
0.35	2.168859	21.46344
0.36	5.392511	21.4141
0.37	6.17489	21.30176
0.38	6.502203	21.22996
0.39	6.514978	21.07753
0.4	6.313656	20.80793
0.41	6.388106	21.11322
0.42	6.308811	20.74978
0.43	6.170925	20.8348
0.44	6.344493	20.57885
0.45	6.057709	20.48899
0.46	5.477093	20.55639
0.47	5.003524	20.38987
0.48	4.718502	20.4533
0.49	3.621903	20.42599
0.5	3.676053	20.49339
0.51	3.082811	20.6511
0.52	2.145806	20.70485
0.53	1.962868	21.41894
0.54	0.824841	22.13789
0.55	3.847577	23.74317
0.56	16.96696	17.03568
0.57	16.69339	19.46784
0.58	22.73128	20.08194
0.59	16.54097	19.6185
0.6	19.44273	18.90529
0.61	19.24405	17.68326
0.62	19.61101	16.95727
0.63	20.26564	14.53084
0.64	19.49912	12.2815
0.65	17.25419	10.34449
0.66	19.0674	8.044493
0.67	19.75154	10.23833
0.68	20.59692	3.6163
0.69	16.92291	0.839207
0.7	18.04581	0.026432
0.71	16.77841	0.600881
0.72	16.2141	1.459471
0.73	16.08811	2.703524

เวลา (วินาที)	ระดับน้ำ(เซนติเมตร) (ต่อ)	
	เซนเซอร์ตัวที่ 1	เซนเซอร์ตัวที่ 2
0.74	16.26564	2.051101
0.75	16.89031	2.604405
0.76	15.99912	4.693392
0.77	16.54361	4.224229
0.78	16.21586	5.581938
0.79	16.02996	0.175903
0.8	14.17225	0.522863
0.81	14.42247	0.649648
0.82	14.50132	0.708238
0.83	13.70793	0.261674
0.84	10.47533	0.244141
0.85	7.220705	3.789868
0.86	3.842291	11.92863
0.87	10.44581	4.011894
0.88	7.66696	13.12379
0.89	3.191859	21.38018
0.9	0.553956	21.49106
0.91	0.098059	21.48242
0.92	0.055938	21.76916
0.93	0.03442	21.7137
0.94	0.018374	21.71922
0.95	0.007823	22.15938
0.96	0.056788	21.71458
0.97	0.053223	21.65295
0.98	0.058542	21.43088
0.99	0.883696	21.53084
1.00	5.139648	21.43084

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองแรงดันไฟฟ้าและระดับของเหลว เมื่อของเหลวต่างชนิดกัน

ตารางที่ ข-1 แรงดันไฟฟ้ากับระดับน้ำ เมื่อวัดระดับน้ำคลอง

ครั้งที่	แรงดันไฟฟ้า(โวลต์)					
	ระดับน้ำ(เมตร)					
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
1	115	221	330	454	564	693
2	116	221	330	454	564	694
3	118	222	329	454	565	693
4	115	221	329	455	564	694
5	115	223	330	455	563	694
6	116	223	330	456	564	694
7	117	222	331	455	563	695
8	119	221	331	454	565	695
9	119	222	330	455	565	695
10	114	222	331	454	566	695
ค่าเฉลี่ย	116.40	221.80	330.10	454.60	564.30	694.20

ตารางที่ ข-2 แรงดันไฟฟ้ากับระดับน้ำ เมื่อวัดระดับน้ำทะเล

ครั้งที่	แรงดันไฟฟ้า(โวลต์)					
	ระดับน้ำ(เมตร)					
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
1	80	202	315	440	555	687
2	80	202	316	439	554	687
3	80	202	316	441	555	688
4	81	202	316	440	555	687
5	78	202	316	440	554	687
6	78	202	315	440	555	687
7	80	203	315	440	555	687
8	77	203	316	439	554	688
9	78	203	315	441	554	687
10	77	203	314	440	555	687
ค่าเฉลี่ย	78.90	202.40	315.40	440.00	554.60	687.20

ตารางที่ ช-3 แรงดันไฟฟ้ากับระดับน้ำ เมื่อวัดระดับน้ำดื่ม

ครั้งที่	แรงดันไฟฟ้า(มิลลิโวลต์)					
	ระดับน้ำ(เมตร)					
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
1	82	196	338	447	573	698
2	82	196	338	446	574	698
3	81	196	338	446	574	698
4	82	193	337	445	573	698
5	83	194	337	445	574	698
6	82	195	338	446	574	698
7	83	197	338	446	574	698
8	81	193	337	445	574	698
9	82	196	337	447	574	698
10	83	195	338	445	574	698
ค่าเฉลี่ย	82.10	195.10	337.60	445.80	573.80	698.00

ภาคผนวก ซ

ผลการทดลองผลกระทบจากการส่งข้อมูลของเซนเซอร์ผ่านโมดูลสื่อสารไร้สาย

ตารางที่ ซ-1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเวลาของค่าที่วัดจาก LabVIEW กับโมดูล XBee

เวลา(วินาที)	ระดับของเหลว(เมตร)	เวลา(วินาที)	ระดับของเหลว(เมตร)
	LabVIEW		LabVIEW
0	0	3.2	0.215068
0.1	0	3.3	0.216774
0.2	0	3.4	0.214092
0.3	0	3.5	0.202781
0.4	0	3.6	0.19637
0.5	0	3.7	0.209672
0.6	0	3.8	0.210042
0.7	0	3.9	0.211338
0.8	0	4	0.210412
0.9	0	4.1	0.211153
1	0	4.2	0.210367
1.1	0	4.3	0.209717
1.2	0	4.4	0.210552
1.3	0	4.5	0.204064
1.4	0	4.6	0.207662
1.5	0	4.7	0.210692
1.6	0.01637	4.8	0.209857
1.7	0.036303	4.9	0.210647
1.8	0.076295	5	0.210552
1.9	0.089145	5.1	0.210092
2	0.112282	5.2	0.209857
2.1	0.141175	5.3	0.20969
2.2	0.167264	5.4	0.210832
2.3	0.19539	5.5	0.210417
2.4	0.208114	5.6	0.210092
2.5	0.210832	5.7	0.20969
2.6	0.210602	5.8	0.209441
2.7	0.214417	5.9	0.210552
2.8	0.214833	6	0.209676
2.9	0.203283	6.1	0.209812
3.0	0.204998	6.2	0.209672
3.1	0.215853	6.3	0.209717

เวลา(วินาที)	ระดับของเหลว(เมตร)	เวลา(วินาที)	ระดับของเหลว(เมตร)
	LabVIEW		LabVIEW
6.4	0.2095	9.9	0.140787
6.5	0.209857	10	0.140647
6.6	0.209586	10.1	0.137481
6.7	0.209577	10.2	0.136411
6.8	0.209627	10.3	0.135946
6.9	0.209627	10.4	0.134944
7	0.212309	10.5	0.133711
7.1	0.214097	10.6	0.130704
7.2	0.204569	10.7	0.126735
7.3	0.198817	10.8	0.126329
7.4	0.19595	10.9	0.123529
7.5	0.19651	11	0.121904
7.6	0.196505	11.1	0.118088
7.7	0.19683	11.2	0.117393
7.8	0.202086	11.3	0.113857
7.9	0.20266	11.4	0.108502
8	0.200479	11.5	0.108227
8.1	0.184133	11.6	0.104131
8.2	0.177392	11.7	0.103712
8.3	0.177252	11.8	0.103486
8.4	0.173717	11.9	0.102989
8.5	0.172651	12	0.10051
8.6	0.16912	12.1	0.100741
8.7	0.168181	12.2	0.100741
8.8	0.163349	12.3	0.099106
8.9	0.159995	12.4	0.098925
9	0.159019	12.5	0.098384
9.1	0.157922	12.6	0.09558
9.2	0.154459	12.7	0.09455
9.3	0.154554	12.8	0.094284
9.4	0.154274	12.9	0.093372
9.5	0.153226	13	0.091624
9.6	0.149627	13.1	0.093507
9.7	0.146187	13.2	0.097657
9.8	0.144972	13.3	0.096735

เวลา(วินาที)	ระดับของเหลว(เมตร)	เวลา(วินาที)	ระดับของเหลว(เมตร)
	LabVIEW		LabVIEW
13.4	0.09525	16.9	0.06884
13.5	0.09502	17	0.067111
13.6	0.094455	17.1	0.067625
13.7	0.092455	17.2	0.067485
13.8	0.091349	17.3	0.067251
13.9	0.090319	17.4	0.067061
14	0.090459	17.5	0.067016
14.1	0.090089	17.6	0.066966
14.2	0.089087	17.7	0.066826
14.3	0.08822	17.8	0.066424
14.4	0.086698	17.9	0.066826
14.5	0.085479	18	0.06497
14.6	0.085529	18.1	0.063539
14.7	0.085668	18.2	0.063259
14.8	0.085294	18.3	0.062979
14.9	0.085203	18.4	0.062835
15	0.083799	18.5	0.062315
15.1	0.080783	18.6	0.062266
15.2	0.080878	18.7	0.062266
15.3	0.080688	18.8	0.062266
15.4	0.080462	18.9	0.062266
15.5	0.080417	19	0.062266
15.6	0.079921	19.1	0.060825
15.7	0.078462	19.2	0.058748
15.8	0.076322	19.3	0.058374
15.9	0.075956	19.4	0.058374
16	0.074453	19.5	0.058089
16.1	0.073116	19.6	0.057665
16.2	0.072421	19.7	0.057665
16.3	0.071527	19.8	0.057484
16.4	0.071477	19.9	0.057484
16.5	0.071527	20	0.057173
16.6	0.071481	20.1	0.056766
16.7	0.070624	20.2	0.055123
16.8	0.069987	20.3	0.06884

เวลา(วินาที)	ระดับของเหลว(เมตร)	เวลา(วินาที)	ระดับของเหลว(เมตร)
	LabVIEW		XBee
20.4	0.053723	0	0
20.5	0.053673	0.3	0
20.6	0.053249	0.6	0
20.7	0.053158	0.9	0
20.8	0.052878	1.2	0
20.9	0.051072	1.5	0
21	0.049826	1.8	0
21.1	0.049402	2.1	0
21.2	0.048548	2.4	0
21.3	0.048499	2.7	0
21.4	0.048598	3	0
21.5	0.048454	3.3	0
21.6	0.048499	3.6	0.10191
21.7	0.048454	3.9	0.207703
21.8	0.048454	4.2	0.216508
21.9	0.048454	4.5	0.209916
22	0.048454	4.8	0.21872
22.1	0.048363	5.1	0.205491
22.2	0.048454	5.4	0.212083
22.3	0.048408	5.7	0.212083
22.4	0.048318	6	0.212083
22.5	0.048142	6.3	0.216508
22.6	0.047785	6.6	0.212083
22.7	0.048052	6.9	0.212083
22.8	0.047289	7.2	0.212083
22.9	0.046792	7.5	0.214295
23	0.046611	7.8	0.207703
23.1	0.045315	8.1	0.209916
23.2	0.044611	8.4	0.196686
23.3	0.043812	8.7	0.205491
23.4	0.044137	9	0.179031
		9.3	0.170226
		9.6	0.159209
		9.9	0.150404
		10.2	0.141599

เวลา(วินาที)	ระดับของเหลว(เมตร)	เวลา(วินาที)	ระดับของเหลว(เมตร)
	XBee		XBee
10.5	0.137174	21	0.051248
10.8	0.132795	21.3	0.049036
11.1	0.123945	21.6	0.044656
11.4	0.112927	21.9	0.049036
11.7	0.11076	22.2	0.044656
12	0.106335	22.5	0.044656
12.3	0.10191	22.8	0.046823
12.6	0.09753	23.1	0.044656
12.9	0.093105	23.4	0.044656
13.2	0.093105	23.7	0.044656
13.5	0.093105		
13.8	0.086513		
14.1	0.086513		
14.4	0.079875		
14.7	0.079875		
15	0.079875		
15.3	0.077708		
15.6	0.071071		
15.9	0.073283		
16.2	0.068858		
16.5	0.068858		
16.8	0.064478		
17.1	0.066691		
17.4	0.062266		
17.7	0.062266		
18	0.062266		
18.3	0.060053		
18.6	0.055673		
18.9	0.057841		
19.2	0.060053		
19.5	0.053461		
19.8	0.053461		
20.1	0.053461		
20.4	0.051248		
20.7	0.053461		

ตารางที่ ซ-2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเวลากรณีคลื่นน้ำเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์เมื่อส่งสัญญาณผ่าน XBee

เวลา(วินาที)	แรงดันไฟฟ้า(โวลต์)
0	0.6734
0.1	0.6783
0.2	0.6929
0.3	0.6978
0.4	0.6978
0.5	0.6978
0.6	0.7076
0.7	0.6978
0.8	0.6783
0.9	0.7173
1	0.7564
1.1	0.7564
1.2	0.7612
1.3	0.7515
1.4	0.7759
1.5	0.7759
1.6	0.7808
1.7	0.854
1.8	0.7759
1.9	0.7271
2	0.7417
2.1	0.7808
2.2	0.7856
2.3	0.7856
2.4	0.8296
2.5	0.8832
2.6	0.854
2.7	0.7905
2.8	0.7905
2.2	0.7856
2.3	0.7856
2.4	0.8296
2.5	0.8832
2.6	0.854

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายศุภกร กดาธิการกุล	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5110120093	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต	มหาวิทยาลัยทักษิณ	2541

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนค่าเล่าเรียนระดับบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

นักวิชาชีพ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

- ชื่อเรื่องที่น่าสนใจ การศึกษาห้วงวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกเพื่อการวัดระดับของเหลว
ชื่อการประชุม การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7
ระหว่างวันที่ 21-22 พฤษภาคม 2552 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ชื่อเรื่องที่น่าสนใจ เซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอกเพื่อวัดระดับของเหลว
ชื่อการประชุม การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 ระหว่างวันที่ 26-30 ตุลาคม 2552
จังหวัดปราจีนบุรี
- ชื่อเรื่องที่น่าสนใจ การศึกษาผลตอบสนองเชิงพลวัตของเซนเซอร์ความจุไฟฟ้าแบบกึ่ง
ทรงกระบอกเพื่อวัดระดับของเหลว
ชื่อการประชุม การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33 ระหว่างวันที่ 1-3 ธันวาคม 2553
จังหวัดเชียงใหม่