



ระบบเฝ้าตรวจวัดระดับน้ำ โดยใช้หัววัดอัจฉริยะ
แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิทีฟอิเล็กโตรด
Water Level Monitoring Systems using Intelligent Sensor
based on Interdigital Capacitive Electrode

ธิตินันท์ ตะพานน้อย

Titinan Tapaonoi

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เลขที่	TJ1166 563 2555
Bib Key	361176
	/ /

ชื่อวิทยานิพนธ์ ระบบเฝ้าตรวจวัดระดับน้ำ โดยใช้หัววัดอัจฉริยะแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิทีฟ
อิเล็กทรอนิกส์

ผู้เขียน นายชิตินันท์ ตะเกาน้อย

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย พลฤกษ์ภัทรานนท์) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชา จินดาเพ็ชร)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย พลฤกษ์ภัทรานนท์)

.....
.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรัช สันติอมรทัต) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรัช สันติอมรทัต)

.....
.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย วรพจน์พิศุทธิ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
สำหรับการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์คารา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ ระบบเฝ้าตรวจวัดระดับน้ำ โดยใช้หัววัดอัจฉริยะแบบอินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิทีฟ
อิเล็กทรอนิกส์

ผู้เขียน นายธิดินทร์ ตะเกาน้อย

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2554

บทคัดย่อ

ระบบเฝ้าตรวจวัดระดับน้ำ โดยใช้หัววัดอัจฉริยะแบบอินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิทีฟอิเล็กทรอนิกส์ เป็นระบบที่ประกอบด้วยหัววัดระดับน้ำทำมาจากแผ่นวงจรมพิมพ์ ซึ่งเรียบง่ายและมีราคาถูก ทำงานร่วมกับการประมวลผลแบบอัจฉริยะที่สามารถปรับการคำนวณค่าระดับน้ำให้มีความถูกต้องอยู่เสมอ และการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่มีเครือข่ายสื่อสารเป็นของตัวเอง มีเป้าหมายของการวิจัยเพื่อสร้างต้นแบบระบบตรวจวัดระดับน้ำ สำหรับใช้ในภาคการเกษตรหรือการเตือนภัย ที่ต้องการวัดระดับน้ำในหลายๆจุดเป็นพื้นที่บริเวณกว้าง ทดแทนการใช้ระบบตรวจวัดแบบเดิม ที่ต้องนำเข้าหัววัดสำเร็จรูปมาจากต่างประเทศ ผลจากการศึกษาทำให้ได้รูปแบบหัววัดระดับน้ำที่มีความเหมาะสม โดยใช้โครงสร้างของอินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิทีฟอิเล็กทรอนิกส์ ที่ได้จากการออกแบบลายทองแดงของแผ่นวงจรมพิมพ์ให้มีลักษณะเป็นซี่ วางสลับกันระหว่างขั้วบวกและลบ แล้วเคลือบทับด้วยฉนวนป้องกันการกัดกร่อน ผลที่เกิดขึ้นจากลายวงจรมพิมพ์ลักษณะดังกล่าวจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้าแปรผันตามระดับน้ำที่สัมผัสอิเล็กทรอนิกส์ โดยค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ จะถูกวัดและประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งสามารถปรับการคำนวณค่าระดับน้ำให้เหมาะสมกับค่าไดอิเล็กตริกของน้ำขณะตรวจวัดโดยอัตโนมัติ จากนั้นค่าระดับน้ำจะถูกส่งให้กับโมดูลเซนเซอร์ไร้สาย Unode เพื่อส่งผ่านข้อมูลแบบไร้สายให้กับสถานีฐาน หรืออุปกรณ์อื่นๆที่มาตรฐานการสื่อสารแบบ RS-232 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า หัววัดที่มีย่านวัด 0-30 เซนติเมตร มีผลตอบสนองระหว่างระยะเวลาคายประจุกับค่าระดับน้ำเป็นเชิงเส้นตลอดย่านวัด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9992 และมีค่าความผิดพลาดในการวัดสูงสุด 2.3% FSO มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า 3.35 มิลลิวัตต์ และผลจากการจำลองการทำงานทำให้ทราบว่า สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนอิเล็กทรอนิกส์มีขอบเขตจำกัดประมาณ 2.5-3.0 มิลลิเมตร นอกจากนี้จากการศึกษากำลังไฟฟ้าสูญเสียยังพบว่า การนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกันเพื่อจ่ายพลังงานให้กับ Unode จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าส่วนเกิน กลายเป็นพลังงานสูญเสียที่ส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลง 13-60%

คำสำคัญ: หัววัดแบบอินเทอร์ดิจิตอล การวัดระดับของเหลว หัววัดแบบค่าความจุไฟฟ้า

Thesis Title Water Level Monitoring Systems using Intelligent Sensor based on Interdigital
 Capacitive Electrode
Author Mr. Titinan Tapaonoi
Major Program Electrical Engineering
Academic Year 2011

Abstract

Water level monitoring system using intelligent sensor based on Interdigital capacitive electrode contained level sensor from printed circuit board (PCB) which was simple and inexpensive. It worked with intelligent water level processing which always adjusted water level calculation correctly and transmitted water level data through wireless sensor networks. The main objective of this research was to develop a system prototype for water level monitoring in agriculture or flood warning. The system was convenient for using and measures water levels in wide areas for replace imported water level system which was expensive. The water level sensor fabricated from a printed circuit board. The copper traces of a printed circuit board as periodic fingers and capacitance between parallel fingers varied according to the water level. The change of capacitance can be measured and converted to a water level by a microcontroller. The output signal of a water level from a microcontroller transmitted to a base station or other devices are compatible with the RS-232 standard through wireless sensor networks. The experimental results show that the water level sensor has linear relation with $R^2 = 0.9992$ and maximum error is 2.3 %FSO and this sensor need low energy 3.35 mW. The simulation results show that the copper traces of the sensor limited vertical electric field in the 2.5-3.0 mm. Moreover, the study shows that when connecting batteries in serial in the system. The excessive supply voltage can produce power loss in the device more than in necessary. In the experimental results, the lifetime of battery has been deducted by 13-60%.

Keywords: Interdigital Sensors, Liquid level measurement, Capacitance sensors

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จไม่ได้เลย หากปราศจากความช่วยเหลือและการสนับสนุนที่ดีจากท่านเหล่านี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย พฤษภักทรานนท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรัช สันตอมรทัต และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ อุทิศเวลาในการให้คำปรึกษาทั้งความรู้ในศาสตร์วิชา คุณธรรม จริยธรรม ซึ่งช่วยขัดเกลา กระบวนการคิดและทัศนคติที่ดีในการทำงานให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชา จินดาเพชร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย วรพจน์พิศุทธิ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ตรวจทานและให้คำแนะนำต่างๆ ในการปรับปรุง วิทยานิพนธ์ จนมีความถูกต้องครบถ้วนสมบูรณ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ได้ให้ สถานที่สำหรับการศึกษา และให้ความภาคภูมิใจที่ได้สำเร็จการศึกษาจากที่แห่งนี้

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ได้ให้การ สนับสนุนทุนวิจัย และการจัดกิจกรรมเพื่อพัฒนาความสามารถของบัณฑิตในด้านต่างๆ

อุทยานวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้ความรู้ในเรื่องทรัพย์สิน ทางปัญญา และให้การสนับสนุนการยื่นขอจดสิทธิบัตรงานวิจัย

คณาจารย์และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรม ไฟฟ้าทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ในด้านต่างๆมาโดยตลอด จนกระทั่งงานสำเร็จลุล่วง

นายด้าย บัณฑิตศักดิ์ นายอภิเดช บูรณวงศ์ นายธีรพงษ์ ฉิมเพชร รวมถึงพี่ๆและ เพื่อนๆทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณอุปสรรคและปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงาน ที่ช่วยให้ข้าพเจ้าได้พัฒนาความรู้ความสามารถของตนเอง ซึ่งเป็นประสบการณ์อันมีค่าที่จะนำไปใช้ให้ เกิดประโยชน์แก่ตนเองและผู้อื่นต่อไป

ธิตินันท์ ตะเกาน้อย

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(10)
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	1
1.2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	3
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	11
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	11
1.5 ระเบียบวิธีวิจัย.....	12
1.6 คุณค่าของงานวิจัย.....	13
2. หัววัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิทีฟอิเล็กทรอนิกส์.....	14
2.1 เทคโนโลยีการวัดระดับของเหลว.....	14
2.1.1 หลักการวัดระดับแบบ Float System.....	14
2.1.2 หลักการวัดระดับแบบ Detecting Electrical Properties.....	14
2.1.3 หลักการวัดระดับแบบ Hydrostatic Pressure.....	15
2.1.4 หลักการวัดระดับแบบ Time of Flight.....	15
2.2 ทฤษฎีและหลักการ.....	17
2.2.1 พื้นฐานการเก็บประจุไฟฟ้า.....	18
2.2.2 พื้นฐานอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์.....	23
2.3 วัสดุอุปกรณ์และการทดลอง.....	28
2.3.1 อินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์.....	28
2.3.2 วงจรควบคุมการทำงาน.....	31
2.3.3 การลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนค่าไดอิเล็กตริกของน้ำ.....	32
2.3.4 การลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการกระเพื่อมของน้ำที่มีการไหล.....	35
2.4 การทดลองและผลการทดลอง.....	38
2.4.1 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าความจุไฟฟ้า.....	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับระยะเวลาคายประจุ	39
2.4.3 การทดลองเพื่อหาค่าความผิดพลาดในการวัดระดับน้ำ.....	41
2.4.4 การทดลองเพื่อหาค่าความผิดพลาดแบบฮิสเทอรีซิส	42
2.4.5 การทดลองเพื่อหาค่าความไม่แน่นอนในการวัดระดับน้ำ	42
2.4.6 การทดลองผลตอบสนองการวัดระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว	43
2.4.7 การทดลองผลตอบสนองการวัดระดับคลื่น	45
2.4.8 การทดลองผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้น.....	46
2.4.9 การทดลองวัดระดับน้ำที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง	46
2.4.10 การจำลองการทำงานเพื่อศึกษาผลกระทบจากการวัดระดับน้ำ ที่มีค่าไดอิเล็กตริก 1-100.....	48
2.4.11 การทดลองผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย	49
2.4.12 การทดลองผลกระทบจากการเสื่อมสภาพฉนวนของผิวเคลือบสายทองแดง	50
2.4.13 การทดลองวิธีการชดเชยค่าความผิดพลาดจากอุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้น	51
2.4.14 ทดลองวิธีการลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการกระเพื่อมของน้ำ ด้วยวิธีการหาค่าเฉลี่ย.....	52
2.4.15 ทดลองวิธีการลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการกระเพื่อมของน้ำ ด้วยวิธีการใช้โครงข่ายประสาทเทียม	56
2.4.16 การทดลองเพื่อหาอัตราการใช้พลังงาน	58
2.4.17 การจำลองการทำงานเพื่อหาขอบเขตสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก.....	59
2.4.18 การจำลองการทำงานเพื่อศึกษาผลกระทบจากความหนาของผิวเคลือบ	61
3. เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย.....	64
3.1 โมดูลเซนเซอร์ไร้สาย Unode.....	64
3.2 การพัฒนาโปรโตคอลการสื่อสารแบบไร้สาย	66
3.2.1 รูปแบบของแพ็กเก็ต	66
3.2.2 การกำหนดค่าเริ่มต้น (initial setup)	68
3.2.3 การรับส่งข้อมูล (data collection).....	69
3.2.4 การบำรุงรักษาเส้นทาง (maintenance).....	70

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.5 การพัฒนาโปรโทคอลบนระบบปฏิบัติการ TinyOS.....	73
3.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานระบบ	74
3.3.1 ประสิทธิภาพการทำงานของโปรโทคอล	74
3.4 การเชื่อมต่อหัววัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอลเข้ากับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย.....	78
3.5 การทดสอบประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของเซนเซอร์โหนดในห้องทดลอง.....	80
3.6 การทดสอบประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของเซนเซอร์โหนดในรางน้ำทดสอบ	82
3.7 การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียของเซนเซอร์โหนด (Unode)	86
3.7.1 ผลการศึกษาและการอภิปราย	87
3.7.2 วิธีการทดลอง	88
3.7.3 สรุปผลการศึกษา	93
4. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	95
4.1 สรุปผลการวิจัยหัววัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอล	95
4.1.1 ต้นแบบหัววัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอล.....	95
4.1.2 การเชื่อมต่อหัววัดระดับน้ำเข้ากับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย	96
4.2 ข้อเสนอแนะ	97
บรรณานุกรม	98
ภาคผนวก.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	104

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2-1 ผลการทดลองวัดของเหลวชนิดต่างๆ.....	47
3-1 คุณสมบัติของเซนเซอร์โหนด Unode	65
3-2 การทำงานของฟิลต์ข้อมูล	67
3-3 ค่า Packet Delivery Ratio ของรูปแบบการทดสอบที่ 1, 2 และ 3.....	76
3-4 ผลการทดสอบค่า PDR กับจำนวนการเชื่อมต่อระหว่างโพรโทคอลที่มี scheduling กับโพรโทคอลที่ไม่มี scheduling	78
3-5 ผลการทดลองการส่งข้อมูลของเซนเซอร์โหนดที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อช่วงการส่งข้อมูลทุกๆ 10 นาที	81
3-6 ผลการทดลองการส่งข้อมูลของเซนเซอร์โหนดในสถานะน้ำไหลหลาก เมื่อช่วงการส่งข้อมูลทุกๆ 1 วินาที	85
3-7 การเปรียบเทียบอายุการใช้งานระหว่างการใช้แบตเตอรี่ Ni-MH, Alkaline และการใช้วงจรปรับแรงดันไฟฟ้า	93
4-1 คุณสมบัติของหัววัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอล.....	95
4-2 ผลสรุปการเชื่อมต่อหัววัดระดับน้ำเข้ากับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย.....	96

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1-1 ตัวอย่างหัววัดระดับของเหลวในอุตสาหกรรม.....	1
1-2 การใช้หัววัดระดับน้ำในหุ่นจำลองสำหรับงานวิจัยด้านชลศาสตร์.....	2
1-3 การใช้หัววัดระดับน้ำ ติดตั้งในสถานีวัดระดับน้ำท่วมบนถนน.....	2
1-4 หัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย Stanley E.	3
1-5 หัววัดระดับน้ำที่นำเสนอโดย Kevin Sze.....	4
1-6 หัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย Georgi Nikolov	4
1-7 หัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย Guilin Zheng	5
1-8 หัววัดระดับน้ำที่นำเสนอโดย Guilin Zheng.....	5
1-9 หัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย A. Cataldo	6
1-10 รูปแบบหัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย Hüseyin Canbolat	7
1-11 หัววัดระดับน้ำที่นำเสนอ โดย Armand Crabit	7
1-12 การวัดระดับน้ำด้วยหลักการประมวลผลภาพถ่ายแผ่นป้ายวัดระดับน้ำ.....	8
1-13 หัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย Ferran Reverter	8
1-14 หัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย Klaas Spaargaren.....	9
1-15 หัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย Jonh R. Hart	10
1-16 หัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย Jonh R. Hart	10
1-17 วงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย Jonh R. Hart	11
1-18 โค้ดอะแกรมระบบเผ่าตรวจวัดระดับน้ำโดยใช้หัววัดอัจฉริยะแบบอินเตอร์ดิจิตอล คาปาซิทีฟอิเล็กทรอนิกส์.....	12
2-1 หัววัดระดับของเหลวแบบ Float System.....	14
2-2 หัววัดระดับของเหลวแบบ capacitance	15
2-3 หัววัดระดับของเหลวแบบ Hydrostatic Pressure	15
2-4 หัววัดระดับของเหลวแบบ Radar	16
2-5 การใช้อินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวกรองสัญญาณไฟฟ้า SAW.....	17
2-6 การเก็บประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน	18
2-7 ทิศทางของสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าเดิม	19
2-8 ประจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากวัสดุไดอิเล็กตริก ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น	20

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2-9 สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการแยกแผ่นตัวนำออกในแนวระนาบ	21
2-10 วงจรเสมือนของอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ ทรอด.....	21
2-11 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อมีการสะสมประจุ.....	22
2-12 การประยุกต์ใช้หัววัดแบบอินเตอร์ดิจิตอลตรวจวัดคุณลักษณะของวัสดุแบบต่างๆ.....	22
2-13 การใช้อินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ ทรอดวัดระดับน้ำโดยใช้คุณสมบัติ ของค่าไดอิเล็กตริกของน้ำที่มากกว่าอากาศ	23
2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความหนาของลายวงจร	24
2-15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับระยะห่างของซี่.....	24
2-16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความกว้างของซี่	25
2-17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ ทรอดกับความหนาของสารเคลือบผิว อิเล็กทรอนิกส์ที่ค่าไดอิเล็กตริกต่างๆ	25
2-18 วงจรสมมูลของอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ ทรอดที่นำเสนอโดย Rui Igreja	26
2-19 ตัวแปรที่ใช้ในการประมาณค่าความจุไฟฟ้าของอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ ทรอด	27
2-20 สนามไฟฟ้าแบบวงรีที่เกิดจากอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ ทรอด	27
2-21 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics	28
2-22 ขนาดของลายวงจรที่ได้จากการออกแบบ	29
2-23 ต้นแบบหัววัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอล	30
2-24 วงจรควบคุมการทำงานสำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กทรอนิกส์ ทรอด.....	31
2-25 สัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการทำงานทั้งหมดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	31
2-26 การเพิ่มอิเล็กทรอนิกส์ ทรอดสำหรับชดเชยค่าความผิดพลาด	33
2-27 การปรับการคำนวณของ Sensing Electrode ด้วย Reference Electrode เพื่อลดค่าความ ผิดพลาดที่เกิดจากค่าไดอิเล็กตริกของน้ำมีการเปลี่ยนแปลง	34
2-28 การใช้รีเลย์สลับการวัดระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ ทรอดวัดระดับน้ำ กับอิเล็กทรอนิกส์ ทรอดอ้างอิง.....	35
2-29 ผังการทำงานของระบบการลดค่าความผิดพลาดเนื่องจากการกระเพื่อมของน้ำ	36
2-30 ผลการวัดระดับน้ำที่มีการกระเพื่อมเนื่องจากการไหล	37
2-31 ลักษณะโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้จากการสอน.....	37
2-32 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าความจุไฟฟ้า.....	38

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2-33 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่ได้จากการทดลอง กับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ.....	39
2-34 วิธีการทดลองวัดระดับน้ำด้วยหัววัด โดยเพิ่มระดับน้ำครั้งละ 1 เซนติเมตร	39
2-35 ผังแสดงการเชื่อมต่อหัววัดระดับน้ำ เข้ากับคอมพิวเตอร์	40
2-36 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าระยะเวลาคายประจุ ที่ได้จากการวัดด้วยวงจรควบคุมการทำงาน.....	40
2-37 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าระดับน้ำที่ได้จากการวัดด้วยหัววัดกับค่าระดับน้ำจริง.....	41
2-38 ค่าความผิดพลาดแบบฮิสเทอรีซิสของหัววัด.....	42
2-39 ค่าความไม่แน่นอนของการวัดของหัววัด (uncertainty measurement).....	42
2-40 การนำหัววัดจุ่มลงในน้ำทันทีทันใด.....	43
2-41 การนำหัววัดเคลื่อนที่ขึ้นจากน้ำอย่างทันทีทันใด.....	43
2-42 ผลทดสอบการตอบสนองของหัววัดเมื่อระดับน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว.....	44
2-43 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับทดสอบสถานะคลื่นน้ำไหลผ่าน	45
2-44 ผลการทดลองผลตอบสนองการวัดระดับคลื่น.....	45
2-45 อุณหภูมิน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าระดับน้ำที่วัดด้วยหัววัด	46
2-46 น้ำที่มีการสังเคราะห์ค่า PH 4 – PH9 สำหรับใช้ในการทดลอง	46
2-47 การทดลองวัดระดับน้ำเกลือด้วยหัววัด	47
2-48 การวัดระดับน้ำอัดลมด้วยหัววัด.....	47
2-49 การวัดระดับน้ำมันปาล์มด้วยหัววัด.....	47
2-50 ค่าความผิดพลาดจากการวัด เมื่อค่าไดอิเล็กตริกของน้ำเปลี่ยนแปลง.....	49
2-51 ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดด้วยวงจรควบคุมการทำงานเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดัน 2.1-5 V.....	49
2-52 การต่อตัวต้านทานขนานกับอิเล็กโทรด เพื่อจำลองการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบ	50
2-53 ค่าความผิดพลาดจากการวัดด้วยหัววัด เมื่อผิวเคลือบเสื่อมสภาพจนวน	50
2-54 อิเล็กโทรดอ้างอิงที่มีความยาว 2 เซนติเมตร	51
2-55 เปรียบเทียบการวัดระดับน้ำระหว่างหัววัดที่มีการชดเชยค่าความผิดพลาด	51
2-56 ไอ้ น้ำที่ เกิดขึ้นเมื่อน้ำเริ่มมีอุณหภูมิมากกว่า 40 องศาเซลเซียส.....	52
2-57 การจำลองสภาพการไหลของน้ำด้วยปั้มน้ำ.....	53

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2-58 การกระเพื่อมของน้ำที่เกิดจากการจำลองการไหลด้วยปั้มน้ำ.....	53
2-59 ผลการวัดระดับน้ำด้วยหัววัด ในสถานะที่มีการจำลองการไหลของน้ำ.....	54
2-60 ผลการเฉลี่ยค่าระดับน้ำที่วัดได้จากหัววัดทุก 10 วินาที.....	54
2-61 ผลการเฉลี่ยค่าระดับน้ำที่วัดได้จากหัววัดทุก 60 วินาที.....	55
2-62 ผลการเฉลี่ยค่าระดับน้ำที่วัดได้จากหัววัดใน 600 วินาที.....	55
2-63 การใช้โครงข่ายประสาทเทียมใน Labview ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB.....	56
2-64 การจำลองสภาพการไหลแบบเปลี่ยนแปลงซ้ำในรางเปิด.....	56
2-65 ลักษณะการกระเพื่อมของน้ำที่ไหลผ่านหัววัด.....	57
2-66 ระดับน้ำที่วัดจริงด้วยหัววัด เปรียบเทียบกับค่าระดับน้ำที่ผ่านโครงข่ายประสาทเทียม.....	57
2-67 ระดับน้ำที่วัดจริงด้วยหัววัด (บน) เปรียบเทียบกับค่าระดับน้ำที่ผ่านโครงข่ายประสาทเทียม.....	57
2-68 อัตราการใช้พลังงานของหัววัดในแต่ละโหมด ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ.....	58
2-69 ขนาดและวัสดุของอิเล็กโทรดที่ใช้ในการหาขอบเขตของสนามไฟฟ้า.....	59
2-70 การจำลองการทำงานเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเมื่อความหนาของน้ำมีค่าตั้งแต่ 0-10 มิลลิเมตร โดยใช้โปรแกรม COMSOL.....	59
2-71 ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเมื่อความหนาของน้ำที่สัมผัสอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น 0-10 มิลลิเมตร.....	60
2-72 ระยะเวลาขอบเขตสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กโทรด.....	60
2-73 โครงสร้างของอิเล็กโทรดที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	61
2-74 ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลดลงเมื่อความหนาของชั้นผิวเคลือบเพิ่มขึ้น.....	62
2-75 อิเล็กโทรดมีความสามารถในการวัดไดอิเล็กตริกของน้ำลดลงเมื่อความหนาของชั้นผิวเคลือบเพิ่มขึ้น.....	62
3-1 ลักษณะโมดูลเซนเซอร์ไร้สาย Unode.....	65
3-2 รูปแบบแพ็กเก็ตในโปรโตคอล.....	66
3-3 รูปแบบการเริ่มต้นการค้นหาเส้นทาง.....	68
3-4 โหนด gateway ทำการกระจายแพ็กเก็ตให้กับโหนดรอบข้าง.....	69
3-5 โหนดมีเส้นทางติดต่อกับโหนด gateway.....	69

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

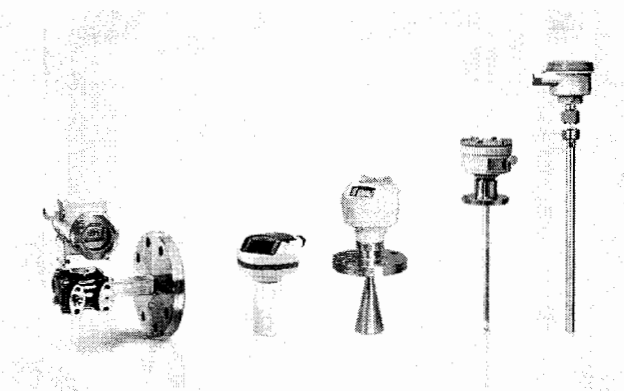
ภาพประกอบ	หน้า
3-6 รูปแบบการรับส่งข้อมูลของ โหนด.....	70
3-7 รูปแบบการบำรุงรักษาเส้นทางของ โพรโทคอล.....	71
3-8 เส้นทางในเครือข่ายเกิดการเสียหาย.....	72
3-9 เส้นทางใหม่ในเครือข่ายในการติดต่อสื่อสาร.....	72
3-10 โครงสร้างลำดับชั้น network บนระบบปฏิบัติการ TinyOS2.0.....	73
3-11 โครงสร้างเครือข่ายแบบเรียงต่อกันจำนวน 4 hop.....	74
3-12 โครงสร้างเครือข่ายแบบมี 2 ทางเลือกแต่ละเส้นทางมีจำนวน 2 hop.....	75
3-13 โครงสร้างเครือข่ายแบบ 3 hop lollipop.....	75
3-14 การเชื่อมต่อหัววัดระดับน้ำเข้ากับ โมดูลเซนเซอร์ไร้สาย Unode.....	79
3-15 การประกอบหัววัดระดับน้ำเข้ากับ โมดูลเซนเซอร์ไร้สาย.....	79
3-16 การจำลองการวัดระดับน้ำในถังพลาสติก ซึ่งจัดวางไว้ในตำแหน่งต่างๆ.....	80
3-17 สถานที่ทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของเซนเซอร์ โหนด.....	80
3-18 ตำแหน่งการวางเซนเซอร์ โหนดในการทดลอง.....	81
3-19 ประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของเซนเซอร์ โหนดในแต่ละช่วงเวลาที่ทำทดสอบ.....	82
3-20 การติดตั้งเซนเซอร์ โหนดทั้ง 4 ชุด ในรางน้ำจำลองสภาพการไหล.....	83
3-21 เซนเซอร์ โหนดที่ใช้ในการทดลอง.....	83
3-22 สถานีฐานที่ใช้ในการเก็บข้อมูลระดับน้ำที่ส่งมาจากเซนเซอร์ โหนดทั้ง 4 ชุด.....	84
3-23 น้ำที่ไหลผ่านเซนเซอร์ โหนด.....	84
3-24 ผลการรับ-ส่งข้อมูลระดับน้ำของเซนเซอร์ โหนดในแต่ละช่วงเวลา.....	85
3-25 วิธีการวัดเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ โหนดที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 2.2 ถึง 3.5 โวลต์.....	88
3-26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของ Unode กับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Unode.....	89
3-27 ร้อยละของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าสูงเกินกว่าความต้องการ ต่ำสุดของ Unode ที่ 2.2 โวลต์.....	90
3-28 การเปรียบเทียบอัตราใช้พลังงานใน 1 ชั่วโมงระหว่างการใช้แบตเตอรี่ Ni-MH กับ Alkaline เมื่อ Unode มีรอบการส่งข้อมูลตั้งแต่ 0-100%.....	91
3-29 การเปรียบเทียบอายุการใช้งานแบตเตอรี่ Ni-MH กับ Alkaline เมื่อแบตเตอรี่มีความจุ พลังงานเท่ากันที่ 200,000 จูล.....	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

เมื่อสำรวจผลิตภัณฑ์หัววัดระดับของเหลวที่มีจำหน่ายจะพบว่า โดยส่วนใหญ่เป็นหัววัดที่ผลิตออกมาสำหรับใช้ในภาคอุตสาหกรรมเป็นหลัก เช่น หัววัดแบบ Hydrostatic level measurement หัววัดแบบ Ultrasonic level measurement หัววัดแบบ Radar level measurement หรือหัววัดแบบ Capacitance level measurement ดังภาพประกอบ 1-1 หัววัดเหล่านี้ถูกออกแบบมาให้มีเสถียรภาพการทำงาน และมีความแม่นยำในการวัดสูง นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติพิเศษต่างๆเพื่อรองรับการใช้งานในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น มีย่านวัดใช้งานกว้าง สามารถวัดของเหลวได้หลายชนิด ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี มีความปลอดภัยต่ออาหาร ป้องกันการระเบิด หรือสามารถแยกแยะระหว่างระดับของเหลวกับฟองบนผิวได้ จึงทำให้หัววัดระดับของเหลวที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีราคาสูงตามไปด้วย



ภาพประกอบ 1-1 ตัวอย่างหัววัดระดับของเหลวในอุตสาหกรรม [1]

ในการตรวจวัดระดับน้ำที่เป็นการใช้งานทั่วไป เช่น การวัดระดับน้ำในหุ้่นจำลอง สำหรับงานวิจัยด้านชลศาสตร์ดังภาพประกอบ 1-2 ที่เป็นการใช้งานในช่วงเวลาสั้นๆและมีระดับน้ำไม่สูงมาก หรือการวัดระดับน้ำสำหรับระบบเตือนภัยน้ำท่วมดังภาพประกอบ 1-3 ที่หัววัดมีโอกาสใช้งานไม่กี่ครั้งต่อปีแต่ต้องการการบำรุงรักษาอยู่เสมอ หรือการวัดระดับน้ำในแปลงเกษตรหรือบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ที่ไม่ต้องการความแม่นยำในการวัดที่สูงมาก แต่ต้องการวัดระดับน้ำหลายๆจุด เพื่อให้ครอบคลุมทั่วพื้นที่การทำเกษตร จากตัวอย่างที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า หากเรานำหัววัดระดับ

ของเหลวในอุตสาหกรรม มาใช้ในงานลักษณะดังกล่าว จะเป็นการลงทุนที่สูงมากและไม่คุ้มค่ากับการใช้งาน



ภาพประกอบ 1-2 การใช้หัววัดระดับน้ำในหุ่นจำลองสำหรับงานวิจัยด้านชลศาสตร์ [2]



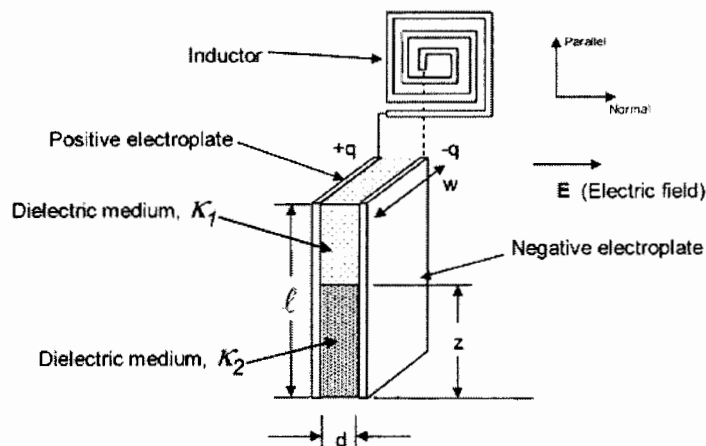
ภาพประกอบ 1-3 การใช้หัววัดระดับน้ำ ติดตั้งในสถานีวัดระดับน้ำท่วมบนถนน [3]

จากคุณสมบัติที่หลากหลายของหัววัดระดับของเหลวในอุตสาหกรรม ทำให้หัววัดมีราคาสูง ไม่เหมาะสมกับการนำมาตรวจวัดระดับน้ำที่เป็นการใช้งานทั่วไป งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างต้นแบบระบบเฝ้าตรวจวัดระดับน้ำ โดยใช้หัววัดระดับน้ำและเครือข่ายสื่อสารไร้สายที่พัฒนาขึ้นเอง เพื่อให้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำหัววัดระดับน้ำไปใช้งานหรือนำไปพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

1.2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการทบทวนบทความวิจัยที่ผ่านมา ได้ให้ความสำคัญไปที่ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบหรือหัววัดระดับของเหลว ที่มีโครงสร้างและหลักการทำงานที่ไม่ซับซ้อน เพื่อให้สามารถผลิตได้ง่าย และมีราคาถูก มีบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

1.2.1 บทความของ Stanley E. (2007) เรื่อง A wireless fluid-level measurement technique, Sensors and Actuators [4] ได้นำเสนอหัววัดระดับของเหลวที่มีหลักการทำงานแบบค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ประกอบด้วยส่วนอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งทำหน้าที่เสมือนตัวเก็บประจุที่เปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าตามระดับน้ำ และส่วนที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งทั้งสองส่วนนี้ต่อขนานกันโดยไม่มีแหล่งพลังงานไฟฟ้าจ่ายให้กับวงจร ดังภาพประกอบ 1-4



ภาพประกอบ 1-4 หัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย Stanley E. [4]

ในการอ่านค่าระดับน้ำจะต้องมีตัวรับ-ส่งคลื่นวิทยุแยกออกมาอีกชุดหนึ่ง ทำหน้าที่ส่งความถี่วิทยุออกไป แล้ววัดความถี่วิทยุที่แพร่กระจายกลับออกมา คล้ายกับระบบ RFID โดยความถี่ที่แพร่กลับออกมาจะแปรผกผันกับระดับน้ำ ข้อสังเกตที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ หัววัดระดับของเหลวที่มีหลักการการทำงานแบบค่าความจุไฟฟ้าจะใช้พลังงานน้อย

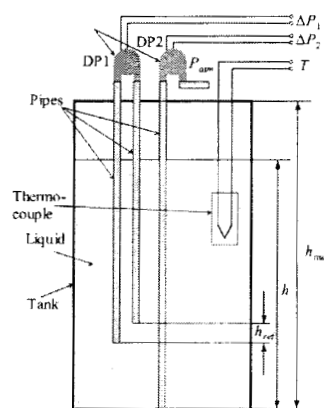
1.2.2 บทความของ Kevin Sze (2008) เรื่อง Remote flood monitoring system based on plastic optical fibres and wireless motes [5] นำเสนอระบบเฝ้าตรวจวัดระดับน้ำท่วมโดยใช้หัววัดระดับน้ำแบบใยแก้วนำแสง ทำงานร่วมกับระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ดังภาพประกอบ 1-5 จุดเด่นของบทความนี้คือ 1) การนำเสนอหัววัดรูปแบบใหม่ซึ่งใช้หลักการหักเหของแสงที่แตกต่างกันระหว่างน้ำและอากาศ 2) วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กทรอนิกส์ทำได้ง่าย และมีโครงสร้าง

ไม่ซับซ้อน 3) อิเล็กทรอนิกส์สามารถเปิดปิดการทำงานได้อย่างรวดเร็ว จึงช่วยประหยัดพลังงานเมื่อต้องทำงานร่วมกับโหมดหลับ (sleep mode)



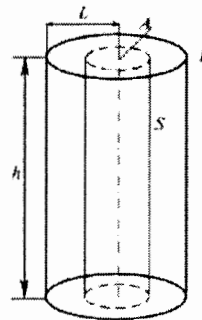
ภาพประกอบ 1-5 หัววัดระดับน้ำที่นำเสนอโดย Kevin Sze [5]

1.2.3 บทความของ Georgi Nikolov (2008) เรื่อง Virtual techniques for liquid level monitoring using differential pressure sensors [6] นำเสนอการทำหัววัดระดับของเหลวโดยการประยุกต์ใช้หัววัดแรงดัน ซึ่งวัดแรงดันเปรียบเทียบระหว่างแรงดันจากความกดอากาศ แรงดันอากาศภายในท่อที่จุ่มในของเหลว และแรงดันที่ระดับของเหลวอ้างอิง ดังภาพประกอบ 1-6 มีหลักการการทำงานคือ แรงดันอากาศในท่อจะแปรผันตรงกับระดับของเหลวและแรงดันจากความกดอากาศ โดยมีการวัดอุณหภูมิและค่าความหนาแน่นของเหลว (จากแรงดันที่ระดับของเหลวอ้างอิง) เพื่อนำมาชดเชยค่าความผิดพลาด (compensation) ที่เกิดจากความหนาแน่นของเหลวเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ สิ่งที่น่าสนใจสำหรับงานวิจัยนี้คือ สามารถนำหัววัดแรงดันอากาศมาประยุกต์ใช้งานได้ โดยไม่ต้องสร้างส่วนของหัววัดขึ้นมาใหม่ และสามารถต่อใช้งานกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ โดยตรงผ่านพอร์ตแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital)



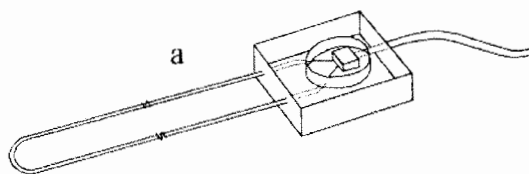
ภาพประกอบ 1-6 หัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย Georgi Nikolov [6]

1.2.4 บทความของ Guilin Zheng (2007) เรื่อง Fast Dynamic Liquid Level Sensor Based on Liquid Resistance [7] นำเสนอการวัดระดับของเหลวด้วยหลักการค่าความต้านทาน มีโครงสร้างของอิเล็กโทรดเป็นตัวยาน้ำสองชิ้นที่อยู่ในรูปทรงกระบอกดังภาพประกอบ 1-7 เมื่อแผ่นตัวนำถูกจุ่มลงไปในของเหลว จะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามระดับของเหลวที่สัมผัส สิ่งที่น่าสนใจของหัววัดนี้คือ อิเล็กโทรดมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน และมีตัวอย่างวงจรการต่อใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพประกอบ 1-7 หัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย Guilin Zheng [7]

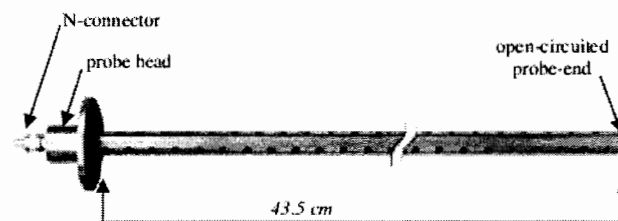
1.2.5 บทความของ A. Thomsen (2000) เรื่อง Application of TDR to water level measurement [8] นำเสนอการสร้างหัววัดระดับน้ำที่มีหลักการทำงานแบบ Time domain reflectometry (TDR) โดยใช้ลวดนำสัญญาณมาตัดให้เป็นส่วนโค้งดังภาพประกอบ 1-8



ภาพประกอบ 1-8 หัววัดระดับน้ำที่นำเสนอโดย A. Thomsen [8]

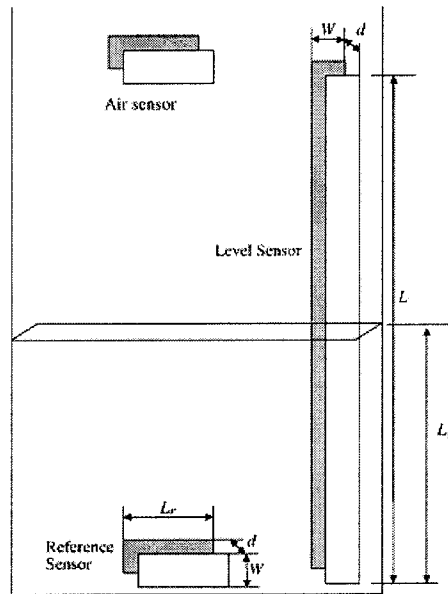
การอ่านค่าระดับน้ำทำได้โดยใช้เครื่องตรวจหาจุดขาดของสายนำสัญญาณยี่ห้อ Tektronix รุ่น 1502 ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ส่งออกไปผ่านทางลวดตัวนำที่อยู่ในอากาศและน้ำ แล้ววัดระยะเวลาที่สัญญาณสะท้อนกลับมา โดยอาศัยหลักการที่ความเร็วในการเดินทางของสัญญาณผ่านลวดตัวนำที่อยู่ในน้ำ ช้ากว่าสัญญาณที่เดินทางผ่านลวดตัวนำที่อยู่ในอากาศ ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของทั้งสองส่วนไม่เท่ากัน สัญญาณบางส่วนจึงเกิดการสะท้อนกลับเมื่อมาถึงจุดที่ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไป จุดเด่นของหัววัดนี้คือ มีโครงสร้างของอิเล็กโทรดไม่ซับซ้อน

1.2.6 บทความของ A. Cataldo (2008) เรื่อง An evaluation of performance limits in continuous TDR monitoring of permittivity and levels of liquid materials [9] นำเสนอการสร้างหัววัดระดับของเหลวที่มีหลักการการทำงานแบบ Time domain reflectometry (TDR) ซึ่งมีโครงสร้างแบบทรงกระบอกคล้ายสายนำสัญญาณแบบโคแอกเซียลดังภาพประกอบ 1-9 การอ่านค่าระดับน้ำจะใช้หลักการเดียวกับบทความของ A. Thomsen แต่แตกต่างกันที่ A. Cataldo ใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์สัญญาณแทนเครื่องมือวัด TDR สำเร็จรูป จุดเด่นของหัววัดนี้คือ โครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์มีความแข็งแรงเหมาะสำหรับการวัดระดับของเหลวที่มีการไหล เช่น การวัดระดับของเหลวในท่อ



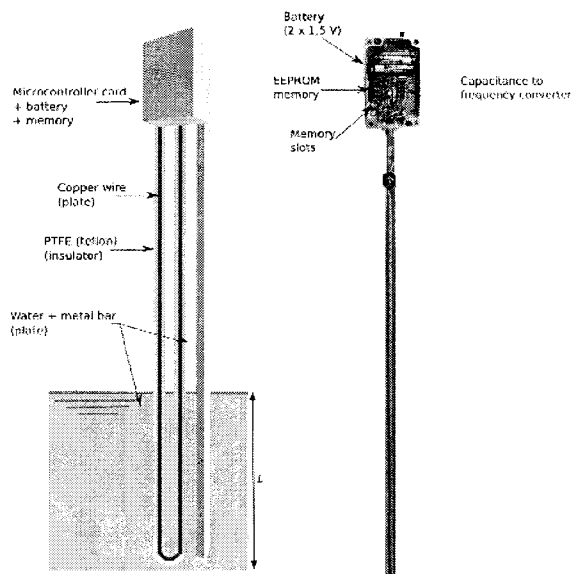
ภาพประกอบ 1-9 หัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย A. Cataldo [9]

1.2.7 บทความของ Hüseyin Canbolat (2009) เรื่อง Novel Level Measurement Technique Using Three Capacitive Sensors for Liquids [10] นำเสนอรูปแบบหัววัดระดับของเหลวแบบค่าความจุไฟฟ้า โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างแบบแผ่นตัวนำ วางขนานกันจำนวน 3 ชุด ประกอบด้วย 1) Air Sensor สำหรับใช้วัดค่าไดอิเล็กตริกของอากาศ 2) Reference Sensor สำหรับใช้วัดค่าไดอิเล็กตริกของเหลว และ 3) Level Sensor สำหรับใช้วัดระดับของเหลวดังภาพประกอบ 1-10 จุดเด่นที่น่าสนใจสำหรับบทความนี้คือ การแสดงให้เห็นถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กตริกของอากาศและของเหลวเนื่องจากฝุ่นละอองหรือสิ่งเจือปนในน้ำ ทำให้การวัดระดับของเหลวด้วยหลักการค่าความจุไฟฟ้ามีความผิดพลาด และเสนอวิธีการลดค่าความผิดพลาดดังกล่าว ด้วยการเพิ่มอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดค่าไดอิเล็กตริกของเหลวและอากาศโดยเฉพาะ แล้วจึงนำค่าไดอิเล็กตริกที่ได้ไปชดเชยค่าความผิดพลาด



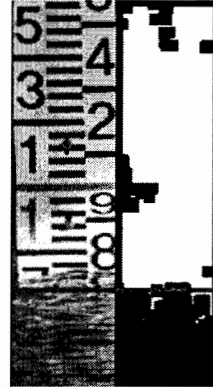
ภาพประกอบ 1-10 รูปแบบหัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย Hüseyin Canbolat [10]

1.2.8 บทความของ Armand Crabit (2011) เรื่อง Soft Water Level Sensors for Characterizing the Hydrological Behaviour of Agricultural Catchments [11] นำเสนอหัววัดระดับน้ำที่มีหลักการทำงานแบบค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งมีโครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์ภาพประกอบ 1-11 จุดเด่นของหัววัดนี้คือ ส่วนอิเล็กทรอนิกส์ถูกบรรจุอยู่ในท่อ PTFE ซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าและป้องกันการกัดกร่อนได้ดี จึงน่าจะมีอายุการใช้งานยาวนาน อีกทั้งหัววัดให้ค่าความจุไฟฟ้าในช่วงนาโนฟารัด (nF) จึงง่ายต่อการวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยหลักการ RC Time Constant ซึ่งสามารถใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์จับระยะเวลาคาบประจุที่สัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าได้



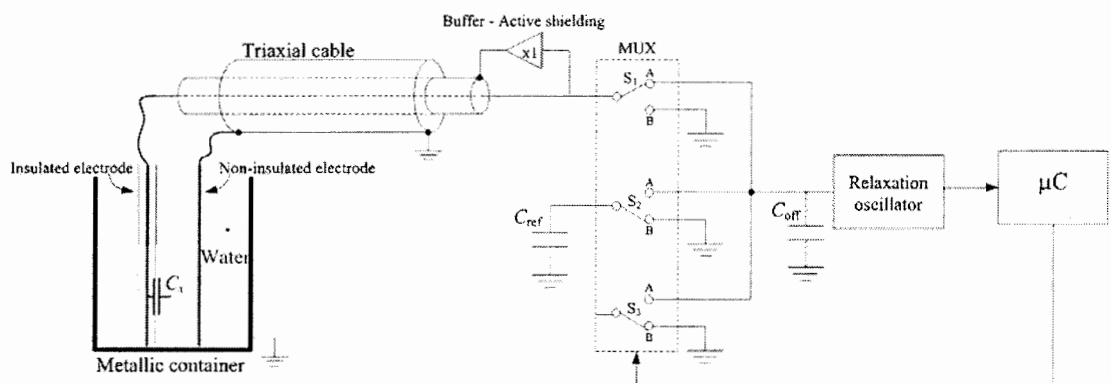
ภาพประกอบ 1-11 หัววัดระดับน้ำที่นำเสนอโดย Armand Crabit [11]

1.2.9 บทความของ J. Kim (2011) เรื่อง Embedded implementation of image-based water-level measurement system [12] นำเสนอระบบวัดระดับน้ำด้วยหลักการประมวลผลภาพถ่ายแผ่นป้ายวัดระดับน้ำที่ได้จากกล้องวงจรปิดซึ่งภาพประกอบ 1-12 จุดเด่นของงานวิจัยนี้คือสามารถใช้งานร่วมกับสถานีวัดระดับน้ำที่มีอยู่แล้ว โดยไม่ต้องดัดแปลงอุปกรณ์ใดๆเพิ่มเติม และเป็นการวัดที่ไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของเหลว



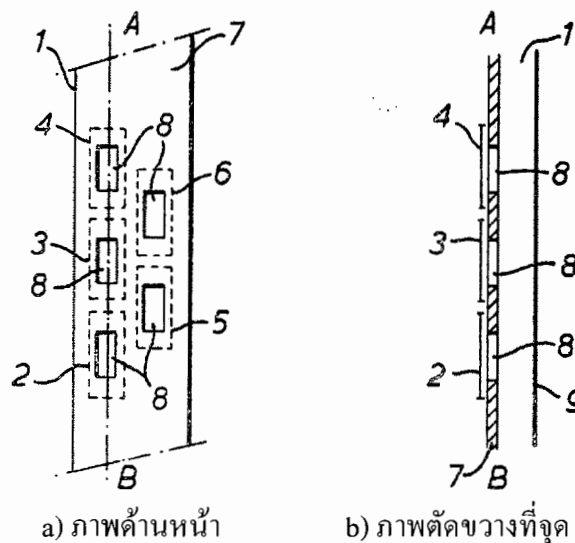
ภาพประกอบ 1-12 การวัดระดับน้ำด้วยหลักการประมวลผลภาพถ่ายแผ่นป้ายวัดระดับน้ำ
ที่นำเสนอโดย J. Kim [12]

1.2.10 บทความของ Ferran Reverter (2007) เรื่อง Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor [13] นำเสนอหัววัดระดับน้ำที่มีหลักการทำงานแบบค่าความจุไฟฟ้า มีโครงสร้างดังภาพประกอบ 1-13 จุดเด่นที่สำคัญของหัววัดนี้คือ จะมีการสอบเทียบ (calibration) วงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าขณะทำการตรวจวัดด้วย โดยให้วงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเป็นประจุ (capacitor) ค่าคงที่ค่าหนึ่งก่อน (C_{ref}) หากค่าที่วัดได้ไม่ตรงกับค่าของตัวเก็บประจุ แสดงว่าวงจรวัดมีความผิดพลาด จากนั้นนำผลต่างระหว่างค่าจริงกับค่าที่วัดได้ไปชดเชยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น



ภาพประกอบ 1-13 หัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย Ferran Reverter [13]

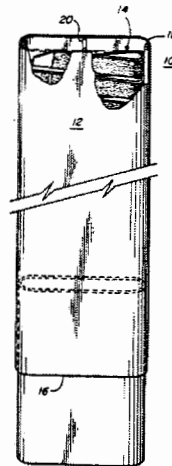
1.2.11 สิทธิบัตรของ Klaas Spaargaren (1985) เลขที่ US 4553434 ชื่อ สิ่งประดิษฐ์ Capacitive Level Gauge [14] นำเสนอหัววัดระดับของเหลวซึ่งมีหลักการทำงานแบบ ค่าความจุไฟฟ้า โดยส่วนอิเล็กทรอนิกส์ทำมาจากโลหะซึ่งถูกเจาะรูไว้เป็นส่วนๆ (section) ดัง ภาพประกอบ 1-14a และใช้แผ่นโลหะปิดทับทำหน้าที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์อีกส่วนหนึ่ง มีระยะห่าง ระหว่างกัน 5 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 1-14b



ภาพประกอบ 1-14 หัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย Klaas Spaargaren [14]

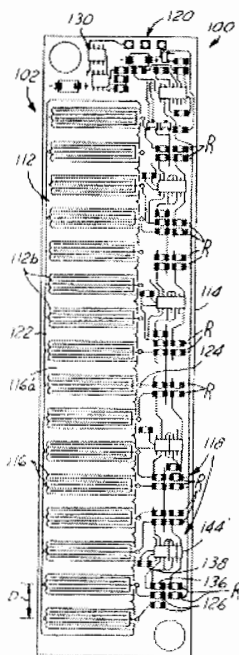
หลักการทำงานคือ เมื่อของเหลวสัมผัสกับอิเล็กทรอนิกส์ ของเหลวจะไหลเข้าไปแทนที่อากาศซึ่งอยู่ใน รูเจาะ ความแตกต่างกันระหว่างค่าไดอิเล็กตริก (dielectric constant) ของเหลวและอากาศ จะทำให้ ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้เปลี่ยนแปลงตามระดับของเหลว แต่สิทธิบัตรนี้ไม่ได้นำเสนอวงจรสำหรับวัด ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้

1.2.12 สิทธิบัตรของ Jonh R. Hart (1990) เลขที่ US 5001596 ชื่อสิ่งประดิษฐ์ Capacitive Fluid Level Sensor [15] นำเสนอหัววัดระดับของเหลวซึ่งมีหลักการทำงานแบบค่าความ จุไฟฟ้าผสมกับระบบลูกลอย มีส่วนอิเล็กทรอนิกส์ทำจากการพันลวดทองแดงอบน้ำยาให้เป็น เกลียว แล้วหุ้มด้วยกล่องดังภาพประกอบ 1-15 มีหลักการทำงานคือ เมื่อระดับของเหลวเพิ่มขึ้น ลูก ลอยที่อยู่ด้านล่างจะเคลื่อนตามระดับของเหลว ซึ่งลูกลอยจะเคลื่อนที่ไปแทนอากาศที่อยู่ภายใน เกลียวขดลวด ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้เพิ่มขึ้นตามระดับของลูกลอย แต่สิทธิบัตรนี้ไม่ได้นำเสนอ วงจรสำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้

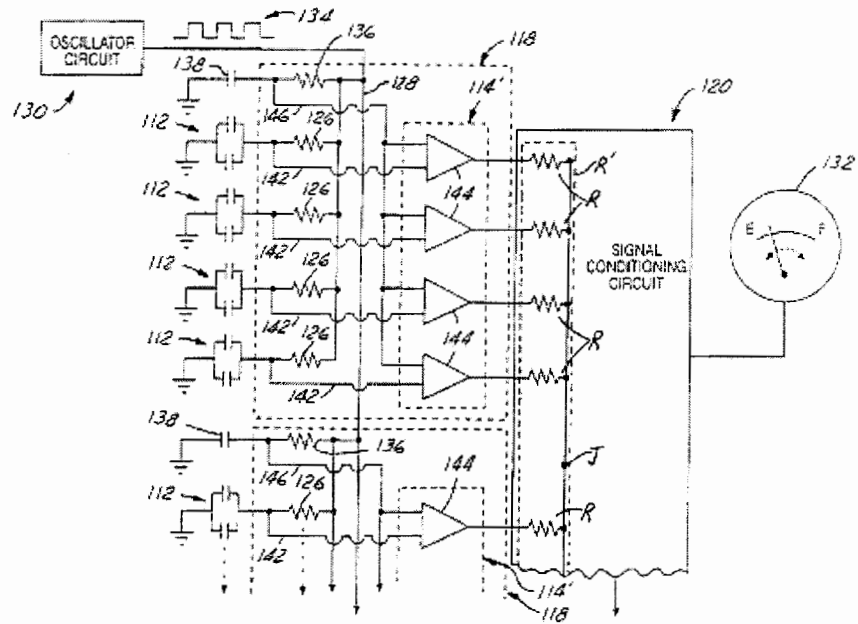


ภาพประกอบ 1-15 หัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย Jonh R. Hart [15]

1.2.13 สิทธิบัตรของ Andrew M. Matulak (2000) เลขที่ US 6164132 ชื่อ สิ่งประดิษฐ์ Capacitive Liquid Level Indicator [16] นำเสนอหัววัดระดับของเหลวที่มีหลักการ ทำงานแบบค่าความจุไฟฟ้า โดยมีอิเล็กทรอนิกส์ทำมาจากแผ่นวงจรมพิมพ์ (print circuit board : PCB) และมีวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้ารวมอยู่บนวงจรถ่ายเดียวกัน ดังภาพประกอบ 1-16 หัววัดมีการทำงาน แบบอาร์เรย์ กล่าวคืออิเล็กทรอนิกส์หลักจะประกอบด้วยอิเล็กทรอนิกส์ย่อยวางเรียงกัน มีวงจรวัดค่าความจุ ไฟฟ้าแบบ RC bridge และวงจรถ่ายเทียบแรงดัน (comparator) แยกอิสระกันในแต่ละชุด แล้วจึง นำมารวมกันเป็นสัญญาณเอาต์พุตแบบแอนะล็อกสัญญาณเดียวดังภาพประกอบ 1-17



ภาพประกอบ 1-16 หัววัดระดับของเหลวที่นำเสนอโดย Andrew M. Matulak [16]



ภาพประกอบ 1-17 วงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดระดับของเหลว
ที่นำเสนอโดย Andrew M. Matulak [16]

จากการทบทวนผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับการวัดระดับของเหลว ทำให้ทราบว่า หัววัดระดับที่มีหลักการทำงานแบบ TDR และแบบค่าความจุไฟฟ้า จะมีโครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ซับซ้อน แต่หลักการอ่านค่าระดับน้ำของหัววัดแบบ TDR จะมีความซับซ้อนกว่าหัววัดแบบค่าความจุไฟฟ้า งานวิจัยนี้จึงให้ความสำคัญไปที่การวัดระดับน้ำด้วยหัววัดแบบค่าความจุไฟฟ้า โดยเลือกรูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเทอร์ดิจิตอล เนื่องจากมีโครงสร้างเพียงชั้นเดียวและทำจากแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งง่ายในการออกแบบและสร้างต้นแบบ

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อสร้างต้นแบบระบบฝ้าตรวจวัดระดับน้ำในคลองเปิด โดยใช้หัววัดระดับน้ำ และเครือข่ายสื่อสารที่พัฒนาขึ้นเอง

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ต้นแบบระบบฝ้าตรวจวัดระดับน้ำสามารถวัดระดับน้ำ และส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายสำหรับแสดงค่าระดับน้ำ
- 2) หัววัดระดับน้ำที่มีโครงสร้างแบบอินเทอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ ทำมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ ควบคุมการทำงานทั้งหมดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถวัดระดับน้ำได้ตั้งแต่

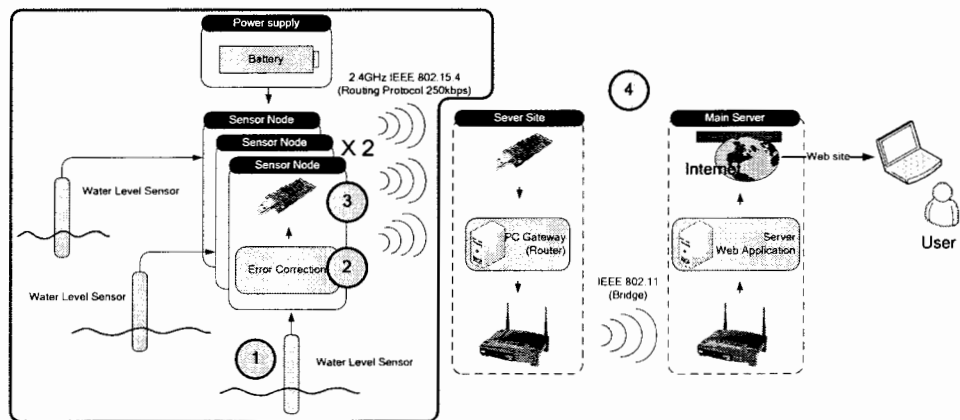
0 ถึง 30 เซนติเมตร มีค่าความผิดพลาดในการวัดไม่เกิน 3 เซนติเมตรตลอดย่านวัด และใช้พลังงานสูงสุดไม่เกิน 10 มิลลิวัตต์ (mW)

- 3) หัววัดระดับน้ำสามารถปรับความถูกต้องในการวัดได้ด้วยตัวเอง
- 4) ใช้เซนเซอร์โหนด Unode ที่พัฒนาขึ้นเอง เป็นตัวเชื่อมต่อหัววัดระดับน้ำเข้ากับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

1.5 ระเบียบวิธีวิจัย

- 1) ออกแบบโครงสร้างของอินเทอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ และวงจรควบคุมการทำงาน
- 2) ออกแบบวิธีการให้หัววัดระดับน้ำสามารถปรับความถูกต้องในการวัดได้ด้วยตัวเอง โดยลดผลกระทบของอุณหภูมิหรือสิ่งเจือปนในน้ำที่ทำให้ค่าไดอิเล็กตริกของน้ำเปลี่ยนแปลงไป และสามารถประมาณค่าระดับน้ำที่วัดได้ แม้วิน้ำจะมีการกระเพื่อม
- 3) ทดสอบการเชื่อมต่อต้นแบบหัววัดระดับน้ำ เข้ากับเซนเซอร์โหนดที่มีอยู่แล้ว (Unode)
- 4) ทดสอบประสิทธิภาพทำงาน เมื่อเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายทำงานร่วมกับระบบจัดเก็บและแสดงผลข้อมูล
- 5) เผยแพร่ผลงานวิจัย และรายงานวิทยานิพนธ์

2553						2554						2555											
6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5
(1)																							
						(2)																	
												(3)											
												(4)											
												(5) Journal & Full Report											



ภาพประกอบ 1-18 ไคอะแกรมระบบเฝ้าตรวจวัดระดับน้ำ โดยใช้หัววัดอัจฉริยะแบบอินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิทีฟอิเล็กทรอนิกส์

1.6 คุณค่าของงานวิจัย

- 1) เราสามารถใช้แผ่น PCB ที่มีลายวงจรแบบอินเตอร์ดิจิตอล มาทำเป็นหัววัดระดับน้ำที่มีราคาถูกได้
- 2) การเคลือบแผ่น PCB ที่มีลายวงจรแบบอินเตอร์ดิจิตอลด้วย LPSM ซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้า แผ่น PCB นี้ก็ยังคงให้ค่าความจุไฟฟ้าแปรผันตามระดับน้ำ
- 3) ความหนาของฉนวนเคลือบ PCB ที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของ PCB ที่มีลายวงจรแบบอินเตอร์ดิจิตอลมีค่าลดลง และเมื่อความหนาของฉนวนเคลือบ PCB ที่เพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จะไม่แปรผันตามระดับน้ำ
- 4) สนามไฟฟ้าของอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขอบเขตจำกัด โดยมันขึ้นอยู่กับความกว้าง และระยะห่างซี่
- 5) เราสามารถใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์วัดค่าความจุไฟฟ้าของอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ได้ โดยใช้หลักการ RC Time constant ซึ่งควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงตัวเดียว ง่าย และประหยัด
- 6) หัววัดระดับน้ำนี้มีผลตอบสนองในการวัดระดับน้ำที่รวดเร็วเมื่อวัดระดับน้ำที่เพิ่มขึ้น แต่กลับมีผลตอบสนองช้ามากเมื่อวัดระดับน้ำที่ลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากยังมีน้ำเกาะบนหัววัดแม้ว่าระดับน้ำจริงจะลดลงไปหมดแล้ว หัววัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลจึงไม่เหมาะกับการนำไปใช้วัดลักษณะของคลื่นบนผิวน้ำ
- 7) แม้ค่าไดอิเล็กตริกของน้ำจะเปลี่ยนแปลงไป แต่หัววัดระดับน้ำก็ยังคงมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำเป็นเชิงเส้น แต่ค่าความจุจะลดลงตามค่าไดอิเล็กตริกของน้ำ
- 8) เราสามารถทำให้หัววัดระดับน้ำนี้วัดระดับน้ำได้อย่างถูกต้องได้ แม้ค่าไดอิเล็กตริกของน้ำจะเปลี่ยนแปลงไป โดยการเพิ่มอิเล็กทรอนิกส์อ้างอิง และการคำนวณด้วยหลักการของสามเหลี่ยมคล้าย เพื่อปรับการคำนวณของหัววัด ให้เหมาะสมกับค่าไดอิเล็กตริกที่เปลี่ยนแปลงไป
- 9) อัตราการใช้พลังงานของเซนเซอร์โหนด Unode ไม่ได้คงที่ แต่ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วย โดยแรงดันไฟฟ้าที่สูงอัตราการใช้พลังงานของเซนเซอร์โหนดก็จะสูงตามไปด้วย
- 10) การนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกันเพื่อจ่ายพลังงานให้กับเซนเซอร์โหนด พลังงานส่วนหนึ่งของแบตเตอรี่จะสูญเสียไปเป็นความร้อนภายในวงจรลวดระดับแรงดันและจากความต้านทานภายในของแบตเตอรี่เอง นอกจากนี้ยังสูญเสียเป็นพลังงานแสงของหลอดไฟแสดงสถานะการทำงานที่สว่างมากเกินไปจนความจำเป็น

บทที่ 2

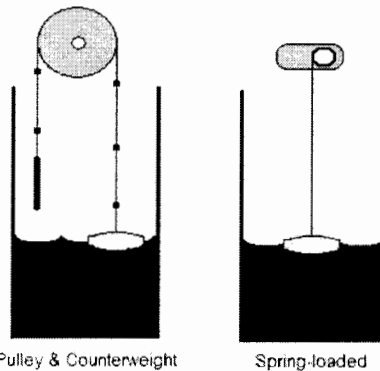
หัววัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิทีฟอิเล็กโทรด

2.1 เทคโนโลยีการวัดระดับของเหลว

เมื่อศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดระดับของเหลว รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายจะพบว่า มีหัววัดระดับของเหลวถูกคิดค้นขึ้นมาในรูปแบบต่างๆมากมายหลายแบบ แต่เมื่อทำการจำแนกประเภทของหัววัดตามหลักการทำงาน หัววัดระดับของเหลวจะประกอบด้วยหลักการพื้นฐาน 4 หลักการ คือ

2.1.1 หลักการวัดระดับแบบ Float System

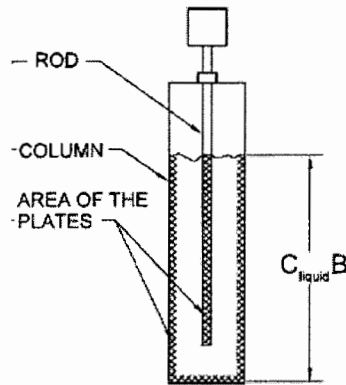
Float System เป็นการวัดระยะทางของลูกลอยซึ่งเคลื่อนที่ตามระดับของเหลว ดังภาพประกอบ 2-1 มีข้อดีคือ มีความแม่นยำในการวัดสูง เพราะเป็นการวัดที่ระดับผิวของเหลวโดยตรง ชนิดของเหลวและอุณหภูมิส่งผลกระทบต่อ การวัดเพียงเล็กน้อย แต่มีความยุ่งยากในการบำรุงรักษา เนื่องจากมีชิ้นส่วนทางกลเป็นส่วนประกอบหลัก หากขาดการหล่อลื่นที่ดีค่าที่วัดได้จะมีความผิดพลาด [17]



ภาพประกอบ 2-1 หัววัดระดับของเหลวแบบ Float System [17]

2.1.2 หลักการวัดระดับแบบ Detecting Electrical Properties

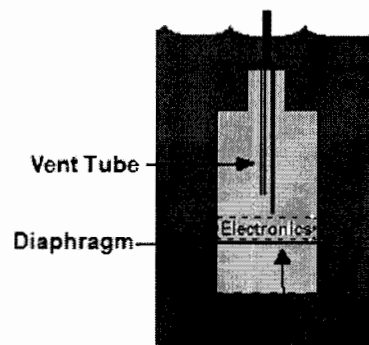
Detecting Electrical Properties เป็นการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับระดับของเหลว เช่น การวัดค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ดังภาพประกอบ 2-2 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (resistance) หลักการนี้มีข้อดีคือ ไม่มีชิ้นส่วนทางกลที่ต้องบำรุงรักษาบ่อย แต่เนื่องจากการวัดที่ต้องให้หัววัดสัมผัสกับของเหลวโดยตรง อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนที่หัววัดได้



ภาพประกอบ 2-2 หัววัดระดับของเหลวแบบ capacitance [18]

2.1.3 หลักการวัดระดับแบบ Hydrostatic Pressure

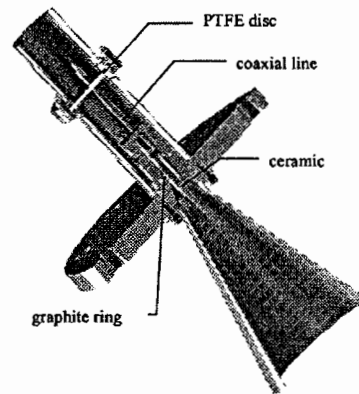
Hydrostatic Pressure เป็นการเปรียบเทียบแรงดันของเหลวกับแรงดันบรรยากาศ ดังภาพประกอบ 2-3 มีข้อดีคือ ติดตั้งง่าย มีย่านวัดให้เลือกใช้งานกว้าง และใช้อุปกรณ์น้อย แต่โครงสร้างของหัววัดมีแผ่นไดอะแฟรมขนาดเล็ก ซึ่งเสียหายได้ง่ายหากเกิดการกระทบกระเทือน มีไฟรั่ว หรือมีความชื้นสะสมภายใน [17] ในการใช้งานจึงต้องมีการติดตั้งระบบกราวด์ และสารดูดซับความชื้นด้วย (desiccant)



ภาพประกอบ 2-3 หัววัดระดับของเหลวแบบ Hydrostatic Pressure [17]

2.1.4 หลักการวัดระดับแบบ Time of Flight

Time of Flight เป็นการวัดระดับของเหลวโดยใช้การจับเวลาการเดินทางของเสียงความถี่สูง (Ultrasonic) หรือคลื่นวิทยุความถี่สูง (Radar) ที่เดินทางผ่านอากาศหรือลวดตัวนำ แล้วเกิดการสะท้อนกลับเมื่อชนกับผิวของเหลว ดังภาพประกอบ 2-4 มีข้อดีคือ ไม่ต้องบำรุงรักษาบ่อย เพราะไม่มีส่วนใดสัมผัสกับของเหลว และวัดระดับของเหลวได้หลายชนิด แต่หากผิวของเหลวมีการกระเพื่อมหรือมีฟองอากาศ จะทำให้ค่าระดับที่วัดได้มีความผิดพลาด หรือไม่สามารวัดได้เลย



ภาพประกอบ 2-4 หัววัดระดับของเหลวแบบ Radar [19]

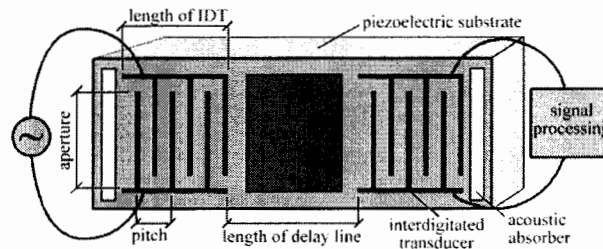
การวัดระดับของเหลวด้วยหลักการวัดค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance level sensor) เป็นวิธีการวัดที่มีหลักการทำงานไม่ซับซ้อน อาศัยการวัดค่าไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกันระหว่างของเหลวกับอากาศ ส่วนของอิเล็กโทรดสามารถเคลือบสารป้องกันการกัดกร่อนได้ แต่เนื่องจากโครงสร้างของหัววัดระดับแบบค่าความจุไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่ มักมีลักษณะเป็นแผ่นหรือแท่งตัวนำ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนวางขนานกัน [4],[10],[11],[13] ทำให้มีขนาดใหญ่ ติดตั้งยาก และมีความซับซ้อนในการผลิต อีกทั้งค่าความจุไฟฟ้าที่ได้อยู่ในช่วงพิโคฟารัด (pF) จึงมีผลกระทบจากค่าความจุไฟฟ้าแฝงมาก ทำให้การวัดค่าความจุไฟฟ้าต้องมีความซับซ้อนตามไปด้วย

อินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กโทรด (Interdigital Electrode) เป็นอิเล็กโทรดสำหรับหัววัดค่าความจุไฟฟ้ารูปแบบหนึ่ง ที่ใช้การวางแผ่นตัวนำในแนวระนาบแทนการวางแบบขนาน แผ่นตัวนำมีลักษณะคล้ายซี่หวีสลับไปมาระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ คล้ายกับการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกัน ทำให้มีค่าความจุไฟฟ้ามาก จนสามารถละเลยผลกระทบของค่าความจุไฟฟ้าแฝงได้ และด้วยโครงสร้างเป็นชั้นเดียว จึงสามารถผลิตโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีอยู่ทั่วไปได้

บทนี้เป็นการนำเสนอผลการวิจัยและพัฒนาต้นแบบหัววัดระดับน้ำที่สร้างจากแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับใช้งานในภาคการเกษตรหรืองานด้านอื่น ที่มีลักษณะการใช้งานที่ต้องติดตั้งหัววัดระดับน้ำจำนวนมาก แต่ใช้งานไม่บ่อย และไม่ต้องการความแม่นยำในการวัดสูง โดยใช้พื้นฐานการออกแบบจากโครงสร้างของอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กโทรด ซึ่งมีความเรียบง่ายหลักการทำงานไม่ซับซ้อน ไม่ต้องใช้กระบวนการผลิตขั้นสูง สามารถผลิตได้เองภายในประเทศ เพื่อให้เกษตรกรหรือบุคคลทั่วไปมีทางเลือกในการใช้หัววัดระดับน้ำมากยิ่งขึ้น

2.2 ทฤษฎีและหลักการ

อินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กโทรด (Interdigital Electrode) เป็นอิเล็กโทรดแบบค่าความจุไฟฟ้าอีกรูปแบบหนึ่ง ที่ใช้การวางแผ่นตัวนำในแนวระนาบแทนการวางแผ่นตัวนำในแนวขนาน ทำให้มีโครงสร้างเป็นซันเดียว คำว่า Interdigital มาจากความหมายที่แปลว่าง่ามหรือซี่ สอดคล้องกับลักษณะของหัววัด ที่เกิดจากการวางแผ่นตัวนำสลับไปมา ระหว่างแผ่นตัวนำที่มีขั้วบวกและลบ ทำให้มีลักษณะคล้ายหวีสองอันวางทาบกัน อินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กโทรดถูกนำมาเผยแพร่ครั้งแรกโดย Lord Rayleigh [20] ในปี ค.ศ. 1885 ในยุคแรกมันถูกสร้างขึ้นมาเพื่อเป็นรูปแบบหนึ่งของ piezoelectric สำหรับใช้ในการส่งผ่านและกรองสัญญาณในอุปกรณ์สื่อสาร โดยใช้หลักการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นแรงสั่นสะเทือน แล้วเปลี่ยนแรงสั่นสะเทือนกลับไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าใหม่อีกครั้ง แรงสั่นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความถี่ในการสั่น ถ้าสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปมีความถี่ไม่ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของวัสดุ แรงสั่นสะเทือนจะน้อย สัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตก็จะน้อยตามไปด้วย แต่หากสัญญาณไฟฟ้ามีความถี่ที่ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ แรงสั่นสะเทือนจะมาก สัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตก็จะมากตามไปด้วย เรียกหลักการนี้ว่า surface acoustic wave (SAW) มีลักษณะดังภาพประกอบที่ 2-5



ภาพประกอบ 2-5 การใช้อินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กโทรดเป็นตัวกรองสัญญาณไฟฟ้า SAW [20]

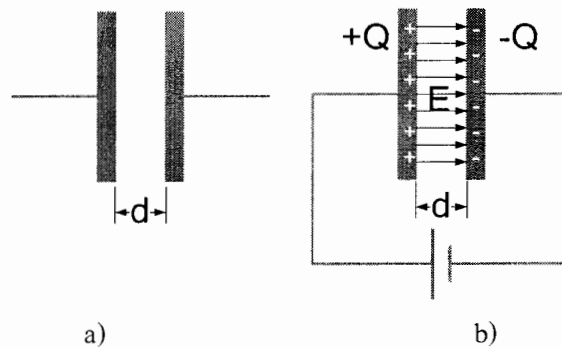
ต่อมาในปี ค.ศ. 1891 Nikola Tesla [21] ได้นำเสนอการใช้รูปแบบของอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กโทรด มาทำเป็นหัววัด ตามสิทธิบัตรเลขที่ 464667 มีชื่อว่า Electrical Condenser ในรายละเอียดได้อธิบายถึงการนำอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กโทรดไปจุ่มในของเหลวที่ไม่นำไฟฟ้า แล้วทำให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าแปรผันตามระดับของเหลว ต่อมาในปี 1923 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นตัวนำสองแผ่นที่วางในแนวระนาบก็ถูกนำเสนอโดย A.E.H. Love [22] ซึ่งเป็นพื้นฐานในการออกแบบหัววัดแบบอินเตอร์ดิจิตอลในเวลาต่อมา

จากอดีตจนถึงปัจจุบัน การวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัววัดแบบอินเตอร์ดิจิตอลยังคงได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ทั้งในด้านการประยุกต์งาน และการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใหม่ๆ มีการกำหนดชื่อย่อสำหรับใช้เรียกหัววัดชนิดนี้ คือ IDT ที่ย่อมาจาก Interdigital

Transducer หรือ IDC ซึ่งย่อมาจาก Interdigital Capacitor จากการสำรวจบทความวิจัยในปัจจุบันพบว่า โดยส่วนใหญ่จะเป็นการนำหัววัดแบบอินเทอร์ดิจิทัลมาใช้วัดเพื่อหาค่าคุณสมบัติของวัสดุทดสอบหรือที่เรียกว่า “Material Under Test” (MUT) เช่น การนำมาประยุกต์ใช้วัดความชื้นในอากาศ [23] การวัดความชื้นในคอนกรีต [24] การวัดปริมาณสารพิษในอาหารทะเล [25] การวัดปริมาณไขมันในเนื้อสัตว์ [26] การวัดความแข็งตัวของกาว [27] หรือการนำมาวัดเพื่อใช้คัดแยกของเหลวชนิด [28] เป็นต้น จุดเด่นสำคัญที่ทำให้หัววัดแบบอินเทอร์ดิจิทัลได้รับความนิยมนำมาทำเป็นเครื่องมือวัดคือ การมีโครงสร้างและหลักการทำงานไม่ซับซ้อน สร้างได้ง่ายในราคาไม่แพง สามารถประยุกต์ใช้ในงานตรวจวัดได้หลากหลายชนิด มีทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับหลักการทำงานและการออกแบบดังนี้

2.2.1 พื้นฐานการเก็บประจุไฟฟ้า

เมื่อเรานำแผ่นตัวนำสองแผ่นวางขนานกันในสุญญากาศ แล้วป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับแผ่นตัวนำทั้งสอง ผลที่เกิดขึ้นคือ เกิดการสะสมประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันบนแผ่นตัวนำแต่ละแผ่น ดังภาพประกอบ 2-6



ภาพประกอบ 2-6 การเก็บประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน

a) ลักษณะของแผ่นตัวนำที่ยังไม่มีการสะสมประจุ

b) ลักษณะของแผ่นตัวนำที่มีการสะสมประจุ และมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำ

จำนวนประจุไฟฟ้าที่สะสมบนแผ่นตัวนำแต่ละแผ่นจะมีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) และแรงดันไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำ (ΔV) ดังสมการที่ (2-1)

$$Q = C_0 \Delta V \quad (2-1)$$

ในกรณีที่เป็นการศึกษาในสถานะสุญญากาศ ค่าความจุไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวเก็บประจุ (capacitor) เป็นหลัก โดยตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน (parallel plate capacitor) จะมีค่าความจุไฟฟ้า (C_0) สัมพันธ์กับค่าสภาพยอมให้เกิดประจุไฟฟ้าของสุญญากาศ (permittivity of

free space) ϵ_0 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.85 (pF/m) พื้นที่ผิวของแผ่นตัวนำ (A) และระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (d) ดังสมการที่ (2-2)

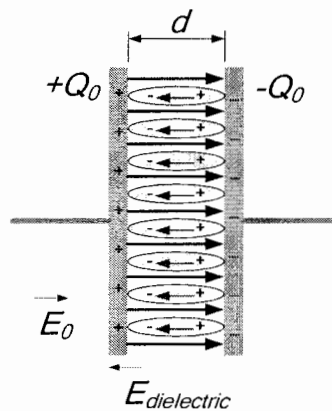
$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2-2)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการ (2-1) และ (2-2) เห็นค่าความจุไฟฟ้าเป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของตัวเก็บประจุเสมอ สามารถเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าได้กับปริมาณของภาชนะบรรจุก๊าซปริมาณหนึ่ง ที่ถึงแม้เราจะใช้แรงดันอัดก๊าซให้บรรจุไปมากเพียงใด ปริมาตรของถังก๊าซก็ยังคงเดิม

ผลจากการสะสมประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำ (Electric field between plates) ซึ่งมีทิศทางออกจากแผ่นประจุบวก ไปหาแผ่นประจุลบ โดยมีความสัมพันธ์กับจำนวนประจุไฟฟ้า (Q) ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (d) และค่าความจุไฟฟ้า (C_0) ดังสมการที่ (2-3)

$$\bar{E} = \frac{Q}{C_0 d} \quad (2-3)$$

ที่ผ่านมาเป็นการพิจารณาเฉพาะในกรณีที่แผ่นตัวนำสองแผ่นวางอยู่ในสุญญากาศ ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จึงขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวเก็บประจุเป็นหลัก แต่หากเราเปลี่ยนช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำจากสุญญากาศไปเป็นวัสดุอื่น ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า “วัสดุไดอิเล็กตริก” ผลที่เกิดขึ้นคือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงของสนามไฟฟ้าที่ตัดผ่านวัสดุไดอิเล็กตริก ได้ไปพยายามแยกอิเล็กตรอนและโปรตอนของวัสดุไดอิเล็กตริกออกจากกัน ในขณะที่อิเล็กตรอนและโปรตอนก็พยายามดึงตัวเองกลับสู่สภาวะเดิม ความพยายามดังกล่าวทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในอะตอมของวัสดุไดอิเล็กตริก ($E_{\text{dielectric}}$) เรียกว่า “สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ” (induced electric field) ดังภาพประกอบ 2-7



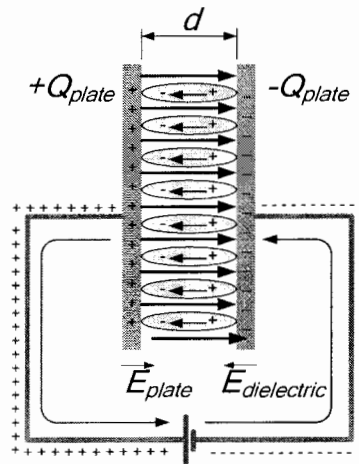
ภาพประกอบ 2-7 ทิศทางของสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (ลูกศรชี้ไปทางซ้าย)

มีทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าเดิม (ลูกศรชี้ไปทางขวา)

ในกรณีที่ตัวเก็บประจุดังกล่าวไม่ได้ต่อกับแหล่งจ่ายไฟ จำนวนประจุไฟฟ้าบนแผ่นตัวนำจะยังคงมีค่าเท่าเดิม (Q_0) สนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำจึงยังคงมีค่าเท่าเดิม (E_0) ดังนั้นผลรวมของสนามไฟฟ้าทั้งหมดจะลดลง (เนื่องจากสนามไฟฟ้าทั้งสองมีทิศทางที่ตรงข้ามกัน) ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น (จากสมการ 2-3) โดยค่าความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับจำนวนประจุไฟฟ้าเดิม (Q_0) ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (d) และผลรวมของสนามไฟฟ้า ($E_{total} = \bar{E}_0 + \bar{E}_{dielectric}$) ดังสมการที่ (2-4)

$$C_{dielectric} = \frac{Q_0}{(\bar{E}_0 + \bar{E}_{dielectric})d} \quad (2-4)$$

ในกรณีที่ตัวเก็บประจุต่อกับแหล่งจ่ายไฟ สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำให้จำนวนประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยการดึงประจุไฟฟ้าเพิ่มเติมจากแหล่งจ่าย เพื่อรักษาสถาณภาพไฟฟ้ารวมให้มีค่าเท่าเดิม ($\bar{E}_{total} = \bar{E}_0$) ดังภาพประกอบ 2-8



ภาพประกอบ 2-8 ประจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากวัสดุไดอิเล็กตริก ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

ค่าความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น จะมีความสัมพันธ์กับผลรวมของจำนวนประจุไฟฟ้าใหม่ ($Q_{plate} = Q_0 + Q_{dielectric}$) ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (d) และค่าสนามไฟฟ้าเดิม (\bar{E}_0) ดังสมการ

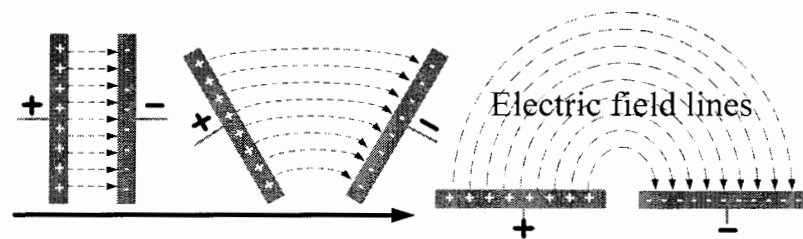
$$C_{dielectric} = \frac{Q_0 + Q_{dielectric}}{\bar{E}_0 d} \quad (2-5)$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน ค่าความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากวัสดุไดอิเล็กตริก จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) กับค่าความจุไฟฟ้าในสุญญากาศ (C_0) ดังสมการที่ (2-6)

$$C_{dielectric} = \epsilon_r C_0 \quad (2-6)$$

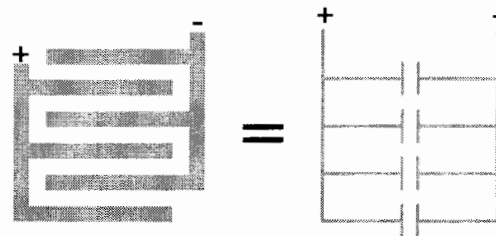
จากสมการที่ (2-6) จะสังเกตได้ว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุใดๆ (ϵ_r) จะไม่มีหน่วย แต่ใช้การเปรียบเทียบแบบสัมพัทธ์ (Relative) กับค่าสภาพยอมให้เกิดประจุไฟฟ้าของสุญญากาศ (ϵ_0) ซึ่งมีเท่ากับ 8.85 (pF/m) ดังนั้นในกรณีที่ไดอิเล็กตริกเป็นสุญญากาศ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) จะมีค่าเท่ากับ 1

จากหลักการพื้นฐานของตัวเก็บประจุตั้งที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อนำตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานที่มีประจุไฟฟ้าต่างกัน มาแยกออกจากกันในแนวระนาบดังภาพประกอบ 2-9 สิ่งที่เกิดขึ้นคือ ยังคงเกิดการสะสมประจุไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำ แต่ค่าความจุไฟฟ้าจะลดจากระยะห่างที่เพิ่มขึ้น ผลจากการแยกแผ่นตัวนำออกจากกันทำให้เราสามารถวางวัสดุไดอิเล็กตริกได้หลายขนาด โดยไม่ต้องเปลี่ยนโครงสร้างของตัวเก็บประจุใหม่ รูปแบบนี้จึงมีความเหมาะสมที่จะมีทำเป็นหัววัด



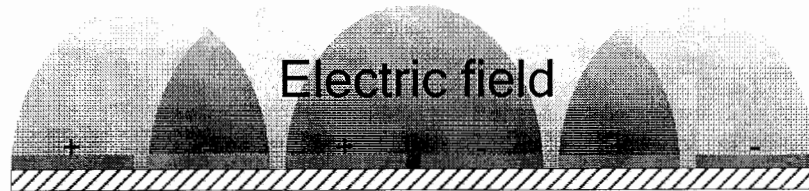
ภาพประกอบ 2-9 สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการแยกแผ่นตัวนำออกในแนวระนาบ

เมื่อนำแผ่นตัวนำที่ถูกแยกออกจากกันในแนวระนาบ มาต่อสลับไปมาระหว่างขั้วบวกและลบ ผลที่เกิดขึ้นคือ จะได้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วน เสมือนการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกัน เรียกูปแบบนี้ว่า “อินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กโตรด” (Interdigital Electrode) ดังภาพประกอบ 2-10



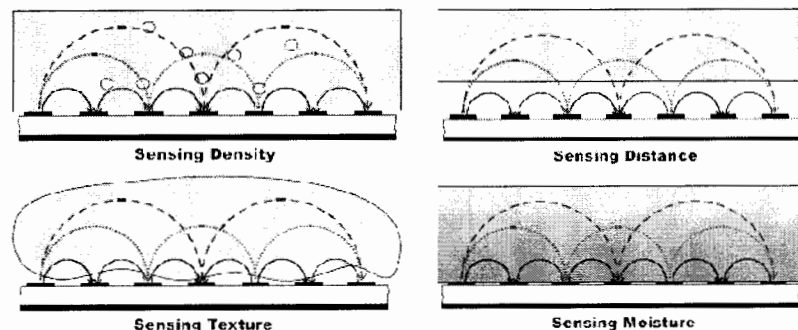
ภาพประกอบ 2-10 วงจรเสมือนของอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กโตรด

ผลจากการสะสมประจุบนอินเทอร์ดิเจตอลอิเล็กโตรด ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างซีตลอคความยาวของอิเล็กโตรด ดังภาพประกอบ 2-11



ภาพประกอบ 2-11 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อมีการสะสมประจุ

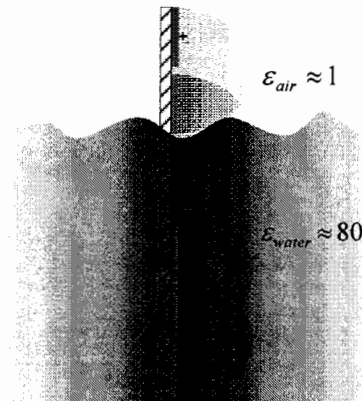
เมื่อเรานำวัสดุไดอิเล็กตริกวางบนอินเทอร์ดิเจตอลอิเล็กโตรด สนามไฟฟ้าจากอิเล็กโตรดที่ตัดผ่านวัสดุไดอิเล็กตริก ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโตรดเปลี่ยนแปลงไปตามค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ จากหลักการนี้เราจึงสามารถนำโครงสร้างของอินเทอร์ดิเจตอลอิเล็กโตรดมาทำเป็นหัววัดเพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดค่าต่างๆ โดยอาศัยคุณสมบัติที่แตกต่างกันของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เช่น การวัดความหนาแน่นของวัสดุ การวัดระยะห่างของวัสดุ การทดสอบความราบเรียบของวัสดุ หรือการวัดความชื้นในวัสดุ ดังตัวอย่างในภาพประกอบ 2-12



ภาพประกอบ 2-12 การประยุกต์ใช้หัววัดแบบอินเทอร์ดิเจตอล

ตรวจวัดคุณลักษณะของวัสดุแบบต่างๆ [25]

ความแตกต่างกันระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำและอากาศ (น้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 80 อากาศมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 1) งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำอินเทอร์ดิเจตอลอิเล็กโตรดมาประยุกต์ใช้ในการวัดระดับน้ำ ดังภาพประกอบ 2-13 โดยมีสมมุติฐานที่ว่า เมื่อระดับน้ำสัมผัสกับอิเล็กโตรดมากขึ้น ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโตรดจะเพิ่มขึ้นตามระดับน้ำด้วย ซึ่งหากความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าความจุไฟฟ้าเป็นไปในลักษณะที่มีนัยสำคัญ ก็จะนำไปสู่การพัฒนาหัววัดระดับน้ำอีกรูปแบบหนึ่ง แตกต่างจากที่เคยมีมา



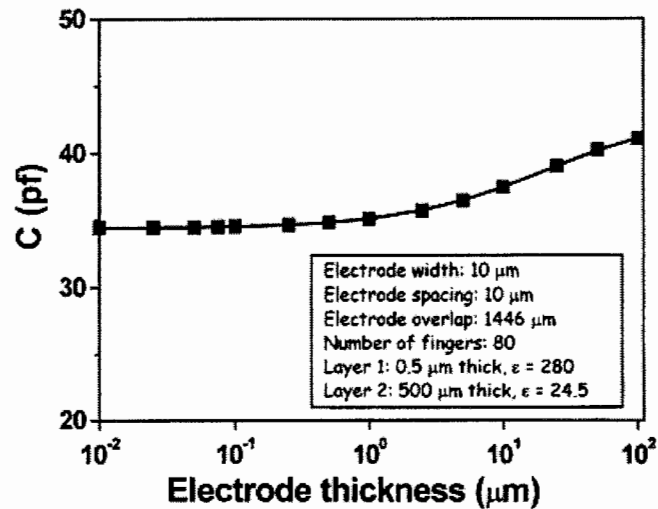
ภาพประกอบ 2-13 การใช้อินเทอร์ดีเจิตอลิเล็กโตรดระดับน้ำ
โดยใช้คุณสมบัติของค่าไดอิเล็กตริกของน้ำที่มากกว่าอากาศ

จากที่กล่าวมาเป็นการอธิบายหลักการทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการเก็บประจุไฟฟ้า ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่ทำให้เกิดการสะสมประจุไฟฟ้า ที่มาจากลักษณะ โครงสร้างของแผ่นตัวนำ วัสดุไดอิเล็กตริก และสนามไฟฟ้า รวมถึงความสัมพันธ์และสิ่งที่เกิดขึ้นในระดับอะตอมของวัสดุ ไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า ความรู้ต่างๆ ที่ได้เมื่อรวมกับความคิดสร้างสรรค์และประสบการณ์ จะช่วยให้เราสามารถนำไปต่อยอดเป็นนวัตกรรมใหม่ๆต่อไปในอนาคต

2.2.2 พื้นฐานอินเทอร์ดีเจิตอลิเล็กโตรด

ในการออกแบบหัววัดแบบอินเทอร์ดีเจิตอล โครงสร้างของอิเล็กโตรดจะเป็นตัว กำหนดค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นขนาดและระยะห่างระหว่างขั้วของ อิเล็กโตรด รวมถึงความหนาของสารเคลือบผิวป้องกันการกัดกร่อน มีผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการ ออกแบบดังนี้

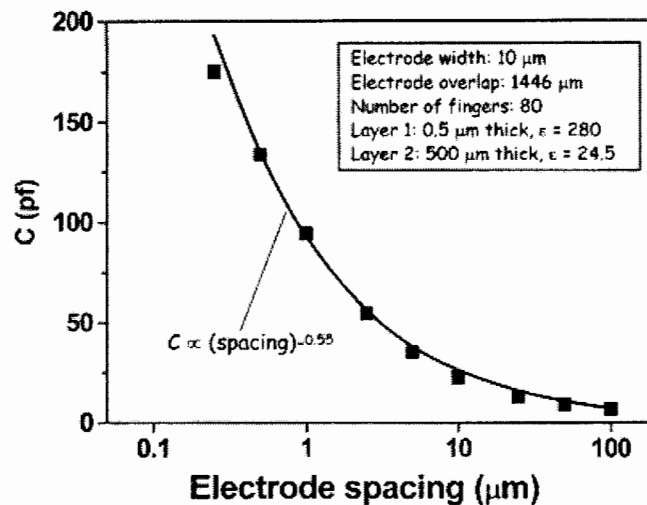
Y. Wang et al. [29] ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับ ระยะห่างระหว่างขั้ว ความกว้างของขั้ว ความหนาของลายวงจร และความหนาของสารเคลือบผิว เคลือบของอินเทอร์ดีเจิตอลิเล็กโตรด มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความหนาของลาย วงจรดังภาพประกอบ 2-14



ภาพประกอบ 2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความหนาของลายวงจร [29]

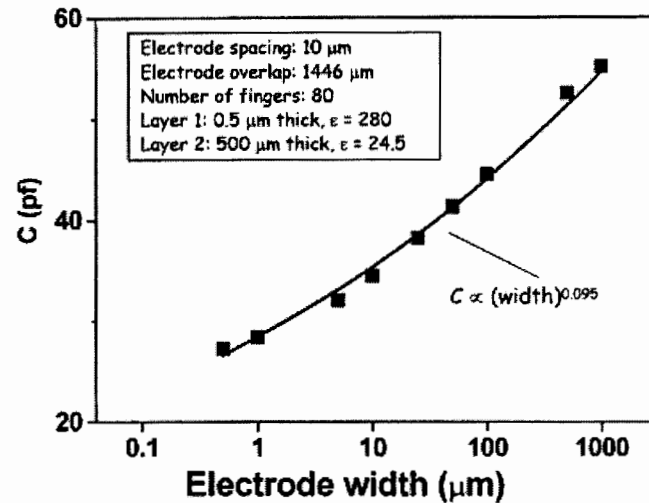
จากภาพจะเห็นได้ว่า เมื่อความหนาของลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์อยู่ระหว่าง 10 nm ถึง 1 μm ค่าความจุไฟฟ้าจะไม่มีเปลี่ยนแปลงมาก แต่เมื่อความหนามีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 1 μm ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยความหนาของลายวงจรมีค่าเท่ากับ 100 μm ค่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจากเดิม 20 % ดังนั้นความหนาของอิเล็กทรอนิกส์จะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดมีอัตราเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

ในส่วนความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของซี่กับค่าความจุไฟฟ้า จะมีลักษณะความสัมพันธ์ดังภาพประกอบ 2-15 ซึ่งจะเห็นว่าระยะห่างของซี่ส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้าค่อนข้างมาก โดยมีค่าความจุไฟฟ้าแปรผันตาม (ระยะห่าง)^α โดยที่ $\alpha < 1$ เมื่อระยะห่างระหว่างซี่เพิ่มขึ้น ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์จะมีอัตราลดลงอย่างรวดเร็ว



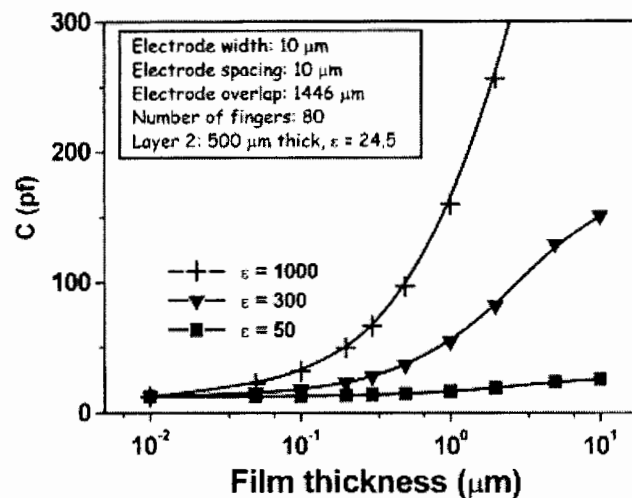
ภาพประกอบ 2-15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับระยะห่างของซี่ [29]

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของซี่กับค่าความจุไฟฟ้างภาพประกอบ 2-16 จะเห็นว่าเมื่อความกว้างของซี่เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้ามีอัตราเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าแปรผันไปตาม (ความกว้าง) $^{\beta}$ โดยที่ $\beta \ll 1$ และในที่นี้ $\beta \approx 0.095$



ภาพประกอบ 2-16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความกว้างของซี่ [29]

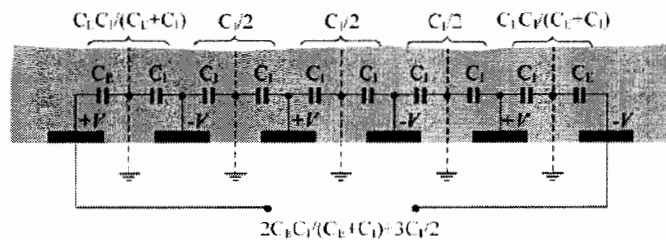
ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า กับความหนาสารเคลือบผิวที่ค่าไดอิเล็กตริกต่างๆ มีความสัมพันธ์ดังภาพประกอบ 2-17 ซึ่งเห็นได้ว่าอิทธิพลจากความหนาของสารเคลือบ จะแปรไปตามคุณสมบัติของสารเคลือบผิวเอง ถ้าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารเคลือบน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุฐานรอง ค่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามความหนาอย่างเป็นเชิงเส้น แต่เมื่อค่าไดอิเล็กตริกของสารเคลือบมีมากกว่าวัสดุฐานรอง ความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างยี่งวดเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 2-17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดกับความหนาของสารเคลือบผิวอิเล็กโทรดที่ค่าไดอิเล็กตริกต่างๆ [29]

ผลการศึกษาของ Y. Wang et al. มีประโยชน์ต่อการออกแบบโครงสร้างของอินเตอร์ดิจิตอลิเล็กโตรดมาก เพราะทำให้เราทราบว่าปัจจัยใดที่ส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้ามาก และปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลต่อค่าความจุน้อย

Rui Igreja [30] ได้ทำการศึกษาวงจรสมมูลของอินเตอร์ดิจิตอลิเล็กโตรดสำหรับใช้ในการประมาณค่าความจุไฟฟ้า โดยมองอิเล็กโตรดเป็นเสมือนตัวเก็บประจุหลายๆตัวนำมาต่ออนุกรมกันดังภาพประกอบ 2-18 จากนั้นหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยวิธีการส่งคงรูป (conformal mapping) โดยอาศัยการแปลงฟังก์ชันเชิงวิเคราะห์ 2 มิติ (two dimensional analytical function) ในโดเมนเชิงซ้อน ผลจากการส่งคงรูปจะแปลงความจุไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดไปเป็นความจุไฟฟ้าของแผ่นขนาน ทำให้สามารถประมาณค่าความจุไฟฟ้าได้

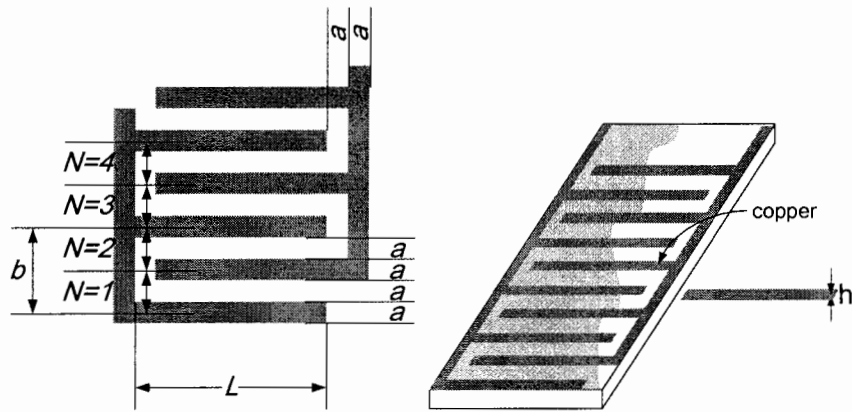


ภาพประกอบ 2-18 วงจรสมมูลของอินเตอร์ดิจิตอลิเล็กโตรดที่นำเสนอโดย Rui Igreja [30]

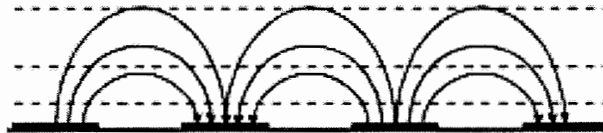
Md. Nazmul Alam [24] ได้เสนอการประมาณค่าความจุไฟฟ้าของอินเตอร์ดิจิตอลิเล็กโตรด เพื่อใช้ในการออกแบบอิเล็กโตรด สำหรับใช้เป็นหัววัดค่าความชื้นในเนื้อคอนกรีต โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วย (C_{PUC}) ที่มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-7)

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

โดยที่ ϵ_0 ϵ_m ϵ_s และ ϵ_a เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอากาศว่าง วัสดุทดสอบ วัสดุฐานรอง และอากาศตามลำดับ a เป็นขนาดความกว้างของซี่ b เป็นขนาดช่องว่างระหว่างซี่ และ h เป็นขนาดความหนาของซี่ดังภาพประกอบ 2-19 โดย $K[a/b]$ เป็นปริพันธ์เชิงวงรีของมอดุลัส (elliptic integrals of modulus) เพื่อใช้หาค่าความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า เนื่องจากแนวของสนามไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายวงรีเมื่อแผ่นตัวนำถูกวางในแนวระนาบดังภาพประกอบ 2-20



ภาพประกอบ 2-19 ตัวแปรที่ใช้ในการประมาณค่าความจุไฟฟ้าของอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์



ภาพประกอบ 2-20 สนามไฟฟ้าแบบวงรีที่เกิดจากอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ [20]

โดยปริพันธ์เชิงวงรีของมอดูลัสมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-8)

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

ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมดของหัววัดแบบอินเตอร์ดิจิตอล $C_{electrode}$ หาได้จากสมการที่ (2-9)

$$C_{electrode} = NLC_{PUc} \quad (2-9)$$

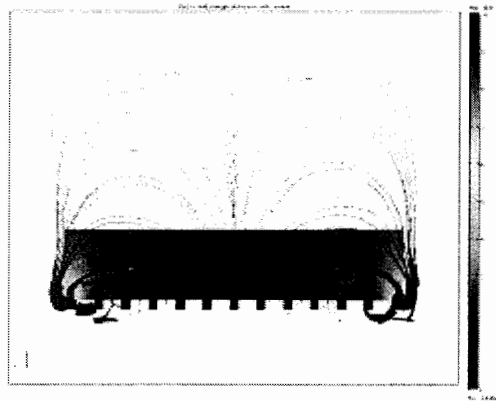
โดยที่ N เป็นจำนวนของอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด L เป็นความยาวของสายชี้ และ C_{PUc} แทนค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยที่ได้จากสมการที่ (2-7)

Mohd Syaifudin [25] ได้นำเสนอการหาค่าความจุไฟฟ้าของอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์โดยการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ (Simulation) ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ซึ่งมีหลักการคำนวณแบบ Finite element โดยการพิจารณาแต่ละส่วนย่อย (Mesh) แล้วหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการเคลื่อนย้ายประจุ จากนั้นนำค่าพลังงาน (W_e) ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL ไปคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าจากความสัมพันธ์

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

โดยที่ ΔV คือแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายประจุ ซึ่งถูกกำหนดภายในโปรแกรมโดยผู้ใช้

ในการจำลองการทำงาน ผู้ออกแบบจะต้องทำการเขียนแบบของอิเล็กทรอนิกส์ตามขนาดจริง และต้องกำหนดชนิดของวัสดุ และคุณสมบัติให้ใกล้เคียงกับวัสดุที่ใช้จริงมากที่สุด แต่เนื่องจากโปรแกรม COMSOL ต้องใช้ทรัพยากรจากคอมพิวเตอร์ในการประมวลผลแต่ละครั้งสูงมาก โดยต้องมีหน่วยความจำ Ram ไม่ต่ำกว่า 4 Gbyte และต้องมีหน่วยประมวลผลและการ์ดจอที่มีประสิทธิภาพพอสมควร



ภาพประกอบ 2-21 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics

2.3 วัสดุอุปกรณ์และการทดลอง

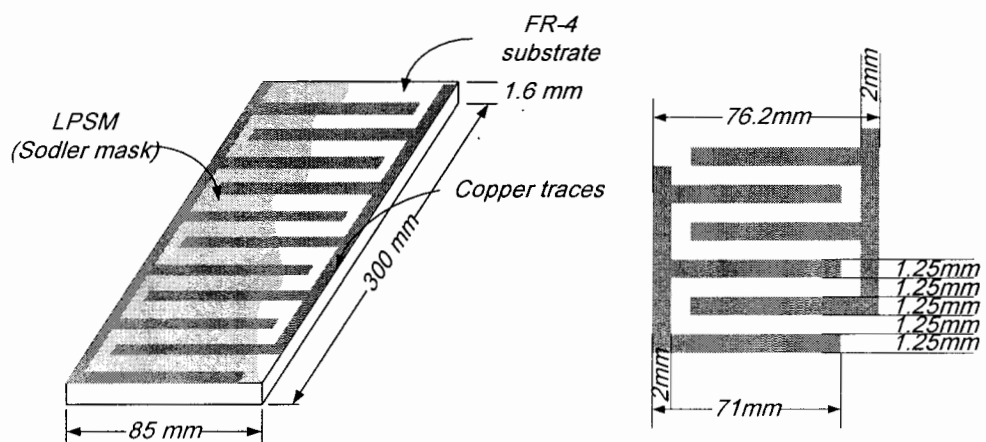
ในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบหัววัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอล เพื่อรองรับการใช้งานร่วมกับ โมดูลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ซึ่งต้องการคุณสมบัติของหัววัดที่กินพลังงานต่ำ และมีราคาถูก สามารถปรับการทำงานให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมได้ด้วยตัวเอง แนวคิดของการออกแบบจะยึดกับหลักการ 3 ส่วน คือ 1) อิเล็กทรอนิกส์ต้องทำจากวัสดุที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก 2) ออกแบบวงจรควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 3) มีส่วนประมวลผลอัจฉริยะ (Intelligent processing system) เพื่อให้สามารถวัดระดับน้ำได้อย่างถูกต้อง แม้วิน้ำจะกระเพื่อมหรือสภาพน้ำขณะทำการวัดจะเปลี่ยนแปลงไป ต้นแบบหัววัดที่ได้จะถูกทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติต่างๆ สำหรับนำไปเป็นข้อมูลประกอบการใช้งานหรือนำไปสู่การพัฒนาต่อไป

2.3.1 อินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์

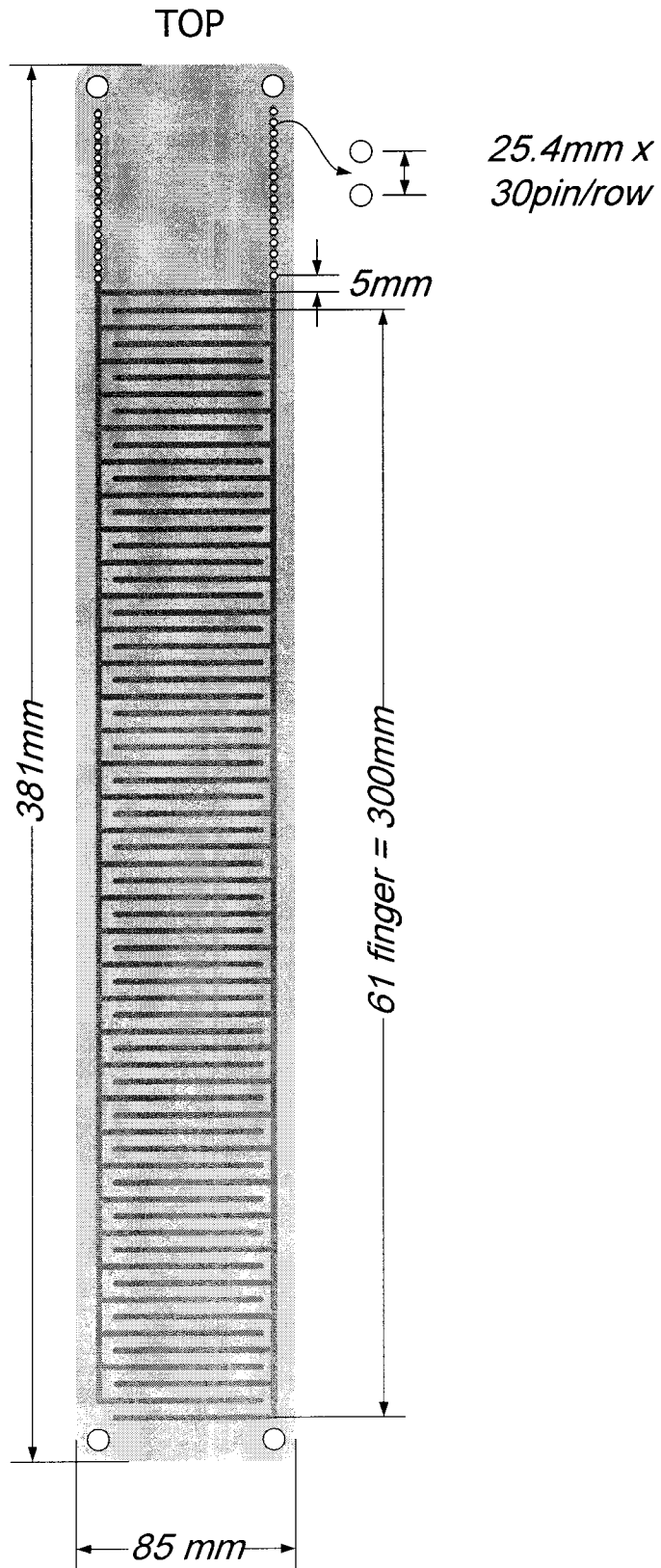
วัสดุสำหรับนำมาทำอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ คือ แผ่นวงจรพิมพ์ (print circuit board) เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย สามารถทำตัวเอง หรือสั่งผลิตตามแบบได้จากโรงงานภายในประเทศ ซึ่งรองรับการผลิตตั้งแต่อุปกรณ์ต้นแบบ จนถึงระดับผลิตภัณฑ์โดยไม่กำหนดจำนวนขั้นต่ำในการสั่งผลิต การผลิตจากโรงงานทำให้ได้ชิ้นงานที่รวดเร็ว และมีมาตรฐานสม่ำเสมอทุกชิ้น แผ่นวงจรพิมพ์ที่เลือกใช้ในการสร้างอิเล็กทรอนิกส์ เป็นแผ่นวงจรชนิด FR-4 หนา

1.6 มิลลิเมตร มีลายทองแดงหน้าเดียว มีความหนาของทองแดง 0.05 มิลลิเมตร แต่เนื่องจากทองแดงเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้าและเกิดสนิมโลหะได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับน้ำและอากาศ ดังนั้นจะต้องเคลือบทับด้วยฉนวนที่ป้องกันน้ำได้ ในงานวิจัยนี้จะใช้วัสดุชนิดเดียวกับที่ใช้ในการทำ solder mask เคลือบลายวงจรส่วนที่ต้องสัมผัสกับน้ำทั้งหมด เพื่อให้กระบวนการผลิตทั้งหมดเสร็จสิ้นจากโรงงานผลิตแผ่นวงจร

ในส่วนของลายวงจร ซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของอินเทอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ จะใช้การออกแบบโครงสร้างเบื้องต้นด้วยการประมาณค่าจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอในบทความของ Md. Nazmul Alam [24] โดยกำหนดค่าตัวแปรต่างๆตามวัสดุที่จะใช้งานจริงคือ วัสดุฐานรองแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.5 และน้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 80 ส่วนคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการ คือ มีย่านวัด 0-30 เซนติเมตร กว้าง 3 นิ้ว เมื่อวัดระดับน้ำเต็มย่านวัดจะต้องให้ค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 5 nF ผลจากการแทนค่าตัวแปรต่างๆในแบบจำลองคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2-7) - (2-9) จะได้ขนาดของลายวงรดังภาพประกอบ 2-22 และมีต้นแบบหัววัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอลที่ทำมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ดังภาพประกอบ 2-23



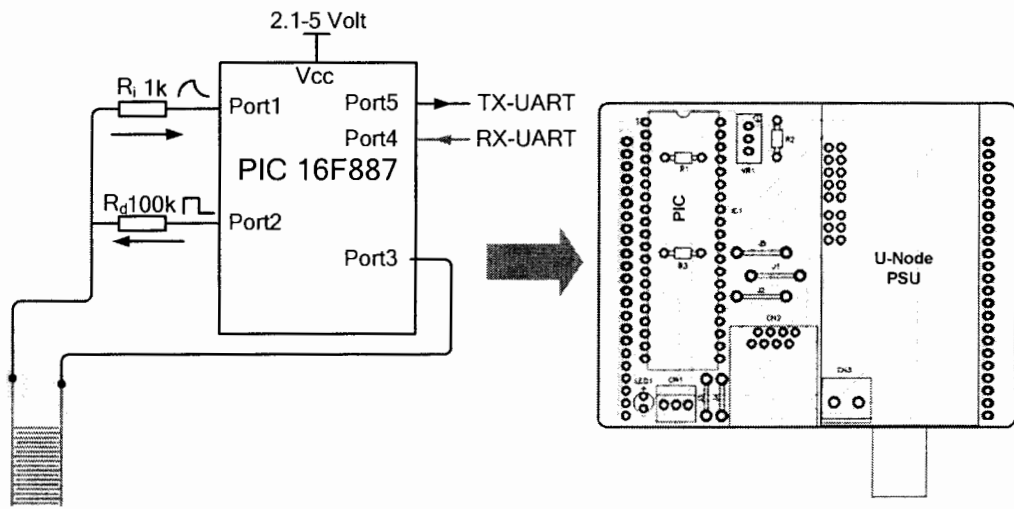
ภาพประกอบ 2-22 ขนาดของลายวงจรที่ได้จากการออกแบบ



ภาพประกอบ 2-23 ต้นแบบหัววัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอล

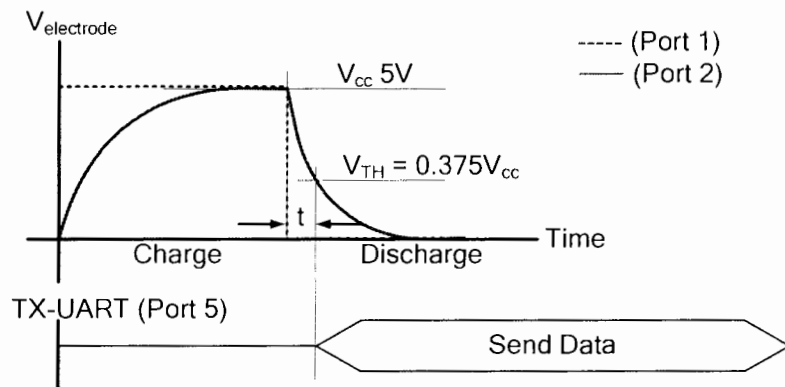
2.3.2 วงจรควบคุมการทำงาน

ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กทรอนิกส์ จะถูกวัดด้วยวงจรควบคุมการทำงาน ซึ่งใช้หลักการจับเวลาคายประจุ ออกแบบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงตัวเดียว เพื่อลดจำนวนอุปกรณ์และการใช้พลังงาน และสามารถควบคุมการทำงานได้ง่ายด้วยโปรแกรม ทำให้สะดวกในการกำหนดค่าอัตราการสุ่มเก็บข้อมูลและรูปแบบการสื่อสารได้ตามต้องการ มีอุปกรณ์และผลการออกแบบลายวงจรดังภาพประกอบ 2-24a และ 2-24b ตามลำดับ



a) อุปกรณ์พื้นฐานที่ต้องใช้ในวงจรควบคุมการทำงาน b) ผลการออกแบบลายวงจรภาพประกอบ 2-24 วงจรควบคุมการทำงานสำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กทรอนิกส์

การทำงานของวงจรทั้งหมดจะถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีลำดับการทำงาน 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเก็บประจุไฟฟ้า คายประจุไฟฟ้า และขั้นตอนการส่งข้อมูล มีสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการทำงานทั้งหมดดังภาพประกอบ 2-25 ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังนี้



ภาพประกอบ 2-25 สัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการทำงานทั้งหมดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ขั้นตอนการเก็บประจุไฟฟ้า ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้างสัญญาณพัลส์ผ่าน R_d แล้วส่งต่อไปลายวงจรซึ่งบวกของแผ่นอิเล็กโทรด ส่วนซึ่งลบถูกต่อเข้ากับขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีสถานะเป็นลอจิกต่ำ (Logic low) ดังภาพประกอบ 2-25 เมื่ออิเล็กโทรดเก็บประจุไฟฟ้าจนเต็ม ไมโครคอนโทรลเลอร์จะหยุดการป้อนสัญญาณพัลส์แล้วเปลี่ยนสถานะเป็นลอจิกต่ำ เพื่อให้ประจุไฟฟ้าที่สะสมในแผ่นอิเล็กโทรดคายประจย้อนกลับออกมา ผ่าน R_d กลับเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ แรงดันตกคร่อมอิเล็กโทรดในระหว่างที่คายประจุ จะถูกวัดด้วยวงจรเปรียบเทียบแรงดันภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยมี R_s ทำหน้าที่จำกัดกระแสไหลเข้าระยะเวลาตั้งแต่เริ่มต้นคายประจุจนกระทั่งแรงดันตกคร่อมอิเล็กโทรดลดลงเหลือ 37.5% ของแหล่งจ่าย จะถูกจับเวลาด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-11)-(2-12)

$$V_c(t) = V_{cc} e^{\frac{-t}{R_d C_{electrode}}} \quad (2-11)$$

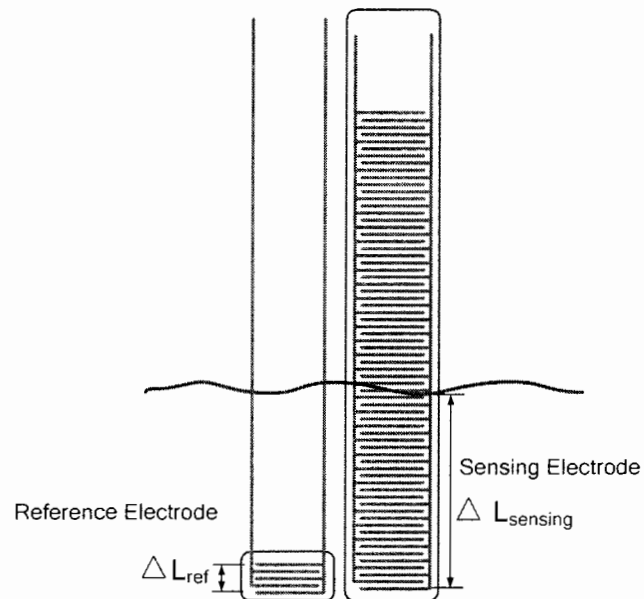
จากวงจรดังภาพประกอบ 2-24 เมื่อ $R_d = 100K\Omega$ และกำหนดให้ ไมโครคอนโทรลเลอร์เริ่มจับระยะเวลาคายประจุตั้งแต่อิเล็กโทรดเริ่มต้นคายประจุ จนกระทั่งเหลือแรงดันตกคร่อมเท่ากับร้อยละ 37.5 ของแหล่งจ่าย มีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าดังสมการที่ (2-12)

$$t = 98,083 \cdot C_{electrode} \quad (2-12)$$

จากสมการที่ (2-12) เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการคายประจก็จะมากขึ้นตามไปด้วย โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับระยะเวลาคายประจุเป็นเชิงเส้น ระยะเวลาคายประจุที่ได้ จะถูกเปลี่ยนเป็นรหัสแอสกี (ASCII Code) แล้วส่งออกผ่านทางพอร์ตอนุกรม UART ของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อส่งต่อไปกับอุปกรณ์ที่มีมาตรฐานสื่อสารแบบเดียวกันต่อไป

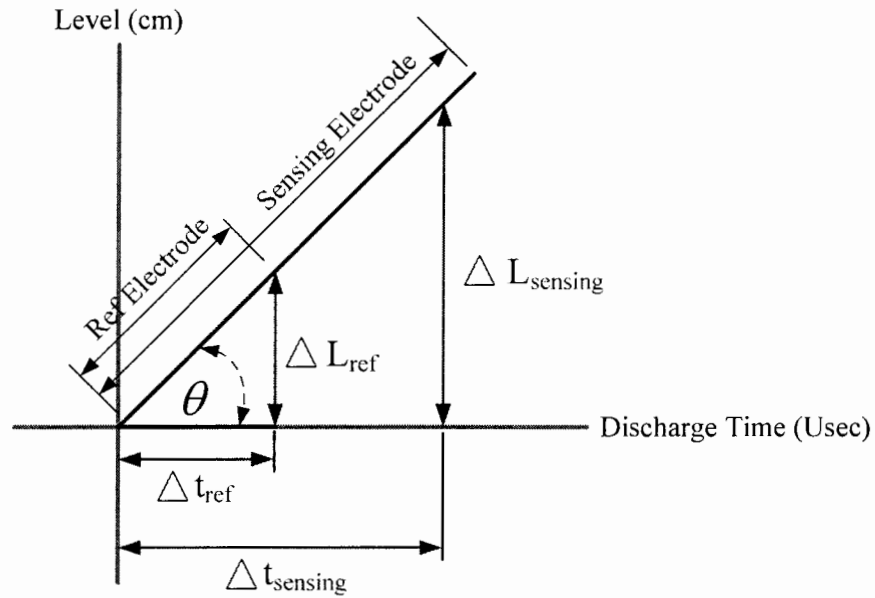
2.3.3 การลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนค่าไดอิเล็กตริกของน้ำ

เนื่องจากหัววัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอล มีหลักการทำงานที่ต้องอาศัยการเก็บประจุไฟฟ้าเสมือนตัวเก็บประจุตัวหนึ่ง นอกจากขนาดโครงสร้างของอิเล็กโทรดแล้ว ค่าไดอิเล็กตริกของน้ำ ก็เป็นปัจจัยสำคัญต่อความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรด เมื่อค่าไดอิเล็กตริกของน้ำเปลี่ยนแปลงไป อันเนื่องจากอุณหภูมิหรือสิ่งเจือปนในน้ำ ย่อมส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัดของหัววัดด้วย การเพิ่มอิเล็กโทรดสำหรับวัดความเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กตริกของน้ำโดยเฉพาะ เพื่อนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงในการปรับสูตรการคำนวณให้เหมาะสมกับสภาพน้ำขณะทำการวัด จะช่วยลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและสิ่งเจือปนในน้ำลงได้ โดยมีหลักการดังภาพประกอบ 2-26



ภาพประกอบ 2-26 การเพิ่มอิเล็กโทรดอ้างอิงสำหรับชดเชยค่าความผิดพลาด

จากภาพประกอบ 2-26 อิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode) จะเป็นส่วนที่ถูกเพิ่มเข้ามาเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในการปรับสูตรการคำนวณของอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำ (Sensing Electrode) โดยอิเล็กโทรดอ้างอิงนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำ เพียงแต่จะมีขนาดสั้นกว่า ซึ่งเราสามารถกำหนดขนาดความยาวที่แน่นอนไว้ อิเล็กโทรดอ้างอิงที่เราทราบขนาดจะถูกจุ่มลงในน้ำทั้งหมด ดังนั้นค่าระดับน้ำที่วัดได้จากอิเล็กโทรดอ้างอิงจะต้องเท่ากับ ความยาวของอิเล็กโทรดอ้างอิง ซึ่งหากระดับน้ำที่วัดได้ผิดไปจากความยาวของอิเล็กโทรดอ้างอิง แสดงว่าค่าไดอิเล็กตริกของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับอิเล็กโทรดอ้างอิง จะถูกนำไปปรับสูตรการคำนวณของอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำ ซึ่งมีหลักการดังภาพประกอบ 2-27



ภาพประกอบ 2-27 การปรับการคำนวณของ Sensing Electrode ด้วย Reference Electrode เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากค่าไดอิเล็กตริกของน้ำมีการเปลี่ยนแปลง

จากภาพประกอบ 2-27 เมื่อ ΔL_{ref} เป็นค่าความยาวของอิเล็กโทรดอ้างอิง และ Δt_{ref} เป็นค่าระยะเวลาคายประจุของอิเล็กโทรดอ้างอิงที่ได้จากการวัดด้วยวงจรควบคุมการทำงาน มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-13)

$$\tan \theta = \frac{\Delta L_{ref}}{\Delta t_{ref}} \tag{2-13}$$

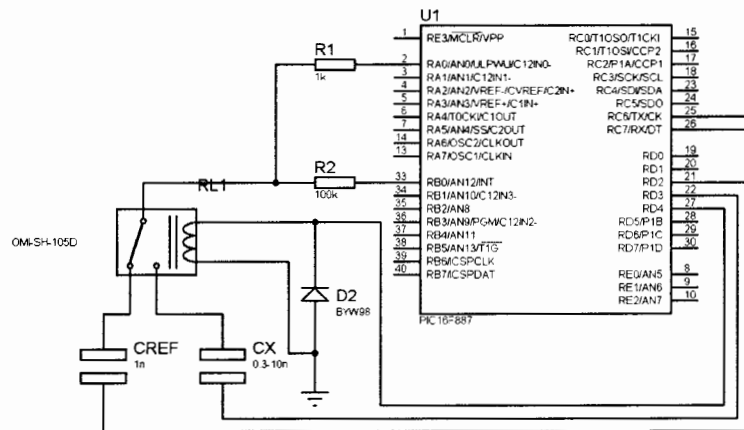
เนื่องจากอิเล็กโทรดอ้างอิงมีส่วนที่เหมือนกับอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำ และด้วยความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดกับระดับน้ำที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำกับอิเล็กโทรดอ้างอิงจึงเท่ากันดังสมการที่ (2-14)

$$\tan \theta = \frac{\Delta L_{ref}}{\Delta t_{ref}} = \frac{\Delta L_{sensing}}{\Delta t_{sensing}} \tag{2-14}$$

จึงสามารถหาค่าระดับน้ำของอิเล็กโทรดวัดระดับได้จาก

$$\Delta L_{sensing} = t_{sensing} \tan \theta \tag{2-15}$$

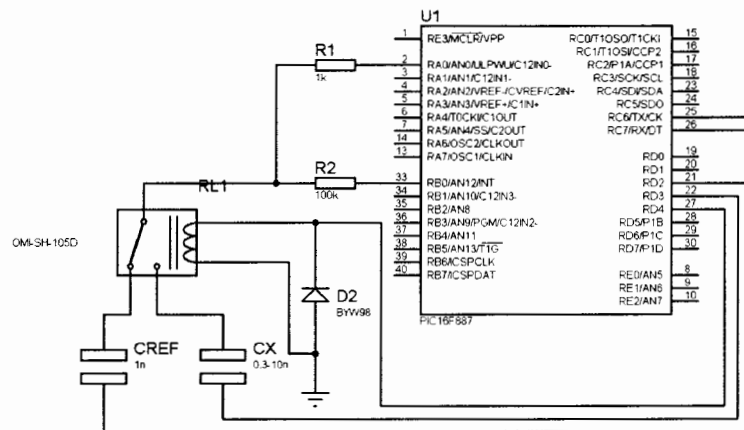
ในทางปฏิบัติ การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำ กับอิเล็กโทรดอ้างอิงไม่สามารถทำการวัดพร้อมกันได้ เพราะจะเกิดการรบกวนทางสนามไฟฟ้าระหว่างกันเมื่ออยู่ในน้ำ เนื่องจากกราวด์ของอิเล็กโทรดทั้งสองต่อรวมกัน จำเป็นต้องใช้วิธีการสลับกันวัด โดยใช้รีเลย์และพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่สลับกันวัดระหว่างอิเล็กโทรดวัดระดับน้ำกับอิเล็กโทรดอ้างอิง มีวงจรดังภาพประกอบ 2-28



ภาพประกอบ 2-28 การใช้รีเลย์สลับการวัดระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ระดับน้ำ กับอิเล็กทรอนิกส์อ้างอิง

2.3.4 การลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการกระเพื่อมของน้ำที่มีการไหล

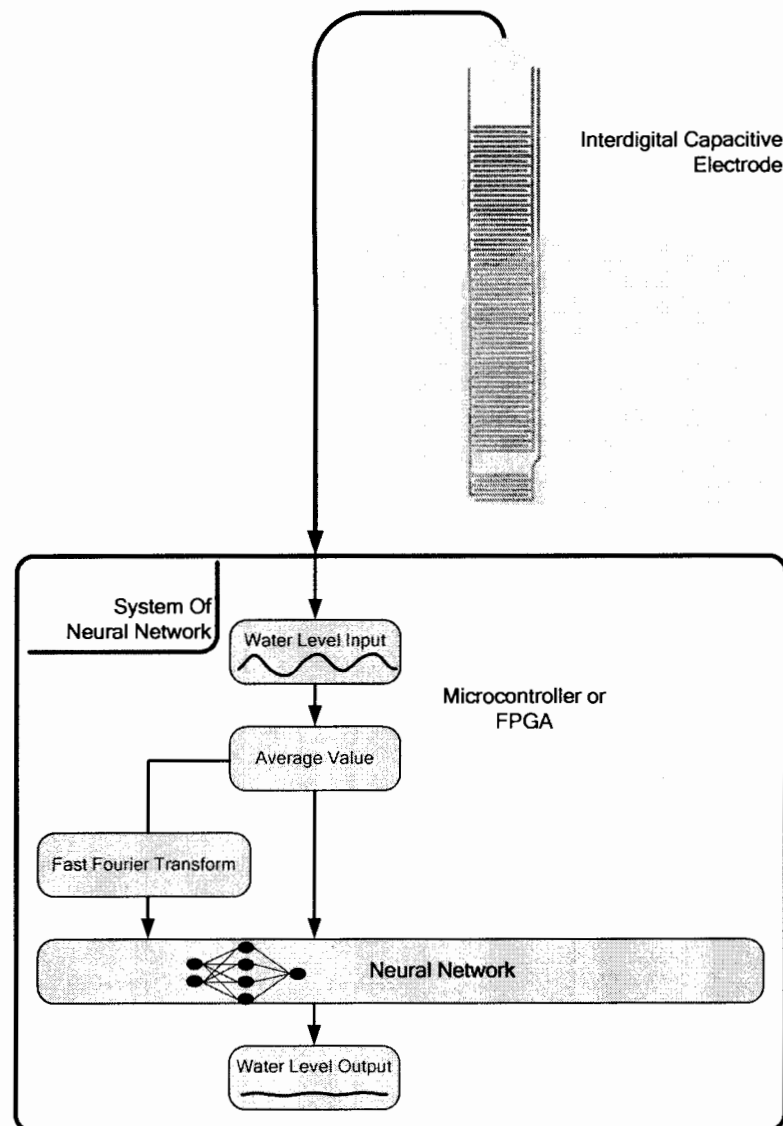
โดยปกติการวัดระดับน้ำที่มีลักษณะเป็นแหล่งน้ำเปิด ผิวน้ำจะมีการกระเพื่อมตลอดเวลา เนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น เกิดจากลม การไหลของน้ำ หรือจากเรือ ฯลฯ ทำให้เราไม่สามารถอ่านค่าระดับน้ำที่แท้จริงจากหัววัดได้ ที่ผ่านมามีการแก้ปัญหาดังกล่าว นิยมใช้การเก็บค่าระดับน้ำในช่วงเวลาหนึ่งแล้วทำการหาค่าเฉลี่ย แม้วิธีการหาค่าเฉลี่ยจะให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือ แต่ก็ต้องใช้ระยะเวลาในการเก็บและประมวลผลข้อมูล ส่งผลให้ค่าระดับน้ำที่วัดได้ไม่เป็นข้อมูล ณ เวลาปัจจุบัน (Real Time) จากการศึกษาบทความวิจัยของ Edin Terzic [31] ที่ได้เสนอวิธีการลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดปริมาณเชื้อเพลิงในถังน้ำมันรถยนต์ขณะรถเคลื่อนที่ ส่งผลให้ไม่สามารถหาปริมาณเชื้อเพลิงในถังเก็บได้อย่างถูกต้อง โดยผลการทดลองได้พิสูจน์ให้เห็นว่า วิธีการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ (Feed forward backpropagation neural network) สามารถลดค่าความผิดพลาดจากการวัดปริมาณ จากเดิม 68% เหลือเพียง 0.11% งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ที่เสนอโดย Edin. Terzic มาประยุกต์ใช้กับหัววัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอล เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการกระเพื่อมของน้ำที่มีการไหล โดยมีผังการทำงานดังภาพประกอบ 2-29



ภาพประกอบ 2-28 การใช้รีเลย์สลับการวัด
ระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ระดับน้ำ กับอิเล็กทรอนิกส์อ่างอิง

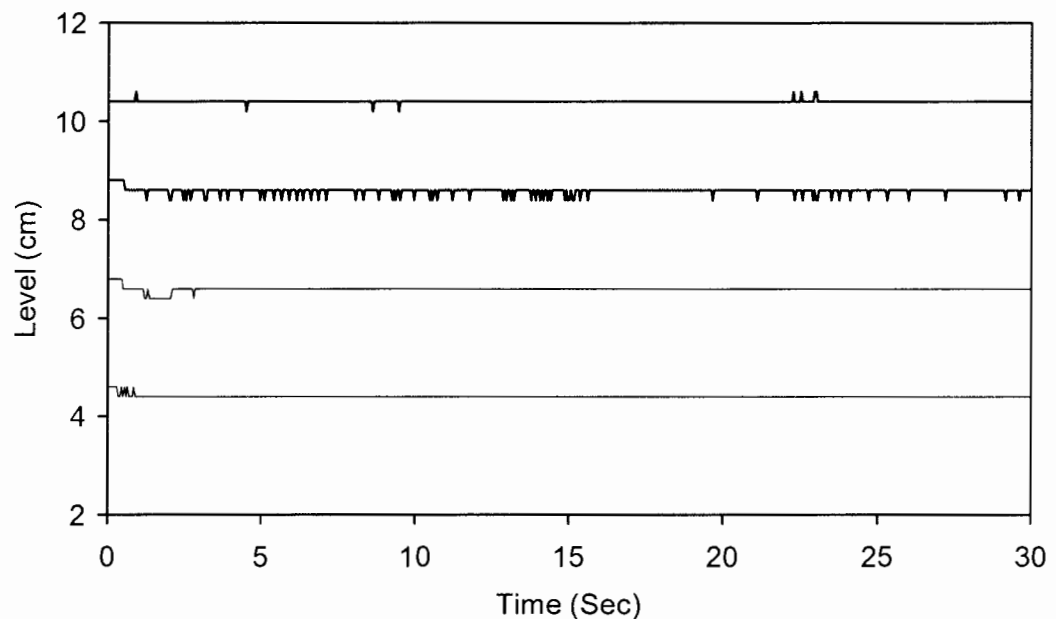
2.3.4 การลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการกระเพื่อมของน้ำที่มีการไหล

โดยปกติการวัดระดับน้ำที่มีลักษณะเป็นแหล่งน้ำเปิด ผิวน้ำจะมีการกระเพื่อมตลอดเวลา เนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น เกิดจากลม การไหลของน้ำ หรือจากเรือ ฯลฯ ทำให้เราไม่สามารถอ่านค่าระดับน้ำที่แท้จริงจากหัววัดได้ ที่ผ่านมาการแก้ปัญหาดังกล่าว นิยมใช้การเก็บค่าระดับน้ำในช่วงเวลาหนึ่งแล้วทำการหาค่าเฉลี่ย แม้วิธีการหาค่าเฉลี่ยจะให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือ แต่ก็ต้องใช้ระยะเวลาในการเก็บและประมวลผลข้อมูล ส่งผลให้ค่าระดับน้ำที่วัดได้ไม่เป็นข้อมูล ณ เวลาปัจจุบัน (Real Time) จากการศึกษาบทความวิจัยของ Edin Terzic [31] ที่ได้เสนอวิธีการลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดปริมาณเชื้อเพลิงในถังน้ำมันรถยนต์ขณะรถเคลื่อนที่ ส่งผลให้ไม่สามารถหาปริมาณเชื้อเพลิงในถังเก็บได้อย่างถูกต้อง โดยผลการทดลองได้พิสูจน์ให้เห็นว่า วิธีการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ (Feed forward backpropagation neural network) สามารถลดค่าความผิดพลาดจากการวัดปริมาณ จากเดิม 68% เหลือเพียง 0.11% งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ที่เสนอโดย Edin. Terzic มาประยุกต์ใช้กับหัววัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอล เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการกระเพื่อมของน้ำที่มีการไหล โดยมีผังการทำงานดังภาพประกอบ 2-29



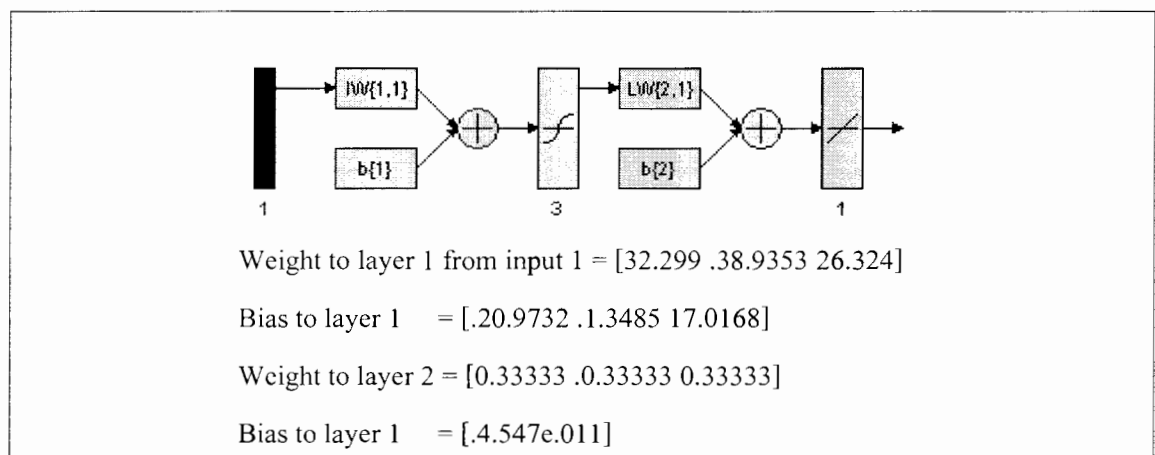
ภาพประกอบ 2-29 ผังการทำงานของระบบการลดค่าความผิดพลาดเนื่องจากการกระเพื่อมของน้ำ

การเก็บข้อมูลเพื่อนำมาใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียม ใช้การทดลองเพื่อเก็บค่าระดับน้ำที่เกิดจากการจำลองการไหลแบบเปลี่ยนแปลงช้าในรางเปิดของภาควิชาวิศวกรรมโยธา โดยใช้หัววัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิทัล ซึ่งกำหนดการวัดระดับน้ำไว้ที่ 4 ระดับ คือ 4, 6, 8 และ 10 เซนติเมตร โดยสุ่มเก็บค่าระดับน้ำขณะน้ำไหลทุกๆ 50 มิลลิวินาที เป็นเวลาประมาณ 30 วินาที มีผลการทดลองดังภาพประกอบ 2-30



ภาพประกอบ 2-30 ผลการวัดระดับน้ำที่มีการกระเพื่อมเนื่องจากการไหล

ข้อมูลระดับน้ำที่ได้ จะถูกนำไปใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียม โดยวิธีการเรียนรู้แบบแพร่กลับ มีโครงสร้างแบบ 1.3.1 (1 input-3 cells-1 output) โดยใช้ Neural Network Toolbox ภายในโปรแกรม MATLAB มีข้อมูลในการสอน (Input data) จำนวน 4000 ชุดข้อมูล และค่าเอาต์พุตเป้าหมาย (Target data) ที่ระดับ 4, 6, 8 และ 10 เซนติเมตรตามค่าระดับน้ำจริงที่ได้จากการทดลอง หลังจากได้ผลการสอนตามที่ต้องการแล้ว จะได้โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมดังภาพประกอบ 2-31



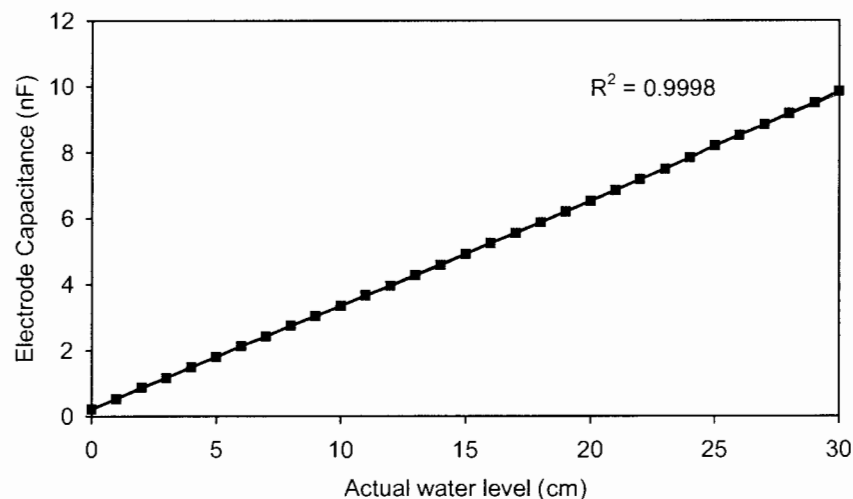
ภาพประกอบ 2-31 ลักษณะโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้จากการสอน

2.4 การทดลองและผลการทดลอง

หลังจากออกแบบหัววัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลจนได้คุณสมบัติตามที่ต้องการแล้ว จึงทำการสร้างต้นแบบหัววัดระดับน้ำตามที่ได้ออกแบบไว้ ต้นแบบที่ได้จะถูกนำมาทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ พิกัดการทำงาน และการใช้พลังงาน โดยการทดลองทั้งหมดทำภายในห้องปฏิบัติการที่มีอุณหภูมิของน้ำขณะทำการทดลองอยู่ระหว่าง 25 – 30 องศาเซลเซียส ใช้น้ำประปาในการทดลองปกติ มีการทดลองและผลการทดลองดังนี้

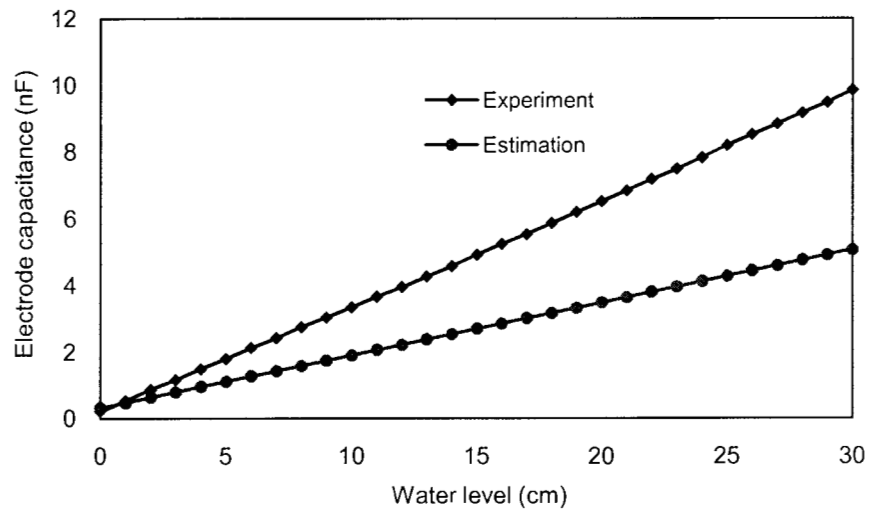
2.4.1 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าความจุไฟฟ้า

ทำการทดลองโดยใช้หัววัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอล วัดระดับน้ำตั้งแต่ 0-30 เซนติเมตร โดยเพิ่มระดับน้ำครั้งละ 1 เซนติเมตร แล้ววัดค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรด (electrode capacitance) ด้วยเครื่อง LRC Meter ยี่ห้อ HIOKI มีผลการทดลองดังภาพประกอบ 2-32



ภาพประกอบ 2-32 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าความจุไฟฟ้า

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าความจุไฟฟ้าของอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กโทรด ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตลอดย่านวัด 30 เซนติเมตร โดยมีค่า $R^2 = 0.9998$ และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 0.3 nF ต่อระดับน้ำ 1 เซนติเมตร และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ จะมีความสัมพันธ์ดังภาพประกอบ 2-33

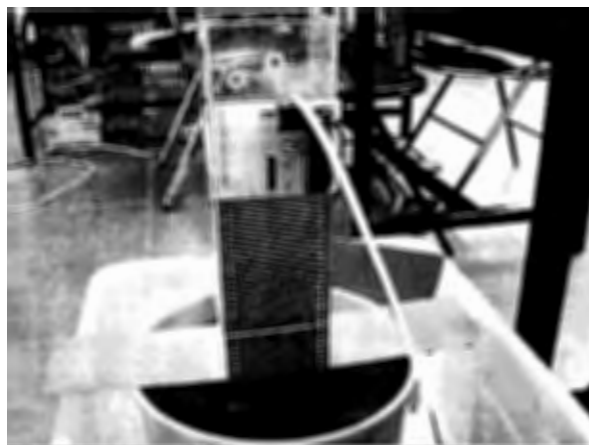


ภาพประกอบ 2-33 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่ได้จากการทดลอง กับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ

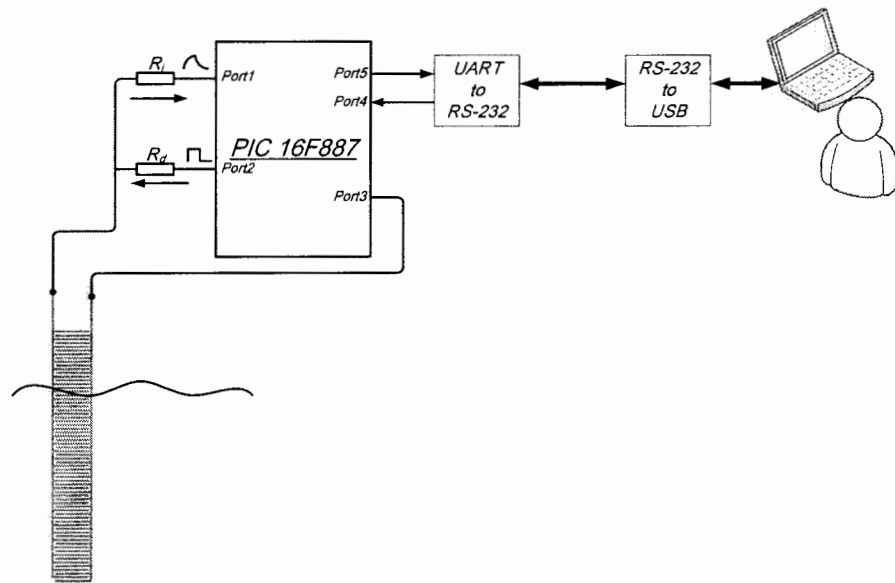
2.4.2 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับระยะเวลาคายประจุ

ทำการทดลองวัดระดับน้ำตั้งแต่ 0-30 เซนติเมตร โดยเพิ่มระดับน้ำครั้งละ 1 เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 2-34 จากวัดค่าระยะเวลาคายประจุของอิเล็กโทรดด้วยวงจรควบคุมการทำงาน (electrode discharge time) ที่ได้จากการออกแบบ ทำการทดลองซ้ำ 10 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย



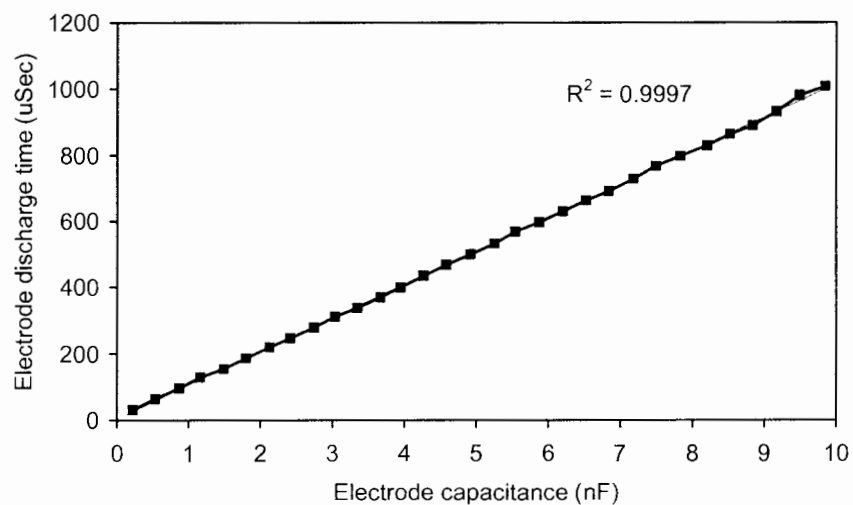
ภาพประกอบ 2-34 วิธีการทดลองวัดระดับน้ำด้วยหัววัด โดยเพิ่มระดับน้ำครั้งละ 1 เซนติเมตร

โดยระยะเวลาคายประจุของอิเล็กโทรดจะถูกวัดด้วยวงจรควบคุมการทำงาน ซึ่งใช้วิธีการจับเวลา คายประจุของอิเล็กโทรดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ระยะเวลาคายประจุที่วัดได้จะถูกส่งออกผ่านทางพอร์ตอนุกรม UART ของไมโครคอนโทรลเลอร์ในรูปแบบรหัสแอสกี จากนั้นเปลี่ยนมาตรฐานสื่อจาก UART เป็น RS-232 แล้วเปลี่ยนจากมาตรฐานสื่อสาร RS-232 เป็น USB อีกครั้ง เพื่อเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ต่อไป โดยโปรแกรม LabView จะรับข้อมูลผ่านทางพอร์ต USB แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปแสดงผลและบันทึกข้อมูล มีผังการทำงานดังภาพประกอบ 2-35



ภาพประกอบ 2-35 ผังแสดงการเชื่อมต่อหัววัดระดับน้ำ เข้ากับคอมพิวเตอร์

มีผลที่ได้จากการทดลองดังภาพประกอบ 2-36

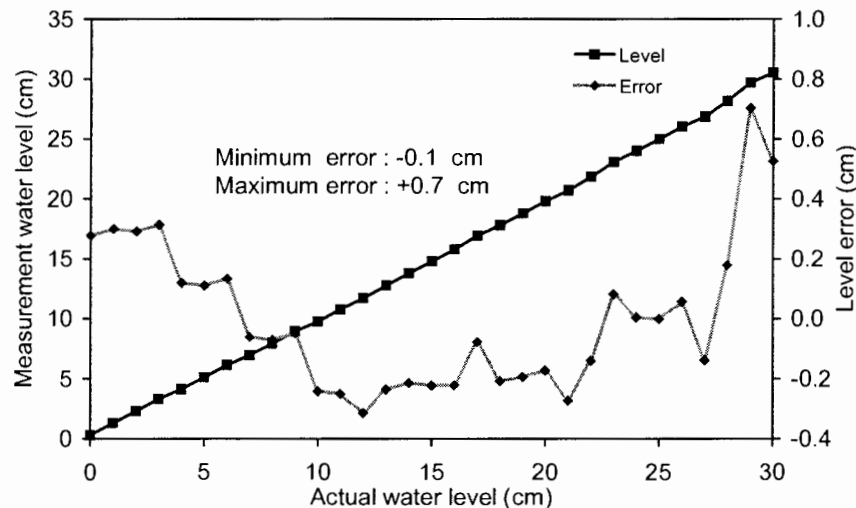


ภาพประกอบ 2-36 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าระยะเวลาคายประจุ ที่ได้จากการวัดด้วยวงจรควบคุมการทำงาน

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าระยะเวลาคายประจุของอิเล็กโทรด ที่ได้จากการวัดด้วยวงจรควบคุมการทำงานมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นและมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าระยะเวลาคายประจุประมาณ $34 \mu\text{Sec}$ ต่อระดับน้ำ 1 เซนติเมตร

2.4.3 การทดลองเพื่อหาค่าความผิดพลาดในการวัดระดับน้ำ

ทำการทดลองโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำ กับระยะเวลาคายประจุของหัววัดที่ได้จากการทดลองที่ 2.4.2 มาคำนวณหาค่าระดับน้ำ (measurement water level) แล้วเปรียบเทียบกับระดับน้ำจริงที่ได้จากการอ่านด้วยสายตา (actual water level) นำผลที่ได้จากสองวิธีมาเปรียบเทียบ เพื่อหาค่าความผิดในการวัดของหัววัด (measurement error) โดยใช้ค่าระดับที่อ่านด้วยสายตาเป็นค่าอ้างอิง ทำการทดลองซ้ำ 10 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย มีผลการทดลองดังภาพประกอบ 2-37

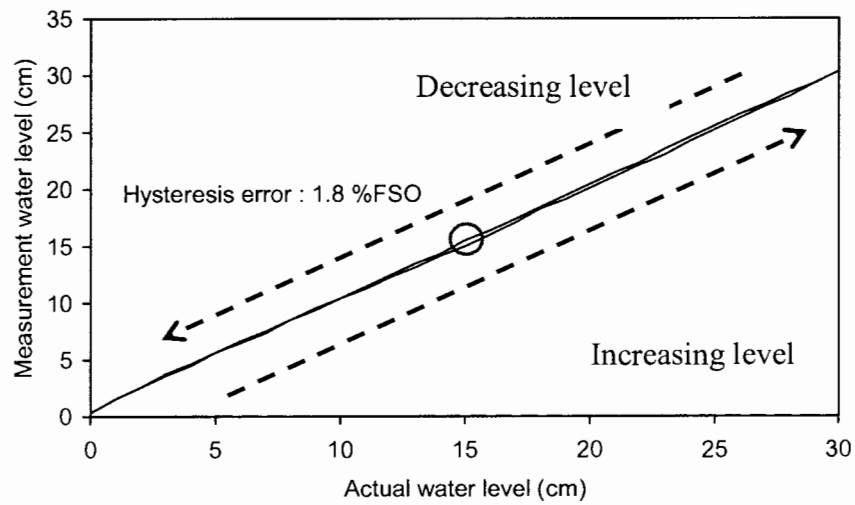


ภาพประกอบ 2-37 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าระดับน้ำที่ได้จากการวัดด้วยหัววัดกับค่าระดับน้ำจริง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดระดับน้ำด้วยหัววัดแบบอินเทอร์ดิจิตอลมีค่าความผิดพลาดสูงสุด $+0.7$ เซนติเมตรที่ระดับน้ำ 27 เซนติเมตร หรือเท่ากับ $2.33\% \text{FSO}$ และมีค่าความผิดพลาดต่ำสุด -0.1 เซนติเมตรที่ระดับน้ำ 12 เซนติเมตร หรือคิดเป็น $0.33\% \text{FSO}$

2.4.4 การทดลองเพื่อหาค่าความผิดพลาดแบบฮิสเทอรีซิส

ทำการทดลองวัดระดับน้ำตั้งแต่ 0-30 เซนติเมตร โดยเพิ่มระดับน้ำครั้งละ 1 เซนติเมตร และลดระดับน้ำลงครั้งละ 1 เซนติเมตร แล้วนำผลที่ได้จากทั้งสองช่วง มาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความผิดพลาดแบบฮิสเทอรีซิส ทำการทดลองซ้ำ 10 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย มีผลการทดลองดังภาพประกอบ 2-38

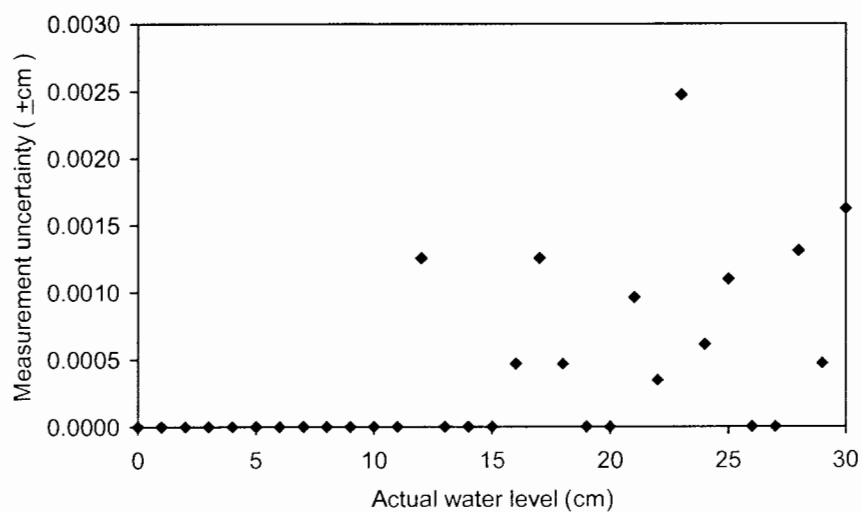


ภาพประกอบ 2-38 ค่าความผิดพลาดแบบฮิสเทอรีซิสของหัววัด

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

2.4.5 การทดลองเพื่อหาค่าความไม่แน่นอนในการวัดระดับน้ำ

ทำการทดลองวัดระดับน้ำด้วยหัววัดตั้งแต่ 0-30 เซนติเมตร โดยเพิ่มระดับน้ำครั้งละ 1 เซนติเมตร ทำการทดลองที่ระดับเดียวกันซ้ำกัน 10 ครั้ง แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนการวัด (uncertainty measurement) ที่ระดับต่างๆ มีผลดังภาพประกอบ 2-39



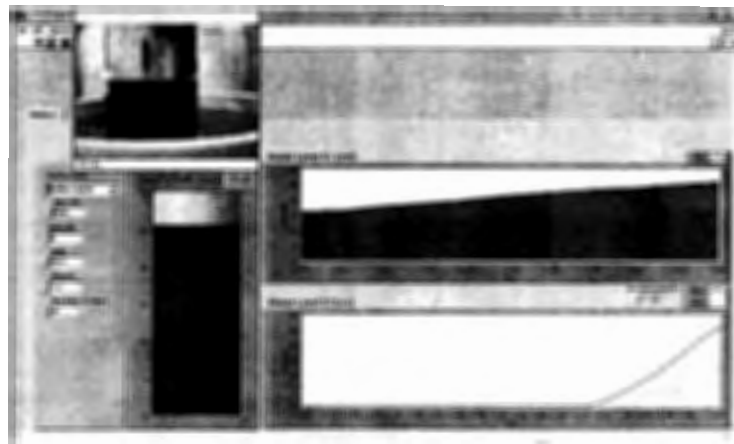
ภาพประกอบ 2-39 ค่าความไม่แน่นอนการวัดของหัววัด (uncertainty measurement)

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความไม่แน่นอนการวัดจะเริ่มเพิ่มขึ้นเมื่อวัดระดับน้ำมากกว่า 15 เซนติเมตร และระดับน้ำที่มีค่าความไม่แน่นอนการวัดสูงสุดคือ + 0.0025 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำ 23 เซนติเมตร

2.4.6 การทดลองผลตอบสนองการวัดระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

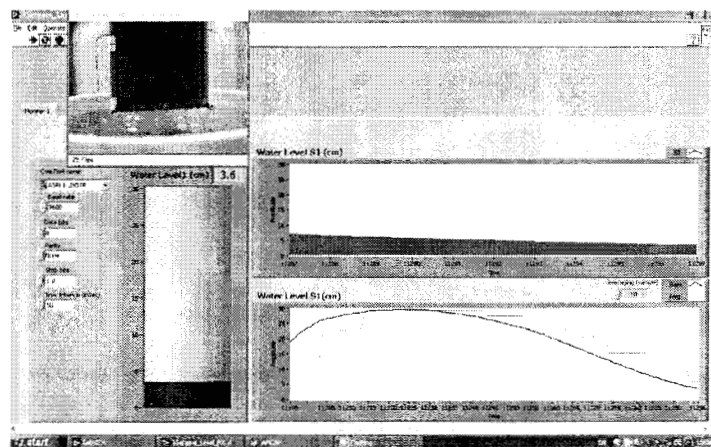
วิธีการทดลอง

1. นำหัววัดเคลื่อนที่ลงไปใต้น้ำ 30 เซนติเมตรอย่างทันทีทันใด และวัดระดับน้ำด้วยหัววัด โดยใช้อัตราการสุ่มเก็บข้อมูล 20 sample/sec ดังภาพประกอบ 2-40



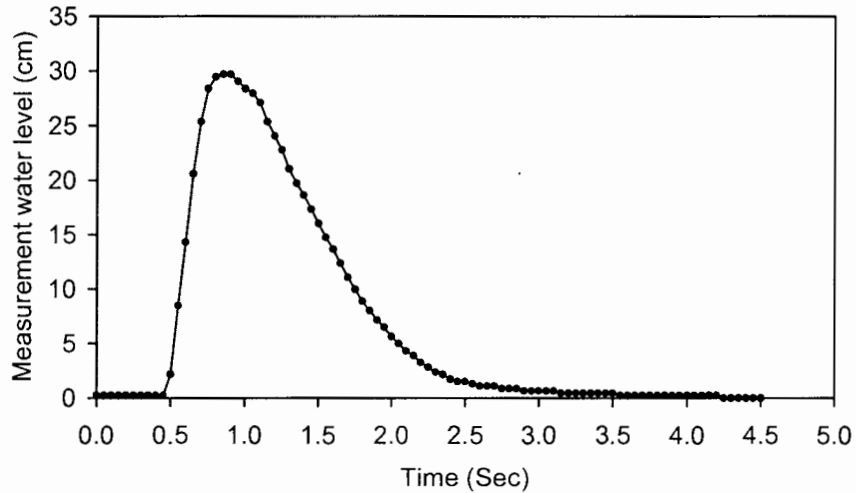
ภาพประกอบ 2-40 การนำหัววัดจุ่มลงในน้ำทันทีทันใด

2. หลังจากนั้นนำหัววัดเคลื่อนที่ขึ้นจากน้ำอย่างทันทีทันใด พร้อมวัดระดับน้ำด้วยหัววัดดังภาพประกอบ 2-41



ภาพประกอบ 2-41 การนำหัววัดเคลื่อนที่ขึ้นจากน้ำอย่างทันทีทันใด

3. นำค่าที่ได้มาพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับระยะเวลาที่มีผลการทดลองดังภาพประกอบ 2-42

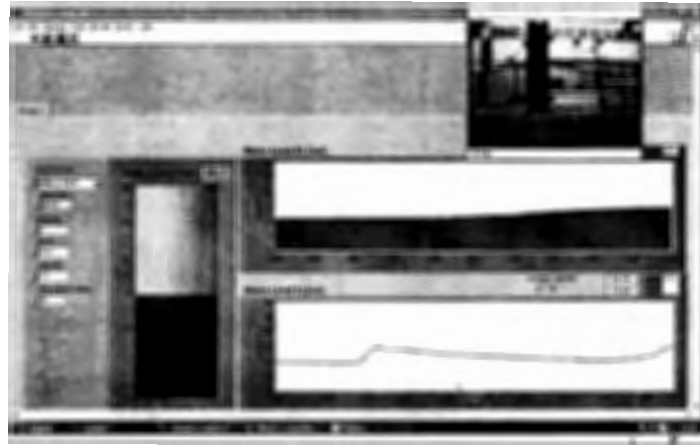


ภาพประกอบ 2-42 ผลทดสอบการตอบสนองของหัววัด
เมื่อระดับน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ในช่วงระดับน้ำเพิ่มขึ้น หัววัดมีผลตอบสนองที่รวดเร็ว คือ สามารถวัดระดับน้ำเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 ถึง 30 เซนติเมตรภายในระยะเวลาไม่เกิน 500 มิลลิวินาที แต่ในช่วงที่น้ำลงหัววัดกลับมีผลตอบสนองค่อนข้างช้า คือ วัดระดับน้ำลดลงตั้ง 30 เซนติเมตร เหลือ 0 เซนติเมตร ต้องใช้ระยะเวลาไม่น้อยกว่า 3.5 วินาที

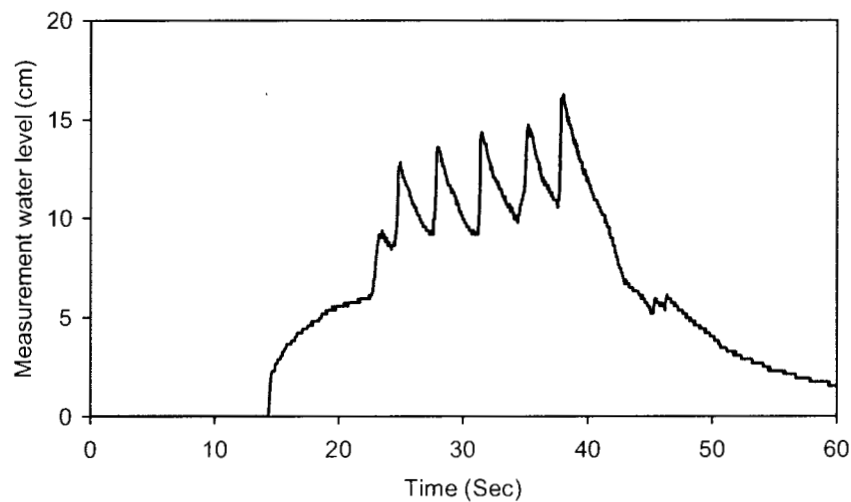
2.4.7 การทดลองผลตอบสนองการวัดระดับคลื่น

ทำการทดลองจำลองสภาวะการเกิดคลื่นในรางน้ำเปิด ในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา โดยติดตั้งหัววัดระดับน้ำในรางน้ำเปิด แล้วให้น้ำไหลผ่านหัววัด ดังภาพประกอบ 2-43



ภาพประกอบ 2-43 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับทดสอบสถานะคลื่นน้ำไหลผ่าน

เมื่อระดับน้ำเพิ่มขึ้นถึงระดับ 5 เซนติเมตร จึงทำการสร้างคลื่นน้ำจำนวน 6 ลูก แล้วปล่อยให้ระดับน้ำลดลง มีผลการทดลองดังภาพประกอบ 2-44

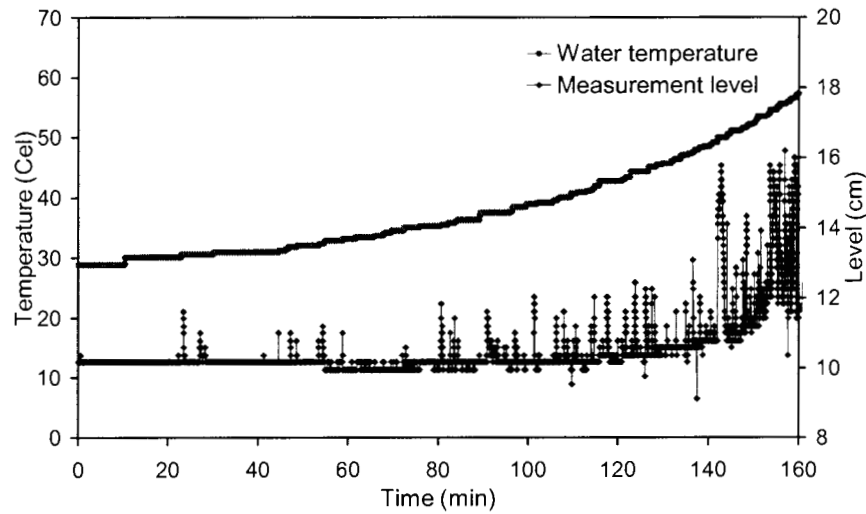


ภาพประกอบ 2-44 ผลการทดลองผลตอบสนองการวัดระดับคลื่น

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า หัววัดสามารถวัดระดับความสูงของลูกคลื่นได้ แต่ไม่สามารถแสดงลักษณะได้เหมือนกับลูกคลื่น sine ที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากเมื่อคลื่นเคลื่อนผ่านหัววัดไปแล้ว ระดับน้ำจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ยังคงมีน้ำบางส่วนเกาะบนอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้ระดับน้ำที่วัดลดลงช้ากว่าระดับน้ำจริง

2.4.8 การทดลองผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้น

ทำการทดลองโดยใช้หัววัดวัดระดับน้ำคงที่ 10 เซนติเมตร แล้วเพิ่มอุณหภูมิของน้ำตั้งแต่ 30 – 60 องศาเซลเซียส บันทึกค่าทุกๆ 1 วินาที มีผลการทดลองดังภาพประกอบ 2-45



ภาพประกอบ 2-45 อุณหภูมิน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าระดับน้ำที่วัดด้วยหัววัด

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระดับน้ำที่วัดด้วยหัววัด มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และเมื่ออุณหภูมิของน้ำมากกว่า 40 องศาเซลเซียส ระดับน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

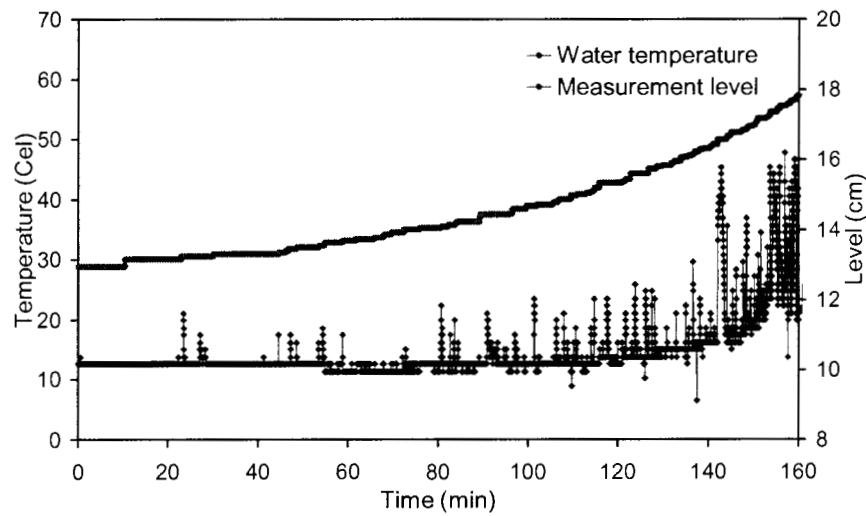
2.4.9 การทดลองวัดระดับน้ำที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง

วิธีการทดลอง

1. ทดลองกับน้ำประปา และน้ำที่มีค่า PH ระหว่าง 4 – 9 เพื่อจำลองสภาพน้ำที่เป็นกรด-ด่างดังภาพประกอบ 2-46
2. ทดลองกับน้ำ 500 มิลลิลิตร ผสมเกลือแกง 1 ช้อนโต๊ะเพื่อจำลองสภาพน้ำเค็มดังภาพประกอบ 2-47
3. ทดลองกับน้ำอัดลม (Coke) เพื่อจำลองน้ำที่มีส่วนผสมของน้ำตาลและก๊าซ ดังภาพประกอบ 2-48
4. ทดลองกับน้ำมันปาล์ม เพื่อทดสอบของเหลวที่ไม่ใช่น้ำดังภาพประกอบ 2-49



ภาพประกอบ 2-46 น้ำที่มีการสังเคราะห์ค่า PH 4 – PH9 สำหรับใช้ในการทดลอง



ภาพประกอบ 2-45 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าระดับน้ำที่วัดด้วยหัววัด

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระดับน้ำที่วัดด้วยหัววัด มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และเมื่ออุณหภูมิของน้ำมากกว่า 40 องศาเซลเซียส ระดับน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

2.4.9 การทดลองวัดระดับน้ำที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง

วิธีการทดลอง

1. ทดลองกับน้ำประปา และน้ำที่มีค่า PH ระหว่าง 4 – 9 เพื่อจำลองสภาพน้ำที่เป็นกรด-ด่างดังภาพประกอบ 2-46
2. ทดลองกับน้ำ 500 มิลลิลิตร ผสมเกลือแกง 1 ช้อนโต๊ะเพื่อจำลองสภาพน้ำเค็มดังภาพประกอบ 2-47
3. ทดลองกับน้ำอัดลม (Coke) เพื่อจำลองน้ำที่มีส่วนผสมของน้ำตาลและก๊าซ ดังภาพประกอบ 2-48
4. ทดลองกับน้ำมันปาล์ม เพื่อทดสอบของเหลวที่ไม่ใช่น้ำดังภาพประกอบ 2-49



ภาพประกอบ 2-46 น้ำที่มีการสังเคราะห์ค่า PH 4 – PH9 สำหรับใช้ในการทดลอง



ภาพประกอบ 2-47 การทดลองวัดระดับน้ำเกลือด้วยหัววัด



ภาพประกอบ 2-48 การวัดระดับน้ำอัดลมด้วยหัววัด



ภาพประกอบ 2-49 การวัดระดับน้ำมันปาล์มด้วยหัววัด

5. กำหนดให้หัววัดอ่านค่าระดับทุกๆ 1 วินาที นานเวลา 1 นาที มีผลการทดลองของการวัดระดับน้ำชนิดต่างๆที่ระดับ 5 เซนติเมตร ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ผลการทดลองวัดของเหลวชนิดต่างๆ

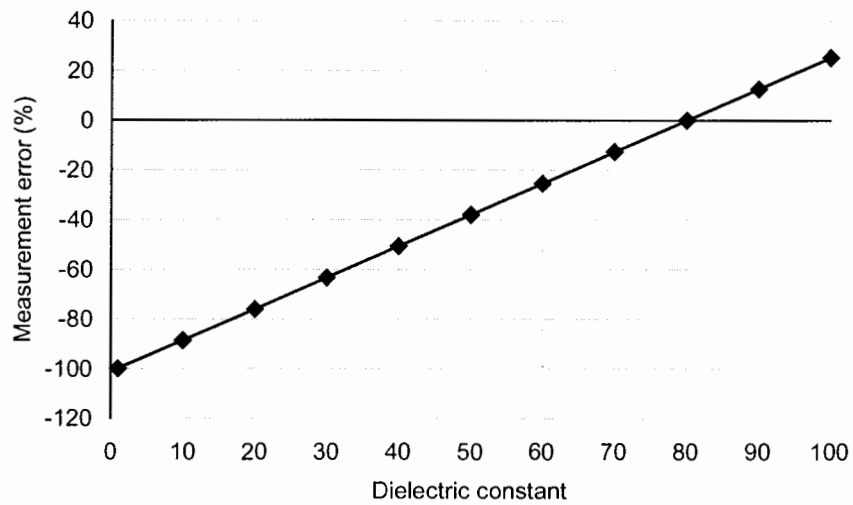
ชนิดของเหลว	ระดับจริง (cm)	ระดับที่วัดได้ (cm)	ค่าความผิดพลาด(cm)
น้ำประปา	5	4.8	0.2
น้ำ PH 4	5	4.8	0.2
น้ำ PH 4.5	5	4.8	0.2
น้ำ PH 5	5	5.0	0.0
น้ำ PH 5.5	5	4.8	0.2
น้ำ PH 6	5	5.0	0.0
น้ำ PH 6.5	5	4.8	0.2
น้ำ PH 7	5	4.8	0.2
น้ำ PH 7.5	5	4.8	0.2
น้ำ PH 8	5	4.8	0.2
น้ำ PH 8.5	5	5.0	0.0
น้ำ PH 9	5	4.8	0.2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

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า น้ำที่มีค่า PH อยู่ระหว่าง 4 – 9 ไม่ส่งผลต่อค่าระดับน้ำที่วัดด้วยหัววัดแบบอินเทอร์ดิจิตอล ในขณะที่น้ำในอ่างเก็บน้ำ น้ำอัดลม และน้ำเกลือ ก็ไม่ส่งผลต่อค่าระดับน้ำที่วัดด้วยหัววัดเช่นกัน แต่เมื่อใช้หัววัดระดับน้ำมันปาล์มกลับไม่สามารถวัดระดับของน้ำมันปาล์มได้ เนื่องจากน้ำมันปาล์มมีค่าไดอิเล็กตริกต่ำกว่าน้ำ 27 เท่า

2.4.10 การจำลองการทำงานเพื่อศึกษาผลกระทบจากการวัดระดับน้ำที่มีค่าไดอิเล็กตริก 1-100

วิธีการทดลอง

ทำการจำลองการทำงานของอิเล็กโตรดด้วยโปรแกรม COMSOL โดยกำหนดให้หัววัดวัดระดับน้ำที่ 10 เซนติเมตร และให้ค่าไดอิเล็กตริกของน้ำเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 1 – 100 โดยค่าระดับน้ำที่ค่าไดอิเล็กตริกเท่ากับ 80 เป็นค่าอ้างอิง เพื่อเปรียบเทียบกับค่าระดับน้ำที่ไดอิเล็กตริกต่างๆ มีผลการจำลองดังภาพประกอบ 2-50

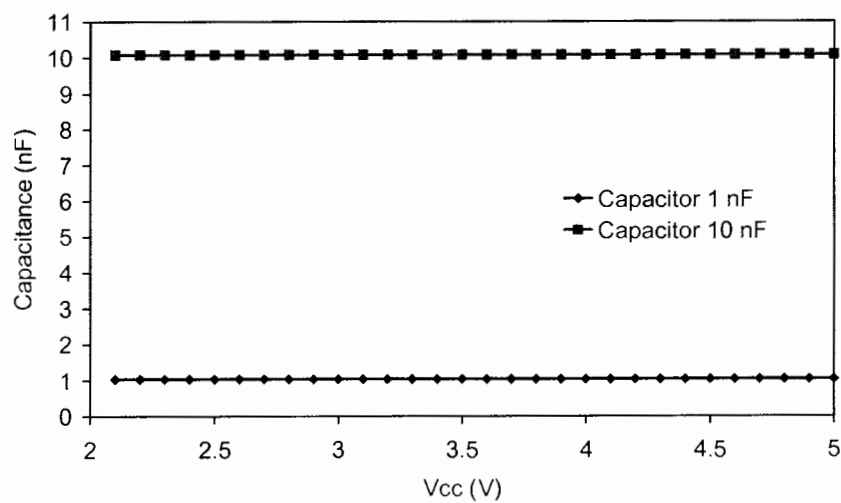


ภาพประกอบ 2-50 ค่าความผิดพลาดจากการวัด เมื่อค่าไดอิเล็กตริกของน้ำเปลี่ยนแปลง

จากภาพประกอบ 2-50 เมื่อค่าไดอิเล็กตริกของน้ำเพิ่ม ค่าระดับน้ำที่วัดด้วยหัววัด จะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อค่าไดอิเล็กตริกของน้ำลดลง ค่าระดับน้ำที่วัดด้วยหัววัดก็จะมีค่าลดลง อัตราค่าความผิดพลาดของค่าระดับน้ำต่อค่าไดอิเล็กตริก มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น

2.4.11 การทดสอบผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟของแหล่งจ่าย

ทำการทดลองโดยให้วงจรควบคุมการทำงานวัดค่าความจุไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุที่มีค่า 1 nF และ 10 nF โดยปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรควบคุมการทำงานระหว่าง 2.1 – 5 โวลต์ มีผลการทดลองดังภาพประกอบ 2-51



ภาพประกอบ 2-51 ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดด้วยวงจรควบคุมการทำงานเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดัน 2.1-5 V

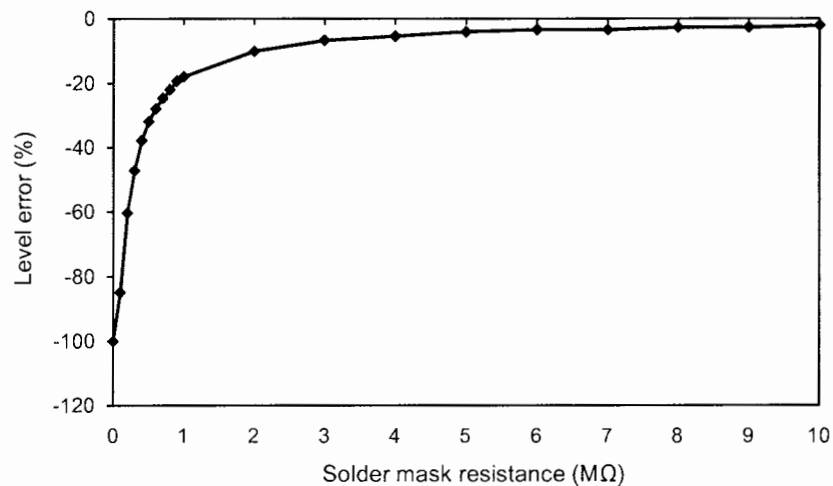
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อแหล่งจ่ายไฟของวงจรควบคุมการทำงานมีแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 2.1 – 5 V วงจรควบคุมการทำงานยังคงวัดค่าความจุไฟฟ้าได้เท่าเดิม ดังนั้นระดับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไม่ส่งผลต่อการวัดค่าความจุไฟฟ้าของวงจรควบคุมการทำงาน

2.4.12 การทดลองผลกระทบจากการเสื่อมสภาพฉนวนของผิวเคลือบลายทองแดง

จำลองการเสื่อมสภาพฉนวนเคลือบผิวทองแดงด้วยการต่อตัวต้านทานขนานกับอิเล็กโทรดดังภาพประกอบ 2-52



ภาพประกอบ 2-52 การต่อตัวต้านทานขนานกับอิเล็กโทรด เพื่อจำลองการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบ โดยมีค่าความต้านทานที่ใช้ในการทดลองอยู่ระหว่าง 0 - 10 M Ω ทำการทดลองวัดระดับน้ำที่ 30 เซนติเมตร และใช้ระดับน้ำที่ความต้านทานของฉนวนเท่ากับ 100 M Ω เป็นค่าอ้างอิง มีผลการทดลองดังภาพประกอบ 2-53



ภาพประกอบ 2-53 ค่าความผิดพลาดจากการวัดด้วยหัววัด เมื่อผิวเคลือบเสื่อมสภาพฉนวน

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อฉนวนเคลือบทองแดงของอิเล็กโทรดมีความต้านทานลดลง จะส่งผลให้ค่าระดับน้ำที่วัดได้จากหัววัดมีความผิดพลาดไปในแนวทางที่น้อยกว่าค่าระดับจริง

2.4.13 การทดลองวิธีการชดเชยค่าความผิดพลาดจากอุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้น วิธีการทดลอง

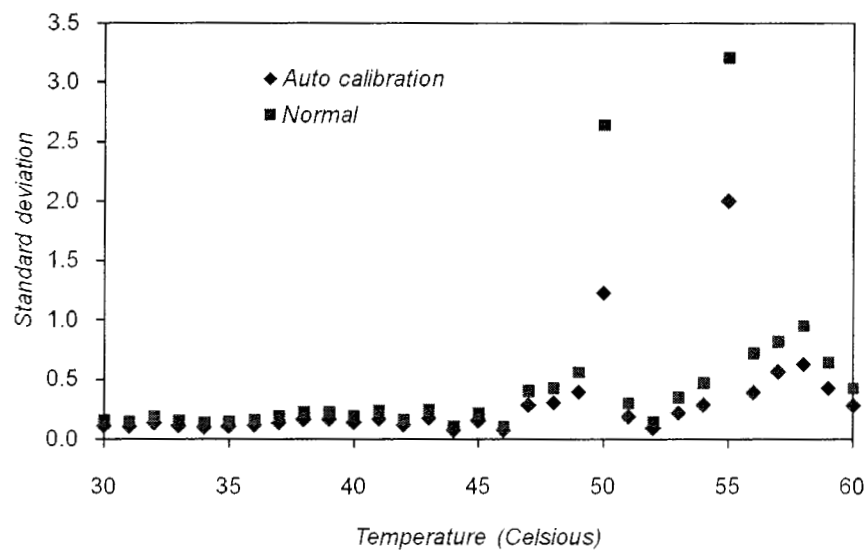
1. กำหนดขนาดของอิเล็กโตรดอ้างอิงที่มีความยาว 2 เซนติเมตร ดังภาพประกอบ

2-54



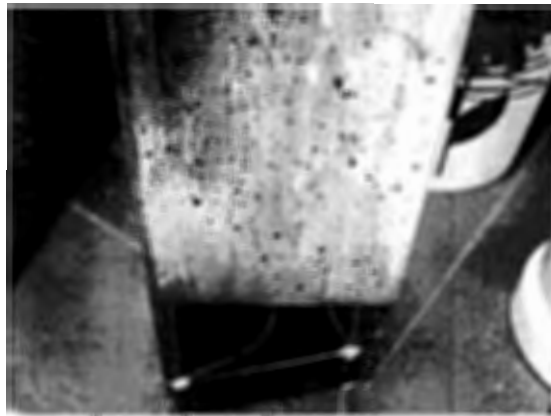
ภาพประกอบ 2-54 อิเล็กโตรดอ้างอิงที่มีความยาว 2 เซนติเมตร

2. กำหนดค่าระดับน้ำจริงที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 10 เซนติเมตร จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิของน้ำตั้งแต่ 30 – 60 องศาเซลเซียส บันทึกค่าอุณหภูมิและระดับน้ำที่ผ่านการประมวลผลแบบอัจฉริยะแล้ว เก็บค่าระดับน้ำและอุณหภูมิทุกๆ 1 วินาที เปรียบเทียบผลการวัดระดับน้ำระหว่างหัววัดที่มีการชดเชยค่าความผิดพลาด (Auto calibration) กับหัววัดแบบปกติ (Normal) ด้วยวิธีการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน มีผลการทดลองดังภาพประกอบ 2-55



ภาพประกอบ 2-55 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ระหว่างหัววัดที่มีการชดเชยค่าความผิดพลาด กับหัววัดแบบปกติ เมื่อวัดน้ำที่มีอุณหภูมิ 30-60 องศาเซลเซียส

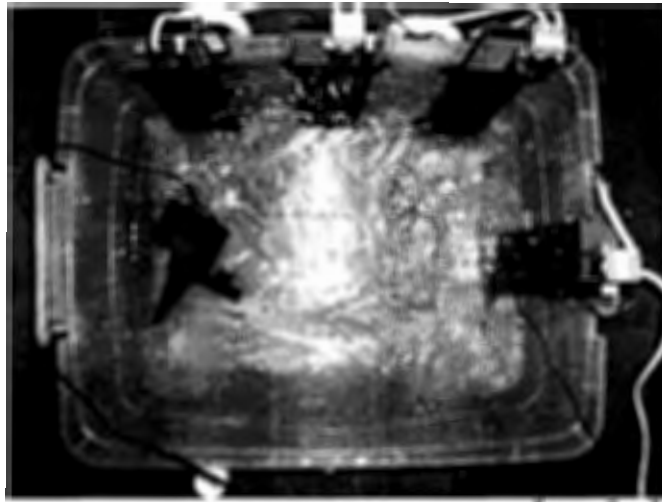
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิของน้ำอยู่ในช่วง 30- 45 องศาเซลเซียส ค่าระดับน้ำที่วัดด้วยหัววัดที่มีการชดเชยค่าความผิดพลาด (Auto calibration) กับหัววัดแบบปกติ (Normal) จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ใกล้เคียงกันและค่อนข้างคงที่ แต่เมื่ออุณหภูมิของน้ำมากกว่า 45 องศา หัววัดที่มีการชดเชยค่าความผิดพลาด จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าหัววัดแบบปกติ แสดงว่าการเพิ่มวิธีการชดเชยค่าความผิดพลาดให้กับหัววัด จะช่วยรักษาค่าระดับน้ำที่วัดได้ให้คงที่ แม้อุณหภูมิของน้ำจะสูงขึ้น อย่างไรก็ตามค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้ กลับมากกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดระดับน้ำในช่วงอุณหภูมิ 30- 45 องศาเซลเซียส สาเหตุก็เนื่องมาจาก เมื่อน้ำมีอุณหภูมิมากกว่า 45 องศา จะเกิดไอน้ำระเหยไปเกาะบนอิเล็กทรอนิกส์โทรดดังภาพประกอบ 2-56 ซึ่งวิธีการชดเชยค่าความผิดพลาด ไม่สามารถชดเชยผลกระทบที่เกิดจากไอน้ำได้ ค่าระดับน้ำจึงมีการแกว่งของข้อมูลตามปริมาณไอน้ำที่เกาะบนอิเล็กทรอนิกส์โทรด



ภาพประกอบ 2-56 ไอน้ำที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำร้อนมีอุณหภูมิมากกว่า 45 องศาเซลเซียส

2.4.14 ทดลองวิธีการลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากระฟุ้งของน้ำ ด้วยวิธีการหาค่าเฉลี่ย

ทำการทดลองในถังน้ำ โดยใช้ระดับน้ำ 10 เซนติเมตรเป็นระดับน้ำอ้างอิงในการทดลอง และใช้ปั๊มน้ำขับเคลื่อนน้ำเพื่อจำลองสภาพการไหลดังภาพประกอบ 2-57 และผลจากขับเคลื่อนน้ำทำให้เกิดระฟุ้งที่ผิวของน้ำดังในภาพประกอบ 2-58 กำหนดให้หัววัดระดับน้ำทุกๆ 1 วินาที เป็นระยะเวลา 10 นาที แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยแบบต่างๆ

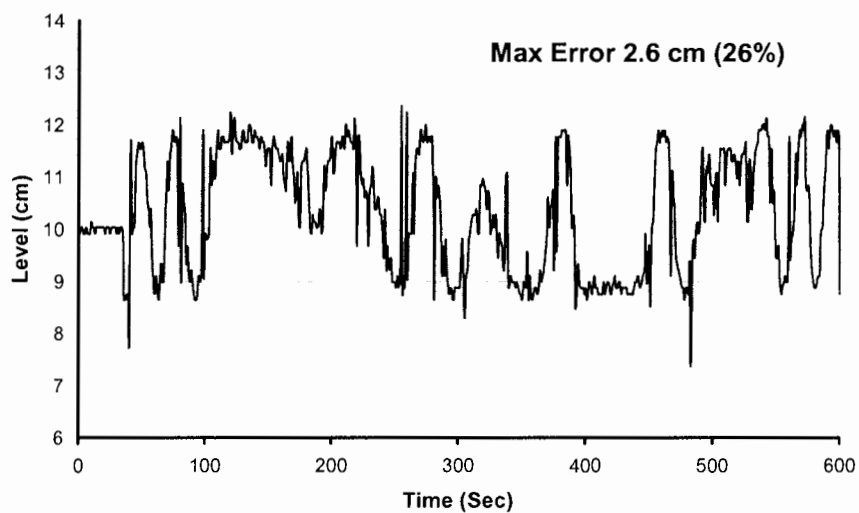


ภาพประกอบ 2-57 การจำลองสภาพการไหลของน้ำด้วยปั้มน้ำ

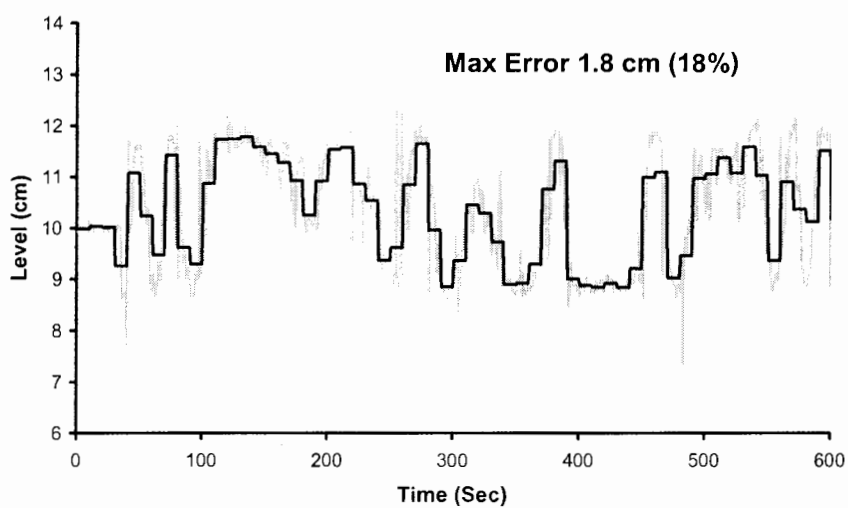


ภาพประกอบ 2-58 การกระเพื่อมของน้ำที่เกิดจากการจำลองการไหลด้วยปั้มน้ำ

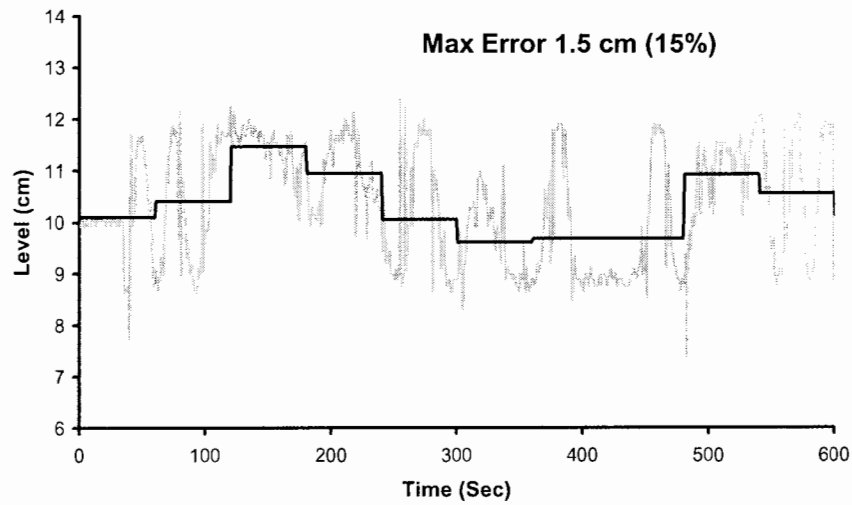
ผลการทดลองที่ได้จากการวัดระดับน้ำในสถานะที่จำลองการไหลแสดงได้ดังในภาพประกอบ 2-59 เมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยของระดับน้ำที่วัดได้จากหัววัด ในช่วงเวลา 10 วินาที 60 วินาที และ 600 วินาที แสดงได้ดังในภาพประกอบ 2-60, 2-61 และ 2-62 ตามลำดับ



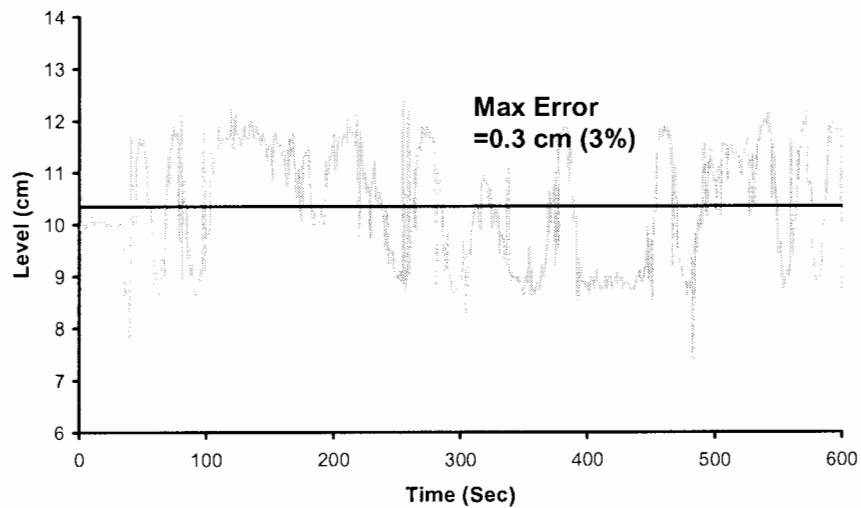
ภาพประกอบ 2-59 ผลการวัดระดับน้ำด้วยหัววัด ในสถานะที่มีการจำลองการไหลของน้ำ



ภาพประกอบ 2-60 ผลการเฉลี่ยค่าระดับน้ำที่วัดได้จากหัววัดทุก 10 วินาที



ภาพประกอบ 2-61 ผลการเฉลี่ยค่าระดับน้ำที่วัดได้จากหัววัดทุก 60 วินาที



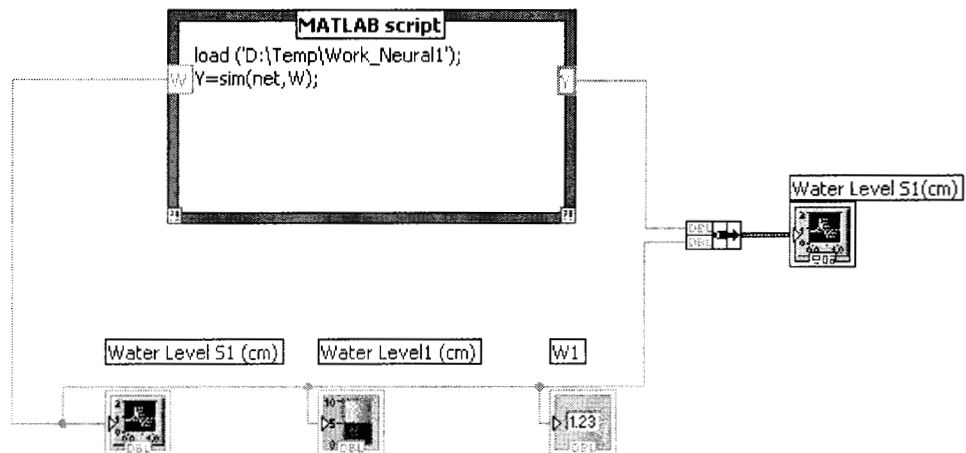
ภาพประกอบ 2-62 ผลการเฉลี่ยค่าระดับน้ำที่วัดได้จากหัววัดใน 600 วินาที

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า วิธีหาค่าเฉลี่ยจากระดับน้ำที่มีการกระเพื่อม เนื่องจากการไหลสามารถลดค่าความผิดพลาดได้ และยังมีการใช้จำนวนตัวอย่างในการคำนวณหาค่าเฉลี่ยมากค่าความผิดพลาดก็ยิ่งลดลง แต่ระยะเวลาที่ต้องใช้ในการเก็บค่าก็จะมากขึ้นตามไปด้วย

2.4.15 ทดลองวิธีการลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการกระเพื่อมของน้ำ ด้วยวิธีการใช้โครงข่ายประสาทเทียม

วิธีการทดลอง

1. นำโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้จากการสอนในโปรแกรม MATLAB ไปใส่ในโปรแกรม Labview เพื่อแสดงค่าระดับน้ำหลังผ่านการลดค่าความผิดพลาดด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ดังภาพประกอบ 2-63

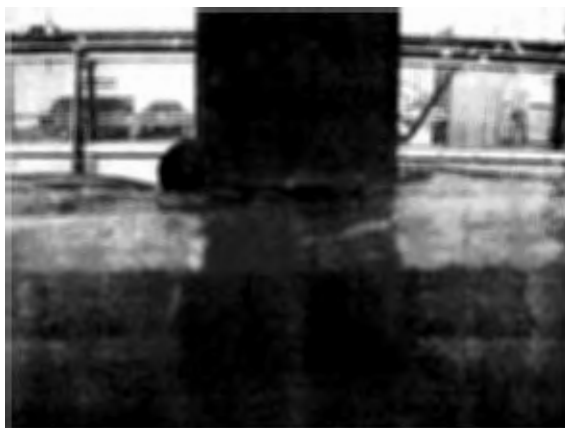


ภาพประกอบ 2-63 การใช้โครงข่ายประสาทเทียมใน Labview ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB

2. ติดตั้งหัววัดระดับน้ำในรางน้ำทดสอบที่มีการไหลของน้ำ ที่ระดับน้ำ 4 เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 2-64 และ 2-65

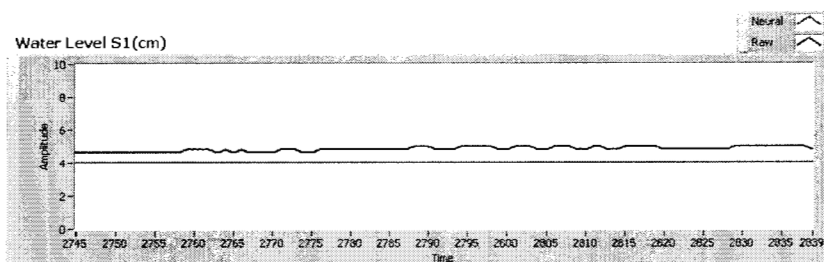


ภาพประกอบ 2-64 การจำลองสภาพการไหลแบบเปลี่ยนแปลงช้าในรางเปิด



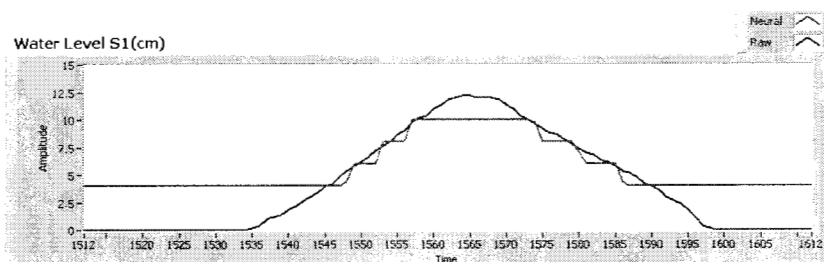
ภาพประกอบ 2-65 ลักษณะการกระเพื่อมของน้ำที่ไหลผ่านหัววัด

เมื่อเปรียบเทียบระดับน้ำที่วัดจริง กับระดับน้ำที่ผ่าน โครงข่ายประสาทเทียม มีผลการทดลองดังภาพประกอบ 2-66



ภาพประกอบ 2-66 ระดับน้ำที่วัดจริงด้วยหัววัด (บน) เปรียบเทียบกับ
ค่าระดับน้ำที่ผ่าน โครงข่ายประสาทเทียม (ล่าง)

3. ทดลองวัดระดับน้ำที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 ถึง 12.5 เซนติเมตร และลดระดับตั้งแต่ 12.5 ถึง 0 เซนติเมตรเปรียบเทียบระดับน้ำที่วัดได้จริงจากหัววัด กับระดับน้ำที่ผ่าน โครงข่ายประสาทเทียมแล้ว มีผลการทดลองดังภาพประกอบ 2-67

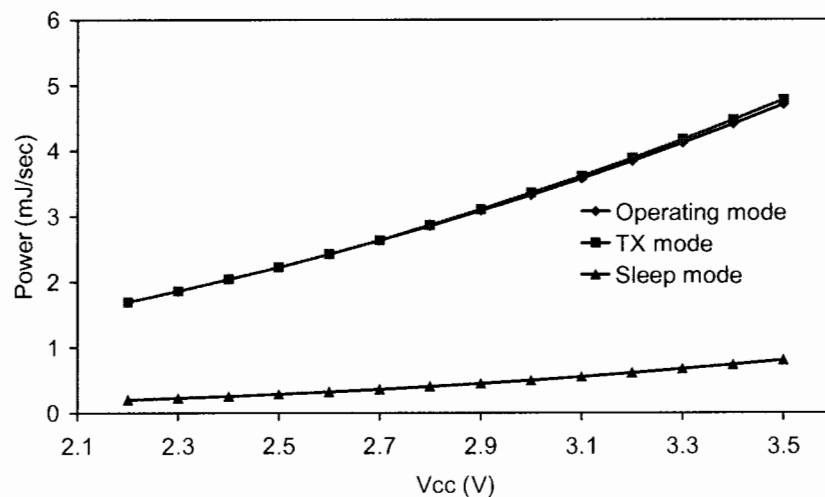


ภาพประกอบ 2-67 ระดับน้ำที่วัดจริงด้วยหัววัด (บน) เปรียบเทียบกับ
ค่าระดับน้ำที่ผ่าน โครงข่ายประสาทเทียม

ผลการทดลองพบว่า การใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) สามารถลดค่าการกระเพื่อมของน้ำได้จริง ดังภาพประกอบ 2-66 แต่ก็ต้องสูญเสียความละเอียดในการวัดของหัววัดไปด้วย (Resolution) ดังภาพประกอบ 2-67 เนื่องจากในการสอนโครงข่าย เราต้องใช้เอาท์พุทเป้าหมายจากค่าระดับจริง ซึ่งในที่นี้คือค่าระดับ 4, 6, 8 และ 10 เซนติเมตร ทำให้ค่าเอาท์พุทที่ได้จากโครงข่ายจะถูกจำกัดที่ระดับ 4, 6, 8 และ 10 เซนติเมตรด้วยเช่นกัน

2.4.16 การทดลองเพื่อหาอัตราการใช้พลังงาน

ทำการทดลองโดยวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหัววัด เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 2.2-3.5 โวลต์ โดยทำการวัดในโหมดการทำงานของวงจรควบคุมการทำงาน 3 โหมด คือ โหมดทำงานปกติ (Operating mode) ,โหมดส่งข้อมูล(TX mode) และ โหมดหยุดพัก (Sleep mode) มีระดับน้ำจริงขณะทดลองเท่ากับ 30 เซนติเมตร จากนั้นนำค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละโหมด มีผลการทดลองดังภาพประกอบ 2-68



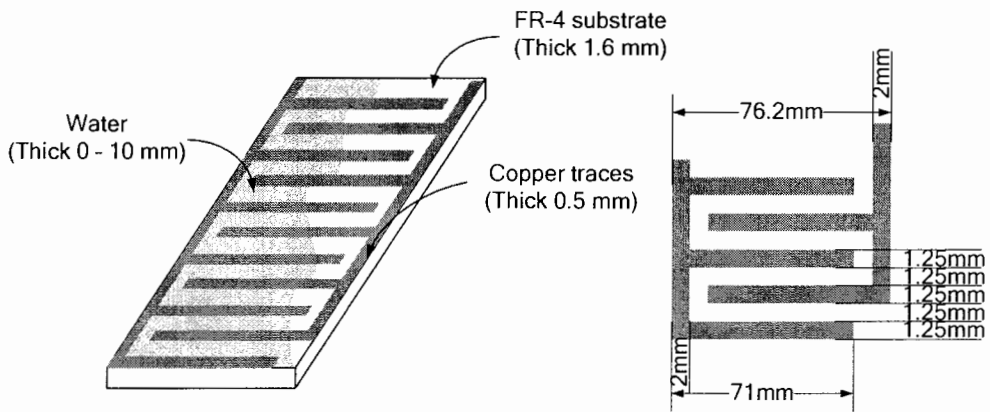
ภาพประกอบ 2-68 อัตราการใช้พลังงานของหัววัดในแต่ละโหมด ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า หัววัดมีอัตราการใช้พลังงานที่สอดคล้องกับระดับแรงดันของแหล่งจ่าย คือ อัตราการใช้พลังงานของหัววัดแปรผันตรงกับแหล่งจ่าย แต่มีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่ระดับแรงดัน 3.5 โวลต์ ซึ่งเป็นแรงดันสูงสุดสำหรับการทดลองนี้ หัววัดใช้พลังงานในโหมดทำงานปกติ (Operating mode) และโหมดส่งข้อมูล (TX mode) ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 4.7 mJ/Sec และในโหมดหยุดพัก (Sleep mode) หัววัดใช้พลังงาน 0.805 mJ/Sec ส่วนที่ระดับแรงดัน 2.2 โวลต์ซึ่งเป็นแรงดันต่ำสุดสำหรับการทดลองนี้ หัววัดใช้พลังงาน

ในโหมดปกติ และโหมดส่งข้อมูลเท่ากัน คือ 1.694 mJ/Sec และใน โหมดหยุดพักหัววัด ใช้พลังงาน 0.198 mJ/Sec

2.4.17 การจำลองการทำงานเพื่อหาขอบเขตสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาขอบเขตของสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความหนาของน้ำ โดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics จำลองการทำงานเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งกำหนดให้ความหนาของน้ำเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0-10 มิลลิเมตร, มีค่าไดอิเล็กตริกของน้ำเท่ากับ 80, มีขนาดและวัสดุสำหรับใช้จำลองการทำงานดังภาพประกอบ 2-69 และ 2-70

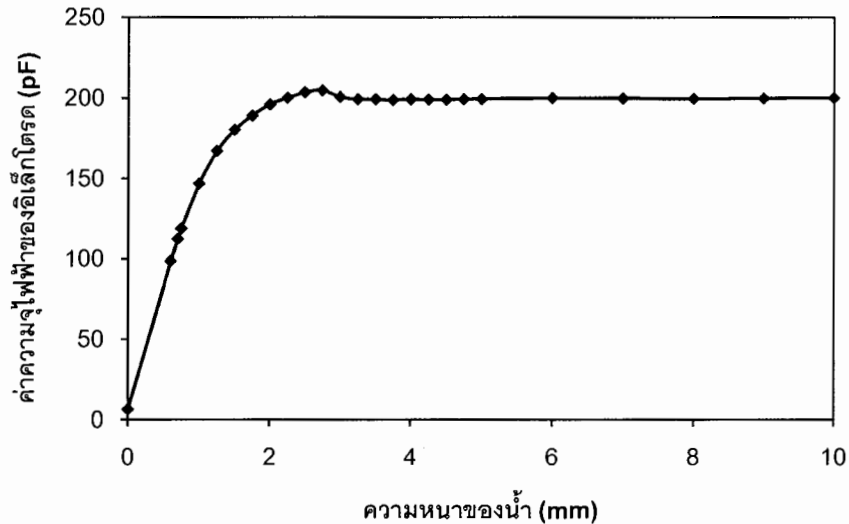


ภาพประกอบ 2-69 ขนาดและวัสดุของอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการหาขอบเขตของสนามไฟฟ้า



ภาพประกอบ 2-70 การจำลองการทำงานเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อความหนาของน้ำมีค่าตั้งแต่ 0-10 มิลลิเมตร โดยใช้โปรแกรม COMSOL

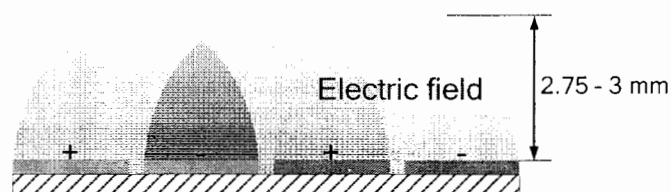
ผลจากการจำลองการทำงาน จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดกับความหนาของน้ำค้างภาพประกอบ 2-71



ภาพประกอบ 2-71 ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรด
เมื่อความหนาของน้ำที่สัมผัสอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น 0-10 มิลลิเมตร

ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า เมื่อความหนาของน้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 0 ถึง 2.75 มิลลิเมตร ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อความหนาของน้ำมากกว่า 2.75 มิลลิเมตร ค่าความจุไฟฟ้ากลับลดลงและเริ่มคงที่ไม่เพิ่มตามความหนาของน้ำที่สัมผัสอิเล็กโทรดอีก โดยจุดที่ค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดคือจุดที่น้ำมีความหนาเท่ากับ 2.75 มิลลิเมตร และค่าความจุไฟฟ้าจะเริ่มคงที่เมื่อน้ำมีความหนาดั้งแต่ 3 มิลลิเมตรเป็นต้นไป

จากภาพประกอบ 2-71 จะเห็นได้ว่า เมื่อความหนาของน้ำเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง (ในที่นี้คือ 3 มิลลิเมตร) ค่าความจุไฟฟ้าของอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กโทรดจะเริ่มคงที่ แสดงว่าขอบเขตของสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กโทรดนี้ มีขอบเขตห่างจากอิเล็กโทรดประมาณ 2.75 – 3 มิลลิเมตรดังภาพประกอบ 2-72

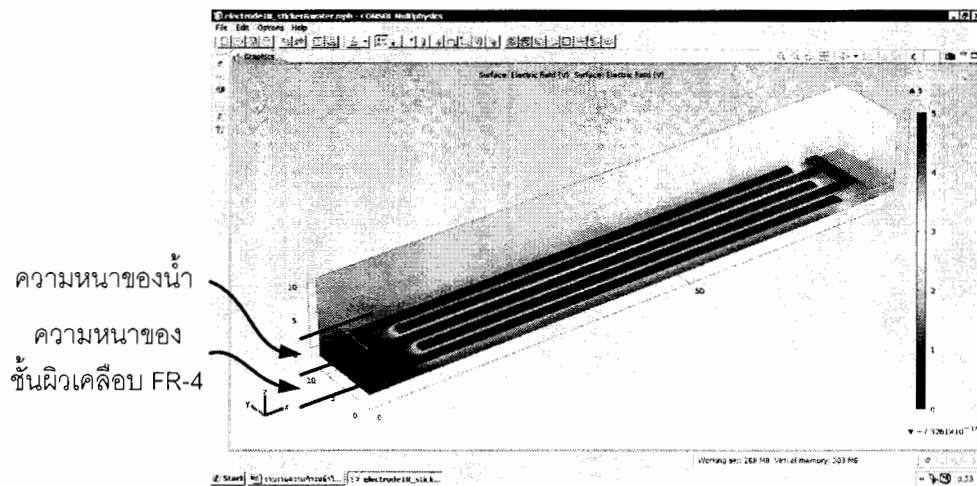


ภาพประกอบ 2-72 ระยะเวลาขอบเขตสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กโทรด

2.4.18 การจำลองการทำงานเพื่อศึกษาผลกระทบจากความหนาของผิวเคลือบ

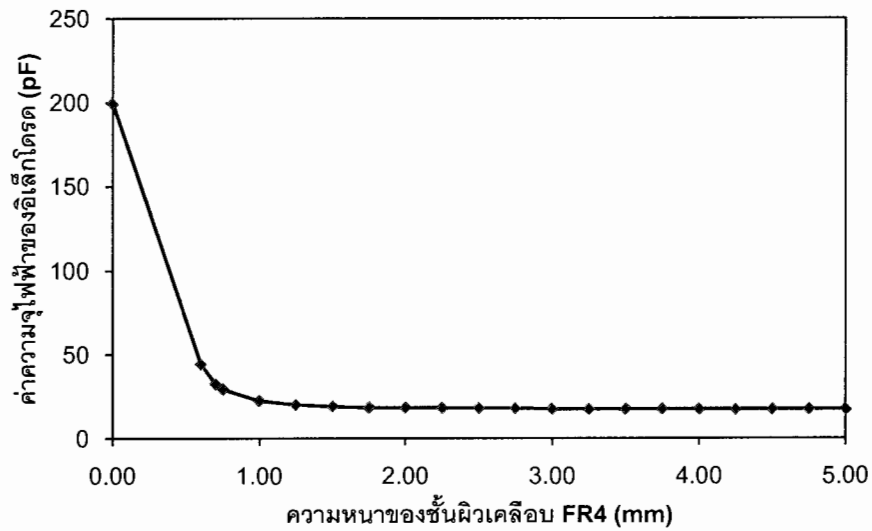
เนื่องจากอินเตอร์ดิคัลที่ใช้วัฏระดบน้ำนี้ ต้องเคลือบสายทองแดงทั้งหมดด้วย ฉนวนไฟฟ้าเพื่อป้องกันการกัดกร่อนและการลัดวงจร การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการวัฏระดบน้ำของอินเตอร์ดิคัลอิเล็กโตรดกับความหนาของฉนวนเคลือบ โดยใช้วิธีจำลองการทำงาน

ในการจำลองการทำงาน กำหนดให้ความหนาของน้ำที่สัมผัสอิเล็กโตรดมีค่าคงที่เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าไดอิเล็กตริกของน้ำเท่ากับ 80 และมีความหนาของชั้นผิวเคลือบเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0-5 มิลลิเมตร วัสดุของชั้นเคลือบผิวคือ FR-4 ซึ่งมีค่าไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.5 มีลักษณะโครงสร้างของอิเล็กโตรดทั้งหมดดังภาพประกอบ 2-73

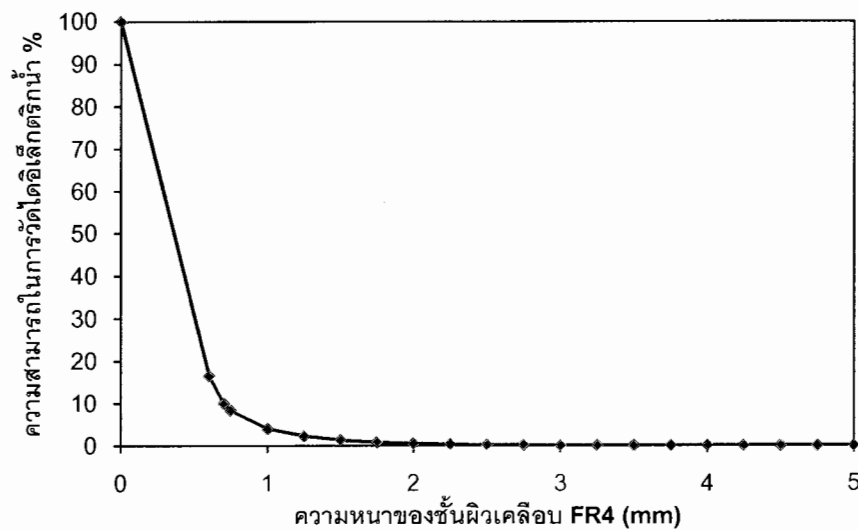


ภาพประกอบ 2-73 โครงสร้างของอิเล็กโตรดที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

ผลจากการจำลองการทำงานจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของอินเตอร์ดิคัลอิเล็กโตรดกับความหนาของชั้นผิวเคลือบ ดังภาพประกอบ 2-74 และเมื่อนำมาหาค่าความสามารถในการวัฏระดบน้ำของอิเล็กโตรดจะมีความสัมพันธ์กับความหนาของชั้นผิวเคลือบดังภาพประกอบ 2-75



ภาพประกอบ 2-74 ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลดลงเมื่อความหนาของชั้นผิวเคลือบเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 2-75 อิเล็กโตรดมีความสามารถในการวัดไดอิเล็กตริกของน้ำลดลงเมื่อความหนาของชั้นผิวเคลือบเพิ่มขึ้น

ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า เมื่อความหนาของชั้นผิวเคลือบที่เป็นวัสดุ FR-4 เพิ่มขึ้น ความสามารถในการวัดระดับน้ำของอิเล็กโตรดจะลดลง และเมื่อความหนาของชั้นผิวเคลือบเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง (ในที่นี้คือ 3 มิลลิเมตร) อิเล็กโตรดจะไม่สามารถวัดไดอิเล็กตริกน้ำได้อีกเลย

จากการศึกษาคุณลักษณะของสนามไฟฟ้าของอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กโตรด ด้วยวิธีการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics สามารถสรุปได้ 2 ประเด็น คือ

1) สunami ไฟฟ้าที่เกิดจากอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขอบเขตจำกัด กล่าวคือ อิเล็กทรอนิกส์ที่มีซี่ของลายวงจรกว้าง 1.25 มิลลิเมตร และมีระยะห่างระหว่างซี่ 1.25 มิลลิเมตร จะมีการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าเหนือลายวงจรไม่เกิน 3 มิลลิเมตร

2) การเคลือบผิวตัวนำด้วยวัสดุที่มีค่าไดอิเล็กตริกต่ำกว่าน้ำ จะทำให้ความสามารถในการวัดระดับน้ำของอิเล็กทรอนิกส์ตกลงเป็นอย่างมาก และไม่สามารถวัดระดับน้ำได้เลยหากความหนาของชั้นผิวเคลือบมากกว่าระยะแพร่กระจายของสนามไฟฟ้า

บทที่ 3

เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

ในอนาคตมนุษย์และเครื่องจักร (Human and machine) จะมีความต้องการรับรู้สถานะแวดล้อมรอบตัวในรูปแบบเวลาจริง (Real time) เพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สามารถปรับตัวได้อย่างเหมาะสมกับสถานะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป ลดความสูญเสียชีวิตและทรัพย์สิน เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต และอำนวยความสะดวกในการดำรงชีวิตประจำวัน ตัวอย่างเช่น ระบบป้องกันก่อนการเกิดอุบัติเหตุ ที่สามารถพยากรณ์เหตุการณ์ร้ายแรงได้จากการวิเคราะห์สถานะแวดล้อมรอบตัว แล้ววางแผนป้องกันอุบัติเหตุได้อย่างแม่นยำ หรือระบบป้องกันศัตรูพืชในการเกษตร ที่สามารถตรวจจับการเกิดโรคและแมลงได้ตั้งแต่เบื้องต้น แล้วปล่อยสารเคมียับยั้งก่อนที่จะเกิดการแพร่ระบาดออกไปบริเวณอื่น ซึ่งช่วยลดการใช้สารเคมีได้เป็นอย่างมาก

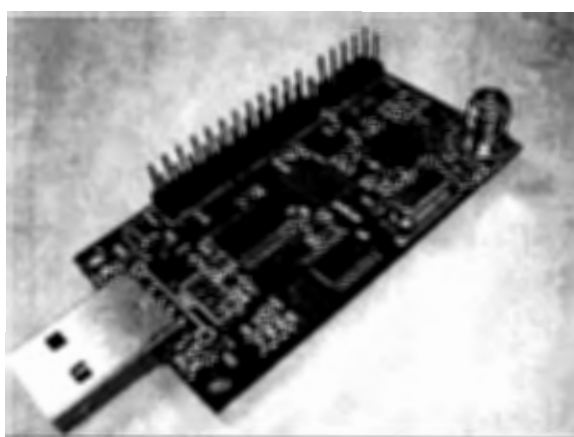
การที่ระบบดังกล่าวจะรับรู้สถานะแวดล้อมได้อย่างทั่วถึง จำเป็นต้องมีข้อมูลทางกายภาพที่ได้จากการวัดด้วยเซนเซอร์ซึ่งถูกติดตั้งไว้ครอบคลุมทั่วพื้นที่เป้าหมายเกิด ในกรณีเป็นพื้นที่ภายในอาคาร การใช้เซนเซอร์เชื่อมต่อสื่อสารผ่านสายยังคงมีความน่าเชื่อถือและตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้เป็นอย่างดี แต่หากเป็นการใช้งานภายนอกอาคารซึ่งมีบริเวณกว้าง ไม่มีระบบไฟฟ้าและแหล่งพลังงานทดแทนอื่นๆ เช่น การใช้งานในป่ารกทึบ หรือการใช้งานใต้ทะเลที่การส่งข้อมูลและจ่ายพลังงานให้กับเซนเซอร์ผ่านทางสายเป็นสิ่งที่ไม่ได้ยากลำบากทั้งในด้านเทคนิคและความคุ้มค่าในการลงทุน ดังนั้น จึงมีการศึกษาวิจัยเพื่อสร้างเซนเซอร์ไร้สายที่ใช้งานง่าย ขนาดเล็ก และมีราคาถูก สามารถใช้งานได้ทุกสถานที่ โดยไม่ต้องบำรุงรักษาหรือเปลี่ยนพลังงานใหม่ตลอดอายุการใช้งาน [32]

ในการใช้งานเซนเซอร์ไร้สายจะถูกติดตั้งในพื้นที่เป็นจำนวนมาก จนสามารถสร้างเครือข่ายสื่อสารขนาดใหญ่ขึ้นมาเป็นของตนเองได้ เรียกเครือข่ายสื่อสารนี้ว่า “เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless sensor networks)” และเรียกอุปกรณ์ไร้สายที่ทำงานในเครือข่ายนี้ว่า “เซนเซอร์โหนด (Sensor node)”

3.1 การพัฒนาโมดูลเซนเซอร์ไร้สาย Unode

โมดูลเซนเซอร์ไร้สาย Unode ออกแบบและพัฒนาโดยห้องปฏิบัติการวิจัยร่วมเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ มีพื้นฐานการพัฒนาจาก Tmote sky [32] ของมหาวิทยาลัย Berkeley มีส่วนอุปกรณ์หลักประกอบด้วยไอซี

CC2420 ซึ่งทำหน้าที่ในส่วนรับ-ส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุย่านความถี่ 2.4 GHz มาตรฐาน IEEE 802.15.4 และส่วนควบคุมการทำงานโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MSP430f1611 ในส่วนของการแสดงสถานะการทำงาน จะประกอบด้วยหลอดแอลอีดีจำนวน 2 หลอดสำหรับแสดงสถานะของแหล่งจ่ายไฟ และสถานะการส่งข้อมูล นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ไอซีประกอบอื่นๆ เช่น Isolating USB form microcontroller , USB to microcontroller , USB flash memory, Code Flash memory รองรับการใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าใช้งานได้ตั้งแต่ 2.1-3.6 โวลต์ มีลักษณะดังภาพประกอบ 3-1 และมีคุณสมบัติเบื้องต้นดังตารางที่ 3-1



ภาพประกอบ 3-1 ลักษณะโมดูลเซนเซอร์ไร้สาย Unode

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติของเซนเซอร์ไร้สาย Unode

คุณสมบัติ	ค่าคุณสมบัติ
โมดูลเซนเซอร์ไร้สาย	Unode Version 2
ความถี่วิทยุ	2.4 GHZ
กำลังส่งสูงสุด	1 mW
มาตรฐานการสื่อสารไร้สาย	IEEE 802.15.4
อัตราการรับ-ส่งข้อมูลออกอากาศ	250 kps
ระดับแรงดันไฟฟ้าทำงาน	2.1 – 3.6 โวลต์
อัตราการใช้พลังงาน	Operating Mode: 63.58 mJ/Sec @Vcc 3 V TX Mode: 80.35 mJ/Sec @Vcc 3 V

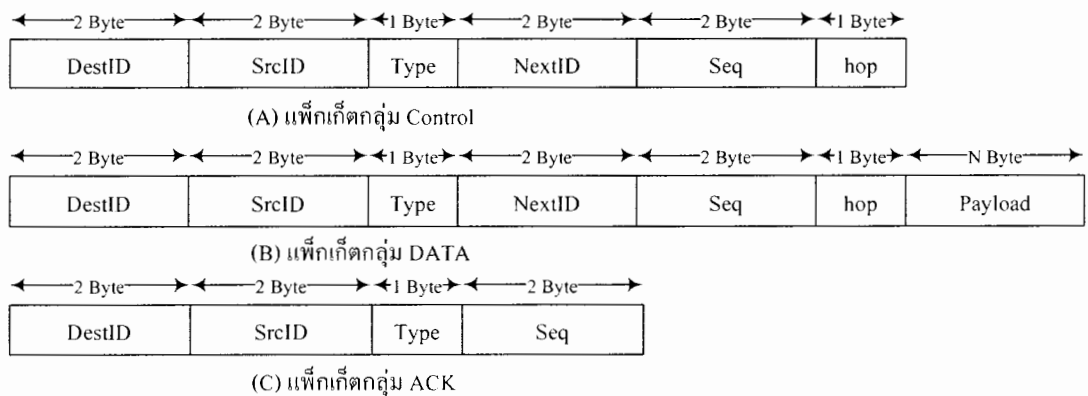
3.2 การพัฒนาโพรโทคอลการสื่อสารแบบไร้สาย

โพรโทคอลที่ได้ออกแบบและพัฒนา มีความสามารถในการค้นหาเส้นทาง การติดต่อสื่อสาร แล้วทำการรับส่งข้อมูล ตรวจสอบเส้นทางและบำรุงรักษาเส้นทางในการติดต่อสื่อสารให้สามารถใช้งานได้ โพรโทคอลที่ออกแบบจะมีรูปแบบของแพ็กเก็ตอยู่ด้วยกัน 4 รูปแบบ คือ แพ็กเก็ต Route Request (RREQ) แพ็กเก็ต Route Reply (RREP) แพ็กเก็ต DATA และแพ็กเก็ต ACK ใช้ในการตอบรับการได้รับแพ็กเก็ต DATA

การทำงานของโพรโทคอลเริ่มจากโหนดต้นทางที่สถานีฐาน จะทำการส่งแพ็กเก็ต RREQ ไปให้โหนดในเครือข่าย เพื่อเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทาง เมื่อโหนดใดได้รับแพ็กเก็ต RREQ แล้วจะทำการส่งแพ็กเก็ต RREP เพื่อตอบกลับ หลังจากนั้นโหนดแต่ละโหนดได้รับแพ็กเก็ต RREP แล้วจะจดจำเฉพาะโหนดเพื่อนบ้านไว้ในหน่วยความจำของโหนด โหนดแต่ละโหนดจะทราบถึงเส้นทางติดต่อถึงสถานีฐานผ่านโหนดที่ส่งแพ็กเก็ต RREP ตอบกลับไป ในการเลือกเส้นทางนั้น จะเลือกจากเส้นทางติดต่อสื่อสารถึงสถานีฐานจากความเร็วในการได้รับแพ็กเก็ต RREQ เข้ามา

3.2.1 รูปแบบของแพ็กเก็ต

ตามที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นแพ็กเก็ตในโพรโทคอลมี 4 รูปแบบ แต่สามารถจัดหมวดหมู่ได้ 3 กลุ่มได้แก่ กลุ่มแพ็กเก็ต Control มีขนาด 10 ไบต์ กลุ่มแพ็กเก็ต DATA มีขนาดขึ้นอยู่กับปริมาณข้อมูลในฟิลด์ข้อมูล Payload และกลุ่มแพ็กเก็ต ACK มีขนาด 7 ไบต์ ดังภาพประกอบ 3-2 ในแต่ละแพ็กเก็ตจะประกอบด้วยฟิลด์ข้อมูล ซึ่งรูปแบบการเรียงตัวของฟิลด์ข้อมูลจะแตกต่างกันตามกลุ่มที่จำแนกไว้ ความหมายและการทำงานของแต่ละฟิลด์ได้อธิบายไว้ในตารางที่ 3-2



ภาพประกอบ 3-2 รูปแบบแพ็กเก็ตในโพรโทคอล

ตารางที่ 3-2 การทำงานของฟิลด์ข้อมูล

ฟิลด์ข้อมูล	ขนาด(Byte)	การทำงาน
Type	1	ระบุชนิดของแพ็กเก็ต 0x01 : RREQ 0x02 : RREP 0x03 : DATA 0x04 : ACK
DestID	2	หมายเลขโหนดปลายทาง (กำหนด 0xFFFF ในกรณี ส่งแบบกระจาย (broadcast))
SrcID	2	หมายเลขโหนดต้นทาง
NextID	2	หมายเลขโหนดถัดไป
seq	2	ลำดับหมายเลขแพ็กเก็ต
hop	1	จำนวนที่แพ็กเก็ตถูกส่งต่อ (ค่าโดยปริยาย เท่ากับ 5)
Payload	N	ข้อมูลจากตัวตรวจวัด (สูงสุด 20 ไบต์)

แพ็กเก็ตในแต่ละกลุ่มจะมีฟิลด์ข้อมูลที่เหมือนกันคือ ฟิลด์ข้อมูล “Type” บอกชนิดการทำงานของแพ็กเก็ตซึ่งมีขนาด 1 ไบต์ ฟิลด์ข้อมูล “DestID” บอกถึงหมายเลขโหนดปลายทาง แต่ถ้ามีค่า 0xFFFF หมายถึงมีการส่งแบบกระจาย มีขนาด 2 ไบต์ ฟิลด์ข้อมูล “SrcID” บอกถึงหมายเลขโหนดต้นทาง มีขนาด 2 ไบต์ และฟิลด์ข้อมูล “seq” บอกถึงลำดับของหมายเลขแพ็กเก็ต แต่แพ็กเก็ตแต่ละกลุ่มมีฟิลด์ข้อมูลในการทำงานที่ต่างกันดังนี้

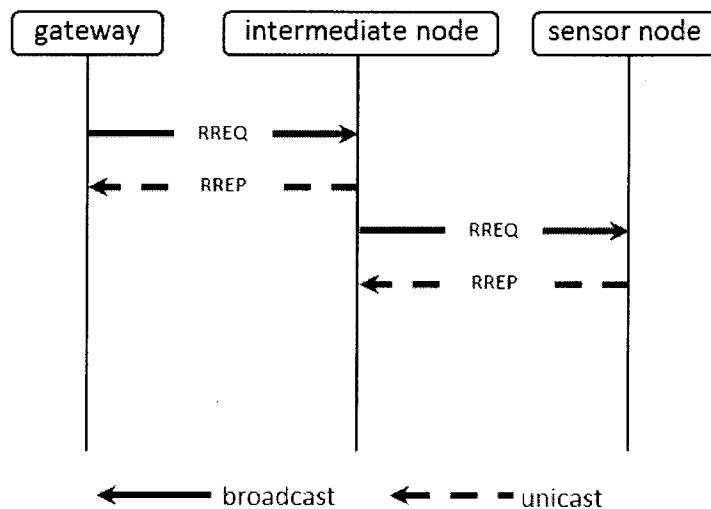
แพ็กเก็ตกลุ่ม CONTROL ในภาพประกอบ 3-2 (A) มีหน้าที่ทำงาน 2 หน้าที่คือ Route Requests (RREQ) ทำหน้าที่ค้นหาเส้นทาง และ Route Reply (RREP) ทำหน้าที่ตอบรับการค้นหาเส้นทาง โดยพิจารณาจากฟิลด์ข้อมูล Type เพื่อบอกถึงการทำงานของแพ็กเก็ต ฟิลด์ข้อมูล Type มีค่าเท่ากับ 0x01 หมายถึงแพ็กเก็ต RREQ แต่ถ้าฟิลด์ข้อมูล Type มีค่าเท่ากับ 0x02 หมายถึงแพ็กเก็ต RREP

แพ็กเก็ตกลุ่ม DATA ในภาพประกอบ 3-2 (B) มีหน้าที่ส่งข้อมูลออกจากโหนดให้กับโหนดรอบข้าง หรือโหนดปลายทาง รูปแบบแพ็กเก็ต DATA มีฟิลด์ข้อมูล Payload เพิ่มขึ้น โดยขนาดของฟิลด์ข้อมูลขึ้นอยู่กับขนาดของข้อมูล สามารถปรับเปลี่ยนได้ ขนาดข้อมูลมีได้มากที่สุดที่ 20 ไบต์

แพ็กเก็ตกลุ่ม ACK ในภาพประกอบ 3-2 (C) มีหน้าที่ในการตอบรับให้โหนด เพื่อเป็นการยืนยันว่าได้รับแพ็กเก็ต DATA ที่ส่งมาจากโหนดรอบข้าง

3.2.2 การกำหนดค่าเริ่มต้น (initial setup)

การกำหนดค่าเริ่มต้นของโพรโทคอลสามารถอธิบายได้ดังภาพประกอบ 3-3 โหนด gateway ส่งกระจายแพ็กเก็ต RREQ ให้กับโหนดในเครือข่าย เมื่อโหนดได้รับแพ็กเก็ต RREQ โหนดจะทำการบันทึกหมายเลขลำดับแพ็กเก็ตไว้เพื่อนำหมายเลขลำดับแพ็กเก็ตเข้ามาช่วยในการตรวจสอบแพ็กเก็ตข้อมูลซ้ำซ้อนหรือไม่ ถ้าแพ็กเก็ต RREQ นั้นเคยได้รับแล้ว จะทำการรีเซ็ตแพ็กเก็ต RREQ ทิ้ง ถ้าไม่เคยได้รับแพ็กเก็ต RREQ โหนดบันทึกข้อมูลของโหนดต้นทางไว้ และทำการส่งแพ็กเก็ต RREP ให้กับโหนดต้นทางที่ส่งแพ็กเก็ต RREQ มาให้ และทำการส่งกระจายแพ็กเก็ต RREQ ให้กับโหนดรอบข้างโดยมีการแก้ไขแพ็กเก็ตในฟิลด์ข้อมูล hop จะทำการลดค่าลง 1 เพื่อช่วยป้องกันแพ็กเก็ตส่งซ้ำอยู่ในเครือข่าย

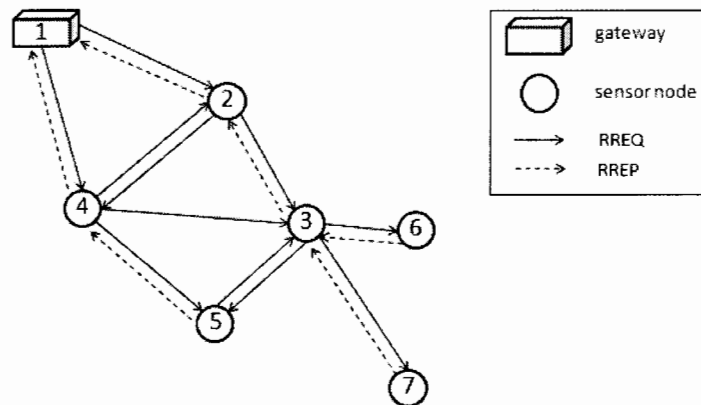


ภาพประกอบ 3-3 รูปแบบการเริ่มต้นการค้นหาเส้นทาง

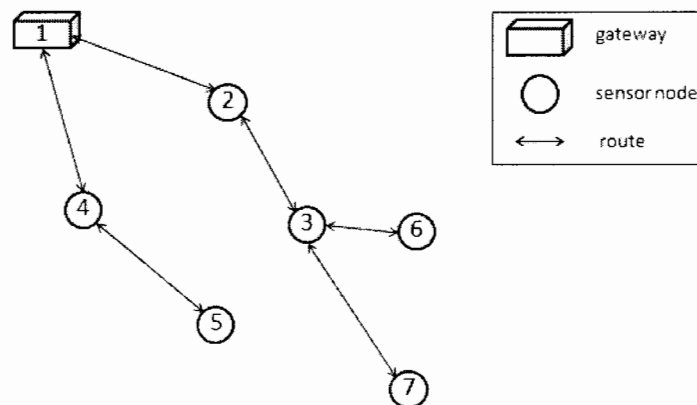
การที่โหนดได้รับแพ็กเก็ต RREP ตอบรับกลับมาแสดงว่าได้เลือกโหนดนี้เป็นเส้นทางในการติดต่อถึงโหนด gateway ดังนั้นจะมีการบันทึกหมายเลขของโหนดรอบข้างที่ตอบ RREP กลับมาไว้ในหน่วยความจำของโหนดนั้นๆ

ตัวอย่างในภาพประกอบ 3-4 โหนดหมายเลข 2 ได้รับแพ็กเก็ต RREQ จากโหนดหมายเลข 1 เมื่อโหนด 2 ส่งแพ็กเก็ต RREP ให้กลับโหนดหมายเลข 1 แสดงว่าโหนดหมายเลข 2 เลือกโหนดหมายเลข 1 เป็นเส้นทางในการติดต่อถึงโหนด gateway แล้วจึงทำการกระจายแพ็กเก็ต RREQ ให้กับโหนดรอบข้างในเครือข่าย เมื่อโหนดหมายเลข 3 ส่งแพ็กเก็ต RREP ให้กลับโหนด 2

แสดงว่าโหนดหมายเลข 3 เลือกโหนดหมายเลข 2 เป็นเส้นทางในการติดต่อถึงโหนด gateway ในภาพประกอบ 3-5 โหนดในเครือข่ายได้สร้างเส้นทางในการเชื่อมต่อกันถึงโหนด gateway ได้โดยมีเส้นทางในเครือข่ายดังนี้ 1-2-3-6, 1-2-3-7 และ 1-4-5



ภาพประกอบ 3-4 โหนด gateway ทำการกระจายแพ็กเก็ตให้กับโหนดรอบข้าง

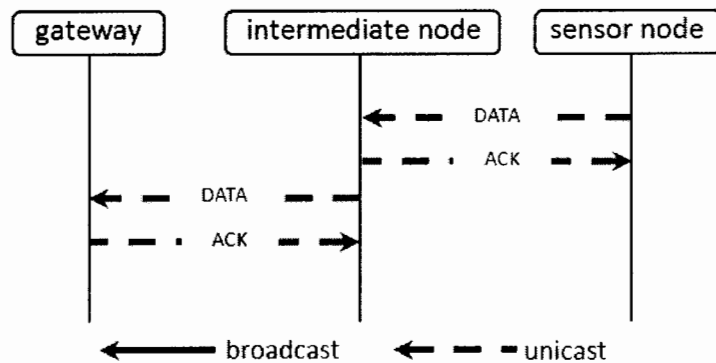


ภาพประกอบ 3-5 โหนดมีเส้นทางติดต่อกับโหนด gateway

3.2.3 การรับส่งข้อมูล (data collection)

การรับส่งข้อมูลจะเริ่มทำงานหลังจากการกำหนดค่าเริ่มต้นสำเร็จ เมื่อโหนด gateway ได้รับทราบเส้นทางของการเชื่อมต่อของเครือข่ายทั้งหมดแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการส่งข้อมูลตามเส้นทางที่ได้เลือกกลับมาถึงโหนด gateway โดยจะเริ่มต้นจากโหนดที่เก็บข้อมูลจากตัวตรวจวัด (sensor) โหนดทำการสร้างแพ็กเก็ต DATA เพื่อส่งข้อมูลไปให้กับโหนด gateway ในแพ็กเก็ต DATA จะทำการระบุหมายเลขโหนดที่ช่วยในการส่งให้กับโหนด gateway จากการกำหนดค่า

เริ่มต้นของโพรโทคอล นี้คือ โหนดกลาง (intermediate node) หลังจากที่โหนดกลางได้รับแพ็กเก็ต DATA โหนดกลางจะส่งแพ็กเก็ต ACK ให้กับโหนดที่ส่งแพ็กเก็ตเข้ามา เพื่อเป็นการยืนยันว่าได้รับแพ็กเก็ต DATA แล้ว หลังจากนั้นโหนดกลางจะทำการส่งแพ็กเก็ต DATA ให้กับโหนด gateway เมื่อโหนด gateway ได้รับแพ็กเก็ต DATA โหนด gateway จะส่งแพ็กเก็ต ACK ให้กับโหนดกลางเพื่อเป็นการยืนยันการได้รับแพ็กเก็ต



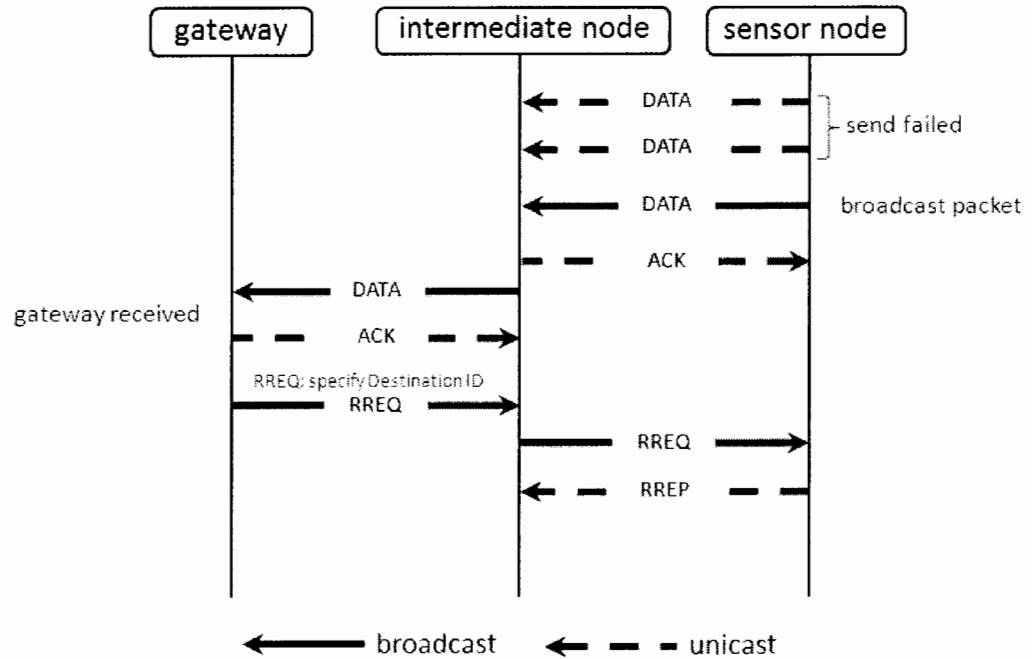
ภาพประกอบ 3-6 รูปแบบการรับส่งข้อมูลของโหนด

3.2.4 การบำรุงรักษาเส้นทาง (maintenance)

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการรักษาเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโหนด gateway กับโหนดต่างๆในเครือข่าย โหนด gateway จะทำการตรวจสอบเส้นทางว่าเกิดความเสียหายหรือไม่ โดยสามารถตรวจสอบความเสียหายของเส้นทางได้จากช่วงเวลาที่โหนดทำการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของตัวตรวจวัดกลับมายังโหนด gateway โดยทำการตรวจสอบจากแพ็กเก็ต DATA ที่โหนดส่งเข้ามาดังภาพประกอบ 3-6

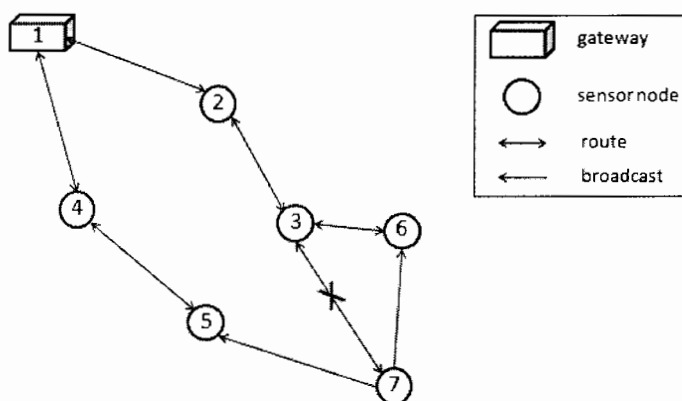
หากข้อมูลที่โหนดส่งถึงโหนด gateway ได้รับแพ็กเก็ต ACK ตอบกลับมาแสดงว่าการส่งข้อมูลสมบูรณ์ แต่ถ้าเกิดการส่งไม่สมบูรณ์ดังภาพประกอบ 3-7 โหนดจะส่งแพ็กเก็ต DATA แล้วไม่ได้รับแพ็กเก็ต ACK กลับมารอบที่ 1 โหนดจะส่งแพ็กเก็ตซ้ำรอบที่ 2 แต่ยังไม่ได้รับแพ็กเก็ต ACK กลับมา โหนดทำการเปลี่ยนหมายเลขโหนดปลายทางเป็น 0xFFFF เพื่อส่งกระจาย (broadcast) ให้โหนดรอบข้าง (intermediate node) ช่วยส่งแพ็กเก็ต DATA ให้กับโหนด gateway เมื่อโหนดรอบข้างได้รับแพ็กเก็ต DATA จะส่งแพ็กเก็ต ACK ให้กับโหนดต้นทางรับทราบ และโหนดรอบข้างจะส่งแพ็กเก็ต DATA ที่ได้รับมาให้กับโหนด gateway เมื่อโหนด gateway พบว่าแพ็กเก็ต DATA ที่เข้ามามีหมายเลขโหนดปลายทาง 0xFFFF ทำให้รู้ว่าเส้นทางเชื่อมต่อของโหนดต้นทางมีปัญหา โหนด gateway จะส่งแพ็กเก็ต RREQ โดยมีการระบุหมายเลขโหนดต้นทาง

เป็นหมายเลขโหนดปลายทาง เมื่อโหนดได้รับแพ็กเก็ต RREQ ที่มีการระบุหมายเลขโหนดปลายทางเป็นหมายเลขของตัวเอง โหนดจะทำการส่งแพ็กเก็ต RREP ให้กับโหนดที่ส่งแพ็กเก็ต RREQ มาให้เพื่อเป็นการเลือกเส้นทางในการเชื่อมต่อกับโหนด gateway ได้



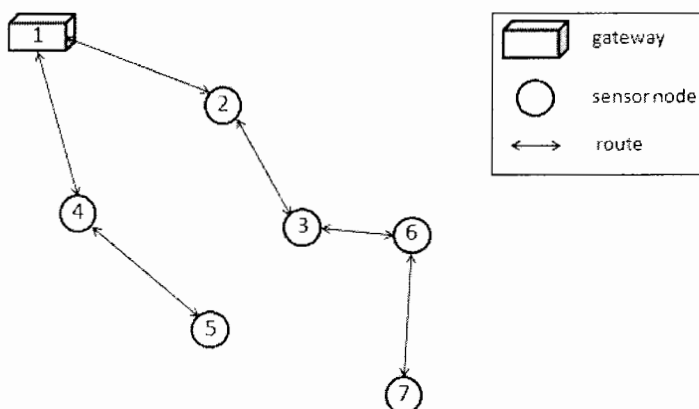
ภาพประกอบ 3-7 รูปแบบการบำรุงรักษาเส้นทางของโปรโตคอล

ตัวอย่างในภาพประกอบ 3-8 เส้นทางเดิมโหนดหมายเลข 7 เชื่อมต่อกับโหนดหมายเลข 3 เมื่อโหนดหมายเลข 7 ทำการส่งแพ็กเก็ต DATA ให้กับโหนดหมายเลข 3 แต่โหนดหมายเลข 7 ไม่ได้รับแพ็กเก็ต ACK กลับมาภายในช่วงเวลาที่กำหนดไว้ โหนดหมายเลข 7 จะทำการส่งแพ็กเก็ต DATA ซ้ำ แต่โหนดหมายเลข 7 ยังไม่ได้รับแพ็กเก็ต ACK จากโหนดหมายเลข 3 โหนดหมายเลข 7 ทำการเปลี่ยนหมายเลขโหนดปลายทางเป็น 0xFFFF ซึ่งเป็นรหัสบอกให้โหนด gateway ทราบว่าเกิดการเสียหายของเส้นทางในเครือข่าย



ภาพประกอบ 3-8 เส้นทางในเครือข่ายเกิดการเสียหาย

เมื่อโหนด gateway ได้รับแพ็กเก็ต DATA แล้วตรวจสอบว่าแพ็กเก็ตที่ได้รับมานั้นเป็นการส่งกระจายแพ็กเก็ตเข้ามา และหมายเลขโหนดปลายทางเป็น 0xFFFF ทำให้รู้ว่าเส้นทางในการเชื่อมต่อกันระหว่างโหนดกับโหนด gateway นั้นเสียหาย ดังนั้นโหนด gateway จะทำการแก้ไขเส้นทางที่เสียหายโดยการส่งแพ็กเก็ต RREQ ออกไปให้กับโหนดโดยทำการระบุ หมายเลขโหนดปลายทางเป็นโหนดหมายเลข 7 หลังจากที่โหนด gateway ส่งแพ็กเก็ต RREQ ให้กับโหนดหมายเลข 7 เมื่อโหนดหมายเลข 7 ได้รับจะส่งแพ็กเก็ต RREP ให้กับโหนดที่ส่งแพ็กเก็ต RREQ เพื่อเลือกโหนดนั้นเป็นเส้นทางในการเชื่อมต่อถึงโหนด gateway ทำให้เครือข่ายมีการซ่อมแซมเส้นทางบางส่วนทำให้เกิดการเชื่อมต่อใหม่อีกครั้งดังภาพประกอบ 3-9 เส้นทางมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเส้นทางเดิมคือ 1-2-3-7 เป็น 1-2-3-6-7

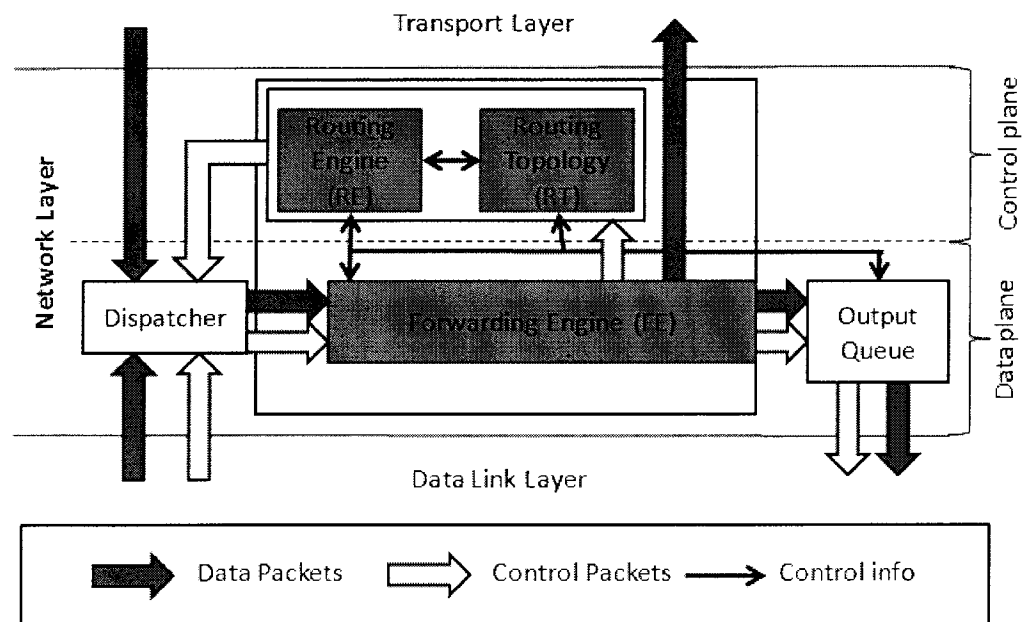


ภาพประกอบ 3-9 เส้นทางใหม่ในเครือข่ายในการติดต่อสื่อสาร

3.2.5 การพัฒนาโพรโทคอลบนระบบปฏิบัติการ TinyOS

จากภาพประกอบ 3-10 เป็นโครงสร้างลำดับชั้นของเครือข่ายบนระบบปฏิบัติการ TinyOS2.0 ที่เรียกว่า *modular network layer* ซึ่งออกแบบเน้นให้สะดวก ง่ายต่อการสร้างและพัฒนาโพรโทคอลตัวใหม่ โดยที่สามารถให้มีการนำโค้ดกลับมาใช้ใหม่ (code reuse) และใช้โมดูลเดิมที่มีอยู่ในการพัฒนาต่อ ช่วยลดระยะเวลาของการพัฒนาระบบ

สถาปัตยกรรมของเครือข่ายในชั้น Network เป็นส่วนการประมวลผลหลักของโพรโทคอล โดยทำหน้าที่สร้างและประมวลผลแพ็กเก็ตที่เข้ามาในโหนด รวมถึงการติดต่อสื่อสารกับโหนดในเครือข่าย และส่วนการจัดการข้อมูล ชั้น Network นี้แบ่งออกเป็น 2 ชั้นย่อยคือชั้นการควบคุม (control plane) และชั้นของการจัดการข้อมูล (data plane)



ภาพประกอบ 3-10 โครงสร้างลำดับชั้น network บนระบบปฏิบัติการ TinyOS2.0

ชั้นย่อยที่ทำหน้าที่ควบคุมประกอบด้วย 2 โมดูลหลักที่สำคัญคือ โมดูล Routing Engine (RE) และ โมดูล Routing Topology (RT) ซึ่งโมดูล RE ทำงานตามอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นเพื่อค้นหาเส้นทางร่วมกับโมดูล Routing Topology (RT) ควบคุมการส่งผ่านข้อมูลของโมดูล Forwarding Engine (FE) และควบคุมโมดูล Output Queue

ชั้นย่อยของการจัดการข้อมูลเป็นการไหลของข้อมูลที่ผ่านมาถึงชั้น Network ประกอบด้วย 1) โมดูล Dispatcher ใช้ทำการตรวจสอบ header ของแพ็กเก็ตข้อมูลและแพ็กเก็ตควบคุมที่มาจาก Network ทั้งชั้น Transport และ Data Link ตามลำดับ เมื่อทำการเพิ่ม header

เรียบร้อยแล้วจะจัดส่งเข้าสู่ 2) Forwarding Engine เป็นฟังก์ชันหนึ่งที่ทำให้บริการของโพรโทคอล ทำหน้าที่ในการเพิ่ม header ก่อนที่จะส่งผ่านข้อมูลออกไป หรือทำหน้าที่ส่งข้อมูลขึ้นไปยังชั้น Transport ในกรณีที่ แพ็กเก็ตถึงปลายทางเรียบร้อยแล้ว รายละเอียดการเพิ่มส่วน header นั้น ได้มาจากส่วนของ RE 3) โมดูล Output Queue จะทำหน้าที่จัดลำดับการส่งแพ็กเก็ตจากโหนด ในที่นี้สามารถนำอัลกอริทึมการทำ scheduling มาประยุกต์ใช้ใน โมดูลนี้

3.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

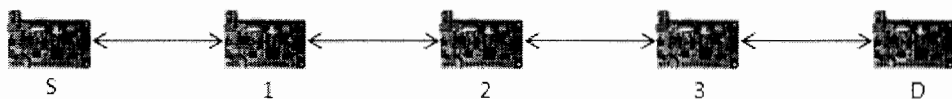
3.3.1 ประสิทธิภาพการทำงานของโพรโทคอล

การทดสอบประสิทธิภาพของโพรโทคอลจะแสดงถึงความสามารถและคุณสมบัติของโพรโทคอลที่ได้ทำการออกแบบและพัฒนาในที่นี้จะใช้การวัดประสิทธิภาพด้วยค่า Packet Delivery Ratio (PDR) ซึ่งจะทำการคำนวณจากอัตราส่วนร้อยละระหว่างจำนวนข้อมูลที่ได้รับกับจำนวนข้อมูลที่ส่ง สามารถสรุปเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$PDR = \frac{\#RX}{\#TX} \times 100 \quad (3-1)$$

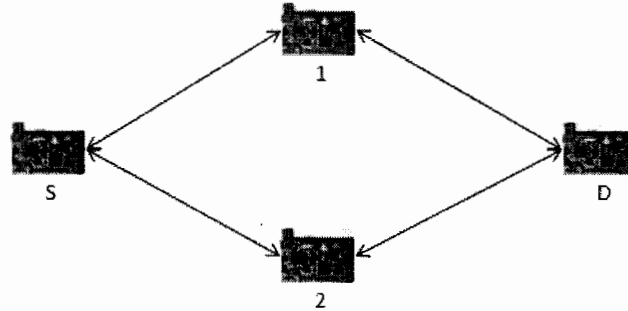
โดยที่ #RX คือ จำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับและ #TX คือ จำนวนแพ็กเก็ตที่ส่งออก ซึ่ง Packet Delivery Ratio ที่มีค่ามากจะหมายถึง โพรโทคอลที่ออกแบบและพัฒนาสามารถทำงานมีประสิทธิภาพดี การทดสอบขั้นต้นคือการวัดประสิทธิภาพของรูปแบบเครือข่ายที่แตกต่างกัน เพื่อตรวจสอบว่าโพรโทคอลที่ออกแบบไว้สามารถทำงานมีประสิทธิภาพอย่างไรในแต่ละสถานการณ์ รูปแบบของการจัดวางเครือข่ายเพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของโพรโทคอลนั้น กำหนดให้ S คือโหนดต้นทาง และ D คือโหนดปลายทาง สามารถกำหนดโครงสร้างเครือข่ายด้วยกัน 3 แบบคือ

1. โครงสร้างเครือข่ายแบบเรียงต่อกันจำนวน 4 hop ดังภาพประกอบ 3-11 ในโครงสร้างเครือข่ายแบบนี้จะใช้เพื่อทดสอบการทำงานของโหนดในกรณีที่มีเส้นทางในการติดต่อสื่อสารเพียงเส้นเดียว คือ S<-->1<-->2<-->3<-->D



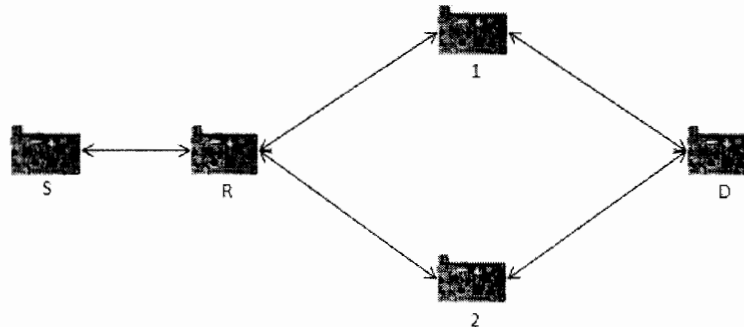
ภาพประกอบ 3-11 โครงสร้างเครือข่ายแบบเรียงต่อกันจำนวน 4 hop

2. โครงสร้างเครือข่ายแบบมี 2 ทางเลือก โดยที่แต่ละเส้นทางมีจำนวน 2 hop ดังภาพประกอบ 3-12 โครงสร้างเครือข่ายแบบนี้ใช้เพื่อทดสอบการเลือกสลับเส้นทางเมื่อเส้นทางใดเส้นทางหนึ่งได้รับความเสียหาย สรุปรูปการเชื่อมต่อได้ดังนี้ $S \leftrightarrow 1 \leftrightarrow D$ และ $S \leftrightarrow 2 \leftrightarrow D$



ภาพประกอบ 3-12 โครงสร้างเครือข่ายแบบมี 2 ทางเลือกแต่ละเส้นทางมีจำนวน 2 hop

3. โครงสร้างเครือข่ายแบบ 3 hop lollipop ดังภาพประกอบ 3-13 โครงสร้างเครือข่ายแบบนี้ถูกวางขึ้นเพื่อต้องการทดสอบการรับส่งข้อมูล 3 hop พร้อมทั้งให้เกิดการสลับเส้นทางเมื่อเกิดความเสียหายของเส้นทาง โดยสามารถสรุปรูปการเชื่อมต่อได้ดังนี้ $S \leftrightarrow R \leftrightarrow 1 \leftrightarrow D$ และ $S \leftrightarrow R \leftrightarrow 2 \leftrightarrow D$



ภาพประกอบ 3-13 โครงสร้างเครือข่ายแบบ 3 hop lollipop

รูปแบบการทดสอบหาค่า Packet Delivery Ratio มีด้วยกัน 3 สถานการณ์ดังนี้

1. โหนด S ส่งข้อมูลไปยังโหนด D เพียงตัวเดียว เรียกว่ารูปแบบการทดสอบที่ 1
2. โหนดทุกตัวส่งข้อมูลไปที่โหนด D พร้อมกัน เรียกว่ารูปแบบการทดสอบที่ 2
3. โหนดทุกตัวทำหน้าที่ส่งข้อมูลไปยังโหนด D ไม่พร้อมกัน โดยให้จำนวนการเริ่มส่งข้อมูลของแต่ละโหนดจากสมการด้านล่างนี้ เรียกว่ารูปแบบการทดสอบที่ 3

$$t_{start} = (5) \times (\#hop) \quad (3-2)$$

โหนด S จะทำการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลให้กับโหนด D 100 ครั้ง โดยที่ขนาดของข้อมูลหรือ Payload ที่ใช้ส่งนั้นมีขนาดเท่ากับ 4 Byte การทดสอบหาค่า PDR เลือกใช้โครงสร้างเครือข่ายทั้ง 3 แบบคือ โครงสร้างเครือข่ายแบบเรียงต่อกันจำนวน 4 hop โครงสร้างเครือข่ายแบบมีสองเส้นทางแต่ละเส้นทางมี 2 hop และโครงสร้างเครือข่ายแบบ 3 hop lollipop ตามรูปแบบการทดสอบที่ 1 ถึง 3 ได้ผลดังตารางที่ 3-3 พบว่ารูปแบบการทดสอบที่ 1 คือโหนด S ส่งข้อมูลไปยังโหนด D เพียงตัวเดียว ในรูปแบบการเชื่อมต่อแบบสองเส้นทางโดยแต่ละเส้นทางมี 2 hop ให้ค่า PDR ที่สุดที่ 99.2 เปอร์เซ็นต์ ตามด้วยโครงสร้างเครือข่ายแบบ 3 hop lollipop ที่ 98.4 เปอร์เซ็นต์ และโครงสร้างเครือข่ายแบบเรียงต่อกันจำนวน 4 hop มีค่าน้อยที่สุดที่ 97.7 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองพบโปรโตคอลที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในสถานการณ์ปกติ ไม่มีโหนดหลายตัวส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางในเวลาเดียวกัน

ตารางที่ 3-3 ค่า Packet Delivery Ratio ของรูปแบบการทดสอบที่ 1, 2 และ 3

โครงสร้างเครือข่าย	Packet Delivery Ratio (%)		
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3
เรียงต่อกันจำนวน 4 hop	97.7	84.5	94.5
สองเส้นทางแต่ละเส้นทางมี 2 hop	99.2	81.2	95.2
3 hop lollipop	98.4	80.7	94.6

สำหรับการทดสอบในรูปแบบที่ 2 ได้ค่า PDR ของโครงสร้างเครือข่ายแบบเรียงต่อกันจำนวน 4 hop โครงสร้างเครือข่ายแบบมีสองเส้นทางแต่ละเส้นทางมี 2 hop และโครงสร้างเครือข่ายแบบ 3 hop lollipop เป็น 84.5 เปอร์เซ็นต์ 81.2 เปอร์เซ็นต์ และ 80.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งลดลงจากสถานการณ์ในการทดสอบแบบที่ 1 ประมาณ 13 ถึง 18 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเป็นสถานการณ์ที่โหนดทุกตัวต่างส่งข้อมูลออกมาพร้อมกันในเวลาเดียวกันไปยังโหนดปลายทางหรือโหนด D เหตุการณ์เช่นนี้เกิดมาจากการชนกันของข้อมูล เพราะเครือข่ายมีความคับคั่งของแพ็กเก็ตข้อมูล

เพื่อเป็นการตรวจสอบและศึกษาสาเหตุของการที่ค่า PDR ของโปรโตคอลที่ออกแบบและพัฒนาลดลงจากสถานการณ์การทดสอบที่ 2 ที่โหนดต่างส่งข้อมูลออกมาพร้อมกันในเวลาเดียวกับ ดังนั้นจึงจัดการทดสอบแบบที่ 3 ให้โหนดแต่ละตัวมีการส่งข้อมูล ณ เวลาที่แตกต่างกัน โดยกำหนดให้โหนดแต่ละตัวเริ่มทำงานไม่พร้อมกัน ผลการทดสอบค่า PDR ของโครงสร้าง

เครือข่ายแบบเรียงต่อกันจำนวน 4 hop แบบมีสองเส้นทางแต่ละเส้นทางมี 2 hop และแบบ 3 hop lollipop พบว่ามีค่าเป็น 94.5 เปอร์เซ็นต์, 95.2 เปอร์เซ็นต์ และ 94.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งค่า PDR ที่ได้ดีขึ้นจนเกือบจะเท่ากับการทดลองในรูปแบบที่ 1 จึงสามารถสรุปได้ว่าค่า PDR ที่ลดลงในสถานการณ์การทดสอบที่ 2 นั้น เกิดจากการชนกันของข้อมูลอันเนื่องมาจากที่โหนดทั้งหมดต่างส่งข้อมูลออกมาพร้อมกันในเวลาเดียวกัน

จากปัญหาที่พบนี้ผู้พัฒนาจึงได้ทำการพัฒนาอัลกอริทึมการทำงาน Scheduling อย่างง่ายเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของโพรโทคอลที่พัฒนาขึ้น โดยกำหนดให้แต่ละโหนดมีค่านับเวลาที่ก่อนที่จะจัดส่งแพ็กเก็ตข้อมูลออกไม่เท่ากัน ซึ่งสามารถกำหนดค่านับได้จากผลคูณของค่าคงที่กับหมายเลขของโหนดเช่น โหนดหมายเลข 1 จะมีค่านับเวลาที่ 5 หน่วยเวลา โหนดหมายเลข 2 จะมีค่านับเวลาที่ 10 หน่วยเวลา เป็นต้น

การทดสอบโพรโทคอลแบบมี Scheduling อย่างง่ายโดยการเพิ่มค่านับของการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล เพื่อลดปัญหาของแพ็กเก็ตชนกัน ซึ่งการพัฒนาในส่วนของ Scheduling จะทำในโมดูล OutputQueue ดังภาพประกอบ 3-10 ซึ่งทำกระบวนการ Scheduling อย่างง่ายโดยการเอาหมายเลขโหนดคูณกับ 100ms เพื่อเป็นค่านับของการส่งข้อมูลออกของแต่ละโหนด ทำให้มีการนับเวลาที่ก่อนส่งข้อมูลของแต่ละโหนดไม่ตรงกัน ลักษณะของโครงสร้างเครือข่ายแบบดาว (star topology)

การทดสอบประสิทธิภาพของโพรโทคอลในกรณีที่มีจำนวนการเชื่อมต่อมายังโหนดเดียวกันเพิ่มขึ้น (many-to-one) จะช่วยชี้วัดความสามารถของโพรโทคอลว่าสามารถจัดการกับการชนกันของข้อมูลได้อย่างไร โดยได้ทำการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ star เพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อจาก 1 โหนดไปจนถึง 5 โหนด มีผลการทดสอบดังตารางที่ 3-4 พบว่าค่า PDR ลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเมื่อมีจำนวนการเชื่อมต่อเป็น 5 โหนดค่า PDR มีค่าต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงได้ทำการนำโพรโทคอลที่พัฒนาแบบมีการทำ scheduling อย่างง่ายนำมาใช้ พบว่าค่า PDR สูงขึ้นกว่า การใช้โพรโทคอลแบบที่ไม่มี scheduling อยู่ที่ประมาณ 12 ถึง 18 เปอร์เซ็นต์ ในแต่ละจำนวนการเชื่อมต่อที่แตกต่างกัน

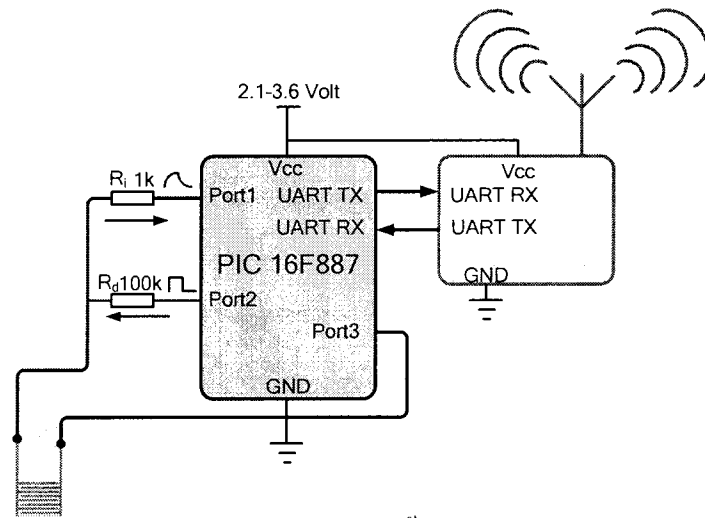
ตารางที่ 3-4 ผลการทดสอบค่า PDR กับจำนวนการเชื่อมต่อระหว่างโพรโทคอลที่มี scheduling กับ โพรโทคอลที่ไม่มี scheduling

จำนวนการสื่อสาร (connection)	ค่า Packet Delivery Ratio (%)		Improvement (%)
	ไม่มี scheduling	มี scheduling	
1	100	100	0
2	81.5	93.86	12.36
3	67.6	85.19	17.59
4	56.25	74.21	17.96
5	49.4	64.15	14.75

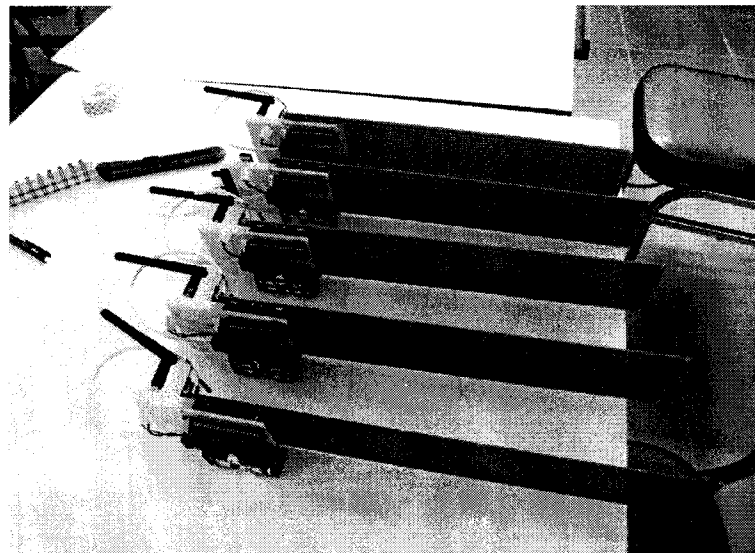
3.4 การเชื่อมต่อหัววัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอลเข้ากับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

หัววัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอลถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการใช้งานร่วมกับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ซึ่งต้องการคุณสมบัติของหัววัดที่ประหยัดพลังงานและมีราคาถูก สามารถนำไปใช้งานได้ง่ายโดยผู้ใช้ไม่ต้องติดตั้งระบบไฟฟ้าและระบบสื่อสารเพิ่มเติม เช่น การนำไปใช้วัดระดับน้ำในแปลงเกษตร การวัดระดับน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ หรือการวัดระดับน้ำสำหรับระบบเตือนภัยน้ำท่วม มีจุดเด่นที่สำคัญของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายคือ เป็นระบบเครือข่ายสื่อสารที่ใช้พลังงานเฉพาะของตนเอง ทำให้มีเสถียรภาพในการใช้งาน ไม่มีต้นทุนจากค่าบริการรายเดือน และสามารถใช้งานได้แม้ในบริเวณนั้นไม่มีระบบเครือข่ายสื่อสารใดๆเลย

เพื่อเป็นการทดสอบความเข้ากันได้ ระหว่างหัววัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอลที่ได้จากการออกแบบกับโมดูลเซนเซอร์ไร้สาย จึงใช้การทดลองเชื่อมต่อหัววัดระดับน้ำ เข้ากับ โมดูลเซนเซอร์ไร้สาย Unode ที่ออกแบบและพัฒนาโดยภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยการเชื่อมต่อหัววัดระดับน้ำเข้ากับโมดูลเซนเซอร์ไร้สาย Unode จะใช้การเชื่อมต่อผ่านทางพอร์ตอนุกรม UART โดยกำหนดมาตรฐานการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างกันแบบ 9600 8N1 มีลักษณะการเชื่อมต่อดังภาพประกอบ 3-14 และ 3-15



ภาพประกอบ 3-14 การเชื่อมต่อหัววัดระดับน้ำเข้ากับ โมดูลเซนเซอร์ไร้สาย Unode



ภาพประกอบ 3-15 การประกอบหัววัดระดับน้ำเข้ากับ โมดูลเซนเซอร์ไร้สาย

เมื่อทำการอินเทอร์เฟซหัววัดระดับน้ำเข้ากับ โมดูลเซนเซอร์ไร้สาย Unode เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะเรียกรวมอุปกรณ์ทั้ง 2 ส่วนนี้ว่า “เซนเซอร์โหนด” โดยสิ่งที่จะทำการศึกษาหลังจากนี้ คือ

1. การศึกษาประสิทธิภาพการรับ-ส่งข้อมูล ระหว่างสถานีฐานกับเซนเซอร์โหนด เพื่อให้ทราบประสิทธิภาพการทำงานและข้อบกพร่อง สำหรับเป็นข้อมูลนำไปพัฒนาต่อไป
2. การศึกษาอัตราการใช้พลังงานของเซนเซอร์โหนด เพื่อให้ทราบการใช้พลังงานของเซนเซอร์โหนด สำหรับนำไปวางแผนการใช้งานให้เหมาะสมกับขนาดของแบตเตอรี่

3.5 การทดสอบประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของเซนเซอร์โหนดในห้องทดลอง

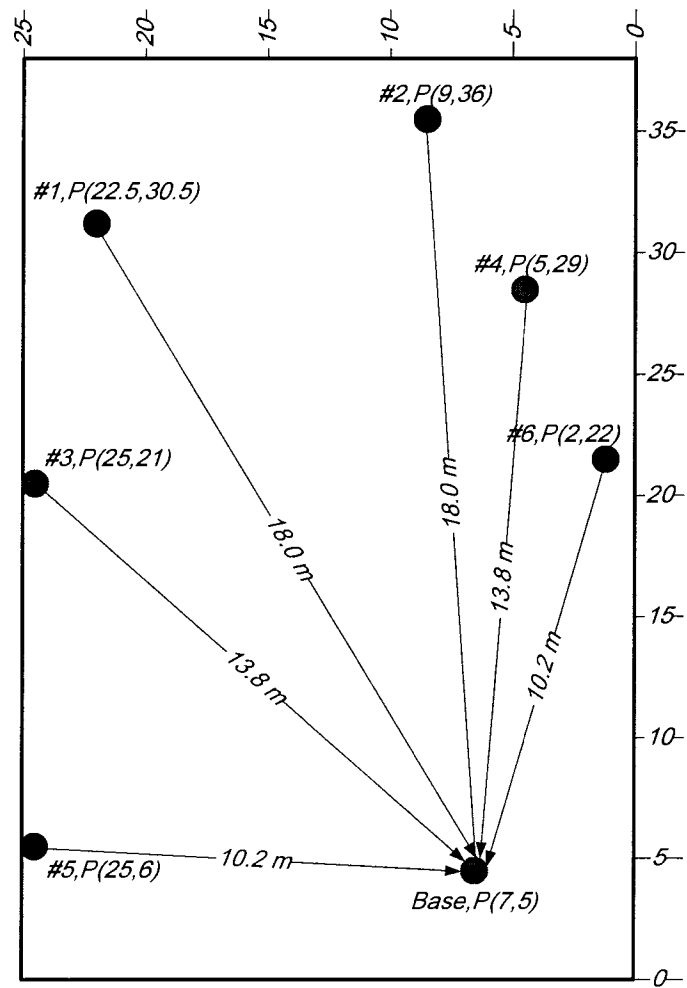
สำหรับการทดลองจะใช้เซนเซอร์โหนดจำนวน 6 ชุด (หมายเลข #1 ถึง #6) วัดระดับน้ำในถังพลาสติกซึ่งมีระดับน้ำ 10 เซนติเมตรดังภาพประกอบ 3-16 โดยถังน้ำทั้งหมดจะวางกระจายกันภายในห้องที่มีขนาดกว้าง 25 เมตร ยาว 38 เมตร ดังภาพประกอบ 3-17 มีตำแหน่งการจัดวางเซนเซอร์โหนดแต่ละตัวดังภาพประกอบ 3-18 กำหนดให้เซนเซอร์โหนดส่งข้อมูลระดับน้ำเข้ามาที่สถานีฐานทุกๆ 10 นาที โดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ชนิด Alkaline ยี่ห้อ Panasonic รุ่น Pro power LR6PPG ขนาด AA แรงดันไฟฟ้า 1.5 โวลต์ จำนวน 2 ก้อนต่ออนุกรมกัน มีผลการทดลองดังตารางที่ 3-5



ภาพประกอบ 3-16 การจำลองการวัดระดับน้ำในถังพลาสติก ซึ่งจัดวางไว้ในตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องทดลอง



ภาพประกอบ 3-17 สถานที่ทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของเซนเซอร์โหนด

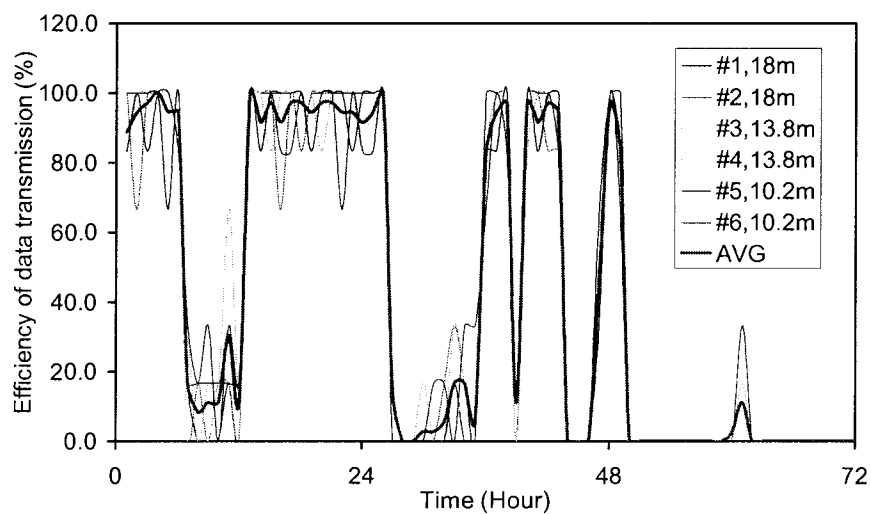


ภาพประกอบ 3-18 ตำแหน่งการวางเซนเซอร์โหนดในการทดลอง

ตารางที่ 3-5 ผลการทดลองการส่งข้อมูลของเซนเซอร์โหนดที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อช่วงการส่งข้อมูลทุกๆ 10 นาที

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

ผลการทดลองแสดงให้เห็นประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของเซนเซอร์โหนดทั้ง 6 ชุดมีค่าเฉลี่ยการส่งข้อมูลสำเร็จที่ 55 % ตลอดระยะเวลาทำงานเฉลี่ย 54.5 ชั่วโมง (เซนเซอร์โหนดใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ทั้งหมด) และเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาพิจารณาประสิทธิภาพการส่งข้อมูลในแต่ละช่วงเวลาพบว่า เซนเซอร์โหนดแต่ละตัวมีประสิทธิภาพการส่งข้อมูลในแต่ละเวลาที่ใกล้เคียงกันดังภาพประกอบ 3-19 จึงมีสมมุติฐานที่เป็นไปได้ว่า สถานีฐาน ซึ่งทำหน้าที่รับข้อมูลทั้งหมดจากเซนเซอร์โหนด (Base station) อาจมีปัญหาการรับข้อมูลในบางเวลา ทำให้ประสิทธิภาพการสื่อสารทั้งหมดลดลง



ภาพประกอบ 3-19 ประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของเซนเซอร์โหนด
ในแต่ละช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ

3.6 การทดสอบประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของเซนเซอร์โหนดในรางน้ำทดสอบ

ในการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพส่งข้อมูลของเซนเซอร์โหนดเมื่อเกิดสภาวะน้ำไหลหลาก เป็นการทดลองเพื่อจำลองสถานการณ์เกิดน้ำท่วมฉับพลันอันเนื่องมาจากน้ำป่าไหลหลาก ทำให้เซนเซอร์โหนดต้องปรับช่วงของการส่งข้อมูลให้เร็วมากยิ่งขึ้นตามอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ จากเดิมที่เป็นการส่งข้อมูลทุกๆ 10 นาที ไปเป็นการส่งข้อมูลทุกๆ 1 วินาที ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อเซนเซอร์โหนดมีช่วงการส่งข้อมูลสูงขึ้นคือ การบริหารจัดการภายในเครือข่ายเกิดความยุ่งยากมากยิ่งขึ้น ทำให้โอกาสที่ข้อมูลจะเกิดการสูญหายมีสูงขึ้นตามไปด้วย การทดลองนี้จึงเป็นการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างเซนเซอร์โหนดกับสถานีฐาน เมื่อเครือข่ายต้องรับสภาวะการใช้งานที่มีการสื่อสารภายในเครือข่ายเกือบตลอดเวลา

สำหรับการทดลองจะใช้เซนเซอร์โหนดจำนวน 4 ชุด ติดตั้งภายในรางน้ำจำลองสภาพการไหล โดยติดตั้งเซนเซอร์โหนดเรียงต่อกันตามแนวรางน้ำมีระยะห่างระหว่างกัน 120 เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 3-20 และ 3-21



ภาพประกอบ 3-20 การติดตั้งเซนเซอร์โหนดทั้ง 4 ชุด ในรางน้ำจำลองสภาพการไหล



ภาพประกอบ 3-21 เซนเซอร์โหนดที่ใช้ในการทดลอง

เซนเซอร์โหนดแต่ละตัวถูกกำหนดให้ส่งข้อมูลทุกๆ 1 วินาทีในช่วงเวลาที่ไม่พร้อมกันซึ่งการจัดลำดับการส่งข้อมูลออกอากาศจะถูกบริหารจัดการโดยโพรโตคอลภายใน Unode ข้อมูลจากเซนเซอร์โหนดทั้ง 4 ชุดจะถูกส่งไปยังสถานีฐานที่อยู่ห่างออกไป มีลักษณะของสถานีฐานดังภาพประกอบ 3-22 โดยเซนเซอร์โหนดหมายเลข #1 จะอยู่ใกล้กับสถานีฐานมากที่สุด และหมายเลข #2, #3, #4 อยู่ห่างออกไปจากสถานีฐานตามลำดับ

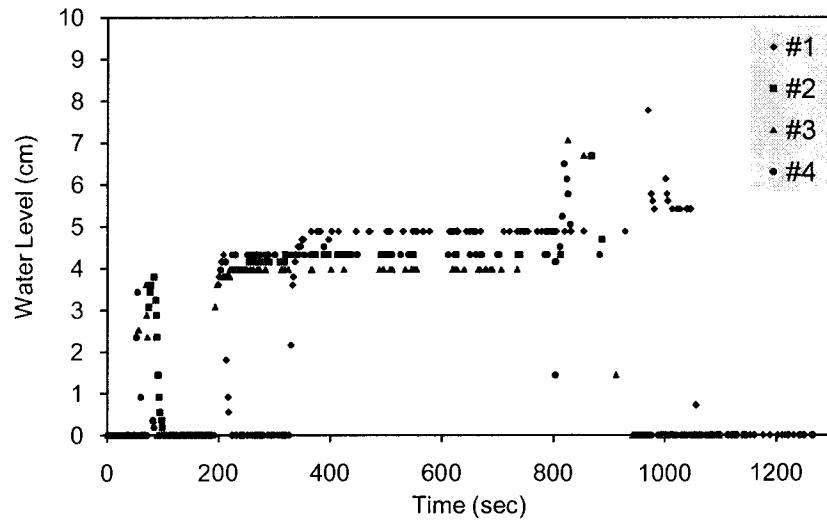


ภาพประกอบ 3-22 สถานีฐานที่ใช้ในการเก็บข้อมูลระดับน้ำที่ส่งมาจากเซนเซอร์โหนดทั้ง 4 ชุด

เมื่อทำการติดตั้งเซนเซอร์โหนดและสถานีฐานเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงปล่อยน้ำไหลให้ผ่านเซนเซอร์โหนดดังภาพประกอบ 3-23 จากนั้นสถานีฐานจะทำการบันทึกข้อมูลที่ได้รับจากเซนเซอร์โหนด มีผลการรับข้อมูลจากเซนเซอร์โหนดดังภาพประกอบ 3-24



ภาพประกอบ 3-23 น้ำที่ไหลผ่านเซนเซอร์โหนด



ภาพประกอบ 3-24 ผลการรับ-ส่งข้อมูลระดับน้ำของเซนเซอร์โหนดในแต่ละช่วงเวลา

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ เพื่อหาประสิทธิภาพการรับ-ส่งข้อมูลของเซนเซอร์โหนดแต่ละชุดในสถานะน้ำไหลหลาก มีผลสรุปดังตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 ผลการทดลองการส่งข้อมูลของเซนเซอร์โหนดในสถานะน้ำไหลหลาก เมื่อช่วงการส่งข้อมูลทุกๆ 1 วินาที

Sensor No.	ผลการรับ-ส่งข้อมูล		ประสิทธิภาพการรับ-ส่งข้อมูล
	สำเร็จ (ครั้ง)	ไม่สำเร็จ (ครั้ง)	(%)
#1	245	930	21
#2	124	1017	11
#3	163	959	15
#4	147	935	14
	ค่าเฉลี่ย		15

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเซนเซอร์โหนดทำงานในสถานะน้ำไหลหลากที่มีช่วงการส่งข้อมูลทุกๆ 1 วินาที จะมีประสิทธิภาพการรับ-ส่งข้อมูลเฉลี่ยเพียง 15 % ซึ่งไม่สามารถวัดระดับน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ การนำเซนเซอร์โหนดมาใช้วัดระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจึงยังไม่เหมาะสมในขณะนี้ จำเป็นต้องมีการปรับปรุงในส่วนของโปรโตคอลต่อไป เพื่อให้สามารถบริหารจัดการเครือข่ายในช่วงการส่งข้อมูลสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.7 การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียของเซนเซอร์โหนด (Unode)

จากเป้าหมายในการสร้างเซนเซอร์ไร้สาย ที่ต้องการให้เป็นเซนเซอร์ที่ใช้งานง่าย ขนาดเล็ก และมีราคาถูก สามารถใช้งานได้ทุกสถานที่โดยไม่ต้องบำรุงรักษา หรือเปลี่ยนพลังงานใหม่ตลอดอายุการใช้งาน ทำให้ทางเลือกของแหล่งพลังงานที่เหมาะสมในขณะนี้คือ การใช้แบตเตอรี่ขนาดเล็ก และเพื่อให้แบตเตอรี่สามารถจ่ายพลังงานให้กับเซนเซอร์ได้ยาวนาน การอนุรักษ์พลังงานสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย จึงเป็นหัวข้อหนึ่งที่มีการศึกษาวิจัยกันอย่างกว้างขวาง โดยมีเป้าหมายเพื่อลดการใช้พลังงานของเซนเซอร์โหนดให้เหลือน้อยที่สุด จากการสำรวจผลงานวิจัยที่ผ่านมา สามารถแบ่งวิธีการอนุรักษ์พลังงาน ได้ 3 วิธี [33] ดังนี้

- 1) วิธีการกำหนดวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycling) เพื่อให้เซนเซอร์โหนดเข้าสู่โหมดหลับ (Sleep mode) เมื่อไม่ได้ใช้งาน
- 2) วิธีการจัดการข้อมูลและเส้นทางในเครือข่าย (Data-driven) เพื่อให้ใช้พลังงานในการดำเนินการน้อยที่สุด
- 3) วิธีการจัดวางตำแหน่งหรือเคลื่อนที่เซนเซอร์โหนดอย่างเหมาะสม (Mobility-base) เพื่อให้ครอบคลุมทั่วพื้นที่ โดยใช้จำนวนของเซนเซอร์โหนดและพลังงานน้อยที่สุด

หากกล่าวโดยสรุปแล้ว วิธีการต่างๆที่ได้มีการศึกษามา จะให้ความสำคัญไปที่การหาจุดเหมาะสมในด้านการบริหารจัดการตามสถานการณ์ เพื่อลดเวลาทำงานของเซนเซอร์โหนด (Operating time) ให้เหลือน้อยที่สุด แต่ยังคงขาดผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับพลังงานสูญเสียจากการใช้พลังงานที่ไม่มีประสิทธิภาพของเซนเซอร์โหนดเอง

ปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นเมื่อเราใช้แบตเตอรี่ขนาดเล็ก (ขนาด AA หรือ AAA) จ่ายพลังงานให้กับเซนเซอร์โหนด คือ แบตเตอรี่ที่มีจำหน่ายโดยส่วนใหญ่จะมีระดับแรงดันไฟฟ้าเพียง 1.5 โวลต์ ซึ่งต่ำกว่าความต้องการของเซนเซอร์โหนด ที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าประมาณ 2 ถึง 5 โวลต์ ในการใช้งานจึงนิยมนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นเป็น 3 โวลต์ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดที่เราสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้โดยไม่ต้องอาศัยวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าใดๆเพิ่มเติม

แต่เมื่อทำการศึกษาข้อมูลอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นส่วนประกอบของเซนเซอร์โหนดกลับพบว่า อุปกรณ์เหล่านี้สามารถทำงานได้ที่แรงดันไฟฟ้าได้ต่ำกว่า 3 โวลต์ โดยเฉพาะในส่วนที่เป็นการทำงานแบบดิจิทัล นอกจากนี้ วงจรบางส่วนก็ไม่ได้ใช้แรงดันไฟฟ้าที่มาจากแบตเตอรี่โดยตรง แต่จะใช้แรงดันไฟฟ้าที่ผ่านวงจรรักษาระดับแรงดันมาแล้ว (Voltage Regulator) เช่น ส่วนที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการรับ-ส่งคลื่นวิทยุ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพื่อป้องกันไม่ให้กำลังส่งคลื่นวิทยุของเซนเซอร์โหนด แกว่งไปตามแรงดันของแบตเตอรี่ แต่ผลกระทบจากการใช้วงจรรักษาระดับ

3.7 การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียของเซนเซอร์โหนด (Unode)

จากเป้าหมายในการสร้างเซนเซอร์ไร้สาย ที่ต้องการให้เป็นเซนเซอร์ที่ใช้งานง่าย ขนาดเล็ก และมีราคาถูก สามารถใช้งานได้ทุกสถานที่โดยไม่ต้องบำรุงรักษา หรือเปลี่ยนพลังงานใหม่ตลอดอายุการใช้งาน ทำให้ทางเลือกของแหล่งพลังงานที่เหมาะสมในขณะนี้คือ การใช้แบตเตอรี่ขนาดเล็ก และเพื่อให้แบตเตอรี่สามารถจ่ายพลังงานให้กับเซนเซอร์ได้ยาวนาน การอนุรักษ์พลังงานสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย จึงเป็นหัวข้อหนึ่งที่มีการศึกษาวิจัยกันอย่างกว้างขวาง โดยมีเป้าหมายเพื่อลดการใช้พลังงานของเซนเซอร์โหนดให้เหลือน้อยที่สุด จากการสำรวจผลงานวิจัยที่ผ่านมา สามารถแบ่งวิธีการอนุรักษ์พลังงาน ได้ 3 วิธี [33] ดังนี้

- 1) วิธีการกำหนดวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycling) เพื่อให้เซนเซอร์โหนดเข้าสู่โหมดหลับ (Sleep mode) เมื่อไม่ได้ใช้งาน
- 2) วิธีการจัดการข้อมูลและเส้นทางในเครือข่าย (Data-driven) เพื่อให้ใช้พลังงานในการดำเนินการน้อยที่สุด
- 3) วิธีการจัดวางตำแหน่งหรือเคลื่อนที่เซนเซอร์โหนดอย่างเหมาะสม (Mobility-base) เพื่อให้ครอบคลุมทั่วพื้นที่ โดยใช้จำนวนของเซนเซอร์โหนดและพลังงานน้อยที่สุด

หากกล่าวโดยสรุปแล้ว วิธีการต่างๆที่ได้มีการศึกษามา จะให้ความสำคัญไปที่การหาจุดเหมาะสมในด้านการบริหารจัดการตามสถานการณ์ เพื่อลดเวลาทำงานของเซนเซอร์โหนด (Operating time) ให้เหลือน้อยที่สุด แต่ยังคงขาดผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับพลังงานสูญเสียจากการใช้พลังงานที่ไม่มีประสิทธิภาพของเซนเซอร์โหนดเอง

ปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นเมื่อเราใช้แบตเตอรี่ขนาดเล็ก (ขนาด AA หรือ AAA) จ่ายพลังงานให้กับเซนเซอร์โหนด คือ แบตเตอรี่ที่มีจำหน่ายโดยส่วนใหญ่จะมีระดับแรงดันไฟฟ้าเพียง 1.5 โวลต์ ซึ่งต่ำกว่าความต้องการของเซนเซอร์โหนด ที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าประมาณ 2 ถึง 5 โวลต์ ในการใช้งานจึงนิยมนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นเป็น 3 โวลต์ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดที่เราสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้โดยไม่ต้องอาศัยวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าใดๆเพิ่มเติม

แต่เมื่อทำการศึกษาข้อมูลอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นส่วนประกอบของเซนเซอร์โหนดกลับพบว่า อุปกรณ์เหล่านี้สามารถทำงานได้ที่แรงดันไฟฟ้าได้ต่ำกว่า 3 โวลต์ โดยเฉพาะในส่วนที่เป็นการทำงานแบบดิจิทัล นอกจากนี้ วงจรบางส่วนก็ไม่ได้ใช้แรงดันไฟฟ้าที่มาจากแบตเตอรี่โดยตรง แต่จะใช้แรงดันไฟฟ้าที่ผ่านวงจรรักษาระดับแรงดันมาแล้ว (Voltage Regulator) เช่น ส่วนที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการรับ-ส่งคลื่นวิทยุ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพื่อป้องกันไม่ให้กำลังส่งคลื่นวิทยุของเซนเซอร์โหนด แกว่งไปมาตามแรงดันของแบตเตอรี่ แต่ผลกระทบจากการใช้วงจรรักษาระดับ

แรงดันคือ ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเป็นความร้อน ซึ่งแปรผันตรงกับความแตกต่างระหว่างแรงดันของแบตเตอรี่กับแรงดันเอาต์พุตของวงจรรักษาระดับแรงดัน ยิ่งความแตกต่างระหว่างแรงดันทั้งสองมีค่ามาก พลังงานสูญเสียเป็นความร้อนก็ยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย

ส่วนแสดงสถานะการทำงาน เป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยให้ผู้ใช้งานตรวจสอบสถานะการทำงานของเซนเซอร์โหนดได้อย่างสะดวก เช่น สถานะการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟ และสถานะการรับส่งข้อมูล ซึ่งนิยมใช้การแสดงผลด้วยหลอดไฟชนิด LED ที่รับแรงดันไฟฟ้ามาจากแบตเตอรี่โดยตรง ระดับความสว่างจึงแปรเปลี่ยนตามระดับแรงดันของแบตเตอรี่ด้วย หากแบตเตอรี่มีแรงดันไฟฟ้าสูงความสว่างของหลอด LED ก็จะมา จนบางครั้งอาจมากเกินไปจนเป็น เกิดเป็นพลังงานสูญเสียในรูปแบบของแสงได้ด้วยเช่นกัน

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีสมมุติฐานที่เป็นไปได้ว่า การต่ออนุกรมแบตเตอรี่เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับเซนเซอร์โหนด อาจทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าความต้องการใช้งานจริง ทำให้แบตเตอรี่ต้องสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งไปเป็นความร้อนภายในวงจรรักษาระดับแรงดัน และแสงสว่างของหลอดไฟแสดงสถานะการทำงานที่สว่างมากเกินไปจนส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลง

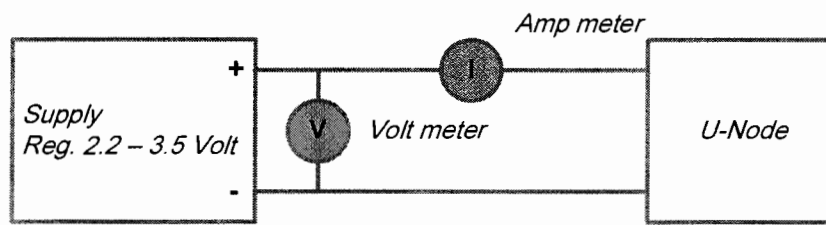
บทความนี้จึงเป็นการนำเสนอผลการศึกษาลงงานสูญเสียของเซนเซอร์โหนดที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าส่วนเกินจากการต่ออนุกรมแบตเตอรี่ ซึ่งส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลง ผลการทดลองจะแสดงให้เห็นปริมาณของกำลังไฟฟ้าสูญเสีย และการเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานและอายุการใช้งาน ระหว่างการใช้แบตเตอรี่ชนิด Ni-MH กับแบตเตอรี่ชนิด Alkaline ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าต่างกัน ผลการศึกษาคือจะช่วยให้นำเซนเซอร์โหนดไปใช้งาน หรือผู้ที่กำลังจะออกแบบเซนเซอร์โหนด ได้คำนึงถึงผลกระทบจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าสูงเกินความจำเป็น ทำให้แบตเตอรี่ต้องสูญเสียพลังงานไปโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งจะเป็นแนวทางนำไปสู่การเลือกใช้อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อไป

3.7.1 วิธีการทดลอง

การทดลองเพื่อหาอัตราการใช้พลังงาน เป็นการพิจารณาเฉพาะการใช้พลังงานของ Hardware เป็นหลัก จึงไม่มีการใช้โปรโตคอลใดๆ เพื่อลดภาระของการประมวลผลให้น้อยที่สุด กำหนดให้เป็นการสื่อสารแบบ Single-hop คือ Unode เป็นตัวส่ง (source node) และใช้ Tmote เป็นตัวรับซึ่งต่ออยู่กับเครื่องคอมพิวเตอร์ (Destination node) โหนดทั้งสองมีระยะห่างกันประมาณ 1 ฟุต Unode ใช้กำลังส่งคลื่นวิทยุคงที่ 1mW ทำการทดลองโดยวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน Unode ซ้ำ 10 ครั้ง ใน 2 โหมดการทำงาน คือ โหมดการทำงานปกติ (Operating mode) และ โหมดการส่งข้อมูล (TX mode) โดยโหมดการทำงานปกติจะหมายถึง เซนเซอร์โหนดอยู่ในช่วงรอ

และพร้อมที่จะรับ-ส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ ในโหมดนี้ LED แสดงสถานะการต่อแหล่งจ่ายไฟจะติดสว่างเพียง 1 ดวง ส่วนโหมดการส่งข้อมูลจะหมายถึง เซนเซอร์โหนดกำลังส่งข้อมูลออกอากาศผ่านทางคลื่นวิทยุ ในโหมดนี้ LED แสดงสถานะการส่งข้อมูลจะติดสว่างเพิ่มอีก 1 ดวง รวมเป็น 2 ดวง จากนั้นนำค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัด 10 ครั้งมาหาค่าเฉลี่ย แล้วคำนวณเป็นค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละโหมด

ในการทดลอง Tmote ซึ่งเป็นตัวรับจะใช้ไฟจากพอร์ต USB ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ส่วน U-node จะรับไฟจากแหล่งจ่ายตั้งแต่ 2.2 ถึง 3.5 โวลต์ (จากการทดลองถ้าแรงดันน้อยกว่านี้ U-node ไม่สามารถส่งข้อมูลได้ และหากมากกว่านี้ U-node จะเสียหาย) โดยปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าครั้งละ 0.1 โวลต์ แล้วบันทึกแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดด้วย MultiMate ยี่ห้อ Fluke รุ่น 117 วิธีการวัดมีไดอะแกรมดังภาพประกอบ 3-25



ภาพประกอบ 3-25 วิธีการวัดเพื่อหาลำดับกำลังไฟฟ้าของเซนเซอร์โหนด
ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 2.2 ถึง 3.5 โวลต์

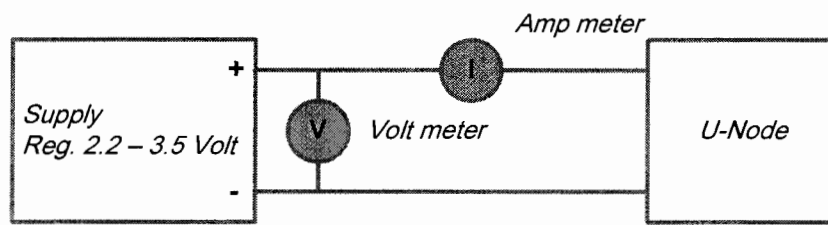
เนื่องจากปัจจุบัน แบตเตอรี่ขนาดเล็กที่มีจำหน่ายทั่วไป (ขนาด AA หรือ AAA) มีแรงดันไฟฟ้าให้เลือกใช้งานเพียง 2 แบบ คือ แบบแรงดันไฟฟ้า 1.2 โวลต์จากเป็นแบตเตอรี่ชนิด Ni-MH และแบบแรงดันไฟฟ้า 1.5 โวลต์จากเป็นแบตเตอรี่ชนิด Alkaline ดังนั้นในการหาปริมาณของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากการนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกัน และการเปรียบเทียบอายุการใช้งาน จะพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ 2 ชนิดนี้

3.7.2 ผลการศึกษาและการอภิปราย

ผลที่ได้จากการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าจะถูกคำนวณเป็นค่ากำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็น มิลลิจูลต่อวินาที (mJ/Sec) ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของ U-node กับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ U-node ดังภาพประกอบ 3-26

และพร้อมที่จะรับ-ส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ ในโหมดนี้ LED แสดงสถานะการต่อแหล่งจ่ายไฟจะติดสว่างเพียง 1 ดวง ส่วนโหมดการส่งข้อมูลจะหมายถึง เซนเซอร์โหนดกำลังส่งข้อมูลออกอากาศผ่านทางคลื่นวิทยุ ในโหมดนี้ LED แสดงสถานะการส่งข้อมูลจะติดสว่างเพิ่มอีก 1 ดวง รวมเป็น 2 ดวง จากนั้นนำค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัด 10 ครั้งมาหาค่าเฉลี่ย แล้วคำนวณเป็นค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละโหมด

ในการทดลอง Tmote ซึ่งเป็นตัวรับจะใช้ไฟจากพอร์ต USB ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ส่วน U-node จะรับไฟจากแหล่งจ่ายตั้งแต่ 2.2 ถึง 3.5 โวลต์ (จากการทดลองถ้าแรงดันน้อยกว่านี้ U-node ไม่สามารถส่งข้อมูลได้ และหากมากกว่านี้ U-node จะเสียหาย) โดยปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าครั้งละ 0.1 โวลต์ แล้วบันทึกแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดด้วย MultiMate ยี่ห้อ Fluke รุ่น 117 วิธีการวัดมีไดอะแกรมดังภาพประกอบ 3-25



ภาพประกอบ 3-25 วิธีการวัดเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าของเซนเซอร์โหนด
ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 2.2 ถึง 3.5 โวลต์

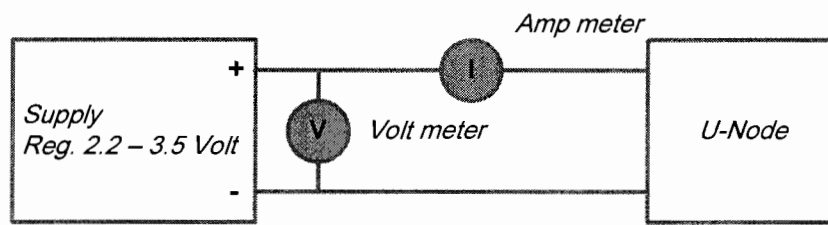
เนื่องจากปัจจุบัน แบตเตอรี่ขนาดเล็กที่มีจำหน่ายทั่วไป (ขนาด AA หรือ AAA) มีแรงดันไฟฟ้าให้เลือกใช้งานเพียง 2 แบบ คือ แบบแรงดันไฟฟ้า 1.2 โวลต์จากเป็นแบตเตอรี่ชนิด Ni-MH และแบบแรงดันไฟฟ้า 1.5 โวลต์จากเป็นแบตเตอรี่ชนิด Alkaline ดังนั้นในการหาปริมาณของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากการนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกัน และการเปรียบเทียบอายุการใช้งาน จะพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ 2 ชนิดนี้

3.7.2 ผลการศึกษาและการอภิปราย

ผลที่ได้จากการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าจะถูกคำนวณเป็นค่ากำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็น มิลลิจูลต่อวินาที (mJ/Sec) ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของ U-node กับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ U-node ดังภาพประกอบ 3-26

และพร้อมที่จะรับ-ส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ ในโหมดนี้ LED แสดงสถานะการต่อแหล่งจ่ายไฟจะติดสว่างเพียง 1 ดวง ส่วนโหมดการส่งข้อมูลจะหมายถึง เซนเซอร์โหนดกำลังส่งข้อมูลออกอากาศผ่านทางคลื่นวิทยุ ในโหมดนี้ LED แสดงสถานะการส่งข้อมูลจะติดสว่างเพิ่มอีก 1 ดวง รวมเป็น 2 ดวง จากนั้นนำค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัด 10 ครั้งมาหาค่าเฉลี่ย แล้วคำนวณเป็นค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละโหมด

ในการทดลอง Tmote ซึ่งเป็นตัวรับจะใช้ไฟจากพอร์ต USB ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ส่วน U-node จะรับไฟจากแหล่งจ่ายตั้งแต่ 2.2 ถึง 3.5 โวลต์ (จากการทดลองถ้าแรงดันน้อยกว่านี้ U-node ไม่สามารถส่งข้อมูลได้ และหากมากกว่านี้ U-node จะเสียหาย) โดยปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าครั้งละ 0.1 โวลต์ แล้วบันทึกแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดด้วย MultiMate ยี่ห้อ Fluke รุ่น 117 วิธีการวัดมีไดอะแกรมดังภาพประกอบ 3-25

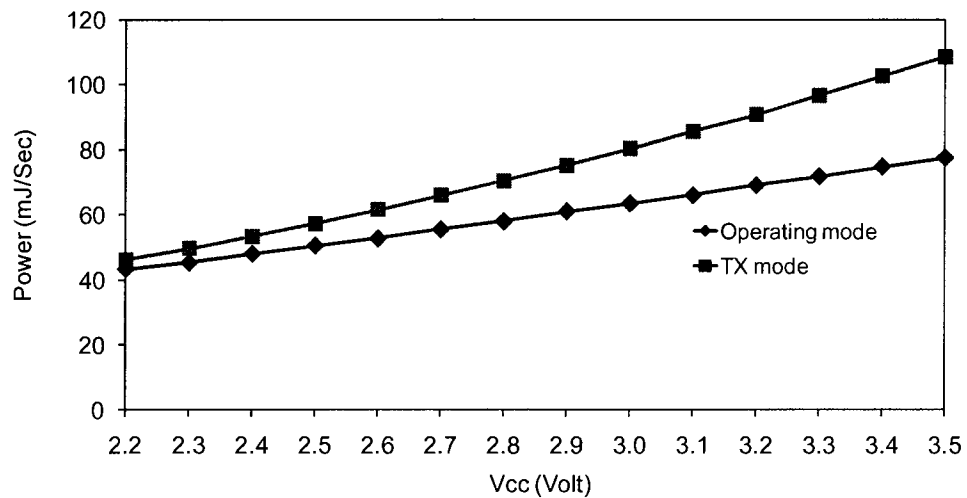


ภาพประกอบ 3-25 วิธีการวัดเพื่อหาลำดับกำลังไฟฟ้าของเซนเซอร์โหนด
ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 2.2 ถึง 3.5 โวลต์

เนื่องจากปัจจุบัน แบตเตอรี่ขนาดเล็กที่มีจำหน่ายทั่วไป (ขนาด AA หรือ AAA) มีแรงดันไฟฟ้าให้เลือกใช้งานเพียง 2 แบบ คือ แบบแรงดันไฟฟ้า 1.2 โวลต์จากเป็นแบตเตอรี่ชนิด Ni-MH และแบบแรงดันไฟฟ้า 1.5 โวลต์จากเป็นแบตเตอรี่ชนิด Alkaline ดังนั้นในการหาปริมาณของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากการนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกัน และการเปรียบเทียบอายุการใช้งาน จะพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ 2 ชนิดนี้

3.7.2 ผลการศึกษาและการอภิปราย

ผลที่ได้จากการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าจะถูกคำนวณเป็นค่ากำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็น มิลลิจูลต่อวินาที (mJ/Sec) ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของ U-node กับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ U-node ดังภาพประกอบ 3-26



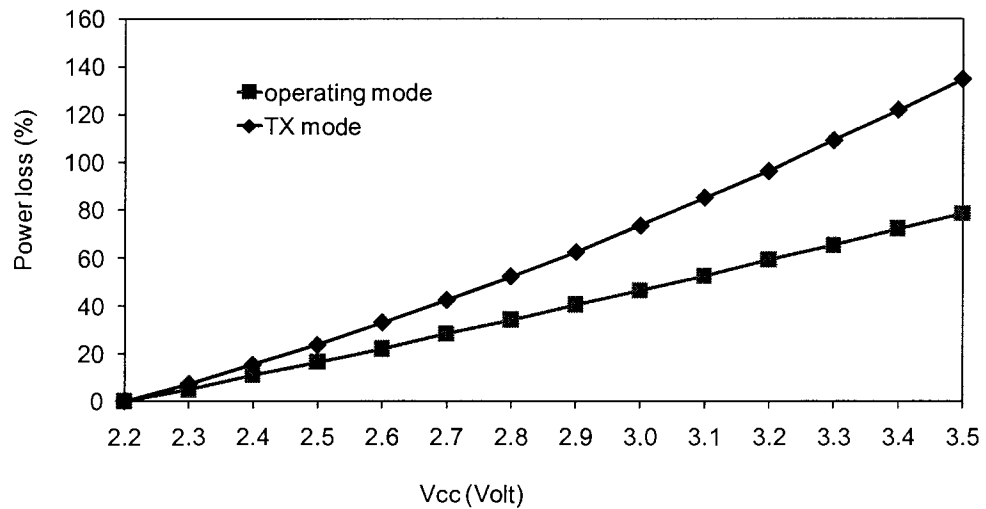
ภาพประกอบ 3-26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของ Unode
กับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Unode

จากภาพประกอบ 3-26 กำลังไฟฟ้าของ Unode เพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย โดยมีกำลังไฟฟ้าต่ำสุด 43.4 mJ/Sec ที่แรงดันไฟฟ้า 2.2 โวลต์ในโหมดการทำงานปกติ และมีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 108.6 mJ/Sec ที่แรงดันไฟฟ้า 3.5 โวลต์ในโหมดการส่งข้อมูล นอกจากนี้แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้กำลังไฟฟ้าของทั้งสองโหมดมีความแตกต่างกันมากขึ้น โดยที่แรงดัน 2.4 โวลต์ในโหมดการส่งข้อมูลจะใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากโหมดการทำงานปกติ 5.3 mJ/Sec หรือคิดเป็น 11% ในขณะที่แรงดันไฟฟ้า 3 โวลต์ โหมดการส่งข้อมูลจะใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากโหมดการทำงานปกติ 16.7 mJ/Sec หรือคิดเป็น 26%

จากการทดลอง แรงดันไฟฟ้า 2.2 โวลต์เป็นระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ Unode ยังคงทำงานได้ตามปกติ (ทั้งส่วนดิจิทัลอินเทอร์เฟสและส่วนภาครับส่งคลื่นวิทยุ) ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากภาครับ-ส่งคลื่นวิทยุภายใน CC2420 ต้องการแรงดันไฟฟ้าใช้งานจริงเพียง 1.8 โวลต์ ซึ่งได้มาจากการลดแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวงจร Low Drop Out Regulator (LDO) ที่อยู่ภายใน CC2420 เอง และไม่โครคอนโทรลเลอร์ MSP430f1611 ก็ต้องการแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเพียง 1.8 โวลต์เช่นกัน ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับเซนเซอร์โหนดมากกว่า 2.2 โวลต์ เป็นผลมาจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$P_{loss} = \left(\frac{P - P_{2.2V}}{P_{2.2V}} \right) \cdot 100 \quad (3-3)$$

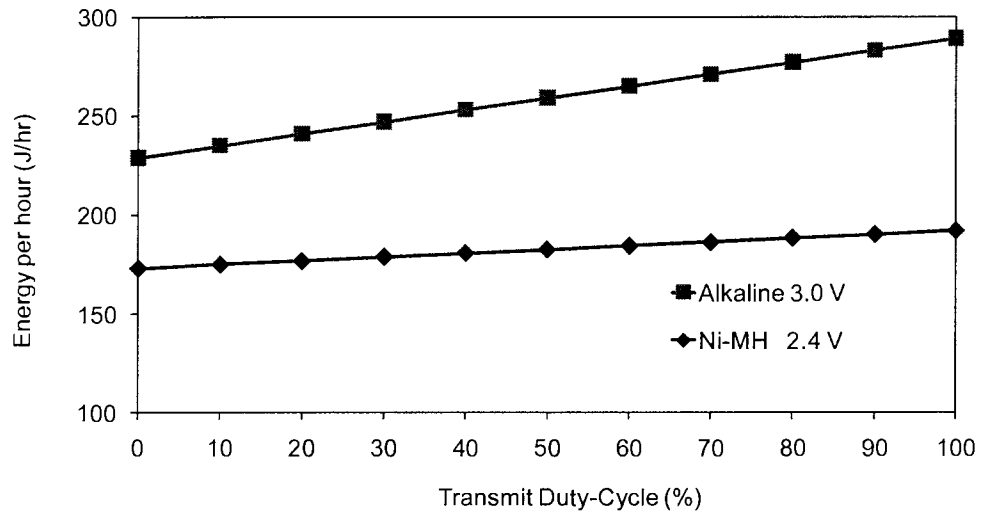
มีความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของกำลังไฟฟ้าสูญเสียกับแรงดันไฟฟ้าส่วนเกินที่ได้จากการคำนวณดังภาพประกอบ 3-27



ภาพประกอบ 3-27 ร้อยละของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าสูงเกินกว่าความต้องการต่ำสุดของ Unode ที่ 2.2 โวลต์

จากภาพประกอบ 3-27 เมื่อเปรียบเทียบร้อยละของกำลังไฟฟ้าสูญเสียระหว่างการเลือกใช้แรงดันไฟฟ้า 2.4 โวลต์ที่ได้จากการต่ออนุกรมแบตเตอรี่ Ni-MH กับการเลือกใช้แรงดันไฟฟ้า 3 โวลต์ที่ได้จากการต่ออนุกรมแบตเตอรี่ Alkaline จะเห็นได้ว่า กำลังไฟฟ้าสูญเสียเฉลี่ยทั้งสองโหมดของ Ni-MH มีค่าเท่ากับ 13% ในขณะที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียเฉลี่ยทั้งสองโหมดของ Alkaline สูงถึง 60% การใช้แบตเตอรี่ Alkaline จึงทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียใน Unode มากกว่าการใช้แบตเตอรี่ Ni-MH เพราะมีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า

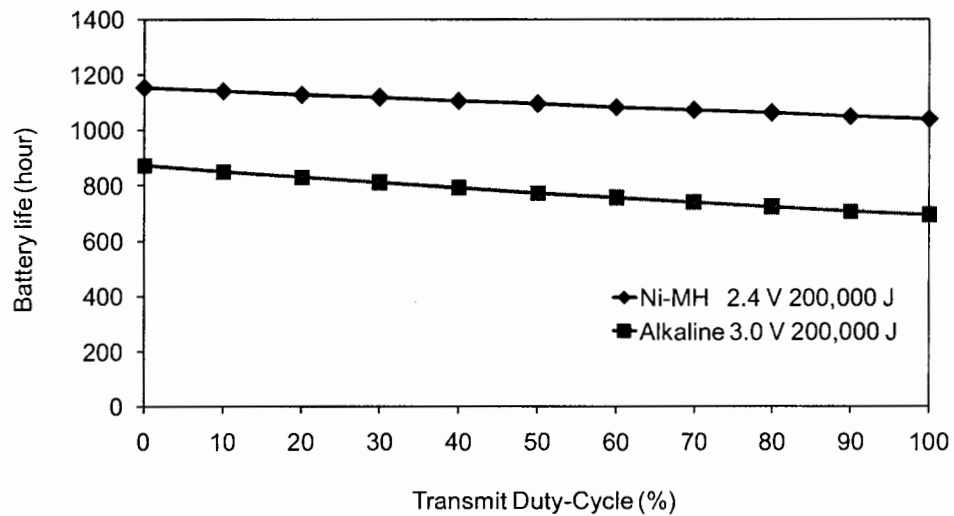
เนื่องจาก Unode มีโหมดการทำงาน 2 โหมด คือโหมดการทำงานปกติ และโหมดการส่งข้อมูล สัดส่วนการทำงานระหว่าง 2 โหมดเรียกว่า “รอบการส่งข้อมูล (Transmit Duty-Cycle)” ซึ่งจะถูกกำหนดโดยเหตุการณ์ หรือการตั้งเวลา เมื่อคำนวณเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของ Unode ในระยะเวลา 1 ชั่วโมง ระหว่างการใช้แบตเตอรี่ Ni-MH กับ Alkaline ซึ่งมีความสัมพันธ์กับรอบการส่งข้อมูลตั้งแต่ 0-100% มีผลการคำนวณดังภาพประกอบ 3-28



ภาพประกอบ 3-28 การเปรียบเทียบอัตราใช้พลังงานใน 1 ชั่วโมงระหว่างการใส่แบตเตอรี่ Ni-MH กับ Alkaline เมื่อ Unode มีรอบการส่งข้อมูลตั้งแต่ 0-100%

จากภาพประกอบ 3-28 เมื่อคำนวณจากรอบการส่งข้อมูลมีค่าตั้งแต่ 0-100% ในระยะเวลา 1 ชั่วโมง การใส่แบตเตอรี่ Alkaline กับ Unode จะใช้พลังงานมากกว่าการใส่แบตเตอรี่ Ni-MH เฉลี่ย 76 จูล หรือคิดเป็น 42% นอกจากนี้ความชันของกราฟแบตเตอรี่ Ni-MH ยังมีความชันน้อยกว่าแบตเตอรี่ Alkaline โดยแบตเตอรี่ Ni-MH มีอัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 0.2 J/Duty-Cycle ในขณะที่แบตเตอรี่ Alkaline มีอัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 0.6 J/Duty-Cycle ภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง

เพื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานระหว่างแบตเตอรี่ 2 ชนิดนี้ จะใช้การคำนวณเพื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานของ Unode โดยสมมติให้แบตเตอรี่ทั้งสองชนิดมีความจุพลังงานเท่ากัน คือ 200,000 จูล และกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่คงที่ตลอดการจ่ายพลังงาน เพื่อให้พลังงานของแบตเตอรี่ทั้งสองชนิดถูกใช้งานจนหมด มีผลการคำนวณอายุการใช้งานสัมพันธ์กับรอบการส่งข้อมูลตั้งแต่ 0 – 100% ดังภาพประกอบ 3-29



ภาพประกอบ 3-29 การเปรียบเทียบอายุการใช้งานแบตเตอรี่ Ni-MH กับ Alkaline
เมื่อแบตเตอรี่มีความจุพลังงานเท่ากันที่ 200,000 จูล

จากภาพประกอบ 3-29 เมื่อ Unode ใช้แบตเตอรี่ที่มีความจุพลังงานเท่ากันที่ 200,000 จูล อายุการใช้งานของ Unode ที่ใช้แบตเตอรี่ Ni-MH จะมีอายุการใช้งานอยู่ระหว่าง 1,040 – 1,155 ชั่วโมง ในขณะที่แบตเตอรี่ Alkaline มีอายุการใช้งานเพียง 691 – 874 ชั่วโมง โดยอายุการใช้งานของ Unode ที่ใช้แบตเตอรี่ Ni-MH จะมีอายุการใช้งานมากกว่า Unode ที่ใช้แบตเตอรี่ Alkaline เฉลี่ย 322 ชั่วโมง หรือคิดเป็น 42%

ผลการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า ยิ่งเราจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับ Unode ค่าลง อัตราการใช้พลังงานก็จะลดลงตามไปด้วย แต่ในการใช้งานจริง Unode ต้องใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากแบตเตอรี่ที่มีจำหน่ายทั่วไป ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าที่ Unode ต้องการ และเมื่อนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกัน ก็มีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าความต้องการของ Unode ทำให้แบตเตอรี่ต้องสูญเสียพลังงานไปโดยเปล่าประโยชน์

การใช้วงจรปรับแรงดันไฟฟ้า (Convertor) เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ที่จะช่วยให้การใช้พลังงานจากแบตเตอรี่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ให้อยู่ในช่วงแรงดันใช้งานที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น Unode สามารถทำงานได้ปกติที่แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 2.2 โวลต์ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 2.2 โวลต์ (ยังใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำการใช้พลังงานของ Unode ก็ยิ่งน้อยลง) โดยสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้า 2.2 โวลต์ได้จากการนำแบตเตอรี่ที่มีแรงดัน 1.2 หรือ 1.5 โวลต์มาต่อขนานกัน แล้วยกระดับแรงดันไฟฟ้า (Boost convertor) ไปที่ 2.2 โวลต์ เมื่อคำนวณเปรียบเทียบอายุการใช้งาน ระหว่างการใช้แรงดันไฟฟ้าจากการต่ออนุกรมแบตเตอรี่

โดยตรง กับการใช้วงจรปรับแรงดันไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเท่ากับ 90% เช่น การใช้ไอซี MCP16301 มีผลการคำนวณดังตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7 การเปรียบเทียบอายุการใช้งานระหว่างการใช้แบตเตอรี่ Ni-MH, Alkaline และการใช้วงจรปรับแรงดันไฟฟ้า

แบตเตอรี่ (ชนิด / แรงดัน / พลังงาน)	วงจรปรับแรงดัน (ชนิด / V_{in} to V_{out})	อายุใช้งานเฉลี่ย(ชั่วโมง)
Ni-MH / 2.4 V / 200,000 J	ไม่มี	1,094
Alkaline / 3.0 V / 200,000 J	ไม่มี	772
Ni-MH / 1.2 V / 200,000 J	Boost / 1.2 to 2.2	1,115
Alkaline / 1.5 V / 200,000 J	Boost / 1.5 to 2.2	1,115

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้วงจรปรับแรงดันไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 90% จะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิด Ni-MH ที่มีความจุพลังงาน 200,000 จูล์ได้เฉลี่ย 21 ชั่วโมงหรือคิดเป็น 2% และเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิด Alkaline ที่มีความจุพลังงานเท่ากันได้เฉลี่ย 343 ชั่วโมงหรือคิดเป็น 44% ดังนั้นการใช้วงจรปรับแรงดันไฟฟ้า สามารถยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ออกไปได้ ส่วนการตัดสินใจใช้หรือไม่ เป็นสิ่งที่ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม เพราะต้องคำนึงถึงระดับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อให้ Unode ยังคงทำงานได้ปกติ และผลกระทบจากต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเมื่อต้องเพิ่มวงจรปรับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งต้องหาจุดคุ้มค่าในการใช้งานต่อไป

3.7.3 สรุปผลการศึกษา

การจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าความต้องการขั้นต่ำของเซนเซอร์โหนด จะทำให้เกิดกำลังสูญเสีย ผลการทดลองด้วยเซนเซอร์โหนด Unode แสดงให้เห็นว่า การใช้แบตเตอรี่ชนิด Alkaline มาต่ออนุกรมกัน เพื่อให้แรงดันไฟฟ้า 3 โวลต์ แบตเตอรี่จะสูญเสียพลังงานไปเฉลี่ย 60% และการใช้แบตเตอรี่ชนิด Ni-MH มาต่ออนุกรมกัน เพื่อให้แรงดันไฟฟ้า 2.4 โวลต์ แบตเตอรี่จะสูญเสียพลังงานไปเฉลี่ย 13% เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้แบตเตอรี่ Alkaline กับ Ni-MH แบตเตอรี่ Alkaline จะใช้พลังงานมากกว่า Ni-MH เฉลี่ย 42% และที่ความจุพลังงานของแบตเตอรี่เท่ากัน อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ Alkaline จะมีอายุการใช้งานน้อยกว่าแบตเตอรี่ Ni-MH เฉลี่ย 42% การใช้วงจรปรับแรงดันไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ 90% จะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิด Ni-MH และชนิด Alkaline ได้เฉลี่ย 2% และ 44% ตามลำดับ

นอกจากนี้ผลการศึกษายังมีประโยชน์สำหรับอุปกรณ์อื่นๆที่ต้องการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อให้ตระหนักถึงความสำคัญของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากการต่ออนุกรมแบตเตอรี่ ทำให้พลังงานไฟฟ้าบางส่วนของแบตเตอรี่ต้องกลายเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์

บทที่ 4

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยระบบเฝ้าตรวจวัดระดับน้ำโดยใช้หัววัดอัจฉริยะแบบอินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิทีฟอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วยการออกแบบและทดสอบหัววัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอล และการเชื่อมต่อหัววัดระดับน้ำเข้ากับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย มีผลสรุปการวิจัยได้ดังนี้

4.1 สรุปผลการวิจัยหัววัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอล

4.1.1 ต้นแบบหัววัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอล

ผลจากการออกแบบและทดลองต้นแบบหัววัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอล สามารถสรุปคุณสมบัติของหัววัดได้ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติของหัววัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอล

คุณสมบัติ	ค่าคุณสมบัติ
ชนิดของหัววัด	หัววัดแบบค่าความจุไฟฟ้า
รูปแบบโครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์	อินเทอร์ดิจิตอล
ชนิดของเหลวที่ใช้วัด	น้ำ
วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กทรอนิกส์	แผ่นวงจรพิมพ์หน้าเดียวชนิด FR-4
ความหนาของวัสดุฐานรอง (PCB)	1.6 มิลลิเมตร
ความหนาของแผ่นทองแดง	0.005 มิลลิเมตร
ชนิดของฉนวนเคลือบผิวทองแดง	Liquid photoimageable solder mask (LPSM)
ขนาดของหัววัด	85 x 381 x 15 (ก. x ย. x ส.) มิลลิเมตร
ย่านวัดระดับน้ำ	0 ถึง 30 เซนติเมตร
อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าต่อระดับน้ำ	0.3 nF ต่อระดับน้ำ 1 เซนติเมตร
อัตราการเปลี่ยนแปลงเวลาคายประจุต่อระดับน้ำ	34 μ Sec ต่อระดับน้ำ 1 เซนติเมตร
หลักการวัดค่าความจุไฟฟ้า	R-C Time constant
วงจรควบคุมการทำงาน	ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์
สัญญาณเอาต์พุต	แบบอนุกรมมาตรฐาน UART
อัตราการส่งข้อมูล	9600 – 38400 บิตต่อวินาที
ความละเอียดในการวัด	0.2 เซนติเมตร
อัตราเร็วสูงสุดการสุ่มเก็บระดับน้ำ	20 ตัวอย่างต่อ 1 วินาที

คุณสมบัติ	ค่าคุณสมบัติ
ระดับแรงดันไฟฟ้าทำงาน	2.1 – 5 โวลต์
ช่วงอุณหภูมิใช้งาน	20 ถึง 40 องศาเซลเซียส
ความต้านทานฉนวนไฟฟ้าต่ำสุด	1 M Ω
อัตราการใช้พลังงาน	Operating Mode: 3.35 mJ/Sec @Vcc 3.0 V TX Mode: 3.35 mJ/Sec @Vcc 3.0 V Sleep Mode 0.50 mJ/Sec @Vcc 3.0 V
ค่าความผิดพลาดสูงสุดในการวัดระดับน้ำ	2.33 %FSO
ค่าความผิดพลาดต่ำสุดในการวัดระดับน้ำ	0.33 %FSO
ค่าความผิดพลาดแบบฮิสเทอรีซิส	1.80 %FSO
ค่าความไม่แน่นอนในการวัดสูงสุด	+ 0.0025 เซนติเมตร
ค่าความไม่แน่นอนในการวัดต่ำสุด	0 เซนติเมตร
ราคาต้นทุนวัสดุ	500-800 บาท ต่อย่านวัด 30 เซนติเมตร

4.1.2 การเชื่อมต่อหัววัดระดับน้ำเข้ากับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

ผลจากการทดลองเชื่อมต่อหัววัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอลเข้ากับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย มีผลสรุปดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ผลสรุปการเชื่อมต่อหัววัดระดับน้ำเข้ากับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

คุณสมบัติ	ค่าคุณสมบัติ
โมดูลสื่อสารไร้สาย	U-node Ver.2
มาตรฐานสื่อสารไร้สาย	IEEE 802.15.4
ความถี่วิทยุ	2.4 GHz
กำลังส่งคลื่นวิทยุสูงสุด	1 mW
ระดับแรงดันไฟฟ้าทำงาน	2.1 – 3.6 โวลต์
ประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลเฉลี่ย	55 % เมื่อส่งข้อมูลทุก 10 นาที จำนวน 6 โหนด 15 % เมื่อส่งข้อมูลทุก 1 วินาที จำนวน 4 โหนด
อัตราการใช้พลังงาน	Operating Mode: 63.58 mJ/Sec @Vcc 3.0 V TX Mode: 80.35 mJ/Sec @Vcc 3.0 V

4.2 ข้อเสนอแนะ

1) การลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนค่าไดโอดีเล็กทรอนิกส์ของน้ำ ด้วยวิธีการเพิ่มอิเล็กทรอนิกส์อ้างอิง แม้จะมีหลักการที่สามารถลดค่าความผิดพลาดลงได้ แต่ในทางปฏิบัติเมื่อนำมาวัดระดับน้ำที่มีอุณหภูมิสูง กลับมีปัญหาที่เกิดจากไอน้ำระเหยเกาะบนอิเล็กทรอนิกส์โทรด ทำให้ค่าระดับน้ำที่วัดได้สูงกว่าความเป็นจริง หัววัดชนิดนี้จึงไม่เหมาะสมกับการวัดระดับน้ำที่มีไอน้ำ

2) การลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการกระเพื่อมของน้ำที่มีการไหล ด้วยวิธีการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) แม้จะสามารถลดค่าความผิดพลาดจากการวัดระดับน้ำที่กระเพื่อมได้ แต่ก็ต้องสูญเสียค่าความละเอียดในการวัด (resolution) ของหัววัดไปด้วย ซึ่งต้องนำไปแก้ไขต่อไป

3) หัววัดยังตอบสนองการวัดระดับน้ำที่ลดลงอย่างรวดเร็วได้ไม่ดีนัก เพราะน้ำที่เกาะบนเซนเซอร์ลดลงช้ากว่าระดับน้ำจริง หากต้องการนำหัววัดนี้ไปใช้วัดเพื่อดูลักษณะคลื่นน้ำ ก็ควรหาวัสดุที่มีความลื่นมาเคลือบอิเล็กทรอนิกส์โทรดแทน LPSM ซึ่งต้องทำการศึกษาวัสดุที่มีความเหมาะสมต่อไป

4) ในการนำหัววัดไปใช้งานจริง อาจมีปัญหาจากความคงทนของวัสดุเคลือบผิว LPSM ซึ่งอาจหลุดร่อนได้เมื่อใช้งานกลางแจ้ง หรือต้องแช่อยู่ในน้ำเป็นเวลานานๆ การใช้วัสดุเคลือบที่มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมแทนการใช้วัสดุ LPSM จะช่วยยืดอายุการใช้งานของหัววัดได้นานยิ่งขึ้น ซึ่งต้องมีการศึกษาเพื่อหาวัสดุเคลือบผิวที่มีความเหมาะสมต่อไป

5) การเชื่อมต่อหัววัดระดับน้ำเข้ากับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ยังมีประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลที่ไม่ดี ต้องมีการปรับปรุงส่วนของ Hardware และ Protocol ของ Unode ให้มีเสถียรภาพการทำงานที่ดียิ่งขึ้นต่อไป

6) หัววัดแบบอินเทอร์ดิจิตอล เป็นหัววัดที่มีการทำงานระหว่างแรงสองชนิดคือแรงจากสนามไฟฟ้าที่มาจากอิเล็กทรอนิกส์โทรด และแรงระหว่างพันธะในอะตอมหรือโมเลกุลของวัสดุไดโอดีเล็กทรอนิกส์ที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.1.1 วัสดุไดโอดีเล็กทรอนิกส์ที่ต่างชนิดกันหรือมีส่วนผสมต่างกันก็มีแรงพันธะที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งเราสามารถมาวัดได้จากค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์โทรด หลักการนี้นอกจากจะนำมาใช้วัดระดับน้ำในงานวิจัยนี้แล้ว เรายังสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อทำเป็นหัววัดชนิดอื่นๆได้อีกมากมาย เช่น หัววัดค่าความชื้นในข้าว หัววัดค่าความชื้นในดิน หัววัดปริมาณสารอาหารในดิน หัววัดความเข้มข้นน้ำยาฯ ฯลฯ ดังนั้นหัววัดแบบอินเทอร์ดิจิตอลจึงควรได้รับการนำไปพัฒนาต่อ เพื่อให้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้นต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] Siemens AG, Level measurement guide, 2009
- [2] หุ่นจำลองวิเคราะห์การไหลของน้ำ โครงการแก้มลิงอเนกประสงค์คลองสนามชัย-มหาชัย, สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย, 2009
- [3] ระบบเฝ้าระวังน้ำท่วมบนถนน สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร, <http://dds.bangkok.go.th/Floodmon/> , 2010
- [4] S. E. Woodard and B. D. Taylor, “A Wireless Fluid-Level Measurement Technique,” *Sensors and Actuators, A* 137, pp. 268–278, 2007.
- [5] K. S. Chiang Kuang, S. T. Quek, and M. Maalej, “Remote Flood Monitoring System based on Plastic Optical Fibres and Wireless Motes,” *Sensors and Actuators, A* 147, pp. 449–455, 2008.
- [6] G. Nikolov and B. Nikolova. “Virtual Techniques for Liquid Level Monitoring Using Differential Pressure Sensors,” *Recent*, Vol 9, No.2(23), 2008.
- [7] G. Zheng, H. Zong, X. Zhuan, and J. Luan, “Fast Dynamic Liquid Level Sensor based on Liquid Resistance,” *Africon*, 2007.
- [8] A. Thomsen, B. Hansen, and K. Schelde, “Application of TDR to Water Level Measurement,” *Journal of Hydrology*, 236, pp. 252–258, 2000.
- [9] A. Cataldo, M. Vallone, L. Tarricone, and F. Attivissimo, “An Evaluation of Performance Limits in Continuous TDR Monitoring of Permittivity and Levels of Liquid Materials,” *Measurement*, 41, pp. 719–730, 2008.
- [10] H. Canbolat, “A Novel Level Measurement Technique Using Three Capacitive Sensors for Liquids,” *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, Vol. 58, No. 10, October 2009.
- [11] A. Crabit, F. Colin, J. Stephane, B. H. Ayroles, and F. Garnier, “Soft Water Level Sensors for Characterizing the Hydrological Behaviour of Agricultural Catchments,” *Sensors*, 11, pp. 4656-4673, 2011.
- [12] J. Kim, Y. Han, and H. Hahn, “Embedded implementation of image-based water-level measurement system,” *IET Comput. Vis.*, Vol. 5, Iss. 2, pp. 125 – 133, 2011.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [13] F. Reverter, X. Li, and G. C.M. Meijer, "Liquid-level Measurement System based on A Remote Grounded Capacitive Sensor," *Sensors and Actuators, A* 138, pp. 1–8, 2007.
- [14] K Spaargaren, "Capacitive Level Gauge," U.S. Patent 4553434, 1985.
- [15] J. R. Hart, "Capacitive Fluid Level Sensor," U.S. Patent 5001596, 1990.
- [16] A. M. Matulak, "Capacitive Liquid Level Indicator," U.S. Patent 6164132, 2000.
- [17] Irrigation Training and Research Center, "Water Level Sensors and Datalogger Testing and Demonstration," ITRC Report, pp. 99-002, 1998.
- [18] J. Motzer, "A Puls Radar Gauge for Level Measurement and Process Control," *IEEE MTT-S Digest*, 2000.
- [19] A. V. Mamishev, K. S. Rajan, Y. Du and M. Zahn, "Inter-digital Sensors and Transducers," *IEEE Proceedings*, 92, No. 5, pp. 808-845, 2004.
- [20] N. Tesla, "Electric condenser," U.S. Patent 464 667, 1891.
- [21] A.E. H. Love, "Some electrostatic distributions in two dimensions," in *Proc. London Mathematical Soc.*, vol. 22, Apr. 1923, pp. 339–369.
- [22] P. Fürjes, A. Kovács, Cs. Dücs^o, M. Ádáma, B. Müller b, and U. Mescheder, "Porous Silicon-based Humidity Sensor with Interdigital Electrodes and Internal Heaters," *Sensors and Actuators, B* 95, pp. 140–144, 2003.
- [23] Md. N. Alam, R. H. Bhuiyan, R. A. Dougal, and M Ali, "Concrete Moisture Content Measurement Using Interdigitated Near-Field Sensors," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 10, No. 7, July 2010.
- [24] M. Syaifudin, B. A. Rahman, S. C. Mukhopadhyay, and P. L. Yu, "Novel Sensors for Food Inspections," *Sensors & Transducers Journal*, Vol. 114, Issue 3, pp. 1-40, March 2010.
- [25] S. C. Mukhopadhyay and C. P. Gooneratne, "A Novel Planar-Type Biosensor for Noninvasive Meat Inspection," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 7, No. 9, September, 2007.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [26] T. Blecha and Iosef Pihera, "Epoxy Resin Curing Process Evaluation Based on Signal Frequency Analysis from Interdigital Structure Sensor," Electronic System-Integration Technology Conference 3rd (ESTC), 2010.
- [27] J. Wan Kim, P. Pasupathy, S. Zhang, and D. P. Neikirk, "Measurement of Liquid Complex Dielectric Constants Using Non-contact Sensors," IEEE Sensors Conference, 2009.
- [28] Y. Wang, N. Chong, Y.L. Cheng, H.L.W. Chan, and C.L. Choy, "Dependence of Capacitance on Electrode Configuration for Ferroelectric Films with Interdigital Electrodes," Microelectronic Engineering, Vol 66, pp. 880–886, 2003.
- [29] R. Igreja and C. J. Dias, "Analytical Evaluation of The Inter-digital Electrodes Capacitance for A Multi-layered Structure, Sensors and Actuators," A 112, pp. 291-301, 2004.
- [30] E. Terzic, C.R. Nagarajah, and M. Alamgir, "Capacitive Sensor-based Fluid Level Measurement in A Dynamic Environment using Neural Network," Engineering Applications of Artificial Intelligence, 23, pp. 614–619, 2010.
- [31] L.F. Akyildiz and M.C. Vuran., "Wireless Sensor Networks," 1st ed, WSN Applications Chapter 2, John Wiley & Sons Ltd 2010.
- [32] G. Anastasi, M. Conti, M.D. Francesco, and A. Passarella. "Energy conservation in wireless sensor networks: A survey," Ad Hoc Networks, Vol. 7, pp. 537–568, 2009.

ภาคผนวก

บทความวิชาการ



ที่ ศธ.0514.4.1.5/๔7๕

คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
จังหวัดขอนแก่น 40002

11 พฤษภาคม 2555

เรื่อง แจ้งการตีพิมพ์บทความ

เรียน นายธิตินันท์ ตะเกาน้อย

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิชาการเรื่อง “การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียของเซนเซอร์โหนด (Unode)” เพื่อลงตีพิมพ์ในวิศวกรรมสาร มข. นั้น

บัดนี้ กองบรรณาธิการพิจารณาแล้ว เห็นสมควรตีพิมพ์บทความวิชาการของท่านลงใน วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 39 ฉบับที่ 2 ประจำเดือนเมษายน – มิถุนายน 2555 ทั้งนี้ จึงขอแจ้งให้ท่านชำระเงิน เพื่อเป็นค่าตีพิมพ์บทความ จำนวน 1,000 บาท (หนึ่งพันบาทถ้วน) โดยโอนเข้าบัญชีเงินรายได้คณะ วิศวกรรมศาสตร์ เลขที่บัญชี 5513-00234-7 ธนาคารไทยพาณิชย์ สาขามหาวิทยาลัยขอนแก่น และโปรด ส่งหลักฐานการโอนเงินไปที่กองบรรณาธิการวิศวกรรมสาร มข. E-mail: enjournal@kku.ac.th หรือชำระเป็น เงินสดที่เจ้าหน้าที่ประจำวิศวกรรมสาร มข. ตึกเพียรวิจิตร ชั้น 7 ภายในระยะเวลา 2 สัปดาห์ หากพ้นระยะเวลา ที่กำหนด จะถือว่าท่านสละสิทธิ์ในการตีพิมพ์บทความ

จึงเรียนมาเพื่อทราบและดำเนินการต่อไป

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ปริญญา จินดาประเสริฐ)

บรรณาธิการ

วิศวกรรมสาร มข. โทร. 043-362145-6 ต่อ 603 โทรสาร 043-362142

หมายเหตุ : หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติมกรุณาติดต่อ คุณปรัชญาพร ไกรศรีวรรณนะ (เจ้าหน้าที่ประจำวิศวกรรมสาร มข.)

ที่อยู่ : วิศวกรรมสาร มข. ตึกเพียรวิจิตร ชั้น 7 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

E-mail : enjournal@kku.ac.th



KKU Engineering Journal

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

การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียของเซนเซอร์โหนด (Unode)

Analysis of power loss in sensor node (Unode)

ธิตินันท์ ตะพานน้อย¹⁾ พรชัย พุกภักดิ์ทรานนท์²⁾ วรณรัช สันติอมรทัต³⁾ และ คณดิถ เจริญพัฒนานนท์⁴⁾

Titinan Tapaonoi¹⁾ Pornchai Phukpattaranont²⁾ Wannarat Suntiamorntut³⁾
and Kanadit Chetpattananondh⁴⁾

¹⁾ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90110

²⁾ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90110

³⁾ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90110

⁴⁾ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90110

Received November

Accepted August

บทคัดย่อ

เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายมีความสำคัญ และมีแนวโน้มที่จะนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานมากขึ้นในอนาคต ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ คือ การเพิ่มอายุการใช้งานแบตเตอรี่ของเซนเซอร์โหนดให้นานที่สุด การนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกัน นับว่าเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดในการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการของเซนเซอร์โหนด แต่จากการศึกษาโดยใช้เซนเซอร์โหนด Unode กลับพบว่า การนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกัน จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าส่วนเกิน ซึ่งกลายเป็นพลังงานสูญเสีย ที่ส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลง 13-60% และยังเป็นสาเหตุทำให้การใช้พลังงาน ระหว่างโหมดการทำงานปกติกับโหมดการส่งข้อมูล มีความแตกต่างกันเพิ่มขึ้น 11-26%

คำสำคัญ : กำลังไฟฟ้าสูญเสีย การอนุรักษ์พลังงาน เซนเซอร์โหนด เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

Abstract

Wireless sensor networks are important, and have potential in many innovations in the future. One of the most important factors is to increase the lifetime of the battery power as long as possible. It is an easy method to increase the supply voltage to meet the requirements of sensor nodes (Unode) by connecting them in series. However, our study shows that the excessive supply voltage can produce power loss in the device more than in necessary. In the experimental results, the lifetime of battery has been deducted by 13-60%. Moreover, it also causes the increase in the difference of power consumption between normal operating mode and transmitting mode at 11-26%.

Keywords : Power loss, Energy conservation, Sensor node, Wireless sensor networks

* Corresponding author. Email address: T_097277020@hotmail.com



KKU Engineering Journal

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

การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียของเซนเซอร์โหนด (Unode)

Analysis of power loss in sensor node (Unode)

ธิตินันท์ ตะพานน้อย¹⁾ พรชัย พุกพัชร์ภทรานนท์²⁾ วรณรัช สันติอมรทัต³⁾ และ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์⁴⁾

Titinan Tapaonoi¹⁾ Pornchai Phukpattaranont²⁾ Wannarat Suntiamorntut³⁾

and Kanadit Chetpattananondh⁴⁾

¹⁾ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90110

²⁾ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90110

³⁾ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90110

⁴⁾ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90110

Received November

Accepted August

บทคัดย่อ

เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายมีความสำคัญ และมีแนวโน้มที่จะนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานมากขึ้นในอนาคต ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ คือ การเพิ่มอายุการใช้งานแบตเตอรี่ของเซนเซอร์โหนดให้นานที่สุด การนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกัน นับว่าเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดในการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการของเซนเซอร์โหนด แต่จากการศึกษาโดยใช้เซนเซอร์โหนด Unode กลับพบว่า การนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกัน จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าส่วนเกิน ซึ่งกลายเป็นพลังงานสูญเสีย ที่ส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลง 13-60% และยังเป็นสาเหตุทำให้การใช้พลังงาน ระหว่างโหมดการทำงานปกติกับโหมดการส่งข้อมูล มีความแตกต่างกันเพิ่มขึ้น 11-26%

คำสำคัญ : กำลังไฟฟ้าสูญเสีย การอนุรักษ์พลังงาน เซนเซอร์โหนด เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

Abstract

Wireless sensor networks are important, and have potential in many innovations in the future. One of the most important factors is to increase the lifetime of the battery power as long as possible. It is an easy method to increase the supply voltage to meet the requirements of sensor nodes (Unode) by connecting them in series. However, our study shows that the excessive supply voltage can produce power loss in the device more than in necessary. In the experimental results, the lifetime of battery has been deducted by 13-60%. Moreover, it also causes the increase in the difference of power consumption between normal operating mode and transmitting mode at 11-26%.

Keywords : Power loss, Energy conservation, Sensor node, Wireless sensor networks

* Corresponding author. Email address: T_097277020@hotmail.com

1. บทนำ

ในอนาคตมนุษย์และเครื่องจักร (Human and machine) จะมีความต้องการรับรู้สถานะแวดล้อมรอบตัวในรูปแบบเวลาจริง (Real time) เพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สามารถปรับตัวได้อย่างเหมาะสมกับสถานะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป ลดความสูญเสียชีวิตและทรัพย์สิน เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต และอำนวยความสะดวกในการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ ตัวอย่างเช่น ระบบป้องกันก่อนการเกิดอุบัติเหตุ ที่สามารถพยากรณ์เหตุการณ์ร้ายแรงได้จากการวิเคราะห์สถานะแวดล้อมรอบตัว แล้ววางแผนป้องกันอุบัติเหตุได้อย่างแม่นยำ หรือระบบป้องกันศัตรูพืชในการเกษตร ที่สามารถตรวจจับการเกิดโรคและแมลงได้ตั้งแต่เบื้องต้น แล้วปล่อยสารเคมียับยั้งก่อนที่จะเกิดการแพร่ระบาดออกไปบริเวณอื่น ซึ่งช่วยลดการใช้สารเคมีได้เป็นอย่างมาก

การที่ระบบดังกล่าวจะรับรู้สถานะแวดล้อมได้อย่างทั่วถึง จำเป็นต้องมีข้อมูลทางกายภาพที่ได้จากการวัดด้วยเซนเซอร์ซึ่งถูกติดตั้งไว้ครอบคลุมทั่วพื้นที่เป้าหมาย ในกรณีเป็นพื้นที่ภายในอาคาร การใช้เซนเซอร์เชื่อมต่อสื่อสารผ่านสายยังคงมีความน่าเชื่อถือและตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้เป็นอย่างดี แต่หากเป็นการใช้งานภายนอกอาคารซึ่งมีบริเวณกว้าง ไม่มีระบบไฟฟ้าและแหล่งพลังงานทดแทนอื่นๆ เช่น การใช้งานในป่ารกทึบ หรือการใช้งานได้ทะเลที่การส่งข้อมูลและจ่ายพลังงานให้กับเซนเซอร์ผ่านทางสายเป็นสิ่งที่ทำได้ยากลำบากทั้งในแง่เทคนิคและความคุ้มค่าในการลงทุน ดังนั้น จึงมีการศึกษาวิจัยเพื่อสร้างเซนเซอร์ไร้สายที่ใช้งานง่าย ขนาดเล็ก และมีราคาถูก สามารถใช้งานได้ทุกสถานที่ โดยไม่ต้องบำรุงรักษาหรือเปลี่ยนพลังงานใหม่ตลอดอายุการใช้งาน [1]

ในการใช้งานเซนเซอร์ไร้สายจะถูกติดตั้งในพื้นที่เป็นจำนวนมาก จนสามารถสร้างเครือข่าย

สื่อสารขนาดใหญ่ขึ้นมาเป็นของตนเองได้ เรียกเครือข่ายสื่อสารนี้ว่า “เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless sensor networks)” และเรียกอุปกรณ์ไร้สายที่ทำงานในเครือข่ายนี้ว่า “เซนเซอร์โหนด (Sensor node)”

จากเป้าหมายในการสร้างเซนเซอร์ไร้สายที่ต้องการให้เป็นเซนเซอร์ที่ใช้งานง่าย ขนาดเล็ก และมีราคาถูก สามารถใช้งานได้ทุกสถานที่โดยไม่ต้องบำรุงรักษา หรือเปลี่ยนพลังงานใหม่ตลอดอายุการใช้งาน ทำให้ทางเลือกของแหล่งพลังงานที่เหมาะสมในขณะนี้คือ การใช้แบตเตอรี่ขนาดเล็ก และเพื่อให้แบตเตอรี่สามารถจ่ายพลังงานให้กับเซนเซอร์ได้ยาวนาน การอนุรักษ์พลังงานสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย จึงเป็นหัวข้อหนึ่งที่มีการศึกษาวิจัยกันอย่างกว้างขวาง โดยมีเป้าหมายเพื่อลดการใช้พลังงานของเซนเซอร์โหนดให้เหลือน้อยที่สุด จากการสำรวจผลงานวิจัยที่ผ่านมา สามารถแบ่งวิธีการอนุรักษ์พลังงาน ได้ 3 วิธี [2] ดังนี้

1) วิธีการกำหนดวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycling) เพื่อให้เซนเซอร์โหนดเข้าสู่โหมดหลับ (Sleep mode) เมื่อไม่ได้ใช้งาน [3-4]

2) วิธีการจัดการข้อมูลและเส้นทางในเครือข่าย (Data-driven) เพื่อให้ใช้พลังงานในการดำเนินการน้อยที่สุด [5-7]

3) วิธีการจัดวางตำแหน่งหรือเคลื่อนที่เซนเซอร์โหนดอย่างเหมาะสม (Mobility-base) เพื่อให้ครอบคลุมทั่วพื้นที่ โดยใช้จำนวนของเซนเซอร์โหนดและพลังงานน้อยที่สุด [8-9]

หากกล่าวโดยสรุปแล้ว วิธีการต่างๆ ที่ได้มีการศึกษามา จะให้ความสำคัญไปที่การหาจุดที่เหมาะสมในด้านการบริหารจัดการตามสถานการณ์ เพื่อลดเวลาทำงานของเซนเซอร์โหนด (Operating time) ให้เหลือน้อยที่สุด แต่ยังคงขาดผลการศึกษาที่

เกี่ยวข้องกับพลังงานสูญเสียจากการใช้พลังงานที่ไม่มีประสิทธิภาพของเซนเซอร์โหนดเอง

ปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นเมื่อเราใช้แบตเตอรี่ขนาดเล็ก (ขนาด AA หรือ AAA) จ่ายพลังงานให้กับเซนเซอร์โหนด คือ แบตเตอรี่ที่มีจำหน่ายโดยส่วนใหญ่จะมีระดับแรงดันไฟฟ้าเพียง 1.5 โวลต์ ซึ่งต่ำกว่าความต้องการของเซนเซอร์โหนด ที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าประมาณ 2 ถึง 5 โวลต์ ในการใช้งานจึงนิยมนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นเป็น 3 โวลต์ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดที่เราสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้โดยไม่ต้องอาศัยวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าใดๆเพิ่มเติม

แต่เมื่อทำการศึกษาข้อมูลอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นส่วนประกอบของเซนเซอร์โหนดกลับพบว่า อุปกรณ์เหล่านี้สามารถทำงานได้ที่แรงดันไฟฟ้าได้ต่ำกว่า 3 โวลต์ โดยเฉพาะในส่วนที่เป็นการทำงานแบบดิจิทัล นอกจากนี้ วงจรบางส่วนก็ไม่ได้ใช้แรงดันไฟฟ้าที่มาจากแบตเตอรี่โดยตรง แต่จะใช้แรงดันไฟฟ้าที่ผ่านวงจรรักษาระดับแรงดันมาแล้ว (Voltage Regulator) เช่น ส่วนที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการรับ-ส่งคลื่นวิทยุ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกำลังส่งคลื่นวิทยุของเซนเซอร์โหนด แกว่งไปตามแรงดันของแบตเตอรี่ แต่ผลกระทบจากการใช้วงจรรักษาระดับแรงดันคือ ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเป็นความร้อน ซึ่งแปรผันตรงกับความแตกต่างระหว่างแรงดันของแบตเตอรี่กับแรงดันเอาต์พุตของวงจรรักษาระดับแรงดัน ยิ่งความแตกต่างระหว่างแรงดันทั้งสองมีค่ามาก พลังงานสูญเสียเป็นความร้อนก็ยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย

ส่วนแสดงสถานะการทำงาน เป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยให้ผู้ใช้งานตรวจสอบสถานะการทำงานของเซนเซอร์โหนดได้อย่างสะดวก เช่น สถานะการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟ และสถานะการรับส่งข้อมูล ซึ่ง

นิยมใช้การแสดงผลด้วยหลอดไฟชนิด LED ที่รับแรงดันไฟฟ้ามาจากแบตเตอรี่โดยตรง ระดับความสว่างจึงแปรเปลี่ยนตามระดับแรงดันของแบตเตอรี่ด้วย หากแบตเตอรี่มีแรงดันไฟฟ้าสูงความสว่างของหลอด LED ก็จะมีมาก จนบางครั้งอาจมากเกินไปจนทำให้จ้าเกินไป เกิดเป็นพลังงานสูญเสียในรูปแบบของแสงได้ด้วยเช่นกัน

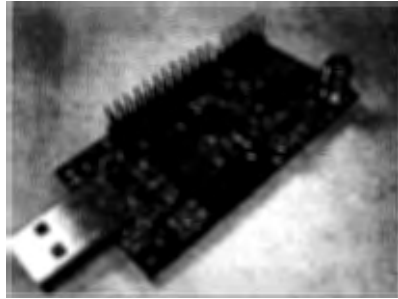
จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีสมมุติฐานที่เป็นไปได้ว่า การต่ออนุกรมแบตเตอรี่เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับเซนเซอร์โหนด อาจทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าความต้องการใช้งานจริง ทำให้แบตเตอรี่ต้องสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งไปเป็นความร้อนภายในวงจรรักษาระดับแรงดัน และแสงสว่างของหลอดไฟแสดงสถานะการทำงานที่สว่างมากเกินไปจนทำให้จ้าเกินไป ส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลง

บทความนี้จึงเป็นการนำเสนอผลการศึกษาลงพลังงานสูญเสียของเซนเซอร์โหนด ที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าส่วนเกินจากการต่ออนุกรมแบตเตอรี่ ซึ่งส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลง ผลการทดลองจะแสดงให้เห็นปริมาณของกำลังไฟฟ้าสูญเสียและการเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานและอายุการใช้งาน ระหว่างการใช้แบตเตอรี่ชนิด Ni-MH กับแบตเตอรี่ชนิด Alkaline ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าต่างกัน ผลการศึกษาจะช่วยให้ผู้นำเซนเซอร์โหนดไปใช้งาน หรือผู้ที่กำลังจะออกแบบเซนเซอร์โหนด ได้คำนึงถึงผลกระทบจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าสูงเกินความจำเป็น ทำให้แบตเตอรี่ต้องสูญเสียพลังงานไปโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งจะเป็นแนวทางนำไปสู่การเลือกใช้วงจรปรับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อไป

2. วิธีการ

ในการศึกษาจะใช้เซนเซอร์โหนด Unode ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นเซนเซอร์โหนดสำหรับใช้ในการ

ทดลอง ซึ่งได้รับการออกแบบและพัฒนาโดยภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ มีพื้นฐานการพัฒนาจาก Tmote sky มีอุปกรณ์หลักประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ MSP430f1611 และส่วนรับส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุย่านความถี่ 2.4 GHz มาตรฐาน IEEE 802.15.4 โดยใช้ไอซี CC2420 มีไฟแสดงสถานะการทำงาน 3 ดวง รองรับช่วงแรงดันใช้งาน 2.1-3.6 โวลต์ และมีกำลังส่งคลื่นวิทยุสูงสุดที่ 1 มิลลิวัตต์ (mW)

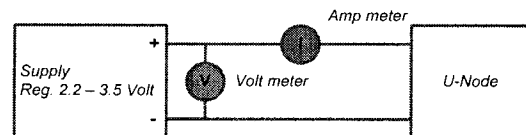


รูปที่ 1 เซนเซอร์โหนด Unode ที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองเพื่อหาอัตราการใช้พลังงาน เป็นการพิจารณาเฉพาะการใช้พลังงานของ Hardware เป็นหลัก จึงไม่มีการใช้โปรโตคอลใดๆ เพื่อลดภาระของการประมวลผลให้น้อยที่สุด กำหนดให้เป็นการสื่อสารแบบ Single-hop คือ Unode เป็นตัวส่ง (source node) และใช้ Tmote เป็นตัวรับซึ่งต่ออยู่กับเครื่องคอมพิวเตอร์ (Destination node) โหนดทั้งสองมีระยะห่างกันประมาณ 1 ฟุต Unode ใช้กำลังส่งคลื่นวิทยุคงที่ 1mW ทำการทดลองโดยวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน Unode ซ้ำ 10 ครั้ง ใน 2 โหมดการทำงาน คือ โหมดการทำงานปกติ (Operating mode) และโหมดการส่งข้อมูล (TX mode) โดยโหมดการทำงานปกติจะหมายถึงเซนเซอร์โหนดอยู่ในช่วงรอและพร้อมที่จะรับ-ส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ ในโหมดนี้ LED แสดงสถานะการต่อแหล่งจ่ายไฟจะติดสว่างเพียง 1 ดวง ส่วนโหมดการส่งข้อมูลจะหมายถึง เซนเซอร์โหนดกำลังส่งข้อมูล

ออกอากาศผ่านทางคลื่นวิทยุ ในโหมดนี้ LED แสดงสถานะการส่งข้อมูลจะติดสว่างเพิ่มอีก 1 ดวง รวมเป็น 2 ดวง จากนั้นนำค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัด 10 ครั้งมาหาค่าเฉลี่ย แล้วคำนวณเป็นค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละโหมด

ในการทดลอง Tmote ซึ่งเป็นตัวรับจะใช้ไฟจากพอร์ต USB ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ส่วน Unode จะรับไฟจากแหล่งจ่ายตั้งแต่ 2.2 ถึง 3.5 โวลต์ (จากการทดลองถ้าแรงดันน้อยกว่านี้ Unode ไม่สามารถส่งข้อมูลได้ และหากมากกว่านี้ Unode จะเสียหาย) โดยปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าครั้งละ 0.1 โวลต์ แล้วบันทึกแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดด้วย Multimeter ยี่ห้อ Fluke รุ่น 117 วิธีการวัดมีไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 2



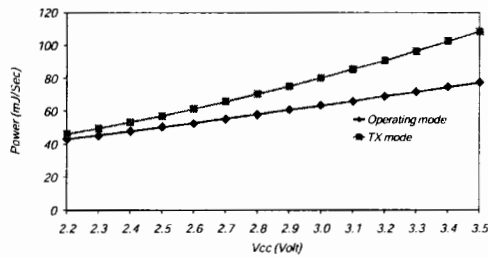
รูปที่ 2 วิธีการวัดเพื่อหาลำดับกำลังไฟฟ้าของเซนเซอร์โหนดที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 2.2 ถึง 3.5 โวลต์

เนื่องจากปัจจุบัน แบตเตอรี่ขนาดเล็กที่มีจำหน่ายทั่วไป (ขนาด AA หรือ AAA) มีแรงดันไฟฟ้าให้เลือกใช้งานเพียง 2 แบบ คือ แบบแรงดันไฟฟ้า 1.2 โวลต์จากเป็นแบตเตอรี่ชนิด Ni-MH และแบบแรงดันไฟฟ้า 1.5 โวลต์จากเป็นแบตเตอรี่ชนิด Alkaline ดังนั้นในการหาปริมาณของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากการนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกัน และการเปรียบเทียบอายุการใช้งาน จะพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ 2 ชนิดนี้

3. ผลการศึกษาและการอภิปราย

ผลที่ได้จากการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้างดแสดงในรูปที่ 2 จะถูกคำนวณเป็นค่ากำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็น มิลลิจูลต่อวินาที (mJ/Sec) ซึ่งมี

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของ Unode กับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Unode ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของ Unode กับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Unode

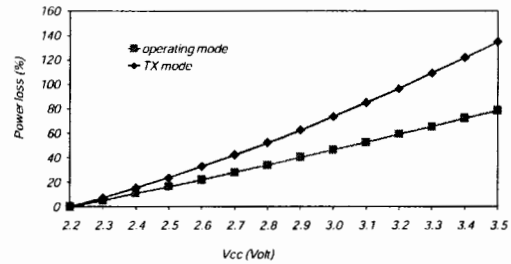
จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่า กำลังไฟฟ้าของ Unode เพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย โดยมีกำลังไฟฟ้าต่ำสุด 43.4 mJ/Sec ที่แรงดันไฟฟ้า 2.2 โวลต์ในโหมดการทำงานปกติ และมีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 108.6 mJ/Sec ที่แรงดันไฟฟ้า 3.5 โวลต์ในโหมดการส่งข้อมูล นอกจากนี้แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้กำลังไฟฟ้าของทั้งสองโหมดมีความแตกต่างกันมากขึ้น โดยที่แรงดัน 2.4 โวลต์ ในโหมดการส่งข้อมูลจะใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากโหมดการทำงานปกติ 5.3 mJ/Sec หรือคิดเป็น 11% ในขณะที่แรงดันไฟฟ้า 3 โวลต์ โหมดการส่งข้อมูลจะใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากโหมดการทำงานปกติ 16.7 mJ/Sec หรือคิดเป็น 26%

จากการทดลอง แรงดันไฟฟ้า 2.2 โวลต์เป็นระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ Unode ยังคงทำงานได้ตามปกติ (ทั้งส่วนดิจิทัลอินเทอร์เฟซและส่วนภาครับส่งคลื่นวิทยุ) ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากภาครับ-ส่งคลื่นวิทยุภายใน CC2420 ต้องการแรงดันไฟฟ้าใช้งานจริงเพียง 1.8 โวลต์ ซึ่งได้มาจากการลดแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวงจร Low Drop Out Regulator (LDO) ที่อยู่ภายใน CC2420 เอง และไม่ใครคอนโทรลเลอร์ MSP430f1611 ก็ต้องการแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเพียง 1.8 โวลต์เช่นกัน ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับ

เซนเซอร์โหนดมากกว่า 2.2 โวลต์ เป็นผลมาจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$P_{\text{loss}} = \left(\frac{P - P_{2.2V}}{P_{2.2V}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

มีความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของกำลังไฟฟ้าสูญเสียกับแรงดันไฟฟ้าส่วนเกินที่ได้จากการคำนวณดังรูปที่ 4

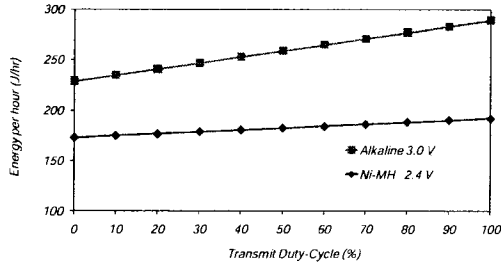


รูปที่ 4 ร้อยละของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าสูงเกินกว่าความต้องการต่ำสุดของ Unode ที่ 2.2 โวลต์

จากรูปที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบร้อยละของกำลังไฟฟ้าสูญเสียระหว่างการเลือกใช้แรงดันไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้า 2.4 โวลต์ที่ได้จากการต่ออนุกรมแบตเตอรี่ Ni-MH กับการเลือกใช้แรงดันไฟฟ้า 3 โวลต์ที่ได้จากการต่ออนุกรมแบตเตอรี่ Alkaline จะเห็นได้ว่า กำลังไฟฟ้าสูญเสียเฉลี่ยทั้งสองโหมดของ Ni-MH มีค่าเท่ากับ 13% ในขณะที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียเฉลี่ยทั้งสองโหมดของ Alkaline สูงถึง 60% การใช้แบตเตอรี่ Alkaline จึงทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียใน Unode มากกว่าการใช้แบตเตอรี่ Ni-MH เพราะมีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า

เนื่องจาก Unode มีโหมดการทำงาน 2 โหมด คือโหมดการทำงานปกติ และโหมดการส่งข้อมูล สัดส่วนการทำงานระหว่าง 2 โหมดเรียกว่า "รอบการส่งข้อมูล (Transmit Duty-Cycle)" ซึ่งจะถูกกำหนดโดยเหตุการณ์ หรือการตั้งเวลา เมื่อคำนวณ

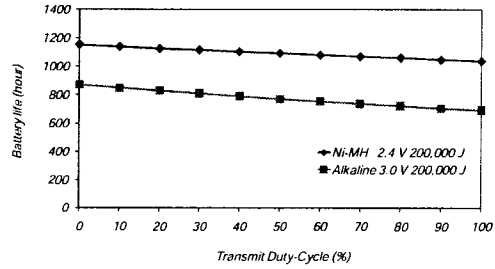
เปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของ Unode ในระยะเวลา 1 ชั่วโมง ระหว่างการใช้แบตเตอรี่ Ni-MH กับ Alkaline ซึ่งมีความสัมพันธ์กับรอบการส่งข้อมูลตั้งแต่ 0-100% มีผลการคำนวณดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบอัตราใช้พลังงานใน 1 ชั่วโมง ระหว่างการใช้แบตเตอรี่ Ni-MH กับ Alkaline เมื่อ Unode มีรอบการส่งข้อมูลตั้งแต่ 0-100%

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า เมื่อรอบการส่งข้อมูลมีค่าตั้งแต่ 0-100% ในระยะเวลา 1 ชั่วโมงการใช้แบตเตอรี่ Alkaline กับ Unode จะใช้พลังงานมากกว่าการใช้แบตเตอรี่ Ni-MH เฉลี่ย 76 จูล หรือคิดเป็น 42% นอกจากนี้ความชันของกราฟแบตเตอรี่ Ni-MH ยังมีความชันน้อยกว่าแบตเตอรี่ Alkaline โดยแบตเตอรี่ Ni-MH มีอัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 0.2 J/Duty-Cycle ในขณะที่แบตเตอรี่ Alkaline มีอัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 0.6 J/Duty-Cycle ภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง

เพื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานระหว่างแบตเตอรี่ 2 ชนิดนี้ จะใช้การคำนวณเพื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานของ Unode โดยสมมติให้แบตเตอรี่ทั้งสองชนิดมีความจุพลังงานเท่ากันคือ 200,000 จูล และกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่คงที่ตลอดการจ่ายพลังงาน เพื่อให้พลังงานของแบตเตอรี่ทั้งสองชนิดถูกใช้งานจนหมด มีผลการคำนวณอายุการใช้งานสัมพันธ์กับรอบการส่งข้อมูลตั้งแต่ 0 - 100% ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบอายุการใช้งานแบตเตอรี่ Ni-MH กับ Alkaline เมื่อแบตเตอรี่มีความจุพลังงานเท่ากันที่ 200,000 จูล

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า เมื่อ Unode ใช้แบตเตอรี่ที่มีความจุพลังงานเท่ากันที่ 200,000 จูล อายุการใช้งานของ Unode ที่ใช้แบตเตอรี่ Ni-MH จะมีอายุการใช้งานอยู่ระหว่าง 1,040 - 1,155 ชั่วโมง ในขณะที่แบตเตอรี่ Alkaline มีอายุการใช้งานเพียง 691 - 874 ชั่วโมงโดยอายุการใช้งานของ Unode ที่ใช้แบตเตอรี่ Ni-MH จะมีอายุการใช้งานมากกว่า Unode ที่ใช้แบตเตอรี่ Alkaline เฉลี่ย 322 ชั่วโมงหรือคิดเป็น 42%

ผลจากการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า ยิ่งเราจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับ Unode ต่ำลง อัตราการใช้พลังงานก็จะลดลงตามไปด้วย แต่ในการใช้งานจริง Unode ต้องใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากแบตเตอรี่ที่มีจำหน่ายทั่วไป ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าที่ Unode ต้องการ และเมื่อนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกัน ก็มีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าความต้องการของ Unode ทำให้แบตเตอรี่ต้องสูญเสียพลังงานไปโดยเปล่าประโยชน์

การใช้วงจรปรับแรงดันไฟฟ้า (Convertor) เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ที่จะช่วยให้การใช้พลังงานจากแบตเตอรี่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ให้อยู่ในช่วงแรงดันใช้งานที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น Unode สามารถทำงานได้ปกติที่แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 2.2 โวลต์ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 2.2 โวลต์ (ยิ่งใช้

แรงดันไฟฟ้าต่ำการใช้พลังงานของ Unode ก็ยิ่งน้อยลง) โดยสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้า 2.2 โวลต์ได้จากการนำแบตเตอรี่ที่มีแรงดัน 1.2 หรือ 1.5 โวลต์มาต่อขนานกัน แล้วยกระดับแรงดันไฟฟ้า (Boost convertor) ไปที่ 2.2 โวลต์ เมื่อคำนวณเปรียบเทียบอายุการใช้งาน ระหว่างการใช้แรงดันไฟฟ้าจากการต่ออนุกรมแบตเตอรี่โดยตรง กับการใช้วงจรปรับแรงดันไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเท่ากับ 90% เช่น การใช้ไอซี MCP16301 มีผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบอายุการใช้งานระหว่างการใช้อัลคาไลน์ Ni-MH, Alkaline และการใช้วงจรปรับแรงดัน

แบตเตอรี่ (ชนิด/แรงดัน/พลังงาน)	วงจรปรับแรงดัน (ชนิด / V_{in} to V_{out})	อายุ ใช้งาน เฉลี่ย (ชม.)
Ni-MH/2.4V/200,000J	ไม่มี	1,094
Alkaline/3.0V/200,000J	ไม่มี	772
Ni-MH/1.2 V/200,000J	Boost / 1.2 to 2.2	1,115
Alkaline/1.5V/200,000J	Boost / 1.5 to 2.2	1,115

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่า การใช้วงจรปรับแรงดันไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 90% จะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิด Ni-MH ที่มีความจุพลังงาน 200,000 จูล์ได้เฉลี่ย 21 ชั่วโมงหรือคิดเป็น 2% และเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิด Alkaline ที่มีความจุพลังงานเท่ากันได้เฉลี่ย 343 ชั่วโมงหรือคิดเป็น 44% ดังนั้นการใช้วงจรปรับแรงดันไฟฟ้า สามารถยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ออกไปได้ ส่วนการตัดสินใจใช้หรือไม่ เป็นสิ่งต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม เพราะต้องคำนึงถึงระดับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อให้ Unode ยังคงทำงานได้ปกติ และผลกระทบจากต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเมื่อต้อง

เพิ่มวงจรปรับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งต้องหาจุดคุ้มค่าในการใช้งานต่อไป

4. สรุปผลการศึกษา

การจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าความต้องการขั้นต่ำของเซนเซอร์โหนด จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียผลจากการทดลองด้วยเซนเซอร์โหนด Unode แสดงให้เห็นว่า การใช้แบตเตอรี่ชนิด Alkaline มาต่ออนุกรมกัน เพื่อให้แรงดันไฟฟ้า 3 โวลต์ แบตเตอรี่จะสูญเสียพลังงานไปเฉลี่ย 60% และการใช้แบตเตอรี่ชนิด Ni-MH มาต่ออนุกรมกัน เพื่อให้แรงดันไฟฟ้า 2.4 โวลต์ แบตเตอรี่จะสูญเสียพลังงานไปเฉลี่ย 13% เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้อัลคาไลน์ Alkaline กับ Ni-MH แบตเตอรี่ Alkaline จะใช้พลังงานมากกว่า Ni-MH เฉลี่ย 42% และที่ความจุพลังงานของแบตเตอรี่เท่ากัน อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ Alkaline จะมีอายุการใช้งานน้อยกว่าแบตเตอรี่ Ni-MH เฉลี่ย 42% การใช้วงจรปรับแรงดันไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ 90% จะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิด Ni-MH และชนิด Alkaline ได้เฉลี่ย 2% และ 44% ตามลำดับ


นอกจากนี้ผลการศึกษายังมีประโยชน์สำหรับอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ต้องการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อให้ตระหนักถึงความสำคัญของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากการต่ออนุกรมแบตเตอรี่ ทำให้พลังงานไฟฟ้าบางส่วนของแบตเตอรี่ต้องกลายเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์

เอกสารอ้างอิง

- [1] L.F. Akyildiz, M.C. Vuran. WSN Applications Chapter 2, Wireless Sensor Networks. 1st ed. John Wiley & Sons Ltd; 2010.

- [2] G. Anastasi, M. Conti, M.D. Francesco, A. Passarella. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks* 2009; Vol. 7: 537–568.
- [3] D. Ganesan, A. Cerpa, W. Ye, Y. Yu, J. Zhao, D. Estrin. Networking issues in wireless sensor networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing* 2004; 799–814.
- [4] A. Warriar, S.Park J. Mina, I. Rhee. How much energy saving does topology control offer for wireless sensor networks? - a practical study. *Elsevier/ACM Computer Communications* 2007; Vol. 30: 2867–2879.
- [5] C. Tang, C.S. Raghavendra, Compression. Techniques for Wireless Sensor Networks, in Chapter 10, Book *Wireless Sensor Networks*. Kluwer Academic Publishers; 2004.
- [6] M. Wu, C.W. Chen. Multiple Bit Stream Image Transmission over Wireless Sensor Networks Chapter 13, Book *Sensor Network Operations*. IEEE & Wiley Interscience; 2006.
- [7] Z. Xiong; A.D. Liveris, S. Cheng. Distributed source coding for sensor networks, *IEEE Signal Processing Magazine* 2004; 21 (5): 80–94.
- [8] H. Jun, M. Ammar, E. Zegura. Power management in delay tolerant networks: a framework and knowledge-based mechanisms, in: *Proc. IEEE Conference on Sensor and Ad Hoc Communication and Networks*; 2005.
- [9] G. Anastasi, M. Conti, A. Passarella, L. Pelusi. Mobile-relay forwarding in opportunistic networks, in: M. Ibnkahla, (Ed.), in Chapter 13, *Adaptation and Cross Layer Design in Wireless Networks*. Taylor and Francis, New York (USA); 2008.

สิทธิบัตร

 คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร <input checked="" type="checkbox"/> การประดิษฐ์ <input type="checkbox"/> การออกแบบผลิตภัณฑ์ <i>Worawut</i> <input type="checkbox"/> อนุสิทธิบัตร ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ.2522 แก้ไขเพิ่มเติม โดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 2) พ.ศ.2535 และพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ.2542	สำหรับเจ้าหน้าที่	
	วันรับคำขอ - 4 มิถุนายน 2556	เลขที่คำขอ
	วันยื่นคำขอ 30 ธ.ค. 53	1101000005
	ด้ญลัถษณัฎจ้แณกการประคิษฐุระหว่างประเทศ ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์ ประเภทผลิตภัณฑ์ วันประกาศโฆษณา เลขที่ประกาศโฆษณา วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่	
1. ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์ เครื่องมือวัดระดับของเหลวด้วยหลักการวัดค่าความจุไฟฟ้าผลิตจากแผ่นวงจรพิมพ์		
2. คำขอรับสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้เป็นคำขอสำหรับแบบผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันและเป็นคำขอลำดับที่ ในจำนวน คำขอ ที่ยื่นในคราวเดียวกัน		
3. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (ฝ่ายจัดการทรัพย์สินทางปัญญาและถ่ายทอดเทคโนโลยี ศูนย์บ่มเพาะวิสาหกิจ) 15 ถนนกาญจนาภิเษย อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110	3.1 สัญชาติ ไทย 3.2 โทรศัพท์ 0-7428-9322 3.3 โทรสาร 0-7428-9339 3.4 อีเมล worawut-w@psu.ac.th	
4. สิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร <input type="checkbox"/> ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบ <input checked="" type="checkbox"/> ผู้รับโอน <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิโดยเหตุอื่น		
5. ตัวแทน (ถ้ามี) ที่อยู่ (เลขที่ ถนน จังหวัด ประเทศ รหัสไปรษณีย์) <i>Worawut</i>	5.1 ตัวแทนเลขที่ 5.2 โทรศัพท์ 5.3 โทรสาร 5.4 อีเมล	
6. ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ) 1) ผศ.ดร.คนดือ เจษฎ์พัฒนานนท์ 2) นายธิตินันท์ ละพาน้อย 3) ผศ.ดร.พรชัย พุกฤษัฎภัทรานนท์ 4) ผศ.ดร.วรวณรัช สันคิอมรทัต ภาลวศิวิศวกรรรมไฟฟ้้า คณะวิศวกรรรมศาสตรั มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เลขที่ 15 ถนนกาญจนาภิเษย ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110		
7. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอให้อธิบายได้ว่าคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ในวันเดียวกับคำขอรับสิทธิบัตรเลขที่ วันยื่น เพราะคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิมเพราะ <input type="checkbox"/> คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หลายอย่าง <input type="checkbox"/> ถูกคัดค้านเนื่องจากผู้ขอไม่มีสิทธิ <input type="checkbox"/> ขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ ทนตเหตุ โนกรณัที่ไม่อัจระบุรายละเอีอจได้ครบบั่วนั ให้จัคทำเป็นเอกสารถนตทำยแบบพิมพ์นี้ โดยระบุหมายเลขกำกับข้อและหัวข้อที่ แสดงรายละเอีอจเพิ่มเติมดังกล่าวดัวย		



บันทึกข้อความ

ส่วนราชการ ศูนย์ทรัพย์สินทางปัญญา อุทยานวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โทร. ๙๓๒๑-๓

ที่ มอ ๑๖๔.๓/๐๔๗

วันที่ ๒๗ กรกฎาคม ๒๕๕๔

เรื่อง หนังสือรับรองการประดิษฐ์ที่ได้ดำเนินการยื่นขอรับการคุ้มครองทรัพย์สินทางปัญญาแล้ว
เรียน คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ตามที่นายธิตินันท์ ตะเกาน้อย นักศึกษาสังกัดหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งมีอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์คือ ผศ.ดร.พรชัย พุกฤษภัทรานนต์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลักและ ผศ.ดร.วรรณรัช สันตอมรทัต เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมนั้น ได้พัฒนาสิ่งประดิษฐ์ใหม่ขึ้นภายใต้ หัวข้อวิทยานิพนธ์ชื่อว่า "ระบบเฝ้าตรวจวัดระดับน้ำ โดยใช้หัววัดอัจฉริยะแบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิทีฟอิเล็กโทรด" ชื่อภาษาอังกฤษคือ "Water Level Monitoring Systems using Intelligent Sensor based on Interdigital Capacitive Electrode" ได้ดำเนินการยื่นขอรับการคุ้มครองทรัพย์สินทางปัญญาประเภทสิทธิบัตรและได้รับเลขที่คำขอตั้งแต่วันที่ ๔ ม.ค. ๒๕๕๔

ในการนี้ศูนย์ทรัพย์สินทางปัญญา จึงขอให้การรับรองว่าการประดิษฐ์ดังกล่าวได้ดำเนินการยื่นขอรับการคุ้มครองทรัพย์สินทางปัญญาแล้ว และผลงานดังกล่าวอยู่ในระหว่างการพัฒนาเพื่อนำไปสู่การใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

ขอแสดงความนับถือ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัศววิทย์ กาญจนโอภาส)

รักษาการผู้อำนวยการอุทยานวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์





บันทึกข้อความ

ส่วนราชการ ศูนย์ทรัพย์สินทางปัญญา อุทยานวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โทร. ๙๓๒๒
ที่ มอ ๑๖๔.๗/๐๑๖ วันที่ ๒๔ มกราคม ๒๕๕๕

เรื่อง แจ้งประกาศโฆษณาคำขอรับสิทธิบัตร

เรียน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.คณิตถ เจษฎ์พัฒนานนท์

ตามที่หนังสือ ที่พนม ๐๗๐๖/๑๒๐๒-๐๐๐๗๖๖ ลงวันที่ ๑๘ มกราคม ๒๕๕๕ ได้แจ้งเรื่อง การชำระค่าธรรมเนียมประกาศโฆษณาคำขอรับสิทธิบัตรเลขที่ ๑๑๐๑๐๐๐๐๕ ที่ท่านได้ยื่นคำขอไว้ วันที่ ๓๐ ธันวาคม ๒๕๕๓ มายังศูนย์ทรัพย์สินทางปัญญา อุทยานวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ บัดนี้ พนักงานเจ้าหน้าที่สำนักสิทธิบัตร กรมทรัพย์สินทางปัญญาได้ทำการตรวจสอบเบื้องต้นแล้ว จึงขอให้ชำระ ค่าธรรมเนียมประกาศโฆษณาคำขอรับสิทธิบัตร และดำเนินการ จัดส่งสำเนาคำขอรับสิทธิบัตร และ คำแปลข้อ ถือสิทธิ,บทสรุปการประดิษฐ์เป็นภาษาอังกฤษ

ในการนี้ ศูนย์ทรัพย์สินทางปัญญา ใคร่ขอให้ท่านจัดส่งสำเนาคำขอรับสิทธิบัตรเลขที่ ๑๑๐๑๐๐๐๐๕, คำแปลข้อถือสิทธิฉบับภาษาอังกฤษ,บทสรุปการประดิษฐ์ฉบับภาษาอังกฤษ อย่างละ ๑ชุด มายัง ศูนย์ทรัพย์สินทางปัญญา ภายในวันที่ ๑๗ กุมภาพันธ์ ๒๕๕๕ เพื่อจะได้ดำเนินการตามขั้นตอนของกรม ทรัพย์สินทางปัญญาต่อไป

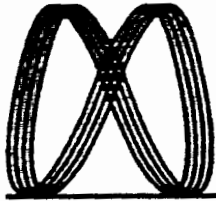
จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาดำเนินการต่อไป จักขอบคุณยิ่ง

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.อัศววิทย์ กาญจนโอภาส)

ผู้อำนวยการอุทยานวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การต่อยอดเชิงพาณิชย์



Mobilis Automata Co., Ltd.
บริษัท โมบิลิส ออโตมาต้า จำกัด

Mobilis Automata Co., Ltd.

บริษัท โมบิลิส ออโตมาต้า จำกัด

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

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

เลขประจำตัวผู้เสียภาษี 3030869814

วันที่ 26 กันยายน พ.ศ. 2554

เรื่อง ขอความร่วมมือเพื่อต่อยอดเทคโนโลยีสู่เชิงพาณิชย์
เรียน รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและบัณฑิตศึกษา

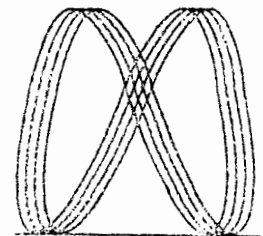
ตามที่ผลงานสิ่งประดิษฐ์ของผศ.คณิต เจษฎ์พัฒนานนท์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในชื่อเรื่อง "เครื่องมือวัดระดับของเหลวด้วยหลักการวัดค่าความจุไฟฟ้าผลิตจากแผ่นวงจรพิมพ์" ได้มีการดำเนินการยื่นขอรับการคุ้มครองทรัพย์สินทางปัญญาประเภทสิทธิบัตรและได้รับเลขที่คำขอแล้วตั้งแต่วันที่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

ทางบริษัท Mobilis Automata จำกัดจึงใคร่ขอความร่วมมือจากทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อให้บริษัทฯ ได้ดำเนินการต่อยอดเพื่อนำไปสู่การใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ต่อไป

ขอแสดงความนับถือ

ดร.กฤษณ์ จงสathit

กรรมการผู้จัดการ



Mobilis Automata Co., Ltd.
บริษัท โมบิลิส ออโตมาต้า จำกัด

การต่อยอดโครงการวิจัย



สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
THE THAILAND RESEARCH FUND

พ.ร.บ. 6804/0013/2555

11 มกราคม 2554

เรื่อง ขอเรียนเชิญนำเสนอข้อเสนอโครงการวิจัย

เรียน ผศ.คณิต เจษฎ์พัฒนานนท์

สิ่งที่ส่งมาด้วย กำหนดการประชุม

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ได้เห็นความสำคัญของเพื่อพัฒนาพื้นที่ (Area-Based Collaborative Research : ABC) ซึ่งเน้นการแก้ปัญหาที่ประชาชนประสบอยู่และสร้างทางเลือก โอกาสใหม่เพื่อการพัฒนาทั้งในด้านเศรษฐกิจ สังคม ทรัพยากร และการเมืองการปกครอง และเน้นให้กลไกพัฒนาในพื้นที่เป็นตัวขับเคลื่อนการสร้างการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่เอง โดยใช้การวิจัยเป็นเครื่องมือสร้างกระบวนการเรียนรู้ร่วมกันระหว่างนักวิชาการซึ่งเป็น “คนนอก” กับชุมชนและหน่วยงานรัฐในจังหวัดและท้องถิ่น ซึ่งเป็น “คนใน” หน่วยพื้นที่ในการทำงานคือ “จังหวัด” ทั้งนี้ กรณีพื้นที่ภาคใต้ตอนกลาง (นครศรีธรรมราช พัทลุง สงขลา สตูล) โจทย์ปัญหาของพื้นที่ที่มีความสำคัญ คือ ผลกระทบจากปัญหาภาวะโลกร้อนและภัยพิบัติที่เกิดขึ้นบ่อยครั้ง และสำนักประสานงานวิจัยเพื่อพัฒนาเชิงพื้นที่ภาคใต้ตอนกลาง (ผศ.ดร.ไชยวรรณ วัฒนจันทร์ ผู้ประสานงานชุดโครงการ) ได้มีการประกาศรับข้อเสนอโครงการและได้พัฒนาข้อเสนอโครงการร่วมกับภาคีพัฒนาในพื้นที่เพื่อตอบโจทย์ดังกล่าว ดังที่ท่านได้ส่งข้อเสนอโครงการ “ต้นแบบเครื่องเฝ้าระวังการเกิดอุทกภัยสำหรับชุมชน” มายัง สกว. เพื่อขอรับทุนสนับสนุนการวิจัย

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

สกว. จึงขอเรียนเชิญท่านมานำเสนอโครงการวิจัยดังกล่าว ในการประชุมเพื่อพิจารณาข้อเสนอโครงการ พร้อมรับฟังข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อแนวทางในการวิจัยของโครงการวิจัย ในวัน และเวลาดังกล่าว

จึงขอเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณา

ขอแสดงความนับถือ

(ดร. สิลากรณ์ บัวสาย)

รองผู้อำนวยการสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ฝ่ายชุมชนและสังคม (ดวงพร)

โทรศัพท์ 02-278-8200 ต่อ 8341

โทรสาร 02-278-8225

E-mail : tuangporm@trf.or.th

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

ชั้น 14 อาคาร เอส เอ็ม ทาวเวอร์ 979/17-21 ถนนพหลโยธิน แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10330
14th Floor, S M Tower, 979/17-21 Phaholyothin Road, Samsennai, Phayathai, Bangkok 10330
Tel : +66 (0) 2278-8200 Fax : +66 (0) 2298-0476 <http://www.trf.or.th> E-mail : trf@trf.or.th

สร้างสรรค์ปัญญา เพื่อพัฒนาประเทศ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายธินันท์ ตะเกาน้อย	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5310120010	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์	2548

ทุนการศึกษา

ทุนอุดหนุนงานวิจัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ประจำปีการศึกษา 2553

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

- บทความวิชาการ เรื่อง การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียของเซนเซอร์โหนด(Unode) วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 39 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน เมษายน-มิถุนายน พ.ศ. 2555
- บทความวิชาการ เรื่อง เซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเทอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ โทรศ. วิศวกรรมสาร มข. (อยู่ระหว่างการพิจารณาเพื่อตีพิมพ์)

สิทธิบัตรการประดิษฐ์

ยื่นขอจดสิทธิบัตร เครื่องมือวัดระดับของเหลวด้วยหลักการวัดค่าความจุไฟฟ้าผลิตจากแผ่นวงจรพิมพ์ เลขที่คำขอ 1101000005 พ.ศ. 2553