



เทคนิคการตรวจสอบความขุ่นของน้ำ ด้วยตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟฟิรัลคาปาซิเตอร์

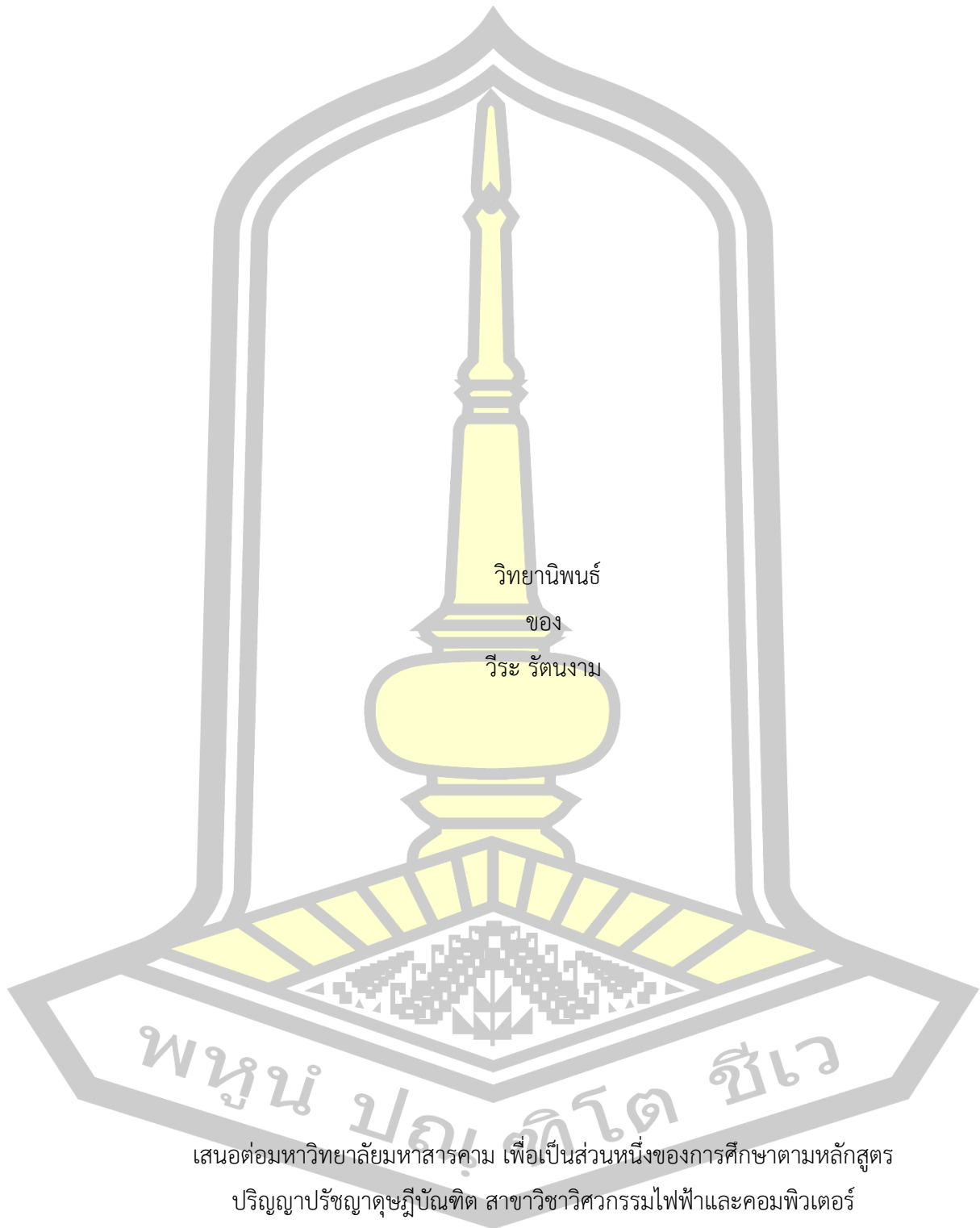
วิทยานิพนธ์
ของ
วีระ รัตนงาม

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

กรกฎาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เทคนิคการตรวจสอบความขุ่นของน้ำ ด้วยตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์

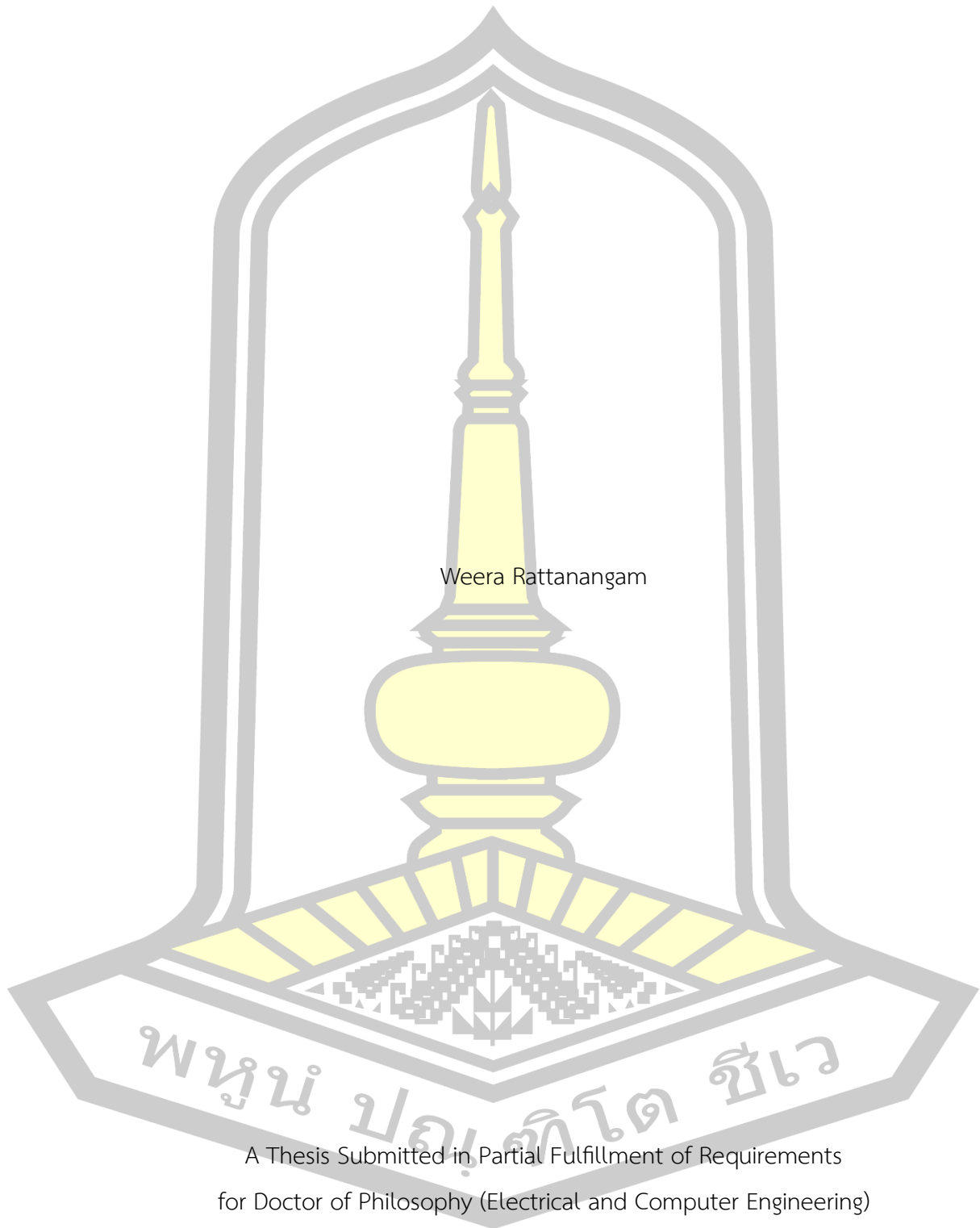


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

กรกฎาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

A Turbidity Measurement Technique using Interdigital Capacitor Sensor



Weera Rattanangam

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Electrical and Computer Engineering)

July 2023

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายวีระ รัตนงาม แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศ. ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล)

กรรมการ

(ผศ. ดร. นิวัตร อังควิเศษฐพันธ์)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ณัฐฉัตร สุวรรณทา)

กรรมการ

(รศ. ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย มหาสารคาม

(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	เทคนิคการตรวจสอบความขุ่นของน้ำ ด้วยตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์		
ผู้วิจัย	วีระ รัตนงาม		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสี่ยมวิบูล		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอ เทคนิคการตรวจสอบความขุ่นของน้ำ ด้วยตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ โดยได้ทำการทดลองคือทำการผสมน้ำขุ่นโดยใช้ดินคาโอลิน (Kaolin clay) ที่ผสมตามอัตราส่วน จำนวน 11 ตัวอย่างตั้งแต่ค่าการวัด 0 - 1000 NTU และทำวัดค่าการเก็บประจุจาก The Interdigital Capacitor Sensor จำนวน 5 โมเดล ที่มีความยาวของค่า L ที่แตกต่างกัน และการปรับความถี่ ณ แหล่งจ่ายเพื่อเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุโดยใช้ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความถี่ในแหล่งจ่ายที่ใช้วัดค่าการเก็บประจุเมื่อลดความถี่จะมีผลต่อค่าการเก็บประจุที่เพิ่มขึ้น มีค่าการเก็บประจุสูงสุดอยู่ที่ สูงสุดที่ 5945.28 pF ที่การจ่ายแรงดันจากแหล่งจ่าย 1 Volt ความถี่ 500Hz จึงสามารถขยายย่านเพื่อวัดระดับน้ำให้ละเอียดขึ้นได้ และพัฒนาระบบเครื่องวัดน้ำขุ่นแบบมาตรฐานต่อไป

คำสำคัญ : ความขุ่นของน้ำ, อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์

พหุณ ปณุ ทิโต ชีเว

TITLE	A Turbidity Measurement Technique using Interdigital Capacitor Sensor		
AUTHOR	Weera Rattanangam		
ADVISORS	Professor Worawat Sa-Ngiamvibool , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Electrical and Computer Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2023

ABSTRACT

This research presents A Turbidity Measurement Technique using Interdigital Capacitor Sensor. In this study's experiments, murky water was mixed with twelve samples that ranged from 0 to 1000 NTU using Kaolin clay, and the capacitance value was measured from the interdigital capacitor sensor on five models at different lengths of L. In the experiment, the frequency adjustment of the supply was used to compare the capacitance of the interdigital capacitor sensor. The results indicate that the value capacitance of the sensor rises as the bias frequency reduces. When supplying voltage from a 1-volt source at a frequency of 500 Hz, the maximum capacitance is 5945.28 pF, so the range can be expanded to measure the water level more accurately and to continue developing a standard turbidity meter system. The maximum capacitance is 5945.28 pF when supplying voltage from a 1-volt source at a frequency of 500 Hz, so the range can be expanded to measure the water level more precisely and continue to develop a standard turbidity meter system.

Keyword : Water's Turbidity, Interdigital Capacitor Sensor

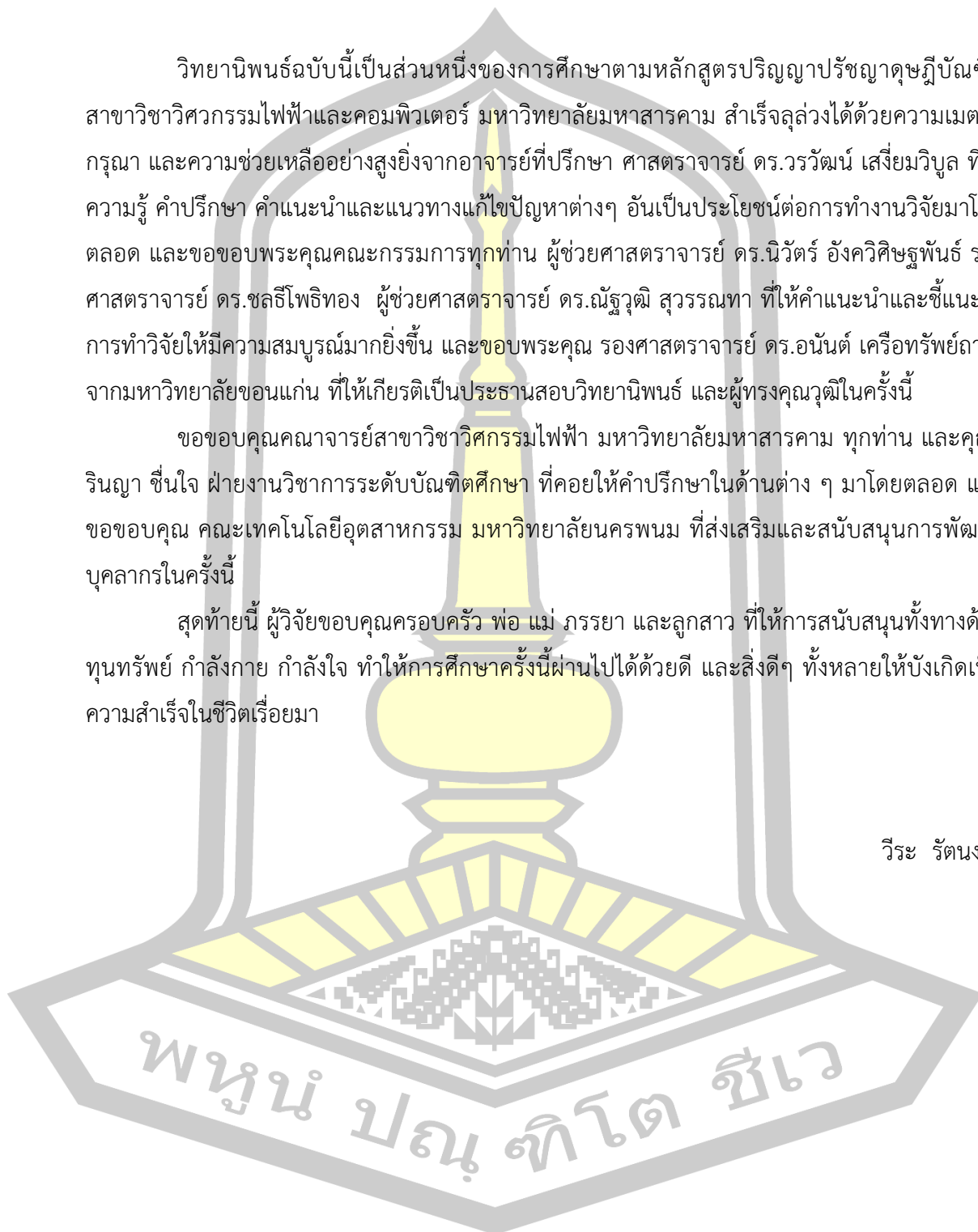
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสำเร็จและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.วรวัดน์ เสงี่ยมวิบูล ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำและแนวทางแก้ไขปัญหาต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยมาโดยตลอด และขอขอบพระคุณคณะกรรมการทุกท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัตร อังควิเศษฐพันธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ชลธิ์โพธิทอง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ สุวรรณทา ที่ให้คำแนะนำและชี้แนะในการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้เกียรติเป็นประธานสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ทรงคุณวุฒิในครั้งนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ทุกท่าน และคุณวรินญา ชื่นใจ ฝ่ายงานวิชาการระดับบัณฑิตศึกษา ที่คอยให้คำปรึกษาในด้านต่าง ๆ มาโดยตลอด และขอขอบคุณ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม ที่ส่งเสริมและสนับสนุนการพัฒนาบุคลากรในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัว พ่อ แม่ ภรรยา และลูกสาว ที่ให้การสนับสนุนทั้งทางด้านทุนทรัพย์ กำลังกาย กำลังใจ ทำให้การศึกษาครั้งนี้ผ่านไปได้ด้วยดี และสิ่งดีๆ ทั้งหลายให้บังเกิดเป็นความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

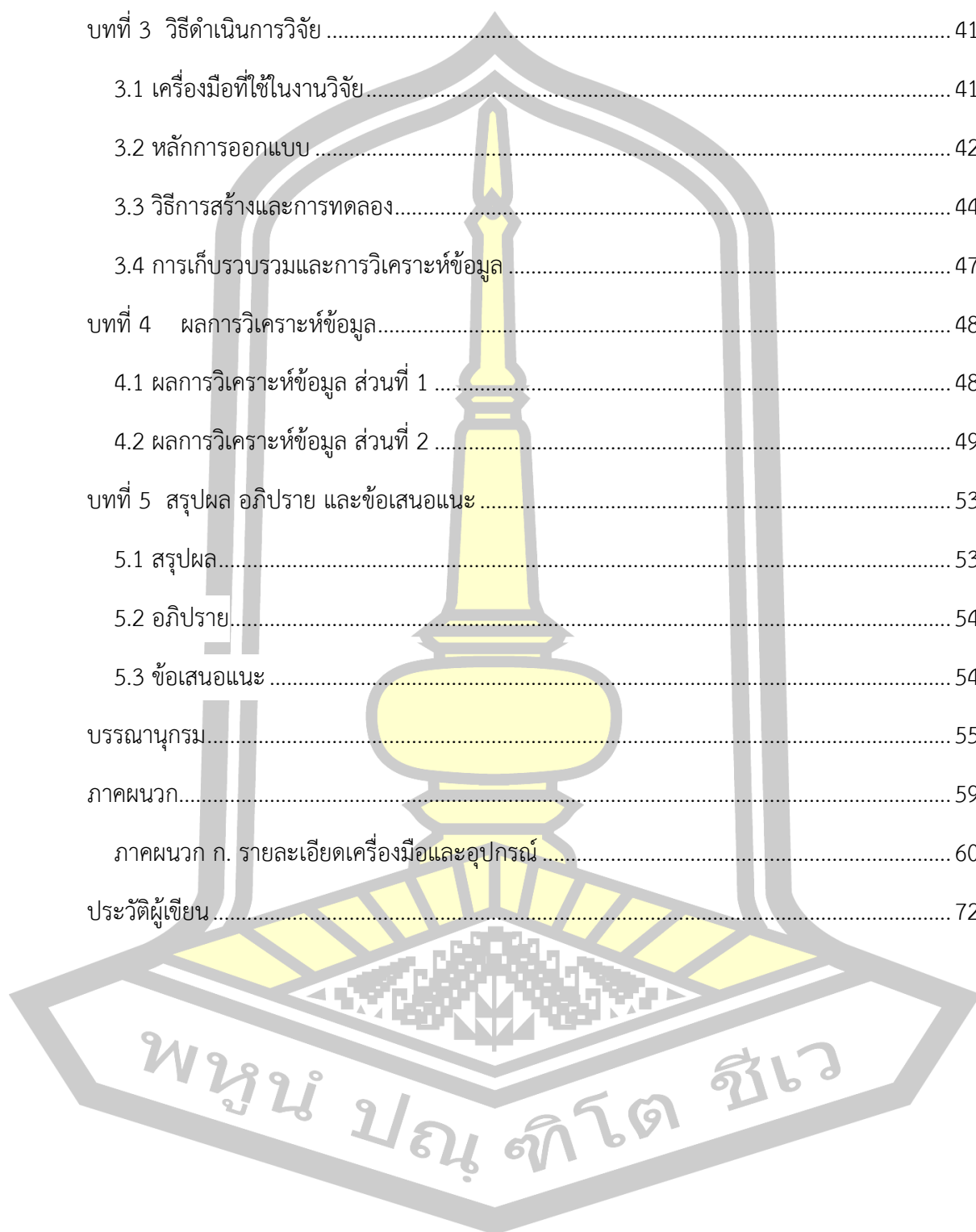
วีระ รัตนงาม



สารบัญ

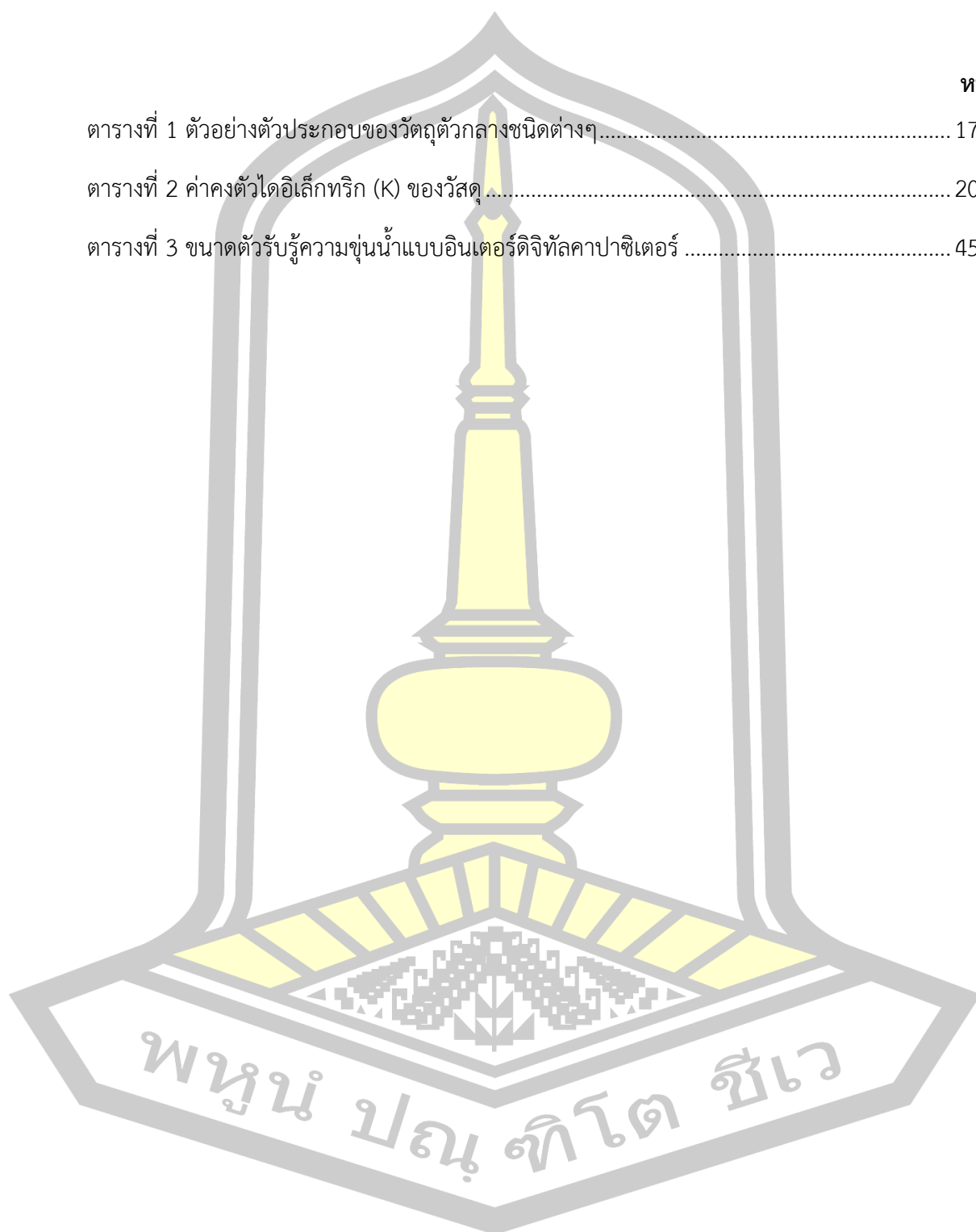
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ความสำคัญของการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.6 เครื่องมือที่ใช้.....	3
1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความชุ่ม.....	4
2.2 ทรานสดิวเซอร์และเซนเซอร์.....	9
2.3 คุณสมบัติของค่าการเก็บประจุทางไฟฟ้า.....	18
2.4 แผ่นวงจรพิมพ์และวัสดุฐานรอง.....	23
2.5 ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัล.....	25
2.6 การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์.....	28

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	41
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	41
3.2 หลักการออกแบบ	42
3.3 วิธีการสร้างและการทดลอง.....	44
3.4 การเก็บรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	47
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	48
4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล ส่วนที่ 1	48
4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล ส่วนที่ 2	49
บทที่ 5 สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ	53
5.1 สรุปผล.....	53
5.2 อภิปราย.....	54
5.3 ข้อเสนอแนะ	54
บรรณานุกรม.....	55
ภาคผนวก.....	59
ภาคผนวก ก. รายละเอียดเครื่องมือและอุปกรณ์	60
ประวัติผู้เขียน.....	72



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ตัวอย่างตัวประกอบของวัตถุตัวกลางชนิดต่างๆ.....	17
ตารางที่ 2 ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (K) ของวัสดุ.....	20
ตารางที่ 3 ขนาดตัวรับรู้ความชุ่มน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์.....	45



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 วิธีวัดความชื้นด้วยวิธีแจ๊คสันแคนเดิลเทอปีติมิเตอร์.....	6
ภาพที่ 2 ระบบการวัดซึ่งน้ำหนัก.....	9
ภาพที่ 3 ค่าความจุที่นำไปตัดแปลงเป็นตัวตรวจจับ.....	11
ภาพที่ 4 หลักการตรวจจับแบบความต้านทานแม่เหล็ก.....	12
ภาพที่ 5 แสดงการใช้หลอด LED และโฟโตทรานซิสเตอร์เป็นตัวตรวจจับ.....	13
ภาพที่ 6 วงจรตรวจจับที่ใช้ LED และโฟโตทรานซิสเตอร์.....	14
ภาพที่ 7 ออปโตไอโซเลเตอร์.....	14
ภาพที่ 8 ตัวอย่างตัวตรวจจับแบบไม่สัมผัสใช้หลักการเหนี่ยวนำ.....	15
ภาพที่ 9 แสดงส่วนประกอบของตัวตรวจจับแบบเหนี่ยวนำ.....	15
ภาพที่ 10 ตัวอย่างตัวตรวจจับแบบความจุแบบต่างๆ.....	17
ภาพที่ 11 ภาพตัดขวางด้านข้างส่วนตรวจจับของตัวตรวจจับแบบไม่สัมผัสแบบความจุไฟฟ้า.....	17
ภาพที่ 12 ตัวอย่างการใช้ตัวตรวจจับแบบความจุไฟฟ้า.....	18
ภาพที่ 13 แสดงการกระจายตัวของประจุที่ผิวรอบตัวนำ.....	19
ภาพที่ 14 การทดสอบไดอิเล็กทริก.....	22
ภาพที่ 15 (ก) ตัวเก็บประจุต่ออนุกรม (ข) ตัวเก็บประจุสมมูล.....	23
ภาพที่ 16 (ก) ตัวเก็บประจุต่อขนาน (ข) ตัวเก็บประจุสมมูล.....	23
ภาพที่ 17 รูปแบบของการเกิดสนามไฟฟ้าเมื่อแยกตัวนำออกจากการในแนวระนาบ.....	26
ภาพที่ 18 วงจรเสมือนของอินเตอร์ดิจิตัลเล็กทรอนิกส์.....	26
ภาพที่ 19 รูปแบบของตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตัล.....	27
ภาพที่ 20 ภาพแนวตัดโครงสร้างของตัวรับรูดระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัล.....	27
ภาพที่ 21 สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย.....	29

ภาพที่ 22 แผนภาพการกระจาย (Scatter Diagram)	30
ภาพที่ 23 น้ำปริมาณสารสมต่อความขุ่นของน้ำที่สังเคราะห์ด้วยดินเกาลิน และดินธรรมชาติ	33
ภาพที่ 24 โครงสร้างของเครื่องวัดความขุ่น	34
ภาพที่ 25 การวัดความขุ่นในคอนกรีตโดยตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลสนามระยะใกล้	34
ภาพที่ 26 เซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลเล็กโทรด	35
ภาพที่ 27 Wang และคณะ นำเสนอเทคนิคการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดความนำไฟฟ้า ...	36
ภาพที่ 28 ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบใหม่	37
ภาพที่ 29 การตรวจสอบความเข้มข้นของน้ำตาลด้วยอินเตอร์ดิจิตอลเซ็นเซอร์	38
ภาพที่ 30 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกับการเจือปนของน้ำในน้ำมันดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล	38
ภาพที่ 31 ตัวรับรู้ระดับระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบไร้ฐานรอง	39
ภาพที่ 32 แผ่นวงจรพิมพ์	41
ภาพที่ 33 เครื่องวัดค่าการเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจุ และค่าความต้าน (LCR Meter)	42
ภาพที่ 34 ภาพด้านบนของโครงสร้างของตัวรับรู้ความขุ่นน้ำตัวเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล	42
ภาพที่ 35 ภาพแนวตัดโครงสร้างของตัวรับรู้ความขุ่นน้ำตัวเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล	43
ภาพที่ 36 ตัวรับรู้ความขุ่นของน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์	45
ภาพที่ 37 วัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ความขุ่นน้ำตัวเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล	46
ภาพที่ 38 การวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ความขุ่นน้ำด้วยอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์	46
ภาพที่ 39 ผลของค่าการเก็บประจุที่ความถี่ 10 และ 100	48
ภาพที่ 40 ผลของค่าการเก็บประจุที่ความถี่ 1 และ 500 Hz	49
ภาพที่ 41 ผลของค่าการเก็บประจุที่ความถี่ 10 ของ 5 โมเดล	50
ภาพที่ 42 ผลของค่าการเก็บประจุที่ความถี่ 1 ของ 5 โมเดล	51
ภาพที่ 43 ผลของค่าการเก็บประจุที่ความถี่ 500Hz ของ 5 โมเดล	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ในการนำไปใช้ในการดำรงชีวิต โดยเฉพาะการอุปโภค-บริโภค การจัดหาน้ำสะอาดเพื่อใช้ในการอุปโภค-บริโภค เป็นสิ่งที่ทุกคนควรได้รับอย่างมีคุณภาพ และทั่วถึง แม้ว่าพื้นผิว 2 ใน 3 ส่วนของโลกถูกปกคลุมไปด้วยน้ำแต่น้ำจืดที่สามารถนำมาใช้ในการดำรงชีวิตของมนุษย์กลับมีไม่ถึง 1% ด้วยเหตุนี้ น้ำจึงเป็นทรัพยากรที่ล้ำค่า และแหล่งน้ำดิบในปัจจุบันมีอยู่อย่างจำกัด ที่จะนำมาผลิตน้ำเพื่ออุปโภค-บริโภค อีกปัญหาก็คือคุณภาพของน้ำ เพราะน้ำแต่ละพื้นที่มีคุณภาพที่แตกต่างกันออกไป ก่อนจะนำน้ำไปใช้อุปโภค-บริโภค จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ เพื่อให้ทราบถึงคุณลักษณะทางกายภาพ เคมี ความเป็นพิษ และแบคทีเรีย แต่กระบวนการจัดการส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้น และใช้เวลานานกว่ากระบวนการอื่น คือ การจัดการความขุ่นของน้ำดิบ อันเนื่องมาจากอนุภาคของสารแขวนลอยในน้ำ ความขุ่นของน้ำดิบจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการผลิตน้ำประปา ทำให้ต้องมีการพัฒนาคุณภาพน้ำให้มีคุณภาพที่ดี และได้มาตรฐาน มาตรฐานน้ำประปาของการประปาภูมิภาค ตามคำแนะนำขององค์การอนามัยโลก (WHO) ปี 2011 ที่ค่าความขุ่น (Turbidity) ไม่เกิน 4 เอ็นทียู (NTU) และตามประกาศกรมอนามัย เรื่อง เกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ ปี พ.ศ.2553 เกณฑ์ที่กำหนดความขุ่น ต้องมีค่าไม่เกิน 5 NTU และมีค่าความขุ่นที่ยอมให้มีได้สูงสุดไม่เกิน 25 NTU (ประกาศกรมอนามัย, 2553) ดังนั้นจะเห็นว่าคุณภาพน้ำจึงมีผลต่อการใช้งานในด้านอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ

โดยทั่วไปในปัจจุบันการวัดความขุ่นของน้ำ จะใช้เครื่องวัดความขุ่นที่ใช้หลักการ Photometer ซึ่งเป็นการใช้แสงในการวัดค่า โดยมีการแยกประเภทของเครื่องวัดความขุ่นได้ 2 ประเภท คือ แบบพกพา เหมาะสำหรับการนำเครื่องไปใช้งานในการวัดจากแหล่งน้ำโดยตรง ซึ่งจะสะดวกและรวดเร็วในการวัดค่า และแบบตั้งโต๊ะที่เหมาะสมสำหรับการวัดค่าตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำที่เก็บมาจากหลาย ๆ พื้นที่ที่แตกต่างกันในทำการวิจัย หรือตรวจสอบคุณภาพ เป็นต้น แต่เครื่องมือเหล่านี้ยังมีราคาสูง และมีขั้นตอนของกระบวนการวัด

จากคุณสมบัติของเครื่องวัดที่ใช้อยู่ยังมีราคาสูง และปัจจุบันการพัฒนาตัวรับรู้เพื่อใช้สำหรับเป็นเครื่องมือวัดเป็นที่แพร่หลายทั่วไปในด้านการอุตสาหกรรม งานอดิเรกนิยามวิทยา สิ่งแวดล้อม (Canbolat, 2009; Loizou & Koutroulis, 2016; Mamishev, Sundara-Rajan, Yang, Du, & Zahn, 2004; Reverter, Li, & Meijer, 2007) เพื่อจะนำมาวิเคราะห์การวัดความขุ่นในอากาศ การวัดของเหลว การวัดคุณภาพน้ำ ดังนั้นตัวรับรู้อินเทอร์ดิทัลคาปาซิ (Alam MdNazmul, Bhuiyan,

Rashed H, Dougal Roger A, & Ali Mohammad, 2010; Angkawisitpan Niwat & Manasri.T, 2012; roungrid, 2014; เรืองฤทธิ์ สิริศักดิ์, อังควิสิษฐพันธ์ นิวัตร, & เสียมวิบูล วรวัฒน์, 2015) เป็นตัวรับรู้ชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจ ออกแบบง่ายไม่มีความซับซ้อน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างต้นแบบตัวรับรู้ความชุ่มของน้ำ โดยใช้หัววัดแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นเอง เพื่อเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งในการนำหัววัดแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ ไปใช้งานแทนเครื่องมือที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน หรือนำไปพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นไป

1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. สามารถออกแบบและสร้างตัวรับรู้ความชุ่มแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์
2. สามารถบ่งบอกคุณลักษณะความแตกต่างของค่าการประจุของตัวรับรู้ความชุ่มแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์
3. สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับการวัดคุณภาพน้ำได้

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างออกแบบและสร้างตัวรับรู้ความชุ่มแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ได้
2. วัดค่าการประจุของตัวรับรู้ความชุ่มแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์
3. เพิ่มคุณลักษณะค่าการเก็บประจุได้มากขึ้นมีผลต่อการวัดที่มีความละเอียดมากขึ้น และนำมาประยุกต์ใช้งานการวัดคุณภาพน้ำได้

1.4 ความสำคัญของการวิจัย

ทำให้ทราบถึงการออกแบบและสร้างตัวรับรู้ความชุ่มแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ เพื่อให้ทราบถึงคุณลักษณะ และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชุ่มของน้ำต่อค่าการเก็บประจุที่เกิดขึ้นกับหัววัดแบบดิจิตอลคาปาซิเตอร์ ด้วยหลักการออกแบบที่ทำงานง่าย และไม่ซับซ้อน สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย รวมถึงการนำไปใช้งานกับหน่วยประมวลผล เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นต้น

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างตัวรับรู้ความชุ่มแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์
2. วัดระดับวัดความชุ่มเพื่อทราบค่าการเก็บประจุโดยใช้เครื่องวัด RLC Meter
3. กลุ่มตัวอย่างน้ำชุ่ม ด้วยการผสมสารสังเคราะห์จากดินคาโอลิน
4. นำค่าการเก็บประจุที่วัดได้มาวิเคราะห์ค่าทางสถิติ สมการเชิงเส้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะนำเสนอเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ และความขุ่นของน้ำ ซึ่งจะประกอบด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

1. ความขุ่น (Turbidity)
2. ทรานสดีวเซอร์และเซนเซอร์
3. คุณสมบัติของค่าการเก็บประจุทางไฟฟ้า
4. แผ่นวงจรพิมพ์และวัสดุฐานรอง
5. ตัวรับรู้ความขุ่นของน้ำด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิจิตัล
6. การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความขุ่น

ความขุ่น (Turbidity) เกิดจากสารแขวนลอยในน้ำ เช่น ดิน ทราย สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก และสาหร่ายเซลล์เดียว แพลงตอน สารแขวนลอยเหล่านี้สามารถทำให้เกิดแสงหักเหในน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจว่า ผู้บริโภคต้องการใช้น้ำหรือไม่ และเนื่องจากความขุ่นเป็นพารามิเตอร์ที่วัดได้ง่าย จึงนิยมใช้ความขุ่นเป็นเครื่องวัดประสิทธิภาพ ของกระบวนการหลายประเภท เช่น กระบวนการตกตะกอน กระบวนการกรอง เป็นต้น (Yimrattanabovorn, 2015)

2.1.1 ความสำคัญของความขุ่นต่อระบบประปา (Srichun, 2010) ความขุ่นของน้ำจะเกิดจากสารแขวนลอยต่าง ๆ อยู่ในน้ำ ทำให้น้ำดูไม่ใสสะอาด เนื่องจากสารเหล่านี้ทำให้เกิดการกระจัดกระจาย (Scattered) และดูดกลืน (Absorbed) ของแสง แทนที่จะปล่อยให้แสงผ่านไปเป็นเส้นตรง ซึ่งสารแขวนลอยเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพวกจุลินทรีย์ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อ

- 1) มีสภาพไม่น่าใช้
- 2) ทำให้ประสิทธิภาพของคลอรีนลดลง เพราะจุลชีพที่แทรกอยู่ภายในสารแขวนลอย ทำให้คลอรีนไม่สามารถเข้าไปถึงตัวจุลชีพ
- 3) สารแขวนลอยซึ่งโดยมากเป็นสารอินทรีย์ที่จะทำปฏิกิริยากับคลอรีน ทำให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes) ซึ่งพบว่ามีโอกาสที่จะก่อให้เกิดมะเร็งในร่างกายมนุษย์
- 4) สารแขวนลอยอาจเป็นตัวที่พาหรือเก็บสะสมสารพิษอันตรายได้ เช่น โลหะหนักต่างๆ

ขนาดของสารแขวนลอยขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของน้ำ ยกตัวอย่าง เช่น กรณีของแหล่งน้ำที่อยู่ในสภาวะสงบนิ่ง เช่น อ่างเก็บน้ำ หรือทะเลสาบ ซึ่งสารแขวนลอยขนาดใหญ่จะตกตะกอน ทำให้เหลือแต่สารแขวนลอยขนาดเล็กเสมอ แต่ในกรณีเกิดฤดูน้ำหลาก น้ำท่วม หรือกระแสน้ำที่รุนแรง จะเกิดจากสารแขวนลอยขนาดใหญ่ที่สามารถสังเกตความขุ่นได้ง่าย

มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาภูมิภาค ตามคำแนะนำขององค์การอนามัยโลก (WHO) ปี 2011 กำหนดค่าความขุ่น(Turbidity) ไม่เกิน 4 เอ็นทียู (NTU) และตามประกาศกรมอนามัย เรื่อง เกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ ปี พ.ศ.2553 เกณฑ์ที่กำหนดความขุ่น ต้องมีค่าไม่เกิน 5 NTU และมีค่าความขุ่นที่ยอมให้มีได้สูงสุดไม่เกิน 25 NTU (ประกาศกรมอนามัย, 2553; สรวุฒิ บุญเกิดรัมย์^{1*} & ถนอมศักดิ์ วงศ์มีแก้ว²) ดังนั้นการควบคุมคุณภาพของการผลิตน้ำประปานั้น จึงมีความจำเป็นต้องควบคุมค่าความขุ่นให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด

2.1.2 ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา

2.1.2.1 การสูบน้ำ เริ่มจากโรงสูบน้ำแรงต่ำ ทำการสูบน้ำจากแหล่งน้ำบาดาล หรือแหล่งน้ำผิวดินตามธรรมชาติ เพื่อลำเลียงเข้าสู่ระบบการผลิตน้ำ

2.1.2.2 การปรับปรุงคุณภาพน้ำ น้ำดิบที่สูบน้ำเข้ามาแล้ว จะถูกผสมด้วยสารเคมี เช่น สารส้ม และปูนขาว เพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ สารส้มจะช่วยให้มีการตกตะกอนได้ดียิ่งขึ้น และปูนขาวจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำ หรือสาหร่ายในน้ำ หรือบางครั้งจะมีการเติมคลอรีน เพื่อทำการฆ่าเชื้อโรคที่อาจปะปนมากับน้ำในขั้นตอนนี้

2.1.2.3 การตกตะกอน ขั้นตอนนี้จะปล่อยน้ำที่ผสมสารส้มและปูนขาว ทำให้เกิดหมุนวนเวียน ให้น้ำกับสารเคมีรวมตัวกัน เพื่อจะช่วยให้มีการจับตัวของตะกอนได้ดียิ่งขึ้น และส่งเข้าสู่ถังตะกอนขนาดใหญ่ พักไว้ให้น้ำนิ่ง และตะกอนที่มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมากจะตกลงสู่ก้นถัง และถูกดูดทิ้ง ส่วนน้ำใสด้านบนจะไหลตามรางรับน้ำเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

2.1.2.4 การกรอง ขั้นตอนนี้จะใช้ทรายหยาบ และทรายละเอียด เพื่อการกรองตะกอนขนาดเล็กมาก ทำให้มีความใสสะอาดมากขึ้น ซึ่งน้ำที่ผ่านการกรองจะมีความใสมาก แต่จะมีความขุ่นหลงเหลืออยู่ประมาณ 0.2-2.0 หน่วยความขุ่น ส่วนทรายกรองจะมีการล้างทำความสะอาดอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้การกรองมีประสิทธิภาพ

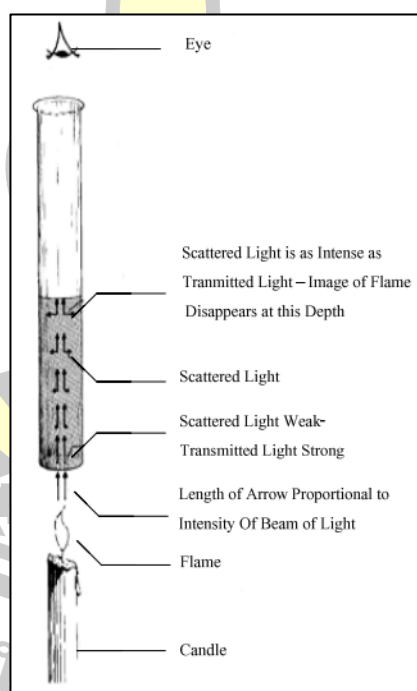
2.1.2.5 การฆ่าเชื้อโรค น้ำที่ผ่านการกรองมาแล้วจะมีความใส แต่อาจจะมีเชื้อโรคปนมากับน้ำ ดังนั้นต้องทำการฆ่าเชื้อโรคโดยใช้คลอรีนอีกครั้ง ซึ่งคลอรีนนี้สามารถฆ่าเชื้อโรคได้เป็นอย่างดี น้ำที่ผ่านขบวนการนี้ เรียกว่า “น้ำประปา” สามารถนำมาใช้เพื่อการอุปโภค-บริโภค ได้

2.1.2.6 การควบคุมคุณภาพน้ำประปา จะเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะน้ำประปาที่ทำการผลิตมาแล้ว จะต้องทำการตรวจสอบคุณภาพน้ำอีกครั้ง เพื่อให้ได้น้ำประปาที่สะอาด ปลอดภัย สำหรับการอุปโภค-บริโภค

2.1.2.7 การสุบจ่าย เมื่อน้ำประปาที่ผลิตมาแล้ว จะส่งจ่ายให้ถึงบ้านเรือนของผู้ใช้น้ำ โดยส่งจากท่อถึงสูงผ่านตามท่อไปยังเขตพื้นที่ใกล้เคียง และในพื้นที่ที่ไกลออกไป หรือพื้นที่ที่ความสูงมาก จำเป็นต้องใช้เครื่องอัดแรงดันน้ำให้สามารถบริการได้อย่างทั่วถึง

2.1.3 วิธีการตรวจวัดความขุ่น (Srichun, 2010) การวัดความขุ่นของน้ำสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ วิธีการเปรียบเทียบกับสายตา (Visual Method) และวิธีเนเฟโลเมตริก (Nephelometric Method) โดยมีรายละเอียดของวิธีการตรวจวัด ดังนี้

2.1.3.1 วิธีเปรียบเทียบกับตา (Visual Method) เป็นวิธีที่วัดความขุ่นของน้ำ โดยการให้แสงสีขาวส่องผ่านตัวอย่างน้ำ แล้วเปรียบเทียบกับแสงซึ่งส่องผ่านสารละลายความขุ่นมาตรฐาน (Standard Suspension) วิธีนี้เป็นการวัดผลของแสงที่ผ่านออกมา (Transmission of Light) เครื่องมือวัดความขุ่นด้วยวิธีนี้ประกอบด้วย แจ็คสัน แคนเดิลเทออบิดิเตอร์ (Jackson Candle Turbidimeter) มีหน่วยเป็น แจ็คสันเทอบิดิตียูนิท หรือเจทียู (Jackson Turbidity Unit, JTU) ดังภาพที่ 1 และขวดมาตรฐาน (Standard Bottle) เครื่องมือชนิดนี้สามารถวัดได้ต่ำสุดที่ค่าความขุ่น 25 JTU



ภาพที่ 1 วิธีวัดความขุ่นด้วยวิธีแจ็คสันแคนเดิลเทอบิดิเตอร์

(Sadar, M.J. 1998)

2.1.3.2 วิธีเนฟโลเมตริก (Srichun, 2010) เป็นวิธีวัดความขุ่นของน้ำโดยเปรียบเทียบความเข้มของแสงที่กระเจิงไปยังน้ำ ความเข้มของแสงที่กระเจิงมากขึ้นก็จะมีค่าความขุ่นมากขึ้น โดยวิธีนี้แสงจะถูกปล่อยให้กระทบตัวอย่างน้ำเป็นมุมฉากกับตาผู้ทดลองหรือ โฟโตอิเล็กทริก เซลล์ (Photoelectric Cell) กับเครื่องมือ แสงซึ่งสะท้อนสารแขวนลอยในน้ำตัวอย่าง จะถูกรวบรวมโดยรีฟlector (Reflector) และบันทึกไว้ หลักการนี้ใช้ได้ดีกับการวัดความขุ่นต่ำ ๆ ซึ่งความขุ่นต่ำ ๆ ก็สามารถทำให้เกิดการกระจายของแสงได้ สำหรับสารละลายความขุ่นมาตรฐานนั้นเลือกใช้ฟอร์มซาซีนโพลิเมอร์ (Formazine Polymer) เพราะเตรียมง่าย และให้ค่าความขุ่นที่เชื่อถือได้ และจะมีความขุ่นสูงเพราะจะใช้เป็นสารละลายสต็อก เช่น 4000 เนฟโลเมตริกเทอบิติตูนิต หรือ เอนทียู (Nephelometric Turbidity Unit, NTU) เมื่อนำสารละลายสต็อกนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าความขุ่นที่วัดได้จากวิธีเนฟโลเมตริกและวิธีแจ๊คสันแคนเดิลเทอบิติตูนิตจะพบว่าความขุ่นที่วัดเป็น NTU นี้จะใกล้เคียงมากกับค่าที่วัดได้ด้วยวิธีแจ๊คสันแคนเดิลเทอบิติตูนิต

ในปัจจุบันการวัดค่าความขุ่น นิยมใช้วิธีเนฟโลเมตริกเป็นเครื่องมือ โดยมีหน่วย NTU เพราะเป็นเครื่องมือวัดที่ง่าย และได้ผลรวดเร็ว (Gilcreas, 1966)

2.1.4 เครื่องมือวัดความขุ่น ได้มีการพัฒนาในปี ค.ศ.1960 และเริ่มแรกมีการสังเกตด้วยตาจนถึงกลางปี ค.ศ. 1980 (Sadar, 2004) มีความก้าวหน้ามากขึ้นในการออกแบบเครื่องมือใหม่และทันสมัย เพื่อใช้ค่าความขุ่นเป็นพารามิเตอร์ในการวัดคุณภาพน้ำ และออกแบบให้เครื่องมือวัดความขุ่นมีหลายแบบ แต่ด้วยเทคโนโลยีที่แตกต่างกัน ความแตกต่างของการใช้แหล่งกำเนิดแสง และการออกแบบอุปกรณ์รับแสงจึงต่างกัน แต่การออกแบบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ นี้ จะช่วยทำให้ลดการรบกวนจำพวกสี ฟองอากาศ ระยะเดินทางของแสง การดูดซับ และการหักเหของแสง ซึ่งค่าเหล่านี้จะส่งผลให้ค่าความขุ่นที่ได้ไม่แม่นยำ และไม่สามารถนำไปใช้การเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความขุ่นได้จริงในการตรวจวัด

มาตรฐานการออกแบบเครื่องวัดความขุ่น มาตรฐานการออกแบบเครื่องวัดความขุ่นได้แบ่งออกเป็น 3 มาตรฐาน ดังนี้

1) USEPA method 180.1 (U.S. Environmental Protection Agency, 1993) ได้กล่าวถึงมาตรฐานการออกแบบเครื่องวัดความขุ่นดังนี้

- แหล่งกำเนิดแสง หลอดทังสเตนที่ให้อุณหภูมิสี แสดงระหว่าง 2,200 – 3,000 องศาเซลเซียส
- ช่วงระยะของแสงที่ตกกระทบและแสงที่กระจายออกจากน้ำต้องไม่เกิน 10 เซนติเมตร
- อุปกรณ์วัดแสงบริเวณกึ่งกลางทำมุม 90 องศา กับแนวแสงส่องเข้าหาน้ำ และทั้งหมดเอียงไม่เกิน ± 30 องศา อุปกรณ์รับแสง และตัวกรอง ต้องทำงานได้ดีที่สุดในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 400–600 นาโนเมตร

2) GLI method 2 (Great Lakes Instruments, Inc., 1992) ซึ่งข้อกำหนดของ GLI Method 2 มีดังนี้

- แหล่งกำเนิดแสงมีความยาวคลื่น 860 นาโนเมตร
- รัศมีของสเปกตรัมต้องน้อยหรือไม่เกิน 60 นาโนเมตร
- รั้งสีตกกระทบต้องขนานและเอียงทำมุมเข้าหากันไม่เกิน 1.5 องศา
- ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง 2 ชุด และตัวรับแสง 2 ชุด
- มุมที่ได้จากการวัดของรั้งสีตกกระทบและรั้งสีสะท้อนในตัวอย่างที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 90 ± 2.5 องศา

3) ISO 7027 (International Organization for Standardization, 1999) โดยมาตรฐานนี้ ได้ให้ข้อกำหนดสำหรับการออกแบบเครื่องวัดความขุ่น ซึ่งเป็นข้อกำหนดที่ผู้ผลิตเครื่องมือต้องทำตามอย่างเคร่งครัดเพื่อความแม่นยำดังนี้

- แหล่งกำเนิดแสงมีความยาวคลื่น 860 นาโนเมตร
- รัศมีของสเปกตรัมต้องน้อยหรือไม่เกิน 60 นาโนเมตร
- รั้งสีตกกระทบต้องขนานและเอียงทำมุมเข้าหากันไม่เกิน 2.5 องศา
- มุมที่จะวัดต้องได้ไม่เกิน 90 ± 2.5 องศา
- มุมรับแสงในตัวอย่างน้ำนั้นต้องอยู่ในช่วงระหว่าง 20 และ 30 องศา

2.1.5 ชนิดของเครื่องวัดความขุ่น โดยทั่วไปมีเครื่องวัดความขุ่นหลายชนิดด้วยกัน (Sadar, 2002) ดังนี้

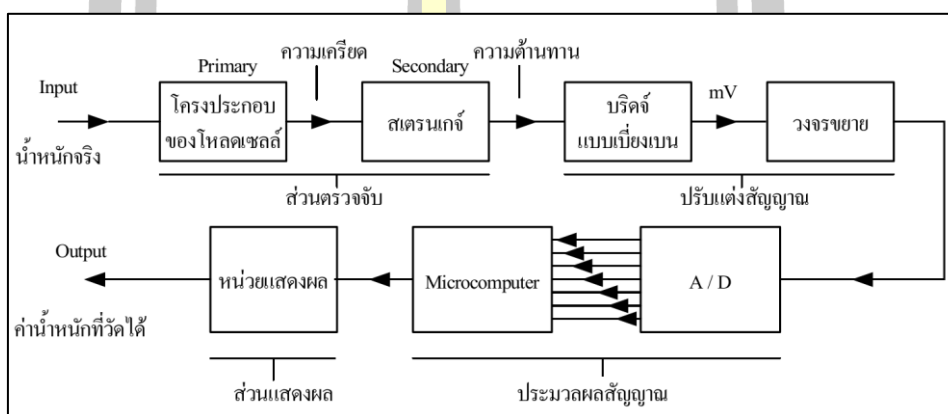
1) เครื่องวัดความขุ่นในห้องปฏิบัติการ (Bench Top Turbidimeter) มีลักษณะการใช้งานที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการ วัดสี และความขุ่นของน้ำได้สูง นิยมใช้การออกแบบเป็นแบบ Ratio Design สามารถวิเคราะห์น้ำตัวอย่างที่เก็บแบบจ้วง ต้องใช้กระแสไฟฟ้าในการทำงาน

2) เครื่องวัดความขุ่นแบบพกพา (Portable Turbidimeter) มีลักษณะการใช้งานเหมาะสมสำหรับการเก็บตัวอย่างความขุ่นในภาคสนาม แบบพกพา และในห้องปฏิบัติการได้ ใช้แบตเตอรี่ในการทำงาน มีการออกแบบ Single Beam และ Ratio Design สามารถวิเคราะห์น้ำตัวอย่างที่เก็บแบบจ้วง ทำงานและประมวลผลได้รวดเร็ว

3) เครื่องวัดความขุ่นแบบออนไลน์ (On-Line Turbidimeter) ใช้กับน้ำตัวอย่างที่บำบัดในภาคอุตสาหกรรม การออกแบบใช้แบบ Single Beam และ Modulate Four Beam และใช้ระบบ SCADA เข้ามาในการควบคุมการเก็บผลตัวอย่างและการประมวลผล ใช้วิธีการแบบให้น้ำไหลผ่านด้วยอัตรา 0.1-1.0 ลิตร/นาที แหล่งกำเนิดแสงอยู่เหนือหลอดตัวอย่างน้ำ และตัวรับแสงแช่อยู่ในหลอดตัวอย่างน้ำ

2.2 ทรานสดิวเซอร์และเซนเซอร์

ทรานสดิวเซอร์ คืออุปกรณ์ อุปกรณ์แปลงข้อมูล หรือพลังงานรูปแบบต่าง ๆ ให้เป็นข้อมูล หรือพลังงานไฟฟ้า หรืออาจกล่าวได้ว่า เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากรูปแบบหนึ่งเป็นพลังงานรูปแบบอื่น โดยที่ทรานสดิวเซอร์อาจรวมทั้งอุปกรณ์ตรวจจับ และส่วนปรับแต่งสัญญาณ เช่น ระบบการวัดขั้วน้ำหนัก ซึ่งจะหมายรวมทั้ง 4 ส่วนคือ ส่วนการตรวจจับ ส่วนปรับแต่งสัญญาณ ส่วนประมวลผล และส่วนแสดงผล ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ระบบการวัดขั้วน้ำหนัก

(กิตติวุฒิ จินนะบุตร 2548)

เซนเซอร์ เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดตัวแรกในระบบการวัด ซึ่งจะใช้ตรวจจับ หรือรับรู้การเปลี่ยนแปลงปริมาณทางกายภาพของตัวแปรต่าง ๆ เช่น แสง สี เสียง ความร้อน ระยะทาง การเคลื่อนที่ ความดัน และการไหล เป็นต้น แล้วทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสัญญาณ หรือข้อมูลที่สอดคล้อง และเหมาะสมกับส่วนของการกำหนดเงื่อนไขทางสัญญาณ ถ้าใช้เซนเซอร์ตรวจจับตัวแปรโดยตรง เราเรียกว่า ตัวตรวจวัดแบบปฐม (Primary Sensors) หรือตัวตรวจวัดขั้นต้น หากมีการตรวจวัดโดยผ่านส่วนอื่นก่อน เช่น สเตรนเกจ ตรวจรับแรงกด ที่ต้องรับแรงถ่ายทอดจากแท่งโลหะที่รับแรงอีกทอด โดยใช้สเตรนเกจแปะติดกับแท่งโลหะนั้นเพื่อวัดแรงนั้น เราจะเรียกสเตรนเกจในกรณีนี้ว่าเป็น ตัวตรวจวัดทุติยภูมิ (Secondary Sensor) หรือตัวตรวจจับขั้นรอง การตรวจวัดจะอาศัยผลการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในตัวเซนเซอร์เองที่ตรวจวัดได้ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า เช่น แรงดัน กระแส ความต้านทาน ความจุ และความเหนี่ยวนำ เป็นต้น เมื่อค่าตัวแปรทางกายภาพเปลี่ยนแปลงแล้วพารามิเตอร์ของตัวเซนเซอร์เหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตาม เมื่อเราทราบค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตาม อาจวัดได้โดยโวลต์มิเตอร์ หรือวงจรรบริดจต่าง ๆ ซึ่งเป็นการวัดตัวแปรทางอ้อม

ด้วยวิธีทางไฟฟ้า โดยเราจะทำการเปรียบเทียบ หรือปรับแต่งปริมาณทางไฟฟ้านี้ แทนค่าตัวแปรที่ทำการวัดอีกครั้งหนึ่ง อาจเรียกว่าเป็นการวัดโดยวิธีอ้อมได้ กระบวนการนี้เรียกว่า การตรวจจับ (Sensing) หรือกรณีนี้ทรานสดิวเซอร์จะถูกเรียกว่า เซนเซอร์

2.2.1 ชนิดของทรานสดิวเซอร์

การแบ่งชนิดของทรานสดิวเซอร์แบ่งโดยอาศัยหลักเกณฑ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้คือ

2.1.1.1 แบ่งตามความต้องการพลังงาน

- แบบแอคทีฟ (Active Sensors) เป็นทรานสดิวเซอร์ที่สามารถปล่อยพลังงานเองได้ เช่น เทอร์โมคัปเปิล เพียโซโซ เซลล์แสงอาทิตย์ ออปโตไดโอด เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ไม่ต้องมีแหล่งจ่ายในตัวเอง สามารถให้สัญญาณแรงดัน หรือกระแส ที่เปลี่ยนแปลงตามตัวแปรได้เอง

- แบบพาสซีฟ (Passive Sensors) แบบนี้จะต้องใช้แหล่งจ่ายจากภายนอกจึงจะทำงาน และการตรวจวัดได้ เช่น เซ็นเซอร์ที่ใช้หลักการเปลี่ยนค่าความต้านทาน ค่าความจุ ค่าความเหนี่ยวนำ ฯลฯ เป็นต้น

2.1.1.2 แบ่งตามลักษณะกลไกในการทำงาน

- การเปลี่ยนแปลงค่าความจุ (Variable Capacitance Transducer)
- การเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ (Variable Inductance Transducer)
- การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (Variable Resistance Transducer)

2.1.1.3 แบ่งตามชนิดของการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

- เปลี่ยนพลังงานกลเป็นไฟฟ้า
- เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล
- เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า
- เปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า

2.1.1.4 แบ่งตามชนิดของสัญญาณที่ใช้

- แบบอนาล็อก ให้สัญญาณเป็นแบบต่อเนื่อง
- แบบไบนารีให้สัญญาณแบบเปิด-ปิด (ON-OFF)
- แบบดิจิทัลให้สัญญาณที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง

2.1.1.5 แบ่งตามตำแหน่งที่ใช้ในระบบ

- ทรานสดิวเซอร์ด้านเข้า (Input Transducer) อยู่ทางด้านเข้าของระบบเครื่องมือ เช่น ไมโครโฟน เป็นต้น

- ทรานสดิวเซอร์ด้านออก (Output Transducers) เช่น ลำโพงของระบบเครื่องขยายเสียง เป็นต้น

2.1.1.6 แบ่งตามข้อมูล หรือวัตถุประสงค์ในการวัด เช่น การเคลื่อนที่วัดอุณหภูมิความดัน อัตราการไหล เป็นต้น

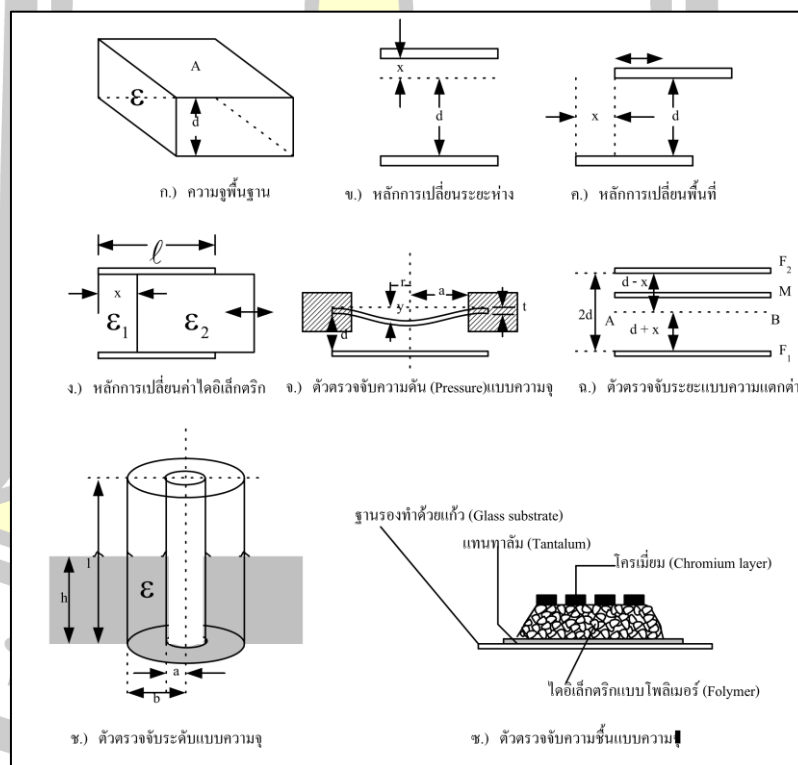
2.2.2 หลักการทำงานของทรานสดิวเซอร์แบบต่าง ๆ

หลักการทำงานของทรานสดิวเซอร์ โดยจะทำการเปลี่ยนพลังงานจากรูปหนึ่งเป็นอีกรูปหนึ่ง ซึ่งปกติจะนิยมเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ให้เป็นค่าแรงดัน หรือกระแสไฟฟ้า และนำค่าไปเทียบให้เป็นขนาดของตัวแปรที่ต้องการวัด มีหลักการทำงานเบื้องต้นดังต่อไปนี้

2.2.2.1 ตัวตรวจจับแบบความจุ และความเหนี่ยวนำ (Capacitive and Inductive)

หลักการเปลี่ยนค่าการเก็บประจุ และความเหนี่ยวนำ ไซวัดระยะทาง หรือ ระยะการเคลื่อนที่ มีหลักการทำงานดังนี้

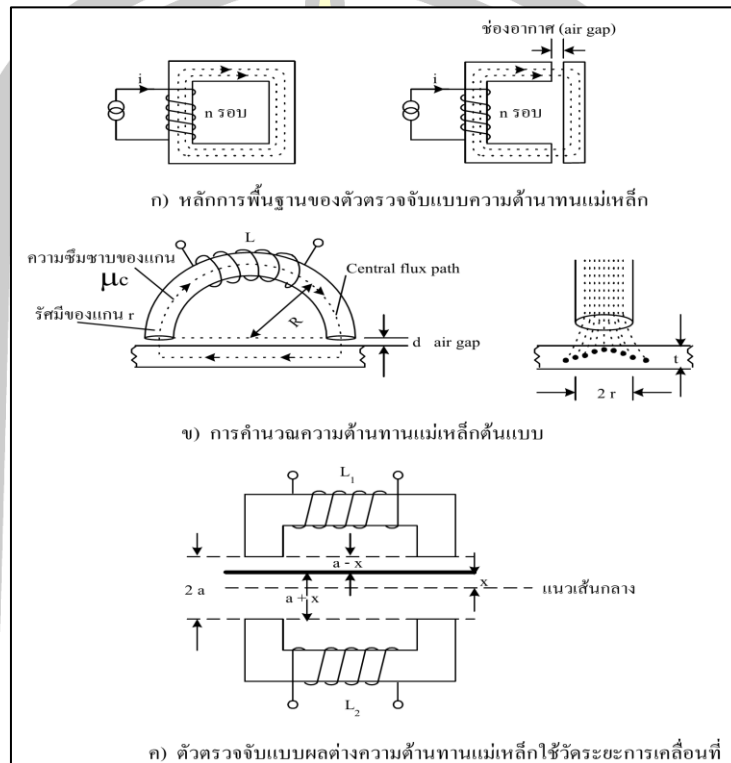
การเปลี่ยนค่าความจุ (Capacitive) ประกอบด้วยแผ่นโลหะอย่างน้อยสองแผ่น ที่มีฉนวน หรือไดอิเล็กตริก กั้นระหว่างแผ่นเพลตทั้งสอง สามารถอธิบายหลักการทำงานโดยใช้สมการของตัวเก็บประจุบนแผ่นเพลตแบบขนานได้ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ค่าความจุที่นำไปดัดแปลงเป็นตัวตรวจจับ

(กิตติวุฒิ จินนະบุตฺร 2548)

การเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำ (Inductive) แนวความคิดเกี่ยวกับวงจรแม่เหล็กได้ถูกนำมาใช้เทียบเคียงกับวงจรไฟฟ้า และหลักการทำงานของตัวตรวจจับแบบความต้านทานแม่เหล็กจะกล่าวโดยย่อ ๆ โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าทำให้กระแสเคลื่อนที่ผ่านความต้านทานในวงจร



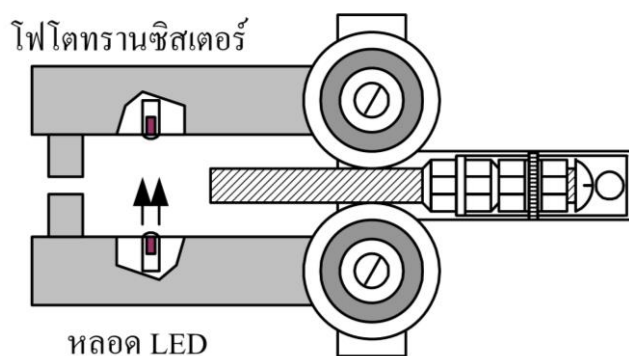
ภาพที่ 4 หลักการตรวจจับแบบความต้านทานแม่เหล็ก
(กิตติวุฒิ จินนะบุตร 2548)

วงจรแม่เหล็กดังภาพที่ 4 (ก) เมื่อมีกระแส i ไหลผ่านขดลวด n ที่พันรอบแกนเหล็กที่ทำจากสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic Material) เราจะพิจารณาขดลวดเป็นแหล่งจ่ายที่กำเนิดเส้นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ภาพที่ 4 (ข) แสดงแกนถูกแยกออกจากกันเป็นสองส่วนด้วยช่องว่างอากาศ (Air Gap) ที่ปรับระยะได้ ความต้านทานแม่เหล็กทั้งหมดของวงจรได้จากทั้งแกนเหล็ก และช่องว่างอากาศ โดยความซึมซาบของอากาศมีค่าเท่ากับ 1 และช่องแกนจะมีค่าตามวัสดุ เมื่อมีช่องว่างอากาศเกิดขึ้น จะทำให้ความต้านทานแม่เหล็กมีค่าความต้านทานเพิ่มมากขึ้น ผลทำให้เส้นแรงแม่เหล็กลดลง ดังนั้นเราจะสามารถใช้หลักการดังกล่าวนี้ สร้างเป็นตัวตรวจจับระยะการเคลื่อนที่ได้ ภาพที่ 4 (ค) เป็นต้นแบบของตัวตรวจจับระยะ แบบอาศัยการเปลี่ยนค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Variable Reluctance) ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ แกนเหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติกรูปครึ่งวงกลม ช่องว่าง

อากาศ และแผ่นเฟอร์โรแมกเนติก หรือเรียกว่า อาร์เมเจอร์ (Armature) ความต้านทานแม่เหล็กรวมได้จากความต้านทานแม่เหล็กของแต่ละส่วนรวมกัน

2.2.2.2 ตัวตรวจจับแบบใช้แสง

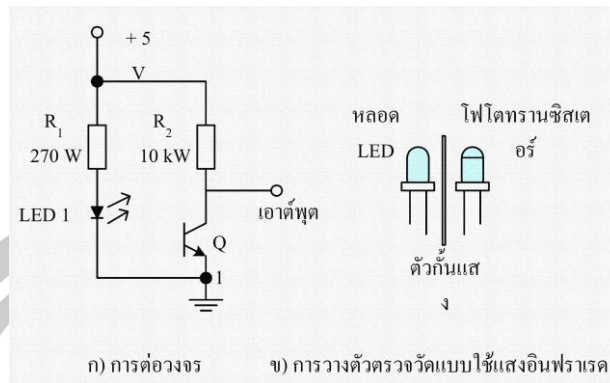
ตัวตรวจจับแบบใช้แสง แสดงดังภาพที่ 5 จะใช้ลำแสงที่มีขนาดเล็ก ตรวจสอบว่าวัตถุอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการหรือไม่ เป็นวิธีตรวจจับที่ไม่ละเอียด และมีความถูกต้องน้อยที่สุด ไม่นิยมใช้กับแขนกล ที่จำเป็นต้องการความละเอียดสูง การติดตั้งตัวตรวจจับแบบใช้แสงสามารถติดตั้งได้ง่าย โดยการติดตั้ง LED แบบอินฟราเรดด้านใดด้านหนึ่ง และติดตั้งตัวรับแสงอินฟราเรดอีกด้านหนึ่ง โดยให้สิ่งที่ต้องการตรวจจับอยู่ระหว่างกลาง เช่น ติดตั้งชุดอินฟราเรดที่ฝ่ามือของแขนกล ทำให้รูวัตถุกำลังอยู่ในระยะที่สามารถจับได้หรือไม่ เป็นต้น



ภาพที่ 5 แสดงการใช้หลอด LED และโฟโตทรานซิสเตอร์เป็นตัวตรวจจับ

(กิตติวุฒิ จินนะบุตร 2548)

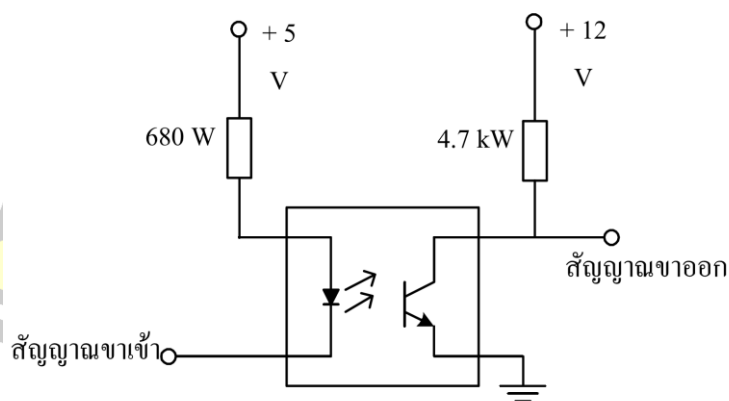
ตัวตรวจจับแบบใช้แสงอินฟราเรดอย่างง่ายแสดงดังภาพที่ 6 ซึ่งใช้ LED แบบอินฟราเรด และโฟโตทรานซิสเตอร์แบบอินฟราเรด โดยเอาตพุดของทรานซิสเตอร์สามารถนำไปต่อเข้ากับวงจรควบคุมใดๆ ก็ได้ตามความต้องการ และมีความต้านทานใช้ปรับเพื่อเพิ่มหรือลดความไวของวงจร การเพิ่มค่าความไวจะทำให้สามารถตรวจจับวัตถุได้ไกล ส่วนการลดความไวจะทำให้สามารถเคลื่อนเข้าไปใกล้วัตถุได้มากขึ้น ก่อนที่จะตรวจจับได้ ตัวตรวจจับแบบนี้จะต้องมีแผ่นกันแสงที่กระจายอยู่ในห้อง และแสงจากหลอด LED ซึ่งตำแหน่งของหลอด LED และโฟโตทรานซิสเตอร์ต้องวางให้ถูกต้อง ซึ่งตัวตรวจจับอาจสร้างขึ้เอง หรือใช้ตัวตรวจจับที่ทำสำเร็จแล้ว เช่น ตัวตรวจจับ TIL139 จากบริษัท Texas Instruments



ภาพที่ 6 วงจรตรวจจับที่ใช้ LED และโฟโตทรานซิสเตอร์
(กิตติวุฒิ จินนະบุตร 2548)

2.2.2.3 ออปโตไอโซเลเตอร์(Opto-isolator)

ออปโตไอโซเลเตอร์ เป็นอุปกรณ์ตรวจจับที่ทำงานด้วยแสง ซึ่งแยกวงจรที่มีระดับแรงดันต่างกัน ประกอบด้วยส่วนกำเนิดแสง (LED) ที่ควบคุมด้วยแรงดันไฟจากแหล่งจ่ายไฟ และออปโตทรานซิสเตอร์ ทำหน้าที่ต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับสัญญาณด้านขาออกของทรานซิสเตอร์ แสดงดังภาพที่ 6 โดยแต่ละด้านของออปโตไอโซเลเตอร์จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟที่แยกอิสระกัน จึงใช้งานเป็นตัวปรับระดับแรงดันไฟฟ้าได้ เช่น เปลี่ยนจากสัญญาณไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็น 12 โวลต์เป็นต้น



ภาพที่ 7 ออปโตไอโซเลเตอร์
(กิตติวุฒิ จินนະบุตร 2548)

2.2.3 ตัวตรวจจับแบบไม่สัมผัส

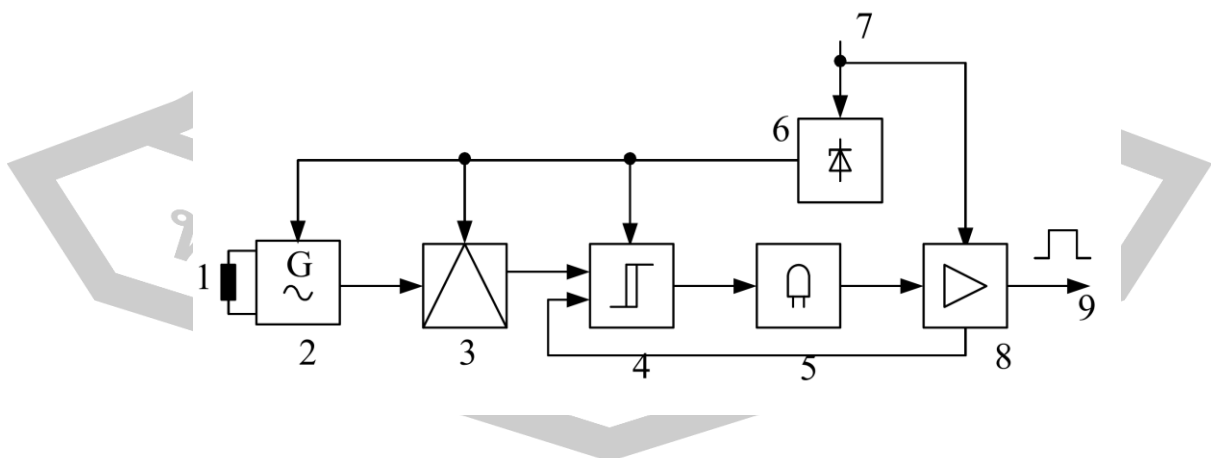
ตัวตรวจจับแบบไม่สัมผัส หรือที่นิยมเรียกว่า พร็อกซิมิตี้เซนเซอร์ใช้หลักการทางไฟฟ้าดังนี้

2.2.3.1 ตัวตรวจจับแบบเหนี่ยวนำ (Inductive Sensors)

ตัวตรวจจับแบบเหนี่ยวนำ หรือเรียกว่าอินดักทีฟเซนเซอร์ ทำงานโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ซึ่งวัตถุที่ตรวจจับได้จะต้องเป็นโลหะเท่านั้น มีลักษณะดังภาพที่ 8 และมีโครงสร้างภายในประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 8 ตัวอย่างตัวตรวจจับแบบไม่สัมผัสใช้หลักการเหนี่ยวนำ
(Howard, 2013)



ภาพที่ 9 แสดงส่วนประกอบของตัวตรวจจับแบบเหนี่ยวนำ
(กิตติวุฒิ จินนะบุตร 2548)

ส่วนประกอบของตัวตรวจจับแบบเหนี่ยวนำ

- 1) ส่วนตรวจจับ (ขดลวด) (Active Zone : Coil)
- 2) วงจรกำเนิดคลื่นความถี่(Oscillator)
- 3) ส่วนการประมวลผล (Evaluator)
- 4) วงจรเปรียบเทียบและจุดชนวน (Trigger)
- 5) หลอดแสดงสถานะการทำงาน (Status display)
- 6) วงจรคงคาแรงดันภายใน (Internal Constant Voltage Supply)
- 7) แหล่งจ่ายแรงดันภายนอก (External Voltage)
- 8) วงจรขยายและป้องกันด้านออก (Output and Protective)
- 9) สัญญาณด้านออก (เป็นแบบ ON-OFF)

หลักการการทำงานของตัวตรวจจับแบบความเหนี่ยวนำ มีหลักการทำงานดังนี้คือ ส่วนที่ 1 สร้างสนามแม่เหล็กตามความถี่ของออสซิลเลเตอร์ หมายเลข 2 เมื่อมีวัตถุ หรือชิ้นงานที่เป็นโลหะเข้ามาในระยะที่สนามแม่เหล็กส่งไปถึงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดการออสซิลเลทลดลง หรือหยุดการออสซิลเลท เมื่อนำโลหะออกห่างจากตัวตรวจจับ วงจรกำเนิดความถี่ จะเริ่มทำงานตามปกติ จากทั้งสองสภาวะจะถูกเปรียบเทียบด้วยส่วนหมายเลข 3 และ 4 จากนั้นก็จะถูกส่งผลไปยังส่วนที่ 5 และส่วนที่ 8 ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นสภาวะ ON หรือ OFF

2.2.3.2 ตัวตรวจจับแบบความจุไฟฟ้า (Capacitive Sensor)

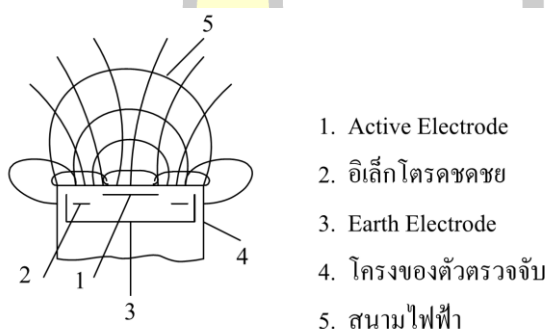
ตัวเหนี่ยวนำแบบนี้สามารถตรวจจับวัตถุได้ทั้งที่เป็นโลหะ และไม่เป็นโลหะ ใช้หลักการตรวจจับค่าความจุ เรียกว่า คาปาซิทีฟเซนเซอร์ โดยโครงสร้าง และส่วนประกอบจะคล้ายกับตัวตรวจจับแบบความเหนี่ยวนำ แต่ต่างกันที่ส่วนตรวจจับจะใช้หลักการเปลี่ยนค่าความจุแทน เมื่อวัตถุที่จะตรวจจับเคลื่อนที่เข้ามาในระยะสนามไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ซึ่งเกิดจาก Active และ Earth Electrode และอาจมีตัวนำที่ทำหน้าที่ป้องกันและชดเชยผล ของความชื้นที่ด้านหน้าของบริเวณตรวจจับ เมื่อมีวัตถุเคลื่อนที่เข้ามาในบริเวณตรวจจับ ค่าความจุของวงจรถูกกำเนิดคลื่นความถี่จะเปลี่ยนแปลงไป

จากภาพที่ 10 และ 11 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของตัวตรวจจับ แบบความจุไฟฟ้า เมื่อมีวัตถุใด ๆ เคลื่อนที่เข้ามาในบริเวณสนามไฟฟ้า จะทำให้ค่าความจุของวงจรถูกกำเนิดความถี่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งขึ้นกับระยะห่างระหว่างตัวกลาง หรือวัตถุกับด้านหน้าของส่วนตรวจจับ คาคงที่ทางไฟฟ้าของตัวกลาง (Dielectric Constant) (ถามีคาคงที่ของตัวกลางมาก ระยะการตรวจจับก็จะมีระยะไกลขึ้น) รวมทั้งขนาดและรูปร่างของตัวกลาง การทำงาน (ON) และไม่ทำงาน (OFF) นั้นได้จากสภาวะของวงจรถูกกำเนิดความถี่ ว่ามีการออสซิลเลทหรือไม่ โดยหลักการเช่นเดียวกันกับตัวตรวจจับแบบเหนี่ยวนำ ระยะการตรวจจับมาตรฐานได้จากการใช้แผ่นโลหะเป็น

วัตถุตัวกลาง เมื่อเปลี่ยนวัตถุตัวกลางเป็นวัสดุอื่น ระยะทางก็จะแตกต่างกันไป โดยการคูณค่าตัวประกอบ กับระยะมาตรฐาน จะได้ระยะตรวจจับ ตามตารางที่ 1 เป็นตัวอย่างตัวประกอบของวัตถุตัวกลางชนิดต่างๆ



ภาพที่ 10 ตัวอย่างตัวตรวจจับแบบความจุแบบต่างๆ
(Howard, 2013)

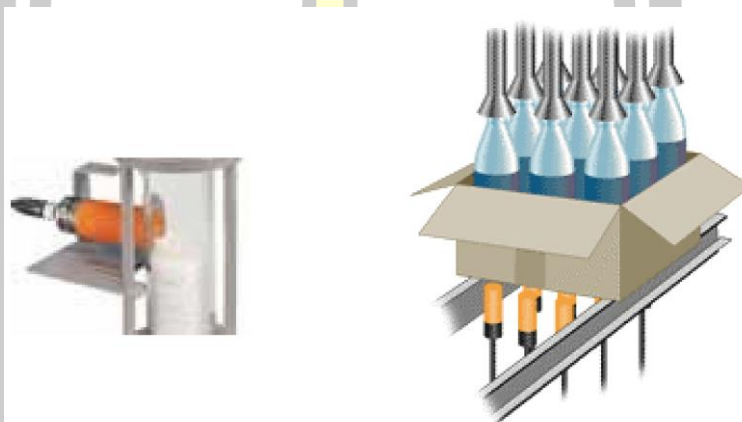


ภาพที่ 11 ภาพตัดขวางด้านข้างส่วนตรวจจับของตัวตรวจจับแบบไม่สัมผัสแบบความจุไฟฟ้า
(กิตติวุฒิ จินนະบุตร 2548)

ตารางที่ 1 ตัวอย่างตัวประกอบของวัตถุตัวกลางชนิดต่างๆ

ชนิดของวัตถุ	ค่าตัวประกอบ
โลหะทุกชนิด	1.0
น้ำ	1.0
แก้ว	0.3-0.5
พลาสติก	0.3-0.6
กระดาษแข็ง	0.3-0.5
ไม้(ขึ้นอยู่กับความชื้น)	0.2-0.7
น้ำมัน	0.1-0.3

การปรับตัวตรวจจับสนจะมีโพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) ใช้สำหรับปรับความไวของระยะการตรวจจับสน ซึ่งจะอยู่ส่วนท้ายของตัวตรวจจับสน และสามารถเลือกปรับไม่ให้อ่านค่าที่ขวางกันอยู่ก่อนวัตถุ ที่ต้องการตรวจจับสน ตัวอย่างเช่น การตรวจจับสนน้ำที่อยู่ในภาชนะบรรจุ การตรวจจับสนขวดในกล่องกระดาษ เป็นต้น ซึ่งตัวตรวจจับสนจะสามารถปรับไม่ให้อ่านค่าภาชนะบรรจุ หรือกล่องกระดาษได้ การประยุกต์ใช้งานตัวตรวจจับสนแบบความจุไฟฟ้ามีหลายอย่าง เช่น การตรวจจับสนระดับของเหลวในภาชนะบรรจุ และการตรวจจับสนจำนวนขวดในกล่องกระดาษ ดังภาพที่ 12 เป็นต้น

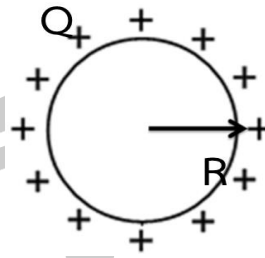


ภาพที่ 12 ตัวอย่างการใช้ตัวตรวจจับสนแบบความจุไฟฟ้า
(Chinpanthana, 2022)

2.3 คุณสมบัติของค่าการเก็บประจุทางไฟฟ้า

ความจุไฟฟ้า (Capacitance) เมื่อประจุไฟฟ้าใส่บนตัวนำที่วางอยู่โดดเดี่ยว ประจุจะกระจายอยู่ที่ผิวของตัวนำ สนามไฟฟ้าภายในตัวนำจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวจะมีค่าเท่ากัน ถ้าใส่ประจุบนตัวนำเพิ่มขึ้น ขนาดของศักย์ไฟฟ้าก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของประจุที่ใส่เข้าไป แต่ทุกๆ จุดบนผิวตัวนำจะมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันเสมอ ดังภาพที่ 13 (สมพงษ์ ใจดี, 2541)

พินิจ ปณ ทิโต ชีเว



ภาพที่ 13 แสดงการกระจายตัวของประจุที่ผิวรอบตัวนำ

จากภาพที่ 13 เมื่อขนาดของประจุไฟฟ้าบนแผ่นประจุไฟฟ้าในแต่ละแผ่น (Coulombs, q) แปรผันตรงกับขนาดของความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง (Volts, V) ดังนั้นความจุทางไฟฟ้า C มีค่าเท่ากับ

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.2)$$

เมื่อ

Q คือ ขนาดของประจุไฟฟ้าบนแผ่นประจุไฟฟ้าแต่ละแผ่น (Coulombs, q)

V คือ ขนาดของความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง (Volts, V)

ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์สองขั้วซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเป็นดังนี้

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (2.3)$$

โดยที่ i คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

V คือ แรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุ

C คือ ค่าความเก็บประจุ (capacitance) มีหน่วยเป็น ฟารัด (farad, F)

ความจุไฟฟ้า (capacitance, C) เป็นค่าที่ถึงบอกความสามารถในการเก็บประจุของตัวเก็บประจุ ปริมาณของประจุจะแปรผันตามแรงดันไฟฟ้า (V) และแปรผันตามพื้นที่ของแผ่นโลหะตัวนำที่ขนานกัน (A) โดยแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำที่ขนานกัน (d) ในกรณีที่เป็นช่องว่างอากาศ (ϵ_0) มีค่า เท่ากับ 8.854×10^{-12} Farads/meter และในกรณีที่เป็นไดอิเล็กทริก (ϵ) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ดังสมการ

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad \text{หรือ} \quad C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.4)$$

เมื่อ ϵ_0 คือ ค่าไดอิเล็กทริกของอากาศ ($\epsilon_{\text{air}} = \epsilon_0$) เท่ากับ 8.854×10^{-12} farad/meter

ϵ คือ ค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุ

A คือ พื้นที่ของแผ่นโลหะตัวนำ (m^2)

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (m)

ไดอิเล็กทริก เป็นสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties) ของวัสดุ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความมีขั้ว (polarity) ของวัสดุที่อุณหภูมิใด ๆ เช่น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอาหาร มีความสำคัญกับการออกแบบเครื่องจักร หรืออุปกรณ์ในการแปรรูปอาหาร

วัสดุไดอิเล็กทริก เป็นวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง จัดเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) มีความเป็นขั้ว (polar) สูง สามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้ได้ และเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่ดี หรือเป็นฉนวนไฟฟ้านั่นเอง

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำ เป็นโมเลกุลที่มีขั้ว โดยอะตอมของออกซิเจนมีขั้วเป็นลบเล็กน้อย และอะตอมของไฮโดรเจนมีขั้วเป็นบวกเล็กน้อย จึงทำให้น้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 78.5 และน้ำเมื่อเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง เนื่องจากโมเลกุลยึดจับกับน้ำที่อยู่รอบด้วยพันธะไฮโดรเจน ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำแข็งมีค่าเท่ากับ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความมีขั้วกับค่า dielectric constant ของตัวทำละลายดังตารางที่ 2 (Kumar, 2007)

ตารางที่ 2 ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (K) ของวัสดุ

(Kumar, 2007)

Material	Dielectric Constant	Dielectric Constant, $K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$
Vacuum		1
Air (1 atm)		1.00054
Air (100 atm)		1.0548
Glycerol		42.5
Methanol		32.6
1% Milk**		70.56

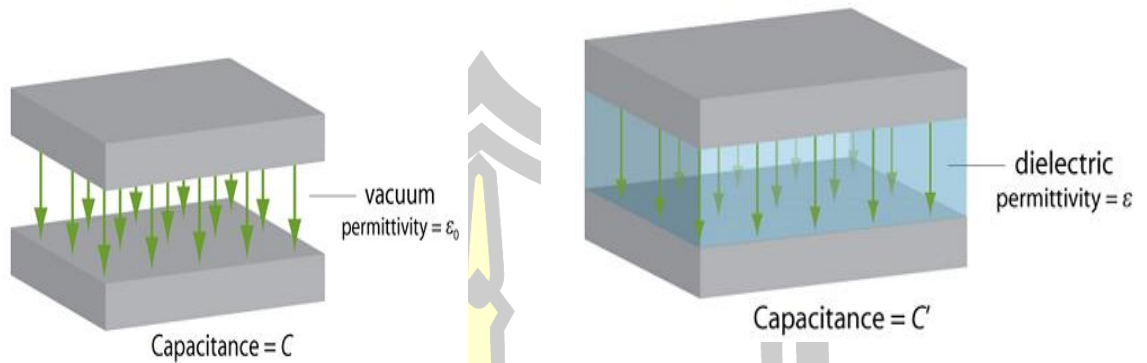
3.25% Milk**	67.98
Bakelite (Typical)	4.9
Glass (Pyrex)	4.5-5.5
Polystyrene (Typical)	2.6
Mylar (Typical)	3.5
Ethanol	24.3
Acetone	20.7
Paper (Typical)	3.5
Porcelain (Typical)	7
Teflon (Typical)	2.04
Isopropyl alcohol	18.3
Benzyl alcohol	13.1
Mineral Oil (Typical)	4.5
Sorbitol solution (70%w/w)	62.0
Syrup USP	56.0
Water	78.5

หมายเหตุ **ที่มา T.Kudra และคณะ 1992 International Microwave Power Institute

สารที่ไม่นำไฟฟ้าตามปกติระหว่างแผ่นทั้งสองของตัวเก็บประจุ อาจเป็นอากาศหรือที่ว่างซึ่งมีค่าสภาวะยอมเป็น ϵ_0 ถ้าสารไดอิเล็กทริกชนิดหนึ่งแทนที่ว่างดังกล่าว ตัวเก็บประจุนั้นจะมีค่าความจุเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของค่าความจุใหม่ (ϵ) เทียบกับค่าความจุเดิม (ϵ_0) เรียกว่า ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (dielectric constant “K”) แสดงดังสมการ

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.5)$$

การทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุใดๆ ทำโดยนำวัสดุนั้นไปวางไว้ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ วัสดุใดมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจะกักเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มาก ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ จะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ของวัสดุ ต่อค่าความจุไฟฟ้าของสุญญากาศ (ไม่มีหน่วย) การทดสอบค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุแสดงในภาพที่ 14



(ก) การทดสอบไดอิเล็กทริกแบบอากาศว่าง

(ข) การทดสอบไดอิเล็กทริกแบบมีไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลาง (Cambridge., 2004)

ภาพที่ 14 การทดสอบไดอิเล็กทริก

พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุคือพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุจะเก็บอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้า โดยมีสมการดังนี้

$$w_c(t) = \frac{1}{2} C v^2(t) \text{ J} \quad \text{หรือ} \quad w_c(t) = \frac{1}{2} \frac{q^2(t)}{C} \text{ J} \quad (2.6)$$

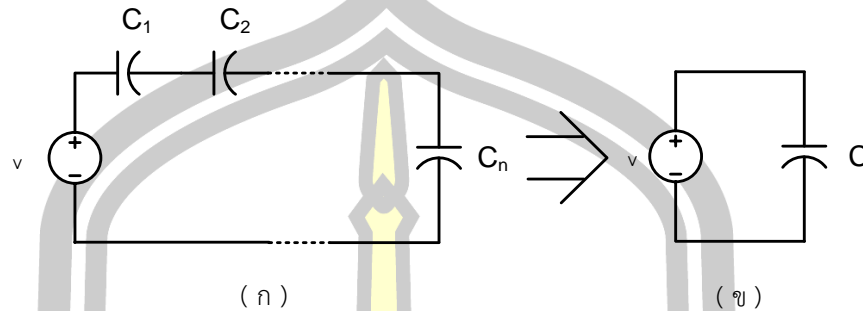
ตัวเก็บประจุในอุดมคติจะดูดกลืนหรือใช้พลังงานไม่ได้ แต่จะเก็บพลังงานไว้ และสามารถถ่ายพลังงานนั้นออกมาได้ภายหลัง ตัวอย่างเช่น ตัวเก็บประจุ 1 F มีแรงดันคร่อมอยู่ 10 V ดังนั้นพลังงานสะสมจะเป็น

$$w_c(t) = \frac{1}{2} C v^2(t) = \frac{1}{2} \times 1 \times 10^2 = 50 \text{ J} \quad (2.7)$$

ถ้าตัวเก็บประจุที่มีพลังงานสะสมอยู่แล้ว ไม่ได้ต่อกับวงจรหรืออุปกรณ์อื่นๆ เลย กระแสไฟฟ้าจะไหลไม่ได้ ทำให้ประจุ แรงดัน และพลังงาน ยังคงค้างอยู่ในตัวเก็บประจุเท่าเดิม ถ้าเรานำตัวเก็บประจุนั้นไปต่อเข้ากับตัวต้านทานเป็นวงจร ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลจนกระทั่งพลังงานสะสมถูก ดูดกลืนกลายเป็นความร้อนที่ตัวต้านทานจนหมด และแรงดันที่คร่อมอุปกรณ์ทั้งสองก็จะกลายเป็นศูนย์

ตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมหรือขนานกันนั้นสามารถถูกแทนได้ด้วยตัวเก็บประจุสมมูลตัวหนึ่ง โดยค่าการเก็บประจุสามารถหาได้ดังนี้

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (2.8)$$



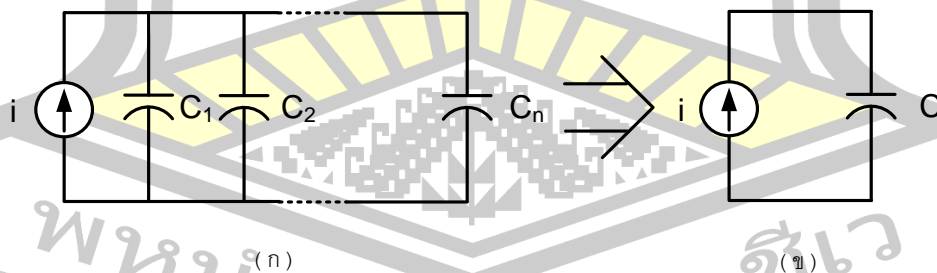
ภาพที่ 15 (ก) ตัวเก็บประจุต่ออนุกรม (ข) ตัวเก็บประจุสมมูล

จะเห็นว่า การรวมค่าความจุที่ต่ออนุกรมกันจะเหมือนกับการรวมค่าความต้านทานที่ต่อขนานกัน ดังนั้นในกรณีรวมค่าความเก็บประจุสองตัวจะเป็นตามสมการที่ 2.9

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.9)$$

สำหรับการรวมค่าความจุที่ต่อขนานกันดังภาพที่ 16(ก) จะได้ความเก็บประจุสมมูลในภาพที่ 16 (ข) ตามสมการที่ 2.10

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (2.10)$$



ภาพที่ 16 (ก) ตัวเก็บประจุต่อขนาน (ข) ตัวเก็บประจุสมมูล

2.4 แผ่นวงจรพิมพ์และวัสดุฐานรอง

แผ่นวงจรพิมพ์ (printed circuit board: PCB) เป็นแผ่นที่สร้างด้วยพลาสติกชนิดหนึ่งโดยมีการฉาบผิวด้วยทองแดงเต็มแผ่น และเมื่อต้องการใช้งานแผ่นวงจรพิมพ์ เพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์ หรือประกอบกันเป็นวงจรแทนการต่อวงจรด้วยสายไฟ เราก็จะสร้างลายด้วยกรรมวิธีต่างๆ ที่แตกต่างกันออกไปจนเกิดเส้นลายทองแดง จากนั้นทำการเคลือบแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยน้ำยาเคลือบ โดยแผ่นวงจรพิมพ์อาจมีด้านเดียว (single-sided) หรือสองหน้า (double-sided) คือ ที่มีทองแดงเคลือบอยู่ทั้ง 2 ด้าน แต่จุดบัดกรีไม่ต่อถึงกันในแต่ละด้าน เหมาะสำหรับวงจรที่มีความยุ่งยากซับซ้อน ส่วนแบบ 2 หน้า ที่เป็นเพลตทรูโฮลด์ (double side plate-through-hole: PTH) จะมีทองแดงอยู่ทั้ง 2 ด้าน และมีจุดบัดกรีที่ต่อถึงกันทั้ง 2 ด้าน

ส่วนประกอบที่สำคัญของแผ่นวงจรพิมพ์ คือ 1) ส่วนนำไฟฟ้า (copper sheet laminated) เช่น ทองแดง เป็นต้น นิยมใช้หน่วยวัดน้ำหนักเป็น "ออนซ์" เพื่อบ่งบอกถึงความหนาในส่วนฉนวน (Nonconductive substrate) 2) ส่วนวัสดุฐาน (substrates) นิยมใช้หน่วยวัดความหนาเป็น มิลลิเมตร วัสดุฐานรองทำมาจากวัสดุเป็นฉนวน น้ำหนักเบาและแข็งแรงที่นิยมใช้มี 3 ชนิดคือฟีนอลิก (phenolic) กลาสอีพอกซี (glass epoxy) และสารประกอบอีพอกซี (composite epoxy)

สมาคมผู้ผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อเมริกา (NEVA-National Electrical Manufacturers Association) ได้แบ่งเกรดของแผ่นวงจรพิมพ์แบ่งออกถึง 30 ชนิด แต่ที่นิยมใช้โดยทั่วไปจะพบประมาณ 10 ชนิด ดังนี้

2.4.1 เกรด XXX PC

แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ ทำขึ้นจากกระดาษยึดรวมตัวกันด้วยฟีนอลิกเรซิน (phenolic resin) เป็นชนิดที่ใช้งานทั่วไป ที่ทนความชื้นได้ไม่สูงมากนัก มีความต้านทานต่ำเมื่อเทียบกับแผ่นวงจรพิมพ์ที่ทำจากสารชนิดอื่น สามารถใช้งานกับความถี่สูงได้ถึงย่านความถี่วิทยุ ออกแบบมาให้ตัดเจาะได้ที่อุณหภูมิต่ำ

2.4.2 เกรด FR-2 (Phenolic Cotton paper)

แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ทำจากฟีนอลิก (phenolic) ลักษณะโดยทั่วไปคล้ายกับเกรด XXX PC แต่ออกแบบมาให้ติดไฟได้ยากกว่า ใช้งานอุณหภูมิสูงกว่าได้

2.4.3 เกรด FR-3 (cotton paper and epoxy)

แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ทำจากกระดาษบางๆ ยึดติดกันด้วยอีพอกซีเรซิน (epoxy resin) แข็งแรง สามารถใช้งานที่แรงดันสูง ทนความชื้นสูงได้ดีกว่า เกรด XXX PC และยังสามารถออกแบบมาให้ตัดเจาะได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง

2.4.4 เกรด FR-4 (woven glass and epoxy)

พัฒนาขึ้นมาจากเกรด FR-3 ทำจากใยแก้วยึดด้วยอีพอกซีเรซิน ใช้งานหลายประเภท ทนต่อความชื้น และอุณหภูมิที่สูง และใช้งานกับแรงดันสูงได้ดีกว่า เกรด XXX PC, FR-2 และ FR-3

2.4.5 เกรด FR-5 (woven glass and epoxy)

พัฒนาขึ้นจากเกรด FR-4 ให้มีความแข็งแรงสูงกว่าทั้งทางกลและทางไฟฟ้า อีกทั้งยังติดไฟยาก

2.4.6 เกรด FR-6 (matte glass and polyester)

ทำจากแผ่นใยแก้วบาง ๆ ยึดกันด้วยเทอร์โมเซตติงโพลีเอสเตอร์ (thermo settings polyester) มีความแข็งแรงต่ำ มีค่าคงที่ทางไดอิเล็กทริกต่ำ แต่มีคุณสมบัติที่ทนต่อความชื้น จึงเหมาะกับการที่มีความชื้นสูง

2.4.7 เกรด CEM1 (cotton paper nad epoxy)

แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ใช้เซลลูโลส (cellulose) เป็นแกนกลางมีใยแก้วทอเป็นผิวสองด้านยึดติดกันด้วยอีพอกซีเรซิน ทำให้ตัดและเจาะง่ายขึ้น แต่ทนความชื้นต่ำกว่าเกรด FR-4, FR-5 และ FR-6

2.4.8 เกรด G-10 (woven glass and epoxy)

เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดอีพอกซีไฟเบอร์กลาส (epoxy resin Fiberglass) มีความแข็งแรงทางกลสูง คุณสมบัติทางไฟฟ้าดีเยี่ยม มีลักษณะทั่วไปคล้ายกับเกรด FR-4 แต่ติดไฟยากกว่า แผ่นวงจรทั้งหมด ไซส์สตุแบบเดิม ๆ ทำเป็นแผ่นฐาน ยังมีแผ่นวงจรพิมพ์ที่ไซส์สารที่พัฒนาขึ้นมาใหม่เป็นแผ่นฐาน ได้แก่ เกรด G-30 และเกรด G-60

2.4.9 เกรด G-30

ใยแก้วทอยึดกันด้วยโพลีอะไมด์เรซิน (polyamide resin) มีความคงตัวสามารถทนต่อความชื้นสูง คุณสมบัติทางไฟฟ้าดีเยี่ยม เหมาะสำหรับการนำมาใช้ทำแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดมัลติเลเยอร์ (multi-layer)

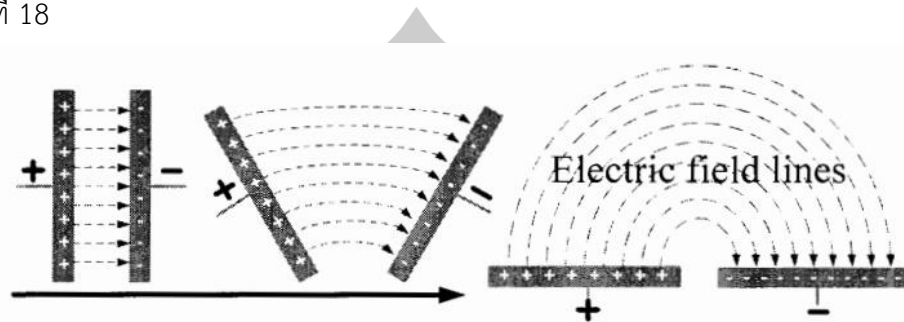
2.4.10 เกรด G-60

เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดพิเศษใช้สารโพลีซัลโฟนเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic polyesters) ทำเป็นฐานรอง เพราะมีค่าความสูญเสียในไดอิเล็กทริกต่ำ สามารถควบคุมคุณสมบัติของไดอิเล็กทริก (dielectric) ได้ง่าย นิยมใช้ในงานความถี่สูงเป็นกิกะเฮิร์ตซ (GHz.) ใช้สำหรับทำไมโครชิป เป็นต้น

2.5 ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัล

อินเตอร์ดิจิตัลอิเล็กโตรด (Interdigital Electrode) เป็นอิเล็กโตรดแบบค่าความจุไฟฟ้ารูปแบบหนึ่ง โดยการออกแบบให้วางแผ่นตัวนำออกในแนวระนาบ แทนการวางแผ่นตัวนำในแนวขนานเหมือนตัวเก็บประจุ ทำให้มีโครงสร้างเป็นชั้นเดียวกัน สิ่งที่เกิดขึ้นคือ ตัวเก็บประจุยังคงมี

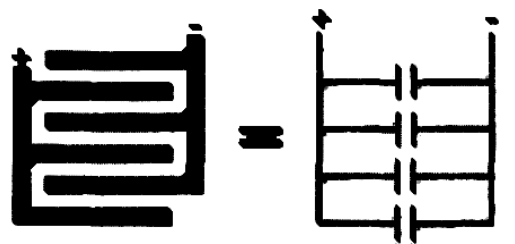
การสะสมประจุ และสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำ แต่ค่าความจุก็จะลดลงจากระยะห่างที่เพิ่มขึ้น
ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 17 รูปแบบของการเกิดสนามไฟฟ้าเมื่อแยกตัวนำออกจากกันในแนวระนาบ

(ธิตินันท์ ตะเกาน้อย, 2012)

แต่วิธีการทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้ โดยการวางแผ่นตัวนำต่อสลับไปมาของขั้วบวก และขั้วลบ คล้ายหวีสองอันวางทับกัน เกิดค่าความจุไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วน เหมือนการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกัน อีกประการสำคัญ ผลจากการแยกแผ่นตัวนำออกในลักษณะนี้ทำให้เราสามารถวางวัสดุไดอิเล็กทริกได้หลายขนาด โดยไม่ต้องเปลี่ยนโครงสร้างของตัวเก็บประจุใหม่ รูปแบบนี้จึงมีความเหมาะสมที่จำทำเป็นหัววัด และมีการกำหนดหัววัดชนิดนี้ว่า IDC ดังภาพที่18

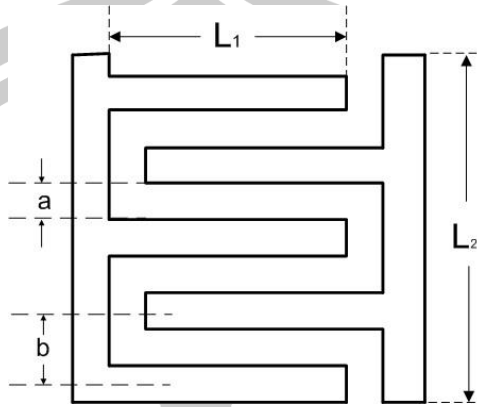


ภาพที่ 18 วงจรเสมือนของอินเตอร์ดิจิตัลอิเล็กโทรด

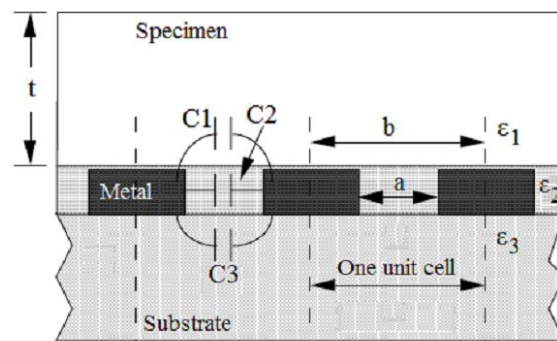
(ธิตินันท์ ตะเกาน้อย, 2012)

นักวิจัย Angkawisittpan N. กล่าวถึงเรื่องสมการการออกแบบ โครงสร้างดังภาพที่ 19 และ 20 เริ่มต้นจากหาค่า C_{UC} โดยมีองค์ประกอบ ϵ_0 คือค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในอากาศว่าง (permittivity of free space) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m , ϵ_1 คือค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ (the relative permittivity) ของวัสดุที่ใช้นำมาทดสอบเช่น อากาศ น้ำ น้ำมัน , ϵ_2 คือค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุระหว่างทองแดงอิเล็กโทรด และ ϵ_3 คือค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุ

ฐานรอง K คือ ฟังก์ชันของปริพันธ์เชิงวงรีของมอดุลัส (elliptic integrals of modulus) โดยมี a เป็นระยะห่างของซี่ b เป็นระยะความกว้างของอิเล็กโทรด หลังจากนั้นเป็นการหาค่าการเก็บประจุทั้งหมดของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ ดังสมการที่ 2.11-2.14



ภาพที่ 19 รูปแบบของตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิทัล



ภาพที่ 20 ภาพแนวตัดโครงสร้างของตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล

$$C = C_{UC} (N - 1) L_1 \tag{2.11}$$

$$C_{UC} = C_1 + C_2 + C_3 \tag{2.12}$$

$$C_1 + C_2 = \epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2} \right) \frac{K \left(\sqrt{1 - \left(\frac{a}{b} \right)^2} \right)}{K \left(\frac{a}{b} \right)} \tag{2.13}$$

พหุคูณ ปณ กิจ โศ ชีวะ

$$C_2 = \epsilon_0 \epsilon_2 \frac{h}{a} \quad (2.14)$$

โดยที่ C = ค่าการเก็บประจุทั้งหมดของอิเล็กโทรด

C_{uc} = ค่าการเก็บประจุของอิเล็กโทรด 1 คู่

N = จำนวนซีทั้งหมดของอิเล็กโทรด

$L1$ = ความยาวของซีอิเล็กโทรดแต่ละอัน

a = ระยะห่างระหว่างซี

b = ระยะความกว้างระหว่างทองแดงอิเล็กโทรด

ϵ_0 = ค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในอากาศว่าง (permittivity of free space) มีค่า 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_1 = ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุที่ใช้นำมาทดสอบ เช่น อากาศ น้ำ น้ำมัน

ϵ_2 = ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุระหว่างทองแดงอิเล็กโทรด

ϵ_3 = ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง

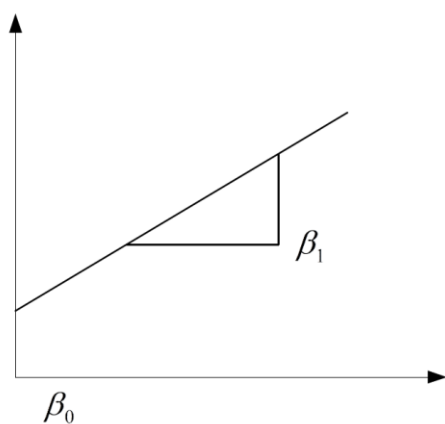
K = ฟังก์ชันของปริพันธ์เชิงวงรีของมอดูลัส

2.6 การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) และการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) (บุญชม ศรีสะอาด, 2541) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของตัวแปรหลักของการวิเคราะห์การถดถอยคือ ต้องการประมาณค่าของตัวแปรตัวหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า ตัวแปรตาม (Dependent Variable) นิยมเขียนแทนด้วย Y โดยอาศัยความรู้จากตัวแปรอื่นๆ ซึ่งเรียกว่า ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) นิยมเขียนแทนด้วย X หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่าเราใช้ความรู้ หรือสารสนเทศจากตัวแปร X เป็นเกณฑ์ในการประมาณค่าของตัวแปร Y ถ้าใช้ตัวแปร X เพียงตัวแปรเดียว ในการประมาณค่าตัวแปร Y ความสัมพันธ์ของ Y และ X จะเป็นเชิงเส้นตรง เราเรียกว่า การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression)

2.6.1 ตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Model) เราจะสมมติว่า Y และ X มีความสัมพันธ์กันในภาพที่ 21 จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ 2.15

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon \quad (2.15)$$

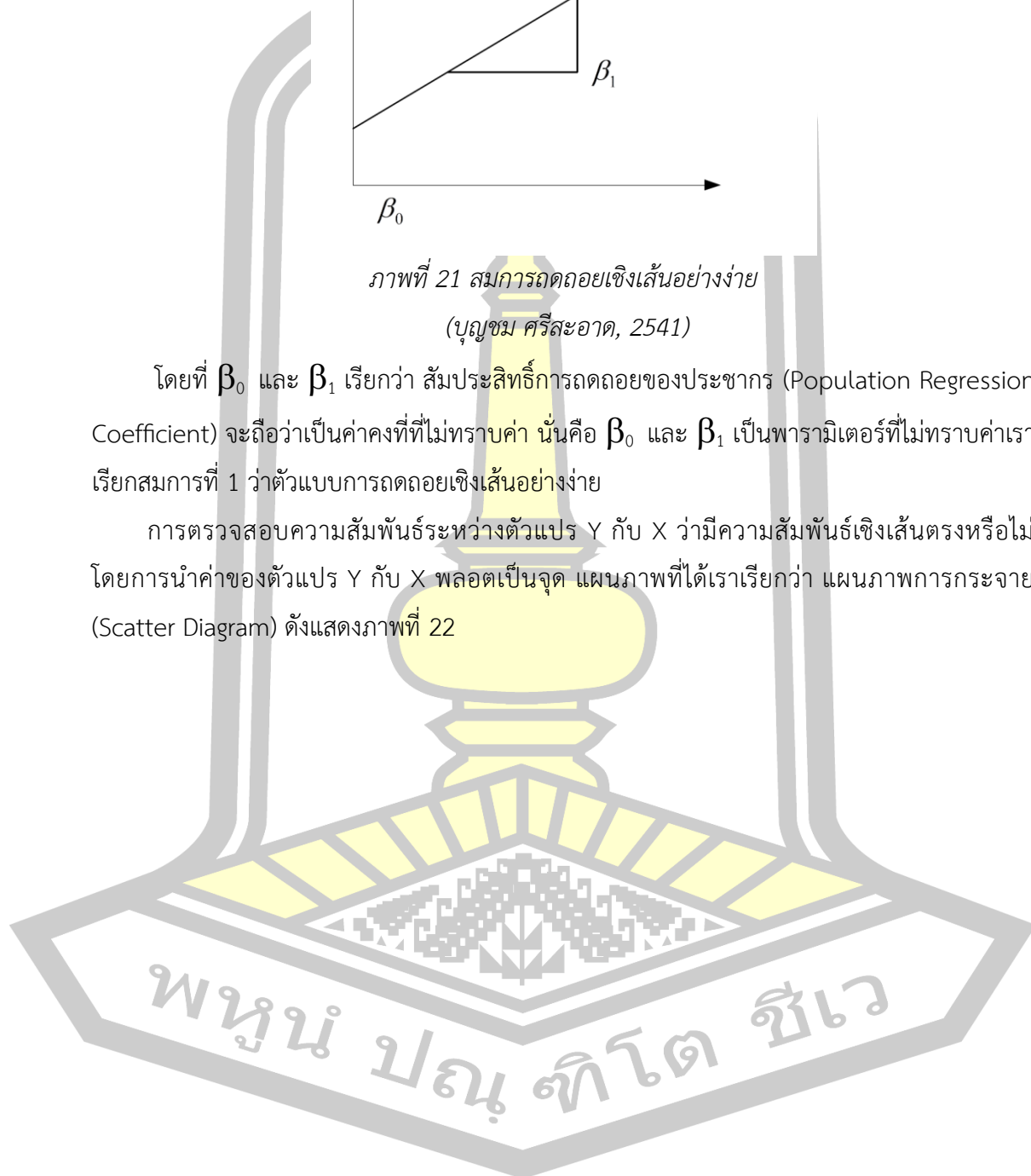


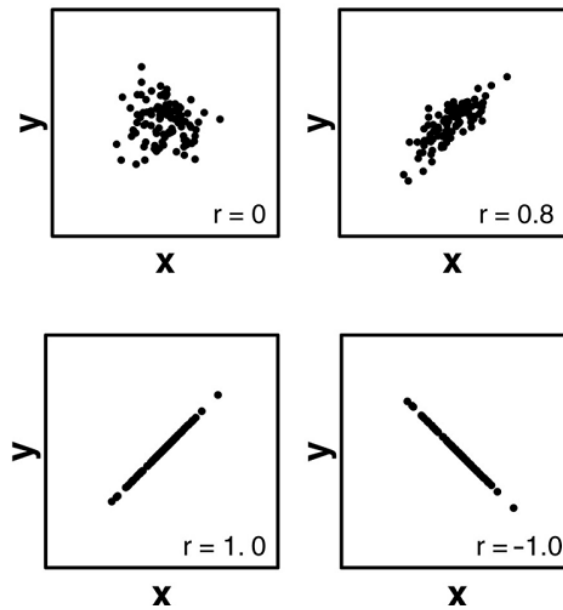
ภาพที่ 21 สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

(บุญชม ศรีสะอาด, 2541)

โดยที่ β_0 และ β_1 เรียกว่า สัมประสิทธิ์การถดถอยของประชากร (Population Regression Coefficient) จะถือว่าเป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า นั่นคือ β_0 และ β_1 เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าเราเรียกสมการที่ 1 ว่าตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

การตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร Y กับ X ว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงหรือไม่ โดยการนำค่าของตัวแปร Y กับ X พลอตเป็นจุด แผนภาพที่ได้เราเรียกว่า แผนภาพการกระจาย (Scatter Diagram) ดังแสดงภาพที่ 22





ภาพที่ 22 แผนภาพการกระจาย (Scatter Diagram)
(บุญชม ศรีสะอาด, 2541)

เมื่อเราทราบว่าตัวแปร Y กับ X มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง เราจะประมาณตัวแบบในสมการ
2.16 ด้วยสมการการถดถอย (Regression Equation)

$$\hat{Y} = a + bX \quad (2.16)$$

โดยที่ a และ b เป็นตัวประมาณแบบกำลังสองต่ำสุด (Least Square Methods) ของ β_0
และ β_1 ตามลำดับ กล่าวคือ เราจะหา a และ b ที่ทำให้

$$SSE = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum e_i^2 \text{ มีค่าน้อยที่สุด}$$

ค่าของ a และ b จะเป็นค่าประมาณของ β_0 และ β_1 ตามลำดับ เราเรียก a และ b ว่า
สัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวอย่าง (Sample Regression Coefficient) โดยที่

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} \quad (2.17)$$

$$b = \frac{\sum XY - (\sum X)(\sum Y)/n}{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}} \quad (2.18)$$

และ

เมื่อกำหนดสัญลักษณ์

$$S_{XX} = \sum (X - \bar{X})^2 = \sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}$$

$$S_{XY} = \sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y}) = \sum XY - \frac{(\sum X)(\sum Y)}{n}$$

$$S_{YY} = \sum (Y - \bar{Y})^2 = \sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n}$$

เราสามารถเขียน

$$b = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad (2.19)$$

2.6.2 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับ β_0 และ β_1

ในการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับ β_0 และ β_1 เราจะต้องมีข้อสมมติเกี่ยวกับ ε ดังนี้
 $\varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ การประมาณค่า σ^2 เป็นขั้นตอนแรกในการทดสอบสมมติฐาน (และสร้างช่วงความเชื่อมั่น) ที่จะกล่าวในตอนต่อไป เราได้ว่า ตัวประมาณที่ไม่เอนเอียงของ σ^2 คือ

$$S^2 = \frac{SSE}{n-2} \quad (2.20)$$

รากที่สองของ S^2 คือ S บางครั้งเราเรียกว่า ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าประมาณ หรือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (Standard Error of Estimate หรือ Standard Error of Regression)

$$S^2 = \frac{S_{YY} - bS_{XY}}{n-2} \quad (2.21)$$

การทดสอบสมมติฐาน และสร้างช่วงความเชื่อมั่นเกี่ยวกับ β_0 ในการทดสอบสมมติฐาน $H_0: \alpha = 0$ และ $H_1: \alpha \neq 0$ สถิติที่ใช้ทดสอบคือ ใช้ t test

$$t = \frac{a-0}{S_a} \quad \text{มีการแจกแจงแบบ } t \text{ ที่มีองศาแห่งความอิสระ } V = n - 2$$

2.6.3 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์

เราทราบความหมายของการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ตามสมการสำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ r คือ

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}} \quad (2.22)$$

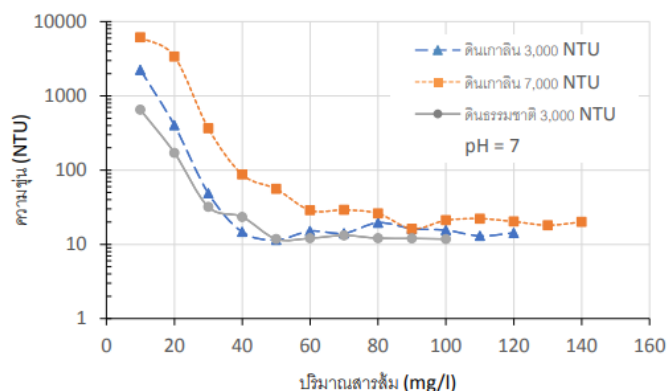
ซึ่งเราสามารถแสดงได้ว่า

$$r = \sqrt{R^2} \quad (2.23)$$

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิระพล พูลสวัสดิ์ และ ดร.ธัญลักษณ์ ราษฎร์ภักดี (Poonsawatt, 2019) นำเสนอปริมาณสารส้มที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดความขุ่นสูงในน้ำของระบบผลิตน้ำประปา โดยสังเคราะห์น้ำตัวอย่างจากดินเหนียวและดินธรรมชาติ จังหวัดเลย ดังภาพที่ พบว่าปริมาณดินทั้งสองชนิดที่ใช้ทำให้น้ำมีความขุ่นเพิ่มขึ้นนั้นเป็นสัดส่วนกันโดยตรง แต่ดินธรรมชาติจะต้องใช้ในปริมาณที่มากกว่า การทดลองทำจาร์เทสน้ำตัวอย่างที่สังเคราะห์จากดินเหนียว ที่ค่าความขุ่น 3,000 NTU และ 7,000 NTU และน้ำตัวอย่างที่สังเคราะห์จากดินธรรมชาติที่ค่าความขุ่น 3,000 NTU พบว่าปริมาณสารส้มที่เหมาะสมคือ 50 mg/l, 90 mg/l และ 50 mg/l ตามลำดับ น้ำตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยดินเหนียวที่ค่าความขุ่น 3,000 NTU และ 7,000 NTU หลังจากเติมสารส้ม 50 mg/l และ 90 mg/l จะเกิดตะกอนที่มีปริมาตร 50 ml และ 100 ml และมีความเป็นด่างคงเหลือเท่ากับ 68 mg/l as CaCO₃ และ 20 mg/l as CaCO₃ ตามลำดับ ส่วนน้ำตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยดินธรรมชาติที่ค่าความขุ่น 3,000 NTU หลังจากเติมสารส้ม 50 mg/l จะเกิดตะกอนที่มีปริมาตร 50 ml และมีความเป็นด่างคงเหลือเท่ากับ 10 mg/l as CaCO₃

พูน ปรณ ทิโต ชีเว



ภาพที่ 23 น้ำปริมาณสารส้มต่อความขุ่นของน้ำที่สังเคราะห์ด้วยดินเหนียว และดินธรรมชาติ (Poonsawatt, 2019)

อรณิชา ศรีจันทร์ (Srichun, 2010) นำเสนอการประยุกต์ใช้เครื่องวัดความขุ่นในการตรวจวัดปริมาณสารแขวนลอย ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง เครื่องวัดความขุ่น 3 รุ่น HACH รุ่น RATIO/XR HACH รุ่น 2100N เครื่องวัดความขุ่นแบบพกพาที่ห่อ EUTECH รุ่น TN100 จำนวนของตัวอย่าง อย่างละ 30 ตัวอย่าง มาจากสถานที่ และจุดเก็บที่แตกต่างกัน เพื่อการวิเคราะห์ผลการทดลองได้ใช้วิธีการทางสถิติแบบสหสัมพันธ์ในการสร้างความสัมพันธ์ ระหว่างปริมาณสารแขวนลอย และค่าความขุ่น โดยพัฒนาแบบจำลองด้วยวิธีการวิเคราะห์ ความถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (LR) วิธีโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ (ANN) และวิธีฟิชชิลอจิก (FL) มาเปรียบเทียบการทำนายค่าปริมาณสารแขวนลอยในแต่ละแห่ง ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองทั้งสามสามารถทำนายค่าปริมาณสารแขวนลอยได้โดยไม่มีความแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แบบจำลองที่ดีที่สุดในการทำนายค่าปริมาณสารแขวนลอยของสมการถดถอยเชิง เส้นอย่างง่ายมีค่า MAPE อยู่ในช่วง 6.075-136.153 ส่วนแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์อยู่ในช่วง 12.860-258.062 และแบบจำลองฟิชชิลอจิกมีค่าอยู่ในช่วง 9.988-75.236 ตามลำดับ

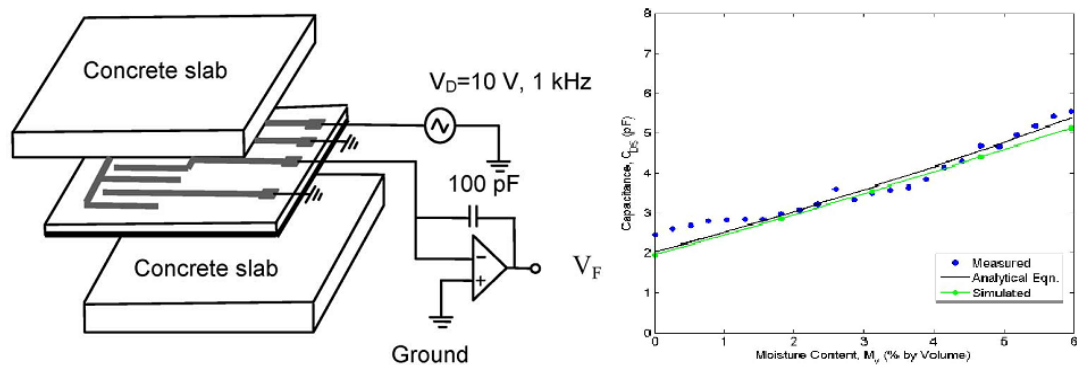
รัตนภรณ์ เทพมาลัย และคณะ (2012) (รัตนภรณ์ เทพมาลัย & ปรัชญา จันทร์ศักดิ์, 2012) นำเสนอการพัฒนาและประดิษฐ์เครื่องวัดความขุ่นแบบพกพา อาศัยหลักการกระเจิงแสงของอนุภาคความขุ่นในน้ำ ดังภาพที่ 24 และการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าผ่าน ตัวต้านทานไวแสงแสดงค่าความสัมพันธ์กับค่าความขุ่นที่วัดจากเครื่องวัดความขุ่น รุ่น 2100 AN ของบริษัท HACH ผลการทดสอบเครื่องวัดความขุ่นแบบพกพานี้ซึ่งใช้หลอดไส้ขนาด 6 วัตต์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง ร่วมกับแผ่นกรองแสงสีน้ำเงิน พบว่าผลต่างความต่างศักย์ที่ได้เป็นไปตามทฤษฎี คือค่าความขุ่นมาก การกระเจิงแสงมาก ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ต้องมากตาม ที่เป็นเช่นนี้ ความยาวช่วงนี้อยู่ระหว่าง 400-600 นา

โนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่ใช้ในการวัดความชื้นด้วยวิธีการกระเจิงแสงตามข้อ กำหนดเดิม (USEPA 180.1) พบว่าให้ค่าความแม่นยำในระดับที่สามารถนำไปใช้ได้ กล่าวคือ มีความคลาดเคลื่อน ร้อยละ 1.5 เมื่อทดลองวัดความชื้นน้ำดิบจากคลองประปาบางเขน



ภาพที่ 24 โครงสร้างของเครื่องวัดความชื้น
(รัตนาภรณ์ เทพมาลัย & ประชญา จันทร์ศักดิ์, 2012)

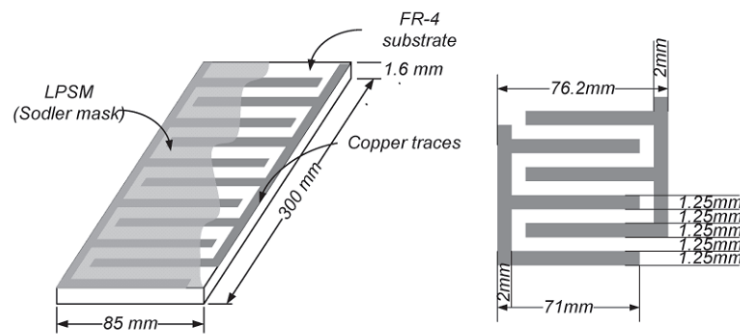
Md. Nazmul Alam และคณะ (2010) (Alam MdNazmul et al., 2010) นำเสนองานวิจัย เรื่อง การวัดความชื้นในคอนกรีต โดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลสนามระยะใกล้ โดยสร้างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบคู่ขนาน ที่จ่ายสัญญาณ $V_p = 1$ โวลต์ ความถี่ 1 kHz และเส้นคู่ขนานอีกคู่หนึ่งนำสัญญาณผ่าน Op-Amp เพื่อขยายสัญญาณค่าการเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบระหว่างค่าการเก็บประจุ กับค่าความชื้นในคอนกรีตที่ถือเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่มีในอากาศ ดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 การวัดความชื้นในคอนกรีตโดยตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลสนามระยะใกล้
(Alam MdNazmul et al., 2010)

ธิตินันท์ ตะพานน้อย และคณะ (2012) (ธิตินันท์ ตะพานน้อย, 2012) นำเสนอเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ โดยการออกแบบลายทองแดงของแผ่นวงจรให้มีลักษณะเป็นซี่

วางสลับกันไปมา ดังภาพที่ 27 ทำให้เกิดเป็นค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างขั้ว ซึ่งมีความแปรผันตามระดับน้ำ จากนั้นค่าคาปาซิแตนซ์ที่ได้จะถูกวัดและแปลงเป็นค่าระดับน้ำ ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อส่งต่อให้กับคอมพิวเตอร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์มีย่านวัด 0-30 เซนติเมตร มีผลตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นตลอดย่านวัด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9992 และมีค่าความผิดพลาดสูงสุด 2.3%



ภาพที่ 26 เซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์
(จิตินันท์ ตะพานน้อย, 2012)

X. Wang และคณะ (2019) (Wang et al., 2019) นำเสนอการวัดค่าการนำไฟฟ้าเป็นในการตรวจจับคุณภาพน้ำ ซึ่งสามารถแสดงความเข้มข้นโดยรวมของไอออนอนินทรีย์ต่างๆ เทคนิคนี้พัฒนาต่อยอดให้สามารถวัดความเข้มข้นอาจแตกต่างกันมากในสภาพแวดล้อมของน้ำ มีความแม่นยำสูงและช่วงกว้างโดยใช้อาร์เรย์เซ็นเซอร์อิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์แบบใหม่และอัลกอริทึมแบบปรับตัวเองได้ อาร์เรย์ประกอบด้วยอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์ 3 คู่ ที่มีค่าคงที่ของเซลล์ต่างๆ ดังภาพที่ 27 ออกแบบสร้างตัวเซ็นเซอร์ผลิตด้วย PCB ผลการทดลองมีประสิทธิภาพการวัดและผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าอาร์เรย์วัดที่แม่นยำได้ตั้งแต่ $0.5 \mu\text{s/cm}$ ถึง 500ms/cm ตามลำดับ

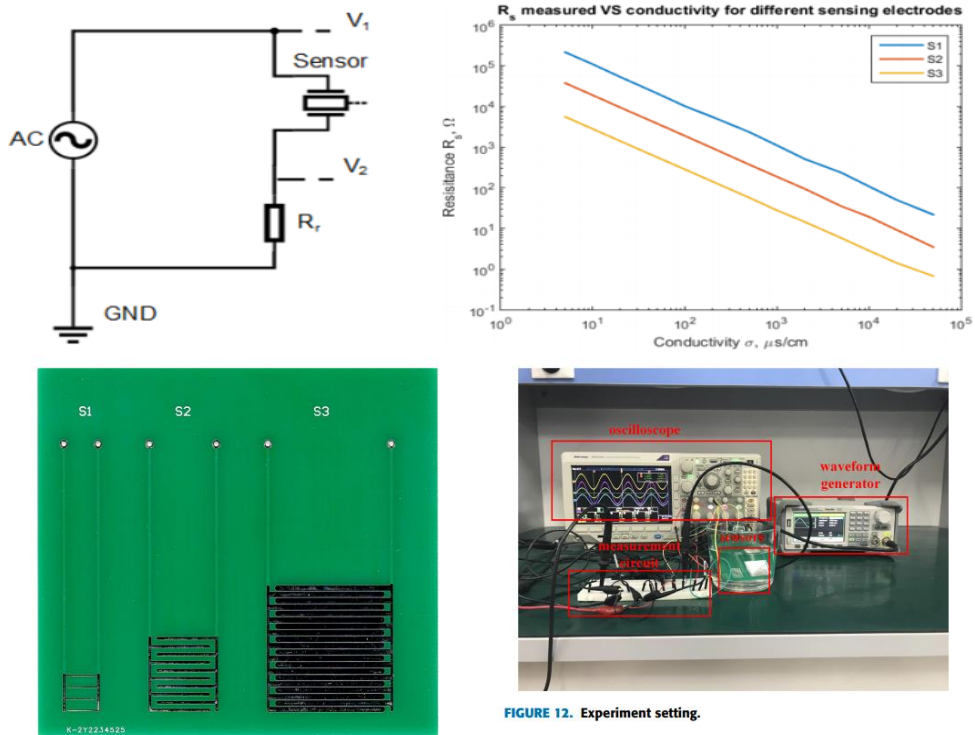
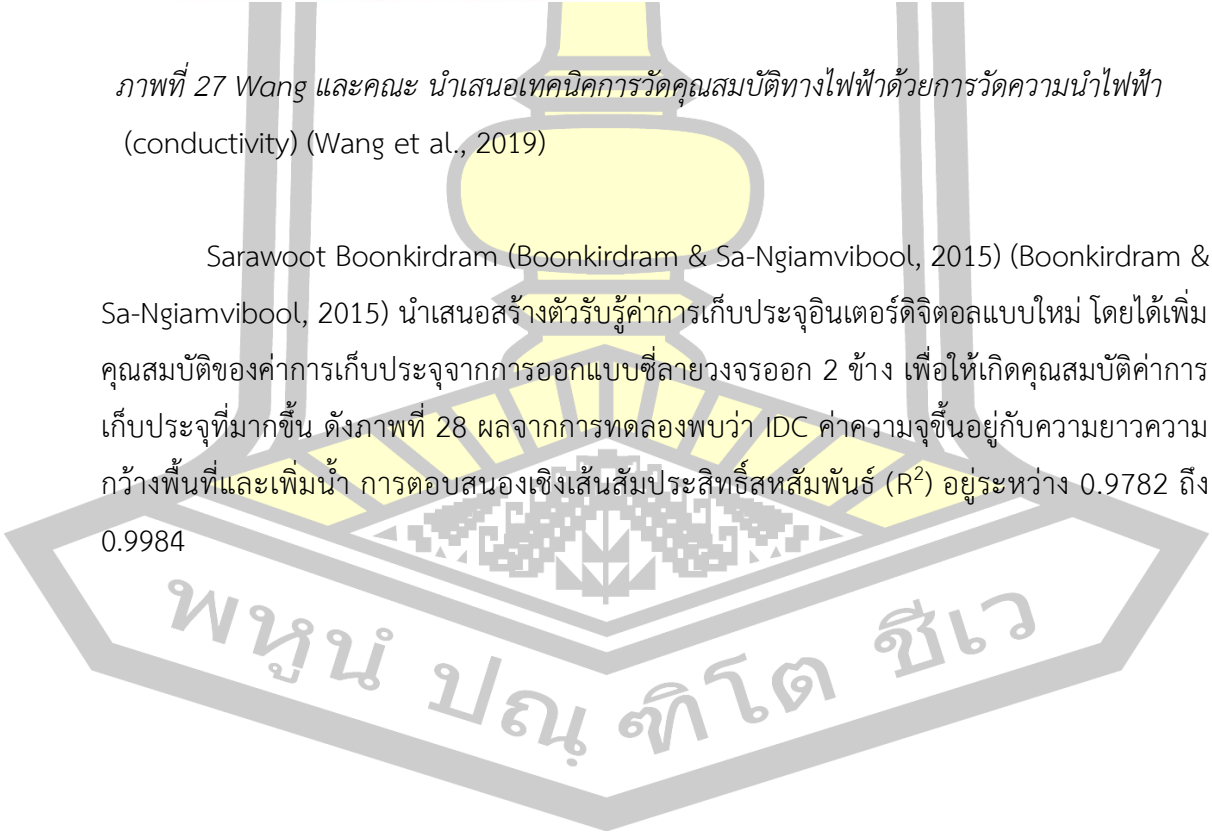
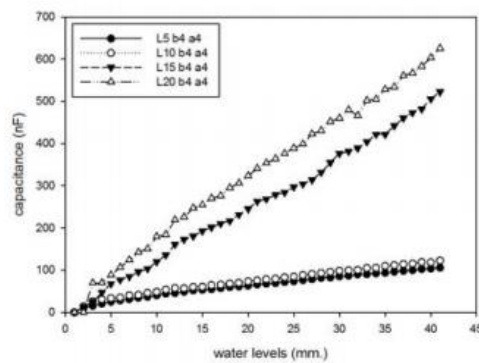
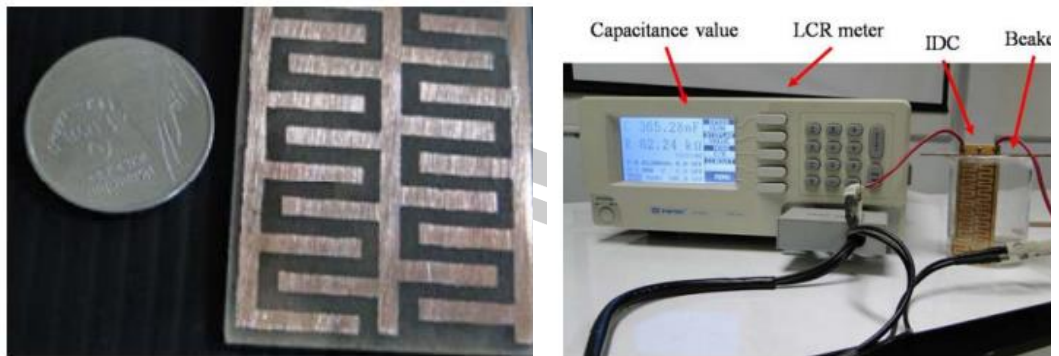


FIGURE 12. Experiment setting.

ภาพที่ 27 Wang และคณะ นำเสนอเทคนิคการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดความนำไฟฟ้า (conductivity) (Wang et al., 2019)

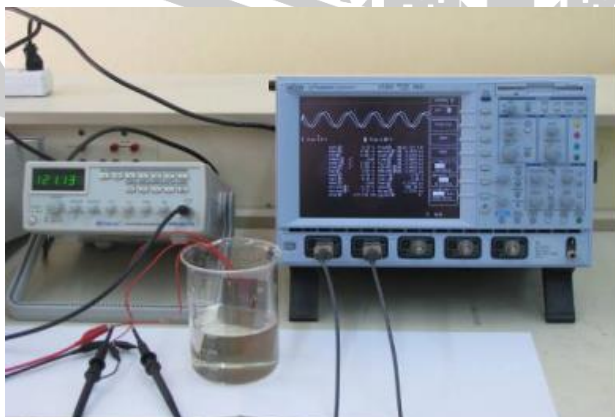
Sarawoot Boonkirdram (Boonkirdram & Sa-Ngiamvibool, 2015) (Boonkirdram & Sa-Ngiamvibool, 2015) นำเสนอสร้างตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบใหม่ โดยได้เพิ่มคุณสมบัติของค่าการเก็บประจุจากการออกแบบขั้วลายวงจรรอบ 2 ข้าง เพื่อให้เกิดคุณสมบัติค่าการเก็บประจุที่มากขึ้น ดังภาพที่ 28 ผลจากการทดลองพบว่า IDC ค่าความจุขึ้นอยู่กับความยาวความกว้างพื้นที่และเพิ่มน้ำ การตอบสนองเชิงเส้นสัมพันธ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ระหว่าง 0.9782 ถึง 0.9984

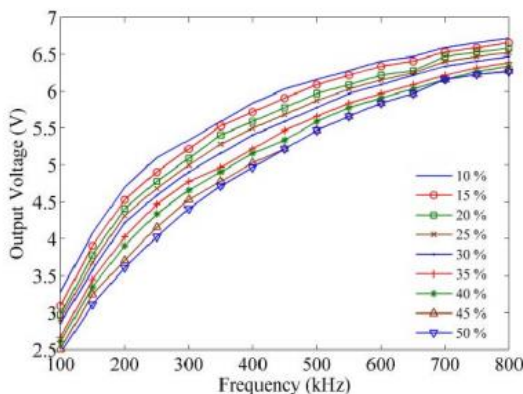




ภาพที่ 28 ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบใหม่
(Boonkirdram & Sa-Ngiamvibool, 2015)

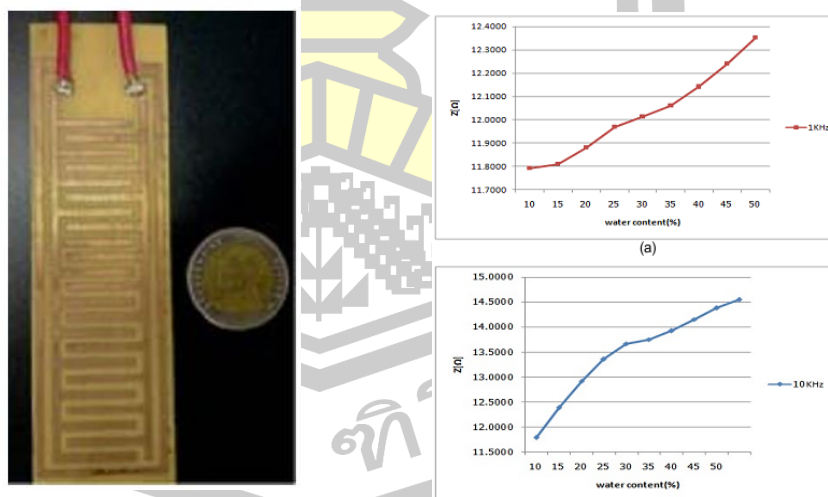
นิวัตร์ อังควิศิษฐพันธ์ และคณะ (2012) (Angkawisittpan Niwat & Manasri.T, 2012) นำเสนอเทคนิคการตรวจสอบความเข้มข้นของน้ำตาลด้วยอินเตอร์ดิจิทัลเซ็นเซอร์ ในลักษณะลินีอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่าน ทดสอบความเข้มข้นของน้ำตาลระหว่าง 10-50% ส่งผ่านความถี่ในช่วง 100-800Hz ปรากฏว่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการวัดปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาล คือช่วงความถี่ที่ 120 – 300 kHz ดังภาพที่ 29





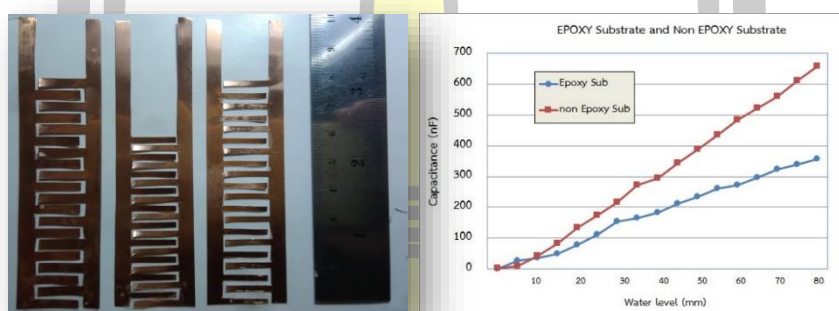
ภาพที่ 29 การตรวจสอบความเข้มข้นของน้ำตาลด้วยอินเตอร์ดิจิทัลเซ็นเซอร์ (Angkawisittpan Niwat & Manasri.T, 2012)

Songgrod Phimphisan & Worawat Sa-ngiamvibool (2015) (Phimphisan & Sa-ngiamvibool, 2015) ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ กักับการเจือปนของน้ำในน้ำนมดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัล การทดลองโดยใช้เครื่องวัด GW INSTEK LCR-817 เพื่อทำการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่ารีซิสแตนซ์ของน้ำนมดิบที่เจือปนน้ำระหว่าง 0 ถึง 50% ที่ความถี่ 1 KHz และ 10 KHz ผลการทดสอบ พบว่าในการวัดค่าคาปาซิแตนซ์แปรผกผันต่อเปอร์เซ็นต์ของปริมาณการเจือปนของน้ำในน้ำนมดิบ ส่วนค่ารีซิสแตนซ์ แปรผันตรงต่อเปอร์เซ็นต์ของปริมาณ การเจือปนของน้ำในน้ำนมดิบ ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกักับการเจือปนของน้ำในน้ำนมดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัล (Phimphisan & Sa-ngiamvibool, 2015)

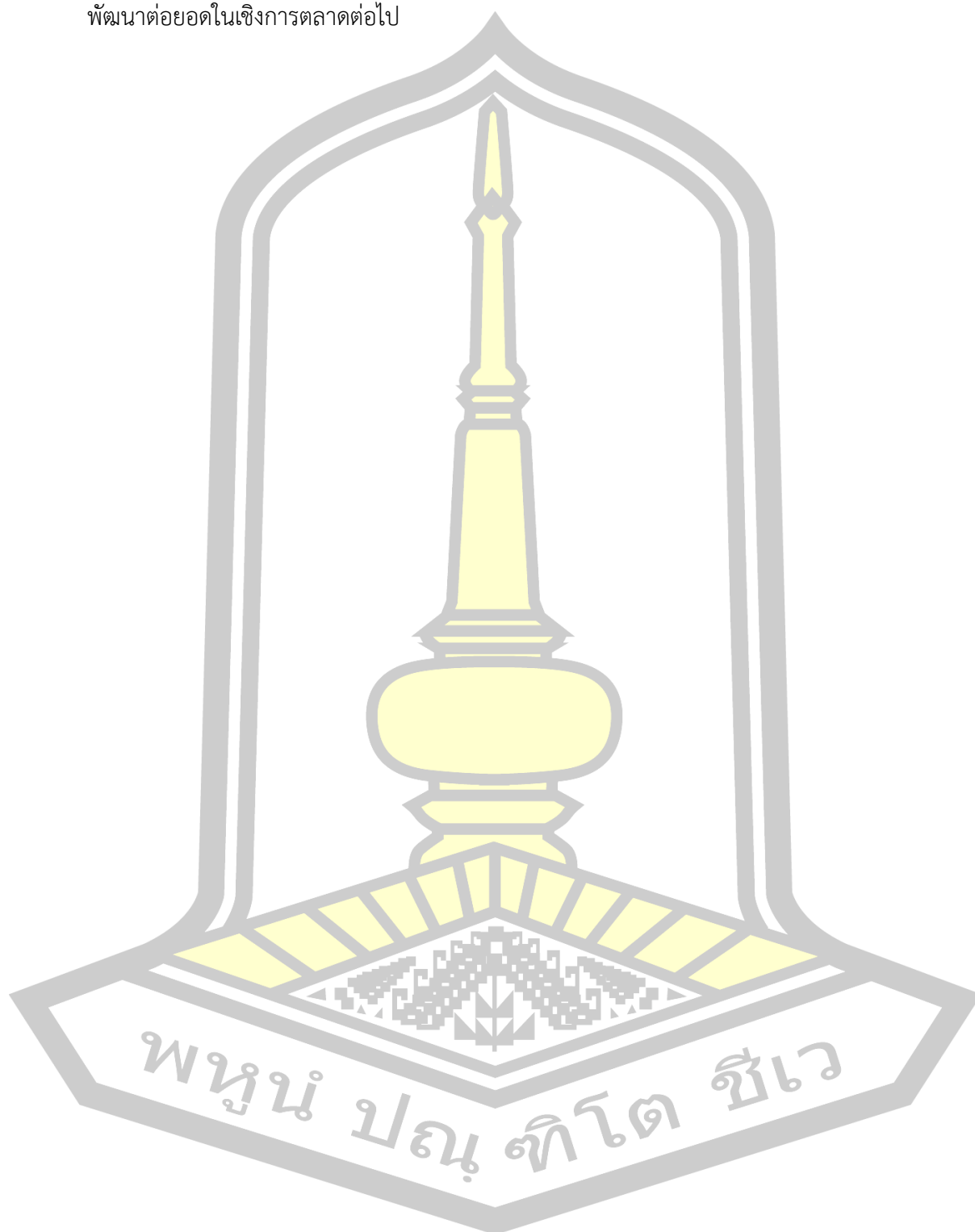
Jagrathon Obma & Worawat Sa-ngiamvibool (2020) (Obma & Sa-ngiamvibool, 2020) นำเสนอตัวรับรู้ระดับระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัลแบบไร้ฐานรองโดยได้ทำการทดลองส่วนแรกคือการวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ระดับระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัลแบบมีฐานรอง โดยใช้วัสดุฐานรองเป็น Epoxy ที่มีค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุ $\epsilon_3 = 4.6$ สร้างขึ้นจำนวน 6 รูปแบบ และตัวรับรู้ระดับระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัลแบบไร้ฐานรองสร้างขึ้นจำนวน 6 รูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุ โดยผลการทดลองตัวรับรู้ระดับระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัลแบบมีฐานรองมีค่าการเก็บประจุสูงสุดอยู่ที่ 536.44 nF และตัวรับรู้ระดับระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัลแบบไร้ฐานรอง มีค่าการเก็บประจุสูงสุดอยู่ที่ 877.56 nF มีผลทำให้ค่าการเก็บประจุที่มากขึ้นจากที่มีฐานรองถึง 302.69 nF



ภาพที่ 31 ตัวรับรู้ระดับระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัลแบบไร้ฐานรอง (Obma & Sa-ngiamvibool, 2020)

ดังนั้นจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการออกแบบ สร้าง พัฒนา ตัวรับรู้สำหรับการวัดคุณสมบัติของวัสดุ ของเหลว ของแข็ง หรือการวัดระดับความสูง ปริมาณของน้ำด้วยการใช้ตัวรับรู้ตัวเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัล ซึ่งไม่มีงานวิจัยชิ้นใดที่จะทำการวัดทดสอบความชุ่มชื้นของน้ำ ทำให้เกิดแนวคิดใหม่โดยบทความวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นในการออกแบบและสร้างตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิตัลอิเล็กทรอนิกส์ โดยอ้างอิงงานของ(Wang et al., 2019) (Angkawisittpan Niwat & Manasri.T, 2012) (Phimpisan & Sa-ngiamvibool, 2015) เพื่อออกแบบ สร้างต้นแบบตัวรับรู้สำหรับการวัดความชุ่มชื้นของน้ำ โดยพิจารณาจากระดับของค่าการเก็บค่าความจุแตกต่างกัน เมื่อแปลงค่าการเก็บค่าความจุเป็นข้อมูลนำไปใช้งานกับตัวประมวลผล เพื่องานวัดระดับที่มีความละเอียดมากขึ้น เป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมกับการและประยุกต์ด้านงานวัดของเหลวที่ต้องใช้ความละเอียด งานทางด้านอุทกศาสตร์ อุตุนิยมวิทยา หรืองาน

ที่ขนาดกลางไปจนถึงเล็กที่ต้องการวัดคุณสมบัติของน้ำความสะอาด การปนเปื้อนระบบน้ำประปา ซึ่งพัฒนาต่อยอดในเชิงการตลาดต่อไป



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ จะนำเสนอตัวรับรู้ความชื้นของน้ำแบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ โดยเนื้อหาจะประกอบด้วย เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ทฤษฎีและการออกแบบ วิธีการสร้างและการทดลอง การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 แผ่นวงจรพิมพ์

เป็นแผ่นที่สร้างด้วยพลาสติกชนิดหนึ่งโดยมีการฉาบผิวด้วยทองแดงเต็มแผ่น ที่มีด้านเดียว (single-sided) งานวิจัยนี้ใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 ที่มีค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุที่ $\epsilon_r = 4.6$ แผ่นทองแดงขนาดความหนา 0.105 มิลลิเมตรในการออกแบบและสร้างตัวรับรู้ความชื้นน้ำ ตัวตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ ดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 แผ่นวงจรพิมพ์

3.1.3 เครื่องวัดค่าการเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจุ และค่าความต้าน (LCR Meter)

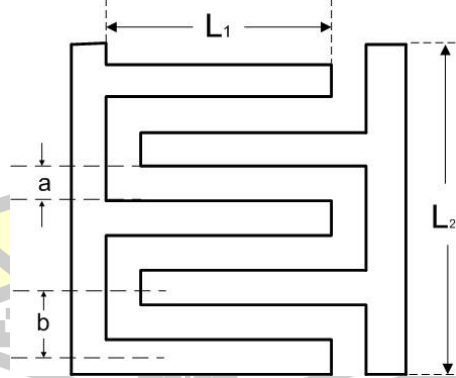
เป็นเครื่องวัดค่าการเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจุ และค่าความต้าน (LCR Meter) ยี่ห้อ Keysight รุ่น E4980AL ที่มีคุณสมบัติวัดความถี่ได้ตั้งแต่ 20Hz – 500KHz Measurement Accuracy 0.01%. Includes Kelvin Clip Leads ดังภาพที่ 33



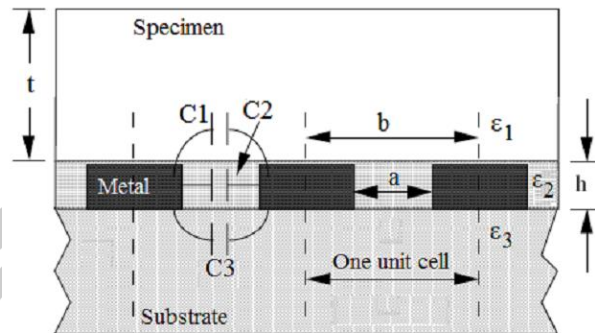
ภาพที่ 33 เครื่องวัดค่าการเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจุ และค่าความต้าน (LCR Meter)

3.2 หลักการออกแบบ

การออกแบบตัวรับรู้ความชุ่มน้ำตัวเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล จะใช้หลักการการขนานของแผ่นทองแดงมีขั้วบวกและลบ โดยเมื่อทองแดงมีการขนานกันเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่าการเก็บประจุมีค่ามากขึ้นเช่นกัน แล้วนำค่าการเก็บประจุที่ได้นั้นไปแปลงค่าในระบบประมวลผล ค่าการเก็บประจุมีหน่วยเป็นฟารัด (Farad,F) การออกแบบตัวรับรู้ตัวเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล ดังโครงสร้างในภาพที่ 34-35



ภาพที่ 34 ภาพด้านบนของโครงสร้างของตัวรับรู้ความชุ่มน้ำตัวเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล



ภาพที่ 35 ภาพแนวตัดโครงสร้างของตัวรับรู้ความชื้นน้ำตัวเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัล

เริ่มต้นจากหาค่า C_{UC} ในสมการที่ 3.2 ที่สัมพันธ์กับสมการที่ 3.3 และ 3.4 โดยมีองค์ประกอบ ϵ_0 คือค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในอากาศว่าง (permittivity of free space) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m, ϵ_1 คือค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ (the relative permittivity) ของวัสดุที่ใช้นำมาทดสอบเช่น อากาศ น้ำ น้ำมัน, ϵ_2 คือค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุระหว่างทองแดงอิเล็กโทรด และ ϵ_3 คือค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง K คือ ฟังก์ชันของปริพันธ์เชิงวงรีของมอดูลัส (elliptic integrals of modulus) โดยมี a เป็นระยะห่างของซี่ b เป็นระยะความกว้างของอิเล็กโทรด ต่อมาเป็นการหาค่าการเก็บประจุทั้งหมดของตัวรับรู้ความชื้นน้ำตัวเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัล ในสมการที่ 3.1 ประกอบด้วย L_1 คือความยาวของซี่ และ N คือจำนวนของซี่ (Angkawisittpan Niwat & Manasri.T, 2012) (Ong, Keat Ghee, Grimes, & A., 2000)

$$C = C_{UC} (N - 1)L_1 \quad (3.1)$$

$$C_{UC} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (3.2)$$

$$C_1 + C_2 = \epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2} \right) \frac{K \left(\sqrt{1 - \left(\frac{a}{b} \right)^2} \right)}{K \left(\frac{a}{b} \right)} \quad (3.3)$$

$$C_2 = \epsilon_0 \epsilon_2 \frac{h}{a} \quad (3.4)$$

โดยที่

C = ค่าการเก็บประจุทั้งหมดของอิเล็กโทรด

C_{UC} = ค่าการเก็บประจุของอิเล็กโทรด 1 คู่

N = จำนวนซี่ทั้งหมดของอิเล็กโทรด

$L1$ = ความยาวของซี่อิเล็กโทรดแต่ละอัน

a = ระยะห่างระหว่างซี่

b = ระยะความกว้างระหว่างทองแดงอิเล็กโทรด

ϵ_0 = ค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในอากาศว่าง (permittivity of free space) มีค่า

$$8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

ϵ_1 = ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุที่ใช้นำมาทดสอบ เช่น อากาศ น้ำ น้ำมัน

ϵ_2 = ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุระหว่างทองแดงอิเล็กโทรด

ϵ_3 = ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง

K = ฟังก์ชันของปริพันธ์เชิงวงรีของมอดูลัส

3.3 วิธีการสร้างและการทดลอง

สำหรับการคำนวณและออกแบบ สร้างต้นแบบตัวรับรู้ในหัวข้อที่ 3.2 ตามสมการที่ 3.1-3.4 ขึ้นเพื่อพิสูจน์หลักการของการวัดค่าความชื้นของน้ำด้วยหัววัดแบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์ โดยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1 วิธีการสร้างตัวรับรู้ความชื้นของน้ำแบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์

การสร้างตัวรับรู้ความชื้นของน้ำแบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์ โดยออกแบบเป็น 5 ขนาดตามตารางที่ 3 ซึ่งมีขนาดความกว้าง 21 มิลลิเมตร ความยาว 80 มิลลิเมตร และมีขนาดความหนาของแผ่นทองแดง 0.105 มิลลิเมตร โดยการสร้างจากแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ชนิด FR-4 ที่มีค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุที่ $\epsilon_r = 4.6$ แล้วทำการกัดลายวงจรเป็นรูปอิเล็กโทรดที่ตามทีออกแบบขนาดไว้ ดังภาพที่ 36

พูน ปรณ ทิโต ชิว

ตารางที่ 3 ขนาดตัวรับรู้ความขุ่นน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์

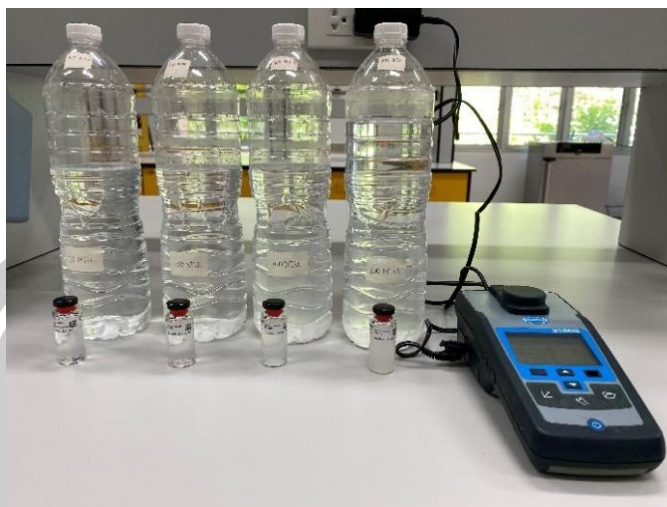
IDC model	b (มม.)	a (มม.)	L (มม.)
1	3	3	10
2	3	3	20
3	3	3	30
4	3	3	40
5	3	3	50



ภาพที่ 36 ตัวรับรู้ความขุ่นของน้ำแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์

3.3.2 วิธีการเตรียมตัวอย่างน้ำ

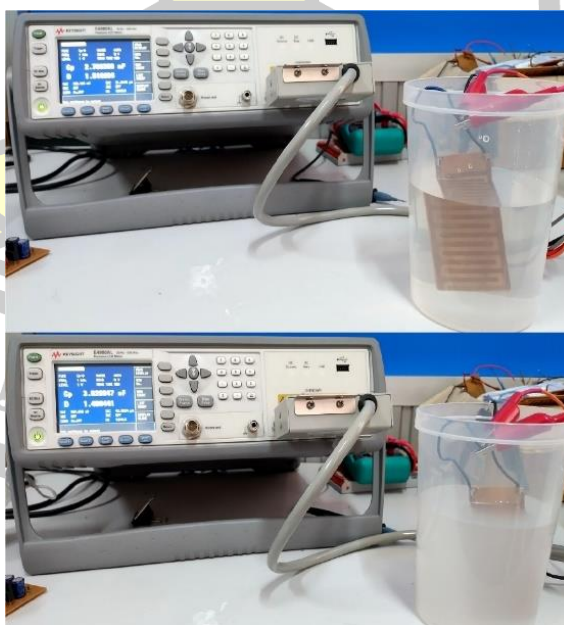
การเตรียมน้ำขุ่นเพื่อทดลองทำได้จากการสังเคราะห์น้ำดิบให้มีค่าความขุ่น โดยใช้ดินคาโอลินผสมน้ำ เนื่องจากดินคาโอลินมีขนาดของอนุภาคเล็กกว่า 0.002 mm จึงสามารถแขวนลอยในน้ำได้ดีกว่าดินธรรมชาติ (Poonsawatt, 2019) ทำการสังเคราะห์น้ำที่มีความขุ่นจำนวน 12 ตัวอย่าง ตั้งแต่ 0, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1000 NTU น้ำที่สังเคราะห์ขึ้นมีการวัดเทียบกับน้ำขุ่นที่เป็นมาตรฐาน ด้วยเครื่องวัดความขุ่นยี่ห้อ HACH รุ่น 2100Q ซึ่งเป็นเครื่องวัดแบบวิธีเนฟิโลเมตริก ดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 วัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ความขุ่นน้ำตัวเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล

3.3.3 วิธีการทดลองและเก็บข้อมูล

เมื่อการสร้างตัวรับรู้ความขุ่นน้ำตัวเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแต่ละโมเดล และ สั่งเคราะห์น้ำตัวอย่างแล้ว นำมาวัดค่าการเก็บประจุของน้ำตัวอย่างตั้งแต่ 0, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1000 NTU จำนวน 12 ตัวอย่าง โดยวัดตัวอย่างละ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าการเก็บประจุที่ดีที่สุด โดยใช้เครื่องวัด LCR Meter (Keysight E4980AL) ทำการวัดโดยใช้ โหมดวงจรขนาน กำหนดให้ขนาดสัญญาณเท่ากับ $1 V_{p-p}$ และใช้ 4 ความถี่ ได้แก่ 100kHz 10kHz, 1kHz และ 500Hz ดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 การวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ความขุ่นน้ำด้วยอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์

3.4 การเก็บรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูล จากการทดลองวัดค่าการเก็บประจุของน้ำขุ่น ด้วยตัวรับรู้แบบ อินเทอร์เน็ตดิจิทัลคาปาซิเตอร์ แล้วนำมาวิเคราะห์ในเชิงสถิติ ด้วยการวิเคราะห์การถดถอย และ สหสัมพันธ์ ซึ่งการศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าความขุ่นของน้ำ และ ปริมาณค่าความจุที่เกิดขึ้น มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรตาม และตัวแปรอิสระ โดยการประมาณที่แตกต่างกันว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่ และมีความสัมพันธ์กันในทิศทางใด



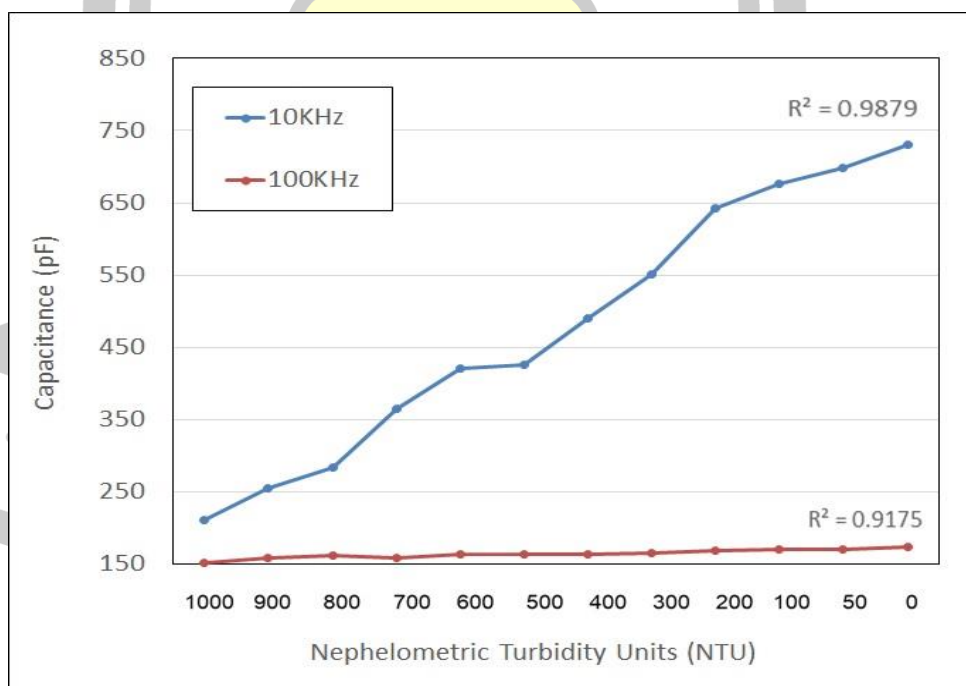
บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลหลังจากทำการทดลองตามที่ได้ ออกแบบไว้ การศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าความขุ่นของน้ำ และ ปริมาณค่าความจุที่เกิดขึ้น มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรตาม และตัวแปรอิสระ โดยการประมาณที่แตกต่างกันว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่ และมีความสัมพันธ์กันในทิศทางใด

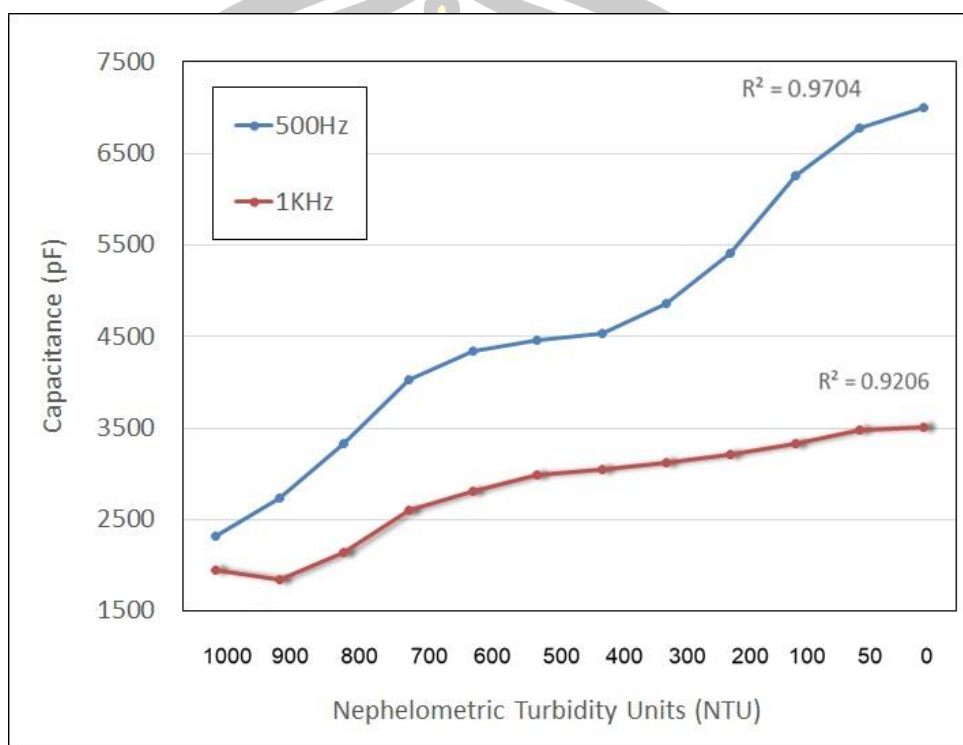
4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล ส่วนที่ 1

ผลการทดลองในส่วนที่ 1 คือการวัดค่าการเก็บประจุโดยปรับค่าความถี่ตั้งแต่ 100kHz, 10 kHz, 1 kHz, 500Hz ใช้โมเดลที่ $a = 3 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$, $L = 20 \text{ mm}$, $N = 13$ เพื่อพิสูจน์ค่าความแตกต่างของ correlation coefficient โดยที่ค่าความถี่ 100 kHz มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 150.46 – 172.96 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9175 ต่อมาที่ค่าความถี่ 10 kHz มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 210.02 – 729.26 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9879 ดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 ผลของค่าการเก็บประจุที่ความถี่ 10 และ 100

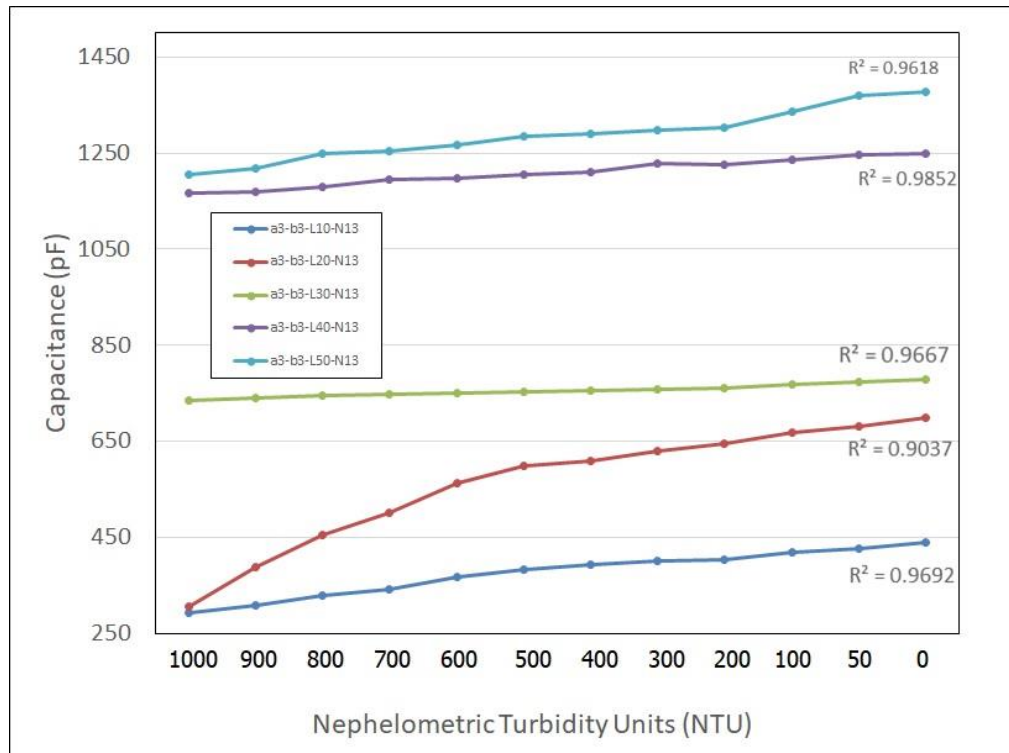
ต่อมาที่ค่าความถี่ 1kHz มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 1950.52 – 3510.59 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9206 และค่าความถี่ 500Hz มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 2320.78 – 6958.29 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9704 ดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 ผลของค่าการเก็บประจุที่ความถี่ 1 และ 500 Hz

4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล ส่วนที่ 2

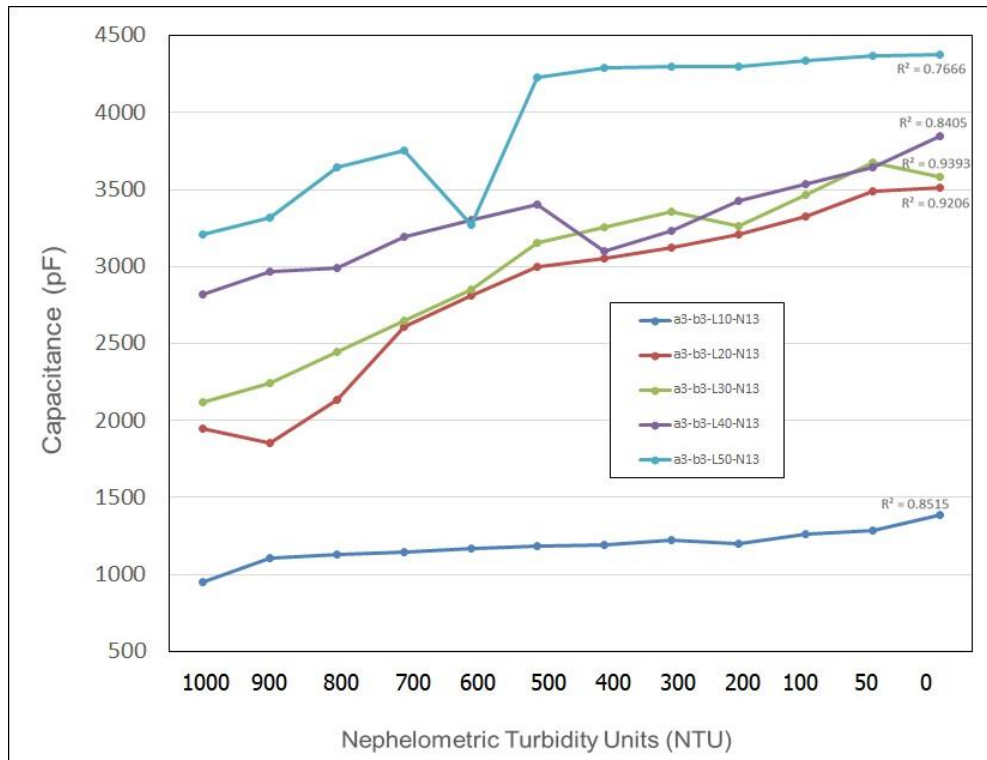
ผลการทดลองในส่วนที่ 2 คือการวัดค่าการเก็บประจุโดยใช้ขนาดตาม 5 โมเดล ความถี่ตั้งแต่ 10kHz, 1 kHz, 500Hz ตามตารางที่ 1 เพื่อพิสูจน์ค่าความแตกต่างของ correlation coefficient โดยที่ค่าความถี่ 10kHz โมเดลที่ 1 ที่ความยาว $L = 10$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 292.99 – 438.55 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9692 ต่อมาโมเดลที่ 2 ที่ความยาว $L = 20$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 306.02 – 698.44 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9037 โมเดลที่ 3 ที่ความยาว $L = 30$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 735.44 – 779.75 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9667 โมเดลที่ 4 ที่ความยาว $L = 40$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 1167.52 – 1250.82 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9852 และสุดท้าย โมเดลที่ 5 ที่ความยาว $L = 50$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 1205.91 – 1378.77 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9618 ดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 ผลของค่าการเก็บประจุที่ความถี่ 10 ของ 5 โมเดล

ค่าความถี่ 1kHz โมเดลที่ 1 ที่ความยาว $L = 10$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 952.25 – 1388.14 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.8151 โมเดลที่ 2 ที่ความยาว $L = 20$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 1950.14 – 3515.51 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9206 โมเดลที่ 3 ที่ความยาว $L = 30$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 2120.45 – 3579.62 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9393 โมเดลที่ 4 ที่ความยาว $L = 40$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 2821.33 – 3850.11 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.8405 และสุดท้ายโมเดลที่ 5 ที่ความยาว $L = 50$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 3210.23-4379.22 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.7666 ดังภาพที่ 42

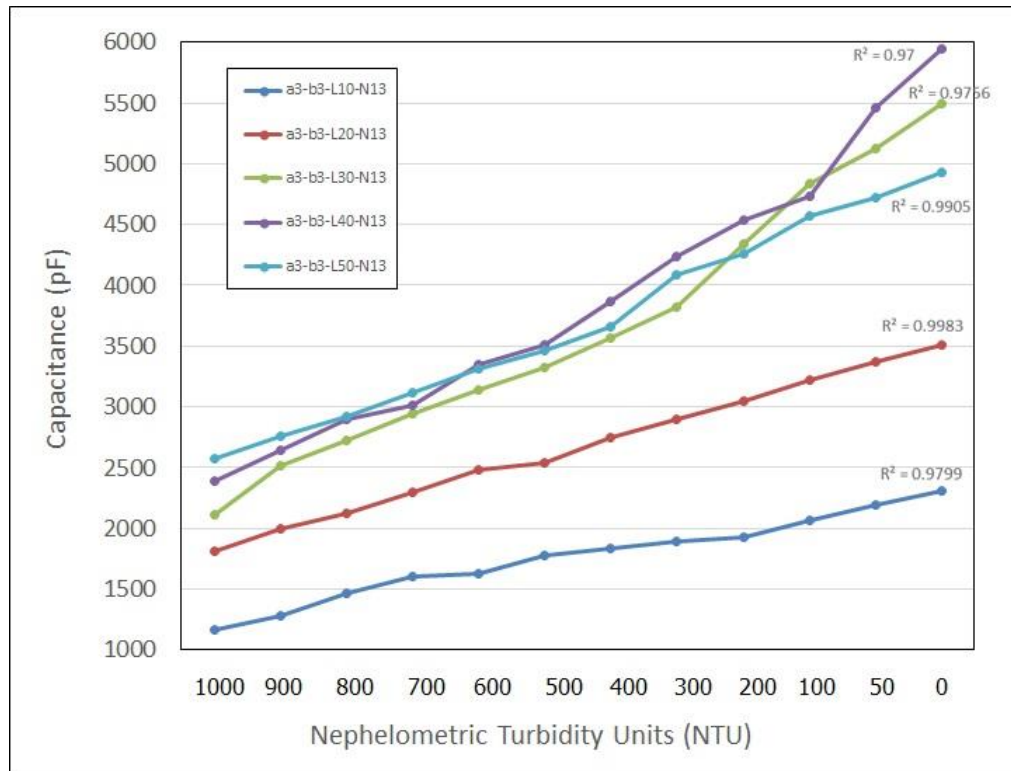
พหุบัณฑิต ชีวะ



ภาพที่ 42 ผลของค่าการเก็บประจุที่ความถี่ 1 ของ 5 โมเดล

ค่าความถี่ 500Hz โมเดลที่ 1 ที่ความยาว $L = 10$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 1163.14 – 2308.11 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9799 โมเดลที่ 2 ที่ความยาว $L = 20$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 1810.45 – 3512.11 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9983 โมเดลที่ 3 ที่ความยาว $L = 30$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 2112.55 – 5492.74 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9766 โมเดลที่ 4 ที่ความยาว $L = 40$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 2395.84 – 5945.31 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.97 และสุดท้ายโมเดลที่ 5 ที่ความยาว $L = 50$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 2574.17-4925.84 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9905 ดังภาพที่ 43

พหุ ประถมศึกษา



ภาพที่ 43 ผลของค่าการเก็บประจุที่ความถี่ 500Hz ของ 5 โมเดล



บทที่ 5

สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคการตรวจสอบความขุ่นของน้ำ ด้วยตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ ประกอบด้วยการออกแบบ และทดสอบหัววัดแบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ โดยอาศัยเครื่องวัด RLC มีผลสรุปการวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปผล

จากการทดลองวัดค่าการเก็บประจุของน้ำขุ่น ด้วยตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ ที่มีฐานรองเป็น Epoxy มีค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุ $\epsilon_r = 4.6$ ออกแบบและสร้างขึ้นจำนวน 5 รูปแบบ ที่มีความยาวของค่า L คือ 10mm, 20mm, 30mm, 40mm และ 50mm โดยวัดค่าการเก็บประจุ จากเครื่องวัด RLC Meter ยี่ห้อ Keysight (E4980AL)

ที่ความถี่ตั้งแต่ 100kHz, 10 kHz, 1 kHz, 500Hz และแต่ละขนาดจะวัดค่าการเก็บประจุของน้ำขุ่นตัวอย่าง โดยเริ่มต้นตั้งแต่ 0, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1000 NTU และนำผลมาวิเคราะห์ในเชิงสถิติ การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เพื่อหาสมการเชิงเส้นตรง ค่าการกระจายเพื่อเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุ ที่เกิดขึ้นทั้ง 5 รูปแบบ

ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่ค่าความถี่ 500Hz โมเดลที่ 1 ที่ความยาว $L = 10$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 1163.14 – 2308.11 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9799 ต่อมาค่าความถี่ 500Hz โมเดลที่ 2 ที่ความยาว $L = 20$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 1810.45 – 3512.11 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9983 ต่อมาค่าความถี่ 500Hz โมเดลที่ 3 ที่ความยาว $L = 30$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 2112.55 – 5492.74 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9766 ต่อมาค่าความถี่ 500Hz โมเดลที่ 4 ที่ความยาว $L = 40$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 2395.84 – 5945.31 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.97 และสุดท้ายค่าความถี่ 500Hz โมเดลที่ 5 ที่ความยาว $L = 50$ mm มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 2574.17-4925.84 pF ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9905

ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุจากวัดจากเครื่อง LCR Meter วัดค่าการเก็บประจุจากตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ จำนวน 5 แบบ ที่มีความยาวของค่า L ที่แตกต่างกัน โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความถี่ในแหล่งจ่ายที่ใช้วัดค่าการเก็บประจุ เมื่อลดความถี่ลง จะมีผลต่อค่าการเก็บประจุที่เพิ่มขึ้น และมีค่าการเก็บประจุสูงสุดอยู่ที่ สูงสุดที่ 2395-5945.28 pF ที่การจ่ายแรงดันจากแหล่งจ่าย 1 Volt ส่วนที่ความถี่ 500Hz ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.9704 แต่ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ขนาด $L = 20$ mm ที่ความถี่ 500Hz ค่า correlation coefficient (R^2) ที่ดีที่สุด คือ 0.9983

5.2 อภิปราย

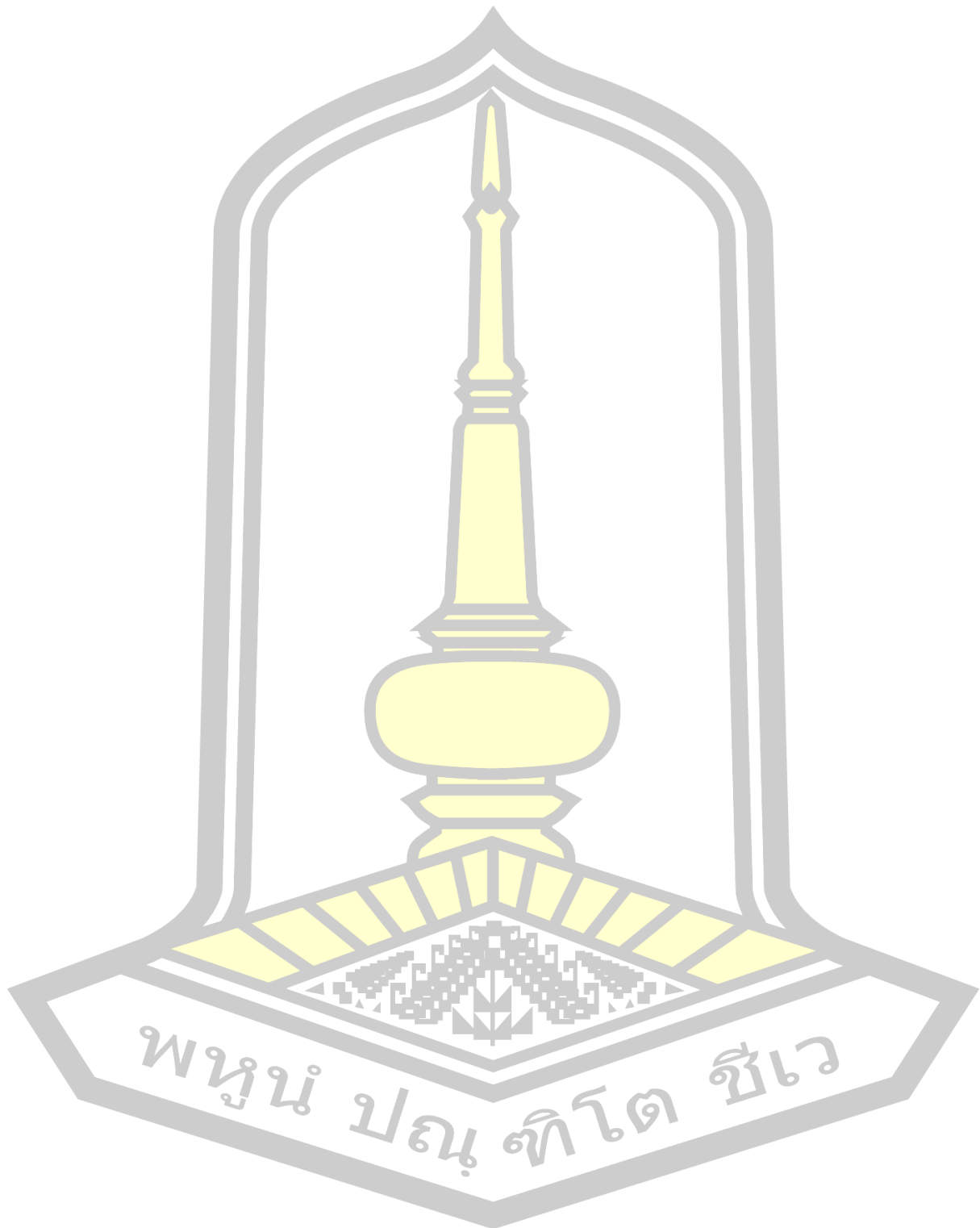
วิทยานิพนธ์เรื่อง เทคนิคการตรวจสอบความชุ่มของน้ำ ด้วยตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัล คาปาซิเตอร์ เป็นงานวิจัยที่ออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดเพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ดีที่สุด ของอุปกรณ์ตัวรับรู้ที่ออกแบบ โดยสามารถขยายย่านการวัดให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น และประยุกต์ใช้งานโดยประมวลผลในไมโครคอนโทรลเลอร์ ใช้กับงานด้านอุตสาหกรรม และสิ่งแวดล้อม เพื่อนำมาวิเคราะห์ เช่น การวัดความชุ่มของน้ำ และการวัดคุณภาพน้ำ เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถพัฒนาเป็นระบบการวัดน้ำความชุ่มที่มีมาตรฐาน และสามารถนำมาเชื่อมต่อผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 1) งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดของน้ำชุ่มที่ใช้ในการทดลอง โดยการตกตะกอนของสารแขวนลอยในน้ำ ซึ่งจะทำให้ค่าการเก็บประจุที่วัดได้อาจจะมีความคลาดเคลื่อน โดยอาจจะต้องพัฒนาตัวแยกขวดทดลองเพื่อให้ความชุ่มคงที่ และสม่ำเสมอ ทำให้การวัดค่าการเก็บประจุมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น
- 2) ในการนำหัววัดไปใช้งานจริง อาจมีปัญหาจากความคงทนของวัสดุเคลือบผิว และลายทองแดง ที่ต้องแช่อยู่ในน้ำเป็นเวลานานๆ ซึ่งต้องมีการศึกษาเพื่อหาวัสดุเคลือบผิวที่มีความเหมาะสมต่อไป



บรรณานุกรม



กิตติวุฒิ จีณะบุตร (2548). เครื่องมือวัดและการวัดทางไฟฟ้า. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
อีสาน.

ธิตินันท์ ตะเกาน้อย. (2012). ระบบเฝ้าระวังตรวจจับระดับน้ำโดยใช้หัววัดอัจฉริยะแบบอินเตอร์
ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์. *KKU ENGINEERING JOURNAL* 39, 249-256.

บุญชม ศรีสะอาด. (2541). วิธีการทางสถิติสำหรับการวิจัย. กรุงเทพฯ : สุวีริยาสาส์น, 2541.:
กรุงเทพฯ : สุวีริยาสาส์น.

ประกาศกรมอนามัย. (2553). เกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ กรมอนามัย พ.ศ. 2553.

รัตนารณ เทพมาลัย, & ประชญา จันทร์ศักดิ์. (2012). Development of Portable Turbidity
Meter with Simple Equipment. *วิศวกรรมสาร มก*, 82(82), 127.

เริงฤทธิ์ สิทธิศักดิ์, อังควิษฐพันธ์ นวัตกรรม, & เสจี่ยมวิบูล วรวัฒน์. (2015). Detection of the
water added in raw milk using inter digital electrode.

สรารวุฒิ บุญเกิดรัมย์^{1*}, & ถนอมศักดิ์ วงศ์มีแก้ว² (2018). *Detection of Water Adulteration in
Raw Milk Using Interdigital Capacitor Sensor*. Paper presented at the 10th
ECTI-CARD 2018, Phitsanulok Thailand

Alam MdNazmul, Bhuiyan, Rashed H, Dougal Roger A, & Ali Mohammad. (2010).
Concrete moisture content measurement using interdigitated near-field
sensors. *IEEE Sensors Journal*, 10(7), 1243-1248.

Angkawisittpan Niwat, & Manasri.T. (2012). Determination of sugar content in sugar
solutions using interdigital capacitor sensor. *Measurement Science Review*,
12(1), 8-13.

Boonkirdram, S., & Sa-Ngiamvibool, W. (2015). A novel planar interdigital capacitor
level sensor. *Przełąd Elektrotechniczny*, 91(8), 91--95.

Cambridge., U. o. (2004, 2022). The dielectric constant. Retrieved from
https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dielectrics/dielectric_constant.php

Canbolat, H. (2009). A novel level measurement technique using three capacitive
sensors for liquids. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*,
58(10), 3762-3768.

Chinpanthana, N. (2022). แบบ จำลองการเรียนรู้ท่าทางมนุษย์จากการเคลื่อนไหวด้วยเทคนิคโครง
ข่ายประสาทเทียมแบบสังวัตนาการและแบบหน่วยความจำระยะสั้นแบบยาว *JOURNAL OF
INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 12(1), 27-36.

- Gilcreas, F. (1966). Standard methods for the examination of water and waste water. American Journal of Public Health and the Nations Health, 56(3), 387-388.
- Howard, M. (2013). The new generation of inductive sensors. World Pumps, 2013(2), 10-11.
- Loizou, K., & Koutroulis, E. (2016). Water level sensing: State of the art review and performance evaluation of a low-cost measurement system. Measurement, 89, 204-214.
- Mamishv, A. V., Sundara-Rajan, K., Yang, F., Du, Y., & Zahn, M. (2004). Interdigital sensors and transducers. Proceedings of the IEEE, 92(5), 808-845.
- Obma, J., & Sa-ngiamvibool, W. (2020). The non-substrate interdigital capacitor level sensor. Przegląd Elektrotechniczny, 96, 34-37.
- Ong, Keat Ghee, Grimes, & A., C. (2000). A resonant printed-circuit sensor for remote query monitoring of environmental parameters. Smart materials and structures, 9(4), 421.
- Phimphan, S., & Sa-ngiamvibool, W. (2015). Determination of water added in raw milk using interdigital capacitor sensor. Przegląd Elektrotechniczny, 91, 265-267.
- Poonsawatt, W. (2019). Optimum Alum Dosage for High Turbidity Removal in Water Treatment Plant. Paper presented at the การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, Khonkhen University.
- Reverter, F., Li, X., & Meijer, G. C. (2007). Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor. Sensors and Actuators A: Physical, 138(1), 1-8.
- rourgrid, M. S. (2014). Water in Raw Milk Measurement using Interdigital Electrode. (Master of Engineering Electrical and Computer Engineering). Mahasarakham University,
- Sadar, M. (2004). Making sense of turbidity measurements—advantages in establishing traceability between measurements and technology. Paper presented at the 2004 National Monitoring Conference, Chattanooga, TN, USA.
- Srichun, O. (2010). APPLICATION OF TURBIDIMETER FOR

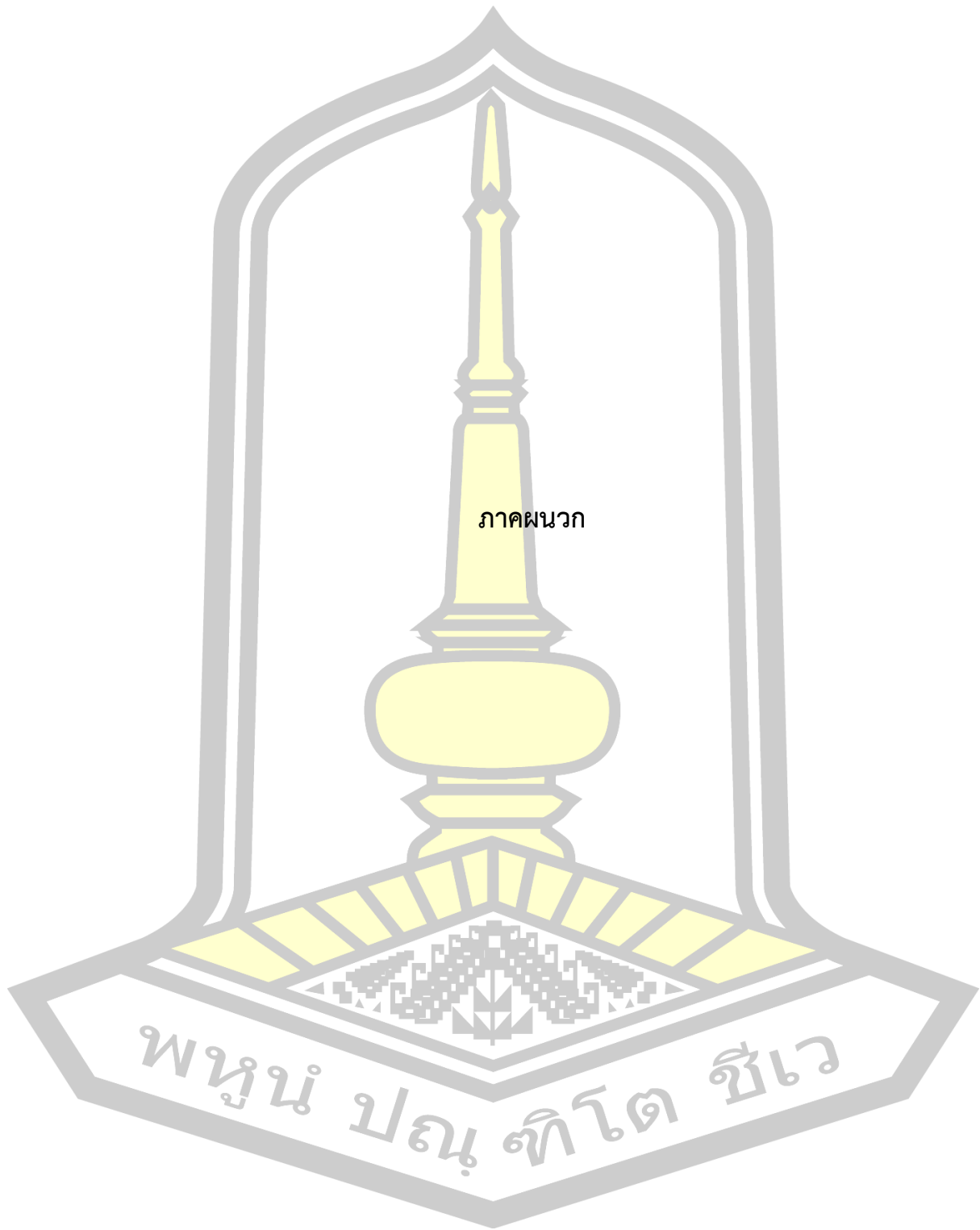
MEASUREMENT OF SUSPENDED SOLIDS IN ACTIVATED SLUDGE

WASTEWATER TREATMENT PLANT. (Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering). Suranaree University of Technology,

Wang, X., Wang, Y., Leung, H., Mukhopadhyay, S. C., Chen, S., & Cui, Y. (2019). A self-adaptive and wide-range conductivity measurement method based on planar interdigital electrode array. *IEEE Access*, 7, 173157-173165.

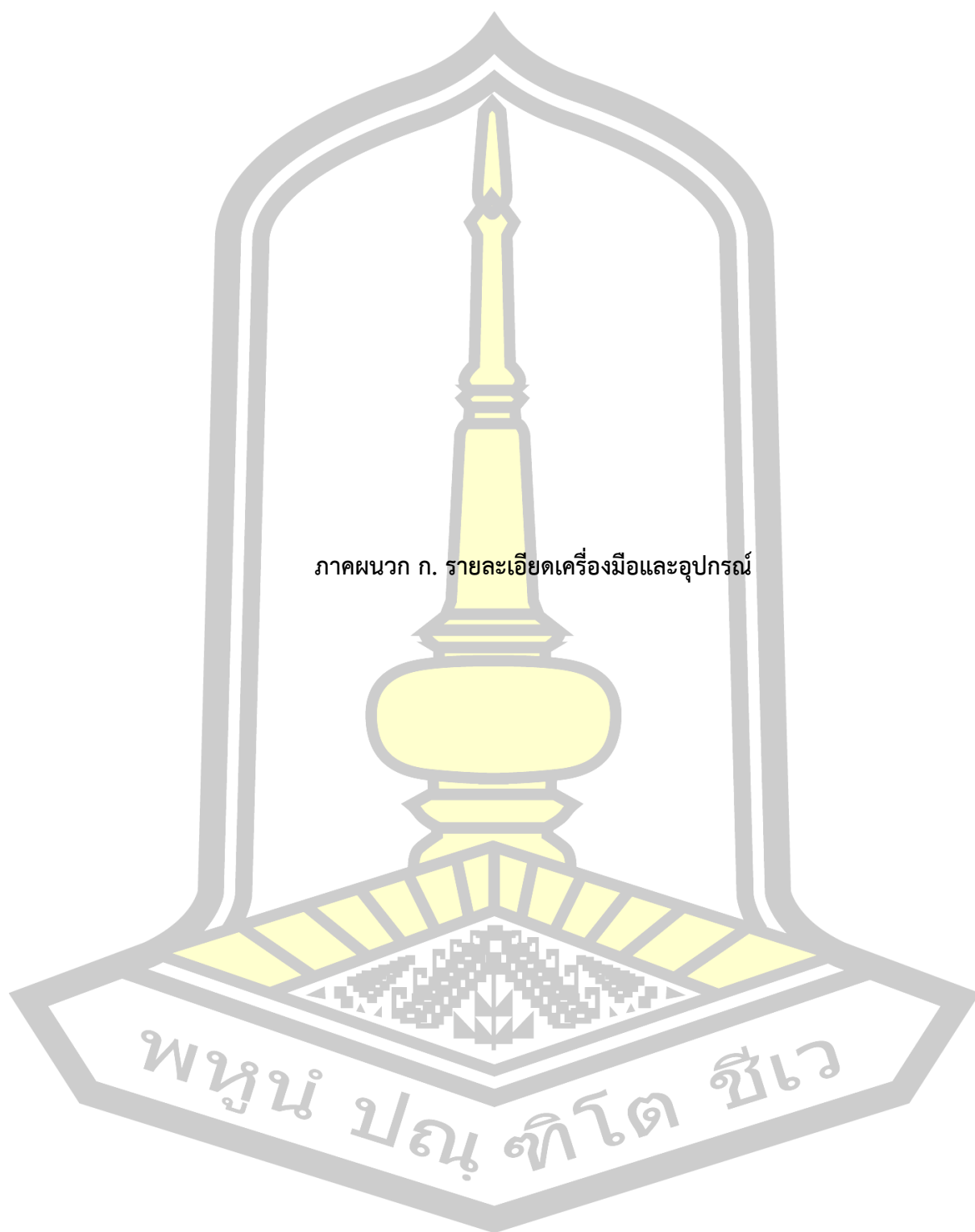
Yimrattanabovorn, C. (2015). Evaluation of Water Quality in Urban Water Supply System in North-Eastern Region. (Master degree). Suranaree University of Technology Intellectual Repository,





ภาคผนวก

พหุมนุ ปณ ทิโต ชีเว



ภาคผนวก ก. รายละเอียดเครื่องมือและอุปกรณ์

พหุบัณฑิตยาลัย

more than you expect



Standard FR4 TG135 Datasheet

Classification according to IPC-4101 E / 21

Reinforcement: Woven E-Glass
Resin System: Epoxy, unfilled

Explanations :
C = preconditioning in humidity chamber
E = preconditioning at temperature

The figures following the letter symbols indicate with the first digit the duration of the preconditioning in hours, with the second digit the preconditioning temperature in °C and with the third digit the relative humidity.

Laminate Requirements	Thickness < 0,50mm		Thickness ≥ 0,5mm		Units	Test Method
	Typical Value	Specification	Typical Value	Specification		
Peel Strength, minimum A: Low profile copper foil and very low profile copper foil – all copper foil > 17µm B: Standard profile copper foil 1. After thermal stress 2. At 125 °C 3. After process solutions C: All other foil - composite	0,9	0,70	0,95	0,70		2.4.8
	1,05	0,80	1,20	1,05	N/mm	2.4.8.2
	0,95	0,70	1,15	0,70		2.4.8.3
	0,8	0,55	1,0	0,80		2.4.8
Volume Resistivity, minimum A: C-96/35/90 B: After humidity conditioning C: At elevated temperature E-24/125	4 10 ⁶	10 ⁶	6 10 ⁶	10 ⁶	MΩ cm	2.5.17.1
	7 10 ⁶	10 ³	7 10 ⁶	10 ³		
Surface Resistivity, minimum A: C-96/35/90 B: After humidity conditioning C: At elevated temperature E-24/125	1 10 ⁸	10 ⁴	3 10 ⁸	10 ⁴	MΩ	2.5.17.1
	6 10 ⁸	10 ³	6 10 ⁸	10 ³		
Moisture Absorption, maximum	0,4		0,4	0,80	%	
Dielectric Breakdown, minimum			45	40	kV	2.5.6
Permittivity @ 1MHz (Laminate and prepreg as laminated)	4,2-4,6	5,4	4,6-4,9	5,4		2.5.5.2 2.5.5.3 2.5.5.9
Loss Tangent @ 1MHz (Laminate and prepreg as laminated)	0,015-0,02	0,035	0,015-0,02	0,035		2.5.5.2 2.5.5.3 2.5.5.9
Flexural Strength , minimum A: Length direction B: Cross direction			440	415	N/mm ²	2.4.4
			400	345		
Arc Resistance, minimum	105	60	105	60	s	2.5.1
Thermal Stress 10 s @288 °C, minimum Unetched Etched	Pass	Pass Visual	Pass	Pass Visual	rating	2.4.13.1
	Pass	Pass Visual	Pass	Pass Visual		
Electric Strength, minimum (Laminate and prepreg as laminated)	39	30			kV/mm	2.5.6.2
Flammability (Laminate and prepreg as laminated)	V0	min. V0	V0	min. V0	rating	UL94
Halogen content , maximum Chlor Brom Chlor + Brom	-		-		ppm	2.3.41
	-		-			
	-		-			
Glass Transition Temperature			135	min. 110	°C	2.4.24
Decomposition Temperature		-	310	-	°C	2.4.24.6 (5% weight loss)
CTE Z-axis A: Alpha 1 B: Alpha 2 C: 50 °C – 260 °C		-	-	-	ppm/°C	2.4.24
		-	-	-	ppm/°C	
		-	3,8-4,2	-	%	
Time to Delamination (TMA) (copper removed) A: T260 B: T288 C: T300		-	15	-		2.4.24.1 and corresponding adjustments in 3.10.1.2
		-	-	-	Minutes	
		-	-	-		
Others PLC CTI			3 200	175 - 250	Class V	UL IEC 112

บริษัท ปรณัฐ เทคโนโลยี



FR4 Data Sheet :-

Test/Specification	FR4 Laminate Typical Values
Thermal Stress, Solder bath 288 deg. C	>60
Dimensional Stability, E-2/150	<0.04% Warp/fill <1.00% Bow/Twist
Flammability, Classification UL94	V0
Water Absorption E-1/105	0.10%
Peel Strength After Thermal Stress	11 lb./in After 10s/288 Deg. C
Flexural Strength	100,000 lbf/in ² Lengthwise 75,000 lbf/in ² Crosswise
Resistivity After Damp Heat Volume	10 ^{^8} M ohms cm
Resistivity After Damp Heat Surface	10 ^{^8} M ohms
Dielectric Breakdown. Parallel to laminate	>60KV
Dielectric Constant @ 1MHz	4.7
Dissipation Factor @ 1MHz	0.014
Q-Resonance @ 1 MHz	>75
Q-Resonance @ 50 MHz	>95
Arc Resistance	125 s
Glass Transition Temperature	135 Deg. C
Temperature Index	130 Deg. C
A Few Other Relevant Facts from other Sources	
Specific Gravity	1.8-1.9
Rockwell Hardness (M scale)	110
Coefficient of Thermal Expansion	11 microns/m/Deg.C Lengthwise 15 microns/m/Deg.C Crosswise
Thermal Conductivity	2.2-2.5 cal/h. cm Deg C





ALLOY

CI1000

Electrolytic Tough Pitch Copper

Data Sheet

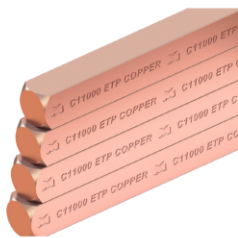
Further capitalizing on its casting, extrusion and manufacturing expertise, Mueller Brass Company has added UNS C11000 Electro Tough Pitch (ETP) copper to its portfolio of brass alloys and products. As with its brass rod and bar products, by controlling the process from casting through the production of the end product, Mueller Brass Company's C11000 ETP Copper is fabricated and certified to comply with ASTM Standards and customer requirements.

Chemical Composition		Typical Applications	
Cu ⁽¹⁾	99.90(min)	Electrical	Busbars, Switch Gears, Slab Terminals, Conductors, Magnet Wire, Stranded Conductor Wire, Electrical Terminals, Switches, Radio Parts, Contacts, Welding Fixtures, Ground Straps, Commutators
O:	0.04(nom)	Architecture	Downspouts, Flashing, Roofing, Gutters, Building Fronts, Skylight Frames, Kitchen Counter Tops
		Automotive	Gaskets, Radiators
		Builder's Hardware	Ball Floats, Butts, Rivets, Nails, Cotter Pines, Soldering Copper, Tacks, Nuts & Bolts
		Industrial	Heat Exchangers, Pans, Vats, Road Bed Expansion Plates, Rotating Bands, Kettles, Chimney Cap Screens, Chlorine Cells, Pressure Vessels, Anodes, Chemical Process Equipment, Pipe Welding Dies, Back-up Welding Shoes, Printing Rolls, Plating Racks, Hooks

⁽¹⁾ Cu value includes Ag

Because of its inherent characteristics and mechanical properties, C11000 ETP Copper can be readily fabricated via a variety of different methods including: bending, soldering, drilling and formed to fit numerous design applications as required by the customer:

Specification Equivalents		Mechanical Properties (ASTM B187)				
ASTM B-187-11		Temper Designation		Tensile Strength (ksi)		Elongation in 4x diameter or thickness
Standard	Form	Rod		(min)	(max)	
		H04	Hard	Up to 0.375" inc.		12
		H04	Hard	> 0.375" to 1.000" inc.		12
		H04	Hard	> 1.000" to 2.000" inc.		15
		H04	Hard	> 2.000" to 3.000" inc.		15
		H04	Hard	> 3.000"		15
				Bar		
		H02	Hard	Thickness:	Up to 0.375" inc.	10
		H02	Hard	Width:	Up to 4.000" inc.	15
				Profiles		
				All Sizes		15



มุลเลอร์ บร๊าส คอปเปอร์




ALLOY

CI 1000

Data Sheet



Physical Properties		
Melting Point (Liquidus)	1981° F	1083° C
Melting Point (Solidus)	1949° F	1065° C
Density	0.322 lb/in ³ at 68° F	8.91 gm/cm ³ at 20° C
Specific Gravity	8.91	8.91
Electrical Resistivity (Ann.)	10.3 ohms-cmil/ft @68° F	1.71 microhm-cm @ 20° C
Electrical Conductivity (Ann.)	101% IACS @ 68° F	0.591 MegaSiemens/cm @ 20° C
Thermal Conductivity	226.0 BTU - ft/(hr-F ² - oF) at 68° F	391.1 W/m - °K at 20° C
Coefficient of Thermal Expansion	9.4 - 10 ⁶ per °F(68° - 212°F)	16.9 - 106 per °C (20° - 100°C)
Coefficient of Thermal Expansion	9.4 - 10 ⁶ per °F(68° - 392°F)	16.9 - 106 per °C (20° - 200°C)
Coefficient of Thermal Expansion	9.4 - 10 ⁶ per °F(68° - 572°F)	16.9 - 106 per °C (20° - 300°C)
Specific Heat Capacity	0.092 Btu/lb/°F @ 68° F	393.5 J/kg - °K at 293° K
Modulus of Elasticity in Tension	17,000ksi	117,000 MPa
Modulus of Rigidity	6,400ksi	44,130 MPa

Mill Capabilities		
Forms	Rectangles, Rounds, Squares, Hexagonals, Profiles	
Edge Contours		Square Edge
		Radius Edge
		Full Rounded Edge

Size Ranges ⁽¹⁾ :		
Round Bar	0.3125" ~ 3.000"	
Square Bar (Radius and Square Corner)	0.375" ~ 2.500"	
Hexagonal Bar (Radius and Sharp Corner)	0.375" ~ 3.000"	
Radius Corner Rectangles	Width:	0.3125" ~ 6.000"
	Thickness:	0.3125" ~ 2.500"
	Thickness (in)	
	>0.125" to 0.3125" inc.:	Nom Corner Radii (in)
	> 0.3125" to 1.000" inc.:	0.03125"
	>1.000"	0.0625"
Full Round Edge Rectangles	Width:	0.3125" ~ 6.000"
	Thickness:	0.3125" ~ 2.500"
Square Edge Rectangles	Width:	0.3125" ~ 6.000"
	Thickness:	0.3125" ~ 2.500"

⁽¹⁾ Confirm with mill for feasibility and verification

MLT-337

Port Huron Mill
2199 Lapeer Avenue • Port Huron, MI 48060
(P) 800-553-3336 • (P) 810.987.7770
(F) 810-987-9108

Belding Mill
302 Ashfield Street • Belding, MI 48809
(P) 800-553-3336 • (P) 616.794.1200
(F) 616-794-1214

www.muellerindustriesipd.com

**MUELLER
BRASS CO.**

บริษัท ปรน ทีโตน

Keysight Technologies
E4980AL Precision LCR Meter
20 Hz to 300 kHz/500 kHz/1 MHz

Providing the best combination of accuracy, speed and versatility



มณฑลพิษณุโลก

A Standard LCR Meter

Keysight's E4980AL precision LCR meter provides the best combination of accuracy, speed, and versatility for a wide range of component measurements. Offering fast measurement speed and outstanding performance at both low and high impedance ranges, the E4980AL is the basic tool for general R&D and manufacturing test of components and materials.

Fast measurement speed

The E4980AL offers excellent speed:

- 12 μ s (SHORT)
- 118 μ s (MED)
- 343 μ s (LONG)

Accurate measurements

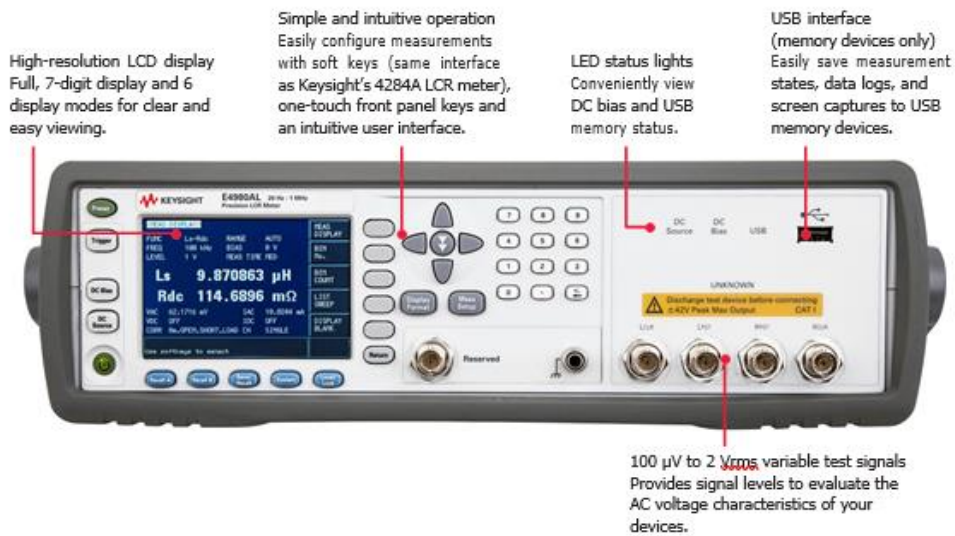
Exceptionally low noise at both low and high impedance for evaluating the characteristics of inductors and capacitors with excellent accuracy and repeatability.

- 0.05% basic impedance accuracy
- 1/2/4m cable extension capability
- Open/Short/Load correction

DC bias

Built-in DC-voltage-bias source provides accurate bias dependency evaluation for C, L, and material measurements.

- 1.5 V and 2 V



1. Measurement time at 1 μ s. Supplemental information. For additional details, refer to the E4980A/E4980AL data sheet (literature number 5989-4435EN).

Key Features

Accurate measurements

Exceptionally low noise at both low and high impedance to improve test quality.

- 0.05 % basic impedance accuracy
- Open/Short/Load compensation support
- Cable extension (1/2/4m) support

Fast measurement speed¹

Fast speed provides more throughput reducing cost of test.

- 12 μ s (SHORT)
- 118 μ s (MED)
- 343 μ s (LONG)

Measurement versatility

- 20 Hz to 300 kHz/500 kHz/1 MHz test frequency with 4-digit resolution at any frequency
- 16 impedance parameters
- 100 μ V to 2 $\sqrt{\text{Vrms}}$, 1 μ A to 20 mA variable test signal
- Auto-level control
- 201 points of programmable list sweep
- DC resistance

Compact and light weight

- Small size for easy transportation
- 370 (W) x 105 (H) x 390 (D) mm
 - 5.3 kg (11.7 lb.)

Standard LAN/USB/GPIB interface

Flexible PC connectivity and fast transfer speed

- 10/100 Base-T LAN
- USB (USBTMC) interface
- GPIB for robust instrument control and test automation

External trigger



Optional handler and scanner interfaces

Two interface options to choose from:

- Handler interface with 9 BIN outputs (Option E4980AL-201)
- Scanner interface with 128 multi-channel correction (Option E4980AL-301)



1. Measurement time at 1 $\sqrt{\text{Vrms}}$. Supplemental information. For additional details, refer to the E4980A/E4980AL data sheet (literature number 5989-4435EN).

Accurate, Fast Measurements up to 300 kHz/500 kHz/1 MHz

Accurate measurements provide design and test confidence

Broad range impedance measurements

The E4980AL LCR meter offers excellent performance for all impedance measurements.

Reliable measurement performance is needed to meet the test requirements of today's latest devices. The E4980AL offers fast measurement speed and outstanding performance within "both" low and high impedance ranges with exceptional dissipation factor accuracy.

Stable small ESR/low impedance measurements

The equivalent series resistance (ESR) of capacitors is becoming smaller and smaller to meet high-speed and low power-consumption circuit needs; and is difficult to measure. The E4980AL provides exceptional measurement stability.

Exceptionally accurate, high impedance measurements

The capacitance values of chip-capacitors are now down to femto-farad (fF) range. Thus, very stable and accurate high impedance measurements are required for higher yields and design reliability. Surpassing Agilent's previous industry-standard LCR meter (4284A), the E4980AL further improves measurement stability for these small capacitance devices.

Offering the industry's best combination of speed and accuracy

Fast measurement speed for more throughput in manufacturing

- 12 μ s per point at 1 MHz with SHORT mode¹
- 118 μ s per point at 1 MHz with MED mode¹
- 343 μ s per point at 1 MHz with LONG mode¹

Average function (up to 256)

Enables users to improve measurement repeatability.

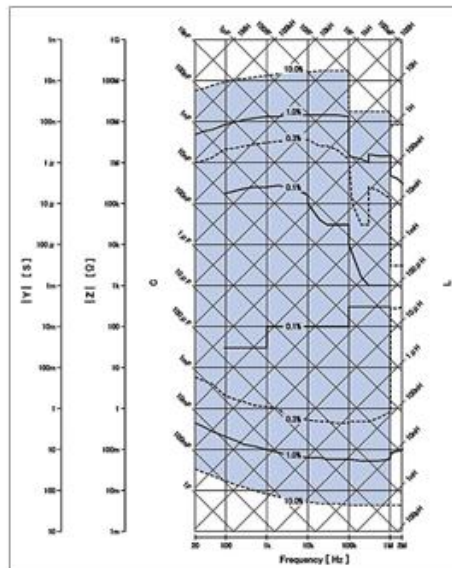


Figure 1. 10% impedance measurement accuracy range. Test signal 1 V_{rms} MED mode, cable 0m²

1. Measurement time at 1 MHz. Supplemental information. For additional details, refer to the E4980A/E4980AL data sheet (literature number 5989-4435EN).
2. Applied up to 300 kHz/500 kHz/1 MHz for E4980AL.

Versatile Measurement Capability to Meet your Application Needs

Powerful features increase test reliability and efficiency

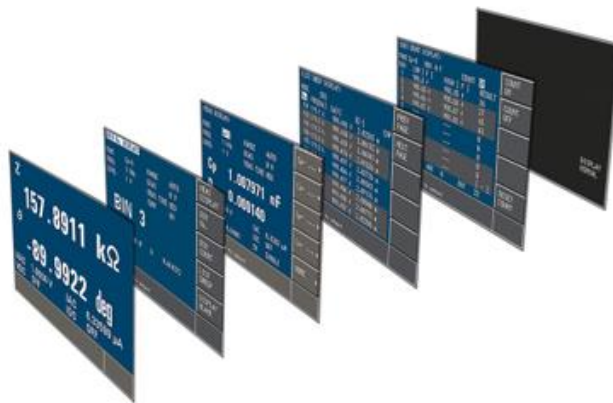


Figure 2. Select one of six display modes

Six convenient display modes

Select one of six display modes to suit your particular measurement needs.

- Normal view for a data overview
- Large display view for enhanced readability
- BIN No. view for measurement comparison and device sorting
- BIN count view for statistical evaluation
- LIST sweep view for continuous data
- Blank page view for ultimate speed (Turns off display to save refresh time.)

201 points list sweep

Frequency, measurement range, and stimulus conditions, can be set as list parameters (max 201 points). You can choose two parameters independently to test under a variety of measurement conditions.

DC resistance measurement

For inductor measurements, L_s or L_p and R_{dc} parameters can be measured at the same time.

LIST SWEEP DISPLAY						PREV PAGE
MODE	SQ					NEXT PAGE
FREQ [Hz]	Cp [F]	D [-]				
191 110.1 k	999.442 f	2.82263 m				
192 110.2 k	999.434 f	2.86183 m				
193 110.3 k	999.426 f	2.90103 m				
194 110.4 k	999.418 f	2.94023 m				
195 110.5 k	999.410 f	2.97943 m				
196 110.6 k	999.402 f	3.01863 m				
197 110.7 k	999.394 f	3.05783 m				
198 110.8 k	999.386 f	3.09703 m				
199 110.9 k	999.378 f	3.13623 m				
200 120 k	999.457 f	2.82296 m				

Figure 3. List sweep mode

MEAS DISPLAY				TESTS DISPLAY
FUNC	Ls-Rdc	RANGE	AUTO	BIN No.
FREQ	1 TME	BIAS	0 V	BIN COUNT
LEVEL	1 V	TESTS TIME	RED	LIST SWEEP
Ls		5.631952 nH		DISPLAY BLANK
Rdc		100.4456 mΩ		
VAC	1.10536 mV	IAC	18.8482 mA	
VDC	---	IDC	---	
CORR	0%/OPEN	DI	---	

Figure 4. DCR measurement

Exceeding Expectations in Productivity

Support for a wide variety of test fixtures

The E4980AL can be used with over twenty fixtures to meet a variety of evaluation [needs](#), from materials to SMD components. Also, built-in compensation functions minimize the influence of test fixtures.

USB memory support

The front panel USB memory interface allows you to [quickly and easily save state files, measurement log data, and display images](#) to an external USB memory device (mass storage).

PC connectivity

Standard GPIB/LAN/USB control interfaces provide a variety of paths for controlling the instrument. Using a LAN cable, you can even control the E4980AL with a computer and Web browser.

Scanner or handler interface options

The E4980AL offers an [optically-isolated](#) 9-BIN handler (Option 201) for integration into handler systems. A 128-channel scanner interface (Option 301) facilitates applications requiring a component scanner. Both interfaces have standard compatibility with other LCR system instruments ([e.g.](#), 4284A/88A/78A, etc.) for easy integration into systems. The multi-compensation function enables open/short/load compensations to perform scanning measurements independently in each scanner channel. This minimizes inconsistency in measured values between channels for more accurate measurements throughout the scanner system.

Materials measurements with N1500A measurement suite

The N1500A Option 006 supports the E4980AL with the 16451B and 16452A for materials measurements. The N1500A's easy-to-use user interface for calibration, limit test, and report generation functions provide versatility when making materials measurements. The N1500A can run on an external PC.



Figure 5. The E4980AL LCR meter offers support for a wide variety of test fixtures



Figure 6. Example of use with USB storage device



Figure 7. The E4980AL LCR meter can conveniently be controlled over LAN with a computer and a Web browser

Upgradability

Following upgrade options are available.

- E4980ALU-050 or 052: 300 kHz to 500 kHz
- E4980ALU-110 or 112: 300 kHz to 1 MHz
- E4980ALU-111 or 113: 500 kHz to 1 MHz
- E4980ALU-201 or 211: Add handler interface
- E4980ALU-301 or 311: Add scanner interface

Refer to the configuration guide for more details.

www.keysight.com/find/e4980al

มณู ทีใจ

Quick Product Comparison



4263B LCR meter (Discontinued)



E4980A Precision LCR meter



E4980A Precision LCR meter

	4263B LCR meter (Discontinued)	E4980A Precision LCR meter	E4980A Precision LCR meter
Frequency	100, 120, 1 k, 10 k, 20 k, and 100 kHz	20 Hz to 300 k/500 k/1 MHz	20 Hz to 2 MHz
Test signal level	20 m to 1 $\sqrt{V_{rms}}$	0 to 2 $\sqrt{V_{rms}}$ /0 to 20 $\sqrt{mA_{rms}}$	0 to 2 $\sqrt{V_{rms}}$ or 20 $\sqrt{V_{rms}}$ (Option 001) / 0 to 20 $\sqrt{mA_{rms}}$ or 100 $\sqrt{mA_{rms}}$ (Option 001)
Auto level control (ALC)	No	Yes	Yes
DC bias capability	1.5 V, 2 V	Built-in 1.5 V, 2 V	1.5 V, 2 V or ± 40 V (Opt. 001)
Programmable list sweep	No	201 points	201 points
Remote control	GPIB	GPIB, LAN, USB	GPIB, LAN, USB
Web browser control	No	Yes	Yes
Interface option	Handler	Handler (Option 201) / Scanner (Option 301)	Handler (Option 201) / Scanner (Option 301)
Parameters	Impedance, DCR, N, M	Impedance, DCR	Impedance, DCR (Option 200)
Control commands	4263B unique	E4980A/4284A compatible	E4980A/4284A compatible
Basic accuracy	0.1% @ Medium	0.1% @ Short 0.05% @ MED/LONG	0.1% @ Short 0.05% @ MED/LONG
Measurement time mode	25 μs Short mode, 65 μs Medium mode	149 μs @ 100 Hz 26 μs @ 1 kHz 12 μs @ 1 MHz Short mode	100 μs @ 100 Hz 20 μs @ 1 kHz 5.6 μs @ 1 MHz Short mode
Storage devices	Internal	Internal/USB memory	Internal/USB memory
Cable length	0, 1, 2, 4 m	0, 1, 2, 4 m	0, 1, 2, 4 m
Cabinet dimensions (mm)	320 (W) x 100 (H) x 300 (D)	370 (W) x 105 (H) x 390 (D)	370 (W) x 105 (H) x 390 (D)
Weight	4.5 kg	5.3 kg	5.3 kg

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายวีระ รัตนงาม
วันเกิด	วันที่ 18 สิงหาคม พ.ศ. 2518
สถานที่เกิด	อำเภอเมืองนครพนม จังหวัดนครพนม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 219 หมู่ 5 ตำบลหนองญาติ อำเภอเมืองนครพนม จังหวัดนครพนม รหัสไปรษณีย์ 48000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	ผู้ช่วยศาสตราจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยนครพนม
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2566 ปรัชญาดุขฎิบัณฑิต (ปร.ด.) วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2548 ครุศาสตรอุตสาหกรรมมหาบัณฑิต (ค.อ.ม.) วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2541 ประกาศนียบัตรครุเทคนิคชั้นสูง (ปทส.) สาขาวิชาไฟฟ้า วิทยาลัยช่างกลปทุมวัน

พูนุ่ ปณุ่ ทิโต ชีเว