



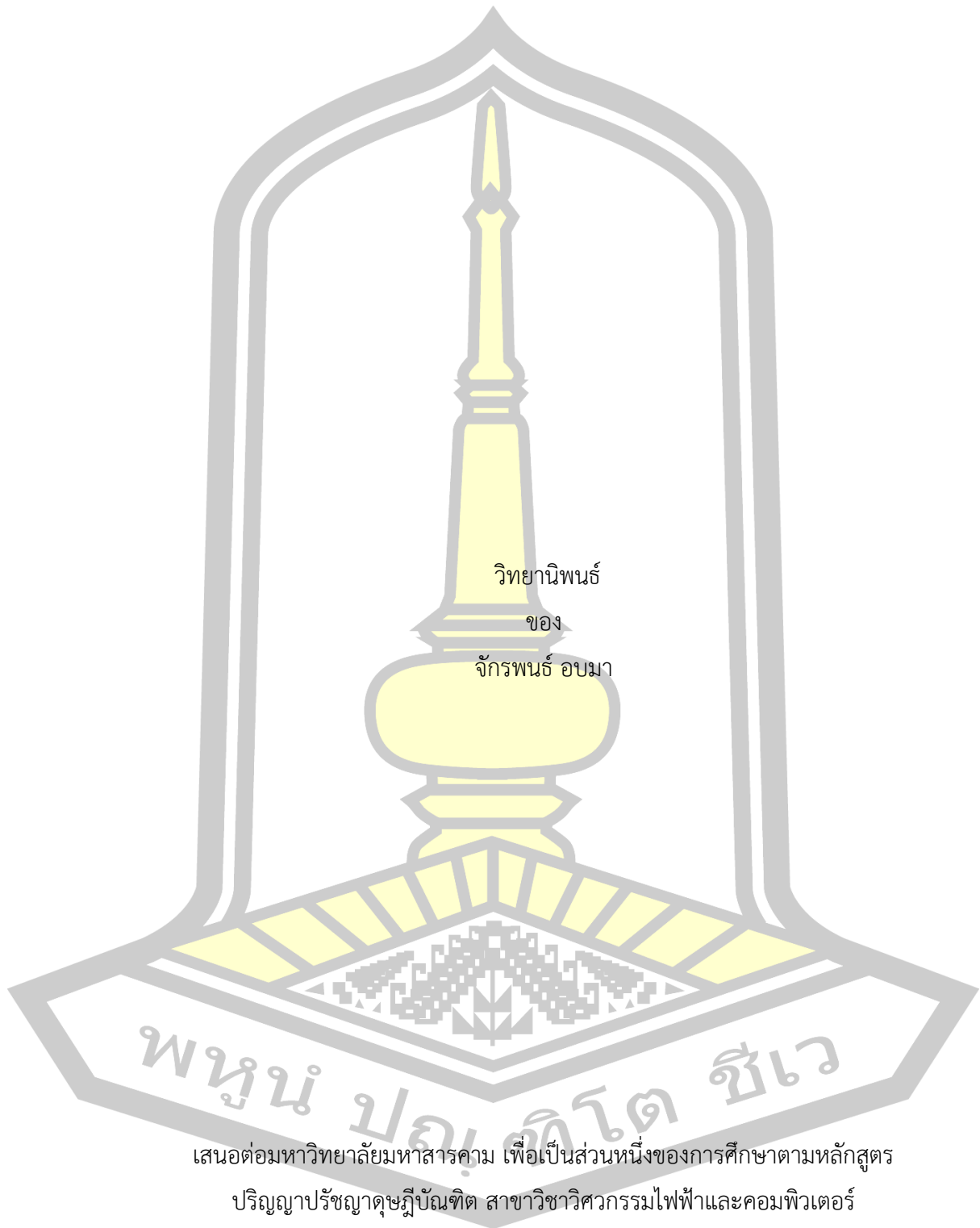
ตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัลโดยไร้ฐานรอง

วิทยานิพนธ์
ของ
จักรพันธ์ ออบมา

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
กรกฎาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัลโดยไร้ฐานรอง

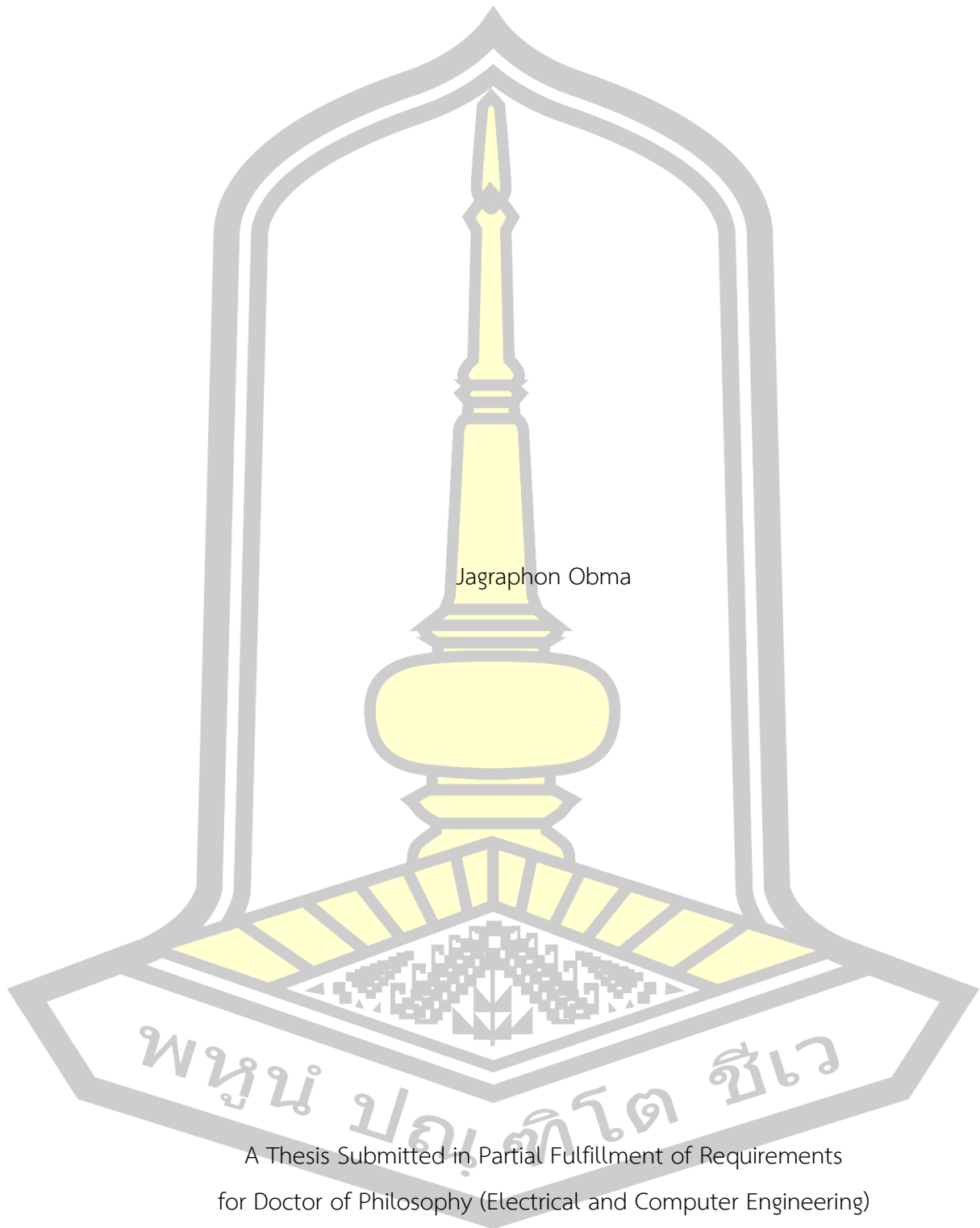


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

กรกฎาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

The Interdigital Capacitor Level Sensor With Non Substrate



Jagraphon Obma

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

July 2021

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายจักรพันธ์ ออบมา แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. อติเรก จันทะคุณ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. วรวัฒน์ เสี่ยงมวิบูล)

กรรมการ

(ผศ. ดร. นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ณัฐฉิ สุวรรณทา)

กรรมการ

(รศ. ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย มหาสารคาม

(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง ตัวรับรู่ระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัลโดยไร้ฐานรอง
 ผู้วิจัย จักรพันธ์ ออบมา
 อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล
 ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
 มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2564

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอตัวรับรู่ระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัลแบบไร้ฐานรองโดยได้ทำการทดลองส่วนแรกคือการวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู่ระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัลแบบมีฐานรอง โดยใช้วัสดุฐานรองเป็น Epoxy ที่มีค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุ $\epsilon_r = 4.6$ สร้างขึ้นจำนวน 6 รูปแบบ และตัวรับรู่ระดับระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัลแบบไร้ฐานรองสร้างขึ้นจำนวน 6 รูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุ โดยผลการทดลองตัวรับรู่ระดับระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัลแบบมีฐานรองมีค่าการเก็บประจุสูงสุดอยู่ที่ สูงสุดที่ 536.44 นาโนฟารัด และตัวรับรู่ระดับระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัลแบบไร้ฐานรอง มีค่าการเก็บประจุสูงสุดอยู่ที่ สูงสุดที่ 877.56 นาโนฟารัด มีผลทำให้ค่าการเก็บประจุที่มากขึ้นจากที่มีฐานรองถึง 302.69 นาโนฟารัด จึงสามารถขยายย่านเพื่อวัดระดับของเหลวให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น สามารถประยุกต์ใช้งานโดยประมวลผลในด้านงานอุตสาหกรรม งานอุตุนิยมวิทยา และเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งได้ต่อไป

คำสำคัญ : ค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล, ตัวรับรู่ระดับของเหลว, ไร้ฐานรอง

พจนัน ปณุกิตโต ชีวะ

TITLE	The Interdigital Capacitor Level Sensor With Non Substrate		
AUTHOR	Jagraphon Obma		
ADVISORS	Associate Professor Worawat Sa-Ngiamvibool , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Electrical and Computer Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2021

ABSTRACT

This thesis presents the interdigital capacitor level sensor with none substrate. The interdigital capacitor level sensor are designed and fabricated to be two types that are the fabricated with an epoxy substrate. The relative permittivity of substrate (Epoxy) $\epsilon_r = 4.6$. and with none substrate. Each type is separated to be 6 models that are designed with difference dimensions of the width, the gap and the length of the copper lines circuit for comparing and obtaining the best model. The fabricated with substrate can sense the maximum capacitance at 536.44 nF and The fabricated with none substrate can sense the maximum capacitance at 877.56 nF that is higher than the maximum capacitance of the sensor with substrate 302.69 nF The higher range of the capacitance of the circuit with none substrate. Developed in many industries and meteorology and applied to use in the water level measurement for the network of internet of things (IOT) system.

Keyword : Interdigital Capacitor, Level Senser, Non-Substrate

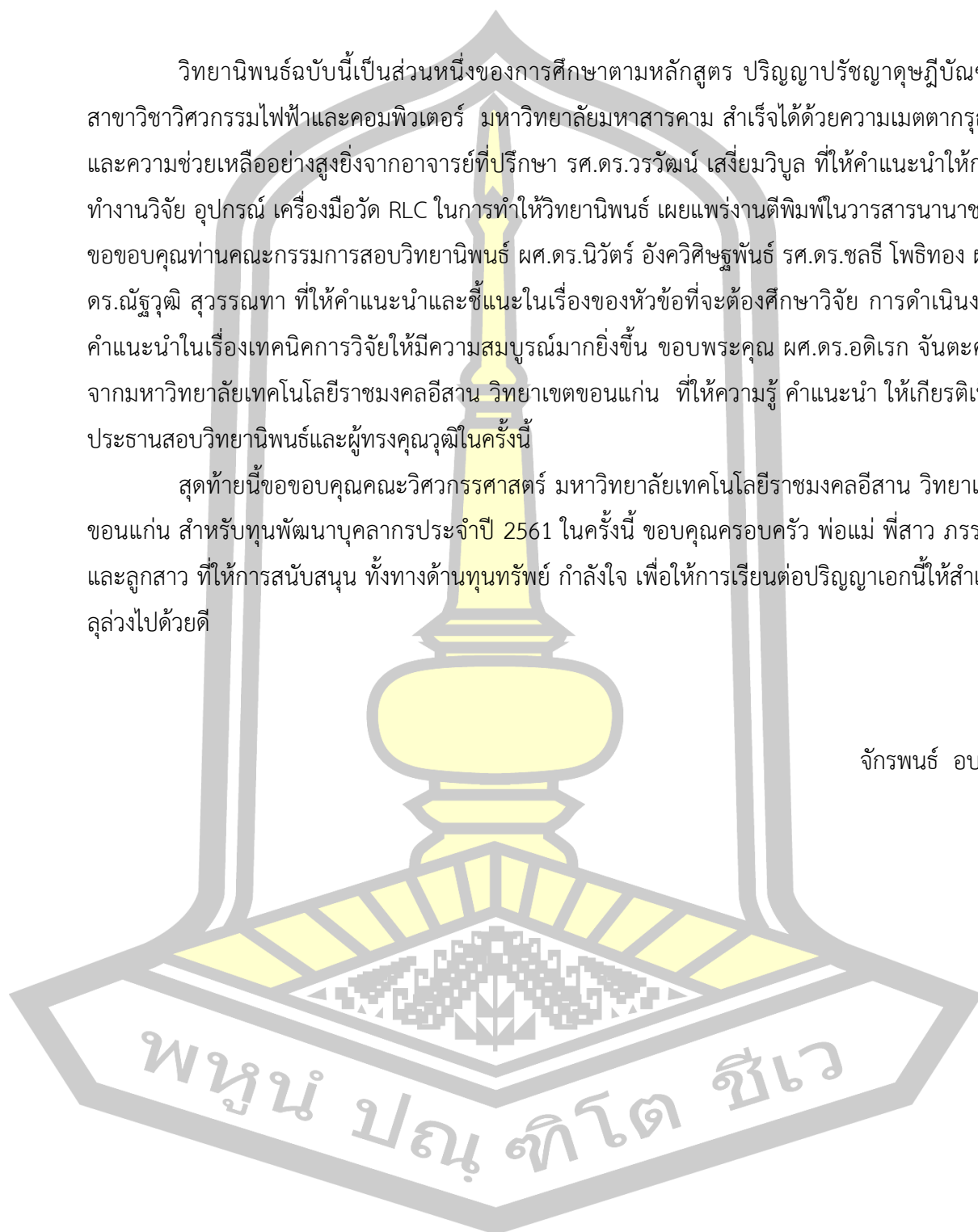
พจนัน์ ปณุ ทิโต ชีเว

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สำเร็จได้ด้วยความสามารถและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล ที่ให้คำแนะนำให้การทำงานวิจัย อุปกรณ์ เครื่องมือวัด RLC ในการทำให้วิทยานิพนธ์ เผยแพร่งานตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ ขอขอบคุณท่านคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.นิวัฒน์ อังควิศิษฐพันธ์ รศ.ดร.ชลธิ โปธิทอง ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ สุวรรณทา ที่ให้คำแนะนำและชี้แนะในเรื่องของหัวข้อที่จะต้องศึกษาวิจัย การดำเนินงาน คำแนะนำในเรื่องเทคนิคการวิจัยให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอขอบคุณ ผศ.ดร.อดิเรก จันตะคุณ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ ให้เกียรติเป็นประธานสอบวิทยานิพนธ์และผู้ทรงคุณวุฒิในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น สำหรับทุนพัฒนาบุคลากรประจำปี 2561 ในครั้งนี้ ขอขอบคุณครอบครัว พ่อแม่ พี่สาว ภรรยา และลูกสาว ที่ให้การสนับสนุน ทั้งทางด้านทุนทรัพย์ กำลังใจ เพื่อให้การเรียนต่อปริญญาเอกนี้ให้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี

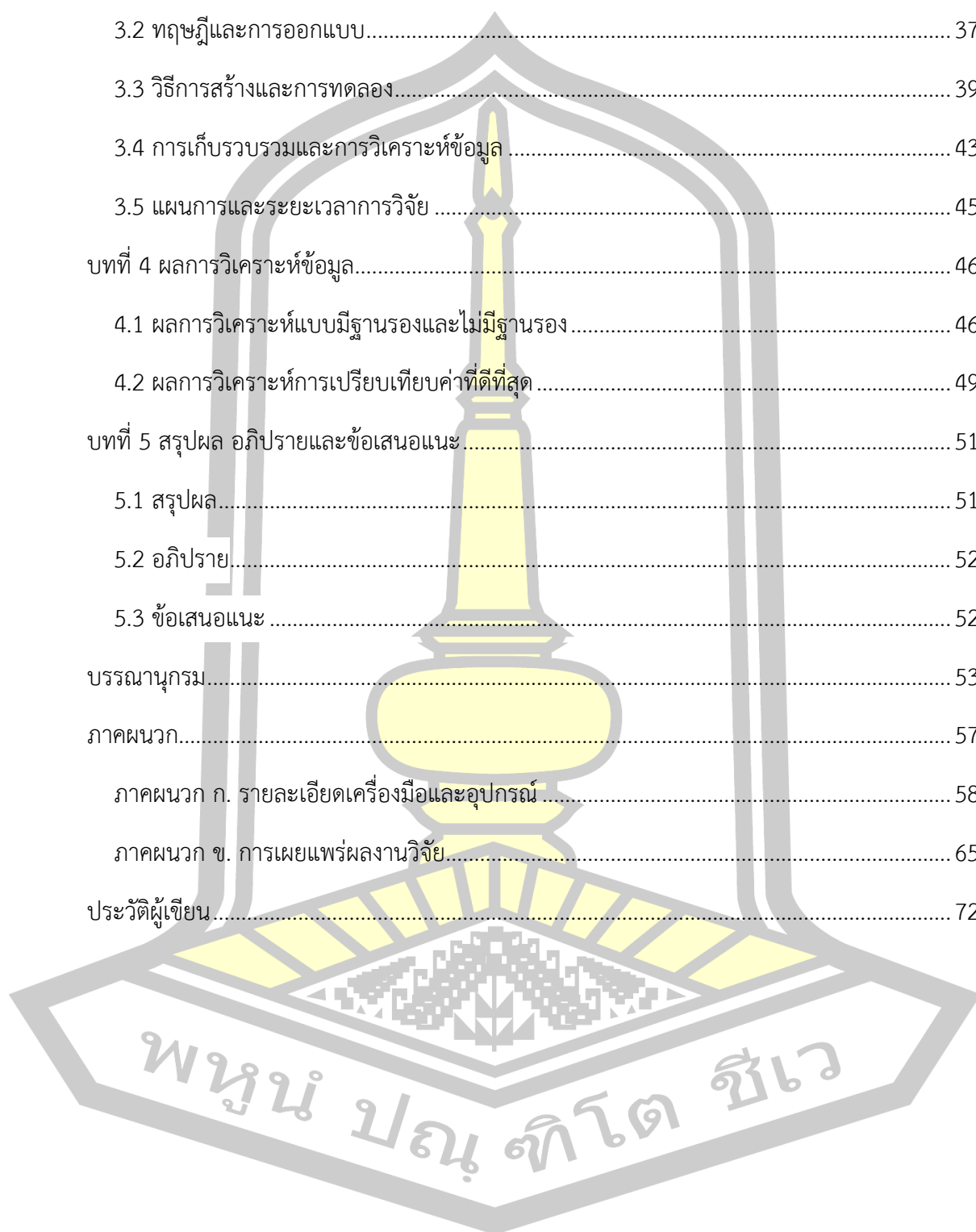
จักรพันธ์ ออบมา



สารบัญ

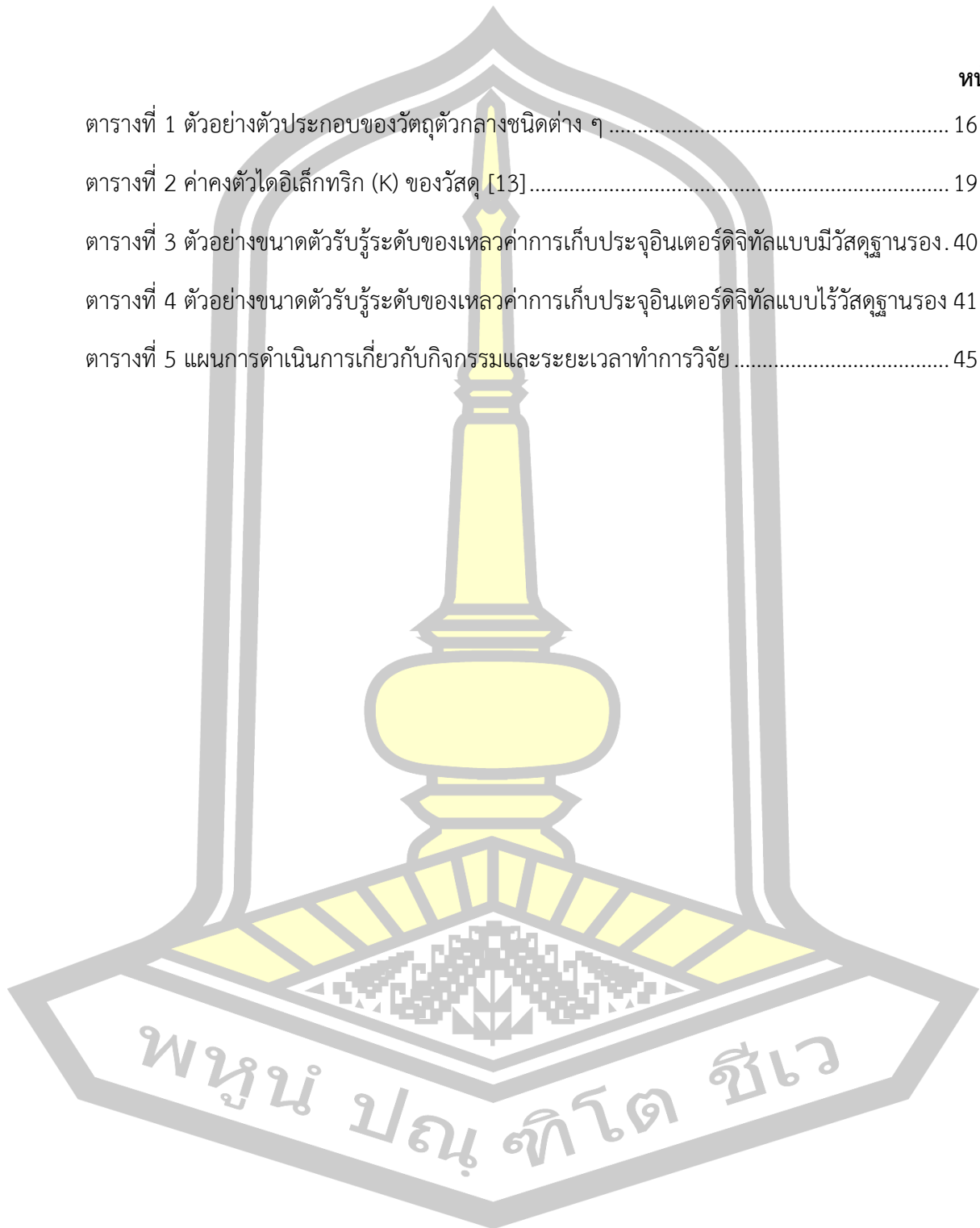
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ภูมิหลัง.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ความสำคัญของการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีสติวเซอร์และเซนเซอร์.....	5
2.2 คุณสมบัติของค่าการเก็บประจุทางไฟฟ้า.....	17
2.3 แผงวงจรพิมพ์และวัสดุฐานรอง.....	22
2.4 ตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล.....	24
2.5 การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์.....	27
2.6 การปริทัศน์วรรณงานวิจัย.....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	36

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	36
3.2 ทฤษฎีและการออกแบบ.....	37
3.3 วิธีการสร้างและการทดลอง.....	39
3.4 การเก็บรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	43
3.5 แผนการและระยะเวลาการวิจัย.....	45
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	46
4.1 ผลการวิเคราะห์แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง.....	46
4.2 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าที่ดีที่สุด.....	49
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายและข้อเสนอแนะ.....	51
5.1 สรุปผล.....	51
5.2 อภิปราย.....	52
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	52
บรรณานุกรม.....	53
ภาคผนวก.....	57
ภาคผนวก ก. รายละเอียดเครื่องมือและอุปกรณ์.....	58
ภาคผนวก ข. การเผยแพร่ผลงานวิจัย.....	65
ประวัติผู้เขียน.....	72



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ตัวอย่างตัวประกอบของวัตถุตัวกลางชนิดต่าง ๆ	16
ตารางที่ 2 ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (K) ของวัสดุ [13]	19
ตารางที่ 3 ตัวอย่างขนาดตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิเจทัลแบบมีวัสดุฐานรอง .	40
ตารางที่ 4 ตัวอย่างขนาดตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิเจทัลแบบไร้วัสดุฐานรอง	41
ตารางที่ 5 แผนการดำเนินการเกี่ยวกับกิจกรรมและระยะเวลาทำการวิจัย	45



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ระบบการวัดซึ่งน้ำหนัก [3].....	5
ภาพประกอบ 2 ค่าความจุที่นำไปตัดแปลงเป็นตัวตรวจจับ [3]	8
ภาพประกอบ 3 หลักการตรวจจับแบบความต้านทานแม่เหล็ก [3].....	9
ภาพประกอบ 4 แสดงการใช้หลอด LED และโฟโตทรานซิสเตอร์เป็นตัวตรวจจับว่าเมื่อใดสมควรจับวัตถุได้ [3].....	10
ภาพประกอบ 5 วงจรตรวจจับที่ใช้แสงใช้ LED และโฟโตทรานซิสเตอร์ [3].....	11
ภาพประกอบ 6 ออปโตไอโซเลเตอร์ [3].....	11
ภาพประกอบ 7 ตัวอย่างตัวตรวจจับแบบไม่สัมผัสใช้หลักการเหนี่ยวนำ (www.balluff.com/solutions/inductive.htm)	12
ภาพประกอบ 8 แสดงส่วนประกอบของตัวตรวจจับแบบเหนี่ยวนำ [3]	12
ภาพประกอบ 9 ระยะของการตรวจจับของตัวตรวจจับแบบไม่สัมผัส [3]	14
ภาพประกอบ 10 ตัวอย่างตัวตรวจจับแบบความจุแบบต่าง ๆ	15
ภาพประกอบ 11 ภาพตัดขวางด้านข้างส่วนตรวจจับของตัวตรวจจับแบบไม่สัมผัส	16
ภาพประกอบ 12 ตัวอย่างการใช้ตัวตรวจจับแบบความจุกับงาน	17
ภาพประกอบ 13 แสดงการกระจายตัวของประจุที่ผิวรอบตัวนำ	17
ภาพประกอบ 14 (ก) ไดอิเล็กทริกแบบอากาศว่าง (ข) ไดอิเล็กทริกแบบไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลาง... ..	20
ภาพประกอบ 15 (ก) ตัวเก็บประจุต่ออนุกรม (ข) ตัวเก็บประจุสมมูล	21
ภาพประกอบ 16 (ก) ตัวเก็บประจุต่อขนาน (ข) ตัวเก็บประจุสมมูล.....	22
ภาพประกอบ 17 ค่าคาปาซิแตนซ์เพิ่มขึ้นเมื่อมีวัสดุไดอิเล็กทริกวางในสนามไฟฟ้า [26-27].....	24
ภาพประกอบ 18 รูปแบบของตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตัล.....	25
ภาพประกอบ 19 แนวตัดโครงสร้างของตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัล [9]..	26
ภาพประกอบ 20 สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย	27

ภาพประกอบ 21 แผนภาพการกระจาย (Scatter Diagram)..... 28

ภาพประกอบ 22 งานวิจัยเทคนิคโดยใช้การวัดค่าการเก็บประจุสามแบบสำหรับของเหลว [14] 30

ภาพประกอบ 23 ระบบการวัดระดับน้ำอ้างอิงกับตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุต่อพื้นดิน [16] 31

ภาพประกอบ 24 การวัดระดับน้ำโดยใช้เทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก [15], [19] 31

ภาพประกอบ 25 ตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิตอลคู่ขนานระยะใกล้สำหรับป้องกันการทำลายของฉนวนในระบบสายส่งไฟฟ้า [20]..... 32

ภาพประกอบ 26 การวัดความชื้นในคอนกรีตโดยตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลสนามระยะใกล้ [21] 32

ภาพประกอบ 27 การวัดค่าความเข้มข้นของน้ำตาลโดยใช้ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตอล [22]..... 33

ภาพประกอบ 28 การวัดค่าความเข้มข้นและเจือปนของน้ำมัน [23-26]..... 33

ภาพประกอบ 29 การวัดระดับน้ำแบบปรับค่าความแม่นยำด้วยตัวเองโดยใช้ตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล [27-28] 34

ภาพประกอบ 30 ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบใหม่ [29], [30] 35

ภาพประกอบ 31 การพิมพ์และแผ่นอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบการวัดระดับโดยใช้ค่าการเก็บประจุต้นทุนต่ำ [31]..... 35

ภาพประกอบ 32 เครื่องวัดค่าการเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจุ และค่าความต้าน (LCR Meter) 37

ภาพประกอบ 33 ภาพด้านบนของโครงสร้างของตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล 38

ภาพประกอบ 34 ภาพตัดโครงสร้างของตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล [9]. 38

ภาพประกอบ 35 ตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบมีฐานรอง (Epoxy).... 40

ภาพประกอบ 36 ตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบไร้มีฐานรอง 41

ภาพประกอบ 37 การวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบมีวัสดุฐานรอง 42

ภาพประกอบ 38 การวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบไร้วัสดุฐานรอง 42

ภาพประกอบ 39 แผนภาพการประมวลผลการวัดค่าการเก็บประจุกับไมโครคอนโทรลเลอร์ 43

ภาพประกอบ 40 ภาพจริงการประมวลผลการวัดค่าการเก็บประจุกับไมโครคอนโทรลเลอร์ 43

ภาพประกอบ 41 ผลของค่าการเก็บประจุแบบมีฐานรอง 3 ตัวอย่างแบบไม่ตัดด้าน L 46

ภาพประกอบ 42 ผลของค่าการเก็บประจุแบบมีฐานรอง 3 ตัวอย่างแบบตัดด้าน L 47

ภาพประกอบ 43 ผลของค่าการเก็บประจุแบบมีฐานรองทั้ง 6 ตัวอย่าง 47

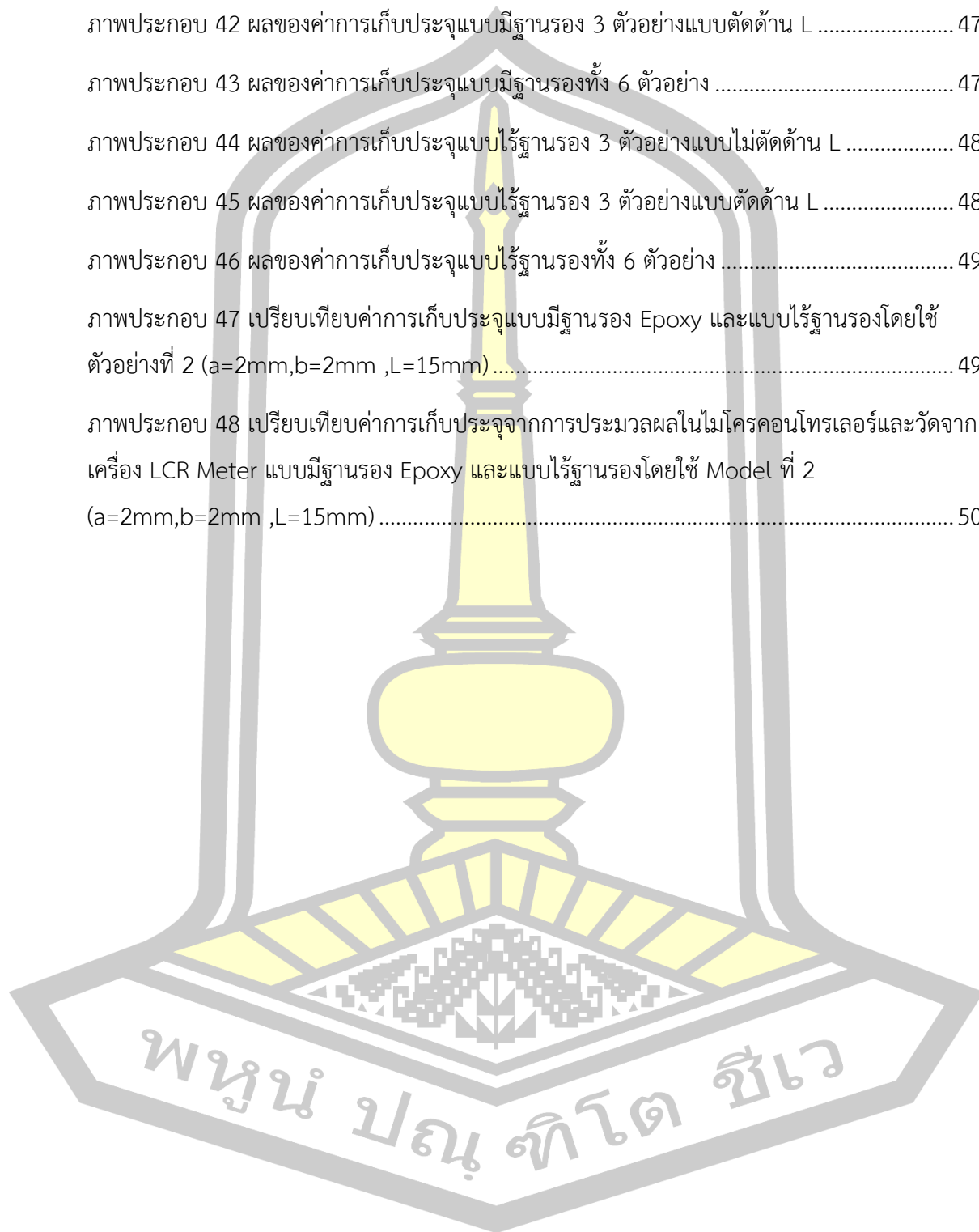
ภาพประกอบ 44 ผลของค่าการเก็บประจุแบบไร้ฐานรอง 3 ตัวอย่างแบบไม่ตัดด้าน L 48

ภาพประกอบ 45 ผลของค่าการเก็บประจุแบบไร้ฐานรอง 3 ตัวอย่างแบบตัดด้าน L 48

ภาพประกอบ 46 ผลของค่าการเก็บประจุแบบไร้ฐานรองทั้ง 6 ตัวอย่าง 49

ภาพประกอบ 47 เปรียบเทียบค่าการเก็บประจุแบบมีฐานรอง Epoxy และแบบไร้ฐานรองโดยใช้
ตัวอย่างที่ 2 ($a=2\text{mm}, b=2\text{mm}, L=15\text{mm}$) 49

ภาพประกอบ 48 เปรียบเทียบค่าการเก็บประจุจากการประมวลผลในไมโครคอนโทรลเลอร์และวัดจาก
เครื่อง LCR Meter แบบมีฐานรอง Epoxy และแบบไร้ฐานรองโดยใช้ Model ที่ 2
($a=2\text{mm}, b=2\text{mm}, L=15\text{mm}$) 50



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

ปัจจุบันการพัฒนาตัวรับรู้เพื่อใช้สำหรับเครื่องมือวัดเป็นที่แพร่หลายทั่วไปในตำนานงานอุตสาหกรรม งานอุตุนิยมวิทยา สิ่งแวดล้อม [1-8] เพื่อจะนำมาวิเคราะห์การวัดความชื้นในอากาศ การวัดของเหลว การวัดคุณภาพน้ำ โดยสิ่งเหล่านี้มีความจำเป็นที่ต้องพัฒนาตัวรับรู้เพื่อนำไปใช้ในงานเหล่านี้ตั้งแต่การพัฒนาในรูปแบบเป็นหลักการเชิงกล หลักการลอยตัวของลูกลอยบนของเหลวโดยน้ำหนักของลูกลอยที่กระทำกับแรงโน้มถ่วงโลกมีค่าเท่ากับน้ำหนัก ของเหลวที่ปริมาตรเท่ากับปริมาตรของลูกลอยส่วนที่จมอยู่ในของเหลว มีโครงสร้างที่ง่าย ใช้งานง่าย ทำางานภายใต้สภาวะอุณหภูมิ ความดันสูง สะดวกต่อการทำให้เป็นมาตรฐาน มีความเที่ยงตรงในการวัดสูง เพราะเป็นการวัดที่ผิวของเหลวโดยตรง หลักการของความดัน [9] ความดันของของเหลวมีลักษณะคล้ายความดันอากาศ คือ น้ำหนักของของเหลวที่อยู่เหนือตำแหน่ง กดทับลงมาและยิ่งในระดับที่ลึกขึ้นของเหลวที่เหนือตำแหน่งนั้นจะมีความดันของของเหลวมากขึ้นหรือ ต่อมาเป็นอุปกรณ์ทางเสียงและแสง การเดินทางของแสง คลื่นอัลตราโซนิกส์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นการเดินทางของเสียงหรือแสงถูกส่งออกโดยการกระจายหรือการเคลื่อนที่ ผ่านอากาศ บางส่วนจะแทรกผ่านเข้าไปในตัวกลางของแข็งหรือของเหลว ทำให้เกิดการสะท้อนกลับ คลื่นความถี่สูงส่วนใหญ่จะสะท้อนกลับโดยช่วงเวลาการสะท้อนกลับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะห่างวัดลูกกับอุปกรณ์วัดระดับ

หลักการคุณสมบัติทางไฟฟ้า [7-8] การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับระดับของเหลว โดยเมื่อของเหลวถูกสิ่งเหล่านี้จะแปลงค่าตามคุณสมบัติที่วัดได้ เช่น ค่าความต้าน ค่าการเก็บประจุ ค่าการเหนี่ยวนำ เป็นต้น โดยมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าการวัดปริมาณไดอิเล็กทริก (dielectric constant, ϵ) และการวัดค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) เป็นองค์ประกอบในการวัดของเหลว แล้วนำค่าดังกล่าวมาแปลงค่าในหน่วยประมวลผลแสดงออกทางหน้าจอเป็นค่าที่วัดได้ ตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล เป็นตัวรับรู้ชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจ ออกแบบง่ายไม่มีความซับซ้อน เป็นการวัดโดยใช้ปริมาณของค่าการเก็บประจุเพิ่มขึ้นตามความสูงของเหลว แล้วนำค่าการเก็บประจุมาแปลงค่าเข้าประมวลผลและสรุปเป็นค่าทางสถิติ [10] เพื่อวัดค่าตามปริมาณที่ต้องการโดยตัวรับรู้ที่มีความน่าสนใจคือ ตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล [11-13]

จากการปริทัศน์วรรณกรรมกรรมการงานวิจัยในเรื่องของการพัฒนาตัวรับรู้ที่พัฒนาขึ้นมา มีหลากหลายรูปแบบ ตั้งแต่การวัดค่าการเก็บประจุของเหลวโดยใช้แท่งเหล็กยาวหรือเป็นแผ่น

ขนาดใหญ่ที่เป็นการวัดค่าการเก็บประจุเพื่อนำมาแปลงค่าวัดทางไฟฟ้า [14] ต่อมาการพัฒนาตัวรับรู้วัดค่าการเก็บประจุแบบทรงกระบอก [15-19] แต่งานวิจัยดังกล่าวมีขนาดใหญ่และเหมาะสมกับงานวัดในระดับเล็กที่มีความละเอียดไม่มากนัก

นักวิจัยบางกลุ่มได้พัฒนาตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล (Interdigital Electrode Capacitor : IDC) หรือที่เรียกกันว่าตัวรับรู้บนแผ่นวงจรพิมพ์หลายซี่หิวที่มีลักษณะเป็นการกัดแผ่นทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Print Circuit Board : PCB) ที่มีวัสดุฐานรอง (Substrate) วางแผ่นตัวนำในแนวระนาบและวางสลับกันขึ้นไปเพื่อทำให้เป็นคุณลักษณะการขนานของค่าการเก็บประจุ โดยนักวิจัยได้นำไปวัดความเป็นฉนวนของสายไฟ [20] วัดความชื้นในคอนกรีต [21] วัดค่าร้อยละความเข้มข้นของน้ำตาล [22] วัดค่าความเข้มข้นและเจือปนของน้ำมัน [23-26]

งานวิจัยการวัดระดับน้ำแบบปรับค่าความแม่นยำด้วยตัวเองโดยใช้ตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล [27-28] บางงานวิจัยได้เพิ่มคุณสมบัติของค่าการเก็บประจุจากการออกแบบซี่ลายวงจรรอก 2 ข้างเป็นซี่หิวเพื่อให้เกิดคุณสมบัติค่าการเก็บประจุที่มากขึ้น [29-30] และงานวิจัยล่าสุดได้นำตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัลลงแผ่นพลาสติกและลามิเนตที่มีคุณสมบัติในการอ่อนตัวและยืดหยุ่นเพื่อนำไปวัดค่าระดับที่มีพื้นที่ผิวโค้ง [31] โดยปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นยังมีจุดด้อยในเรื่องขนาดเนื่องจากงานอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ ทำให้เกิดความไม่ยืดหยุ่น หน้าสัมผัสของเหลวไม่สัมผัสตัวรับรู้ได้ทั่วถึง ส่งผลให้ค่าการเก็บประจุน้อยระยะการวัดที่ไม่ละเอียด

การทบทวนบทความวิจัยเหล่านี้ ทำให้เกิดแนวคิดเทคนิคใหม่โดยบทความวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นในการออกแบบและสร้างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัลแบบไร้วัสดุฐานรอง โดยพิจารณาจากระดับของค่าการเก็บประจุที่มากขึ้นเมื่อไม่มีฐานรอง เมื่อแปลงค่าการเก็บประจุเป็นข้อมูลนำไปใช้งานกับตัวประมวลผลนำไปใช้งานวัดระดับที่มีความละเอียดมากขึ้น เป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมกับการประยุกต์ด้านงานวัดระดับของเหลวที่ต้องใช้ความละเอียด งานทางด้านอุทกศาสตร์ อุตุนิยมวิทยา หรืองานที่ขนาดกลางไปจนถึงเล็กที่ต้องการวัดระดับน้ำ เช่น ตู้ปลาสวยงาม การเลี้ยงสัตว์น้ำของเกษตรกร เป็นต้น สามารถพัฒนางานวิจัยเป็นระบบการวัดระดับน้ำที่มีมาตรฐาน และสามารถเชื่อมต่อผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งได้ต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย

- 1.2.1 สามารถออกแบบและสร้างตัวรับรู่ระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบไร้วัสดุฐานรอง
- 1.2.2 สามารถบ่งบอกคุณลักษณะความแตกต่างของค่าการประจุของตัวรับรู่ระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบมีวัสดุฐานรองและไร้วัสดุฐานรอง
- 1.2.3 สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับการวัดระดับของเหลว

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบและสร้างออกแบบและสร้างตัวรับรู่ระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบไร้วัสดุฐานรองได้
- 1.3.2 วัดค่าการประจุของตัวรับรู่ระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบไร้วัสดุฐานรองได้มากกว่าแบบมีวัสดุฐานรอง
- 1.3.3 เพิ่มคุณลักษณะค่าการเก็บประจุได้มากขึ้นมีผลต่อการวัดที่มีความละเอียดมากขึ้นและนำมาประยุกต์ใช้งานการวัดระดับของเหลวได้

1.4 ความสำคัญของการวิจัย

ทำให้ทราบถึงการออกแบบและสร้างตัวรับรู่ระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบไร้วัสดุฐานรอง คุณลักษณะที่เกิดขึ้นในค่าการเก็บประจุที่มากขึ้นเหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการวัดระดับของเหลวที่ละเอียดมากขึ้น มีหลักการทำงานที่ง่ายไม่ซับซ้อน สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับหน่วยประมวลผล เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นต้น

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 ออกแบบและสร้างตัวรับรู่ระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบมีวัสดุฐานรองและไร้วัสดุฐานรอง ชนิดละ 6 ขนาด เพื่อนำมาเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุ
- 1.5.2 วัดระดับของเหลว 16 ระดับเพื่อทราบค่าการเก็บประจุโดยใช้เครื่องวัด RLC Meter
- 1.5.3 นำค่าการเก็บประจุที่วัดได้มาวิเคราะห์ค่าทางสถิติ สมการเชิงเส้น

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

ตัวรับรู่ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล (Interdigital Electrode Capacitor : IDC) คือ ตัวรับรู่ที่ใช้หลักการของค่าความจุไฟฟ้า (capacitor) โดยวางแผ่นทองแดงตัวนำในแนวระนาบและวางสลับกันที่เป็นขั้วบวกกับขั้วลบ คล้ายกับการต่อคาปาซิเตอร์แบบขนานทำให้เกิดค่าการเก็บประจุทางไฟฟ้า

วัสดุฐานรอง (Substrate) คือ แผ่นที่มีทองแดง 2 ด้านโดยมีฉนวนเป็นตัวกั้นทองแดง มีหลากหลายวัสดุ เช่น AD-260 FR-4 Epoxy เป็นต้น โดยนำมาใช้งานได้ด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ สายอากาศ และสายส่ง

ค่าเก็บประจุทางไฟฟ้า (Capacitance) คือ ความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นฟารัด (Farad : F) ตัวเก็บประจุที่มีความสามารถในการเก็บประจุได้ 1 ฟารัดหมายถึงเมื่อป้อนแรงเคลื่อนจำนวน 1 โวลต์ จ่ายกระแส 1 แอมแปร์ ในเวลา 1 นาที ให้กับแผ่นเพลททั้งสองสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้ 1 คูลอมป์



บทที่ 2

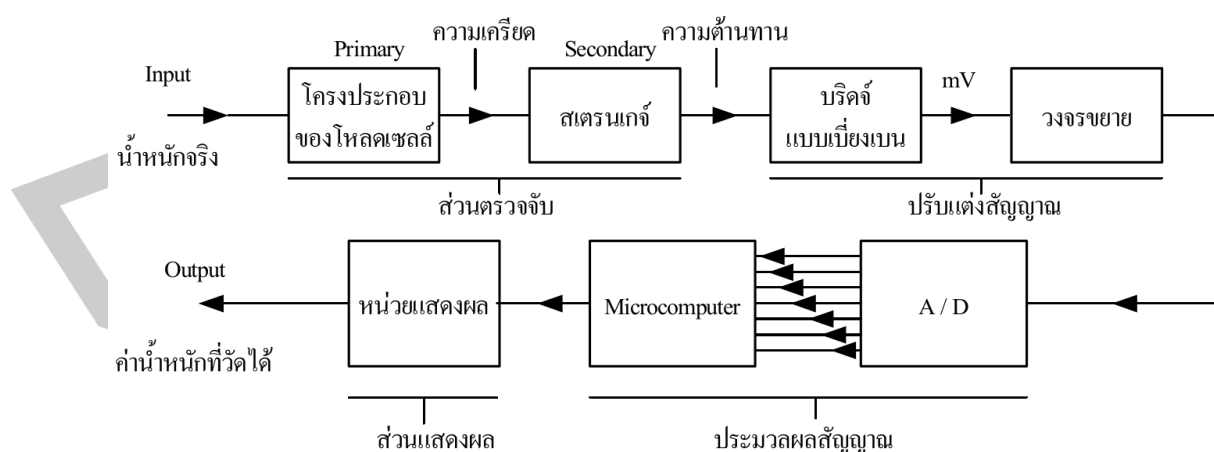
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากบทนำที่กล่าวมาทำให้ผู้วิจัยได้นำประเด็นดังกล่าวมาศึกษาในทฤษฎีกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้ศึกษาแต่ละหัวข้อตามขั้นตอนดังนี้

- 2.1 ทหรานสดิวเซอร์และเซนเซอร์
- 2.2 คุณสมบัติของค่าการเก็บประจุทางไฟฟ้า
- 2.3 แผ่นวงจรพิมพ์และวัสดุฐานรอง
- 2.4 ตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล
- 2.5 การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์
- 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทหรานสดิวเซอร์และเซนเซอร์

กิตติวุฒิ จินนะบุตร [3] กล่าวว่าทหรานสดิวเซอร์คือ อุปกรณ์แปลงข้อมูลหรือพลังงานรูปแบบต่างๆ ให้เป็นข้อมูลหรือพลังงานไฟฟ้า หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากรูปแบบหนึ่งเป็นอีกรูปแบบหนึ่ง อาจรวมทั้งอุปกรณ์ตรวจจับและส่วนปรับแต่งสัญญาณ เช่น ทหรานสดิวเซอร์ซึ่งนำหน้าจะหมายรวมทั้ง 4 ส่วนคือ ส่วนการตรวจจับ ส่วนปรับแต่งสัญญาณ ส่วนประมวลผล และส่วนแสดงผลดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 ระบบการวัดซึ่งน้ำหนัก [3]

เซนเซอร์ คือตัวอุปกรณ์ตรวจวัดตัวแรกในระบบการวัด ใช้ตรวจจับหรือรับรู้การเปลี่ยนแปลง ปริมาณทางกายภาพของตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความร้อน แสง สี เสียง ระยะทาง การเคลื่อนที่ ความดัน การไหล เป็นต้น เปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสัญญาณหรือข้อมูลที่สอดคล้องและเหมาะสมกับส่วนของการกำหนดเงื่อนไข ทาง สัญญาณ ถ้าใช้เซนเซอร์วัดแบบสัมผัสกับตัวแปร โดยตรงเรียก ตัวตรวจรู้แบบปฐม (Primary Sensors) หรือ ตัวตรวจรู้ขั้นต้น หากมีการตรวจรู้โดยผ่านส่วนอื่นก่อน เช่น สเตรอนเกจตรวจรับแรงกดที่ต้องรับแรงถ่ายถอดจากแท่งโลหะที่รับแรงโดยตรง อีกทอดโดยใช้สเตรอนเกจแปะติดกับแท่งโลหะนั้นเพื่อวัดแรงนั้น เราจะเรียกกเกจในกรณีนี้ว่าเป็น ตัวตรวจรู้ทุติยภูมิ (Secondary Sensor) หรือ ตัวตรวจจับขั้นรอง การตรวจรู้จะอาศัย ผลการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในตัวเซนเซอร์เองที่สามารถตรวจวัดได้โดยส่วนใหญ่จะเป็นพารามิเตอร์ทาง ไฟฟ้า เช่น แรงดัน กระแส ความต้านทาน ความจุและความเหนี่ยวนำ เป็นต้น เมื่อค่าตัวแปรทางกายภาพ เปลี่ยนแปลงแล้วพารามิเตอร์ของตัวเซนเซอร์เหล่านี้จะเปลี่ยนตาม เมื่อเราทราบค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่เปลี่ยน ตาม อาจวัดได้โดยใช้มิเตอร์หรือวงจรบริดจ์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นการวัดตัวแปรทางอ้อมด้วยวิธีทางไฟฟ้าโดยการเทียบหรือปรับแต่งปริมาณทางไฟฟ้านี้แทนค่าตัวแปรที่ทำการวัดอีกทอด เรียกว่าเป็นการวัดโดยวิธีอ้อมได้ กระบวนการนี้เรียกว่า การตรวจจับ (Sensing) กรณีนี้ทรานสดิวเซอร์จะถูกเรียกว่า เซนเซอร์

2.1.1 ชนิดของเซนเซอร์

การแบ่งชนิดของทรานสดิวเซอร์แบ่งโดยอาศัยหลักเกณฑ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้คือ

2.1.1.1 แบ่งตามความต้องการพลังงาน

- แบบแอคทีฟ (Active Sensors) เป็นทรานสดิวเซอร์ที่สามารถปล่อยพลังงานเองได้ เช่น เทอร์โมคัปเปิล เพียโซโซ เซลล์แสงอาทิตย์ ออปโตไดโอด เป็นต้น อุปกรณ์เหล่านี้ไม่ต้องมีแหล่งจ่ายกำลังจากภายนอกให้ก็สามารถให้สัญญาณแรงดันหรือกระแสที่แปรตามตัวแปรได้เอง

- แบบพาสซีฟ (Passive Sensors) แบบนี้จะต้องใช้แหล่งจ่ายจากภายนอกจึงทำการตรวจรู้ได้ เช่น เซนเซอร์ที่ใช้หลักการเปลี่ยนค่าความต้านทาน ค่าความจุ ค่าความเหนี่ยวนำ ฯลฯ

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

- แบบอะนาล็อก ให้สัญญาณเป็นแบบต่อเนื่อง
- แบบไบนารีให้สัญญาณแบบเปิด - ปิด (ON - OFF)
- ดิจิตอล ให้สัญญาณเป็นแบบดิจิตอล

2.1.1.5 แบ่งตามตำแหน่งที่ใช้ในระบบ

- ทรานสดิวเซอร์ด้านเข้า (Input Transducer) อยู่ทางด้านเข้าของระบบ
เครื่องมือ เช่น ไมโครโฟน

- ทรานสดิวเซอร์ด้านออก (Output Transducers) เช่น ลำโพงของระบบเครื่อง
ขยายเสียง

2.1.1.6 แบ่งตามข้อมูลหรือวัตถุประสงค์ในการวัด

ทรานสดิวเซอร์วัดการเคลื่อนที่วัดอุณหภูมิความดัน อัตราการไหล ตำแหน่ง

2.1.2 หลักการทำงานของทรานสดิวเซอร์ชนิดต่าง ๆ

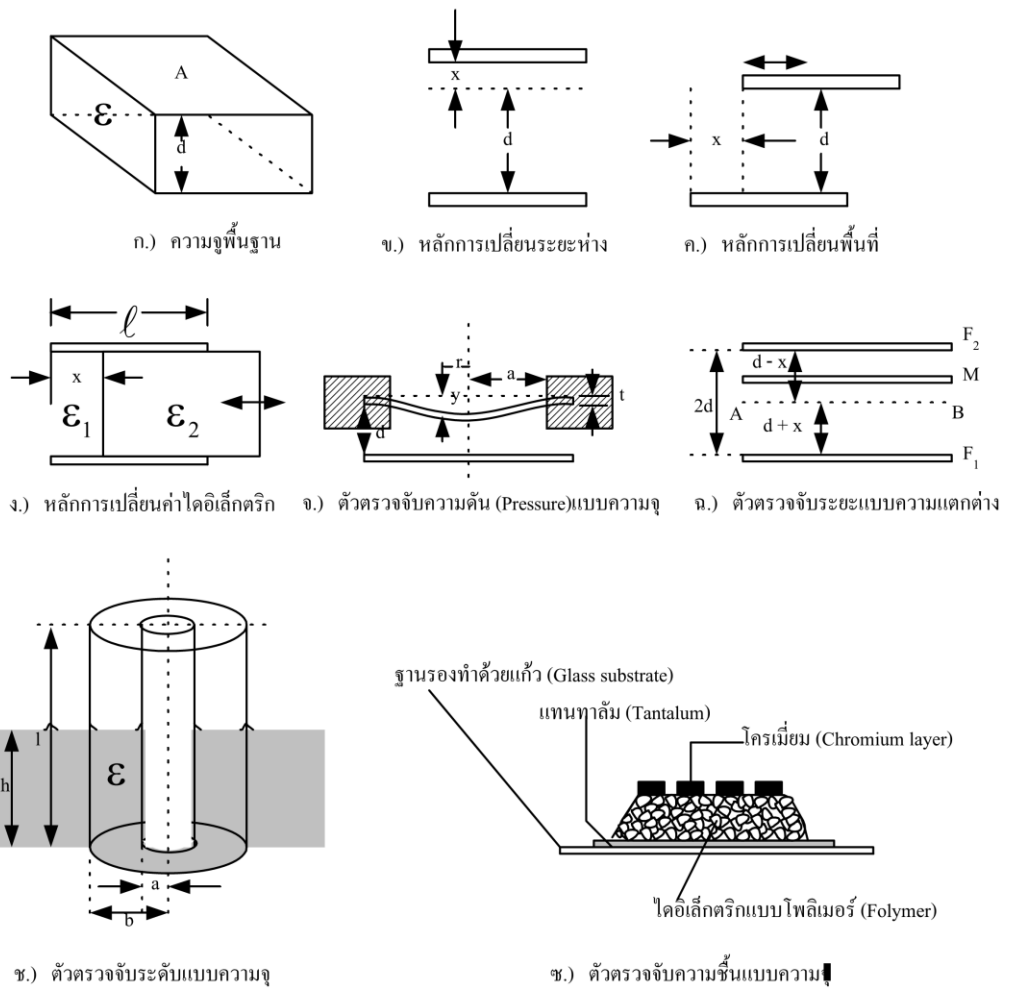
หลักการทำงานของทรานสดิวเซอร์ที่มีใช้ในระบบการวัดทำการเปลี่ยนพลังงานจากรูป
หนึ่งเป็นอีกรูปหนึ่ง โดยปกติจะนิยมเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ให้เป็นค่าแรงดันหรือกระแสไฟฟ้า และนำ
ค่าไปเทียบให้เป็นขนาด ของตัวแปรที่ต้องการวัดหลักการทำงานของทรานสดิวเซอร์เบื้องต้น
ดังต่อไปนี้

2.1.2.1 ตัวตรวจจับแบบความจุและความเหนี่ยวนำ (Capacitive and Inductive)

หลักการเปลี่ยนค่าการเก็บประจุและความเหนี่ยวนำ สามารถใช้วัดระยะทางหรือระยะ
การเคลื่อนที่ได้มีหลักการทำงานดังนี้

การเปลี่ยนค่าความจุ (Capacitive) ตัวเก็บประจุอย่างง่าย ภาพประกอบ 2
ประกอบด้วยแผ่นโลหะอย่างน้อยสองแผ่นมีฉนวนหรือไดอิเล็กตริกกั้นระหว่างแผ่นเพลตอธิบาย
หลักการทำงานโดยใช้สมการของตัวเก็บประจุบนแผ่นเพลตแบบขนานได้ดังนี้

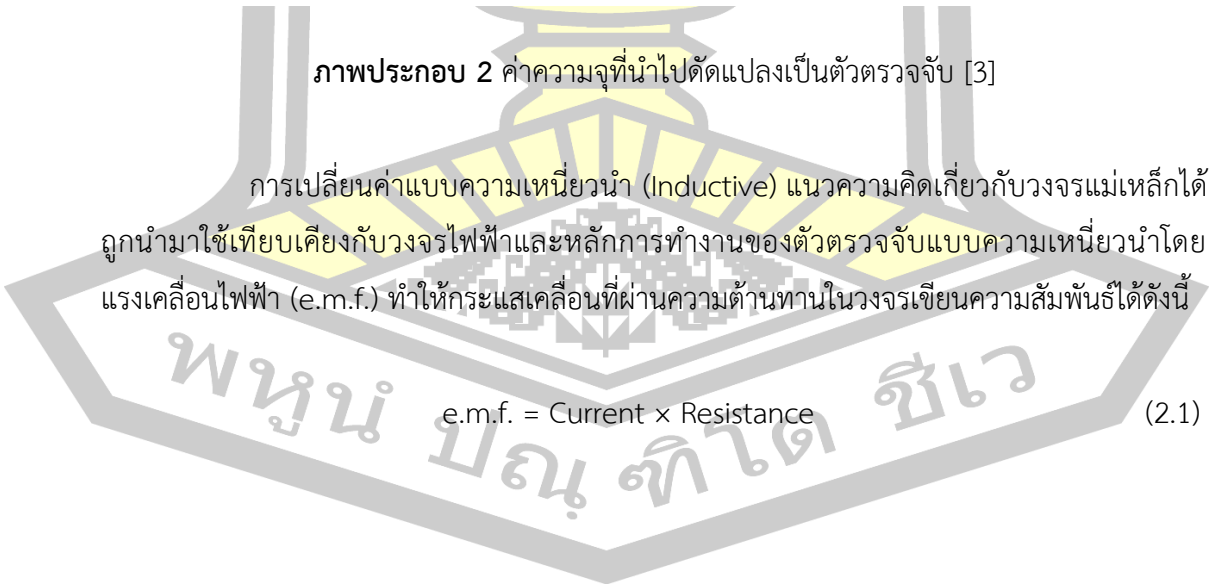
พหุ ประถมศึกษา

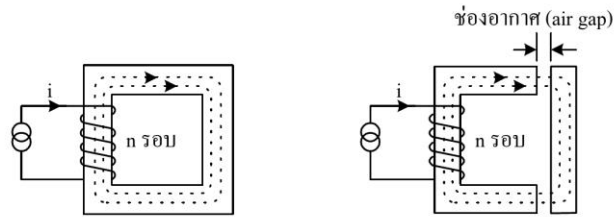


ภาพประกอบ 2 ค่าความจุที่นำไปตัดแปลงเป็นตัวตรวจจับ [3]

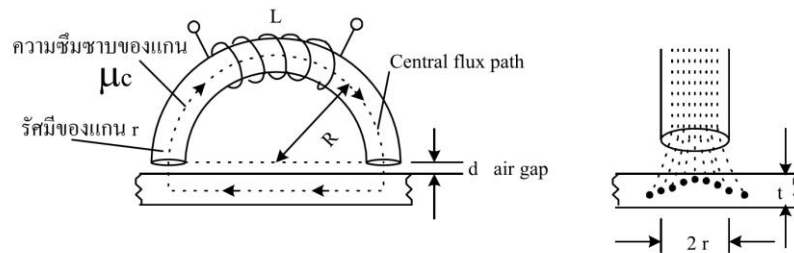
การเปลี่ยนค่าแบบความเหนี่ยวนำ (Inductive) แนวความคิดเกี่ยวกับวงจรแม่เหล็กได้ถูกนำมาใช้เทียบเคียงกับวงจรไฟฟ้าและหลักการทำงานของตัวตรวจจับแบบความเหนี่ยวนำโดยแรงเคลื่อนไฟฟ้า (e.m.f.) ทำให้กระแสเคลื่อนที่ผ่านความต้านทานในวงจรเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$e.m.f. = \text{Current} \times \text{Resistance} \quad (2.1)$$

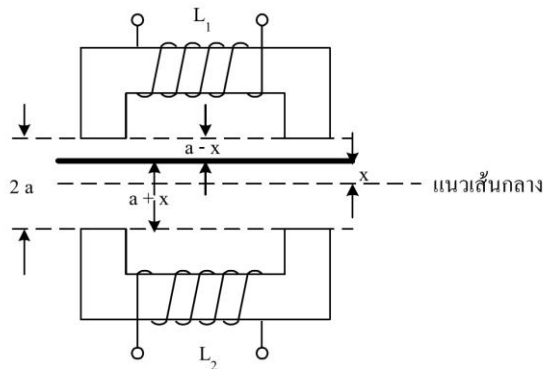




ก) หลักการพื้นฐานของตัวตรวจจับแบบความต้านทานแม่เหล็ก



ข) การคำนวณความต้านทานแม่เหล็กคั่นแบบ



ค) ตัวตรวจจับแบบผลต่างความต้านทานแม่เหล็กใช้วัฏจักรการเคลื่อนที่

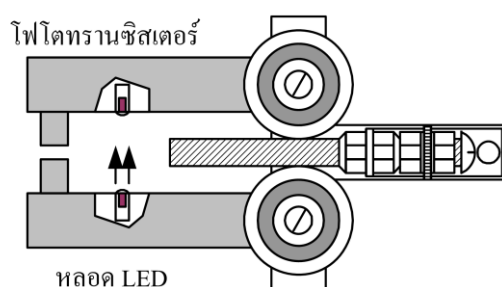
ภาพประกอบ 3 หลักการตรวจจับแบบความต้านทานแม่เหล็ก [3]

วงจรแม่เหล็กดังภาพประกอบ 3 (ก) เมื่อมีกระแส i ไหลผ่านขดลวด n รอบ พันบนแกนเหล็กที่ทำจากสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic Material) เราจะพิจารณาว่าขดลวดเป็นแหล่งกำเนิดเส้นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (m.m.f.) ภาพประกอบ 3 (ข) แสดงแกนถูกแยกออกเป็นสองส่วนด้วยช่องว่างอากาศ (Air Gap) ที่ปรับระยะได้ ความต้านทานแม่เหล็กทั้งหมดของวงจรได้จากทั้งแกนเหล็กและช่องว่างอากาศ โดยความซึมซาบของอากาศเป็น 1 และของแกนจะมีค่าตามวัสดุเป็นจำนวนพัน เมื่อมีช่องว่างอากาศเกิดขึ้นจะทำให้ความต้านทานแม่เหล็กจะมีค่าความต้านทานแม่เหล็กเพิ่มขึ้นมาก ผลทำให้เส้นแรงแม่เหล็กลดลงดังนั้นจะสามารถใช้หลักการดังกล่าวนี้สร้างเป็นตัวตรวจจับระยะการเคลื่อนที่ได้

ภาพประกอบ 3 (ค) เป็นต้นแบบของตัวตรวจจ็บบรรยากาศแบบอาศัยการเปลี่ยนค่าความต้านทานแม่เหล็ก(Variable Reluctance) ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ แกนเหล็กแบบเพอร์โรแมกเนติก รูปครึ่งวงกลม ช่องว่างอากาศและแผ่นเพอร์โรแมกเนติกหรือเรียกว่า อาร์เมเจอร์ (Armature) ความต้านทานแม่เหล็กรวมได้จากความต้านทานแม่เหล็กของแต่ละส่วน

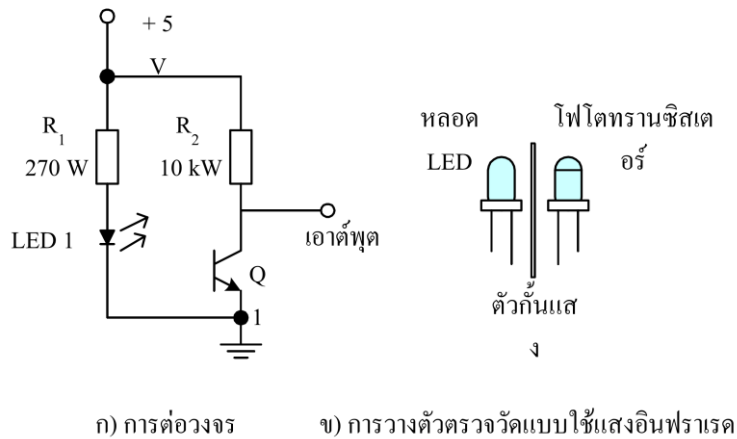
2.1.2.2 ตัวตรวจจ็บบนไฟแสง

ตัวตรวจจ็บบนไฟแสง จะใช้ลำแสงที่มีขนาดเล็กตรวจสอบว่าวัตถุอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการหรือไม่ เป็นวิธีที่ไม่ละเอียดและมีความถูกต้องน้อยที่สุด ไม่นิยมใช้กับแขนกลที่ต้องการความละเอียดสูงการติดตั้งตัวตรวจจ็บบนไฟแสงสามารถติดตั้งได้ง่ายโดยการติดตั้ง LED แบบอินฟราเรดที่ด้านหนึ่ง และติดตั้งตัวรับแสงอินฟราเรดที่อีกด้านหนึ่งโดยให้สิ่งที่ต้องการตรวจจ็บบนไฟอยู่ระหว่างกลาง เช่น ติดตั้งชุด อินฟราเรดที่ฝ่ามือของแขนกล ทำให้รู้ว่าวัตถุกำลังอยู่ในระยะที่สามารถจับได้ เป็นต้น



ภาพประกอบ 4 แสดงการใช้หลอด LED และโฟโตทรานซิสเตอร์เป็นตัวตรวจจ็บบนไฟเมื่อใดสมควรจับวัตถุได้ [3]

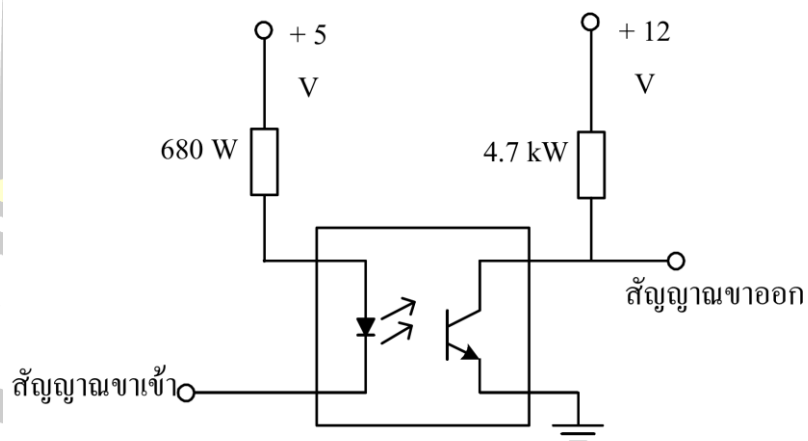
ตัวตรวจจ็บบนไฟแสงอินฟราเรดอย่างง่ายแสดงดังภาพประกอบ 5 ใช้ LED แบบอินฟราเรดและ โฟโตทรานซิสเตอร์แบบอินฟราเรด เอาต์พุตของทรานซิสเตอร์นำไปต่อเข้ากับวงจรควบคุมความต้านทาน R2 ใช้ปรับเพิ่มหรือลดความไวของวงจร การเพิ่มค่าความไวทำให้หุ่นยนต์สามารถ ตรวจจ็บบนไฟวัตถุได้ไกล ส่วนการลดความไวหุ่นยนต์จะสามารถเคลื่อนเข้าไปใกล้วัตถุได้มากขึ้นก่อนที่จะตรวจจ็บบนไฟได้ โฟโตทรานซิสเตอร์แบบใช้แสงอินฟราเรดจะต้องมีแผ่นกันแสง ทั้งที่กระจายอยู่ในห้องและแสงจากหลอด LED ตำแหน่งของหลอด LED และโฟโตทรานซิสเตอร์ต้องวางให้ถูกต้อง อาจสร้างเองหรือหาซื้อตัวตรวจจ็บบนไฟสำเร็จแล้ว เช่น ตัวตรวจจ็บบนไฟ TIL139 จากบริษัท Texas Instruments



ภาพประกอบ 5 วงจรตรวจจับที่ใช้แสงใช้ LED และไฟโตทรานซิสเตอร์ [3]

2.1.2.3 การใช้ออปโตไอโซเลเตอร์ (Opto - isolator)

ออปโตไอโซเลเตอร์เป็นอุปกรณ์ทำงานด้วยแสงใช้แยกวงจรระหว่างวงจรที่มีระดับแรงดันต่างกัน ประกอบด้วยส่วนกำเนิดแสง (LED) ควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟ และออปโตทรานซิสเตอร์จะตรวจจับแสงและทำหน้าที่ต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับสัญญาณด้านออกของทรานซิสเตอร์แสดงดังภาพประกอบ 6 โดยที่แต่ละด้านของออปโตไอโซเลเตอร์จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟแยกกัน จึงสามารถใช้งานเป็นตัวปรับระดับ แรงดันไฟฟ้าได้ เช่น เปลี่ยนจากสัญญาณไฟฟ้า 5 โวลต์เป็น 12 โวลต์ เป็นต้น



ภาพประกอบ 6 ออปโตไอโซเลเตอร์ [3]

2.1.3 ตัวตรวจจับแบบไม่สัมผัส

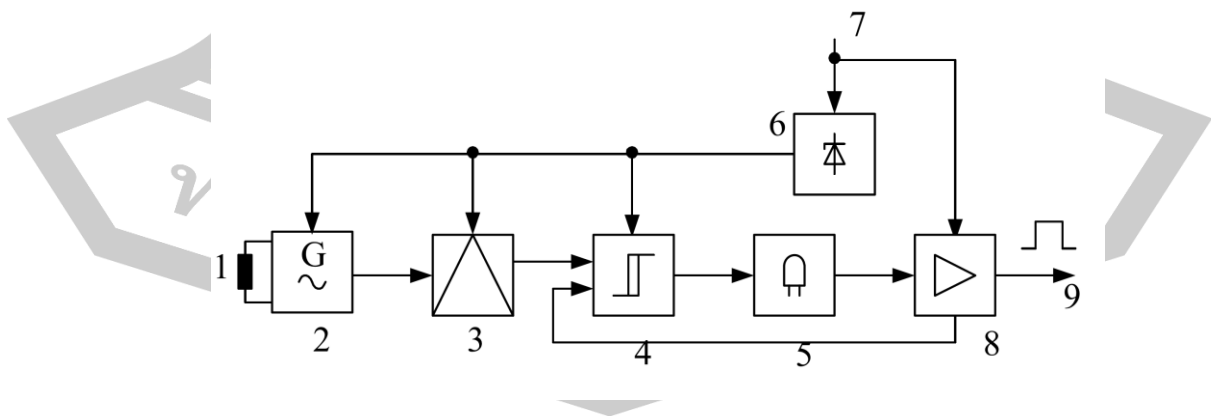
ตัวตรวจจับแบบไม่สัมผัส หรือที่เรียกว่า พร็อกซิมีตีเซนเซอร์ใช้หลักการทางไฟฟ้าดังนี้

2.1.3.1 ตัวตรวจจับแบบเหนี่ยวนำ (Inductive Sensors)

ตัวตรวจจับแบบเหนี่ยวนำเรียกตามศัพท์คือ อินดักทีฟเซนเซอร์ทำงานโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลง ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด วัตถุที่ตรวจจับได้จะเป็นโลหะเท่านั้น ลักษณะภายนอก ส่วนประกอบภายในประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 ตัวอย่างตัวตรวจจับแบบไม่สัมผัสใช้หลักการเหนี่ยวนำ
(www.balluff.com/solutions/inductive.htm)



ภาพประกอบ 8 แสดงส่วนประกอบของตัวตรวจจับแบบเหนี่ยวนำ [3]

ส่วนประกอบ

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

หลักการการทำงานของตัวตรวจจับแบบความเหนี่ยวนำพิจารณาการทำงาน ดังนี้คือ ส่วนที่ 1 สร้างสนามแม่เหล็กตามความถี่ของ ออสซิลเลเตอร์หมายเลข 2 เมื่อมีวัตถุหรือชิ้นงานที่เป็นโลหะเข้ามาในระยะที่สนามแม่เหล็กส่งไปถึงจะทำให้เกิด การเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ ทำให้การออสซิลเลตลดลง หรือหยุดการออสซิลเลต เมื่อนำโลหะออกห่าง จากบริเวณตรวจจับ วงจรกำเนิดความถี่จะเริ่มทำงานตามปกติจากทั้งสองสภาวะจะถูกเปรียบเทียบด้วยส่วน หมายเลข 3 และ 4 จากนั้นก็ผลไปส่วนที่ 5 และส่วนที่ 8 เป็นสภาวะ ON หรือ OFF

ระยะการตรวจรู้มาตรฐานแบบความเหนี่ยวนำหาได้โดยการใช้แผ่นเหล็กอ่อน (Mild Steel) เป็นวัตถุนำ ถ้าวัตถุที่ต้องการตรวจจับเป็นโลหะอื่น เช่น อลูมิเนียม ทองเหลือง ทองแดง ฯลฯ ระยะการตรวจจับจะลด น้อยลง ทั้งนี้เราสามารถหาค่าตัวประกอบ (Factor) คูณกับระยะตรวจจับมาตรฐาน เช่น เหล็กอ่อนมี ค่าตัวประกอบ = 1 ทองเหลือง = 0.35 และ ทองแดง = 0.25 ถ้าระยะตรวจจับมาตรฐานที่ได้จากเหล็กอ่อน เป็น 10 มิลลิเมตร เมื่อตรวจจับทองเหลืองจะมีระยะเป็น 3.5 และทองแดงจะมีระยะเป็น 2.5 มิลลิเมตร เป็นต้น

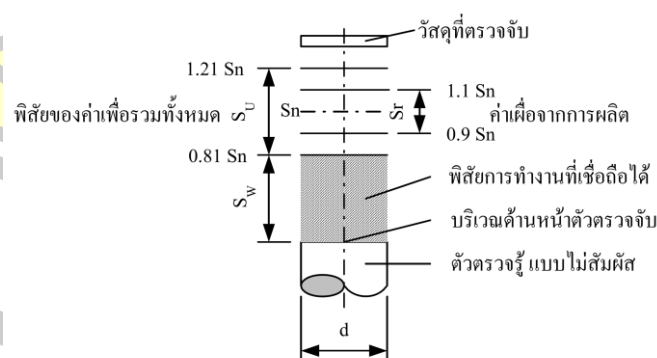
ลักษณะเฉพาะ (Specification)

เป็นรายละเอียดของข้อมูลด้านเทคนิคของตัวตรวจจับ อธิบายได้ดังภาพประกอบ 9 มีรายละเอียดที่ควรทราบเพื่อการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพดังต่อไปนี้คือ

- ระยะการตรวจจับ (Sensing Range) คือระยะที่แผ่นโลหะที่ถูกตรวจจับเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ด้านหน้า ของตัวตรวจจับ จะทำให้สัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น จากสภาวะต่อวงจร (ON) เป็นสภาวะเปิดวงจร (OFF) หรือ ตรงข้าม

- ระยะการตรวจจับทั่วไป (Nominal Sensing Range : Sn) คือระยะตามคุณลักษณะ โดยไม่คิดรวม ผลความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการผลิตแต่ละตัว หรือผลกระทบจากภายนอก เช่น อุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น

- ระยะเวลาตรวจจับสนิจจริง (Real Sensing Range; S_r) คือระยะเวลาตรวจจับสนิจค่าโดยการใช้อยู่ แหล่งจ่ายไฟ ตามค่าที่กำหนด อุณหภูมิที่กำหนด ระยะเวลาตรวจจับสนิจจริงมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 90 % ถึง 110 % ของระยะ การตรวจจับสนิจแบบทั่วไป (S_n)
- ระยะเวลาตรวจจับสนิจที่ใช้ประโยชน์ (Useful Sensing Range : S_u) คือระยะเวลา ตรวจจับสนิจที่วัดตาม มาตรฐาน EN 50010 โดยใช้แหล่งจ่าย และอุณหภูมิแวดล้อมในช่วงที่ยอมรับได้ ระยะเวลาตรวจจับสนิจนี้จะอยู่ในช่วง 81 % ถึง 121 % ของระยะเวลาตรวจจับสนิจแบบทั่วไป
- ระยะเวลาตรวจจับสนิจในการทำงาน (Working Sensing Range : S_w) คือระยะที่เซ็นเซอร์ สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง ที่อุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าตามกำหนด
- ค่าในการชดเชยระยะที่ถูกต้อง ระยะเวลาตรวจจับสนิจทั่วไป (S_n) ของตัวตรวจจับสนิจจะตรวจจับสนิจ วัตถุได้ตามที่ กำหนดไว้โดยใช้แผ่นเหล็กอ่อน (Mild Steel) เป็นวัตถุที่ถูกต้องตรวจจับสนิจ การใช้แผ่นโลหะที่มี ขนาดเล็กกว่าที่กำหนดไว้ทำให้ระยะเวลาตรวจจับสนิจสั้นลง เช่นเดียวกันถ้าแผ่นโลหะมีผิวโค้งก็จะมีผล ต่อการตรวจจับสนิจด้วย และ ระยะเวลาตรวจจับสนิจจะเปลี่ยนแปลงไปถ้าวัตถุที่ตรวจจับสนิจเป็นโลหะประเภทอื่น ระยะเวลาตรวจจับสนิจสำหรับโลหะประเภทนั้นเป็นเท่าไร โดยคูณระยะมาตรฐานด้วยค่าตัวประกอบ (Factor)
- ค่าความสามารถในการกระทำซ้ำ (Repeatability) สามารถหาได้โดยการวัดสองครั้ง ติดต่อกัน ภายใต้สภาวะที่กำหนดในมาตรฐานของ EURO-NORM ตัวตรวจจับสนิจที่ดีควรได้ระยะที่ เท่ากัน
- ค่าฮิสเตอร์รีซิสของการตัดต่อ (Switching Hysteresis) คือ ระยะความแตกต่าง ระหว่างตัวตรวจจับสนิจ ขณะทำงาน (ON) กับสภาวะหยุดทำงาน (OFF) เมื่อนำแผ่นโลหะที่ใช้ทดสอบ เลื่อนเข้ามาใกล้หรือห่างจากบริเวณ ด้านหน้าส่วนตรวจจับสนิจของตัวตรวจจับสนิจ ค่าฮิสเตอร์รีซิสจะมีค่าเป็น เปอร์เซ็นต์ของระยะเวลาตรวจจับสนิจจริง



ภาพประกอบ 9 ระยะเวลาของการตรวจจับสนิจของตัวตรวจจับสนิจแบบไม่สัมผัส [3]

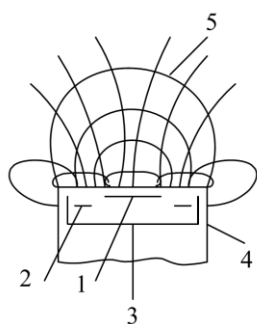
2.1.3.2 ตัวตรวจจับแบบความจุไฟฟ้า (Capacitive Sensor)

ตัวเหนี่ยวนำแบบนี้ใช้ตรวจจับวัตถุทั้งโลหะและไม่ใช้โลหะ ใช้หลักการตรวจจับค่าความจุที่เปลี่ยนแปลง เรียกทับศัพท์ด้านเทคนิคว่า คาปาซิตีฟเซนเซอร์ ส่วนประกอบโครงสร้างและส่วนประกอบจะคล้ายกับตัวตรวจจับแบบความเหนี่ยวนำ ต่างกันที่ส่วนตรวจจับจะใช้ หลักการของการเปลี่ยนค่าความจุแทน เมื่อวัตถุที่จะตรวจจับเคลื่อนที่เข้ามาที่ระยะสนามไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของตัวตรวจจับซึ่งเกิดจาก Active และ Earth Electrode และมีตัวนำชดเชยทำหน้าที่ป้องกันและชดเชยผล ของความชื้นที่ด้านหน้าของบริเวณตรวจจับ เมื่อมีวัตถุเคลื่อนที่เข้ามาในบริเวณตรวจจับค่าความจุของวงจรกำเนิดคลื่นความถี่จะเปลี่ยนแปลงไป

หลักการทำงานจากดัดภาพประกอบ 10 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของตัวตรวจจับแบบความจุเมื่อมีวัตถุใด ๆ เคลื่อนที่เข้ามาในบริเวณสนามไฟฟ้า ทำให้ค่าความจุของวงจรกำเนิดความถี่มีการเปลี่ยนแปลง ขึ้นกับค่า ระยะห่างระหว่างตัวกลางหรือวัตถุกับด้านหน้าของส่วนตรวจจับ ค่าคงที่ทางไฟฟ้าของตัวกลาง (Dielectric Constant) (ถ้ามีค่าคงที่มากระยะการตรวจจับก็จะมีระยะไกลขึ้น) รวมทั้งขนาดและรูปร่างของตัวกลางตัวตรวจจับแบบความจุสามารถตรวจจับวัตถุตัวกลางได้ทั้งที่เป็นโลหะและไม่เป็นโลหะ การทำงาน (ON) และ ไม่ทำงาน (OFF) นั้นได้จากสถานะของวงจรกำเนิดความถี่ว่ามีการออสซิลเลตหรือไม่โดยใช้หลักการ เช่นเดียวกันกับตัวตรวจจับแบบเหนี่ยวนำ ระยะการตรวจจับมาตรฐานได้จากการใช้แผ่นโลหะเป็นวัตถุตัวกลาง เมื่อเปลี่ยนวัตถุตัวกลางเป็นวัสดุอื่นระยะทางก็จะต่างกันไป โดยที่คุณค่าตัวประกอบ กับระยะมาตรฐานได้ระยะตรวจจับ ตารางที่ 1 เป็นตัวอย่างตัวประกอบของวัตถุตัวกลางชนิดต่าง ๆ



ภาพประกอบ 10 ตัวอย่างตัวตรวจจับแบบความจุแบบต่าง ๆ
(www.balluff.com/solutions/inductive.htm)



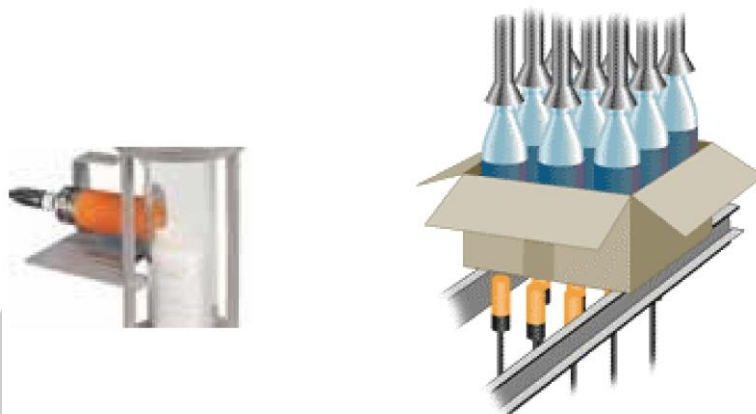
1. Active Electrode
2. อิเล็กโทรดคชชย
3. Earth Electrode
4. โครงของตัวตรวจจับ
5. สนามไฟฟ้า

ภาพประกอบ 11 ภาพตัดขวางด้านข้างส่วนตรวจจับของตัวตรวจจับแบบไม่อิ่มตัสด
แบบความจุไฟฟ้า [3]

ตารางที่ 1 ตัวอย่างตัวประกอบของวัสดุตัวกลางชนิดต่าง ๆ

ชนิดของวัสดุ	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

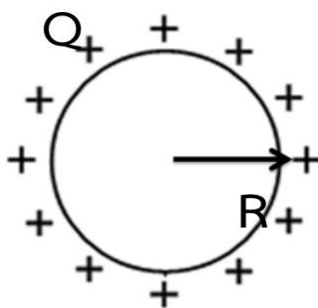
การปรับตัวตรวจจับแบบความจุตัวตรวจจับแบบใช้หลักการความจุจะมีโพเทนซีโอมิเตอร์ (Potentiometer) สำหรับปรับความไวของ ระยะเวลาตรวจจับอยู่ด้านท้ายตรงข้ามกับด้านส่วนตรวจจับ ทำให้สามารถปรับเลือกให้ไม่ตรวจจับวัสดุที่ ขวางกั้นอยู่ก่อนวัสดุที่ต้องการตรวจจับ ตัวอย่าง เช่น การตรวจจับน้ำที่อยู่ในภาชนะบรรจุตรวจจับขวดในกล่อง กระดาษ เป็นต้น ตัวตรวจจับสามารถปรับไม่ให้ตรวจจับภาชนะบรรจุหรือกล่องกระดาษได้ง่ายมากการประยุกต์ใช้งานตัวตรวจจับแบบความจุมีหลากหลาย เช่น การตรวจจับระดับของของเหลวใน ภาชนะบรรจุและการตรวจจับจำนวนขวดในกล่องกระดาษดังภาพประกอบ 12 เป็นต้น



ภาพประกอบ 12 ตัวอย่างการใช้ตัวตรวจจับแบบความจุกับงาน
(www.ifmefector.com/ifmus/web/capacitive.htm)

2.2 คุณสมบัติของค่าการเก็บประจุทางไฟฟ้า

ความจุไฟฟ้า (Capacitance) เมื่อนำประจุไฟฟ้าใส่บนตัวนำที่วางอยู่โดดเดี่ยว ประจุจะกระจายอยู่ที่ผิวของตัวนำ สนามไฟฟ้าภายในตัวนำมีค่าเป็นศูนย์ ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวจะมีค่าเท่ากัน ถ้าใส่ประจุบนตัวนำเพิ่มขึ้นขนาดของศักย์ไฟฟ้าก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย แต่จะมีค่ามากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับขนาดของประจุที่ใส่เข้าไป ทุกจุดบนผิวตัวนำจะมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันเสมอ ดังภาพประกอบ 12 (สมพงษ์ ใจดี, 2541)



ภาพประกอบ 13 แสดงการกระจายตัวของประจุที่ผิวรอบตัวนำ

จากภาพประกอบ 13 เมื่อขนาดของประจุไฟฟ้าบนแผ่นประจุไฟฟ้าแต่ละแผ่น (Coulombs, q) แปรผันตรงกับ ขนาดของความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง (Volts, V) ดังนั้น ความจุทางไฟฟ้า C มีค่าเท่ากับ

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

เมื่อ Q คือ ขนาดของประจุไฟฟ้าบนแผ่นประจุไฟฟ้าแต่ละแผ่น (Coulombs, q)

V คือ ขนาดของความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง (Volts, V)

ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์สองขั้วซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเป็นดังนี้

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

โดยที่ i คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

V คือ แรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุ

C คือค่าความเก็บประจุ (capacitance) มีหน่วยเป็น ฟารัด (farad, F)

ความจุไฟฟ้า (capacitance; C) เป็นค่าที่บอกความสามารถในการเก็บประจุของตัวเก็บประจุ ปริมาณของประจุแปรผันตามแรงดันไฟฟ้า (V) และแปรผันตามพื้นที่ของแผ่นโลหะตัวนำที่ขนานกัน (A) โดยแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำที่ขนานกัน (d) ในกรณีที่เป็นช่องว่างอากาศ (ϵ_0) มีค่าเท่ากับ 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 คือ เป็นสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัสดุ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความมีขั้ว (polarity) ของวัสดุที่อุณหภูมิต่าง ๆ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอาหาร มีความสำคัญกับการออกแบบเครื่องจักรอุปกรณ์แปรรูปอาหาร กระบวนการแปรรูปอาหาร เช่น การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

วัสดุไดอิเล็กทริก คือ วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง จัดเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) มีความเป็นขั้ว (polar) สูง สามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้ จึงเป็นตัวนำไฟฟ้าไม่ดี หรือ เป็นฉนวนไฟฟ้า

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำ คือ น้ำในสถานะของเหลว โมเลกุลของน้ำ เป็นโมเลกุลที่มีขั้ว โดยอะตอมของออกซิเจนมีขั้วเป็นลบเล็กน้อย และอะตอมของไฮโดรเจนมีขั้วเป็นบวกเล็กน้อย ทำให้

น้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง จัดเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 78.5 และน้ำในสถานะของแข็ง เมื่อน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง เนื่องจากโมเลกุลยึดจับกับน้ำที่อยู่รอบด้วยพันธะไฮโดรเจน ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำแข็งมีค่าเท่ากับ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า dielectric constant ของตัวทำละลายดังตารางที่ 2 [13]

ตารางที่ 2 ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (K) ของวัสดุ [13]

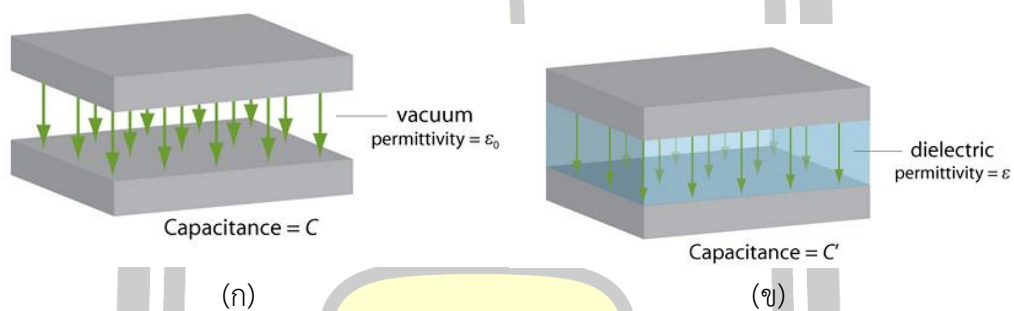
Material	Dielectric Constant	Dielectric Constant , $K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$
Vacuum		1
Air (1 atm)		1.00054
Air (100 atm)		1.0548
Glycerol		42.5
Methanol		32.6
1% Milk**		70.56
3.25% Milk**		67.98
Bakelite (Typical)		4.9
Mylar (Typical)		3.5
Ethanol		24.3
Acetone		20.7
Paper (Typical)		3.5
Porcelain (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 **ที่มาจาก T.Kudra และคณะ 1992 International Microwave Power Institute

สารที่ไม่นำไฟฟ้าตามปกติระหว่างแผ่นทั้งสองของตัวเก็บประจุ อาจเป็นอากาศหรือที่ว่างมีค่าสภาวะยอมเป็น ϵ_0 ถ้าสารไดอิเล็กทริกชนิดหนึ่งแทนที่ว่างดังกล่าวตัวเก็บประจุนั้นมีค่าความจุเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของค่าความจุใหม่ (ϵ) เทียบกับค่าความจุเดิม (ϵ_0) เรียกว่า ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (dielectric constant “K”) แสดงดังสมการ

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

การทดสอบค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุใด ทำโดยนำวัสดุนั้นไปวางไว้ในสนามไฟฟ้า กระแสสลับวัสดุใดมีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสูงจะกักเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มาก ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ของวัสดุต่อค่าความจุไฟฟ้าของสุญญากาศ (ไม่มีหน่วย) การทดสอบค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุแสดงในภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 (ก) ไดอิเล็กทริกแบบอากาศว่าง (ข) ไดอิเล็กทริกแบบไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลาง
ที่มา http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dielectrics/dielectric_constant.php

พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุคือพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุจะเก็บอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้า โดยมีสมการดังนี้

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

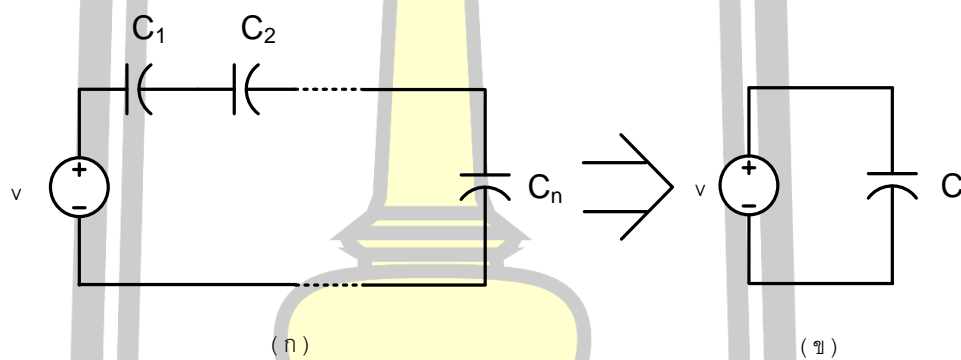
ตัวเก็บประจุในอุดมคติจะดูดกลืนหรือใช้พลังงานไม่ได้ ซึ่งต่างกับตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุได้แต่เก็บพลังงานไว้และสามารถจ่ายพลังงานนั้นออกมาได้ภายหลัง ตัวอย่างเช่น ตัวเก็บประจุ 1 F มีแรงดันคร่อมอยู่ 10 V ดังนั้นพลังงานสะสมจะเป็น

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

ถ้าตัวเก็บประจุที่มีพลังงานสะสมอยู่แล้ว ไม่ได้ต่อกับวงจรหรืออุปกรณ์อื่นๆ เลย กระแสจะไหลไม่ได้ ทำให้ ประจุ แรงดัน และพลังงาน ยังคงค้างอยู่ในตัวเก็บประจุเท่าเดิม ถ้าเรานำตัวเก็บประจุนี้นำมาต่อเข้ากับตัวต้านทานเป็นวงจร กระแสก็สามารถไหลได้ จนกระทั่งพลังงานสะสมถูกดูดกลืนกลายเป็นความร้อนที่ตัวต้านทานจนหมดและแรงดันที่คร่อมอุปกรณ์ทั้งสองก็จะกลายเป็นศูนย์

ตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมหรือขนานกันนั้นสามารถถูกแทนได้ด้วยตัวเก็บประจุสมมูลตัวหนึ่งโดยค่าความเก็บประจุของมันสามารถหาได้ดังนี้ กรณีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกันดังภาพประกอบ 15 (ก) เราสามารถเขียนแทนได้ด้วยตัวเก็บประจุสมมูลดังภาพประกอบ 15(ข) โดยที่หาค่าความเก็บสมมูลได้จากสมการ

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



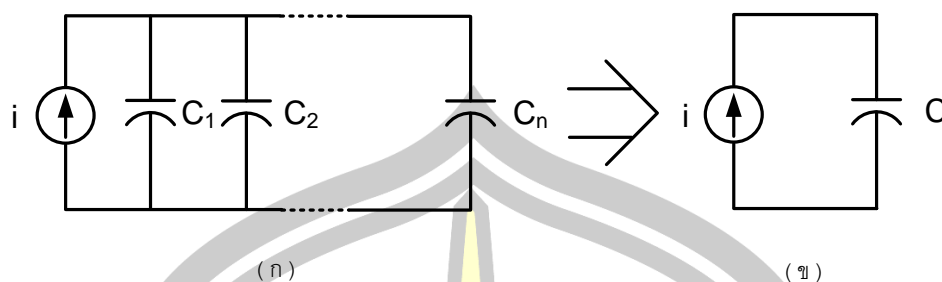
ภาพประกอบ 15 (ก) ตัวเก็บประจุต่ออนุกรม (ข) ตัวเก็บประจุสมมูล

จะเห็นว่าการรวมค่าความจุที่ต่ออนุกรมกันจะเหมือนกับการรวมค่าความต้านทานที่ต่อขนานกัน ดังนั้นในกรณีรวมค่าความเก็บประจุสองตัวจะเป็น

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

สำหรับการรวมค่าความจุที่ต่อขนานกันดังภาพประกอบ 16 (ก) เพื่อจะได้ความเก็บประจุสมมูลในภาพประกอบ 2.16 (ข)

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



ภาพประกอบ 16 (ก) ตัวเก็บประจุต่อขนาน (ข) ตัวเก็บประจุสมมูล

2.3 แผ่นวงจรพิมพ์และวัสดุฐานรอง

แผ่นวงจรพิมพ์ (printed circuit board: PCB) เป็นแผ่นที่มีลายทองแดงนำไฟฟ้าอยู่ หรือแผ่นฉนวนที่มีเส้นลายทองแดงฉาบ โดยมีวัสดุฐานรองกันระหว่างทองแดง แผ่นวงจรพิมพ์ใช้สำหรับให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยึดเกาะและเชื่อมโยงถึงกันและบัดกรีขาของอุปกรณ์กับลายทองแดง เพื่อประกอบเป็นวงจรแทนการต่อวงจรด้วยสายไฟซึ่งมีความซับซ้อนและยุ่งยาก โดยแผ่นวงจรพิมพ์ อาจมีด้านเดียว (single-sided) หรือสองหน้า (double-sided) มีทองแดงเคลือบอยู่ทั้ง 2 ด้านแต่จุดบัดกรีไม่ต่อถึงกันในแต่ละด้าน เหมาะสำหรับวงจรที่มีความยุ่งยากซับซ้อน ส่วนแบบ 2 หน้าเพลตทรูโฮลด์ (double side plate-through-hole: PTH) มีทองแดงอยู่ทั้ง 2 ด้านและจุดบัดกรี จะต่อถึงกันทั้ง 2 ด้าน วงจรมีความหนาสูงมีความซับซ้อนมาก ๆ ต้องทำเป็นหลาย ๆ ชั้น (multi-layer) มีเส้นลายวงจร เพื่อเชื่อมสัญญาณทางไฟฟ้าระหว่างชั้นใน (inner Layer) และชั้นนอก (outer layer) และภายในจะชุบด้วยทองแดงแผ่นวงจรพิมพ์มัลติเลเยอร์ทำขึ้นจากแผ่นวงจรพิมพ์ประเภทอีพอกซีไยแก้วใช้กับวงจรที่มีความซับซ้อน

แผ่นวงจรพิมพ์ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นส่วนนำไฟฟ้า (copper sheet laminated) เช่น ทองแดง เป็นต้น นิยมใช้หน่วยวัดน้ำหนัก "ออนซ์" เพื่อบ่งบอกถึงความหนา กับส่วนฉนวน (Nonconductive substrate) ส่วนวัสดุฐานรอง (substrates) นิยมใช้หน่วยวัดความหนาเป็น มิลลิเมตร วัสดุฐานรองทำมาจากวัสดุเป็นฉนวน น้ำหนักเบาและแข็งแรงที่นิยมใช้มี 3 ชนิด คือ ฟีนอลิก (phenolic) กลาสอีพอกซี (glass epoxy) และสารประกอบอีพอกซี (composite epoxy) แผ่นฉนวนทำหน้าที่เป็นช่องว่างและยึดติดตัวอุปกรณ์ มีตัวนำไฟฟ้าเป็นตัวเชื่อมวงจรให้อุปกรณ์ไปด้วยการแบ่งเกรดของแผ่นวงจรพิมพ์สมาคมผู้ผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อเมริกา (NEVA-National Electrical Manufacturers Association) แบ่งออกถึง 30 ชนิด โดยทั่วไปจะพบประมาณ 10 ชนิด ดังนี้

2.3.1 เกรด XXX PC

แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ ทำขึ้นจากกระดาษยัดรวมตัวกันด้วยฟีนอลิกเรซิน (phenolic resin) เป็นชนิดที่ใช้งานทั่วไป ทนความชื้นได้ไม่สูงนักมี ความต้านทานต่ำเมื่อเทียบกับแผ่นวงจรพิมพ์ที่ทำจากสารชนิดอื่น สามารถใช้กับงานความถี่สูงได้ถึงย่านความถี่วิทยุ ออกแบบมาเพื่อให้ตัดเจาะได้ที่อุณหภูมิต่ำ

2.3.2 เกรด FR-2 (Phenolic Cotton paper)

ทำจากฟีนอลิก (phenolic) ลักษณะโดยทั่วไปคล้ายกับเกรด XXX PC แต่ออกแบบมาให้ติดไฟได้ยากกว่า ใช้กับงานอุณหภูมิสูงกว่าได้

2.3.3 เกรด FR-3 (cotton paper and epoxy)

แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ทำจากกระดาษบาง ๆ ยึดติดกันด้วยอีพอกซีเรซิน (epoxy resin) แข็งแรง สามารถใช้งานที่แรงดันสูงและความชื้นสูงได้ดีกว่า เกรด XXX PC และยังออกแบบมาให้ตัดเจาะได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ

2.3.4 เกรด FR-4 (woven glass and epoxy)

พัฒนาขึ้นมาจากเกรด FR-3 ทำจากใยแก้วยึดด้วยอีพอกซีเรซิน ใช้ได้กับงานหลายประเภท ทนต่อความชื้นและอุณหภูมิสูง และใช้งานกับแรงดันสูงได้ดีกว่า เกรด XXX PC, FR-2 และ FR-3

2.3.5 เกรด FR-5 (woven glass and epoxy)

พัฒนาขึ้นจากเกรด FR-4 โดยยังคงใช้เส้นใยแก้วยึดด้วยอีพอกซีเรซิน แต่มีความแข็งแรงสูงกว่าทั้งทางกลและทางไฟฟ้า ติดไฟยาก

2.3.6 เกรด FR-6 (matte glass and polyester)

ทำจากแผ่นใยแก้วบาง ๆ ยึดรวมกันด้วยเทอร์โมเซตติงโพลีเอสเตอร์ (thermo settings polyester) มีค่าคงที่ทางไดอิเล็กทริกต่ำ แข็งแรงต่ำแต่ได้ปรับปรุงคุณสมบัติในด้านการทนต่อความชื้น ใช้กับงานที่ความชื้นสูงได้

2.3.7 เกรด CEM1 (cotton paper nad epoxy)

แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ใช้เซลลูโลส (cellulose) เป็นแกนกลางมีใยแก้วทอเป็นผิวสองด้าน ยึดติดกันด้วยอีพอกซีเรซินเช่นเดิม ทำให้ตัดเจาะได้ง่าย แต่ทนความชื้นได้ต่ำกว่าเกรด FR-4, FR-5 และ FR-6

2.3.8 เกรด G-10 (woven glass and epoxy)

เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดอีพอกซีไฟเบอร์กลาส (epoxy resin Fiberglass) มีความแข็งแรงทางกลสูง คุณสมบัติทางไฟฟ้าดีเยี่ยมลักษณะทั่วไปคล้ายกับเกรด FR-4 แต่ติดไฟยากกว่า

แผ่นวงจรทั้งหมด ใช้วัสดุแบบเดิม ทำเป็นแผ่นฐาน ยังมีแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้สารที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ เป็นแผ่นฐาน ได้แก่ เกรด G-30 และเกรด G-60

2.3.9 เกรด G-30

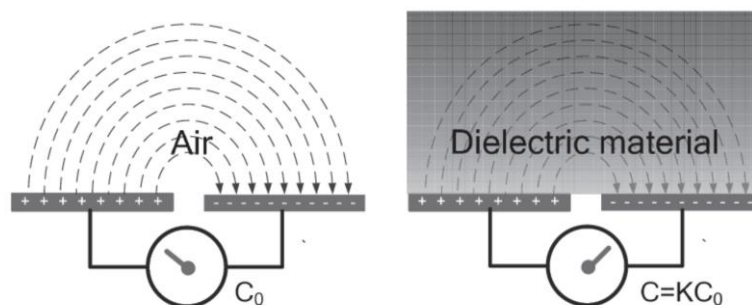
ใช้ใยแก้วทอยึดตัวด้วยโพลีอะไมด์เรซิน (polyamide resin) มีความคงตัว สามารถต้านทานต่อความชื้นสูง คุณสมบัติทางไฟฟ้าดีเยี่ยม เหมาะสำหรับการนำมาทำแผ่นวงจรพิมพ์ ชนิดมัลติเลเยอร์ (multi-layer)

2.3.10 เกรด G-60

เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดพิเศษที่ใช้สารโพลีซัลโฟเนเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic polyesters) ทำเป็นแผ่นฐานเนื่องจากมีค่าความสูญเสียในไดอิเล็กทริกต่ำ สามารถควบคุมคุณสมบัติของไดอิเล็กทริก (dielectric) ได้ง่าย นิยมใช้ในย่านความถี่สูงเป็นกิกะเฮิรตซ์ (GHz.) สำหรับไมโครชิป เป็นต้น คุณสมบัติทางไดอิเล็กทริกและความสูญเสียในไดอิเล็กทริกของสารโพลีซัลไฟด์ (polysulfide) ที่ใช้กับย่านความถี่ไมโครเวฟ

2.4 ตัวรับร้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล

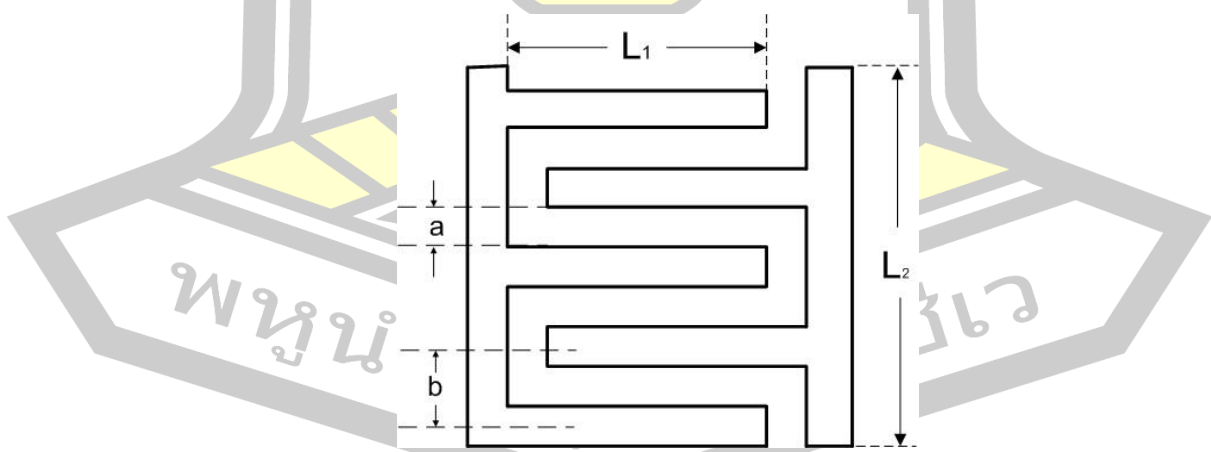
จิตินันท์ ตะghan้อย [26-27] กล่าวว่าตัวรับร้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล (Interdigital Electrode Capacitor) เป็นตัวรับร้ค่าคาปาซิแตนซ์ อีกรูปแบบหนึ่ง ที่ใช้การวางแผ่นตัวนำในแนวระนาบแทนการวางแบบขนาน โดยวางสลับกันระหว่าง ซึ่งที่เป็นขั้วบวกกับซึ่งที่เป็นขั้วลบ คล้ายกับการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกัน ทำให้มีค่าคาปาซิแตนซ์มากสามารถต่อการวัดค่าคาปาซิแตนซ์และด้วยโครงสร้างเป็นชั้นเดียว จึงสามารถผลิตโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีอยู่ทั่วไปได้ เมื่อนำวัสดุไดอิเล็กทริกไปวางไว้ในสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแผ่นตัวนำ มีประจุไฟฟ้าต่างกัันดังภาพประกอบ 17 ผลที่เกิดขึ้นคือค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างแผ่นตัวนำจะเพิ่มขึ้นตามคุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กทริกที่นำไปวางวัสดุที่ต่างกััน จะมีค่าไดอิเล็กทริกต่างกัันด้วย เราจึงนำหลักการนี้ ไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือวัดที่เกี่ยวข้องกับการวัดคุณสมบัติของวัสดุ เช่น การวัดสารพิษในอาหารทะเลการวัดปริมาณไขมันในเนื้อสัตว์ การวัดความชื้นในคอนกรีตหรือการวัดเพื่อจำแนกชนิด ของวัสดุ เป็นต้น



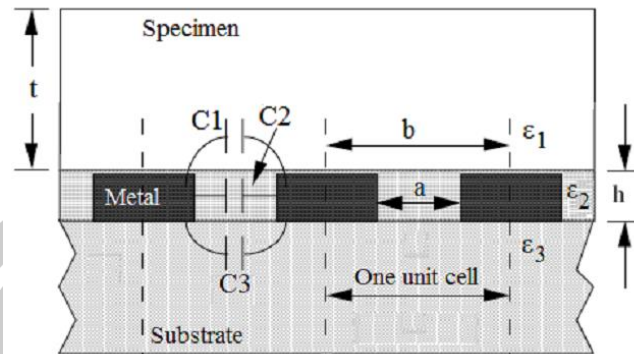
ภาพประกอบ 17 ค่าคาปาซิแตนซ์เพิ่มขึ้นเมื่อมีวัสดุไดอิเล็กทริกวางในสนามไฟฟ้า [26-27]

อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ที่เป็นหลายซี่ ดังภาพประกอบ 18 โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างซี่ เมื่อระดับไดโอดีเล็กทริกที่เกาะบนไดโอดีเล็กทริกเปลี่ยนไป ไดโอดีเล็กทริกก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตอลมีโครงสร้างแบบหลายนิ้วที่มีระยะห่างตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตอลมีค่าคาปาซิแตนซ์เกิดขึ้นที่ช่องว่างขนาดเล็ก ระหว่างตัวนำแบบฟิล์มบาง ค่าดังกล่าวนี้สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยเพิ่มจำนวนของนิ้วหรือใช้วัสดุที่มีชั้นบาง ๆ ที่มีค่าไดโอดีเล็กทริกสูง ๆ เช่น ferroelectric ระหว่างตัวนำและซับสเตรท ที่ใช้การวางแผ่นตัวนำในแนวระนาบแทนการวางแบบขนาน โดยวางสลับกันระหว่างซี่ที่เป็นขั้วบวกกับซี่ที่เป็นขั้วลบคล้ายกับการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกัน ทำให้มีค่าคาปาซิแตนซ์มาง่ายต่อการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ และด้วยโครงสร้างเป็นชั้นเดียวจึงสามารถผลิตโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีอยู่ทั่วไป

Niwat Angkawisitpan และคณะ [22] กล่าวถึงเรื่องสมการการออกแบบ ดังโครงสร้างในภาพประกอบ 3.2-3.3 เริ่มต้นจากหาค่า C_{UC} ในสมการที่ 2 ที่สัมพันธ์กับสมการที่ 3 และ 4 โดยมีองค์ประกอบ ϵ_0 คือค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในอากาศว่าง (permittivity of free space) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m , ϵ_1 คือค่าความนำไฟฟ้าสัมพันธ์ (the relative permittivity) ของวัสดุที่ใช้นำมาทดสอบเช่น อากาศ น้ำ น้ำมัน , ϵ_2 คือค่าความนำไฟฟ้าสัมพันธ์ของวัสดุระหว่างทองแดงอีเล็กโทรด และ ϵ_3 คือค่าความนำไฟฟ้าสัมพันธ์ของวัสดุฐานรอง K คือ ฟังก์ชันของปริพันธ์เชิงวงรีของมอดูลัส (elliptic integrals of modulus) โดยมี a เป็นระยะห่างของซี่ b เป็นระยะความกว้างของอีเล็กโทรด ต่อมาเป็นการหาค่าการเก็บประจุทั้งหมดของตัวรับรู้อัตโนมัติของเหลวค่าการเก็บประจุนิเตอร์ดิจิตอล ในสมการที่ 1 ประกอบด้วย L_1 คือความยาวของซี่ และ N คือจำนวนของซี่



ภาพประกอบ 18 รูปแบบของตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตอล



ภาพประกอบ 19 แนวตัดโครงสร้างของตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิทัล [9]

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

$$C_{UC} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (2.12)$$

$$C_{uc} = \epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2} \right) \frac{K \left(\sqrt{1 - \left(\frac{a}{b} \right)^2} \right)}{K \left(\frac{a}{b} \right)} + \epsilon_0 \epsilon_2 \frac{h}{a} \quad (2.13)$$

โดยที่ C = ค่าการเก็บประจุทั้งหมดของอิเล็กโทรด

C_{UC} = ค่าการเก็บประจุของอิเล็กโทรด 1 คู่

N = จำนวนซี่ทั้งหมดของอิเล็กโทรด

L_1 = ความยาวของซี่อิเล็กโทรดแต่ละอัน

a = ระยะห่างระหว่างซี่

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

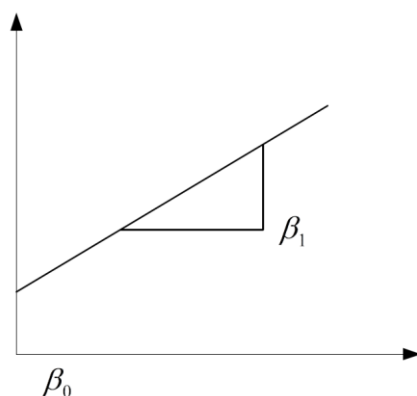
2.5 การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) และการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) [10] เป็นการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของตัวแปร หลักของการวิเคราะห์การถดถอยคือ ต้องการประมาณค่าของตัวแปรตัวหนึ่ง เรียกว่า ตัวแปรตาม (Dependent Variable) นิยมเขียนแทนด้วย Y โดยอาศัยจากตัวแปรอื่น เรียกว่า ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) นิยมเขียนแทนด้วย X หรืออีกอย่างหนึ่ง เราใช้ความรู้ หรือสารสนเทศจาก X เป็นเกณฑ์ในการประมาณ Y ใช้ตัวแปร X เพียงตัวแปรเดียวในการประมาณ Y และความสัมพันธ์ของ Y และ X เป็นเชิงเส้นตรง เราเรียกว่า การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression)

2.5.1 ตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Model)

เราจะสมมติว่า Y และ X มีความสัมพันธ์กันในรูป

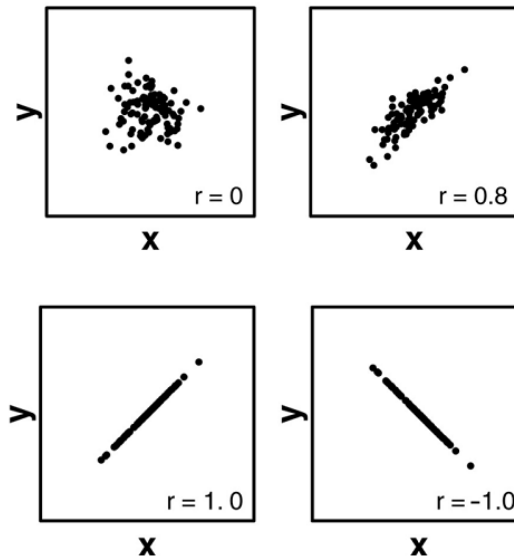
$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (2.15)$$



ภาพประกอบ 20 สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

โดยที่ β_0 และ β_1 เรียกว่า สัมประสิทธิ์การถดถอยของประชากร (Population Regression Coefficient) จะถือว่าเป็นค่าคงที่และไม่ทราบค่า นั่นคือ β_0 และ β_1 เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าเราเรียกสมการที่ 1 ว่า ตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

การตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ X ว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงหรือไม่โดยการนำค่าของ Y กับ X พล็อตเป็นจุด แผนภาพที่ได้เราเรียกว่า แผนภาพการกระจาย (Scatter Diagram) ดังแสดงภาพประกอบ 2.21



ภาพประกอบ 21 แผนภาพการกระจาย (Scatter Diagram)

เมื่อ Y กับ X ว่าจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ประมาณตัวแบบในสมการ 2.16 ด้วยสมการถดถอย (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

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

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

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

และ

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

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

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

2.5.2 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

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

2.5.3 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์

เราทราบความหมายของการวิเคราะห์สหสัมพันธ์สูตรสำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์

สหสัมพันธ์ r คือ

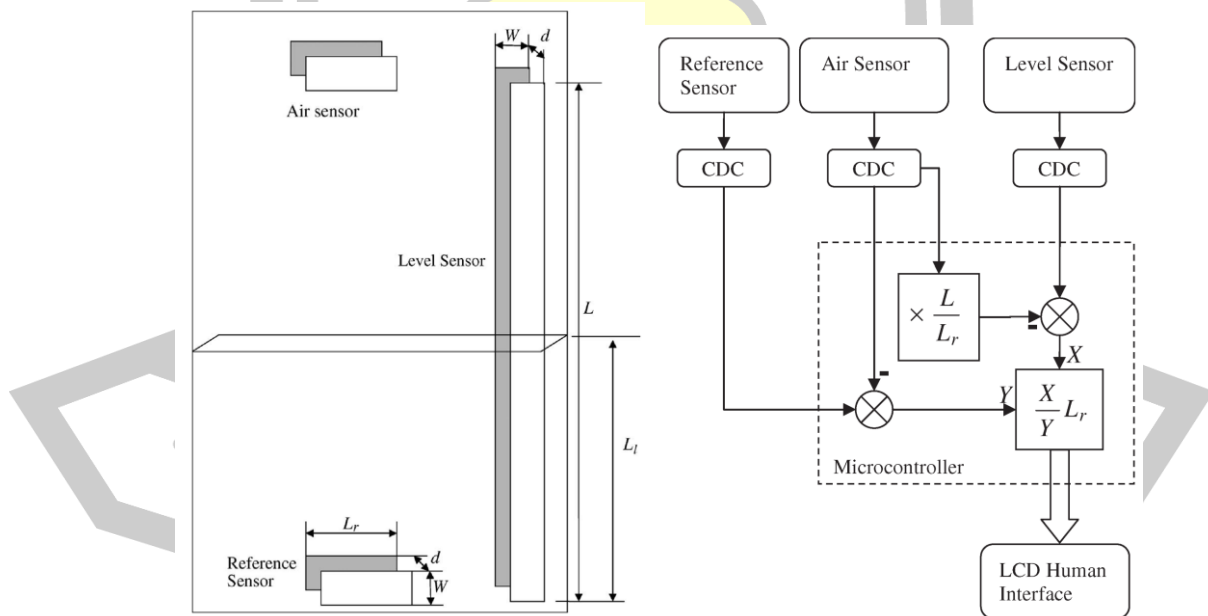
$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}} \quad (2.22)$$

สามารถแสดงได้ว่า

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

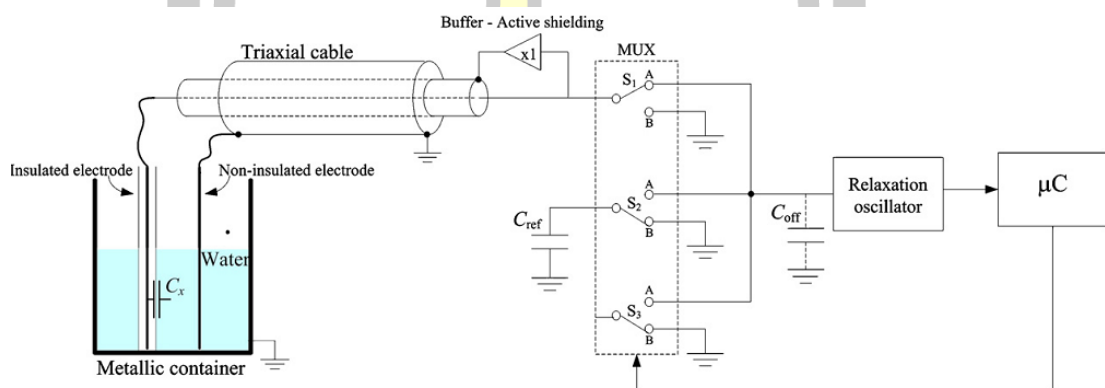
2.6 การปรัทัศน์วรรณงานวิจัย

จากการปรัทัศน์วรรณกรรมกรงานวิจัยในเรื่องของการพัฒนาตัวรับรู้ที่พัฒนาขึ้นมา มีหลากหลายรูปแบบปี 2009 Huseyin Canbolat และคณะ [14] ได้ทำงานวิจัยเทคนิคโดยใช้การวัดค่าการเก็บประจุสามแบบสำหรับของเหลว โดยใช้แท่งเหล็กยาวหรือเป็นแผ่นขนาดใหญ่ที่เป็น การวัดค่าการเก็บประจุเพื่อนำมาแปลงค่าวัดทางไฟฟ้า และมีตัวเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุทั้งอยู่บนอากาศและในน้ำเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า นำมาเชื่อมต่อและเข้าไปประมวลผลในไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุและแปลงออกมาเป็นระดับของเหลว

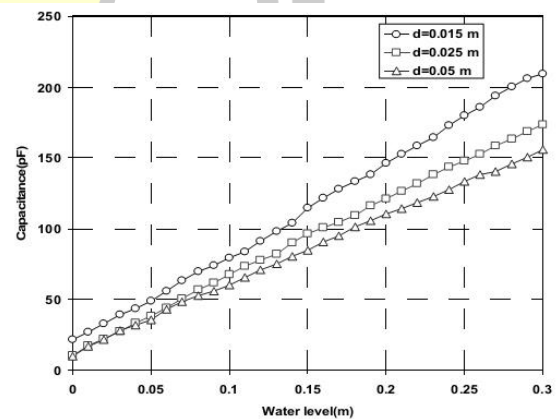
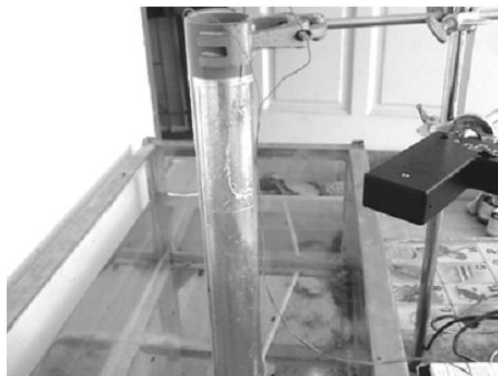


ภาพประกอบ 22 งานวิจัยเทคนิคโดยใช้การวัดค่าการเก็บประจุสามแบบสำหรับของเหลว [14]

ต่อมาการพัฒนาตัวรับรู้วัดค่าการเก็บประจุแบบทรงกระบอกของ Ferran Reverter และคณะ [16] เป็นระบบการวัดระดับน้ำอ้างอิงกับตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุต่อพื้นดินออกแบบเป็นแท่งทรงกระบอกเหล็กและได้ออกแบบวงจรสำหรับวัดค่าการเก็บประจุเชิงภาพประกอบ 23 ปี 2011 งานวิจัยของ ศุภกร กตาทิการกุลและคณะ [15-19] ได้พัฒนางานวิจัยการวัดระดับน้ำโดยใช้เทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก โดยทำจากวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) มีคุณสมบัติเบา เหนียวและทนแรงดันสูง โดยสามารถวัดค่าความจุไฟฟ้ากับระดับน้ำได้ตามภาพประกอบ 24 แต่ งานวิจัยดังกล่าวมีขนาดที่ใหญ่ มีน้ำหนักที่มาก และเหมาะสมกับงานวัดในระดับลึกที่มีความละเอียดไม่มากนัก



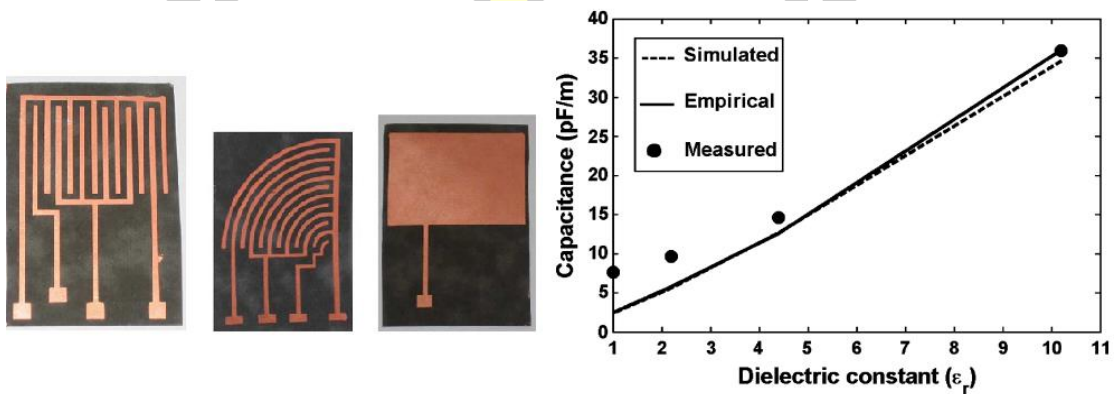
ภาพประกอบ 23 ระบบการวัดระดับน้ำอ้างอิงกับตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุต่อพื้นดิน [16]



ภาพประกอบ 24 การวัดระดับน้ำโดยใช้เทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก [15], [19]

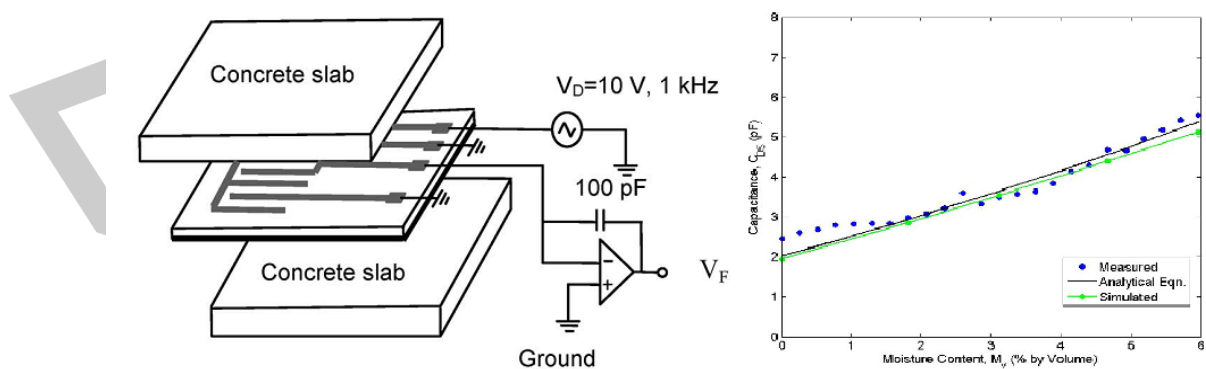
นักวิจัยบางกลุ่มได้พัฒนาตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุนเตอร์ดิจิทัล (Interdigital Electrode Capacitor : IDC) หรือที่เรียกกันว่าตัวรับรู้บนแผ่นวงจรพิมพ์หลายซีพียูที่มีลักษณะเป็นการกีดแผ่นทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Print Circuit Board : PCB) ที่มีวัสดุฐานรอง (Substrate) วางแผ่นตัวนำในแนวระนาบและวางสลับกันขึ้นไปเพื่อทำให้เป็นคุณลักษณะการขนานของค่าการเก็บ

ประจํา ปี 2007 Rashed H. Bhuiyan และคณะ [20] กับงานวิจัยตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิตอลคู่ขนาน ระยะใกล้สำหรับป้องกันการทําลายของฉนวนในระบบสายส่งไฟฟ้า ได้นำไปวัดความเป็นฉนวนของ สายไฟ โดยเป็นตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิตอลคู่ขนาน PCB แบบคู่ขนานดังภาพประกอบ 25 ทําเป็น 2 รูปแบบคือแบบ คู่ขนานตรงกับแบบโค้ง โดยนำค่าการเก็บประจุมาเปรียบเทียบค่าความเสียหายของฉนวนในลักษณะ ต่างๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์และซ่อมแซมระบบสายส่งไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพ



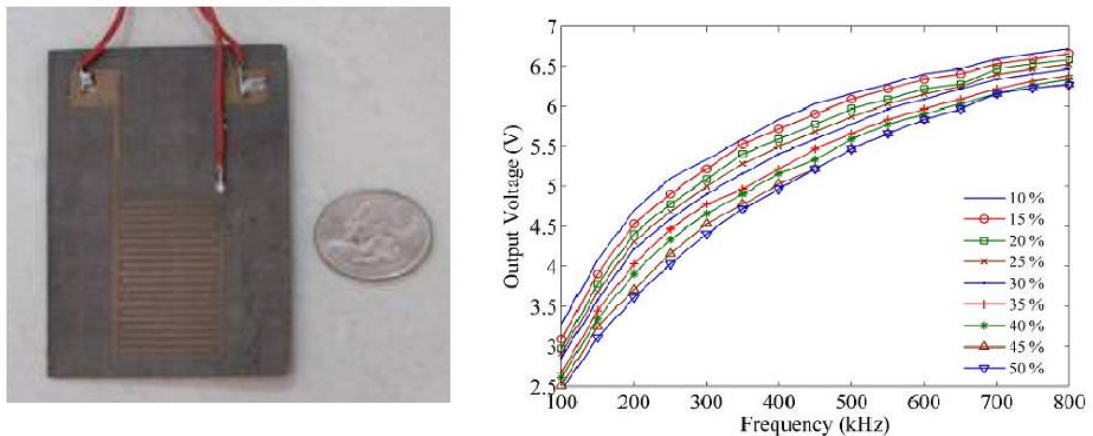
ภาพประกอบ 25 ตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิตอลคู่ขนานระยะใกล้สำหรับป้องกันการทําลายของฉนวนในระบบสายส่งไฟฟ้า [20]

ปี 2010 Md. Nazmul Alam และคณะ [21] กับงานวิจัยเรื่อง การวัดความชื้นในคอนกรีตโดยใช้ตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิตอลสนามระยะใกล้ โดยสร้างตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิตอลแบบคู่ขนานจ่ายสัญญาณ $V_p = 1$ โวลท์ ความถี่ 1 kHz และเส้นคู่ขนานอีกคู่หนึ่งนำสัญญาณผ่าน op-amp เพื่อขยายสัญญาณค่าการเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบระหว่างค่าการเก็บประจุกับ ค่าความชื้นที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่มีในอากาศดังภาพประกอบ 26



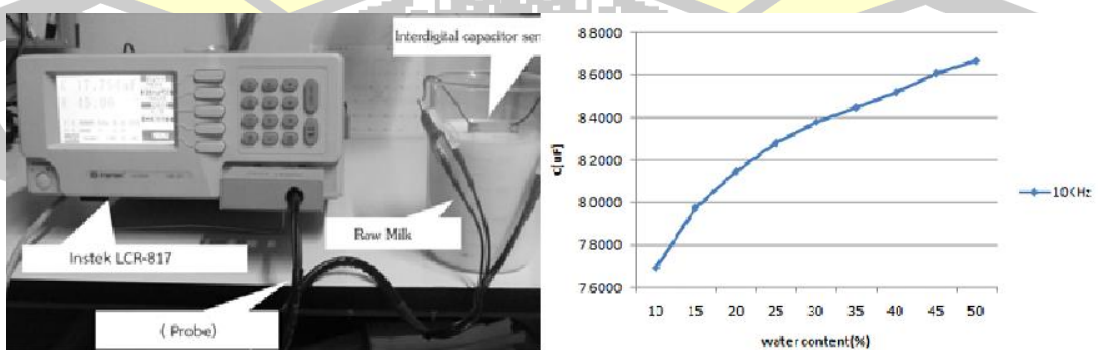
ภาพประกอบ 26 การวัดความชื้นในคอนกรีตโดยใช้ตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิตอลสนามระยะใกล้ [21]

ปี 2012 Niwat Angkawisittpan และคณะ [22] กับงานวิจัยเรื่องการวัดค่าความเข้มข้นของน้ำตาลโดยใช้ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตอล โดยออกแบบตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุแบบดิจิตอลเป็นคู่ขนานและสร้างวงจรกรองความถี่สูง (High-pass Filter) เพื่อเทียบสัญญาณจากรวมเป็นแรงดันทางไฟฟ้าในสัญญาณขาขึ้น เพื่อวัดค่าร้อยละความเข้มข้นของน้ำตาลโดยผลการทดสอบค่า % ความเข้มข้นของน้ำตาลจะมีความแตกต่างกันตามสัญญาณที่เกิดขึ้นดังภาพประกอบ 27



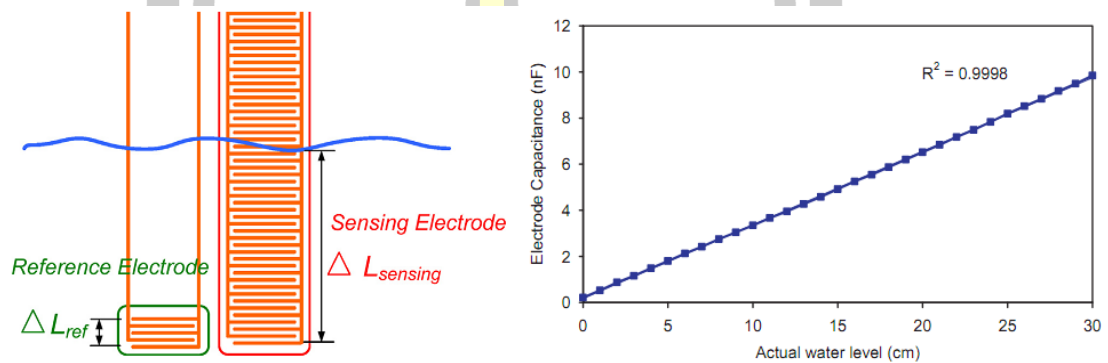
ภาพประกอบ 27 การวัดค่าความเข้มข้นของน้ำตาลโดยใช้ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตอล [22]

ปี 2015 Songkrod Pimpisarn และคณะ [23-26] ได้ทำงานวิจัยเรื่องการวัดค่าความเข้มข้นและเจือปนของน้ำนม โดยใช้ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบมีกราวด์เพื่อทำค่าความเข้มข้นและเจือปนของน้ำนม โดยนำตัวอย่างของน้ำนมแต่ละประเภทมาทำการวัดเพื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าการเก็บประจุต่อเปอร์เซ็นต์การเจือจางของน้ำที่เกิดขึ้นในน้ำนม



ภาพประกอบ 28 การวัดค่าความเข้มข้นและเจือปนของน้ำนม [23-26]

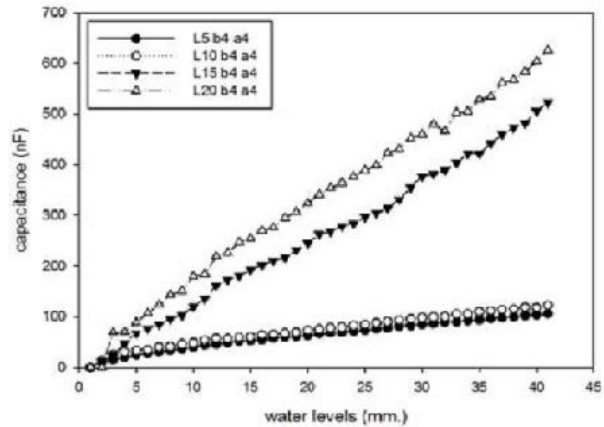
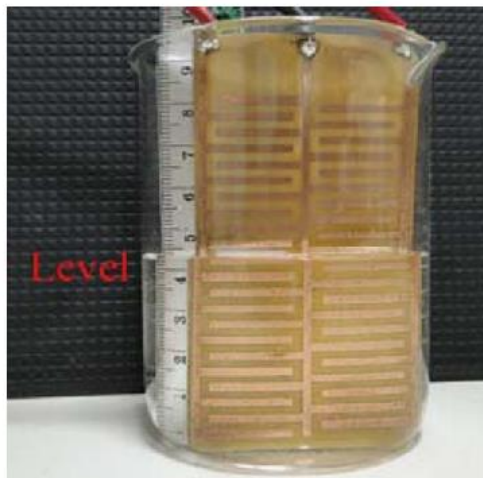
ในขณะเดียวกันปี 2014 Kanadet Chetpattanondh และคณะ [27-28] ได้พัฒนาในการวัดระดับน้ำแบบปรับค่าความแม่นยำด้วยตัวเองโดยใช้ตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล โดยสร้างชุดเปรียบเทียบเป็นตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล 2 ชุด เพื่อเทียบค่าความหนาแน่นของน้ำอย่างเดียว กับตัววัดระดับจริงและนำค่าจากตัวรับรู้ทั้ง 2 ตัวมาเปรียบเทียบเพื่อให้ได้ค่าความสูงของระดับน้ำที่แม่นยำขึ้น ประมวลผลผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์เชื่อมต่อข้อมูลส่งไปยัง Display ที่สร้างขึ้นดังภาพประกอบ 29



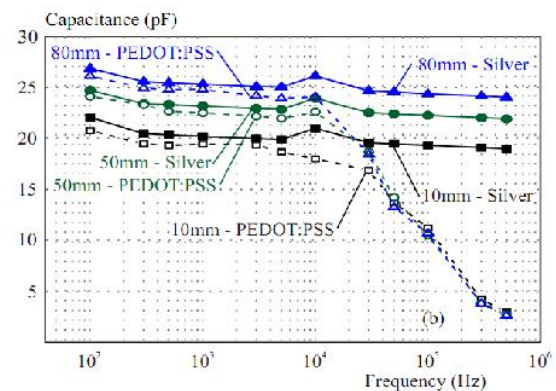
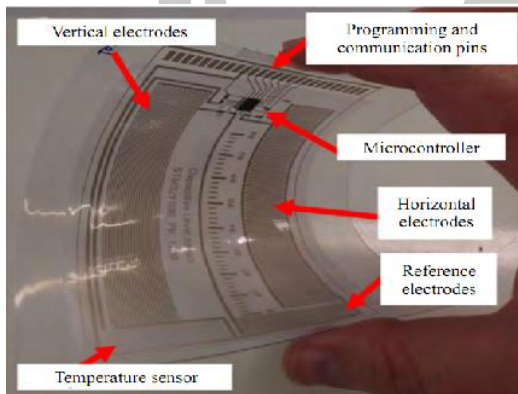
ภาพประกอบ 29 การวัดระดับน้ำแบบปรับค่าความแม่นยำด้วยตัวเองโดยใช้ตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอล [27-28]

ปี 2015 Sarawoot Boonkirdram และคณะ [29-30] ได้สร้างตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบใหม่ โดยได้เพิ่มคุณสมบัติของค่าการเก็บประจุจากการออกแบบซี่ลายวงจรรอก 2 ข้างเป็นซี่หวีเพื่อให้เกิดคุณสมบัติค่าการเก็บประจุที่มากขึ้น ดังภาพประกอบ 30 และงานวิจัยล่าสุดปี 2018 Paval Kulha และคณะ [31] กับงานวิจัยเรื่อง การพิมพ์และแผ่นอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบการวัดระดับโดยใช้ค่าการเก็บประจุต้นทุนต่ำ ได้นำตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลลงแผ่นพลาสติกและลามิเนตที่มีคุณสมบัติในการอ่อนตัวและยืดหยุ่นเพื่อนำไปวัดค่าระดับที่มีพื้นที่ผิวโค้งดังภาพประกอบ 30

พูนุ ปณุกิตโต ชิว



ภาพประกอบ 30 ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิทอลแบบใหม่ [29], [30]



ภาพประกอบ 31 การพิมพ์และแผ่นอิเล็กโทรดสำหรับระบบการวัดระดับโดยใช้ค่าการเก็บประจุต้นทุนต่ำ [31]

การทบทวนบทความวิจัยเหล่านี้กล่าวมาขั้นต้นยังมีจุดด้อยในเรื่องขนาดเนื่องจากงานอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ ทำให้เกิดความไม่ยืดหยุ่น หน้าสัมผัสของเหลวไม่สัมผัสตัวรับรู้ได้ทั่วถึง ส่งผลให้ค่าการเก็บประจุน้อยระยะการวัดที่ไม่ละเอียด ทำให้เกิดแนวคิดเทคนิคใหม่โดยบทความวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นในการออกแบบและสร้างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิทอลแบบไว้มาตรฐานรอง โดยพิจารณาจากระดับของค่าการเก็บประจุที่มากขึ้นเมื่อไม่มีฐานรอง เมื่อแปลงค่าการเก็บประจุเป็นข้อมูลนำไปใช้งานกับตัวประมวลผลนำไปใช้งานวัดระดับที่มีความละเอียดมากขึ้น เป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมกับการประยุกต์ด้านงานวัดระดับของเหลวที่ต้องใช้ความละเอียด งานทางด้านอุทกศาสตร์ อุตุนิยมวิทยา หรืองานที่ขนาดกลางไปจนถึงเล็กที่ต้องการวัดระดับน้ำ เช่น ตู้ปลาสวยงาม การเลี้ยงสัตว์น้ำของเกษตรกร เป็นต้น สามารถพัฒนางานวิจัยเป็นระบบการวัดระดับน้ำที่มีมาตรฐาน และสามารถเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งได้ต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับรายละเอียดในบทนี้จะแสดงถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัยซึ่งหลังจากที่ได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับการออกแบบและสร้างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัลแบบไร้วัสดุฐานรอง แล้วนำทฤษฎีเหล่านั้นมาประยุกต์ใช้งานเพื่อให้ได้งานออกมาตามขอบเขตที่กำหนดไว้ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยมีดังต่อไปนี้

- 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
- 3.2 ทฤษฎีและการออกแบบ
- 3.3 วิธีการสร้างและการทดลอง
- 3.4 การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล
- 3.5 แผนการดำเนินการเกี่ยวกับกิจกรรมและระยะเวลาทำการวิจัย

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 แผ่นทองแดง

ทองแดงมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าเป็นอันดับสอง จึงนิยมนำมาใช้ทำลวดส่งกระแสไฟฟ้าและและอุปกรณ์ไฟฟ้า ทั้งช่วยป้องกันการไหม้ของสายไฟได้ดี ใช้เป็นส่วนผสมสำคัญในโลหะผสมหลายชนิด เช่น ทองเหลือง โมเนลและสำริด เป็นต้น เพิ่มความแข็งให้กับโลหะ โดยใช้ผสมกับเงินและทองใช้ในการทำเครื่องประดับและเหรียญตรา ซึ่งก็จะได้เครื่องประดับที่สวยงามและทนทานอย่างมากโดยงานวิจัยนี้ใช้แผ่นทองแดงขนาดความหนา 0.105 มิลลิเมตรในการออกแบบและสร้างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัลแบบไร้วัสดุฐานรอง

3.1.2 วัสดุฐานรอง

วัสดุฐานรอง คือ แผ่นที่มีทองแดง 2 ด้านโดยมีฉนวนเป็นตัวกั้นทองแดง นำมาใช้งานด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ สายอากาศ มีหลายชนิดต่างขนาด ความหนา ค่าไดอิเล็กตริก ค่าการนำของวัสดุ การทำงานวิจัยนี้ใช้วัสดุฐานรองแบบ Epoxy โดยมีคุณสมบัติ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ $\epsilon_r = 4.6$ โดยผลิตที่ความหนาความหนา 1.6 มม. ซึ่งในงานวิจัยจำทำขึ้นเพื่อเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุระหว่างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัลแบบมีวัสดุฐานรองและไร้วัสดุฐานรอง เหมาะสมกับงานทางด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ระบบสื่อสาร

3.1.3 เครื่องวัดค่าการเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจุ และค่าความต้าน (LCR Meter)

เครื่องวัดค่าการเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจุ และค่าความต้าน (LCR Meter) ยี่ห้อ GW

instek รุ่น LCR-817 คุณสมบัติของเครื่องมีค่าความแม่นยำในการวัดที่ 0.05%~0.1% ดังภาพประกอบ 3.1 โดยเชื่อมต่อระหว่างตัวรับรู้ระดับของเหลวลค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัลแบบไร้วัสดุฐานรองคาปาซิเตอร์แนวระนาบกับเครื่องวัดที่ความถี่ 1 KHz แรงดันไฟฟ้า 1 โวลท ผ่านชุด Kelvin Clip Leads

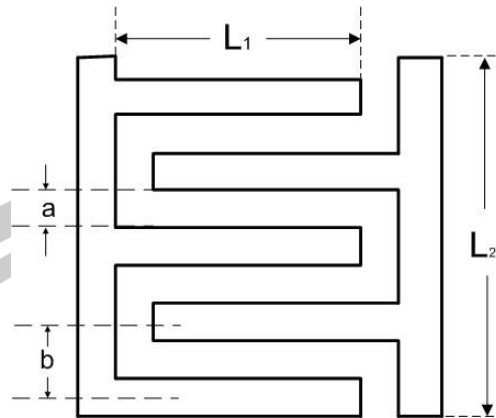


ภาพประกอบ 32 เครื่องวัดค่าการเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจุ และค่าความต้าน (LCR Meter)

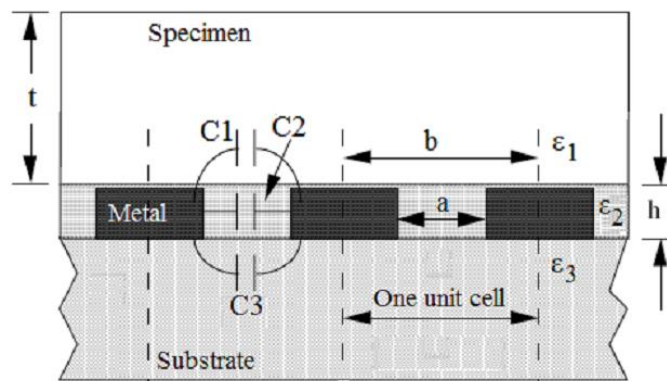
3.2 ทฤษฎีและการออกแบบ

ทฤษฎีและการออกแบบตัวรับรู้ระดับของเหลวลค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัล จะใช้หลักการการขนานของแผ่นทองแดงมีขั้วบวกและลบ โดยเมื่อทองแดงมีการขนานกันเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่าการเก็บประจุมีค่ามากขึ้นเช่นกัน แล้วนำค่าการเก็บประจุที่ได้นั้นไปแปลงค่าในระบบประมวลผลค่าการเก็บประจุมีหน่วยเป็นฟารัด (Farad, F)

การออกแบบ ดังโครงสร้างในภาพประกอบ 33 และ 34 เริ่มต้นจากหาค่า C_{UC} ในสมการที่ 2 ที่สัมพันธ์กับสมการที่ 3 และ 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 เป็นระยะห่างของขั้ว b เป็นระยะความกว้างของอิเล็กโทรด ต่อมาเป็นการหาค่าการเก็บประจุทั้งหมดของตัวรับรู้ระดับของเหลวลค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัล ในสมการที่ 1 ประกอบด้วย L1 คือความยาวของขั้ว และ N คือจำนวนของขั้ว [22]



ภาพประกอบ 33 ภาพด้านบนของโครงสร้างของตัวรับรู่ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ ดิจิทัล



ภาพประกอบ 34 ภาพตัดโครงสร้างของตัวรับรู่ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล [9]

$$C = C_{uc} (N - 1) L_1 \tag{3.1}$$

$$C_{uc} = C_1 + C_2 + C_3 \tag{3.2}$$

$$C_{uc} = \epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2} \right) \frac{K \left(\sqrt{1 - \left(\frac{a}{b} \right)^2} \right)}{K \left(\frac{a}{b} \right)} + \epsilon_0 \epsilon_2 \frac{h}{a} \tag{3.3}$$

โดยที่ C = ค่าการเก็บประจุทั้งหมดของอิเล็กทรอนิกส์

C_{uc} = ค่าการเก็บประจุของอิเล็กทรอนิกส์ 1 คู่

N = จำนวนซี่ทั้งหมดของอิเล็กทรอนิกส์

L_1 = ความยาวของซีอีเล็กโทรดแต่ละอัน

a = ระยะห่างระหว่างซี

b = ระยะความกว้างระหว่างทองแดงอีเล็กโทรด

ϵ_0 = ค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในอากาศว่าง (permittivity of free space)

มีค่า 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_1 = ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุที่ใช้นำมาทดสอบ เช่น อากาศ น้ำ น้ำมัน

ϵ_2 = ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุระหว่างทองแดงอีเล็กโทรด

ϵ_3 = ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง

K = ฟังก์ชันของปริพันธ์เชิงวงรีของมอดูลัส

โดยทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบตัวรับรู่ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัลแบบดั้งเดิมโดยการคำนวณจากการแทนค่าในสมการที่ 3.1-3.4 เพื่อหาค่าการเก็บประจุในสมการที่ 1 ค่าพารามิเตอร์คือ $h=0.105$ mm, $a=2$ mm, $b=4$ mm, $L_1=15$ mm and $N=20$ ค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในอากาศว่างคือ $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$, และค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองชนิดอีพอกซี (Epoxy) $\epsilon_3 = 4.6$. โดยคำนวณค่าการเก็บประจุจากสมการที่ 1 - 4 โดยยังไม่สัมผัสน้ำเท่ากับ 9.5684 pF แต่เนื่องจากถ้ามีการตรวจวัดระดับน้ำจะมีค่าไดอิเล็กตริกมากกว่าอากาศประมาณ 80 เท่าและจะทำให้ค่าการเก็บประจุแปรผันตามตามค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ระหว่างแผ่นทองแดงอีเล็กโทรดกับน้ำตามระดับที่เกิดขึ้น

3.3 วิธีการสร้างและการทดลอง

เมื่อทำการออกแบบในหัวข้อที่ 3.2 ตามสมการแล้วในสมการที่ 3.1-3.4 จึงได้ทำวิธีการทดลองขึ้นเพื่อพิสูจน์ค่าการเก็บประจุของตัวรับรู่ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างแบบมีวัสดุฐานรองและแบบไร้วัสดุฐานรอง โดยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

3.3.1 วิธีการสร้างตัวรับรู่ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล

การสร้างตัวรับรู่ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัลแรกคือแบบดั้งเดิมที่มีโดยออกแบบเป็น 6 ขนาดตามตารางที่ 3 โดยการสร้างวัสดุฐานรองจะใช้ Epoxy ที่มีค่า ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุที่ $\epsilon_r = 4.6$ หล่อขึ้นตามโมลบล็อกขนาดความกว้าง 21 มิลลิเมตร ความยาว 80 มิลลิเมตร ความสูง 1.6 มิลลิเมตร แล้วนำแผ่นทองแดงขนาดความหนา 0.105 มิลลิเมตร ตัดเป็นรูปอีเล็กโทรดที่ออกแบบขนาดไว้ในตารางที่ 3 มาวางด้านบนในขณะที่ Epoxy เซทตัว ซึ่งงานนี้ได้สมมุติฐานงานให้คล้ายกับแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ที่นำมากัดลายวงจร ดังภาพประกอบ 35

ตารางที่ 3 ตัวอย่างขนาดตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิจิทัลแบบมีวัสดุฐานรอง

IDC model แบบมีวัสดุฐานรอง	b (มม.)	a (มม.)	L (มม.)
1	2	1	15
2	2	2	15
3	3	1	15
4	2	1	10
5	2	2	10
6	3	1	10

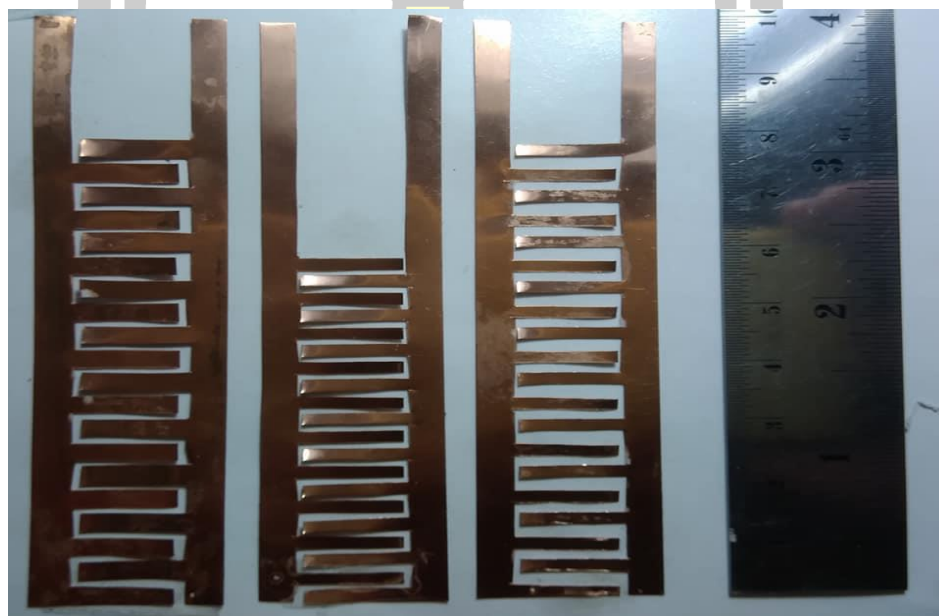


ภาพประกอบ 35 ตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิจิทัลแบบมีฐานรอง (Epoxy)

ต่อมาเป็นการสร้างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิจิทัลแบบที่สองคือแบบไร้วัสดุฐานรอง โดยออกแบบเป็น 6 ขนาดเช่นกันตามตารางที่ 4 โดยนำแผ่นทองแดงขนาดความหนา 0.105 มิลลิเมตร ตัดเป็นรูปอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบขนาดไว้ในตารางที่ 4 ดังภาพประกอบ 36

ตารางที่ 4 ตัวอย่างขนาดตัวรับรู่ระดับของเหลลค่าการเก็บประจุอินเตอร้ดจิทัลแบบไร่่วสตุฐานรอง

IDC model แบบไร่่วสตุฐานรอง	b (mm.)	a (mm.)	L (mm.)
1	2	1	15
2	2	2	15
3	3	1	15
4	2	1	10
5	2	2	10
6	3	1	10



ภาพประกอบ 36 ตัวรับรู่ระดับของเหลลค่าการเก็บประจุอินเตอร้ดจิทัลแบบไร่่วสตุฐานรอง

3.3.2 วิธีกรทดลองและเก็บข้อมูล

เมื่อการสร้กรตัวรับรู่ระดับของเหลลค่าการเก็บประจุอินเตอร้ดจิทัลทั้งสองแบบแล้ว นำมาวัดค่าการเก็บประจุโดยใช้เครื่องวัด LCR Meter (GW intstek LCR - 817) ที่มีคุณสมบัติความแม่นยำที่ 0.05%. โดยผ่าน Kelvin Clip ทำการวัดโดยใช้โหมดวงจรรขนาน สัญญาณความถี่ 1 KHz ที่ 1 Volt_{p-p} โดยแต่ละขนาดทั้งสองแบบจะวัดค่าระดับตั้งแต่ 0 มิลลิเมตร จนถึงระดับ 80 mm โดยช่วงวัดครั้งละ 5 mm จำนวน 16 ช่วงวัด โดยวัดช่วงละ 3 ซ้่าเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดในการวัดค่าการเก็บประจุ ดังภาพประกอบ 36 และ 37

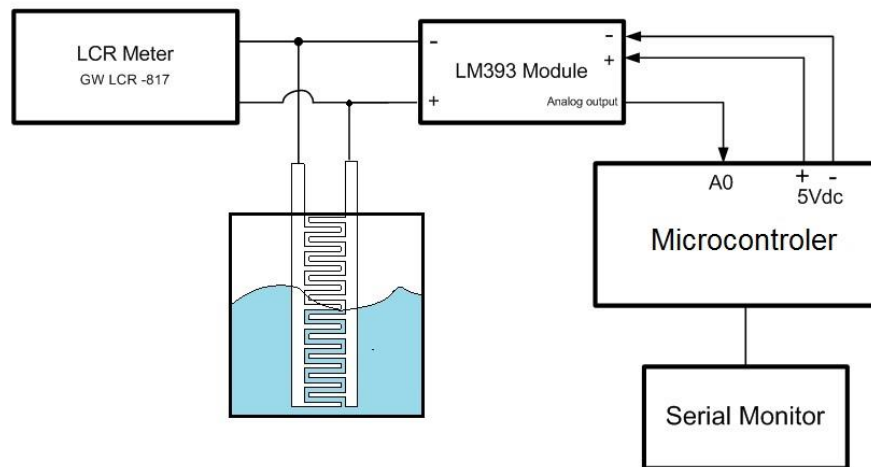


ภาพประกอบ 37 การวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู่ระดับของเหลวแบบมีวัสดุฐานรอง

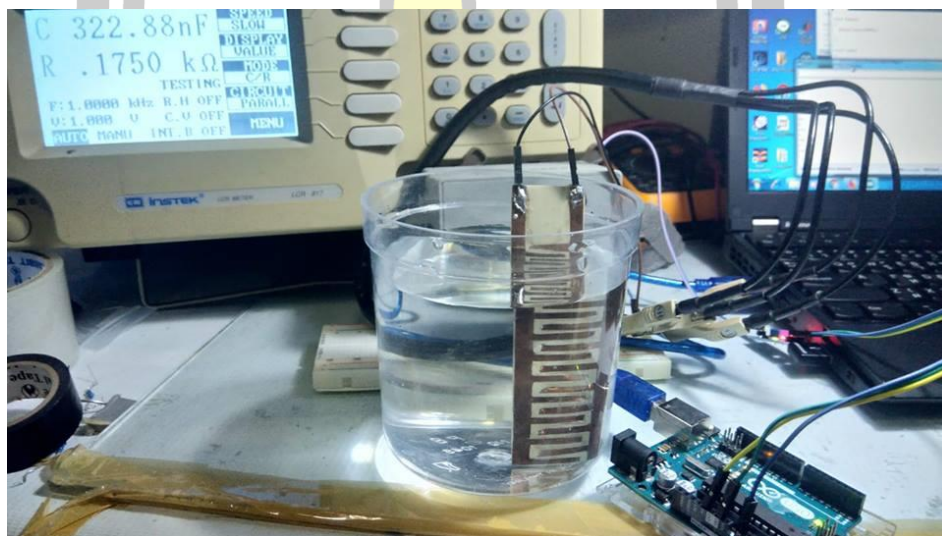


ภาพประกอบ 38 การวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู่ระดับของเหลวแบบไร้วัสดุฐานรอง

ต่อมาการนำ ตัวรับรู่ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุนเตอร์ดิจิตอลแบบมีวัสดุฐานรอง และไร้วัสดุฐานรองโดยเลือกขนาดที่ 2 ที่ค่า $a = 2 \text{ mm}$, $b = 4 \text{ mm}$ และ $L = 15 \text{ mm}$ ของตารางที่ 3 และ 4 วิธีการทดลองวัดการประยุกต์ใช้งานการวัดและประมวลผลโดยใช้ตัวรับรู่ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุนเตอร์ดิจิตอลผ่านโมดูลขยาย LM393 ประมวลผลผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงผลผ่าน Serial Monitor เพื่อทำการเปรียบคู้กับ LCR Meter โดยแต่ละโมเดลจะวัดค่าตั้งแต่ 0-80 mm โดยช่วงวัดครั้งละ 5 mm จำนวน 16 ช่วงวัด โดยวัดช่วงละ 3 ซ้ำเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดในการวัดค่าการเก็บประจุ ดังภาพประกอบ 39 และ 40



ภาพประกอบ 39 แผนภาพการประมวลผลการวัดค่าการเก็บประจุกับไมโครคอนโทรเลอร์



ภาพประกอบ 40 ภาพจริงการประมวลผลการวัดค่าการเก็บประจุกับไมโครคอนโทรเลอร์

3.4 การเก็บรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูล โดยนำมาออกแบบตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบไร้ฐานรอง ดังต่อไปนี้

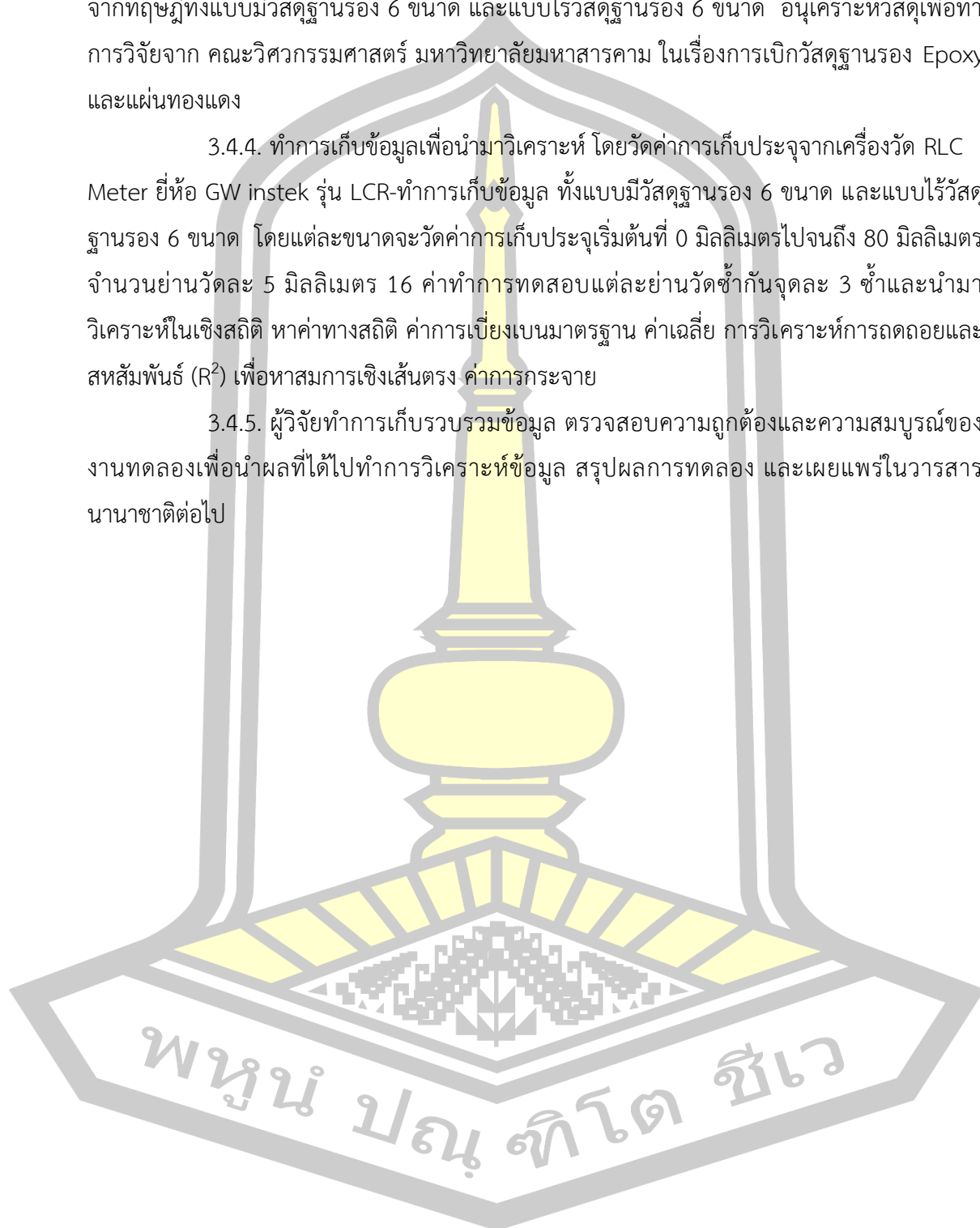
3.4.1. ผู้วิจัยทำการหาข้อมูลงานวิจัย บทความ วิทยานิพนธ์ ในเรื่องตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลจากฐานข้อมูลออนไลน์ ห้องสมุด ฐานข้อมูลมหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยมุ่งเน้นในเรื่องตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลเป็นแผนระนาบ

3.4.2. ทำการออกแบบตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลจากทฤษฎีทั้งแบบมีฐานรอง และแบบไร้ฐานรอง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างจริง

3.4.3. ทำการออกแบบและสร้างตัวรับรู่ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล จากทฤษฎีทั้งแบบมีวัสดุฐานรอง 6 ขนาด และแบบไร้วัสดุฐานรอง 6 ขนาด อนุเคราะห์วัสดุเพื่อทำการวิจัยจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ในเรื่องการเก็บวัสดุฐานรอง Epoxy และแผ่นทองแดง

3.4.4. ทำการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ โดยวัดค่าการเก็บประจุจากเครื่องวัด RLC Meter ยี่ห้อ GW instek รุ่น LCR-ทำการเก็บข้อมูล ทั้งแบบมีวัสดุฐานรอง 6 ขนาด และแบบไร้วัสดุฐานรอง 6 ขนาด โดยแต่ละขนาดจะวัดค่าการเก็บประจุเริ่มต้นที่ 0 มิลลิเมตรไปจนถึง 80 มิลลิเมตร จำนวนย่านวัดละ 5 มิลลิเมตร 16 ค่าทำการทดสอบแต่ละย่านวัดซ้ำกันจุดละ 3 ซ้ำและนำมาวิเคราะห์ในเชิงสถิติ หาค่าทางสถิติ ค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าเฉลี่ย การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์ (R^2) เพื่อหาสมการเชิงเส้นตรง ค่าการกระจาย

3.4.5. ผู้วิจัยทำการเก็บรวบรวมข้อมูล ตรวจสอบความถูกต้องและความสมบูรณ์ของงานทดลองเพื่อนำผลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเผยแพร่ในวารสารนานาชาติต่อไป



3.5 แผนการและระยะเวลาการวิจัย

ตารางที่ 5 แผนการดำเนินการเกี่ยวกับกิจกรรมและระยะเวลาทำการวิจัย

วัตถุประสงค์	แผนงานวิจัย	2562		2563	
		มค.- มิย.	กค.- ธค.	มค.- มิย.	กค.- ธค.
1. เพื่อศึกษางานวิจัย ภาพรวมของตัวรับรู้ระดับ ของเหลวค่าการเก็บประจุ อินเตอร์ดิจิทัลแบบไร้ วัสดุฐานรอง	1. ทำการศึกษาทฤษฎีตัวรับรู้ระดับ ของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล และพารามิเตอร์ในการวัดค่าการเก็บ ประจุ	←→			
	3. ศึกษาและทำการออกแบบตัวรับรู้ ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ ดิจิทัลตามทฤษฎี		←→		
	3. เสนอหัวข้องานวิจัยที่ได้ศึกษามา		←→		
2. ทำการออกแบบและ สร้างตัวรับรู้ระดับ ของเหลวค่าการเก็บประจุ อินเตอร์ดิจิทัล	1. ออกแบบและสร้างตัวรับรู้ระดับ ของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล ตามหัวข้องานวิจัยที่เสนอ			←→	
	2. ออกแบบและสร้างตัวรับรู้ระดับ ของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล จริง ปรับแต่งโครงสร้าง เพื่อทำการวัด ด้วยเครื่องวัด LCR Meter			←→	
3. สรุปผลการทดลอง	1. ทำการสรุปผลการทดลอง			←→	
	2. จัดทำรายงานผลการวิจัย				←→

พูน ปณ ทิโต ชีเว

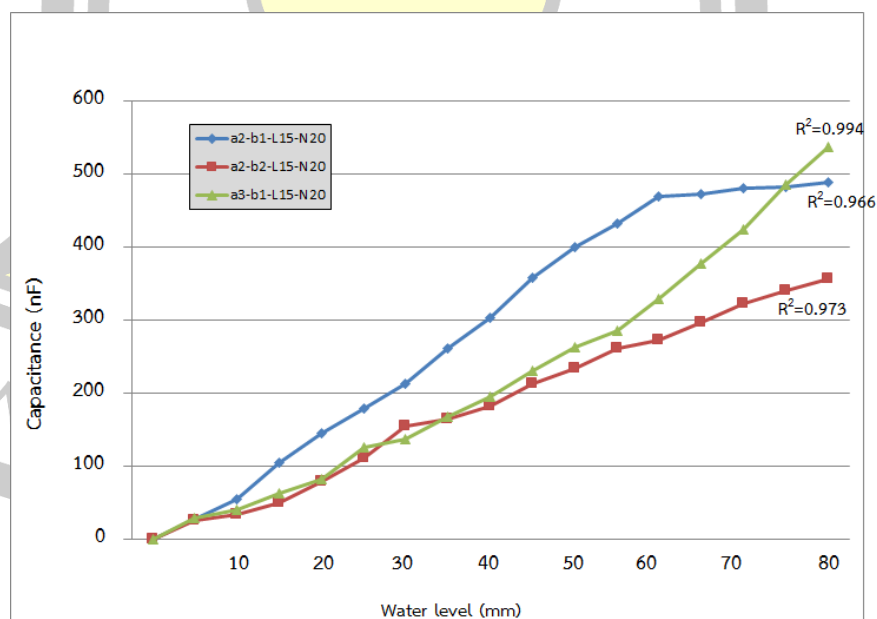
บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับรายละเอียดในบทนี้จะแสดงถึงลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล หลังจากที่ได้วิธีดำเนินการวิจัยแล้วนำไปการออกแบบและสร้างตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบไร้วัสดุฐานรองตามขั้นตอนที่เราสร้างขึ้นเป็นลำดับจนได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลออกมา ซึ่งต้องเป็นไปตามขอบเขตที่กำหนดไว้ซึ่งขั้นตอนที่ทำให้เกิดผลการวิเคราะห์ข้อมูลมีดังต่อไปนี้

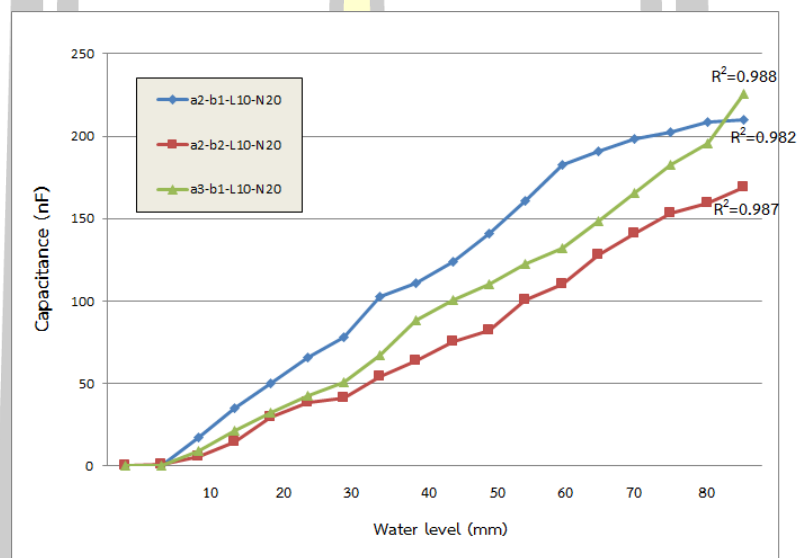
4.1 ผลการวิเคราะห์แบบมีฐานรองและไม่มีฐานรอง

ผลการวิเคราะห์ในส่วนที่ 1 แบบมีฐานรองเป็น Epoxy ที่มีค่า $\epsilon_r=4.6$ จำนวน 6 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 3 ตัวอย่างที่ 1 (a2-b1-L15-N20) มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 0.12 – 488.21 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.966 ตัวอย่างที่ 2 (a2-b2-L15-N20) มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 0.28 – 355.87 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.973 ตัวอย่างที่ 3 (a3-b1-L15-N20) มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 0.11 – 536.44 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.994

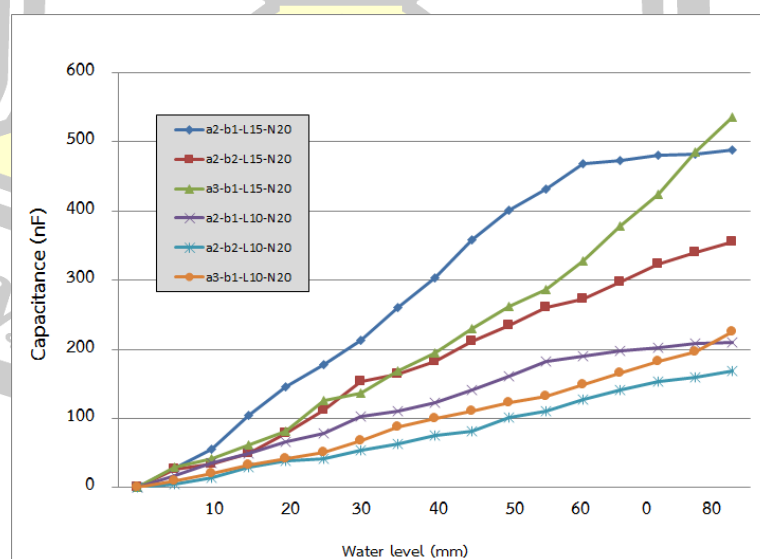


ภาพประกอบ 41 ผลของค่าการเก็บประจุแบบมีฐานรอง 3 ตัวอย่างแบบไม่ตัดด้าน L

จากตัวอย่างที่ 4 ถึงตัวอย่างที่ 6 ผู้วิจัยได้ทำการวัดด้านความยาว L ทั้งหมดให้มีค่าเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ได้ตัวอย่างที่ 4 (a2-b1-L10-N20) มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 0.13 – 210.21 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.982 ตัวอย่างที่ 5 (a2-b2-L10-N20) มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 0.27 – 168.87 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.987 และตัวอย่างที่ 6 (a3-b1-L10-N20) มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 0.16 – 225.44 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.988 ดังภาพประกอบ 42 และผลการเปรียบเทียบทั้งหมด 6 ตัวอย่างดังภาพประกอบ 43

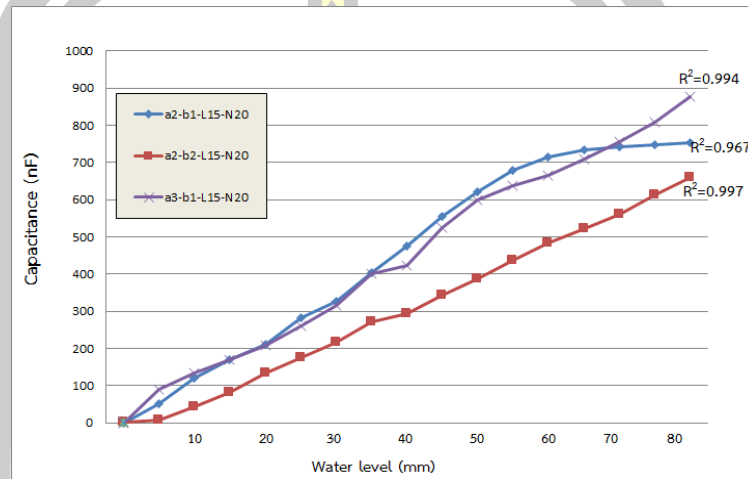


ภาพประกอบ 42 ผลของค่าการเก็บประจุแบบมีฐานรอง 3 ตัวอย่างแบบตัดด้าน L



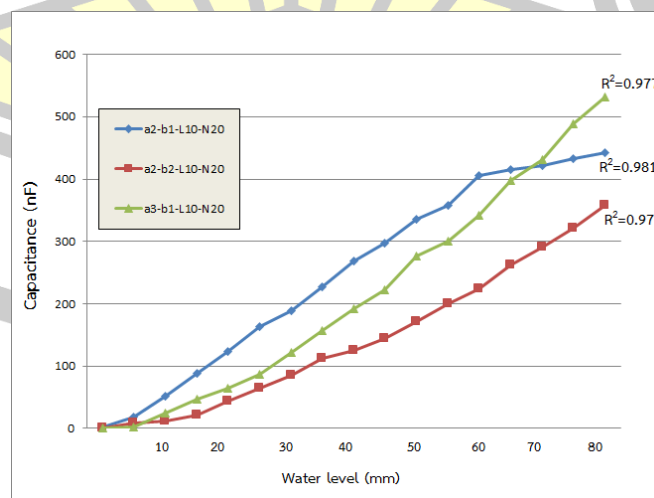
ภาพประกอบ 43 ผลของค่าการเก็บประจุแบบมีฐานรองทั้ง 6 ตัวอย่าง

ผลการวิเคราะห์ในส่วนที่ 2 แบบไร้ฐานรอง 6 ตัวอย่าง ดังตาราง 3.2 ตัวอย่างที่ 1 มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 0.12 – 753.81 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.967 ตัวอย่างที่ 2 มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 0.87 – 658.56 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.997 ตัวอย่างที่ 3 มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 0.16 – 877.56 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.994 ดังภาพประกอบ 44

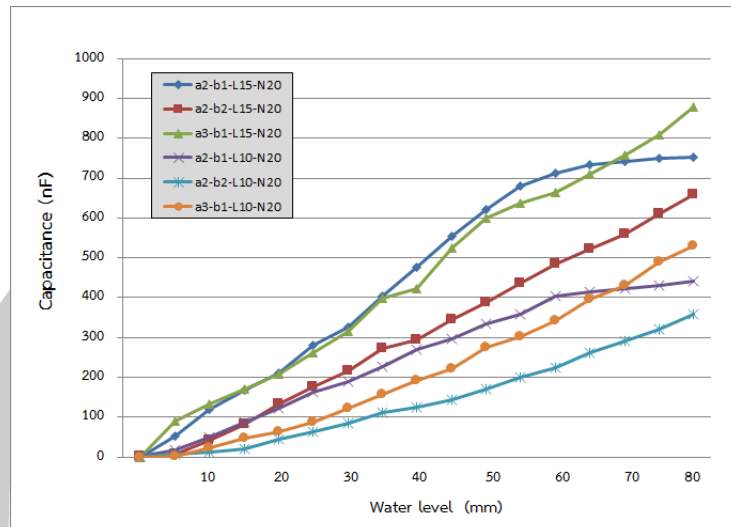


ภาพประกอบ 44 ผลของค่าการเก็บประจุแบบไร้ฐานรอง 3 ตัวอย่างแบบไม่ตัดด้าน L

ตัวอย่างที่ 4 มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 1.03 – 442.56 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.981 ตัวอย่างที่ 5 มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 0.17 – 358.56 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.973 และ ตัวอย่างที่ 6 มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 0.26 – 531.28 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.977 ดังภาพประกอบ 4.5 และผลการเปรียบเทียบทั้งหมด 6 ตัวอย่างดังภาพประกอบ 46



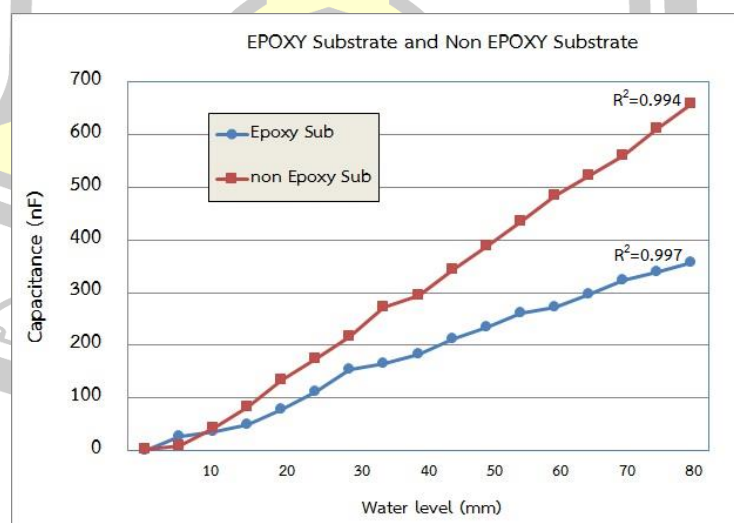
ภาพประกอบ 45 ผลของค่าการเก็บประจุแบบไร้ฐานรอง 3 ตัวอย่างแบบตัดด้าน L



ภาพประกอบ 46 ผลของค่าการเก็บประจุแบบไร้ฐานรองทั้ง 6 ตัวอย่าง

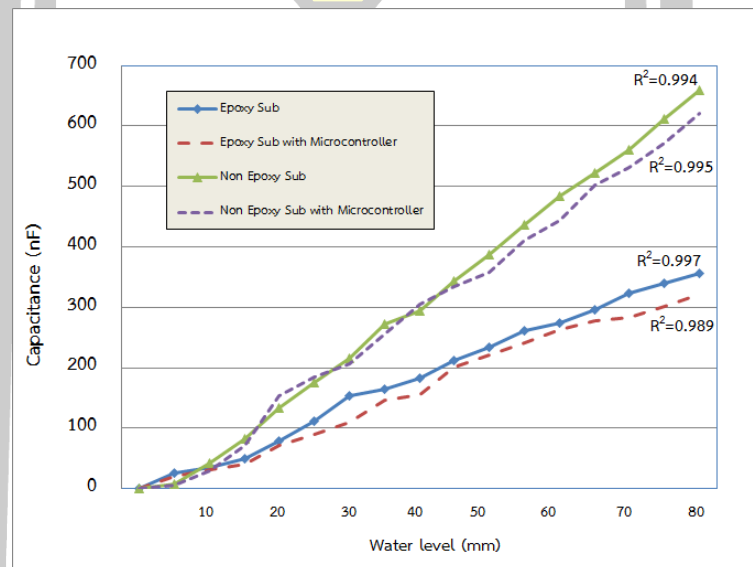
4.2 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าที่ดีที่สุด

โดยจากผลการทดลองได้นำตัวอย่างที่ 2 ($a = 2 \text{ mm}$, $b=2 \text{ mm}$ และ $L=15 \text{ mm}$) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุดนำมาเปรียบเทียบ แบบมีฐานรองเป็น Epoxy และแบบไร้ฐานรองแผ่นวงจรพิมพ์ มาเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุดังภาพประกอบ 4.7 แบบมีฐานรองเป็น Epoxy มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 0.67 – 355.87 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.997 และแบบไร้ฐานรองมีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 0.87 – 658.56 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.994 มีความห่างของค่าการเก็บประจุสูงสุดวัดจากย่าน 80 mm ที่ 302.69 นาโนฟารัด



ภาพประกอบ 47 เปรียบเทียบค่าการเก็บประจุแบบมีฐานรอง Epoxy และแบบไร้ฐานรองโดยใช้ตัวอย่างที่ 2 ($a=2\text{mm}$, $b=2\text{mm}$, $L=15\text{mm}$)

ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุจากการประยุกต์ใช้งานโดยประมวลผลในไมโครคอนโทรลเลอร์ และ วัดจากเครื่อง LCR Meter แบบมีฐานรองและแบบไร้ฐานรอง โดยใช้ตัวอย่างที่ 2 ($a=2\text{mm}, b=2\text{mm}, L=15\text{mm}$) ดังภาพประกอบ 4.8 แบบมีฐานรองมีค่าการเก็บประจุที่วัดจากประมวลผลในไมโครคอนโทรลเลอร์ อยู่ระหว่าง 0 – 320.45 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.989 มีค่าการเก็บประจุที่วัดจาก RLC Meter อยู่ระหว่าง 0.67 – 355.87 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.997 แบบไร้ฐานรองมีค่าการเก็บประจุที่วัดจากประมวลผลในไมโครคอนโทรลเลอร์ อยู่ระหว่าง 0 – 620.45 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.995 มีค่าการเก็บประจุที่วัดจาก RLC Meter อยู่ระหว่าง 0.17 – 658.56 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.985



ภาพประกอบ 4.8 เปรียบเทียบค่าการเก็บประจุจากการประมวลผลในไมโครคอนโทรลเลอร์และวัดจากเครื่อง LCR Meter แบบมีฐานรอง Epoxy และแบบไร้ฐานรองโดยใช้ Model ที่ 2 ($a=2\text{mm}, b=2\text{mm}, L=15\text{mm}$)

พหุ ประถมศึกษา

บทที่ 5

สรุป อภิปรายและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอตัวรับรื้อระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัลแบบไร้ฐานรองโดยได้ทำการทดลองส่วนแรกคือการวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรื้อระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัลแบบมีฐานรอง ใช้วัสดุฐานรองเป็น Epoxy มีค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุ $\epsilon_r = 4.6$ โดยออกแบบและสร้างขึ้นจำนวน 6 รูปแบบ และตัวรับรื้อระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัลแบบไร้ฐานรองสร้างขึ้นจำนวน 6 รูปแบบ ทำการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์โดยวัดค่าการเก็บประจุจากเครื่องวัด RLC Meter ยี่ห้อ GW instek รุ่น LCR-ทำการเก็บข้อมูล ทั้งแบบมีวัสดุฐานรอง 6 ขนาด และแบบไร้วัสดุฐานรอง 6 ขนาด โดยแต่ละขนาดจะวัดค่าการเก็บประจุเริ่มต้นที่ 0 มิลลิเมตรไปจนถึง 80 มิลลิเมตรจำนวนย่านวัดละ 5 มิลลิเมตร 16 ค่าทำการทดสอบแต่ละย่านวัดซ้ำกันจุดละ 3 ซ้ำและนำมาวิเคราะห์ในเชิงสถิติ การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เพื่อหาสมการเชิงเส้นตรง ค่าการกระจายเพื่อเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุ ที่เกิดขึ้นทั้ง 12 รูปแบบ

จากผลการทดลองได้นำตัวอย่างที่ 2 ($a = 2 \text{ mm}$, $b=2 \text{ mm}$ และ $L=15 \text{ mm}$) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุดนำมาเปรียบเทียบ แบบมีฐานรองเป็น Epoxy และแบบไร้ฐานรองแผ่นวงจรมิพ มาเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุ แบบมีฐานรองเป็น Epoxy มีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 0.67 – 355.87 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.997 และแบบไร้ฐานรองมีค่าการเก็บประจุอยู่ระหว่าง 0.87 – 658.56 นาโนฟารัด ค่า correlation coefficient (R^2) อยู่ที่ 0.994 มีความห่างของค่าการเก็บประจุสูงสุดวัดจากย่าน 80 mm ที่ 302.69 นาโนฟารัด

ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุจากการประยุกต์ใช้งานโดยประมวลผลในไมโครคอนโทรลเลอร์ และ วัดจากเครื่อง LCR Meter แบบมีฐานรองและแบบไร้ฐานรอง โดยใช้ตัวอย่างที่ 2 ($a=2\text{mm}, b=2\text{mm}, L=15\text{mm}$) แบบมีฐานรองมีค่าการเก็บประจุวัดจากประมวลผลในไมโครคอนโทรลเลอร์ อยู่ระหว่าง 0 – 320.45 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.989 มีค่าการเก็บประจุที่วัดจาก RLC Meter อยู่ระหว่าง 0.67 – 355.87 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.997 แบบไร้ฐานรองมีค่าการเก็บประจุที่วัดจากประมวลผลในไมโครคอนโทรลเลอร์ อยู่ระหว่าง 0 – 620.45 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.995 มีค่าการเก็บประจุที่วัดจาก RLC Meter อยู่ระหว่าง 0.17 – 658.56 นาโนฟารัด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.985

5.2 อภิปราย

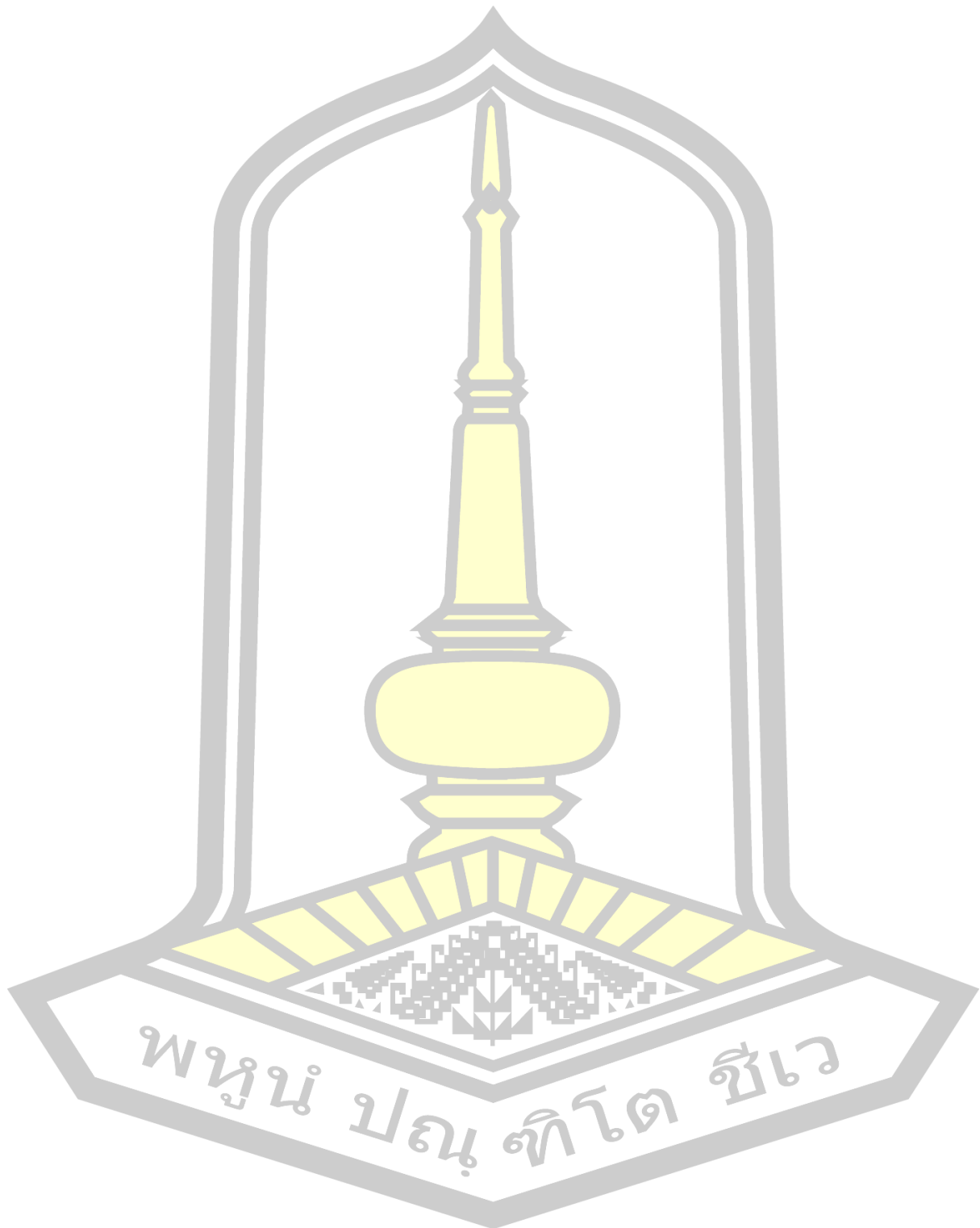
วิทยานิพนธ์เรื่องตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัลแบบไร้ฐานรองเป็นงานวิจัยที่ออกแบบและสร้างเพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ดีที่สุดในการออกแบบ อุปกรณ์ตัวรับรู้ที่ออกแบบ โดยสามารถขยายย่านเพื่อวัดระดับของเหลวให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น และประยุกต์ใช้งานโดยประมวลผลในไมโครคอนโทรลเลอร์ ด้านงานอุตสาหกรรม งานอุดมศึกษา สิ่งแวดล้อม เพื่อนำมาวิเคราะห์ เช่น การวัดความชื้นในอากาศ การวัดของเหลว การวัดคุณภาพน้ำ เป็นต้น สามารถพัฒนางานวิจัยเป็นระบบการวัดระดับน้ำที่มีมาตรฐาน และสามารถนำมาเชื่อมต่อผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดของการอ่อนตัวของทองแดงที่นำมาทดลองซึ่งมีประโยชน์ในการทดลองที่ต้องการตัดสภาพ พื้นที่โค้ง แต่ทำให้ระยะของช่องของแต่ละซี่อาจเกิดความผิดพลาด ทำให้ค่าการเก็บประจุที่วัดได้อาจจะมีความคลาดเคลื่อน โดยวัสดุที่ใช้งานอาจจะต้องมีความแข็งแรงหรือแข็งไม่อ่อนตัวเพื่อทำให้การวัดค่าการเก็บประจุมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น



บรรณานุกรม

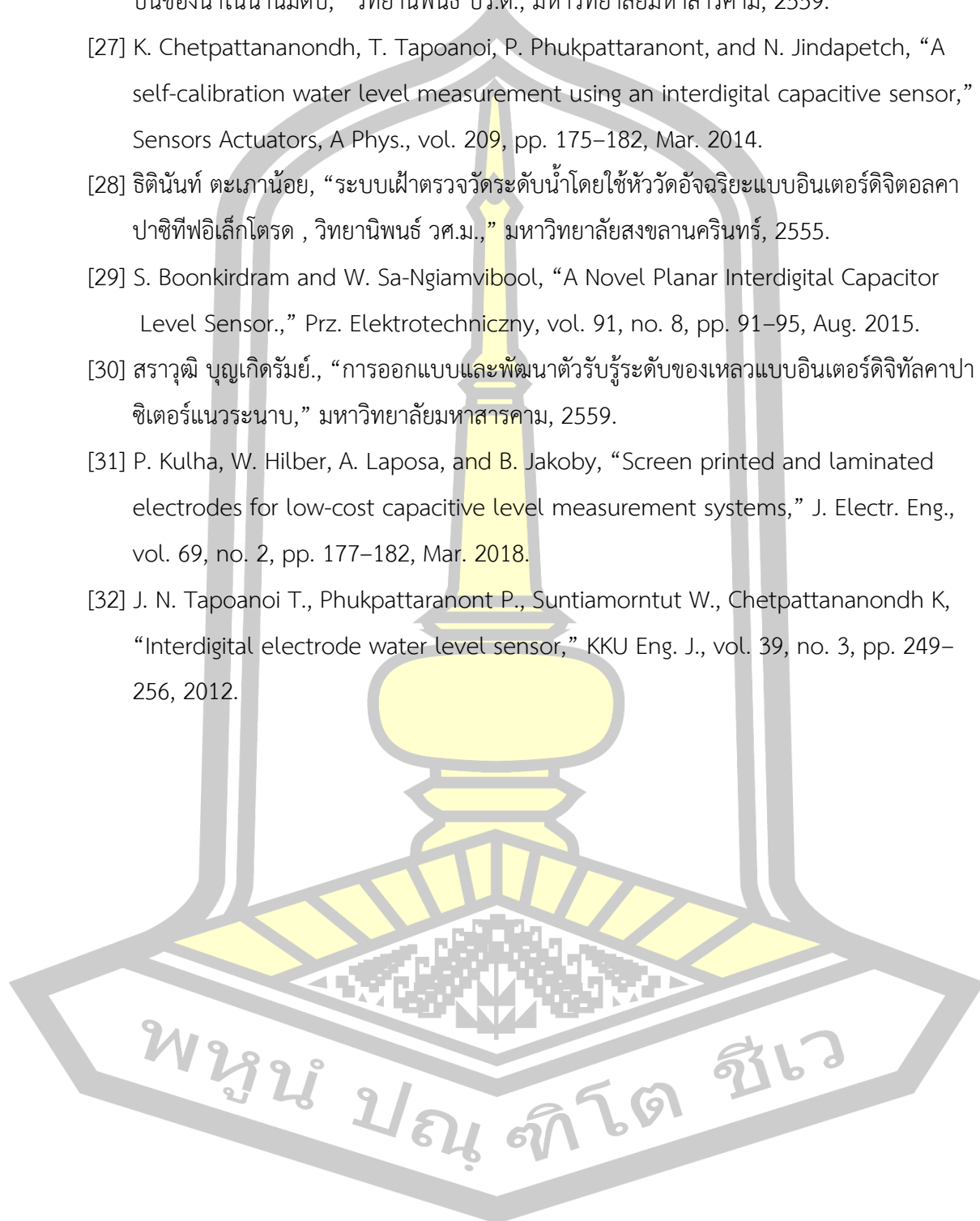


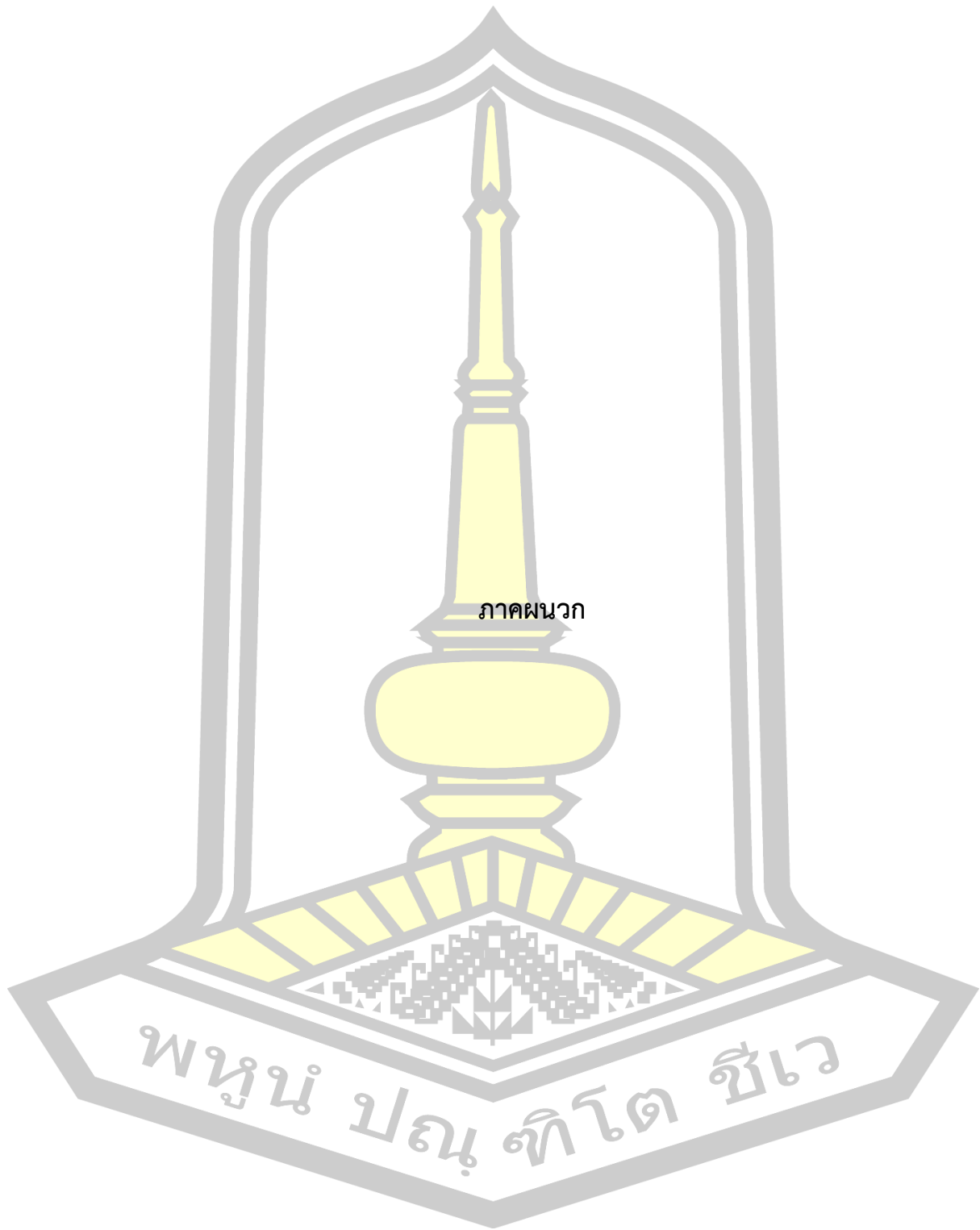
พหุจน์ ปณฺ ทิโต สีเว

- [1] “สถาบันวิชาชีพวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ IEEE.” [Online]. Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/IEEE>.
- [2] พรจิต ประทุมสุวรรณ, เครื่องมือวัดอุตสาหกรรม เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์. กรุงเทพฯ: เรือนแก้วการพิมพ์, 2537.
- [3] กิตติวุฒิ จินนะบุตร, เครื่องมือวัดและการวัดทางไฟฟ้า. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, 2548.
- [4] วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์, เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์. กรุงเทพฯ: ที.เอส.บี. โปรดักส์, 2548.
- [5] สมนึก บุญพาไสว, “ตัวรับรู้และทรานสดิวเซอร์,” 2549. [Online]. Available: <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/PDF-learning/4/PDF-science/Sensor-transducer.pdf%0A>.
- [6] J. P. Bently, Principles of Measurement Systems, 3rd ed. Singapore: Longman Singapore Publishe (pte) Ltd., 1995.
- [7] M. N. O. Alexander, Charles K. and Sadiku, Fundamentals of Electric Circuits, 4th ed. New York ,USA: McGraw-Hill., 2009.
- [8] บุญสืบ โพธิ์ศรี, งานไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมอาชีพ, 2550.
- [9] C. A. Ong, K.G., Grimes, “A resonant print-circuit sensor for remote query monitoring of environmental parameters,” Smart Matererials Struct., vol. 9, no. 4, pp. 421-428., 2000.
- [10] บุญชม ศรีสะอาด, วิธีทางสถิติสำหรับการวิจัย 1. กรุงเทพฯ: สุวีริยาสาส์น, 2541.
- [11] A. V. Mamishev, K. Sundara-Rajan, F. Yang, Y. Du, and M. Zahn, “Interdigital sensors and transducers,” in Proceedings of the IEEE, 2004, vol. 92, no. 5, pp. 808–844.
- [12] X. Hu and W. Yang, “Planar capacitive sensors - Designs and applications,” Sens. Rev., vol. 30, no. 1, pp. 24–39, 2010.
- [13] B. Kumar, G. Rajita, and N. Mandal, “A review on capacitive-type sensor for measurement of height of liquid level,” Measurement and Control (United Kingdom), vol. 47, no. 7. SAGE Publications Ltd, pp. 219–224, 08-Sep-2014.
- [14] H. Canbolat, “A novel level measurement technique using tree capacitive sensors for liquids,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 58, no. 10, pp. 3762–3768, 2009.

- [15] ศุภกร กตาทิการกุล และ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์, “การวัดระดับน้ำโดยใช้เทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก,” วิศวกรรมสาร มข., vol. 38, no. 2, pp. 179–186, 2554.
- [16] F. Reverter, X. Li, and G. C. M. Meijer, “Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 138, no. 1, pp. 1–8, Jul. 2007.
- [17] K. Loizou and E. Koutroulis, “Water level sensing: State of the art review and performance evaluation of a low-cost measurement system,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 89, pp. 204–214, Jul. 2016.
- [18] M. Toghiani Rizi and M. H. Shahrokh Abadi, “Analytical modeling of a coaxial cylindrical probe capacitive sensor based on MATLAB/Simulink for conductive liquids level measurements,” *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 25, no. 4, pp. 3024–3036, 2017.
- [19] ศุภกร กตาทิการกุล, สุเจนต์ พรหมเหมือน , สุวิทย์ เพชรห้วยลึกและ ปิติ พานิชายุนนท์ , “เครื่องมือวัดปริมาณน้ำฝนโดยเทคนิคการวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก,” in *ประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยทักษิณ*, 2555.
- [20] R. H. Bhuiyan, R. A. Dougal, and M. Ali, “Proximity coupled interdigitated sensors to detect insulation damage in power system cables,” *IEEE Sens. J.*, vol. 7, no. 12, pp. 1589–1596, Dec. 2007.
- [21] M. N. Alam, R. H. Bhuiyan, R. A. Dougal, and M. Ali, “Concrete moisture content measurement using interdigitated near-field sensors,” *IEEE Sens. J.*, vol. 10, no. 7, pp. 1243–1248, 2010.
- [22] N. Angkawisittpan and T. Manasri, “Determination of sugar content in sugar solutions using interdigital capacitor sensor,” *Measurement Science Review*, vol. 12, no. 1, pp. 8–13, 2012.
- [23] สิทธิศักดิ์ เรืองฤทธิ์, “การตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำนมดิบโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์หวี,” *วิทยานิพนธ์ วศ.ม.*, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2557.
- [24] สิทธิศักดิ์ เรืองฤทธิ์ นิวัฒน์ อังควิศิษฐพันธ์ และรววัฒน์ เสี่ยงวิบูล, “การตรวจสอบการปนน้ำในน้ำนมดิบโดยอิเล็กทรอนิกส์หวี,” *วารสารวิชาการและการวิจัยมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลพระนคร*, vol. ฉบับพิเศษ, pp. 89–95, 2556.
- [25] S. Phimpisan and W. Sa-ngiamvibool, “v,” *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 91, no. 9, pp. 265–267, Aug. 2015.

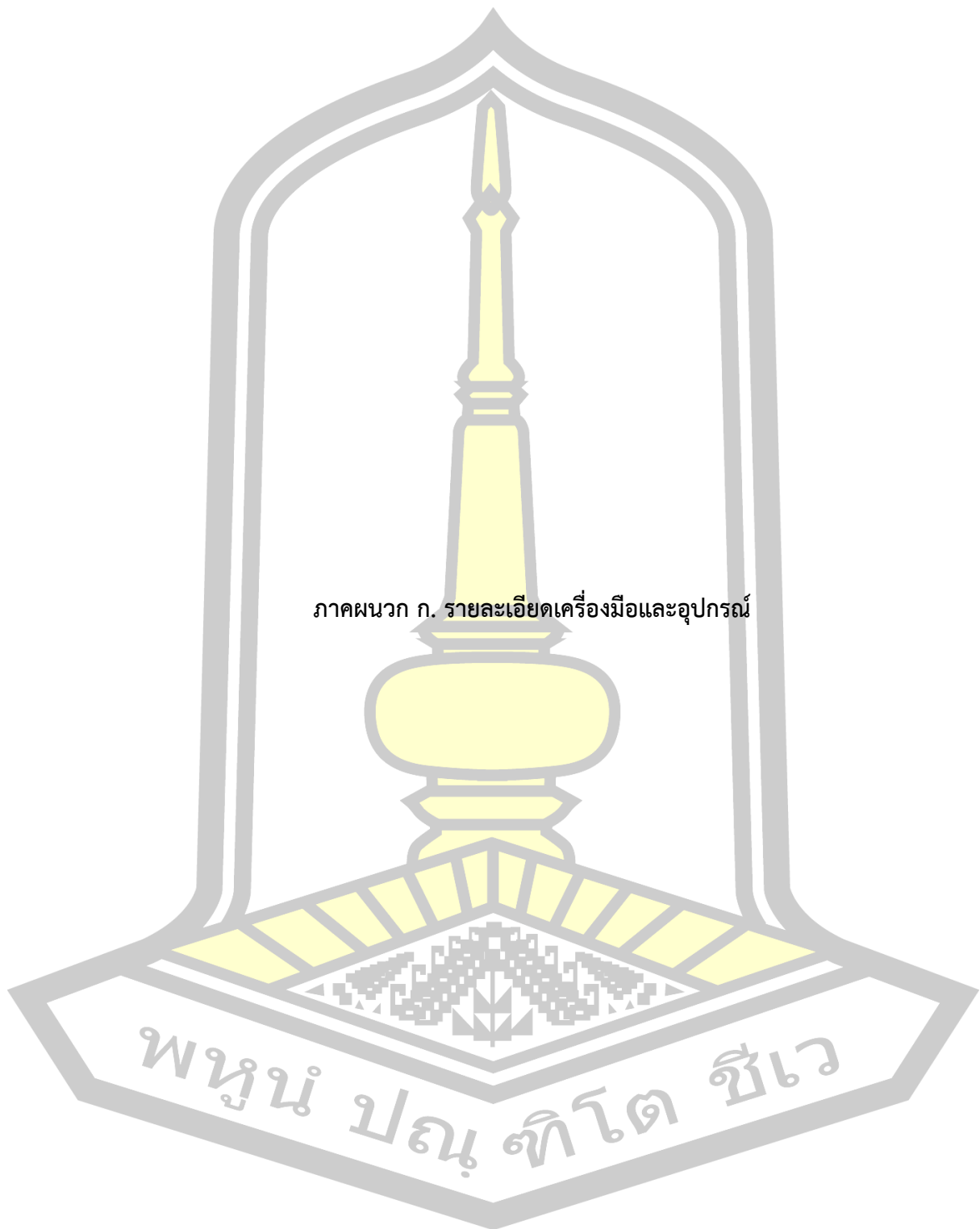
- [26] ทรงกรต พิมพิศาล, “การประยุกต์ใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าสำหรับการประมาณค่าปริมาณการเจือปนของน้ำในน้ำมันดิบ,” วิทยานิพนธ์ ปร.ด., มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2559.
- [27] K. Chetpattananondh, T. Tapoanoi, P. Phukpattaranont, and N. Jindapetch, “A self-calibration water level measurement using an interdigital capacitive sensor,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 209, pp. 175–182, Mar. 2014.
- [28] ธิตินันท์ ตะพานน้อย, “ระบบฝ้าตรวจวัดระดับน้ำโดยใช้หัววัดอัจฉริยะแบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิทีฟอิเล็กโทรด , วิทยานิพนธ์ วศ.ม.,” มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2555.
- [29] S. Boonkirdram and W. Sa-Ngiamvibool, “A Novel Planar Interdigital Capacitor Level Sensor.,” *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 91, no. 8, pp. 91–95, Aug. 2015.
- [30] สราวุฒิ บุญเกิดรัมย์., “การออกแบบและพัฒนาตัวรับรู้ระดับของเหลวแบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ,” มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2559.
- [31] P. Kulha, W. Hilber, A. Laposa, and B. Jakoby, “Screen printed and laminated electrodes for low-cost capacitive level measurement systems,” *J. Electr. Eng.*, vol. 69, no. 2, pp. 177–182, Mar. 2018.
- [32] J. N. Tapoanoi T., Phukpattaranont P., Suntiamorntut W., Chetpattananondh K, “Interdigital electrode water level sensor,” *KKU Eng. J.*, vol. 39, no. 3, pp. 249–256, 2012.





ภาคผนวก

พหุณฺ์ ปณฺุ ทิโต ชีเว



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	AABUS	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

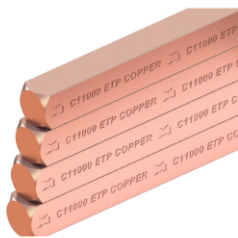
Data Sheet

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 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
O:	0.04(nom)	
<small>⁽¹⁾ Cu value includes Ag</small>		

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-II		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.**

ศูนย์ ปรณุ ทิโต

HIGH PRECISION LCR METER



LCR-821 (12Hz~200kHz)
LCR-819/829 (12Hz~100kHz)
LCR-817/827 (12Hz~10kHz)
LCR-816/826(100Hz~2kHz)



FEATURES

- * Test Frequency:
 - 12Hz~200kHz (LCR-821)
 - 12Hz~100kHz (LCR-819/829)
 - 12Hz~10kHz (LCR-817/827)
 - 100Hz~2kHz (LCR-816/826)
- * 0.05~0.1% Measurement Accuracy
- * 100 Sets Memory for Save/Recall of Settings
- * R/Q, C/D, C/R, L/Q Test Modes for all Models;
Z/θ, L/R for LCR-821 Only
- * Absolute Value, Δ Value, and Δ % Measurement Display
- * 240 x 128 dot Matrix LCD Display
- * Displays Condition and Test Result Simultaneously
- * Interface : RS-232C (LCR-821/819/817/816)
Handler (LCR-829/827/826)

The LCR-800 Series are high-end digital LCR meters for component/material measurements, applicable to various R&D activities and assembly lines. The large 240 x 128 dot matrix LCD display provides ample room for two measurement items and setup parameters allowing you to grasp measurement results quickly. All test modes are able to measure supplementary factors such as, R/Q, C/D, C/R, and L/Q. The LCR-821 also contains precise resistance measurements as a combination of absolute value and phase angle. 100 sets of measurement setup memory allow sharing a single unit among multiple testing conditions or sites. For a better viewing experience with a standard PC monitor, proprietary Windows based software is accessible via the RS-232C terminal. The handler interface is also a standard feature for LCR-826/827/829.

SPECIFICATIONS

TEST FREQUENCY	
	12Hz ~ 200kHz (504 steps) for LCR-821 12Hz ~ 100kHz(503 steps) for LCR-819/829 12Hz ~ 10kHz(489 steps) for LCR-817/827 100Hz ~ 2kHz (245 steps) for LCR-816/826
BASIC ACCURACY (*)	
	0.05% for basic accuracy for LCR-821/819/817 0.1% for basic accuracy for LCR-829/827/826/816
TEST SPEED	
	68ms for LCR-821/819/817/816, 34ms for LCR-829/827/826
TEST SIGNAL LEVELS	
	5mV ~ 1.275Vrms (5mV/step) for LCR-821/819/829/817/827 0.1V ~ 1.275Vrms (5mV/step)for LCR-816/826
DC BIAS	
Internal	2V
External	0 ~ 35V for LCR-821; 0 ~ 30V for LCR-819/829/817/827/816/826
DISPLAY RANGE (**)	
Resistance	R 0.00001Ω ~ 99999kΩ
Capacitance	C 0.00001pF ~ 99999μF
Inductance	L 0.00001mH ~ 99999H
Quality Factor	Q 0.0001 ~ 9999
Dissipation Factor	D 0.0001 ~ 9999
Impedance	Z 0.00001Ω ~ 99999k for LCR-821
Phase Angle (Degree)	θ -180.00° ~ 180.00° for LCR-821
TEST MODE	
	R/Q, C/D, C/R, L/Q Z/θ, L/R for LCR-821 only
EQUIVALENT CIRCUIT	
	Parallel or series selectable
MEMORY	
	100 memory blocks total
AVERAGE	
	1 to 255 times
TEST SPEED MODE	
	SLOW, MEDIUM and FAST
DISPLAY MODE	
	Value, Δ, Δ %
DISPLAY	
	240x128 dot matrix C.C.F.L back light LCD
INTERFACE	
	Standard Interface : RS-232C for LCR-821 Standard Interface : Handler Interface for LCR-829/827/826 Optional : RS-232C Interface for LCR-819/817/816 (factory installed) (Including LCR-Viewer Software)
POWER SOURCE	
Line Voltage Range	AC 100V ~ 240V , 47 ~ 63/400Hz
DIMENSIONS & WEIGHT	
	322 (W) x 149 (H) x 433 (D)mm, Approx. 5.5kg

(*) : Basic accuracy varies with the speed, frequency, AC signal level and impedance of the DUT.

(**) : Display range refers to the range of measurement values that can be displayed on the screen.
Please see the LCR-800 user manual for the effective measurement ranges.



LCR-821

LCR-800 SERIES SELECTION GUIDE							
MODEL	LCR-821	LCR-819	LCR-829	LCR-817	LCR-827	LCR-816	LCR-826
Display	240 x 128 dot matrix CCFL back light LCD						
Test Frequency	12Hz~200kHz (504 steps)	12Hz~100kHz (503 steps)		12Hz~10kHz (489 steps)		100Hz~2kHz (245 steps)	
Basic Accuracy	0.05%	0.05%	0.1%	0.05%	0.1%		0.1%
Test Mode	R/Q, C/D, C/R L/Q, Z/θ, L/R	R/Q, C/D, C/R, L/Q		R/Q, C/D, C/R, L/Q		R/Q, C/D, C/R, L/Q	
Memory	100 memory blocks totally						
DC BIAS	Internal	2V	2V	2V	2V	2V	2V
	External	0~35V	0~30V		0~30V		0~30V
Interface	RS-232	Std.	Opt.		Opt.		Opt.
	Handler			Std.		Std.	Std.

ORDERING INFORMATION

- LCR-821** 200kHz High Precision LCR Meter with RS-232 Interface
- LCR-819** 100kHz High Precision LCR Meter
- LCR-829** 100kHz High Precision LCR Meter with Handler Interface
- LCR-817** 10kHz High Precision LCR Meter
- LCR-827** 10kHz High Precision LCR Meter with Handler Interface
- LCR-816** 2kHz High Precision LCR Meter
- LCR-826** 2kHz High Precision LCR Meter with Handler Interface

ACCESSORIES :
User manual x 1, Power cord x1, LCR-06A x 1

OPTION

Opt.01 RS-232C Interface (Factory Installed)

OPTIONAL ACCESSORIES

- LCR-05** Test Fixture for Axial & Radial Leaded Components
- LCR-06A** Kelvin Clip Test Lead
- LCR-07** Test Fixture, Two-Wire with Alligator Clips
- LCR-08** Test Fixture(Tweezers) for SMD/Chip Components
- LCR-09** Test Fixture for SMD/Chip Components
- LCR-13** Test Fixture for SMD/Chip Components
- GRA-402** Rack Adapter Panel, Rack Mounting (19", 4U)
- GTL-232** RS232C Cable, 9-pin Female to 9-pin, null Modem for Computer
- GTC-001** Instrument Cart
- GTC-002** Instrument Cart

FREE DOWNLOAD

PC Software LCR-Viewer

LCR-821 Rear Panel



LCR-829 Rear Panel



LCR-819 Rear Panel



LCR-06A



Description:
Kelvin clip test leads.
Frequency: DC to 1MHz
Max. Voltage: +/- 35V

LCR-05

Patent:185538



Description:
Test fixture for measurement of both axial and vertical lead components
Frequency: DC to 1MHz
Max. Voltage: +/- 35V

LCR-07



Description:
Test leads for conventional component measurement. It is especially useful for high impedance measurement. (With alligator clips)
Two-wire measurement; apply to low C or high R.
Frequency: DC to 1MHz
Max. Voltage: +/- 35V

LCR-08

Patent:188540



Description:
SMD / clip tweezers
Frequency: DC to 1MHz
Max. Voltage: +/- 35V

LCR-09

Patent:186171



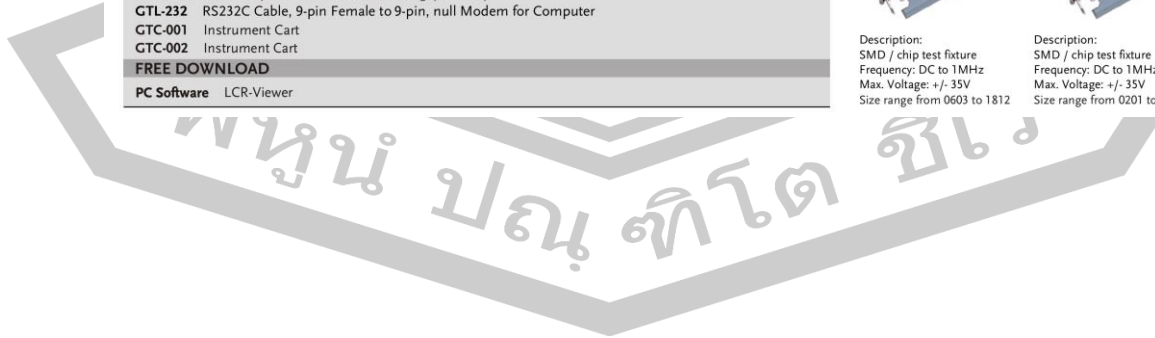
Description:
SMD / chip test fixture
Frequency: DC to 1MHz
Max. Voltage: +/- 35V
Size range from 0603 to 1812

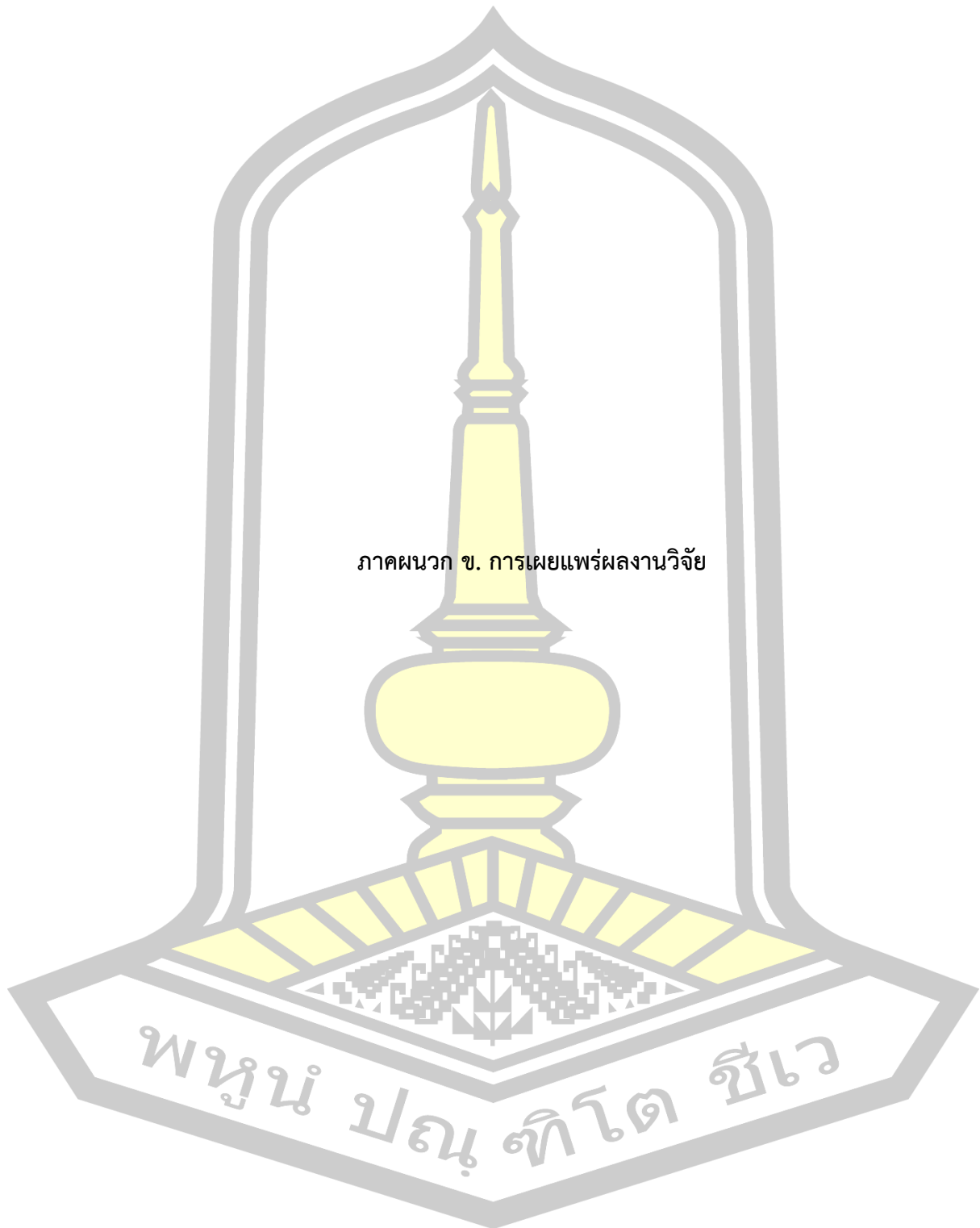
LCR-13

Patent:186171



Description:
SMD / chip test fixture
Frequency: DC to 1MHz
Max. Voltage: +/- 35V
Size range from 0201 to 0805





ภาคผนวก ข. การเผยแพร่ผลงานวิจัย

พหุ ประจักษ์ โท ชีวะ

ผู้วิจัยได้ส่งบทความชื่อเรื่อง

“The Non-Substrate Interdigital Capacitor Level Sensor”

ไปที่วารสาร Przegląd Elektrotechniczny อยู่ในฐานข้อมูลวารสารนานาชาติ

Web of Science and SCOPUS ISSN 0033-2097, e-ISSN 2449-9544

ได้รับการตอบรับบทความเมื่อวันที่ 29 มิถุนายน 2563 และได้รับการตีพิมพ์ในฉบับ

เดือนกันยายน 2563 R. 96 , NR.9 , 2020 Page 34 – 37

doi:10.15199/48.2020.09.07



doi:10.15199/48.2020.09.07

The Non-Substrate Interdigital Capacitor Level Sensor

Abstract. This paper presents the non-substrate interdigital capacitor level sensor. The interdigital capacitor level sensor is designed and fabricated to be two types that are the fabricated with an epoxy substrate and with none substrate. Each type is separated to be 6 models that are designed with difference dimensions of the width, the gap and the length of the hard copper (H04) lines circuit for comparing and obtaining the high linearity model. The fabricated with none substrate can sense the maximum capacitance of 877.56 nF that is higher than the maximum capacitance of the sensor with substrate of 341.12 nF. The higher range of the capacitance of the circuit with none substrate, provides the wide range to sense the water level with high accuracy that is suitable to develop to be the standard level sensor in the future.

Streszczenie. W artykule opisano czujnik pojemnościowy bez podłoża. Czujnik analizowano dla różnych geometrii miedzianego meandra Czujnik może być wykorzystywany do pomiaru poziomu wody. **Projekt pojemnościowego czujnika poziomu wody**

Keywords: Interdigital Capacitor, Level Sensor, Non-Substrate .

Słowa kluczowe: czujnik pojemnościowy, czujnik poziomu wody.

Introduction

Nowadays the development of the reception for water measure machine spread all over the industrial field, meteorology, and environment to analyze such as the humidity in air, liquid measurement, water quality, etc. These are necessary for developing the receptor to be used in those works. Interdigital Electrode Capacitor [1-3] is one of the interesting receptors due to the simple design and uncomplicated which is the measurement of the value of capacitor increasing in accordance with the height of liquid. Then, convert the capacitor value to interpreted and measure the desired volume

Firstly, from the literature review of the research on the development of the receptors which have been developed in many forms such as the capacitance measurement of liquid by using the long metal or large sheet [4-5] and the development of capacitance measurement in cylinder shape [6-9]. Some researchers had developed the receptor which is Interdigital Electrode Capacitor (IDC) used in measuring the humidity of soil, the resistant of electric wire, and the humidity in concrete [10-11], measuring percentage of the sugar concentration [12], and the level of liquid: water or milk [13-18]. Since, the undesirable IDC of these mentioned research are designed on the print circuit board (PCB) with substrate. This substrate causes the least value of capacitance in the unprecise scale. Particularly, Interdigital Electrode Capacitor Level Sensor, the liquid surface will not touch all areas of receptor on the other side. Therefore, the Non-Substrate Interdigital Capacitor Level Sensor is more precisely and could apply with the precise works in the future.

The Interdigital Capacitor Level Sensor uses the principle of the parallel of copper line circuit which have anode and cathode. The number of copper line circuit which is increased in parallel will make the capacitance increase as well.

The typical design of Interdigital Capacitor Level Sensor as shown the structure in Figure 1 starts from find the C_{PU} in equation 1 and 2 which has the component ϵ_0 is permittivity of free space ($8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$), ϵ_1 is the relative permittivity of the material under test, ϵ_2 is the relative permittivity of material between electrodes and ϵ_3 is the relative permittivity of the PCB substrate. $K(x)$ is elliptic integral of the first kind and a is the width size of segment b , which is the duration of the segments. Finding the total capacitors of Interdigital Capacitor Level Sensor in equation 3 including L is the length of segment and N is the number of segments. [12]

$$(1) \quad C_{PU} = \epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2} \right) \frac{K(\sqrt{1-(x)^2})}{K(x)} + \epsilon_0 \epsilon_2 \frac{h}{a}$$

$$(2) \quad x = \frac{a}{b}$$

$$(3) \quad C = C_{PU} (N-1) L_1$$

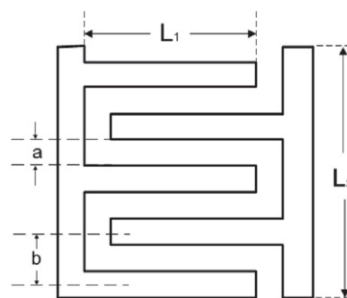


Fig.1. Structure of Interdigital Capacitor Level Sensor

The researcher has designed the origin of Interdigital Capacitor Level Sensor to calculate and put the number in equation (1-2) to find the capacitor with parameters, $h=0.105$ mm, $a=2$ mm, $b=2$ mm, $L=15$ mm and $N=20$. The free space permittivity $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$, and the relative permittivity of substrate (Epoxy) $\epsilon_3 = 4.6$. The total calculated capacitance is 0.2789 pF. If there is the measurement of water level, it will have the electric value more than the air in eightyfold and will change the capacitors based on the touch between copper sheet and the water level.

Experimental method

For the design of experiment, there will be two main parts to compare the capacitor which one is the capacitance measurement with Epoxy the relative permittivity of substance $\epsilon_3 = 4.6$, the density of copper is $h=0.105$ mm as shown in Fig. 2 for 6 models that has the difference in size of a , b , and L in Table 1.

Another part is the capacitance measurement without epoxy substrate. The density of hard copper (H04) is $h = 0.105$ mm as shown in Fig. 3 for 6 models in Table 2 with the various size of a , b , and L as shown in Table 2.

Table.1. the IDC level sensor has a variety length, width and space difference with epoxy substrate.

IDC model	b (mm.)	a (mm.)	L (mm.)
1	2	1	15
2	2	2	15
3	3	1	15
4	2	1	10
5	2	2	10
6	3	1	10



Fig.2. The fabricated the novel IDC level sensor with epoxy substrate .

Table.2. Table of the IDC level sensor has a variety length, width and space difference with non epoxy substrate .

IDC model	b (mm.)	a (mm.)	L (mm.)
1	2	1	15
2	2	2	15
3	3	1	15
4	2	1	10
5	2	2	10
6	3	1	10



Fig.3. The fabricated IDC level sensor with non-substrate .

Then, calculating the capacitor with epoxy substrate of 6 models as Table 1 and without epoxy substrate of 6 models in Table 2 by using LCR Meter (GW instek LCR – 817) which the attribution of measurement accuracy is 0.05%. Includes Kelvin Clip Leads. The experimental method used the parallel mode which each model will be measured the values from 0-80 mm by the each time is 5 mm, 16 periods in total. Calculating each 3 period repeatedly to find the best capacitor values, as shown in Fig. 4.

The second part to use Interdigital Capacitor Level Sensor by choosing the high linearity model which has a = 2 mm, b=2 mm and L=15 mm with epoxy substrate and without epoxy substrate. The method is using the sensor

through extended module LM393 and interpreting through microcontroller from Serial Monitor in order to compare with LCR Meter with each model will measure from 0-80 mm with each 5 mm of periods for 16 times in total and measure repeatedly in each 3 periods to find the capacitance values, as shown in Fig. 5



Fig.4. The measurement setup for IDC level sensor.

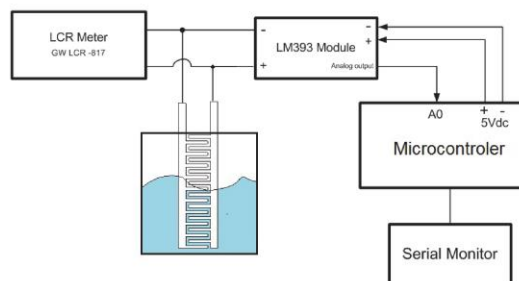


Fig.5. The novel IDC level sensor system with microcontroller

Results and Discussion

For the first part of experiment with epoxy substrate 6 models in Table 2, the first model has the capacitance value of 0.12- 488.21 nF where the correlation coefficient (R^2) is 0.966. The second model has the capacitance value of 0.28 – 355.87 nF where the correlation coefficient (R^2) is 0.973. The third model has the capacitance value of 0.11 – 536.44 nF where the correlation coefficient (R^2) is 0.982. The fourth model has the capacitance value of 0.13-210.21 nF where the correlation coefficient (R^2) is 0.982. The fifth model has the capacitance value of 0.27-168.87 where the correlation coefficient (R^2) is 0.987. The sixth model has the capacitance value of 0.16 – 225.44 nF where the correlation coefficient (R^2) is 0.988, as shown in Fig. 6.

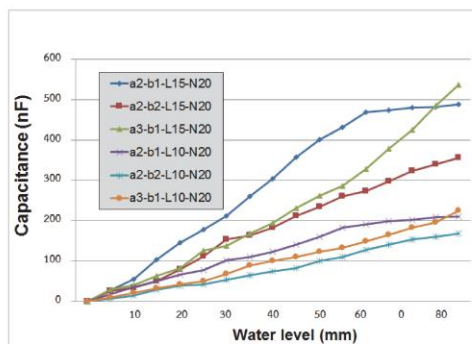


Fig.6. Experiments result of the capacitance measurement using the sensor with epoxy substrate of the 6 models

The result of the experiment with non-substrate 6 models is in Table 2. The first model has the capacitance value of 0.12- 753.81 nF and where the correlation coefficient (R^2) is 0.967. The second model has the capacitance value of 0.87 – 658.56 nF and where the correlation coefficient (R^2) is 0.997. The 3rd model has the capacitance value of 0.16 – 877.56 nF and where the correlation coefficient (R^2) is 0.994. The 4th model has the capacitance value of 1.03 – 442.56 nF and where the correlation coefficient (R^2) is 0.982. The 5th model has the capacitance value of 0.27-168.87 and where the correlation coefficient (R^2) is 0.981. The 6th model has the capacitance value of 0.26 – 531.28 nF and where the correlation coefficient (R^2) is 0.977 as shown in Fig. 7.

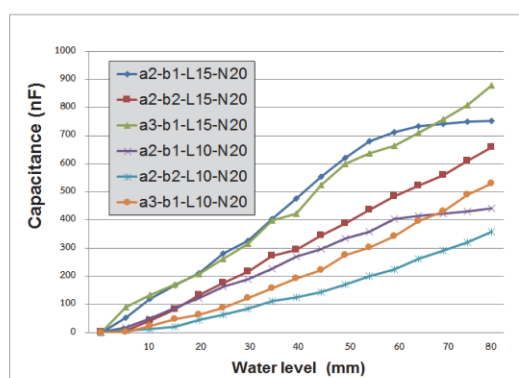


Fig.7. Experiments result of the capacitance measurement using the sensor with non-substrate of the 6 models

Table.3. Experiments result of the capacitance measurement using the sensor with epoxy substrate and non-substrate

IDC model	a (mm.)	b (mm.)	L (mm.)	Capacitive(Max) Substrate	Capacitive(Max) Non Substrate
1	2	1	15	488.21 nF	753.81 nF
2	2	2	15	355.87 nF	658.56 nF
3	3	1	15	536.44 nF	877.56 nF
4	2	1	10	210.21 nF	442.56 nF
5	2	2	10	168.87 nF	358.56 nF
6	3	1	10	225.44 nF	531.28 nF

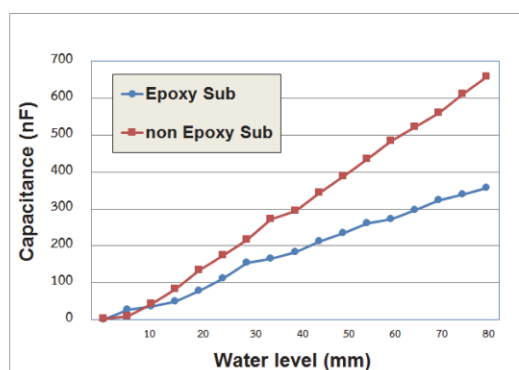


Fig.8. The comparison of the model with epoxy substrate and non-substrate of the 2nd model (a=2mm,b=2mm ,L=15mm)

From the result of experiment of 2nd model (a = 2 mm ,b=2 mm and L=15 mm) with Epoxy board and without printed circuit board, comparing the capacitor values is shown in Fig. 8 that the model with Epoxy board has the

capacitance value of 0.67 – 355.87 nF and where the correlation coefficient (R^2) is 0.997 and model without board has the capacitance value of 0.87 – 658.56 nF and where the correlation coefficient (R^2) is 0.994. Thus, the distance of capacitor values from maximum is 80 mm at 302.69 nF.

The result of the part two experiment of the comparison between the capacitor values from micro-controller and LCR Meter with with epoxy substrate and non-substrate of the 2nd model (a=2mm,b=2mm ,L=15mm) is shown in Fig.10. The model with epoxy substrate has the capacitor values of 0-320.45 nF from micro-controller and where the correlation coefficient (R^2) is 0.995 from LCR Meter is 0.67 – 355.87 nF and where the correlation coefficient (R^2) is 0.997. For the model non-substrate, the capacitor value of 0 – 620.45 nF from micro-controller and where the correlation coefficient (R^2) is 0.995 and from LCR Meter is 0.17-658.356 nF and where the correlation coefficient (R^2) is 0.985.

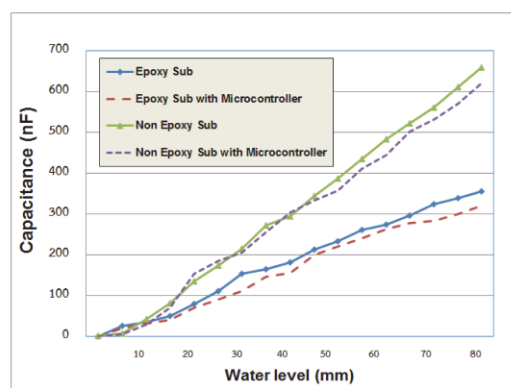


Fig.9. The comparison of the capacitor value from the micro-controller and LCR Meter with Epoxy board and without board in the 2nd model (a=2mm,b=2mm ,L=15mm)

According to the experiments, the Non-Substrate Interdigital Capacitor Level Sensor can be applied with micro-controller and be converted to precise value because it has the increased capacitor value with board up to 302.69 nF. Therefore, it could extend the area to precisely measure water level.

Conclusions

This research shows the Non-Substrate Interdigital Capacitor Level Sensor which the result of the experiment has the maximum value at 877.56 nF. It causes the increasing capacitor values with board up to 302.69 nF and could be extended the area of water level for accurate and precise data. Also, it can apply with the micro-controller and can develop this into the standard of water level measurement and connect to the internet network IOT in the future.

Authors:

Jagrathon OBMA, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Tambon Khamriang, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150 Thailand.

e-mail : jagrathon.ob@rmuti.ac.th

Assoc.Prof.Worawat Sa-ngiamvibool, Ph.D., Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Tambon Khamriang, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150 Thailand.

e-mail : worawat.s@msu.ac.th (Corresponding Author)

REFERENCES

- [1] MAMISHEV A., Interdigital Sensors and Transducers, *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, 92 (2004), no 5, 808-845
- [2] Hu X., Yang W., Planar capacitive sensors – designs and applications, *Sensor Review*, 30 (2010), no 1, 24-39
- [3] Kumar B., A Review on Capacitive-Type Sensor for Measurement of Height of Liquid Level, *Measurement and Control*, 347 (2014), no 7, 219-224
- [4] Georgi N., Boyanka N., A Novel Liquid Level Detection Method and its Implementation, *Sensors and Actuators A ScienceDirect.*, 109 (2008), No. 1, 21-24
- [5] Canbolat H., Pike G.E., A Novel Level Measurement Technique Using Three Capacitive Sensors for Liquids, *IEEE Trans. INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT.*, 58 (2009), No. 10, 3762-3768
- [6] katathikamkul S. , Chetpattananondh K., Water Level Measurement using Semicylindrical Capacitance measurement Technique, *KKU Engineering Journal*, 38 (2002), no 2, 179-186
- [7] Reverter F., Li X., Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor, *Sensors and Actuators A.*, 58 (2007), No. 138, 1-8
- [8] Loizou K., Koutroulis E., Water level sensing: State of the art review and performance evaluation of a low-cost measurement system, *Measurement ScienceDirect*, 89 (2016), 204-214
- [9] RIZI M. , ABADI M., Analytical modeling of a coaxial cylindrical probe capacitive sensor based on MATLAB/Simulink for conductive liquids level measurements, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25 (2017), 3024-3036
- [10] Bhuiyan R., Dougal R., Ali M., Proximity Coupled Interdigitated Sensors to Detect Insulation Damage in Power System Cables, *IEEE SENSORS JOURNAL*, 7 (2007), No.12 , 1598-1596
- [11] Alam N., Bhuiyan R., Dougal R., Concrete Moisture Content Measurement Using Interdigitated Near-Field Sensors, *IEEE SENSORS JOURNAL.*, 10 (2010), No. 1, 1243-1248
- [12] Angkawisitpan N., Manasri T., Determination of Sugar Content in Sugar Solutions using Interdigital Capacitor Sensor, *MEASUREMENT SCIENCE REVIEW.*, 12 (2012), No. 1, 8-13
- [13] Tan Q., Yang M., Luo T., Liu W., Li C., Xue C., Liu J., Zhang W. And Xiong J., A Novel Interdigital Capacitor Pressure Sensor Based on LTCC Technology, *Journal of Sensors Hindawi Publishing Corporation.*, (2014), 1-6
- [14] Tapoanoi T., Phukpattaranont P., Suntiamorntut W., Chetpattananondh K, Jindapetch N., Interdigital electrode water level sensor, *KKU ENGINEERING JOURNAL* , 39 (2012), no 3, 249-256
- [15] Chetpattananondh K., Tapoanoi T., Phukpattaranont P., Jindapetch N. , A self-calibration water level measurement using an interdigital capacitive sensor, *Sensors and Actuators ScienceDirect*, 209 (2014), no 5, 175-182
- [16] Boonkirdram S., Sa-ngiamvibool W., A Novel Planar Interdigital Capacitor Level Sensor, *Przeegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr 8, 125-128
- [17] Phimpisan S., Sa-ngiamvibool W., Determination of Water added in Raw Milk using Interdigital Capacitor Sensor, *Przeegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr 9, 265-267
- [18] Kulha P., Hiber W., Laposa A., Jakoby B., Screen printed and laminated electrode for low-cost capacitive level measurement systems, *Journal of Electrical Engineering*, 69 (2018), no 2, 177-182



Web of Science

Web of Science Group **Master Journal List** Search Journals Match Manuscript Downloads Help Center Welcome, Jagraphon Obma
[Settings](#) [Log Out](#)

General Information

Web of Science Coverage

Peer Review Information

Return to Search Results

PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY [Share This Journal](#)

ISSN / eISSN **0033-2097 / 2449-9544**
 Publisher **WYDAWNICTWO SIGMA-N O T SP Z O O, UL RATUSZOWA 11, PO BOX 1004, WARSAW, POLAND, 00-950**

General Information

Journal Website	Visit Site	Publisher Website	Visit Site
Frequency	Monthly	Issues Per Year	12
Country / Region	POLAND		

Web of Science Coverage

Collection	Index	Category	Similar Journals
Core Collection	Emerging Sources Citation Index (ESCI)	Engineering, Electrical & Electronic Engineering	Find Similar Journals

Web of Science InCites Journal Citation Reports Essential Science Indicators EndNote Publons Kopernio Master Journal List Sign In Help English

Web of Science **Clarivate Analytics**

Search Search Results Tools Searches and alerts Search History Marked List

[Look Up Full Text](#)
[Full Text from Publisher](#)
[Export...](#)
[Add to Marked List](#)
7 of 6,557

The Non-Substrate Interdigital Capacitor Level Sensor

By: Obma, J (Obma, Jagraphon)^[1,2]; Sa-ngiamvibool, W (Sa-ngiamvibool, Worawat)^[1,2]

PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY
 Volume: 96 Issue: 9 Pages: 34-37
 DOI: 10.15199/48.2020.09.07
 Published: 2020
 Document Type: Article
[View Journal Impact](#)

Abstract
 This paper presents the non-substrate interdigital capacitor level sensor. The interdigital capacitor level sensor is designed and fabricated to be two types that are fabricated with an epoxy substrate and with none substrate. Each type is separated to be 6 models that are designed with difference dimensions of the width, the gap and the length of the hard copper (H04) lines circuit for comparing and obtaining the high linearity model. The fabricated with none substrate can sense the maximum capacitance of 877.56 nF that is higher than the maximum capacitance of the sensor with substrate of 341.12 nF. The higher range of the capacitance of the circuit with none substrate, provides the wide range to sense the water level with high accuracy that is suitable to develop to be the standard level sensor in the future.

Citation Network
 In Web of Science Core Collection

0

Times Cited

[Create Citation Alert](#)

18

Cited References

[View Related Records](#)

Use in Web of Science
 Web of Science Usage Count

SCOPUS

Scopus Preview Author search Sources [?](#) [🏠](#) [Create account](#) [Sign in](#)

Source details [Feedback](#) [Compare sources](#)

Przeгляд Elektrotechniczny

Open Access [🔗](#)

Scopus coverage years: from 1969 to 1984, from 2005 to Present

Publisher: Wydawnictwo SIGMA

ISSN: 0033-2097

Subject area: [Engineering: Electrical and Electronic Engineering](#)

[View all documents](#)
[Set document alert](#)
[Save to source list](#)
[Journal Homepage](#)

CiteScore 2019 [🔗](#)
0.8

SJR 2019 [🔗](#)
0.213

SNIIP 2019 [🔗](#)
0.449

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	จักรพนธ์ ออบมา
วันเกิด	24 มิถุนายน 2527
สถานที่เกิด	อำเภอ เมืองขอนแก่น จังหวัด ขอนแก่น
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	96/58 หมู่ 6 หมู่บ้านรุ่งเรืองแลนด์แอนด์เฮาส์ ตำบลพระลับ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	อาจารย์ (พนักงานในสถาบันอุดมศึกษาสายวิชาการ)
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และ โทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น พ.ศ.2553 ประกาศนียบัตรบัณฑิต (ป.บัณฑิต) วิชาซีพครู มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร พ.ศ.2555 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) วิศวกรรมไฟฟ้า และคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ.2564 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูนัน ปณฺ ทิโต ชีเว