



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิทัล  
System Development for Seafood Quality Inspection Using Interdigital sensor

นาย อมต หลวงพล

นาย อภินัย ฤกษ์รัตน์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิทัล  
System Development for Seafood Quality Inspection Using Interdigital sensor

นาย อมต หลวงพล

นาย อภินัย ฤกษ์รัตน์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) “การพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเทอร์  
ดิจิตอล”

แหล่งเงิน

งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2559 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 399,000.- บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2558 ถึง กันยายน 2559

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ

นาย อมต หลวงพล

ชื่อ-สกุล ผู้ร่วมวิจัย

นาย อภินัย ฤกษ์รัตน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 02-329-8341 โทรสาร 02-329-8343

E-mail : klamata@kmitl.ac.th, apinai@gmail.com

**บทคัดย่อ**

โครงการวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเทอร์  
ดิจิตอล โดยระบบที่สร้างขึ้นมาจะประกอบไปด้วย วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน  
เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล วงจรขยายสัญญาณ วงจรเรียงกระแส วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรเปรียบเทียบแรงดัน  
และวงจรแสดงผล จากผลการทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นมากับของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล ผลปรากฏว่าระบบที่  
พัฒนาขึ้นมาสามารถแยกแยะของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลปกติและของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลเมื่อเริ่ม  
มีการเปลี่ยนสภาพได้ ซึ่งจากเทคนิคที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการเปลี่ยนสภาพของอาหาร  
ทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล

**คำสำคัญ :** การตรวจสอบคุณภาพ, อาหารทะเล, เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: “System Development for Seafood Quality Inspection Using Interdigital sensor”

Researcher: Mr. Amata Luangpol and Mr. Apinai Rerkratn  
Faculty: Faculty of Engineering,  
King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang.

## ABSTRACT

This research project presents system development for seafood quality inspection using interdigital sensor. The proposed system consists of sine wave circuit, voltage control current source circuit, interdigital sensor, amplifier circuit, rectifier circuit, low-pass filter circuit, comparator circuit and display circuit. The liquid of normal chilled seafood and liquid of spoil chilled seafood are used for experiment. The experimental results shown that the proposed system can be applied to detect the change of seafood quality by using the interdigital sensor via liquid of chilled seafood.

**Keywords:** Quality Inspection, Seafood, Interdigital sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี ทางผู้วิจัยขอขอบพระคุณในความช่วยเหลือเป็นอย่างมากจาก อาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทั้งทางด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ ตลอดจนคำแนะนำและเอื้อเฟื้อข้อมูลต่างๆ สำหรับใช้ในการเขียนรายงานโครงการวิจัย

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำโครงการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณผู้แต่งและเอกสารอ้างอิงต่างๆ ที่ผู้วิจัยนำมาใช้อ้างอิงเพื่อทำการวิจัยและเขียนรายงานโครงการวิจัย

ขอขอบคุณสำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขรหัสโครงการ A118-59-002 ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

อมต หลวงพล

อภินิย ฤกษ์รัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	vii
สารบัญรูป.....	viii
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐานหรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่จะนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	3
1.6 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย.....	3
1.7 วิธีการดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล.....	4
1.8 ระยะเวลาที่ทำการวิจัยและแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย.....	4
1.9 ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเลโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ.....	6
2.2 การตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์ทางเคมี.....	8
2.3 การตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเลโดยใช้เทคนิคการตรวจวัดสี.....	10
2.4 การตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเลโดยใช้เทคนิคการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	11
2.5 การตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเลโดยใช้เทคนิคการวัดค่าไดอิเล็กทริก (Dielectric).....	12
2.6 บทสรุป.....	14
บทที่ 3 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล.....	15
3.1 การประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล.....	15
3.1.1 เซนเซอร์ทางเคมี (Chemical sensor).....	15
3.1.2 ไบโอสเซนเซอร์ (Biosensor).....	16
3.1.3 เซนเซอร์วัดความชื้น (humidity sensor).....	18
3.1.4 เซนเซอร์ทางด้านอาหาร (Food sensor) .....	20
3.1.5 เซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดสิ่งแวดล้อม (Environmental sensor).....	22

## สารบัญ

	หน้า
3.1.6 เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดคุณสมบัติของวัสดุ.....	24
3.1.7 เซนเซอร์สำหรับการตรวจจับขนาดและของเหลวขนาดเล็ก.....	26
3.2 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล.....	28
3.3 บทสรุป.....	29
<b>บทที่ 4 ระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล.....</b>	<b>30</b>
4.1 ส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic circuit).....	30
4.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ (Sine wave circuit).....	31
4.1.2 วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน.....	31
4.1.3 วงจรขยายสัญญาณ.....	32
4.1.4 วงจรเรียงกระแส.....	32
4.1.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	33
4.1.6 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน.....	33
4.1.7 วงจรแสดงผล.....	34
4.2 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล.....	34
4.2.1 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 1.....	35
4.2.2 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2.....	36
4.2.3 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 3.....	36
4.2.4 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 4.....	37
4.2.5 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 5.....	37
4.2.6 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 6.....	38
4.2.7 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 7.....	38
4.2.8 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 8.....	39
4.3 การสร้างต้นแบบเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล.....	39
4.3.1 การสร้างต้นแบบเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลโดยใช้เครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก.....	39
4.3.2 การสร้างต้นแบบเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลโดยใช้ฟิล์มแข็ง.....	46
<b>บทที่ 5 การทดสอบระบบ.....</b>	<b>54</b>
5.1 การวัดหาคุณสมบัติของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล.....	54
5.2 การทดสอบวัดคุณสมบัติของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลกับตัวอย่างอาหารทะเล.....	56
5.2.1 การทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลกับตัวอย่างอาหารทะเล.....	56

## สารบัญ

	หน้า
5.2.2 การทดสอบวัดคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลกับตัวอย่าง อาหารทะเล.....	60
5.3 การทดสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ.....	65
5.3.1 การทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์.....	65
5.3.2 การทดสอบสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล.....	65
5.3.3 การทดสอบสัญญาณที่ได้จากวงจรเรียงกระแส.....	67
5.3.4 การทดสอบสัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบแรงดัน.....	69
5.3.5 การทดสอบการติดตามการเปลี่ยนแปลงสภาพของอาหารทะเล.....	70
บทที่ 6 บทสรุป.....	72
บทที่ 7 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย.....	73
เอกสารอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก ก ระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล.....	77
ภาคผนวก ข ร่างบทความวิจัย.....	80
ภาคผนวก ค สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย.....	85
ภาคผนวก ง ข้อมูลประวัติผู้วิจัย.....	88

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	คุณสมบัติของแผ่นพีซีบีแบบ FR-4.....	35
4.2	คุณสมบัติที่สำคัญของเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก รุ่น Mini CNC1610.....	40
5.1	ผลการวัดหาค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล.....	54
5.2	ผลการวัดหาคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล.....	55



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	โครงสร้างของระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล.....2
2.1	ระบบการวัดการกระจายของสีในเนื้อปลาแชลมอนแล่นที่นำเสนอโดย Di Wu และคณะฯ.....3
2.2	อัลกอริธึมในการประมวลผลภาพที่นำเสนอโดย Di Wu และคณะฯ.....7
2.3	ผลการทดสอบอัลกอริธึมในการประมวลผลภาพที่นำเสนอโดย Di Wu และคณะฯ.....7
2.4	โครงสร้างของจมูกอิเล็กทรอนิกส์ในการตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเลของ Jong Hyun Lim และคณะฯ.....8
2.5	ผลการทดสอบเซนเซอร์ของ Jong HyunLim และคณะฯ .....9
2.6	ผลการทดสอบกับอาหารทะเลต่างๆ โดยเซนเซอร์ของ Jong HyunLim และคณะฯ.....9
2.7	โครงสร้างของแผ่นตรวจวัดสีที่ใช้ในงานวิจัยของ Mohamed K. Morsy และคณะฯ.....10
2.8	การนำเอาเทคนิคการตรวจวัดสีมาใช้ในการตรวจสอบการเน่าเสียของเนื้อปลาแชลมอนของ Mohamed K. Morsy และคณะฯ.....10
2.9	โครงสร้างของระบบตรวจสอบความสดของปลาคอดโดยใช้เทคนิคการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่นำเสนอโดย Maria Ruiz-Rico และคณะฯ.....11
2.10	การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของปลาคอดที่นำเสนอโดย Maria Ruiz-Rico และคณะฯ.....11
2.11	ผลการทดสอบการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของปลาคอดที่นำเสนอโดย Maria Ruiz-Rico และคณะฯ.....12
2.12	ลักษณะของระบบที่ใช้ในการทดสอบหาค่าไดอิเล็กทริกของอาหารต่างๆ จากงานวิจัยของ Hee Jun Shina และคณะฯ.....12
2.13	ผลการทดสอบหาค่าไดอิเล็กทริกส่วนจริง (real part) ของอาหารต่างๆ จากงานวิจัยของ Hee Jun Shina และคณะฯ .....13
2.14	ผลการทดสอบหาค่าไดอิเล็กทริกส่วนจินตภาพ (real part) ของอาหารต่างๆ จากงานวิจัยของ Hee Jun Shina และคณะฯ.....13
3.1	โครงสร้างของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลของ M. Kitsara และคณะฯ .....15
3.2	ลักษณะของเซนเซอร์และผลการทดสอบกับสารละลายต่างๆ ที่พัฒนาโดย M. Kitsara และคณะฯ.....16
3.3	โครงสร้างของระบบไปโอเซนเซอร์ที่นำเสนอโดย V. Tsouti และคณะฯ.....17
3.4	โครงสร้างของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลที่นำเสนอโดย V. Tsouti และคณะฯ.....17
3.5	การตรวจจับโมเลกุลของสารที่นำมาทดสอบของเซนเซอร์ที่นำเสนอโดย V. Tsouti และคณะฯ .....17
3.6	การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า ( $C_0 + \Delta C$ ) จากการตรวจจับโมเลกุลของสารที่นำมาทดสอบของเซนเซอร์ที่นำเสนอโดย V. Tsouti และคณะฯ.....18
3.7	โครงสร้างของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบอินเตอร์ดิจิตอลที่นำเสนอโดย Cheng-Long Zhao และคณะฯ.....18
3.8	การนำเซนเซอร์บรรจุลงบรรจุภัณฑ์เพื่อทดสอบโดย Cheng-Long Zhao และคณะฯ.....19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9	ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดความชื้นแบบอินเทอร์ดิจิตอลที่นำเสนอโดย Cheng-Long Zhao และคณะฯ..... 20
3.10	ลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์ที่พัฒนาโดย Mohd Syaifudin Abdul Rahman และคณะฯ..... 20
3.11	เซนเซอร์ที่พัฒนาโดย Mohd Syaifudin Abdul Rahman และคณะฯ..... 21
3.12	การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทดสอบเซนเซอร์ที่พัฒนาโดย Mohd Syaifudin Abdul Rahman และคณะฯ..... 21
3.13	ผลการทดสอบเซนเซอร์พัฒนาโดย Mohd Syaifudin Abdul Rahman และคณะฯ..... 22
3.14	โครงสร้างของเซนเซอร์ตรวจวัดเข้ามาจากท่อไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลของ G. Hagen และคณะฯ..... 22
3.15	การติดตั้งเซนเซอร์เข้ากับท่อไอเสียรถยนต์เพื่อทดสอบเซนเซอร์ที่พัฒนาโดย G. Hagen และคณะฯ..... 23
3.16	ผลการทดสอบเซนเซอร์ที่พัฒนาโดย G. Hagen และคณะฯ..... 23
3.17	เซนเซอร์สำหรับการตรวจสอบคุณภาพหนึ่งแคะของ V. Kasturi และ S. C. Mukhopadhyay..... 24
3.18	การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทดสอบเซนเซอร์สำหรับการตรวจสอบคุณภาพหนึ่งแคะของ V. Kasturi และ S. C. Mukhopadhyay ..... 24
3.19	การวางหนึ่งแคะเพื่อทดสอบเซนเซอร์สำหรับการตรวจสอบคุณภาพหนึ่งแคะของ V. Kasturi และ S. C. Mukhopadhyay ..... 25
3.20	ผลการทดสอบเซนเซอร์สำหรับการตรวจสอบคุณภาพหนึ่งแคะของ V. Kasturi และ S. C. Mukhopadhyay..... 25
3.21	ลักษณะโครงสร้างและหลักการของเซนเซอร์ของ Caglar Elbuken และคณะฯ..... 26
3.22	การต่ออุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทดสอบเซนเซอร์ของ Caglar Elbuken และคณะฯ..... 26
3.23	ผลการทดสอบเซนเซอร์ของ Caglar Elbuken และคณะฯ..... 27
3.24	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้กับขนาดของของเหลวที่ทำการวัดจากเซนเซอร์ของ Caglar Elbuken และคณะฯ..... 27
3.25	โครงสร้างพื้นฐานของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล..... 28
3.26	การตรวจจับองค์ประกอบต่างๆของตัวอย่างโดยเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล..... 28
3.27	ตัวอย่างการวัดค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล..... 29
4.1	ระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล..... 30
4.2	วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์..... 31
4.3	วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน..... 31
4.4	วงจรขยายสัญญาณ..... 32
4.5	วงจรเรียงกระแส..... 32
4.6	วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน..... 33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7	วงจรถ่ายเปรียบเทียบแรงดัน.....33
4.8	วงจรถ่ายแสดงผล.....34
4.9	ลักษณะของแผ่นพีซีบีแบบ FR-4.....34
4.10	เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 1.....35
4.11	เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2.....36
4.12	เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 3.....36
4.13	เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 4.....36
4.14	เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 5.....37
4.15	เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 6.....38
4.16	เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 7.....38
4.17	เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 8.....39
4.18	ตัวอย่างของเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก.....39
4.19	โครงสร้างต้นแบบ (เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2).....40
4.20	การเปิดไฟล์โครงสร้างต้นแบบ (เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2) ด้วยโปรแกรม ArtCAM Pro.....41
4.21	การกำหนดขนาดโครงสร้างของชิ้นงานที่จะทำการกัด.....41
4.22	การแปลงไฟล์จาก Bitmap ไปเป็น Vector.....42
4.23	การกำหนดคุณสมบัติของเส้นทางเดินของหัวกัด.....42
4.24	การกำหนดขนาดของดอกสว่านที่ใช้ในการกัดชิ้นงาน.....43
4.25	การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาทำการกัด.....43
4.26	การบันทึกสร้างเส้นทางเดินของหัวกัดที่ได้ออกแบบไว้ในไฟล์ *.tap (G-Code).....44
4.27	การเปิดไฟล์ *.tap (G-code) เพื่อสั่งให้เครื่องกัดชิ้นงานตามเส้นทางเดินของหัวกัดที่ได้ออกแบบไว้.....44
4.28	การติดตั้งแผ่นพีซีบีลงบนเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก.....45
4.29	การสั่งรันโปรแกรม grblControl เพื่อสั่งให้เครื่องกัดชิ้นงานตามเส้นทางเดินของหัวกัดที่ได้ออกแบบไว้.....45
4.30	ต้นแบบ (เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2) ที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก.....46
4.31	เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลทั้ง 8 รูปแบบรวมลงในแผ่นพีซีบีเดียวกัน.....47
4.32	ฟิล์มแบบ Negative ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลทั้ง 8 รูปแบบ.....48
4.33	แผ่นเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลทั้ง 8 รูปแบบ หลังกัดทองแดงออกไป.....49
4.34	เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 1 ที่ทำการสร้างขึ้นมา.....50
4.35	เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2 ที่ทำการสร้างขึ้นมา.....50
4.36	เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 3 ที่ทำการสร้างขึ้นมา.....51
4.37	เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 4 ที่ทำการสร้างขึ้นมา.....51
4.38	เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 5 ที่ทำการสร้างขึ้นมา.....52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.39 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 6 ที่ทำการสร้างขึ้นมา.....	52
4.40 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 7 ที่ทำการสร้างขึ้นมา.....	53
4.41 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 8 ที่ทำการสร้างขึ้นมา.....	53
5.1 ลักษณะของเซนเซอร์ที่นำมาทดสอบทั้ง 8 แบบ.....	54
5.2 การวัดหาค่าอิมพีแดนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล.....	55
5.3 การวัดหาค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลในของเหลวที่ใช้ในการแช่ อาหารทะเล.....	56
5.4 ค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 1 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ใน การแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	56
5.5 ค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ใน การแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	57
5.6 ค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 5 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ใน การแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	57
5.7 ค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 6 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ใน การแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	58
5.8 ค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 1 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ใน การแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	58
5.9 ค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ใน การแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	59
5.10 ค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 5 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ใน การแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	59
5.11 ค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 6 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ใน การแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	60
5.12 การวัดหาค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลในของเหลวที่ใช้ใน การแช่อาหารทะเล.....	60
5.13 ค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 1 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ใน การแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	61
5.14 ค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ใน การแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	61
5.15 ค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 5 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ใน การแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	62
5.16 ค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 6 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ใน การแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	62
5.17 ค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 1 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ใน การแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18	ค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 2 ที่ใช้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) ที่ระยะเวลาต่างๆ.....63
5.19	ค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 5 ที่ใช้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) ที่ระยะเวลาต่างๆ.....64
5.20	ค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 6 ที่ใช้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) ที่ระยะเวลาต่างๆ.....64
5.21	ผลการทดสอบสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่สร้างขึ้นมา.....65
5.22	การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดในการทดสอบสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล..... 66
5.23	ผลการทดสอบวัดสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์และสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล (ของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลปกติ).....66
5.24	ผลการทดสอบวัดสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์และสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล (ของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลเมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนสภาพ).....67
5.25	การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดในการทดสอบสัญญาณที่ได้จากวงจรเรียงกระแส.....67
5.26	ผลการทดสอบสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลและสัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส (ของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลปกติ).....68
5.27	ผลการทดสอบสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลและสัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส (ของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลเมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนสภาพ).....68
5.28	การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดในการทดสอบสัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบแรงดัน.....69
5.29	ผลการวัดสัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบแรงดัน (ของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลปกติ).....69
5.30	ผลการวัดสัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (ของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลเมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนสภาพ).....70
5.31	การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทดสอบการติดตามการเปลี่ยนสภาพของอาหารทะเล.....70
5.32	ผลการทดสอบการติดตามการเปลี่ยนสภาพของอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 6 (ปลาหมึก).....71
5.33	ผลการทดสอบการติดตามการเปลี่ยนสภาพของอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 6 (หอยนางรม).....71
1ก	ระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล (ด้านหน้า).....77
2ก	ระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล (ด้านหลัง).....77
3ก	เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 1.....78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4ก	เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 2.....	78
5ก	เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 5.....	79
6ก	เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 6.....	79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา [1]

อาหารทะเลนับว่าเป็นอาหารชนิดหนึ่งที่คุณค่าทางอาหารสูงและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค อีกทั้งในปัจจุบันการส่งออกผลิตภัณฑ์อาหารทะเลแช่แข็งไปยังต่างประเทศเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ทำรายได้เข้าประเทศปีหนึ่งๆหลายหมื่นล้านบาท สำหรับลักษณะและรูปแบบการผลิตอาหารทะเลแช่แข็งเพื่อการส่งออกอาหารแช่แข็งของไทยส่วนใหญ่เป็นการผลิตเพื่อการส่งออกผลิตภัณฑ์อาหารทะเลแช่แข็งที่สำคัญมี 3 ชนิด คือ กุ้ง ปลา และปลาหมึกโดยเฉพาะกุ้งสดแช่เย็นแช่แข็งเป็นสินค้าที่มีมูลค่าการส่งออกสูงสุด รูปแบบของสินค้าอาหารทะเลแช่แข็งแตกต่างกันไปตามความต้องการของผู้บริโภค ดังนี้

1. กุ้งสดแช่เย็นแช่แข็ง มีรูปแบบสินค้าที่นิยมหลายรูปแบบ อาทิ กุ้งเด็ดหัวไม่แกะเปลือก กุ้งเด็ดหัวแกะเปลือก กุ้งเด็ดหางไม่ผ่าหลัง กุ้ง ทั้งตัวไม่เด็ดหางไม่แกะเปลือก เป็นต้น

2. ปลาสดแช่เย็นแช่แข็งรูปแบบสินค้าที่นิยม คือ ปลาสด ปลาแล่ และปลาสดทั้งตัว

3. ปลาหมึกสดแช่เย็นแช่แข็ง สามารถทำได้หลายรูปแบบ อาทิ ปลาหมึกกระดองแล่ ปลาหมึกกล้วยแล่ ปลาหมึกซีกใส่ ปลาหมึกทั้งตัว เป็นต้น โดยทั่วไปการผลิตอาหารทะเลแช่แข็งเพื่อการส่งออกมีวิธีการผลิตที่สำคัญ 2 แบบ คือ

1. การผลิตแบบ Block Frozen เป็นวิธีการผลิตแบบแช่แข็งรวมกันหลายชิ้นในกล่องเดียวกันเป็นก้อน โดยจะเรียงใส่ถาดที่ทำด้วยเหล็กปลอดสนิม ซึ่งมีขนาดบรรจุต่างๆ กันขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ซื้อ เช่น 1 กิโลกรัมหรือ 2 กิโลกรัม จากนั้นนำเข้าห้องแช่แข็งที่มีอุณหภูมิที่จุดกลาง -18 องศา แล้วจึงนำมาเคาะออกจากถาด นำไปแช่ในน้ำเย็นจัดหรือวางแล้วจึงพ่นด้วยน้ำเย็นจัดเพื่อเคลือบจากนั้นสวมถุงพลาสติกและบรรจุใส่กล่องกระดาษอบเทียม สินค้าที่นิยมผลิตในลักษณะนี้คือ กุ้งสดแช่เย็นแช่แข็ง

2. การผลิตแบบ Individual Quick Frozen (I.Q.F.) เป็นวิธีการผลิตแบบแช่แข็งเป็นตัวๆ หรือชิ้นเดียว สินค้าที่คัดแล้วจะถูกเรียงลงบนสายพานเพื่อส่งเข้าเครื่องแช่เยือกแข็ง I.Q.F. ที่มีอุณหภูมิ -50°C แล้วบรรจุลงถุงพลาสติกที่พิมพ์รูปภาพมีสีสันต่างๆ ตามความต้องการของตลาด จากนั้นจึงบรรจุใส่กล่องกระดาษอบเทียมสินค้าที่นิยมผลิตในลักษณะนี้คือ ปลาสดแช่เย็นแช่แข็งและปลาหมึกสด เมื่อเสร็จขั้นตอนการบรรจุใส่กล่องกระดาษเรียบร้อยแล้วอาหารทะเลแช่แข็งจะถูกนำไปไว้ในห้องเก็บที่อุณหภูมิ -18 องศา เพื่อเตรียมส่งออกต่อไป

จากขบวนการผลิตต่างๆ ที่กล่าวมามีจุดมุ่งหมายเพื่อเก็บรักษาคุณภาพของอาหารทะเลให้มีความสดและปลอดภัยต่อผู้บริโภค ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการใช้แรงงานคนในการตรวจสอบและคัดแยกอาหารทะเลที่ไม่ได้คุณภาพออกไป ทำให้สูญเสียเวลา แรงงานและค่าใช้จ่ายในการคัดแยกและตรวจสอบก่อนที่จะทำการบรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ต่างๆ หรือส่งขายให้กับผู้บริโภค ทำให้ทางผู้วิจัยมีแนวความคิดที่จะทำการพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลเข้ามาช่วยในการตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเลทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดแรงงานและค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลก่อนที่จะส่งลงบรรจุภัณฑ์หรือขายให้แก่ผู้บริโภค

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

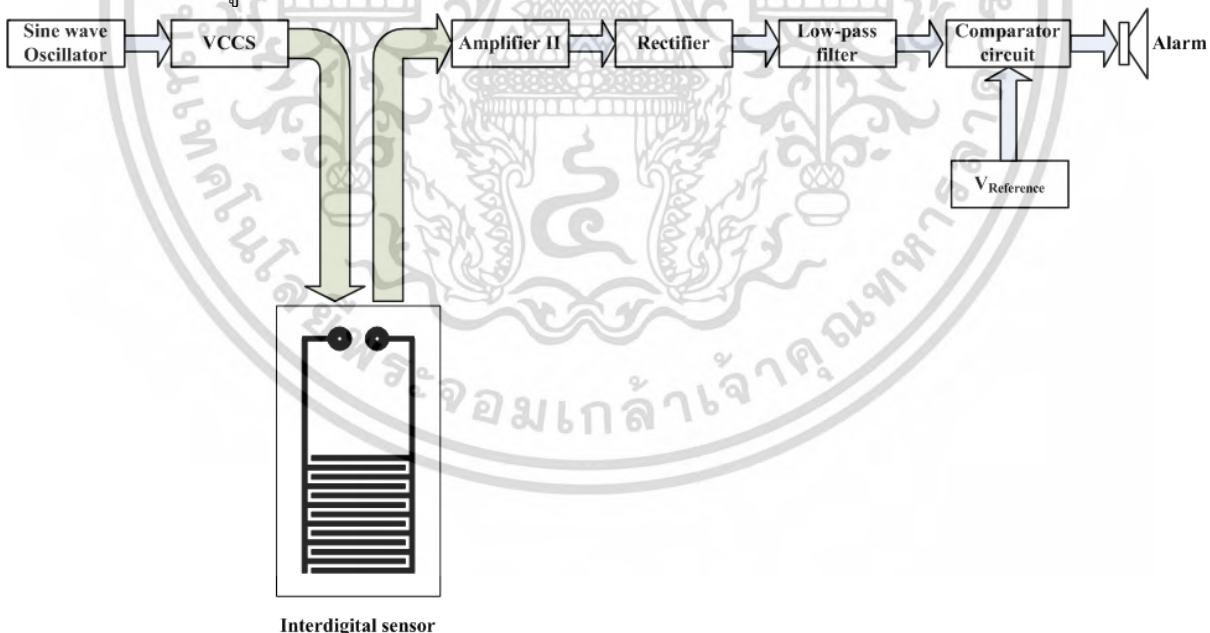
1. พัฒนาต้นแบบระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลโดยใช้เทคโนโลยีและวัสดุภายในประเทศ เพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพเนื้อปลาหรืออาหารทะเลต่างๆ เช่น เนื้อปลาแชลมอล เนื้อปลาทูน่า กุ้ง ปลาหมึก เป็นต้น ก่อนที่จะทำการบรรจุลงบรรจุภัณฑ์หรือขายให้แก่ผู้บริโภค
2. พัฒนาเทคนิคในการตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล
3. พัฒนาเทคโนโลยีในการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเทคนิคในคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลเข้ามาช่วยในการตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเล ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดแรงงานและค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลก่อนที่จะส่งลงบรรจุภัณฑ์หรือขายให้แก่ผู้บริโภค

## 1.4 ทฤษฎี สมมติฐานหรือกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

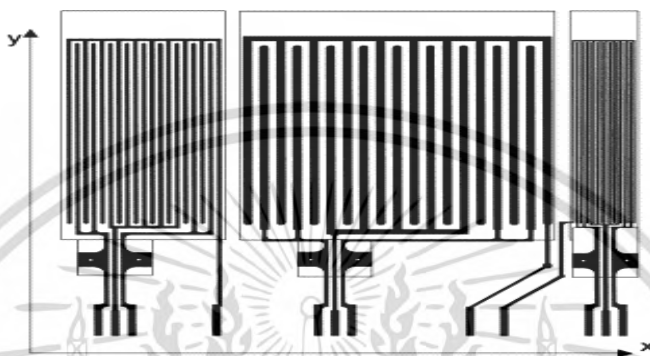
ในโครงการวิจัยนี้กล่าวถึงการพัฒนาต้นแบบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลเข้ามาช่วยในการตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเล ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดแรงงานและค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบอาหารทะเลต่างๆ ก่อนที่จะส่งลงบรรจุภัณฑ์หรือขายให้แก่ผู้บริโภค สำหรับส่วนประกอบทั้งหมดของโครงสร้างระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลที่จะทำการพัฒนาขึ้นมา สามารถแสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล

จากรูปที่ 1.1 โครงสร้างของระบบจะประกอบไปด้วย วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล วงจรขยายสัญญาณ วงจรเรียงกระแส วงจรกรองความถี่ต่ำ

ผ่าน วงจรเปรียบเทียบแรงดัน และวงจรแสดงผล ซึ่งในการทำงานของระบบจะอาศัยการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล ซึ่งจากเทคนิคที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสภาพของอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลร่วมกับวงจรสำหรับใช้ในการประมวลผลสัญญาณ หากคุณภาพหรือคุณสมบัติของอาหารทะเลไม่ได้คุณภาพตามต้องการก็ส่งสัญญาณเตือนให้ผู้ใช้งานรับทราบ โดยตัวอย่างโครงสร้างของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ลักษณะของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล [2]

จากลักษณะของโครงสร้างของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลในรูปที่ 1.2 ได้มีการถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพและสารตกค้างในอาหารทะเลดังตัวอย่างงานวิจัย [3-12] ซึ่งงานวิจัยต่างๆ ที่ทางผู้วิจัยยกตัวอย่างมาจะใช้หลักการวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอาหารทะเลที่นำมาทดสอบ โดยทางผู้วิจัยจะได้นำเอาเทคนิคที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลต่อไป

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่จะนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. ต้นแบบระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลเพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเลต่างๆ ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดแรงงานและค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบอาหารทะเลก่อนที่จะส่งลงบรรจุภัณฑ์หรือขายให้แก่ผู้บริโภค
2. กระตุ้นให้เกิดการทำวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เทคโนโลยีและวัสดุภายในประเทศ
3. เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพสินค้าทางการเกษตร
4. ช่วยประหยัดแรงงานและเวลาในการใช้ในการตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเล

#### 1.6 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย

นำเสนอรายงานผลงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ พร้อมทั้งนำเสนอบทความวิจัยในสถานที่ต่างๆ และถ่ายทอดเทคโนโลยีในการสร้างระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแก่บุคคลและ

หน่วยงานต่างๆ ที่สนใจนำระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลไปใช้งานหรือพัฒนาต่อ เช่น

- นักศึกษา จากมหาวิทยาลัยหรือสถาบันต่างๆ
- นักวิจัยจากหน่วยงานต่างๆ
- หน่วยงานทางภาคเกษตรกรรม
- หน่วยงานทางภาคอุตสาหกรรม
- ผู้สนใจที่จะนำระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลไปประยุกต์ใช้งาน
- ฯลฯ

### 1.7 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

เพื่อให้การวิจัยสร้างระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลสำเร็จรวดเร็วภายในระยะเวลาที่กำหนดประมาณ 12 เดือน จึงขอแบ่งวิธีการวิจัยดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. ศึกษาข้อมูลทั่วไปของเทคนิคและวิธีการตลอดจนหลักเกณฑ์ในการตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลต่างๆ
2. ศึกษาข้อมูลเทคนิคในการตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเล
3. ออกแบบและสร้างระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล
4. ทดสอบระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นมา
5. ปรับปรุงคุณภาพของระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นมา
6. สร้างต้นแบบระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล
7. สรุปผลและเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์

สำหรับสถานที่ในการทำการทดลองและเก็บข้อมูลจะใช้สถานที่ของภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### 1.8 ระยะเวลาที่ทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

เริ่มต้นตั้งแต่เดือนตุลาคม 2558 จนถึง กันยายน 2559 ซึ่งจะทำการวิจัยให้เสร็จภายในปีงบประมาณ 2559

## แผนการดำเนินการตลอดโครงการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	งบประมาณปี 2559											
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
1. ศึกษาข้อมูลทั่วไปของเทคนิคและวิธีการตลอดจนหลักเกณฑ์ในการการตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลต่างๆ	←→											
2. ศึกษาข้อมูลเทคนิคในการตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเล		←→										
3. ออกแบบและสร้างระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล			←→									
4. ทดสอบระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นมา					←→							
5. ปรับปรุงคุณภาพของระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นมา								←→				
6. สร้างต้นแบบระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล										←→		
7. สรุปผลและเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์											←→	

## 1.9 ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัย

1. อุปกรณ์, เครื่องมือวัด และเครื่องมือทดสอบที่ใช้ในการวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วภายในภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
2. อุปกรณ์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในการทำวิจัยส่วนใหญ่สามารถหาซื้อและจัดทำภายในประเทศได้ โดยมีบางส่วนที่จะต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ เช่น ไอซีสำเร็จรูปต่างๆ เป็นต้น

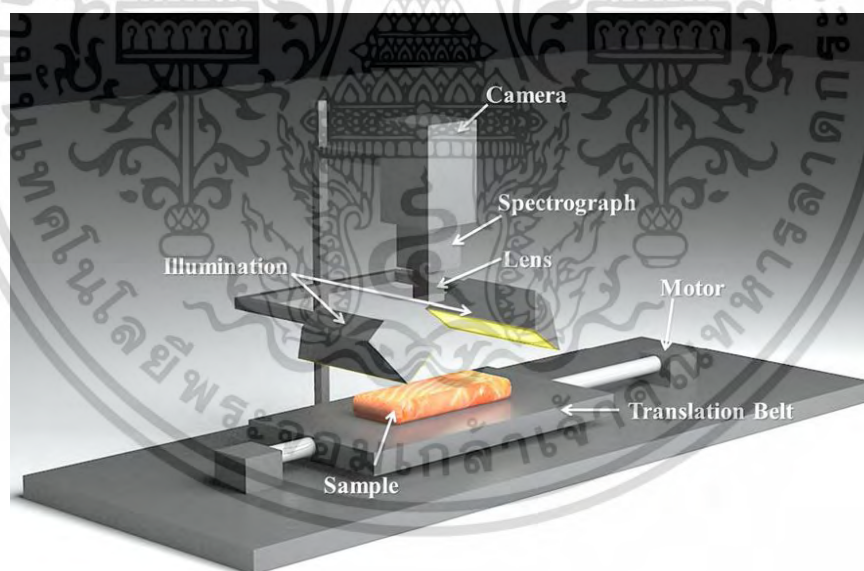
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันอาหารทะเลนับว่าเป็นแหล่งอาหารสำคัญในการบริโภคของคนทั่วไป เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารทะเลมีจำหน่ายมากมายหลายรูปแบบทั้งแบบอาหารทะเลสด อาหารทะเลแช่เย็น อาหารทะเลแช่แข็ง แต่อย่างไรก็ตามจากปัญหาการเก็บรักษาด้วยวิธีและเทคนิคที่ต่างๆ ตลอดจนองค์ประกอบจากสภาพแวดล้อมภายนอก ทำให้คุณภาพของอาหารทะเลที่ผู้บริโภคได้รับมีความแตกต่างกันไป ซึ่งเป็นส่วนที่ส่งผลต่อ ความปลอดภัยและสุขภาพของผู้บริโภค ดังนั้นบรรดานักวิจัยจึงมุ่งพัฒนาเทคนิคต่างๆ ในการตรวจสอบอาหารทะเลดังตัวอย่างต่อไปนี้

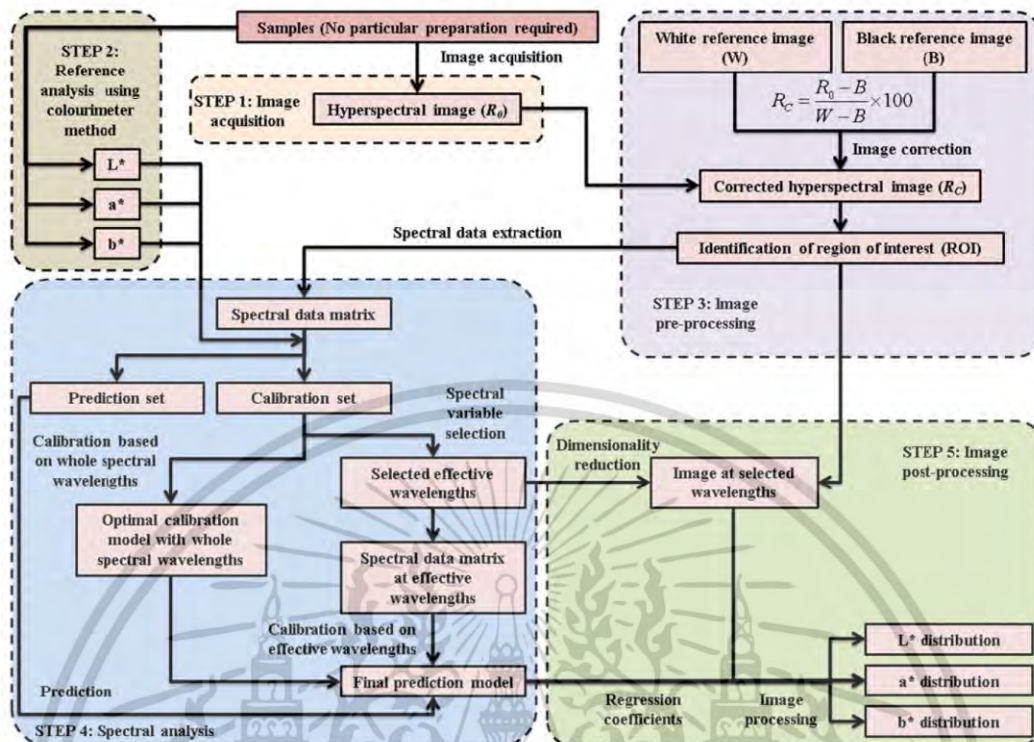
### 2.1 การตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเลโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ

เทคโนโลยีการประมวลผลภาพได้พัฒนาก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว ทำให้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของวัสดุและสินค้าต่างๆ มากมาย สำหรับในการนำเอาเทคโนโลยีการประมวลผลภาพมาตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลดังกล่าวงานวิจัยของ Di Wu และคณะ [13] ในการนำเอาเทคโนโลยีการประมวลผลภาพมาใช้ในการวัดการกระจายของสีในเนื้อปลาแซลมอนแล้ว โดยลักษณะของระบบที่นำเสนอโดย Di Wu และคณะ [13] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

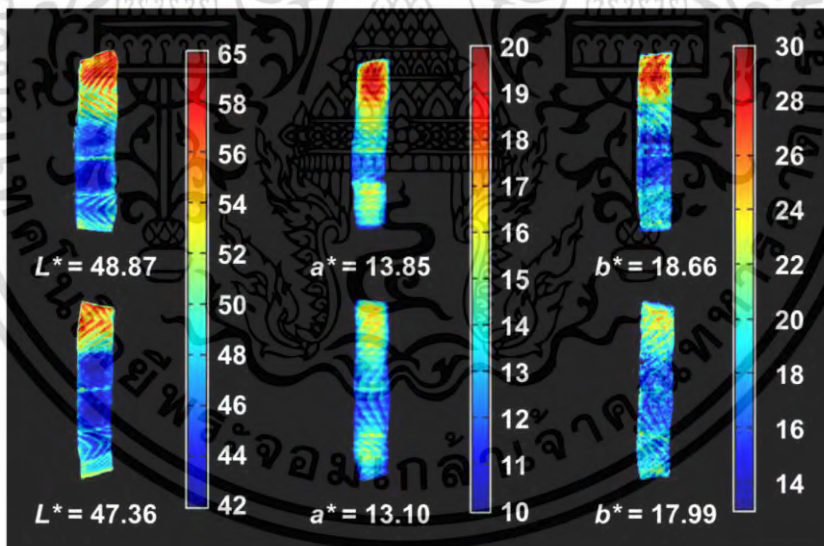


รูปที่ 2.1 ระบบการวัดการกระจายของสีในเนื้อปลาแซลมอนแล้วที่นำเสนอโดย Di Wu และคณะ [13]

จากรูปที่ 2.1 ข้อมูลภาพจากระบบจะถูกส่งไปประมวลผลด้วยอัลกอริธึมที่นำเสนอโดย Di Wu และคณะ [13] ดังรูปที่ 2.2 และได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 2.3 ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 อัลกอริธึมในการประมวลผลภาพที่นำเสนอโดย Di Wu และคณะฯ [13]



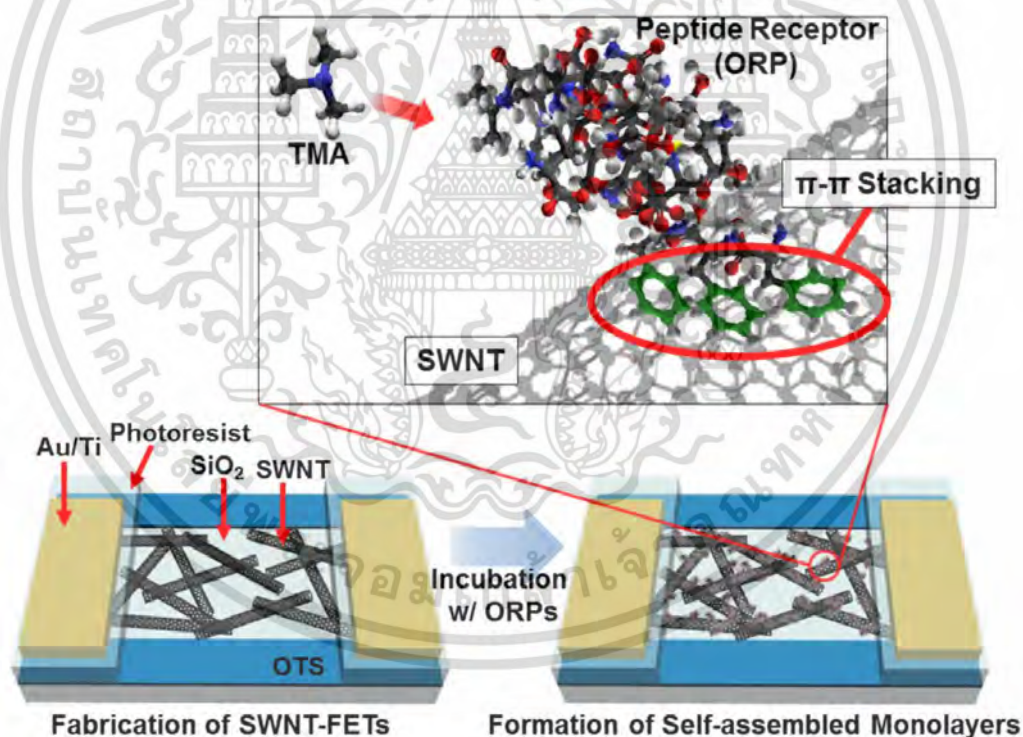
รูปที่ 2.3 ผลการทดสอบอัลกอริธึมในการประมวลผลภาพที่นำเสนอโดย Di Wu และคณะฯ [13]

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นถึงแม้ว่าเนื้อปลาด้านบนและเนื้อปลาด้านล่างจะไม่มี ความแตกต่างกันมากกับค่าสีโดยรวมสำหรับทั้งส่วน  $L^*$ ,  $a^*$  หรือ  $b^*$  แต่การแสดงผลในรูปแบบที่ Di Wu และคณะฯ [13] นำเสนอนั้น ภาพมีความชัดเจนในการแสดงข้อมูลรายละเอียดและแม่นยำยิ่งขึ้นกว่าวิธีการวัดสีแบบดั้งเดิมซึ่งสามารถวัดได้เฉพาะจุดบางส่วนของกลุ่มตัวอย่างเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์ทางเคมี

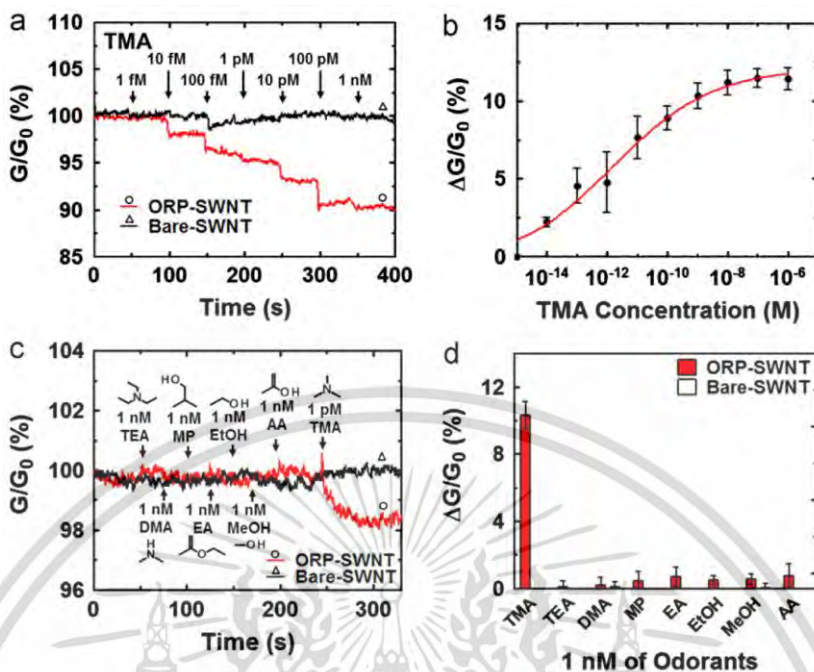
สำหรับการเอาเซนเซอร์ทางเคมีมาประยุกต์ใช้ในตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลมักนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจการเน่าเสียหรือเปลี่ยนแปลงสภาพของอาหารทะเล ซึ่งเมื่ออาหารทะเล เช่น ปลา กุ้ง หรือ หอย เป็นต้น เกิดการเน่าเสียก็จะส่งผลให้เกิดสารระเหยไตรเมทิลามีน (Trimethylamine, TMA) ซึ่งมีกลิ่นเหม็น ดังนั้นจึงมีผู้วิจัยเพื่อหาเทคนิคในการตรวจจับ TMA เพื่อใช้ในการบ่งบอกคุณภาพของอาหารทะเลดังกล่าวอย่างงานวิจัยของ Jong Hyun Lim และคณะฯ [14] ในการพัฒนาจมูกอิเล็กทรอนิกส์ในการตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเลได้ในเวลาจริงโดยการวัดปริมาณ TMA ที่สร้างจากอาหารทะเลที่เน่าโดยใช้ทรานซิสเตอร์แบบ field-effect nanotube ที่ทำหน้าที่ในการรับกลิ่นและสามารถตรวจจับ TMA และช่วยให้เราสามารถตรวจจับ TMA ได้แบบเวลาจริง ซึ่งการใช้คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้เราสามารถกำหนดคุณภาพของอาหารทะเลสามชนิด ได้แก่ หอยนางรม กุ้ง และกุ้งก้ามกรามได้ และยังสามารถแยกแยะอาหารทะเลที่บูดจากอาหารประเภทอื่น นอกจากนี้ยังมีขนาดที่สามารถพกพาได้ ทำให้มีประโยชน์อย่างมากสำหรับอุตสาหกรรมอาหารซึ่งจำเป็นต้องมีการตรวจวัดคุณภาพอาหารทะเลในสถานที่ต่างๆ โดยลักษณะโครงสร้างของจมูกอิเล็กทรอนิกส์ในการตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเลของ Jong Hyun Lim และคณะฯ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของจมูกอิเล็กทรอนิกส์ในการตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเลของ Jong Hyun Lim และคณะฯ [14]

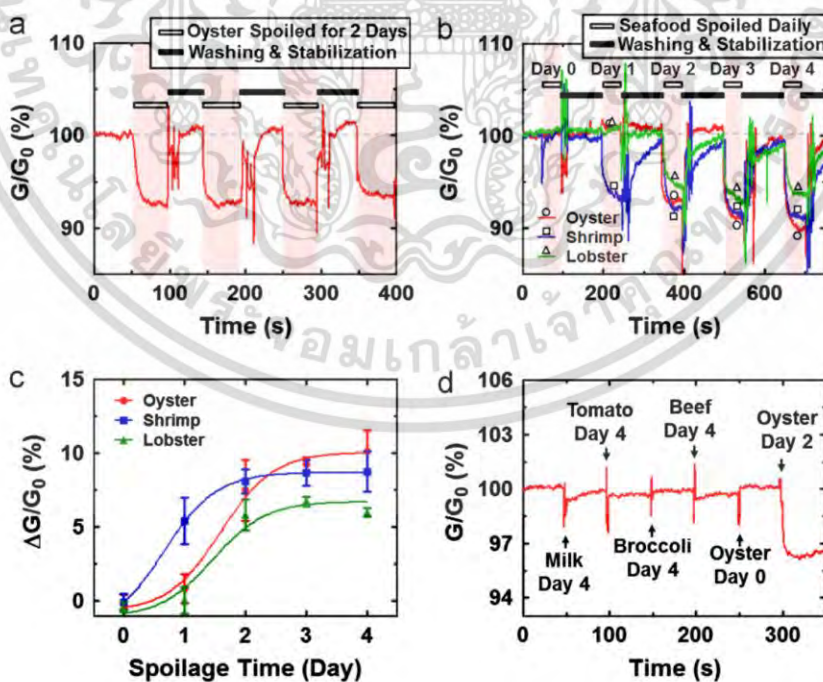
จากรูปที่ 2.4 จากโครงสร้างของเซนเซอร์ทางผู้วิจัยได้นำเซนเซอร์ไปทดสอบกับสาร TMA ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ผลการทดสอบเซนเซอร์ของ Jong HyunLim และคณะฯ [14]

จากรูปที่ 2.5 จากผลการทดลองจะเห็นว่าค่าความนำของเซนเซอร์จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าปริมาณความเข้มข้นของ TMA ซึ่งจากนั้นทางผู้วิจัยได้นำไปทดสอบกับอาหารทะเลต่างๆ ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 2.6



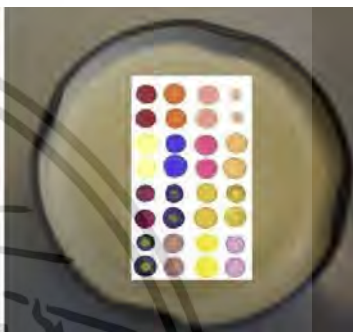
รูปที่ 2.6 ผลการทดสอบกับอาหารทะเลต่างๆ โดยเซนเซอร์ของ Jong HyunLim และคณะฯ [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

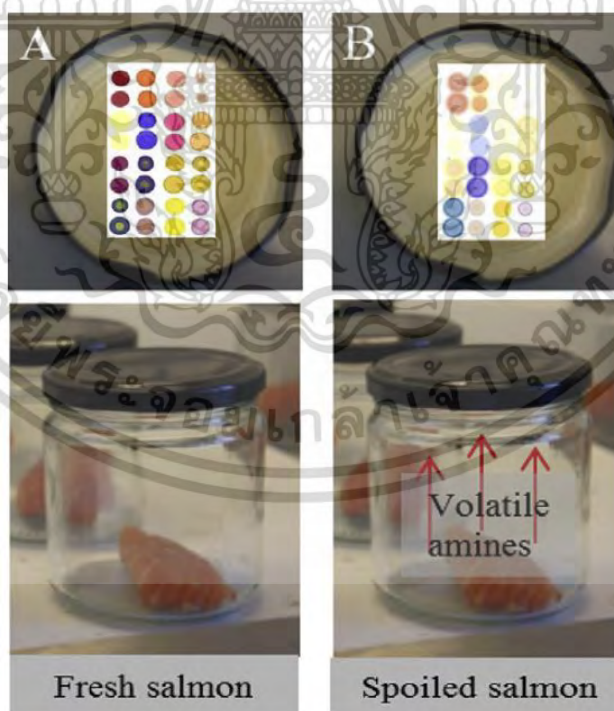
### 2.3 การตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเลโดยใช้เทคนิคการตรวจวัดสี

วิธีนี้เป็นวิธีที่รวดเร็วสำหรับการประเมินระดับการย่อยสลายของแบคทีเรียในอาหารทะเลที่นำมาทดสอบ ซึ่งการทดสอบสามารถดำเนินการได้อย่างรวดเร็ว ไม่ต้องการบุคคลากรที่มีความเชี่ยวชาญสูงและไม่จำเป็นต้องมีการฝึกอบรมพิเศษ นอกจากนี้อุปกรณ์ในการตรวจสอบมีขนาดเล็กพกพาได้ และยังสามารถดำเนินการได้ในทุกสภาพแวดล้อมเช่น บนเรือโดยปราศจากการรบกวนจากกลิ่น ดังตัวอย่างงานวิจัยของ Mohamed K. Morsy และคณะฯ [15] ที่นำเอาเทคนิคการตรวจวัดสีมาใช้ตรวจสอบการเน่าเสียของเนื้อปลาแชลมอลดังตัวอย่างรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8

<b>Methyl Red</b>	<b>Rosolic acid</b>	<b>Phenol Red</b>	<b>Reichardt's dye</b>
<b>2,6-Dichloro-4-(2,4,6-triphenyl-1-pyridinio)phenolate</b>	<b>Crystal Violet Lactone</b>	<b>Cresol Red</b>	<b>Chlorphenol Red</b>
<b>Xylenol Blue</b>	<b>Bromphenol Blue</b>	<b>Bromothymol Blue sodium salt</b>	<b>Bromocresol Purple</b>
<b>Bromocresol Green</b>	<b>Alizarin</b>	<b>Curcumin</b>	<b>Carminic acid</b>



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของแผ่นตรวจวัดสีที่ใช้ในงานวิจัยของ Mohamed K. Morsy และคณะฯ [15]

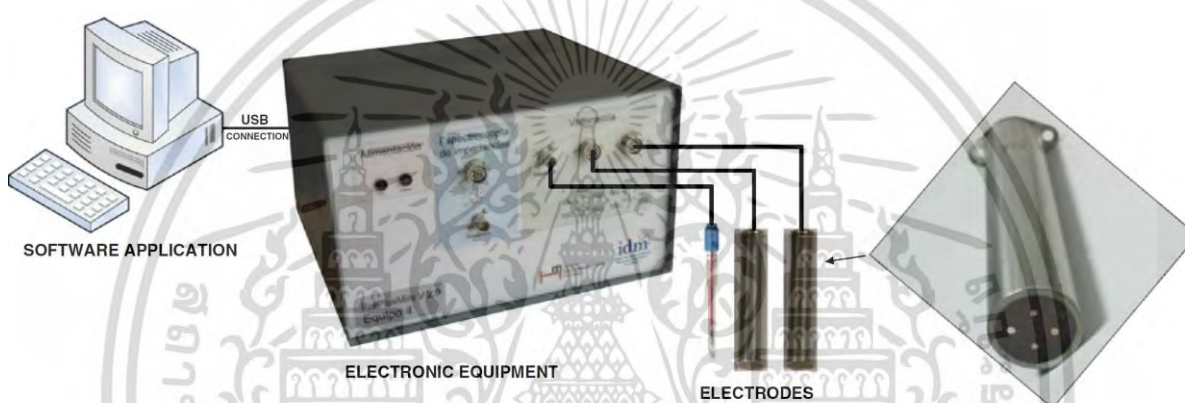


รูปที่ 2.8 การนำเอาเทคนิคการตรวจวัดสีมาใช้ในการตรวจสอบการเน่าเสียของเนื้อปลาแชลมอลของ Mohamed K. Morsy และคณะฯ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเลโดยใช้เทคนิคการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

สำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิคการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าในการประเมินคุณภาพและความปลอดภัยของอาหารทะเลซึ่งจะมีการประยุกต์ใช้เมื่อไม่นานมานี้ โดยเฉพาะปลาและผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ต่างๆ เนื่องจากในปัจจุบันเราต้องการเทคนิคในการวัดเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีคุณภาพแน่นอน และสามารถตรวจจับได้อย่างรวดเร็วเพื่อสามารถทำการตรวจสอบแบบออนไลน์ ซึ่งการตรวจสอบโดยใช้เทคนิคการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้ามีข้อดีคือการตรวจสอบที่รวดเร็วไม่ทำลาย ราคาไม่แพง ใช้งานง่าย ตลอดจนมีศักยภาพในการพัฒนาให้เป็นระบบออนไลน์ ดังตัวอย่างงานวิจัยของ María Ruiz-Rico และคณะ [16] ที่พัฒนาเทคนิคการตรวจสอบความสดของปลาคอดโดยใช้เทคนิคการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยลักษณะโครงสร้างของระบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 ถึงรูปที่ 2.11

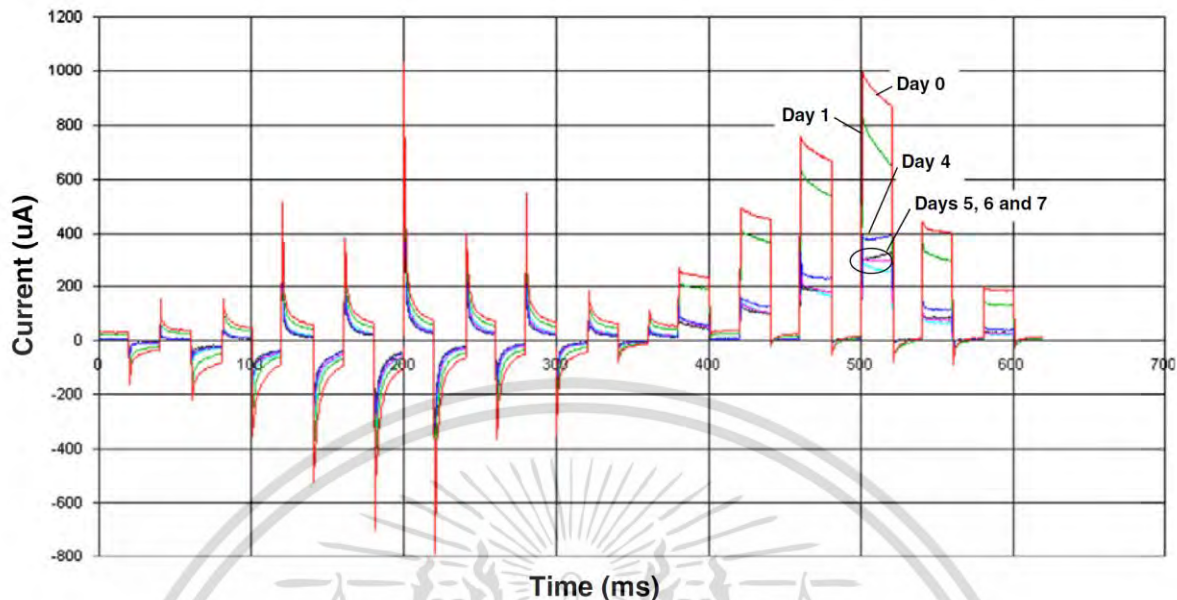


รูปที่ 2.9 โครงสร้างของระบบตรวจสอบความสดของปลาคอดโดยใช้เทคนิคการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่นำเสนอโดย María Ruiz-Rico และคณะ [16]



รูปที่ 2.10 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของปลาคอดที่นำเสนอโดย María Ruiz-Rico และคณะ [16]

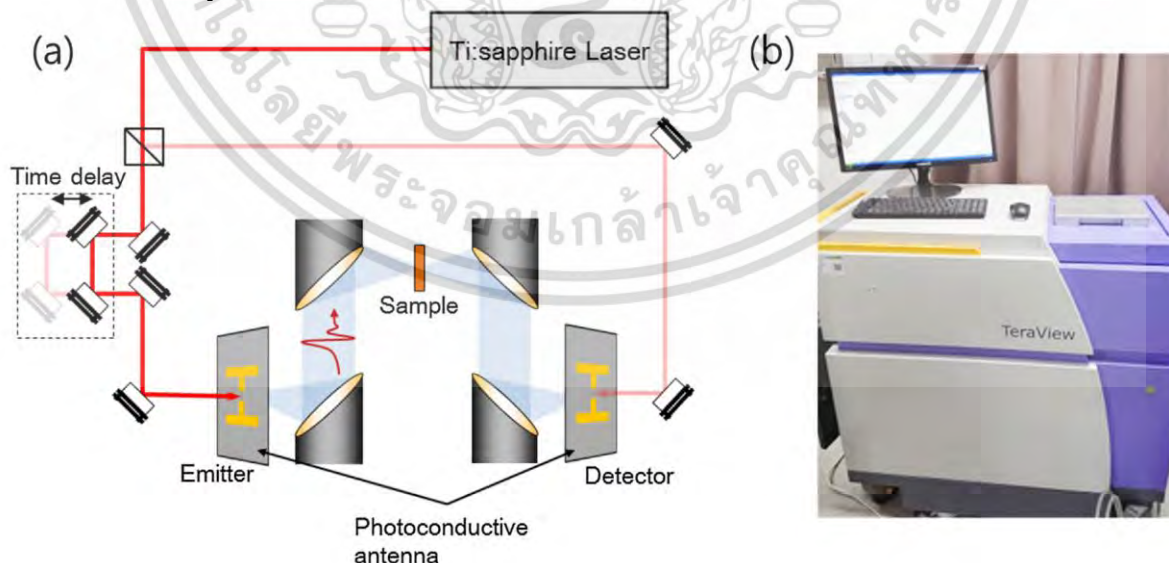
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ผลการทดสอบการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของปลาคอดที่นำเสนอบนโดย María Ruiz-Rico และคณะ [16]

2.5 การตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเลโดยใช้เทคนิคการวัดค่าไดอิเล็กทริก (Dielectric)

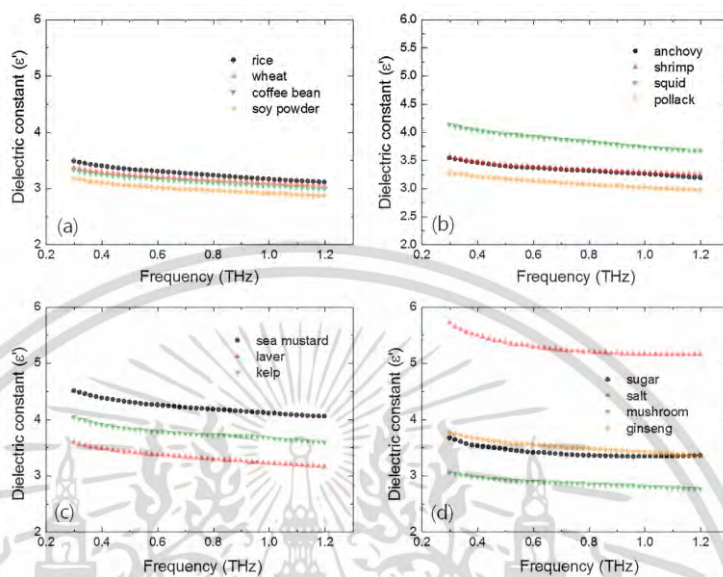
ในปัจจุบันมีการศึกษาความเป็นไปได้ในการระบุผลิตภัณฑ์ องค์ประกอบ และคุณภาพของอาหารต่างๆ รวมทั้งอาหารทะเล โดยใช้ค่าไดอิเล็กทริกที่วัดในช่วงความถี่เทระเฮิรตซ์ (Terahertz : THz) ตั้งแต่ 0.3 ถึง 1.2 THz มาใช้ในการวิเคราะห์เนื่องจากอาหารแต่ละชนิดจะมีค่าไดอิเล็กทริกไม่เท่ากัน ดังตัวอย่างงานวิจัยของ Hee Jun Shina และคณะ [17] โดยลักษณะของระบบที่ใช้ในการทดสอบหาค่าไดอิเล็กทริกของอาหารต่างๆ มีลักษณะดังรูปที่ 2.12



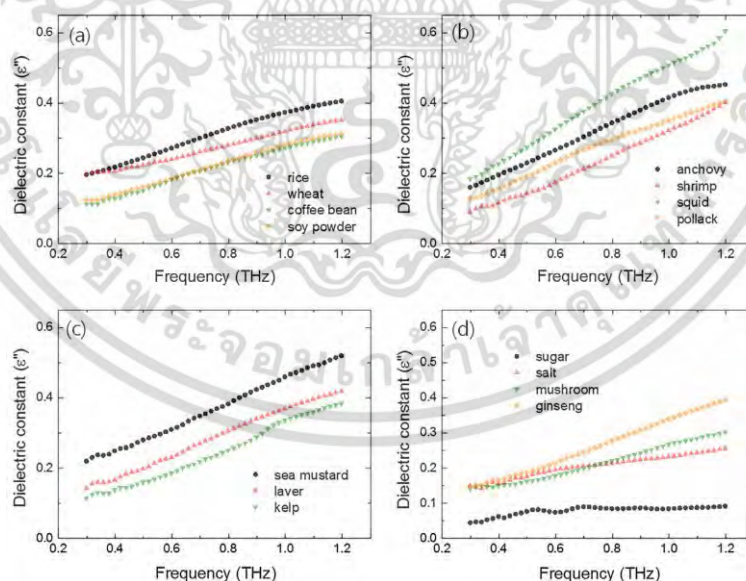
รูปที่ 2.12 ลักษณะของระบบที่ใช้ในการทดสอบหาค่าไดอิเล็กทริกของอาหารต่างๆ จากงานวิจัยของ Hee Jun Shina และคณะ [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากระบบในรูปที่ 2.12 ทางผู้วิจัยได้ทำการทดสอบหาค่าไดอิเล็กทริกของอาหารต่างๆ ดังผลการทดลองในรูปที่ 2.13 และรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 ผลการทดสอบหาค่าไดอิเล็กทริกส่วนจริง (real part) ของอาหารต่างๆ จากงานวิจัยของ Hee Jun Shina และคณะฯ [17]



รูปที่ 2.14 ผลการทดสอบหาค่าไดอิเล็กทริกส่วนจินตภาพ (real part) ของอาหารต่างๆ จากงานวิจัยของ Hee Jun Shina และคณะฯ [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 บทสรุป

จากตัวอย่างของเทคนิคแบบต่างๆ ในการตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเลที่นักวิจัยจากประเทศต่างๆ ได้มีการค้นคว้าและวิจัยพัฒนากันมา ซึ่งในแต่ละเทคนิคและวิธีการจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับจุดมุ่งหมายในการตรวจสอบว่าจะมุ่งเน้นส่วนไหน ซึ่งทางผู้วิจัยจะมุ่งเน้นการพัฒนาเทคนิคในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอาหารทะเลมาประยุกต์ใช้งานในการตรวจสอบคุณภาพของอาหารทะเล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

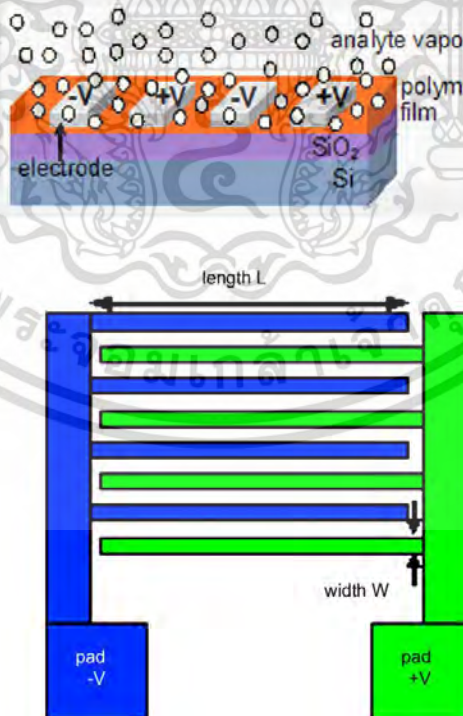
#### เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล

สำหรับเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล นับว่าเป็นเซนเซอร์แบบหนึ่งที่ยิมนำมาใช้ในการวัดและตรวจสอบคุณสมบัติและองค์ประกอบต่างๆ ของวัสดุ ดังตัวอย่างในการประยุกต์ใช้งาน เช่น เซนเซอร์วัดความชื้น (Humidity sensor) เซนเซอร์วัดค่าความนำในสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte conductivity (EC) sensor) เซนเซอร์วัดสารเคมีและแก๊ส (Chemicals and gasses sensor) เป็นต้น โดยในปัจจุบันได้มีการเพิ่มขึ้นของการวิจัยในการพัฒนาเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลทั้งในด้านการออกแบบโครงสร้าง เทคนิคการในการวัดสัญญาณ และการนำเอาไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ โดยเราสามารถแสดงตัวอย่างของการประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลในด้านต่างๆ ดังนี้

#### 3.1 การประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล

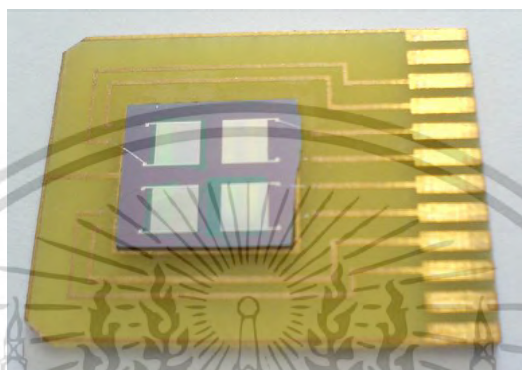
##### 3.1.1 เซนเซอร์ทางเคมี (Chemical sensor)

ปัจจุบันได้มีการนำเอาเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลมาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับหาองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ ของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ ดังตัวอย่างงานวิจัยของ M. Kitsara และคณะฯ [18] ในการนำเอาเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลไปประยุกต์ใช้งานในการวัดสารระเหยต่างๆ เช่น ไอน้ำ เมทานอล (Methanol) เอทานอล (Ethanol) โดยลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมามีลักษณะดังรูปที่ 3.1

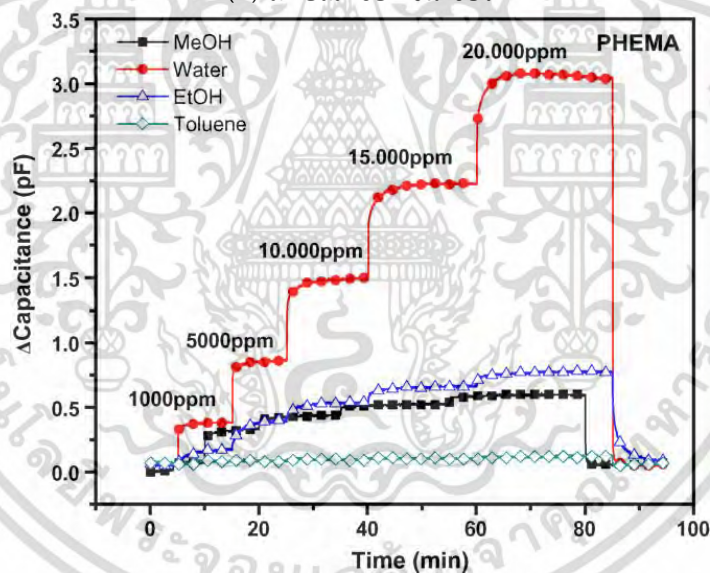


รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลของ M. Kitsara และคณะฯ [18]

จากรูปที่ 3.1 จากโครงสร้างของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลจะอาศัยการวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากผลของสารละลายต่างๆ เช่น ใส่น้ำ เมทานอล (Methanol) เอทานอล (Ethanol) ที่มาจับกับอิเล็กโทรด (Electrode) ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซนเซอร์ (Dielectric constant) เปลี่ยนแปลงตามปริมาณของสารที่ทำการวัด โดยลักษณะของเซนเซอร์และผลการทดสอบกับสารละลายต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



(ก) ลักษณะของเซนเซอร์

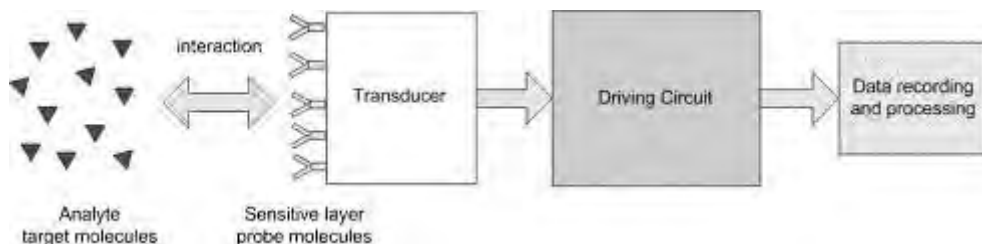


(ข) ผลการทดสอบกับสารละลายต่างๆ

รูปที่ 3.2 ลักษณะของเซนเซอร์และผลการทดสอบกับสารละลายต่างๆ ที่พัฒนาโดย M. Kitsara และคณะฯ [18]

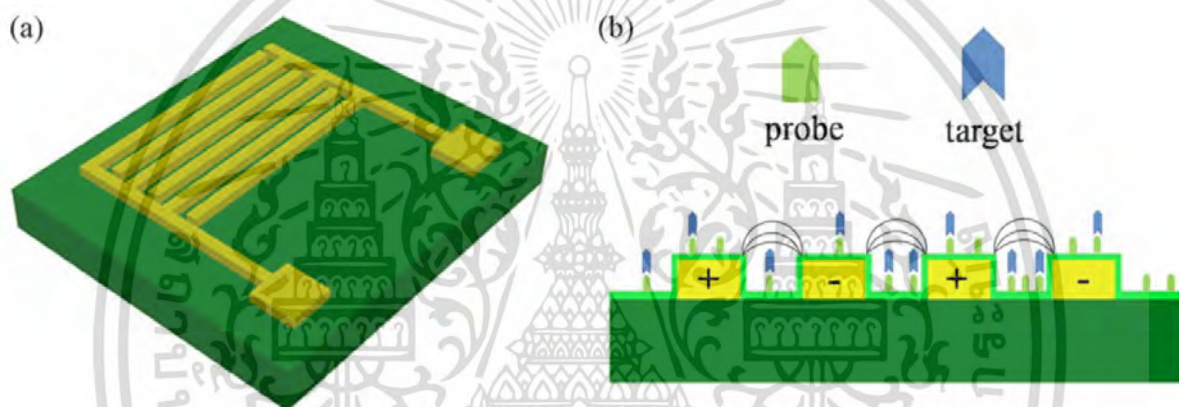
### 3.1.2 ไบโอสเซนเซอร์ (Biosensor)

เป็นการประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลสำหรับการตรวจจับทางชีวภาพ เช่น การตรวจจับ ดีเอ็นเอ (DNA) แอนติบอดี (Antibody) ต่างๆ เป็นต้น ดังตัวอย่างงานวิจัยของ V. Tsouti และคณะฯ [19] โดยลักษณะของโครงสร้างของระบบที่คณะผู้วิจัยนำเสนอสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



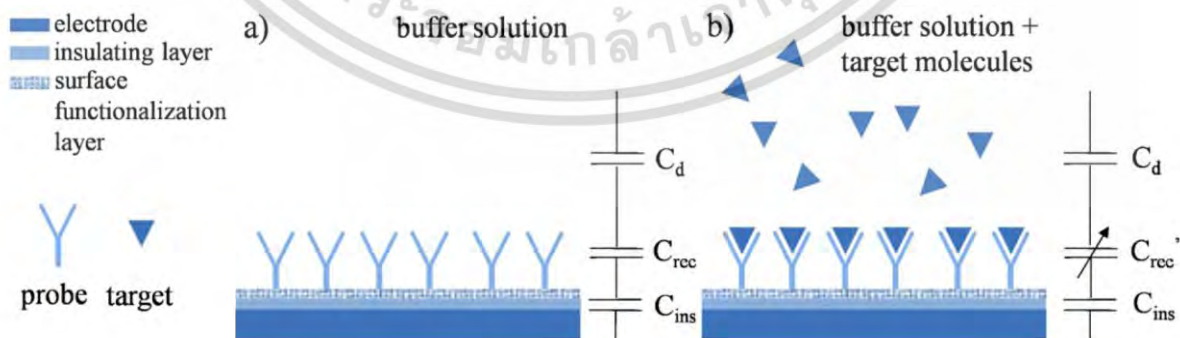
รูปที่ 3.3 โครงสร้างของระบบไบโอเซนเซอร์ที่นำเสนอโดย V. Tsouti และคณะ [19]

จากโครงสร้างของระบบไบโอเซนเซอร์ที่นำเสนอโดย V. Tsouti และคณะ [19] จะประกอบไปด้วย ส่วนของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.4



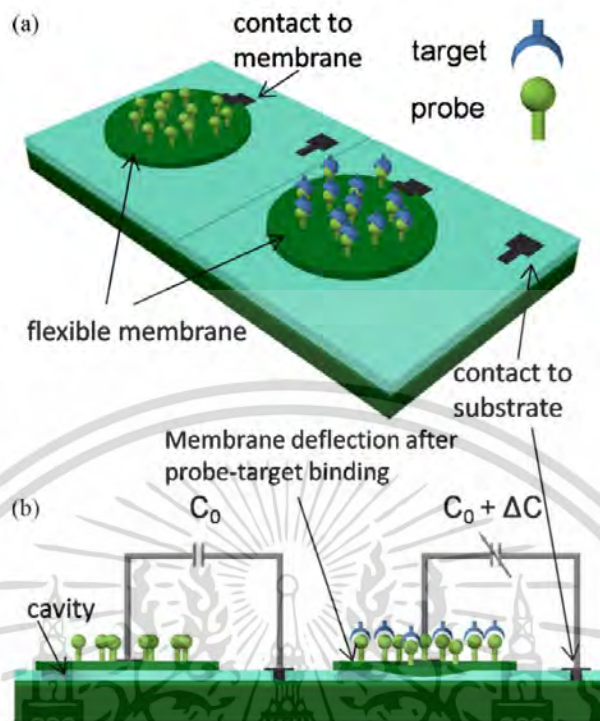
รูปที่ 3.4 โครงสร้างของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลที่นำเสนอโดย V. Tsouti และคณะ [19]

จากรูปที่ 3.4 เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลจะทำหน้าที่ในการตรวจจับโมเลกุลของสารที่นำมาทดสอบ ซึ่งโมเลกุลของสารจะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 การตรวจจับโมเลกุลของสารที่นำมาทดสอบของเซนเซอร์ที่นำเสนอโดย V. Tsouti และคณะ [19]

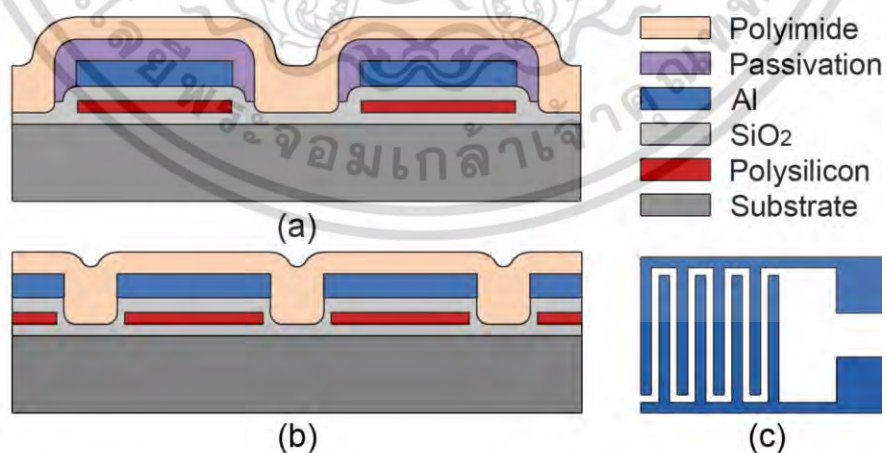
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า ( $C_0 + \Delta C$ ) จากการตรวจจับโมเลกุลของสารที่นำมาทดสอบของ เซนเซอร์ที่นำเสนอโดย V. Tsouti และคณะ [19]

### 3.1.3 เซนเซอร์วัดความชื้น (humidity sensor)

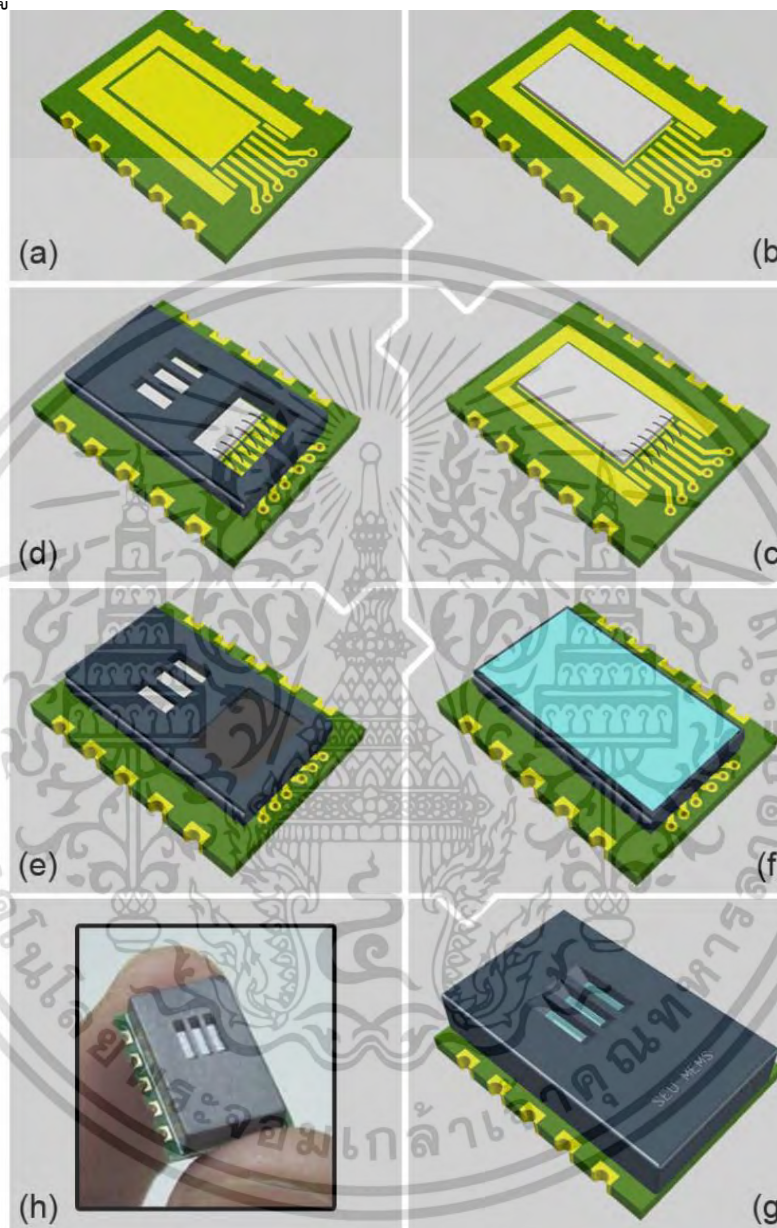
สำหรับการประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลในการวัดค่าความชื้นนั้นมีการพัฒนา โครงสร้างและรูปแบบขึ้นมามากมายดังตัวอย่างงานวิจัยของ Cheng-Long Zhao และคณะ [20] ได้นำเสนอเซนเซอร์วัดความชื้นด้วยเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล โดยมีลักษณะโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โครงสร้างของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบอินเทอร์ดิจิตอลที่นำเสนอโดย Cheng-Long Zhao และ คณะ [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

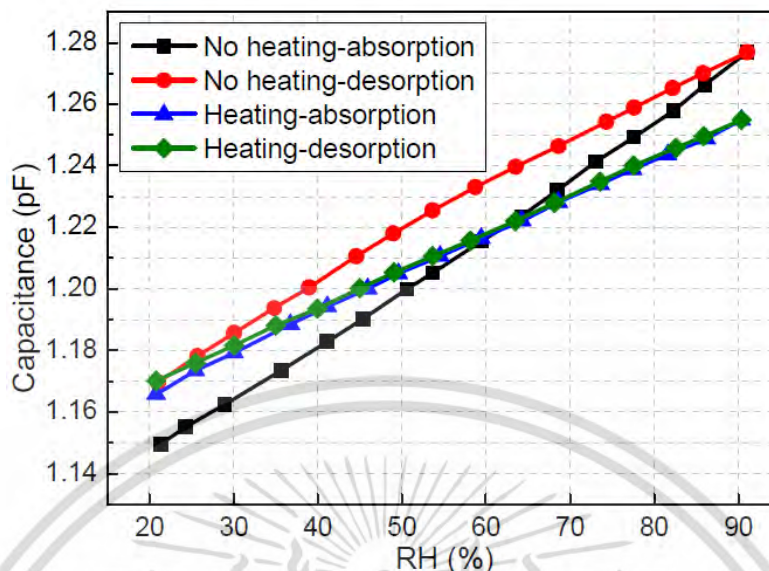
จากโครงสร้างของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบอินเทอร์ดิจิตอลที่นำเสนอโดย Cheng-Long Zhao และคณะฯ [20] ที่แสดงในรูปที่ 3.7 ทางคณะผู้วิจัยได้นำไปทำการบรรจุลงบรรจุภัณฑ์ (Packaging) เพื่อนำไปทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การนำเซนเซอร์บรรจุลงบรรจุภัณฑ์เพื่อทดสอบโดย Cheng-Long Zhao และคณะฯ [20]

จากรูปที่ 3.8 หลังจากเซนเซอร์บรรจุลงบรรจุภัณฑ์เรียบร้อยแล้ว Cheng-Long Zhao และคณะฯ [20] ได้ทำการทดสอบโดยได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 3.9 ซึ่งจะเห็นว่าค่าความจุไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามค่าความชื้นที่ทำการวัด แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงแปลงมีค่าน้อยมากจึงต้องอาศัยเทคนิคการวัดที่ค่อนข้างดีในการวัดค่าความจุไฟฟ้าน้อยๆ

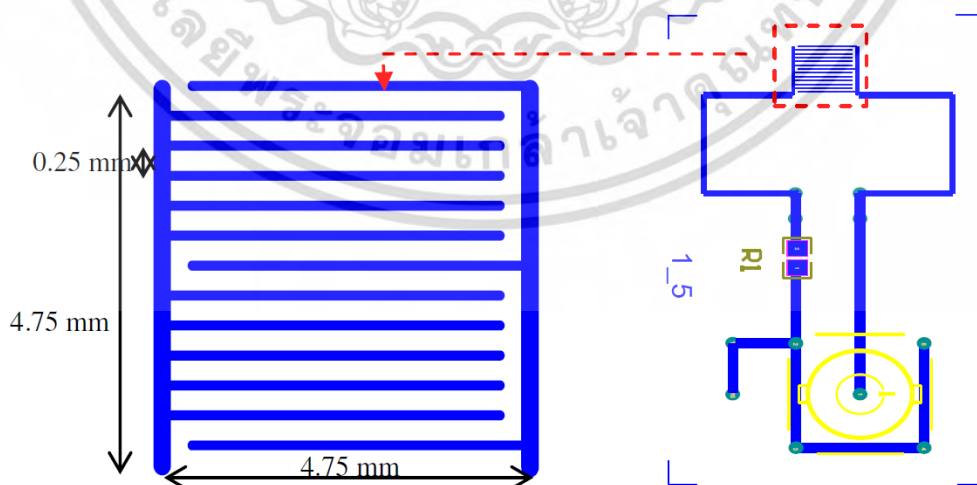
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดความชื้นแบบอินเทอร์ดิจิตอลที่นำเสนอโดย Cheng-Long Zhao และคณะฯ [20]

### 3.1.4 เซนเซอร์ทางด้านอาหาร (Food sensor)

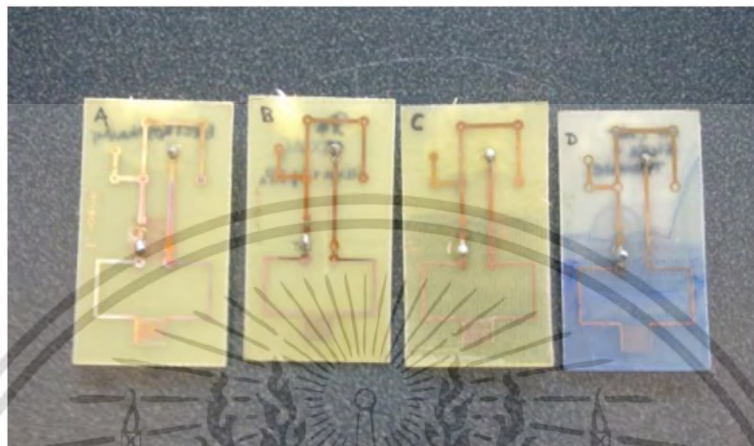
สำหรับการประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลในการตรวจสอบคุณภาพของอาหาร มุ่งเน้นเพื่อทำการตรวจหาสารอันตรายทางชีวภาพ (Biotoxins) ที่ตกค้างในอาหารต่างๆ ซึ่งเกิดจากเชื้อโรคหลัก 2 ชนิดที่สำคัญ ได้แก่ Escherichia coli และ Salmonella ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดการระบาดของโรคอาหารเป็นจำนวนมาก จึงได้มีการพยายามพัฒนาเซนเซอร์ชนิดใหม่ที่มีโครงสร้างแบบอินเทอร์ดิจิตอล โดยการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวัสดุเคลือบที่แตกต่างกันเพื่อประเมินผลการตอบสนองต่อสารอันตรายทางชีวภาพที่ต้องการตรวจสอบดังตัวอย่างในงานวิจัยของ Mohd Syaifudin Abdul Rahman และคณะฯ [21] ที่ได้พัฒนาเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลเพื่อใช้ในการตรวจจับโดยใช้สารเคลือบอิเล็กทรอนิกส์แบบต่างๆ โดยลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์ที่ Mohd Syaifudin Abdul Rahman และคณะฯ นำเสนอสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์ที่พัฒนาโดย Mohd Syaifudin Abdul Rahman และคณะฯ [21]

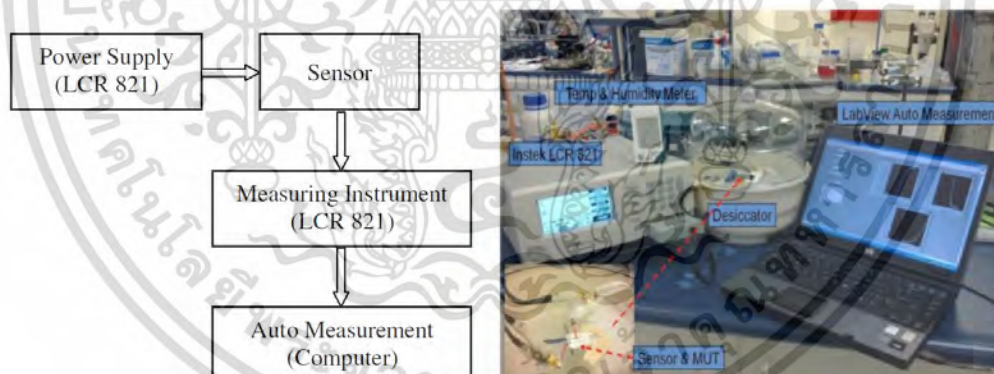
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโครงสร้างของเซนเซอร์ที่พัฒนาโดย Mohd Syaifudin Abdul Rahman และคณะ [21] ซึ่งทางผู้วิจัยได้ทำการสร้างเซนเซอร์จริงขึ้นมาเพื่อทดสอบคุณสมบัติในการตรวจจับหาราสารอันตรายทางชีวภาพดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เซนเซอร์ที่พัฒนาโดย Mohd Syaifudin Abdul Rahman และคณะ [21]

จากเซนเซอร์ในรูปที่ 3.11 ทางผู้วิจัยได้นำเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นมาไปทำการทดสอบโดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 3.12

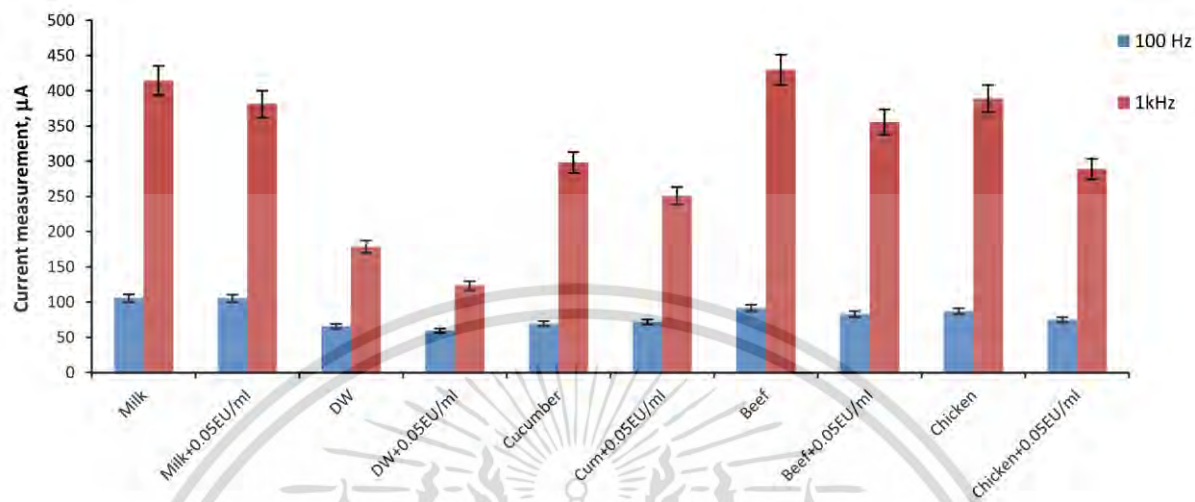


รูปที่ 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทดสอบเซนเซอร์ที่พัฒนาโดย Mohd Syaifudin Abdul Rahman และคณะ [21]

จากรูปที่ 3.12 ทางผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อประเมินผลของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมาโดยใช้ตัวอย่างที่ไม่มีสารปนเปื้อนของสารอันตรายทางชีวภาพและตัวอย่างที่มีการปนเปื้อนของสารอันตรายทางชีวภาพ โดยจากรูปที่ 3.12 แสดงแผนภาพบล็อกไดอะแกรมการทดสอบและการตั้งค่าการทดสอบโดยใช้การวัดแบบอัตโนมัติโดย LabVIEW interfaced และเครื่องวัดความแม่นยำสูงรุ่น LCR 821 โดยใช้ช่วงความถี่ในการทดสอบ 12 Hz–100 kHz ที่แรงดันกระตุ้น 1 Vrms และความเร็วในการวัดถูกตั้งค่าให้ช้าเพื่อความถูกต้องของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

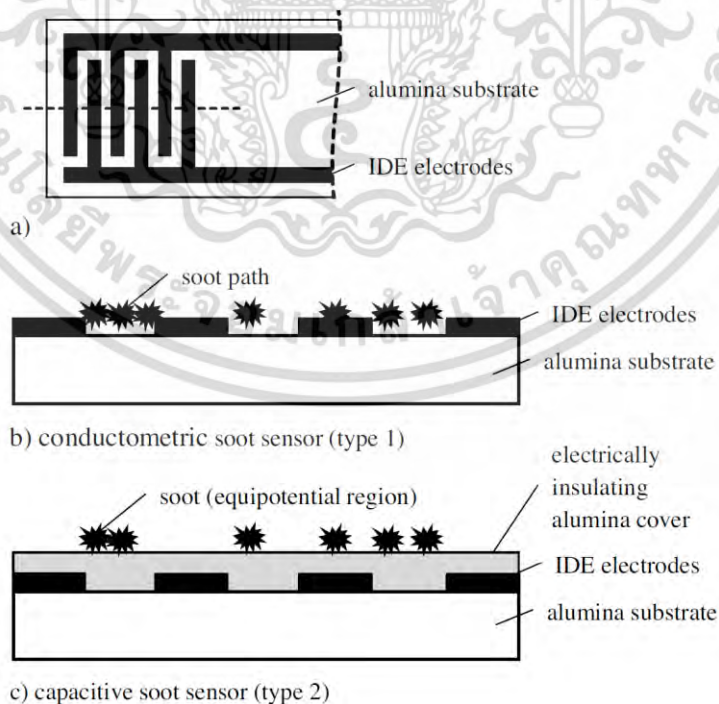
ค่าที่วัดได้ โดยการวัดตัวอย่างแต่ละชิ้นจะถูกวัดสามครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าสามารถวัดซ้ำได้และผลเฉลี่ยของสามครั้งจึงจะถูกนำมาใช้เป็นค่าจริง โดยตัวอย่างของผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ผลการทดสอบเซนเซอร์พัฒนาโดย Mohd Syaifudin Abdul Rahman และคณะ [21]

### 3.1.5 เซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดสิ่งแวดล้อม (Environmental sensor)

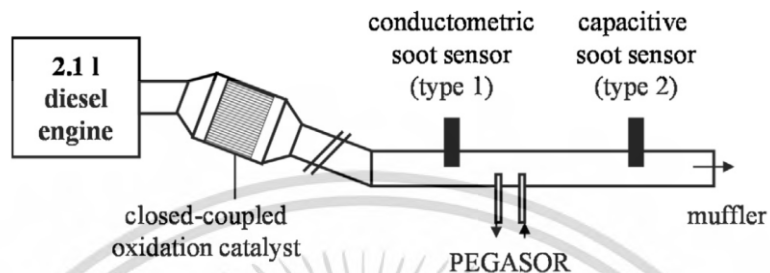
สำหรับการประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลในการตรวจวัดสิ่งแวดล้อม จะมุ่งเน้นการตรวจจับก๊าซที่เป็นอันตรายและสร้างมลภาวะต่างๆ ดังตัวอย่างงานวิจัยของ G. Hagen และคณะ [22] ที่นำเสนอการตรวจวัดเขม่าจากท่อไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล โดยลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์ที่ทางผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 โครงสร้างของเซนเซอร์ตรวจวัดเขม่าจากท่อไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลของ G. Hagen และคณะ [22]

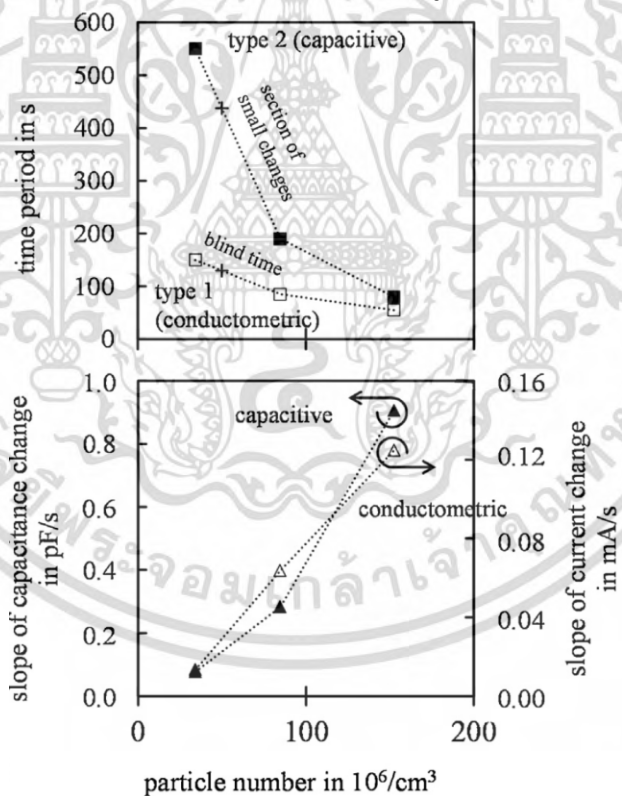
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.14 แสดงโครงสร้างของเซนเซอร์ตรวจวัดเขม่าจากท่อไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลที่พัฒนาโดย G. Hagen และคณะฯ [22] ซึ่งจากโครงสร้างของเซนเซอร์จะอาศัยอนุภาคของเขม่าจากท่อไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลมาเกาะที่ตัวอิเล็กโทรดทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์มีการเปลี่ยนแปลง โดยในการทดสอบทางผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งเซนเซอร์เข้ากับท่อไอเสียรถยนต์ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การติดตั้งเซนเซอร์เข้ากับท่อไอเสียรถยนต์เพื่อทดสอบเซนเซอร์ที่พัฒนาโดย G. Hagen และคณะฯ [22]

จากรูปที่ 3.15 แสดงการติดตั้งเซนเซอร์เข้ากับท่อไอเสียรถยนต์เพื่อทดสอบเซนเซอร์ที่พัฒนาโดย G. Hagen และคณะฯ [22] ซึ่งผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16



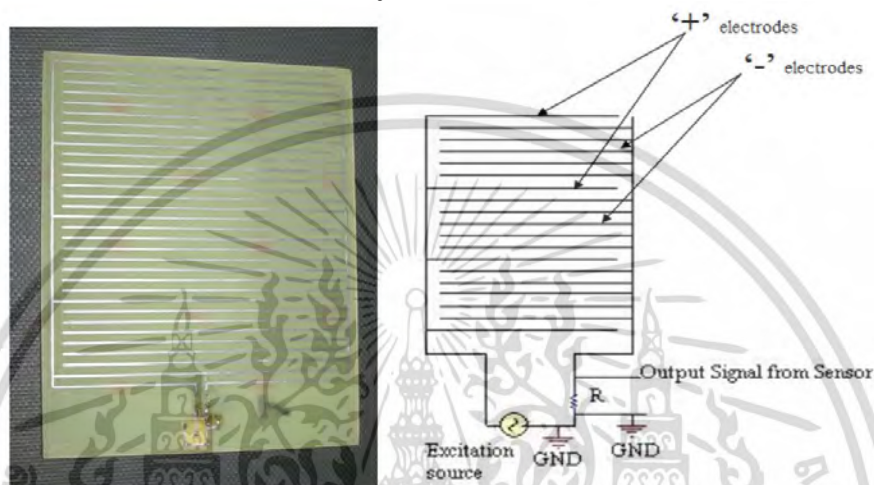
รูปที่ 3.16 ผลการทดสอบเซนเซอร์ที่พัฒนาโดย G. Hagen และคณะฯ [22]

จากผลการทดสอบในรูปที่ 3.16 จะเห็นว่าค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนอนุภาคของเขม่าที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยทำให้ยากในการวัดค่าความจุไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

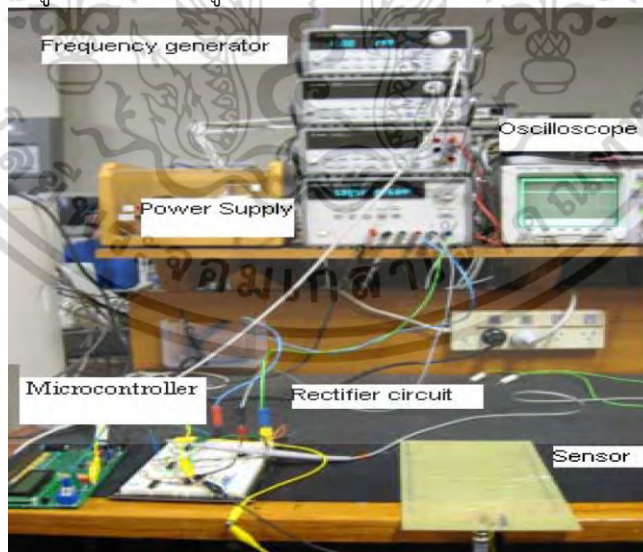
### 3.1.6 เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดคุณสมบัติของวัสดุ

สำหรับการประยุกต์ใช้งานนี้จะเป็นการประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลในการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ดังตัวอย่างงานวิจัยของ V. Kasturi และ S. C. Mukhopadhyay [23] ที่นำเสนอการตรวจสอบคุณภาพของหนังแกะที่ผ่านการฟอกหนังเพื่อใช้เป็นตัวประเมินในการปรับปรุงกระบวนการฟอกหนัง โดยลักษณะของเซนเซอร์สำหรับการตรวจสอบคุณภาพหนังแกะของ V. Kasturi และ S. C. Mukhopadhyay [23] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 เซนเซอร์สำหรับการตรวจสอบคุณภาพหนังแกะของ V. Kasturi และ S. C. Mukhopadhyay [23]

จากเซนเซอร์ในรูปที่ 3.17 ในการทดสอบเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นมาโดยป้อนสัญญาณไซน์ขนาด 10 Vp-p ที่ความถี่ 1-10 KHz เข้าที่เซนเซอร์และทำการวัดแรงดันเอาต์พุตที่ได้ โดยการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทดสอบเซนเซอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทดสอบเซนเซอร์สำหรับการตรวจสอบคุณภาพหนังแกะของ V. Kasturi และ S. C. Mukhopadhyay [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 การวางหนังแกะเพื่อทดสอบเซนเซอร์สำหรับการตรวจสอบคุณภาพหนังแกะของ V. Kasturi และ S. C. Mukhopadhyay [23]

จากรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19 แสดงการทดสอบเซนเซอร์สำหรับการตรวจสอบคุณภาพหนังแกะของ V. Kasturi และ S. C. Mukhopadhyay [23] โดยการทดสอบกับหนังแกะแบบต่างๆ จะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 3.20



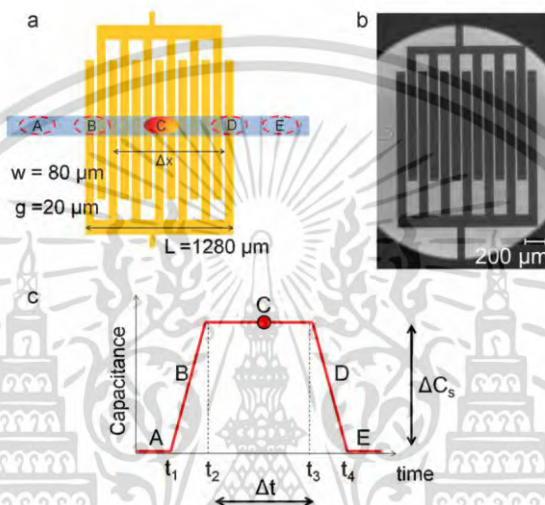
รูปที่ 3.20 ผลการทดสอบเซนเซอร์สำหรับการตรวจสอบคุณภาพหนังแกะของ V. Kasturi และ S. C. Mukhopadhyay [23]

จากผลการทดสอบในรูปที่ 3.20 จะเห็นว่าค่าแรงดันเอาต์พุตของเซนเซอร์จะเปลี่ยนแปลงไปตามคุณภาพของหนังแกะที่นำมาทดสอบ แต่อย่างไรก็ตามแรงดันเอาต์พุตที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักทำให้ต้องใช้วงจรการวัดที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

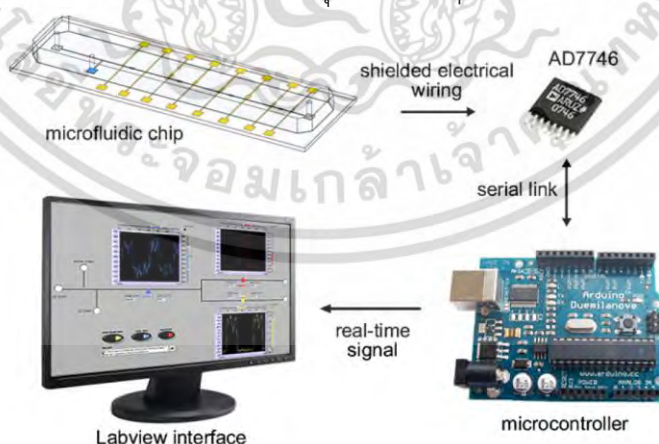
### 3.1.7 เซนเซอร์สำหรับการตรวจนับขนาดและของเหลวขนาดเล็ก

ในปัจจุบันเทคโนโลยีในการควบคุมขนาดและการไหลของอนุภาคขนาดเล็กได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว รวมทั้งมีการนำไปประยุกต์ใช้งานทั้งในทางการแพทย์และวิศวกรรมต่างๆ มากมาย ทำให้มีการวิจัยหาวิธีในการวัดขนาดและอัตราการไหลของของเหลวขนาดเล็กนี้ขึ้นมาโดยใช้เทคโนโลยีทางด้านเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลดังตัวอย่างงานวิจัยของ Caglar Elbuken และคณะ [24] ที่ได้ทำการพัฒนาเซนเซอร์วัดขนาดและอัตราการไหลของของเหลวขนาดเล็ก โดยลักษณะโครงสร้างและหลักการของเซนเซอร์ของ Caglar Elbuken และคณะ [24] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ลักษณะโครงสร้างและหลักการของเซนเซอร์ของ Caglar Elbuken และคณะ [24]

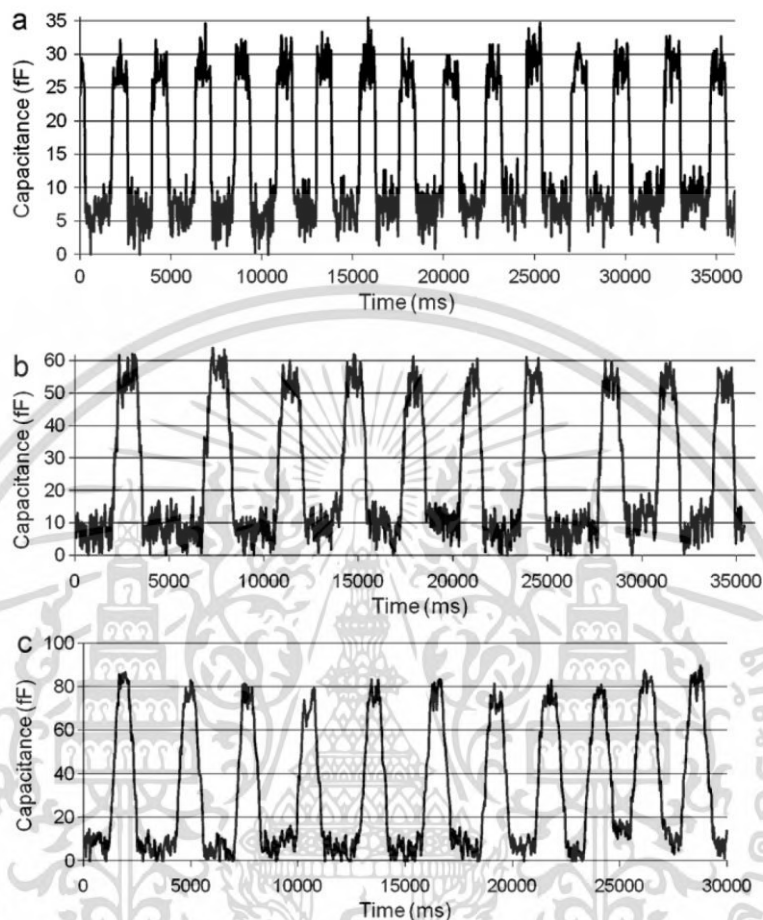
จากรูปที่ 3.21 แสดงโครงสร้างของเซนเซอร์วัดขนาดและอัตราการไหลของของเหลวขนาดเล็กซึ่งในทางอุดมคติเมื่อของเหลวขนาดเล็กไหลผ่านเซนเซอร์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 3.20 ซึ่งในการทดสอบจะต่ออุปกรณ์ต่างๆ เข้ากับเซนเซอร์ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 การต่ออุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทดสอบเซนเซอร์ของ Caglar Elbuken และคณะ [24]

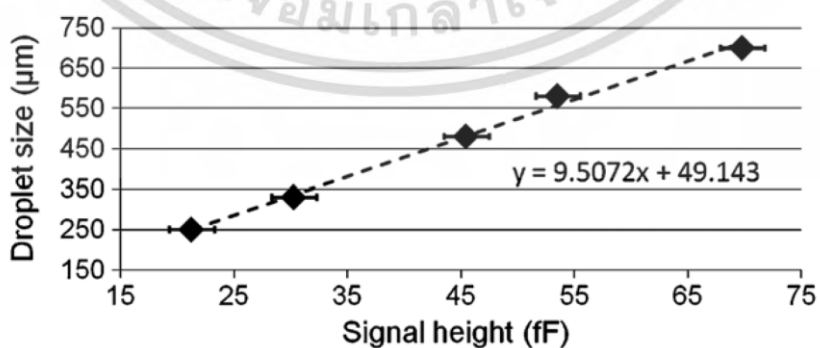
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบในรูปที่ 3.22 สามารถแสดงผลการทดสอบเซนเซอร์วัดขนาดและอัตราการไหลของของเหลวขนาดเล็กที่พัฒนาโดย Caglar Elbuen และคณะ [24] ได้ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ผลการทดสอบเซนเซอร์ของ Caglar Elbuen และคณะ [24]

จากรูปที่ 3.23 เมื่อผู้วิจัยทำการเปลี่ยนขนาดของของเหลวจำนวน 3 ขนาดคือ (a) 250  $\mu\text{m}$  (b) 480  $\mu\text{m}$  และ (c) 700  $\mu\text{m}$  ซึ่งผลของค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จะแปรผันตรงกับขนาดของของเหลวที่ทำการวัดดังแสดงในรูปที่ 3.24

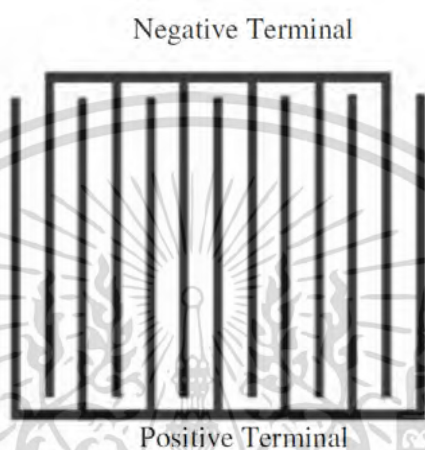


รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้กับขนาดของของเหลวที่ทำการวัดจากเซนเซอร์ของ Caglar Elbuen และคณะ [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

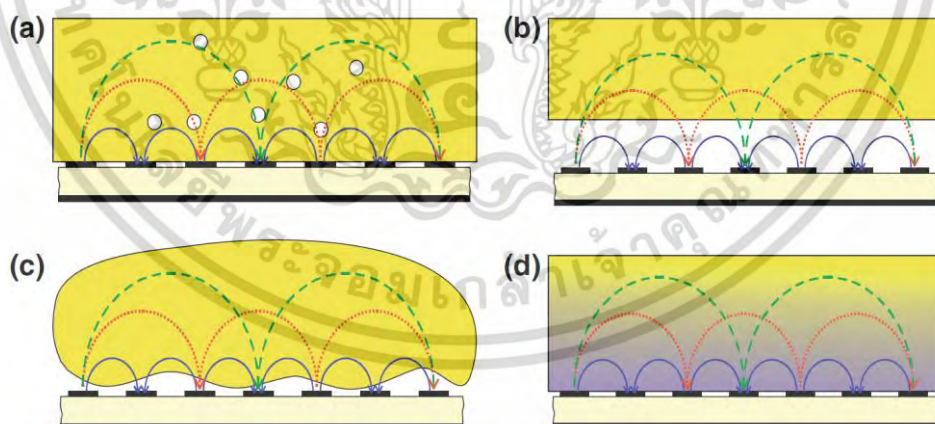
### 3.2 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล

สำหรับในการการออกแบบโครงสร้างของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล ช่วงแรกมักจะใช้ซอฟต์แวร์ในการออกแบบลายวงจรพิมพ์ เช่น Altium Designer จากนั้นจึงทำการพิมพ์ลายเซนเซอร์ออกมาเพื่อนำไปกัดทองแดงส่วนที่ไม่ต้องการออกไปเหลือไว้เฉพาะรอยทองแดงที่ต้องการ เซนเซอร์จะถูกตัดไปตามขนาดที่ต้องการเพื่อทำให้เหมาะสำหรับการนำไปทดสอบ โดยโครงสร้างพื้นฐานของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 โครงสร้างพื้นฐานของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล [25]

จากรูปที่ 3.25 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล ซึ่งความเป็นไปได้ในการตรวจจ็อบองค์ประกอบต่างๆ ของตัวอย่างในแนวระนาบมีลักษณะดังในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 การตรวจจ็อบองค์ประกอบต่างๆ ของตัวอย่างโดยเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล [25]

(a) ความหนาแน่น (b) ระยะทางสัมผัส (c) คุณสมบัติพื้นผิว (d) ความชื้น

จากรูปที่ 3.26 แสดงการตรวจจ็อบองค์ประกอบต่างๆ ของตัวอย่างโดยเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล ซึ่งองค์ประกอบต่างๆ นี้จะส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลดังสมการที่ 3.1

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (3.1)$$

เมื่อ

$C$  = capacitance in farads, F

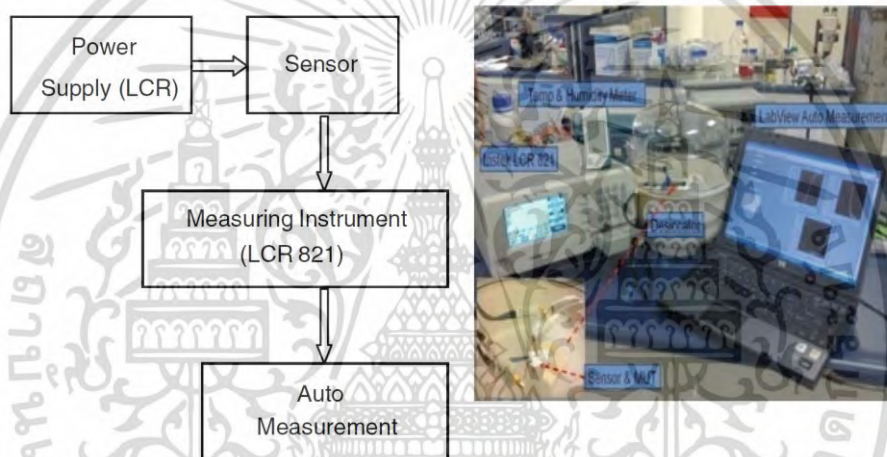
$\epsilon_0$  = the permittivity of free space ( $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  F/m)

$\epsilon_r$  = the relative static permittivity or dielectric constant (vacuum = 1)

$A$  = effective area, square meters

$d$  = effective spacing between positive and negative electrode, meters

ซึ่งจากค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลอยู่ในช่วงของพิโกฟารัด ซึ่งต้องอาศัยเครื่องมือและเทคนิคการวัดที่ดีดังตัวอย่างในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 ตัวอย่างการวัดค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล [25]

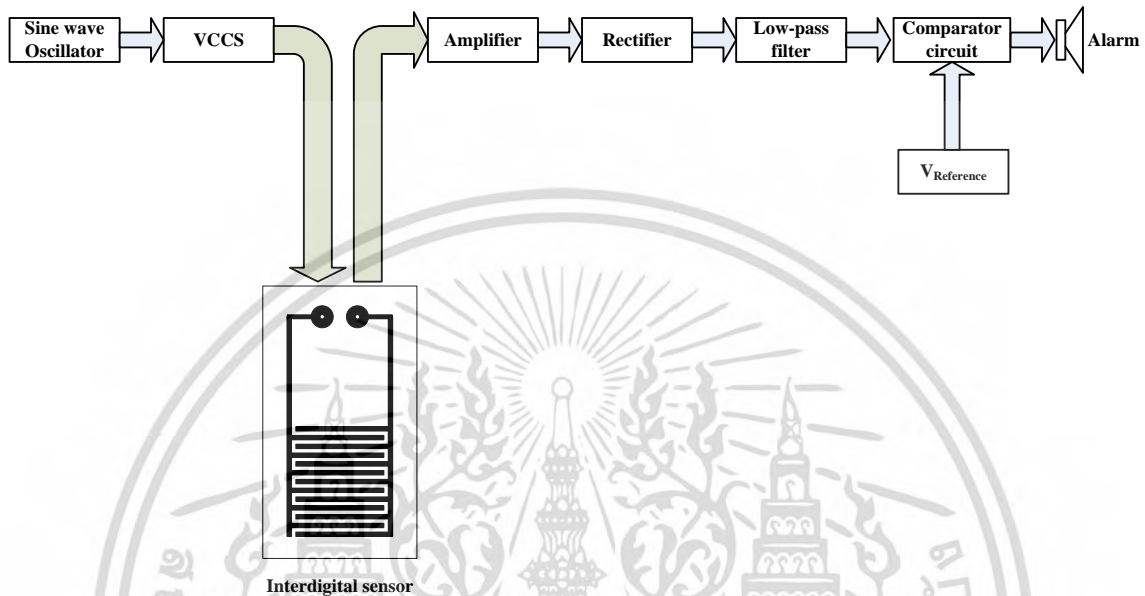
### 3.3 บทสรุป

จากค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลอยู่ในช่วงของพิโกฟารัด ซึ่งมีค่าน้อยมาก จึงจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือและเทคนิคการวัดที่ดีในการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล

## บทที่ 4

### ระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล สำหรับส่วนประกอบทั้งหมดของระบบสามารถแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล

จากรูปที่ 4.1 ระบบที่พัฒนาขึ้นจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนด้วยกันคือ

#### 4.1 ส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic circuit)

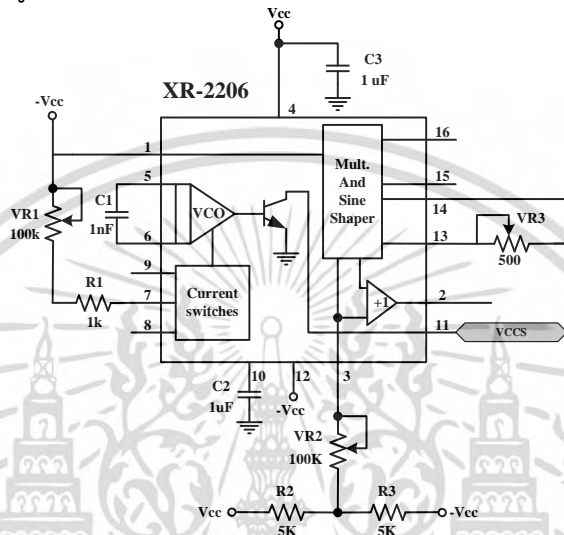
วงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนที่ใช้ในส่งสัญญาณให้กับเซนเซอร์และทำการตรวจวัดสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์เพื่อนำไปประมวลผลต่อไป ซึ่งวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลจะประกอบด้วยวงจรต่างๆ ดังนี้

- วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ (Sine wave circuit)
- วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Control Current Source: VCCS)
- เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล
- วงจรขยายสัญญาณ
- วงจรเรียงกระแส (Rectifier circuit)
- วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter)
- วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Comparator circuit)
- วงจรแสดงผล (Display circuit)

สำหรับรายละเอียดในการออกแบบของวงจรอิเล็กทรอนิกส์แต่ละส่วน สามารถแสดงได้ดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ (Sine wave circuit)

สำหรับวงจรถูกกำเนิดสัญญาณไซน์จะใช้ IC XR2206 ซึ่งเป็นไอซีสำหรับการสังเคราะห์ความถี่ที่มีความแม่นยำ และสะดวกในการใช้งาน โดยสามารถควบคุมการผลิตความถี่ได้ในช่วงความถี่ 0.01 Hz ถึง 1MHz โดยสามารถเลือกรูปแบบของสัญญาณเอาต์พุตได้หลายรูปแบบ เช่น สัญญาณไซน์ สัญญาณสามเหลี่ยม (Triangle) สัญญาณสี่เหลี่ยม (Square wave) เป็นต้น โดยโครงสร้างของวงจรสำหรับการกำเนิดสัญญาณไซน์สำหรับระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2

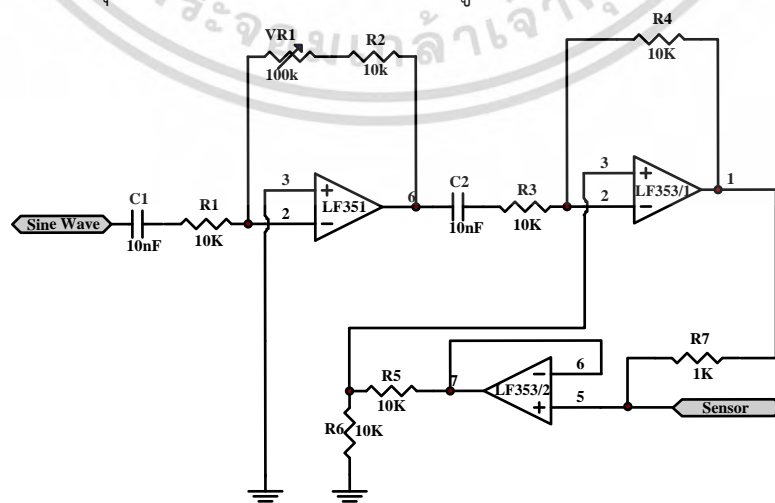


รูปที่ 4.2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์

จากรูปที่ 4.2 ในโครงการวิจัยนี้จะใช้สัญญาณไซน์ในการขับเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล โดยสัญญาณจากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณไซน์จะถูกป้อนเข้าสู่วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันเพื่อทำหน้าที่ในการควบคุมกระแสที่จ่ายให้กับเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลให้เหมาะสม

#### 4.1.2 วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Control Current Source: VCCS)

วงจรถูกจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันทำหน้าที่ในการควบคุมกระแสที่จ่ายให้กับเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล โดยสามารถปรับขนาดตามที่ต้องการโดยปรับค่าความต้านทาน VR1 โดยลักษณะของวงจรถูกจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3

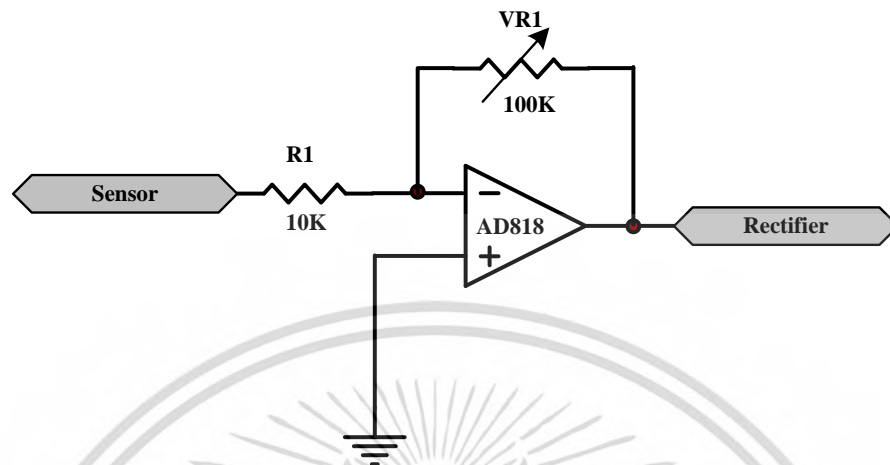


รูปที่ 4.3 วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 วงจรขยายสัญญาณ

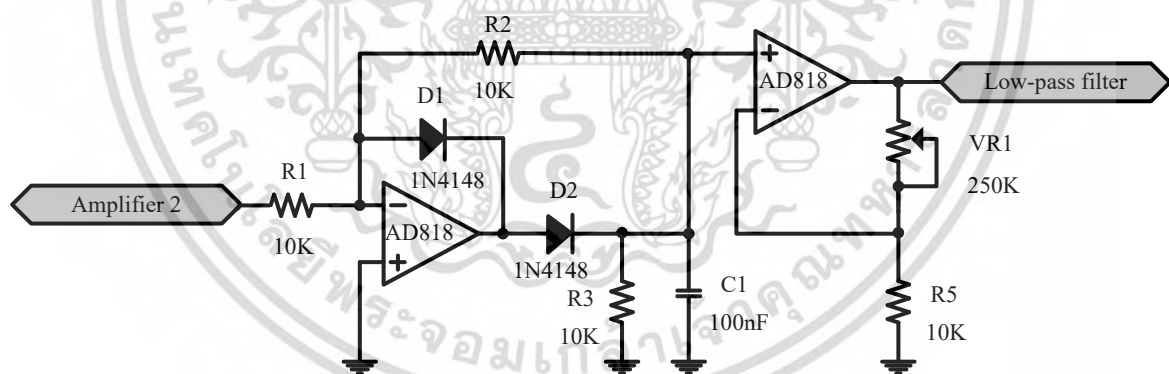
สำหรับวงจรขยายสัญญาณจะทำหน้าที่ในการขยายสัญญาณจากเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลก่อนที่จะส่งไปยังวงจรเรียงกระแส โดยลักษณะของวงจรขยายสัญญาณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรขยายสัญญาณ

#### 4.1.4 วงจรเรียงกระแส

สำหรับวงจรเรียงกระแสจะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณไซน์ที่ได้จากวงจขยายสัญญาณให้เป็นแรงดันดีซีก่อนที่จะส่งไปยังวงจรเปรียบเทียบแรงดันต่อไป โดยลักษณะของวงจรเรียงกระแสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5



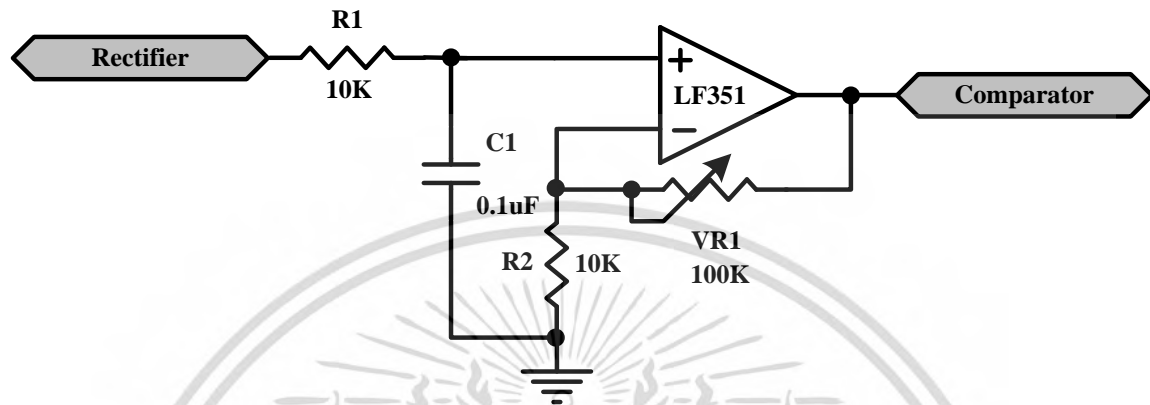
รูปที่ 4.5 วงจรเรียงกระแส

จากรูปที่ 4.5 สัญญาณจากวงจขยายสัญญาณ จะถูกแปลงเป็นสัญญาณดีซี โดยใช้โอปแอมป์สองตัวต่อในลักษณะวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full wave rectifier circuit) ซึ่งแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะถูกส่งไปยังวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อลดสัญญาณรบกวนให้น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

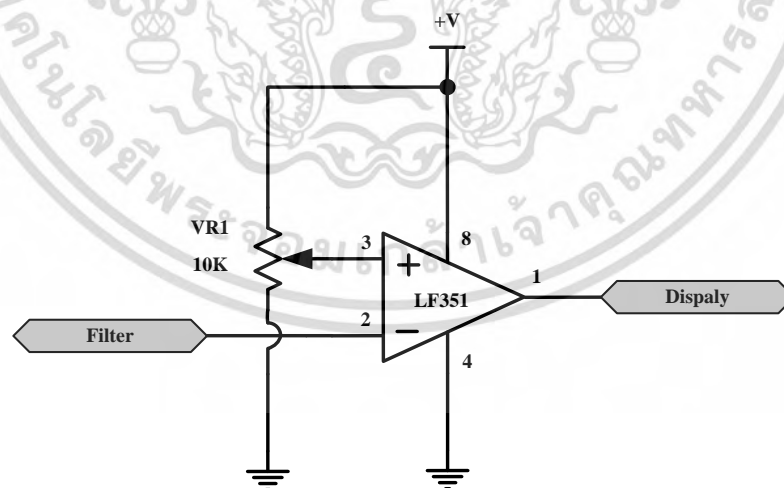
สำหรับวงจรกรองความถี่ต่ำจะทำหน้าที่ในการกรองสัญญาณดีซีที่ได้จากวงจรเรียงกระแสให้มีขนาดของสัญญาณรบกวนลดลงก่อนที่จะส่งไปยังวงจรเปรียบเทียบแรงดัน โดยลักษณะของวงจรกรองความถี่ต่ำ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

#### 4.1.6 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

สำหรับวงจรเปรียบเทียบแรงดันจะทำหน้าที่ในการเปรียบเทียบค่าแรงดันที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านกับค่าแรงดันอ้างอิง ซึ่งหากค่าแรงดันต่ำกว่าค่าแรงดันอ้างอิงก็จะส่งสัญญาณไปขับวงจรแสดงผลเพื่อกำเนิดสัญญาณเตือนให้ผู้ใช้งานรับทราบ สำหรับลักษณะของวงจรเปรียบเทียบแรงดันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7

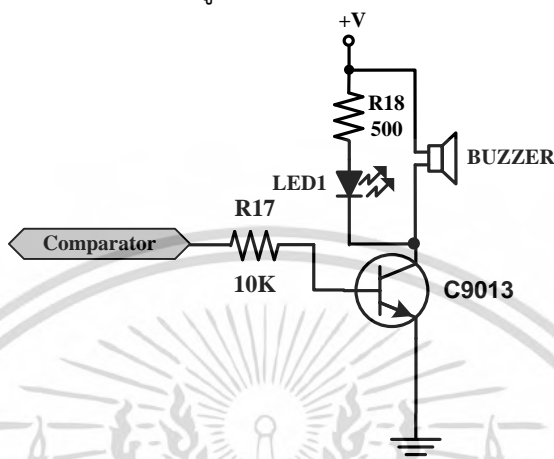


รูปที่ 4.7 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.7 วงจรแสดงผล

สำหรับวงจรแสดงผลจะทำหน้าที่ในการแสดงผลการตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล โดยถ้าคุณภาพของอาหารทะเลต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ วงจรแสดงผลจะทำการแสดงผลการเตือนด้วยหลอดแอลอีดีสีแดง (LED1) และเสียงสัญญาณเสียงเตือนให้ผู้รับทราบ โดยลักษณะของวงจรแสดงผลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 วงจรแสดงผล

#### 4.2 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล

สำหรับเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้แผ่นพีซีบี (printed circuit board : PCB) แบบ FR-4 ในการนำมาใช้ในการสร้าง โดยลักษณะและคุณสมบัติของแผ่นพีซีบีแบบ FR-4 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.9 ลักษณะของแผ่นพีซีบีแบบ FR-4 : [www.AliExpress.com](http://www.AliExpress.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

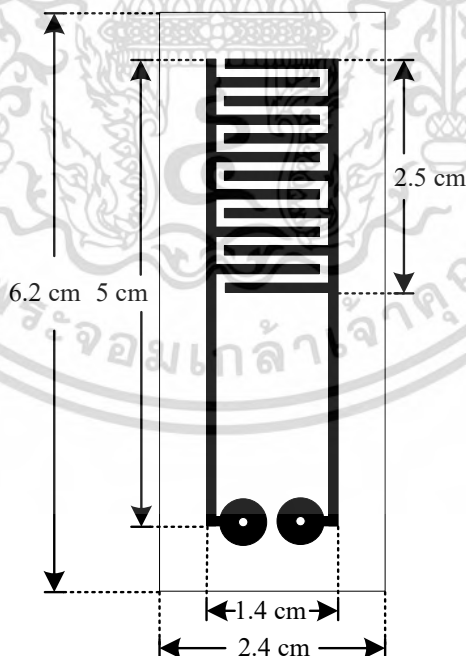
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของแผ่นพีซีบีแบบ FR-4 [26-27]

Density	1.9e3 - 2.1e3 kg/m <sup>3</sup>
Yield Strength	6.5e7 - 7e7 Pa
Tensile Strength	7e7 - 7.5e7 Pa
Young's Modulus	1.2e10 - 1.4e10 Pa
Max Service Temperature	122 - 138 °C
Specific Heat Capability	1.2e3 - 1.4e3 J/kg °C
Resistivity After Damp Heat Volume	10e8 M ohms cm
Resistivity After Damp Heat Surface	10e8 M ohms
Dielectric Breakdown. Parallel to laminate	>60 KV
Dielectric Constant @ 1MHz	4.7

จากแผ่นพีซีบีแบบ FR-4 ทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบโครงสร้างของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลสำหรับการทดสอบระบบจำนวนทั้งหมด 8 แบบดังรายละเอียดดังนี้

#### 4.2.1 เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 1

สำหรับเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 1 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 โดยสีดำแสดงส่วนที่เป็นลายทองแดง

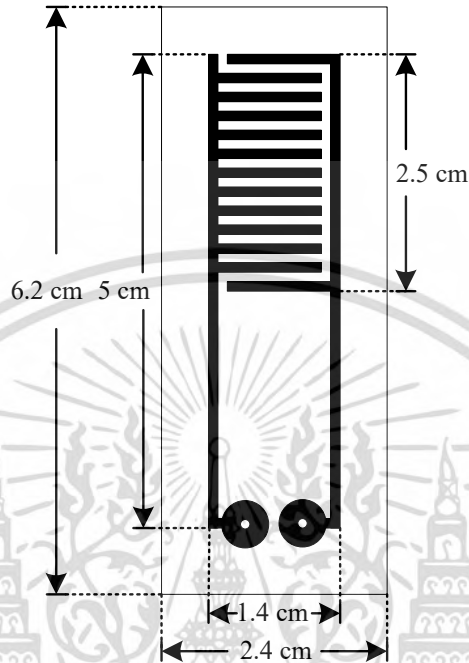


รูปที่ 4.10 เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2

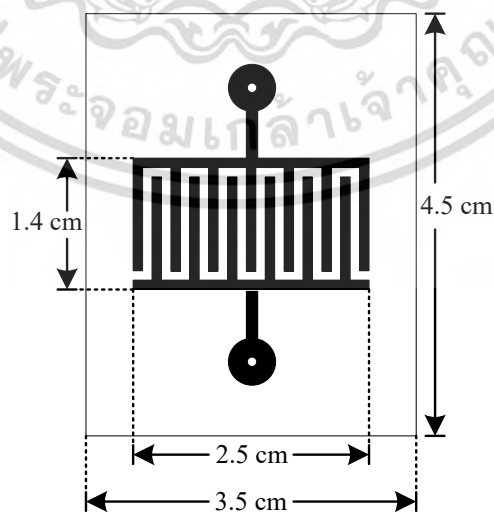
สำหรับเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 โดยสีดำแสดงส่วนที่เป็นลายทองแดง



รูปที่ 4.11 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2

#### 4.2.3 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 3

สำหรับเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 3 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 โดยสีดำแสดงส่วนที่เป็นลายทองแดง

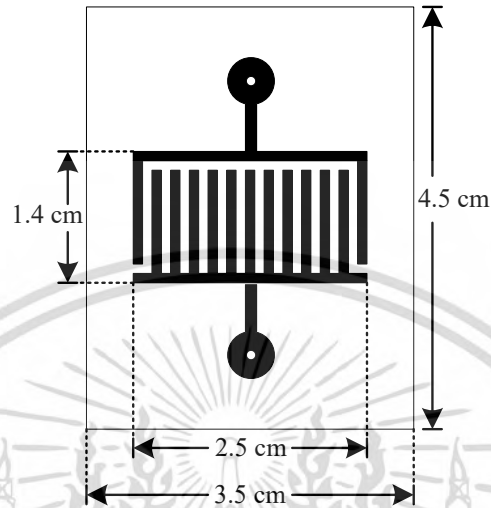


รูปที่ 4.12 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 4

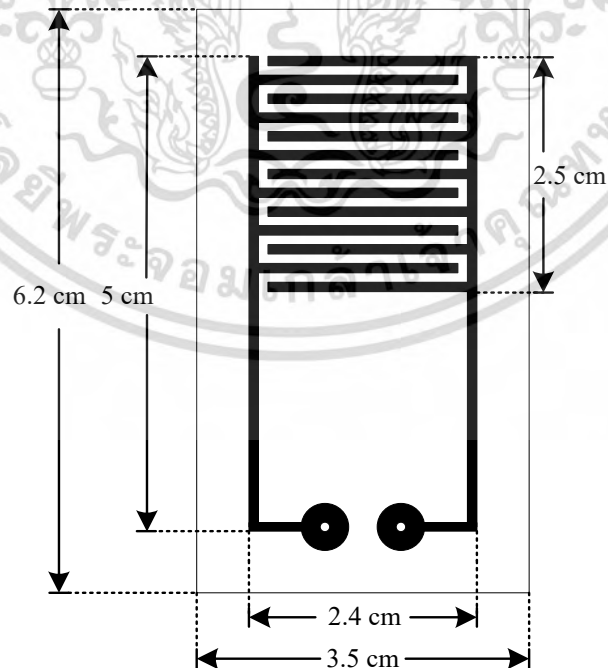
สำหรับเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 4 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 โดยสีดำแสดงส่วนที่เป็นลายทองแดง



รูปที่ 4.13 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 4

#### 4.2.5 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 5

สำหรับเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 5 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 โดยสีดำแสดงส่วนที่เป็นลายทองแดง

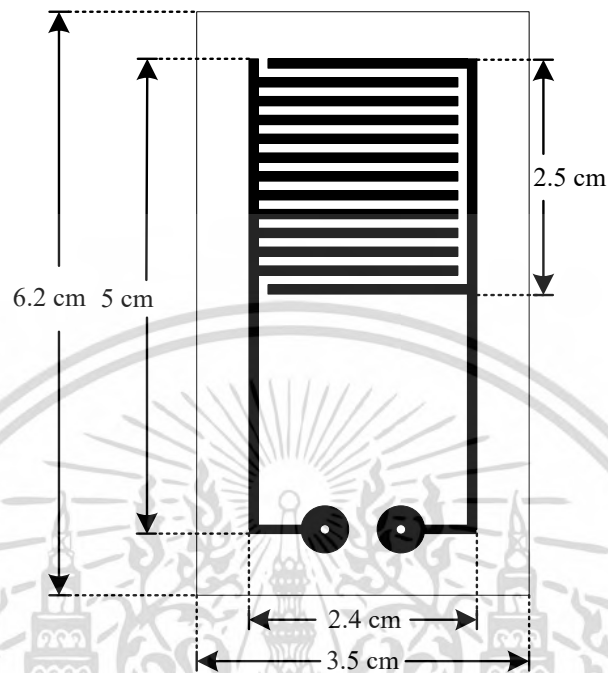


รูปที่ 4.14 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.6 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 6

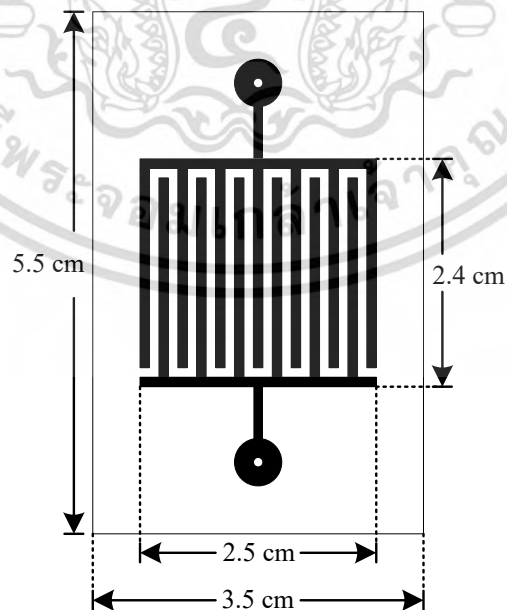
สำหรับเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 6 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 โดยสีดำแสดงส่วนที่เป็นลายทองแดง



รูปที่ 4.15 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 6

#### 4.2.7 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 7

สำหรับเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 7 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.16 โดยสีดำแสดงส่วนที่เป็นลายทองแดง

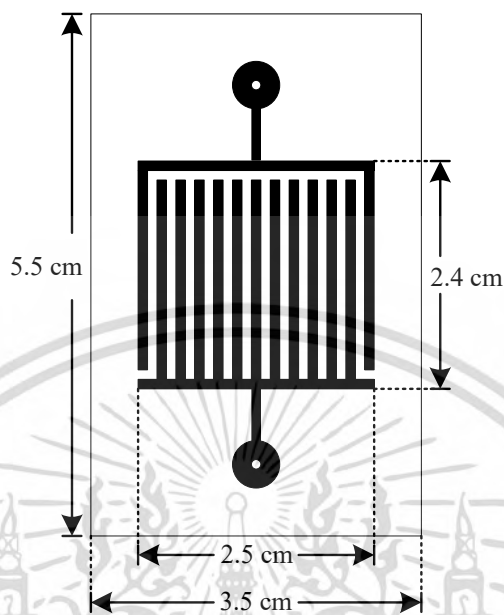


รูปที่ 4.16 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.8 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 8

สำหรับเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 8 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 โดยสีดำแสดงส่วนที่เป็นลายทองแดง



รูปที่ 4.17 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 8

#### 4.3 การสร้างต้นแบบเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล

จากโครงสร้างเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลทั้ง 8 แบบที่ออกแบบขึ้นมา จะถูกนำไปสร้างเป็นต้นแบบเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลเพื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติในการตรวจจัดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารทะเล โดยในการสร้างจะแยกออกเป็น 2 วิธีคือ

##### 4.3.1 การสร้างต้นแบบเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลโดยใช้เครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก

สำหรับการสร้างต้นแบบเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลโดยใช้เครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก (Mini CNC) นั้นจะใช้เครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก รุ่น Mini CNC1610 ในการกัดแผ่นพีซีบีแบบ FR-4 ให้ได้เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบต่างๆ โดยลักษณะตัวอย่างของเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างของเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก : [www.banggood.com](http://www.banggood.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

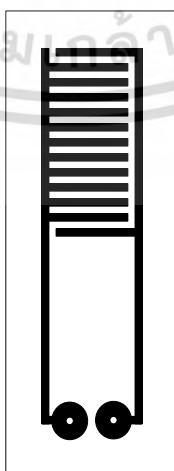
สำหรับคุณสมบัติที่สำคัญของเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก รุ่น Mini CNC1610 สามารถแสดง  
ได้ดังตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.2** คุณสมบัติที่สำคัญของเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก รุ่น Mini CNC1610 : [www.banggood.com](http://www.banggood.com)

โมเดล	Mini CNC1610
วัสดุกรอบ	อะลูมิเนียม, PVC, พลาสติก
แหล่งจ่ายไฟ	DC 24V 5A
แรงดันไฟฟ้า	AC 110-240V
ขนาดตัวเครื่อง	260x240x220mm
พื้นที่ใช้งาน	160x100x45mm
โปรไฟล์อลูมิเนียม: 2020	
มอเตอร์ควบคุมการเคลื่อนที่	มอเตอร์ 42 สปีดแรงดันไฟฟ้า: 12V, กระแสเฟส 1.3A, ความต้านทานเฟส 2.1 โอห์มแรงบิด 0.25Nm
มอเตอร์แกนหลัก	มอเตอร์แกน 775 (12-36V), 24V: 7000rpm / นาที
ซอฟต์แวร์ควบคุม	Grbl Control
ซอฟต์แวร์การออกแบบ	ซอฟต์แวร์ CAM
พอร์ตอินเทอร์เฟซ	USB
ระบบปฏิบัติการ	Windows XP SP3, win7, win8, win10, linux
น้ำหนักสุทธิ:	5.7 กก

จากลักษณะและคุณสมบัติของเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กที่นำมาใช้ในการสร้างต้นแบบเซนเซอร์แบบ  
อินเทอร์ดิจิตอลแบบต่างๆ จะมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

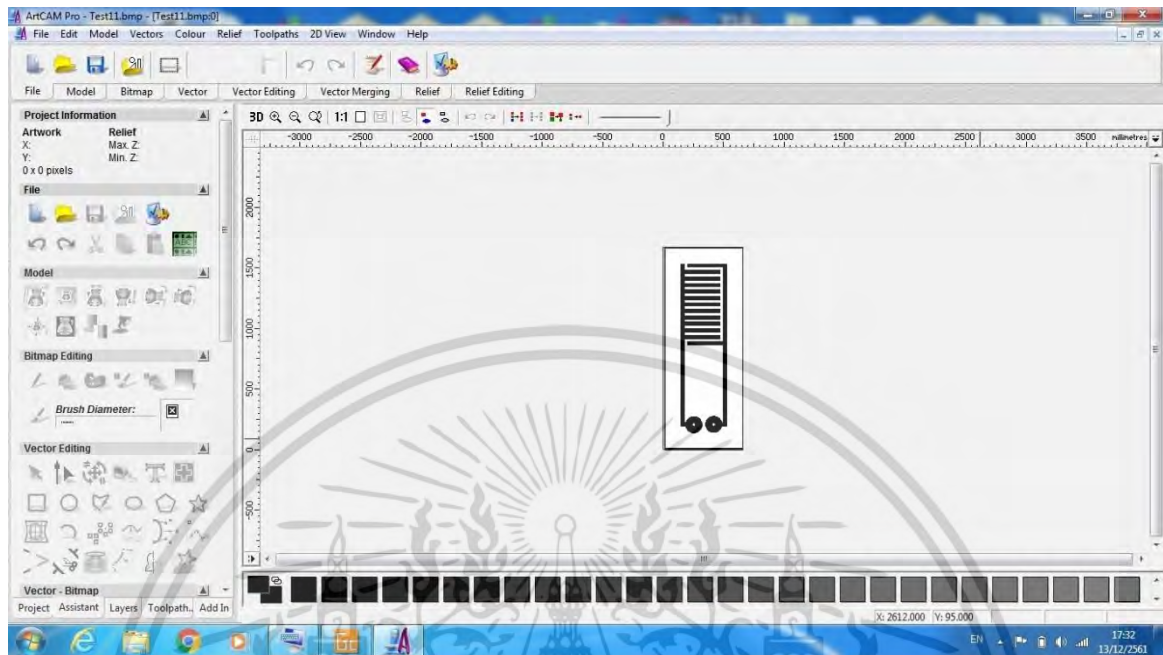
1. นำไฟล์โครงสร้างต้นแบบ (เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2) ซึ่งบันทึกในแบบ Bitmap  
image file(\*.bmp) ดังแสดงในรูปที่ 4.19



**รูปที่ 4.19** โครงสร้างต้นแบบ (เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2)

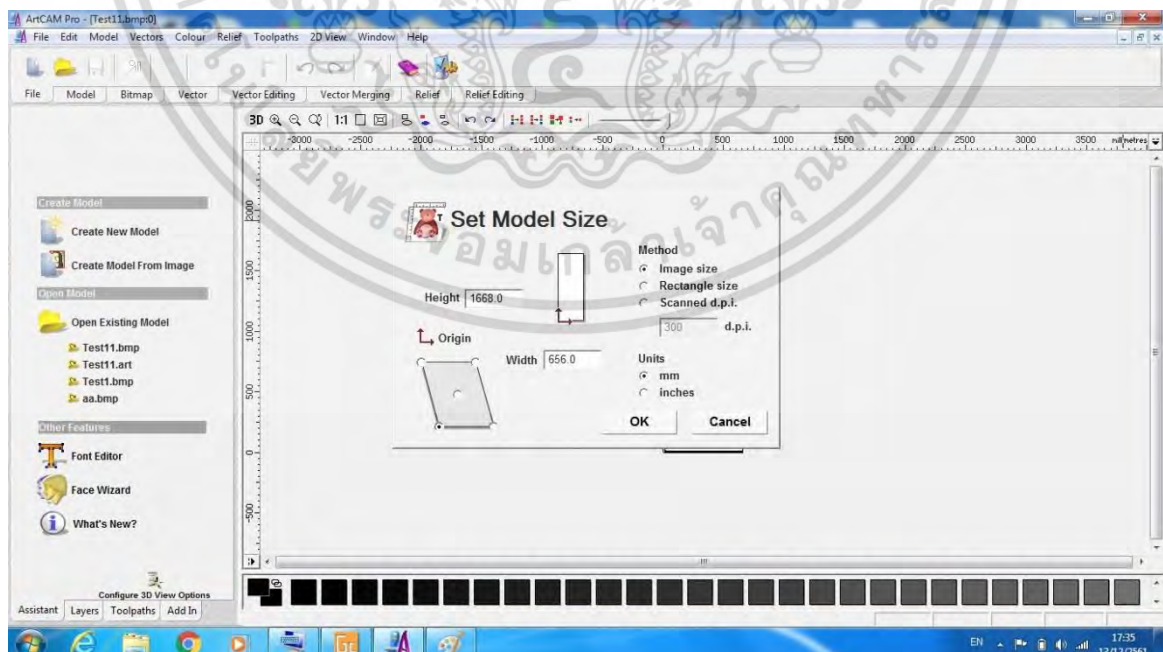
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการเปิดไฟล์โครงสร้างต้นแบบ (เช่นเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 2) ด้วยโปรแกรม ArtCAM Pro เพื่อสร้างเส้นทางเดินของหัวกัด (Tool path) ดังแสดงในรูปที่ 4.20



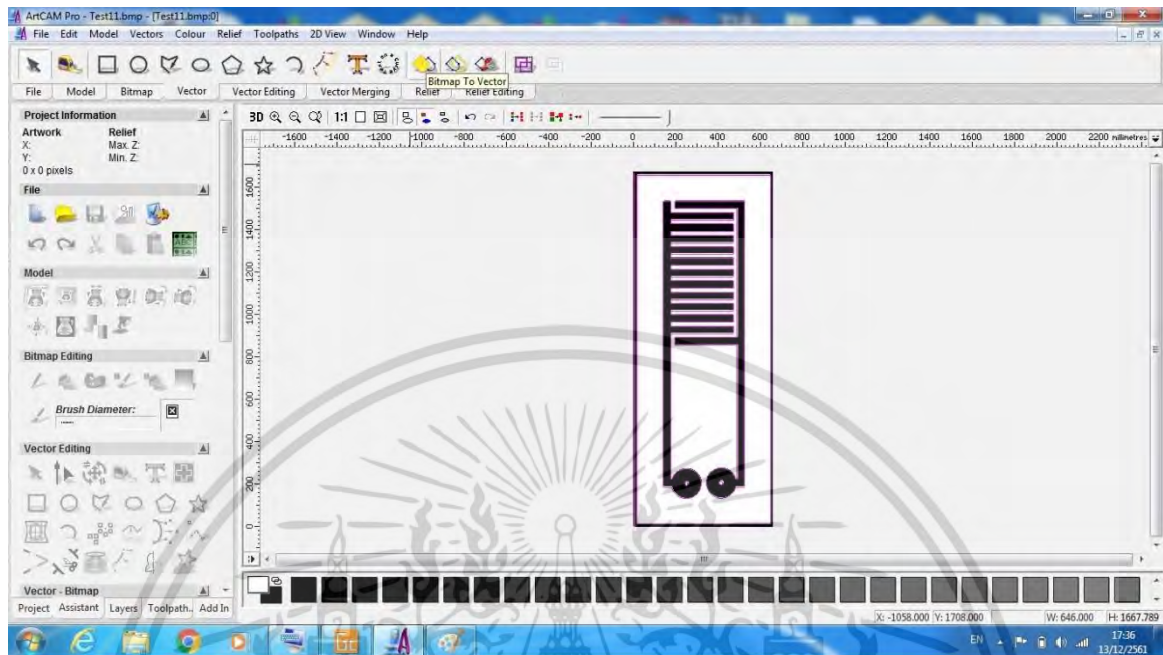
รูปที่ 4.20 การเปิดไฟล์โครงสร้างต้นแบบ (เช่นเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 2) ด้วยโปรแกรม ArtCAM Pro

3. หลังจากนั้นจะทำการกำหนดขนาดโครงสร้างของชิ้นงานที่จะทำการกัดดังแสดงในรูปที่ 4.21



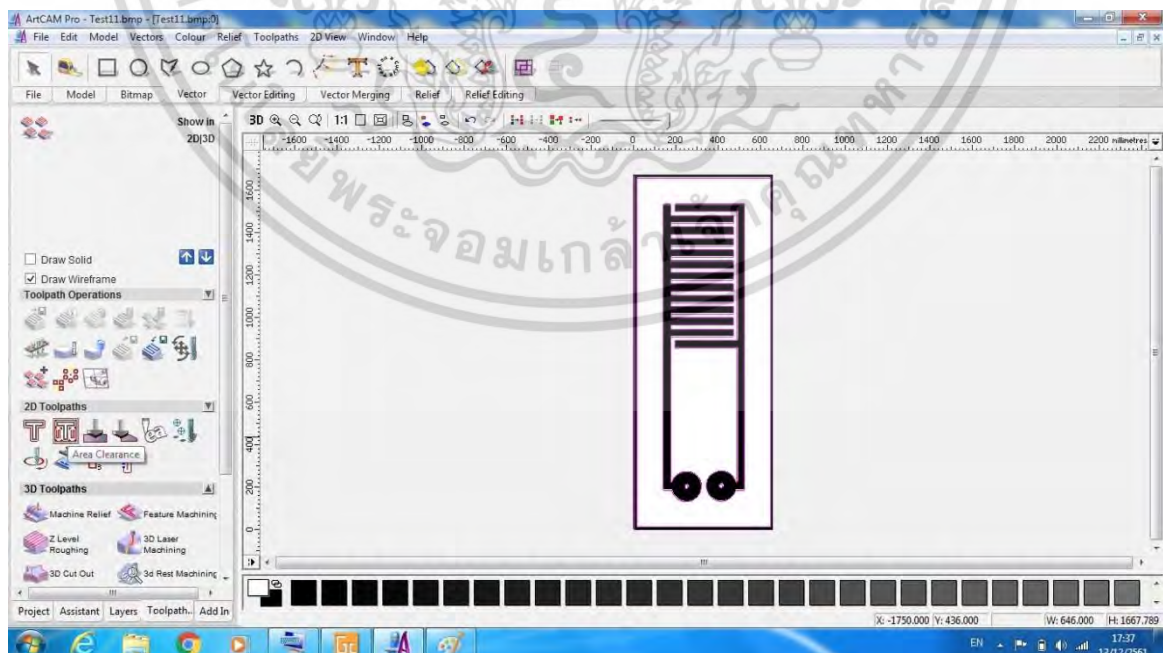
รูปที่ 4.21 การกำหนดขนาดโครงสร้างของชิ้นงานที่จะทำการกัด  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. จากนั้นจะทำการแปลงไฟล์โครงสร้างต้นแบบ (เช่น เซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 2) จาก Bitmap ไปเป็น Vector ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 การแปลงไฟล์จาก Bitmap ไปเป็น Vector

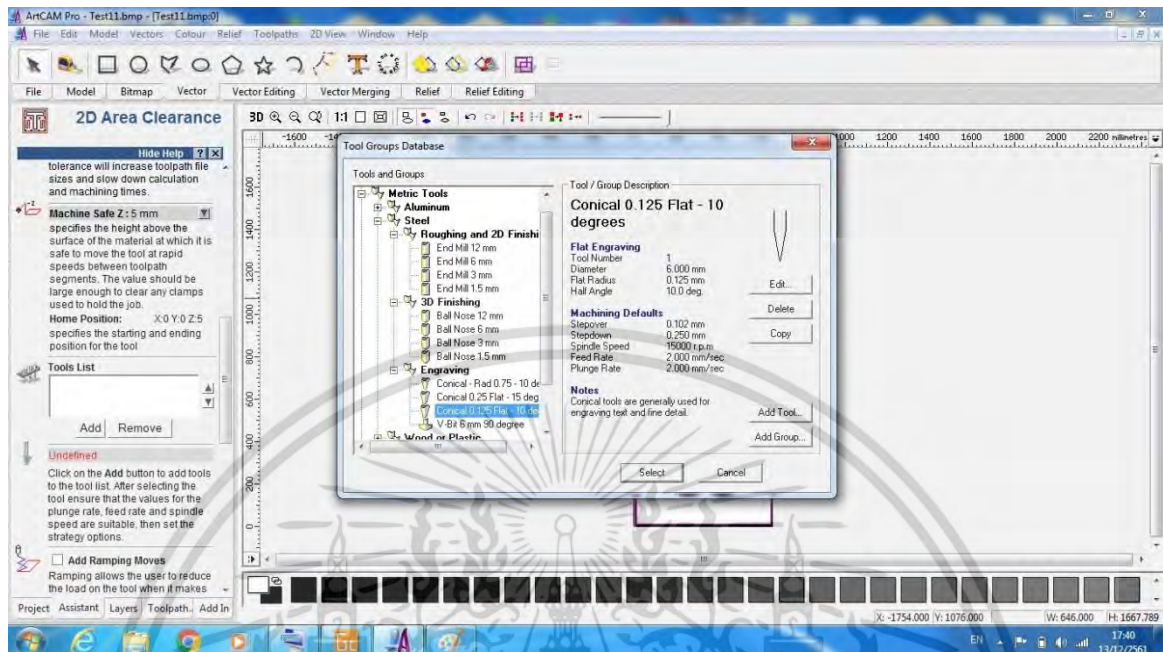
5. หลังจากทำการแปลงไฟล์โครงสร้างต้นแบบ (เช่น เซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 2) แล้ว จากนั้นจะทำการกำหนดคุณสมบัติของเส้นทางเดินของหัวกัด ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 การกำหนดคุณสมบัติของเส้นทางเดินของหัวกัด

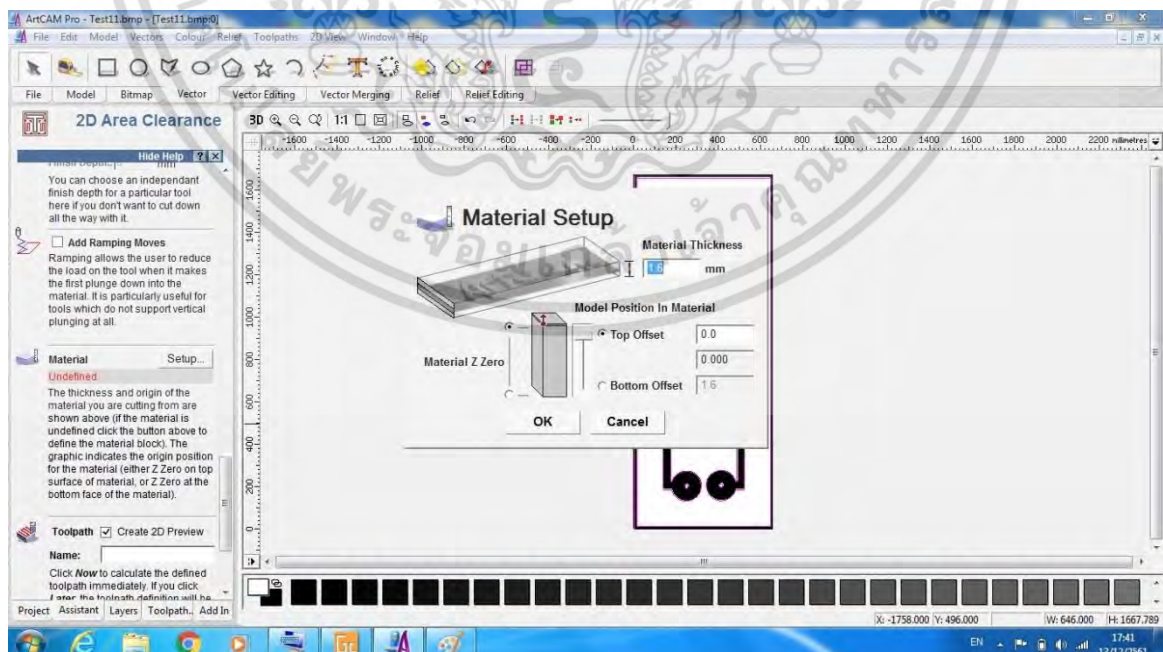
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. หลังจากการกำหนดคุณสมบัติของเส้นทางเดินของหัวกัดแล้ว จากนั้นจึงทำการกำหนดขนาดของดอกสว่านที่ใช้ในการกัดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 การกำหนดขนาดของดอกสว่านที่ใช้ในการกัดชิ้นงาน

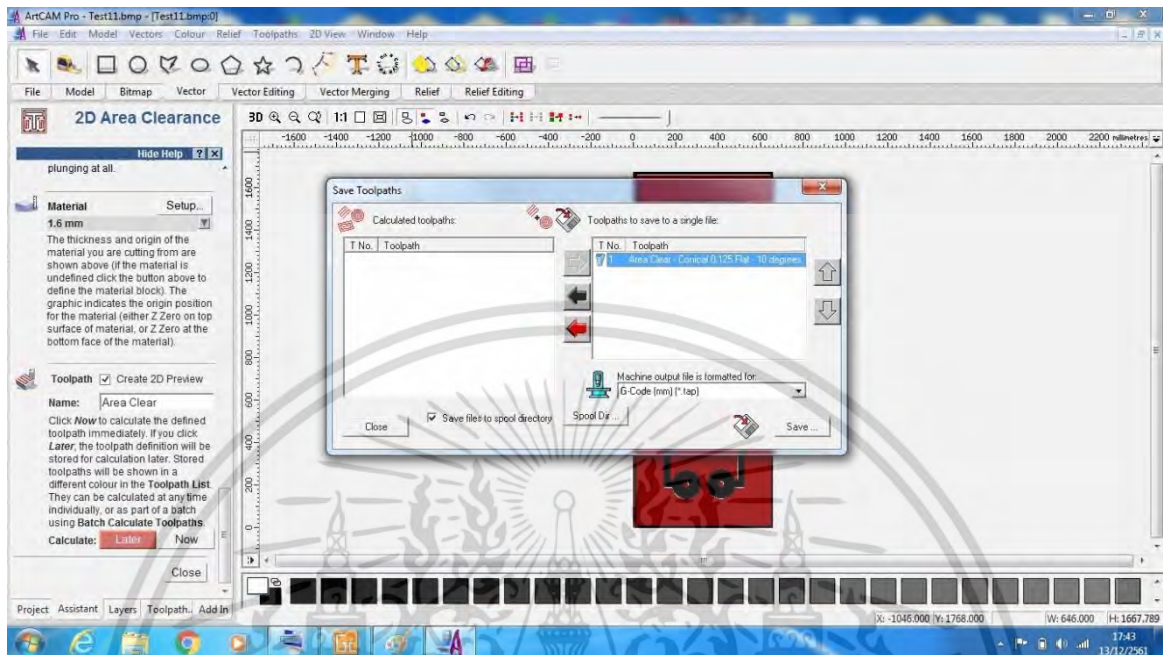
7. หลังจากการกำหนดขนาดของดอกสว่านที่ใช้ในการกัดชิ้นงานแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาทำการกัด ดังแสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาทำการกัด

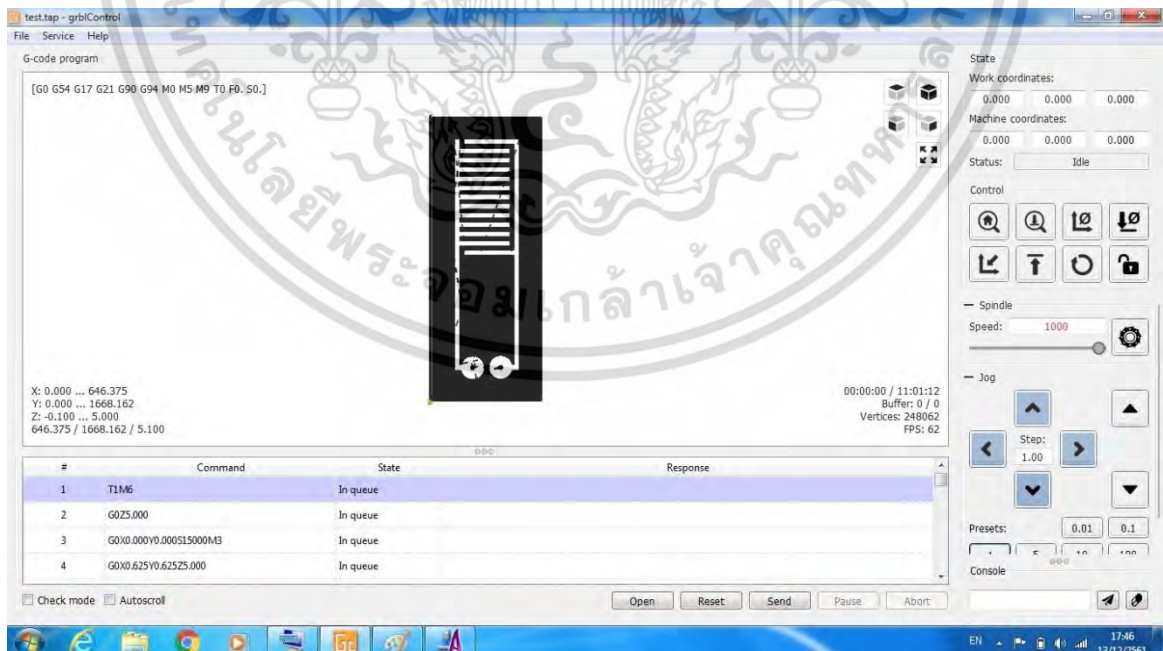
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. หลังจากนั้นจะทำการบันทึกสร้างเส้นทางเดินของหัวกัดที่ได้ออกแบบไว้ในไฟล์ \*.tap ในรูปแบบ G-Code ซึ่งย่อมาจาก Geometric Code เป็นภาษาสำหรับการสั่งงานเครื่องกัดให้เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งที่ต้องการดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 การบันทึกสร้างเส้นทางเดินของหัวกัดที่ได้ออกแบบไว้ในไฟล์ \*.tap (G-Code)

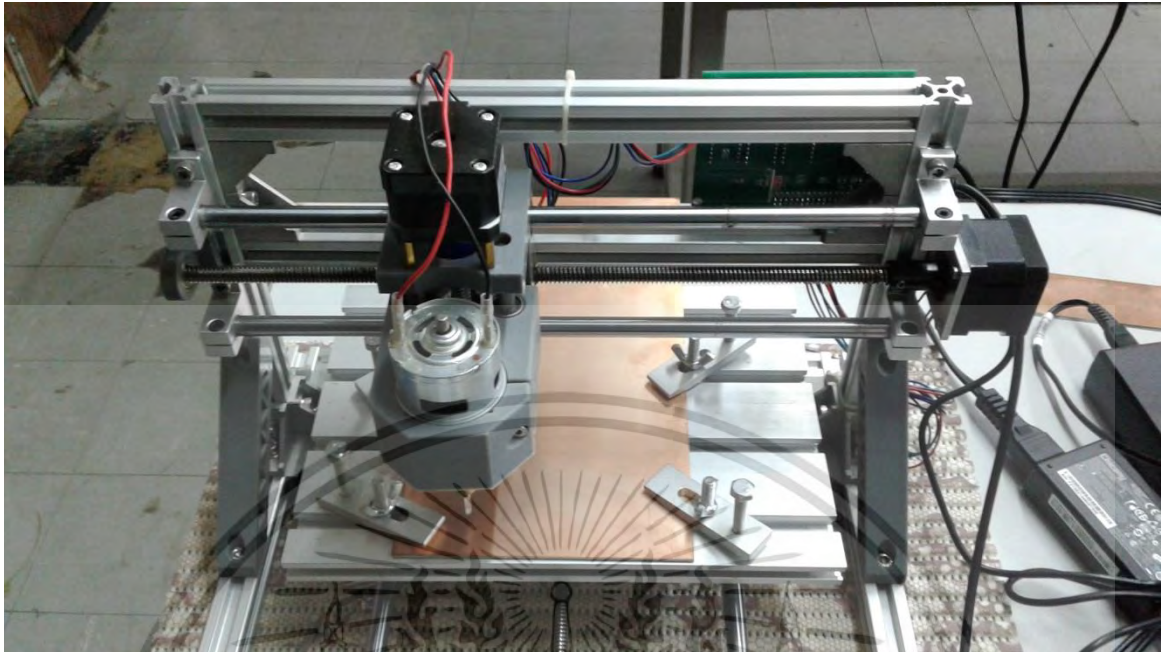
8. หลังจากนั้นจะทำการเปิดไฟล์ \*.tap (G-code) ด้วยโปรแกรม grblControl เพื่อสั่งให้เครื่องกัดขึ้นงานตามเส้นทางเดินของหัวกัดที่ได้ออกแบบไว้ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 การเปิดไฟล์ \*.tap (G-code) เพื่อสั่งให้เครื่องกัดขึ้นงานตามเส้นทางเดินของหัวกัดที่ได้ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ทำการติดตั้งแผ่นพีซีบีลงบนเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 การติดตั้งแผ่นพีซีบีลงบนเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก

10. หลังจากทำการติดตั้งแผ่นพีซีบีลงบนเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก แล้วจึงทำการสั่งรันโปรแกรม grblControl เพื่อสั่งให้เครื่องกัดชิ้นงานตามเส้นทางเดินของหัวกัดที่ได้ออกแบบไว้ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 การสั่งรันโปรแกรมgrblControl เพื่อสั่งให้เครื่องกัดชิ้นงานตามเส้นทางเดินของหัวกัด  
ที่ได้ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. สำหรับต้นแบบ (เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2) ที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.30



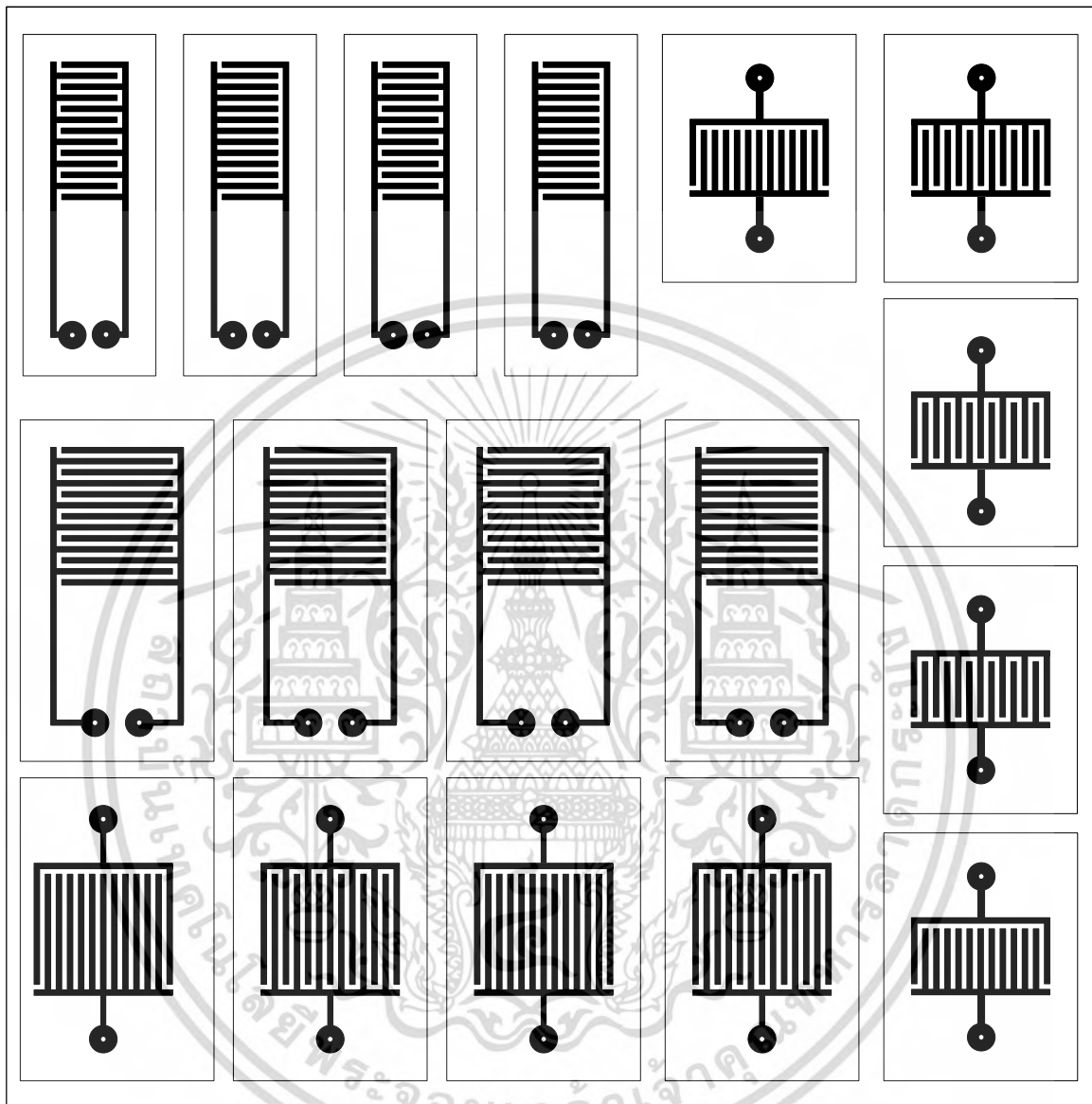
รูปที่ 4.30 ต้นแบบ (เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2) ที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก

จากรูปที่ 4.30 แสดงต้นแบบ (เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2) ที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก โดยใช้เวลาในการกัดชิ้นงานประมาณ 90 นาที ซึ่งจากชิ้นงานที่ได้จะเห็นว่าเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2 ที่สร้างขึ้นมามีความไม่สม่ำเสมอของผิวเซนเซอร์ตลอดจนฐานรองซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสัญญาณและการวัดอีกทั้งใช้เวลาในการกัดที่ค่อนข้างนานต่อเซนเซอร์ 1 ตัว ดังนั้น วิธีการนี้จึงไม่เหมาะสำหรับการผลิตเซนเซอร์เป็นจำนวนมาก

#### 4.3.2 การสร้างต้นแบบเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลโดยใช้ฟิล์มแห้ง

สำหรับการสร้างต้นแบบเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลโดยใช้ฟิล์มแห้ง (Dry film) วิธีนี้เหมาะสำหรับการสร้างเซนเซอร์ที่ละหลายตัว โดยในการสร้างจะทำการเตรียมไฟล์โครงสร้างต้นแบบซึ่งทางผู้วิจัยได้ทำการรวมเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลทั้ง 8 รูปแบบลงในแผ่นพีซีบีเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.31

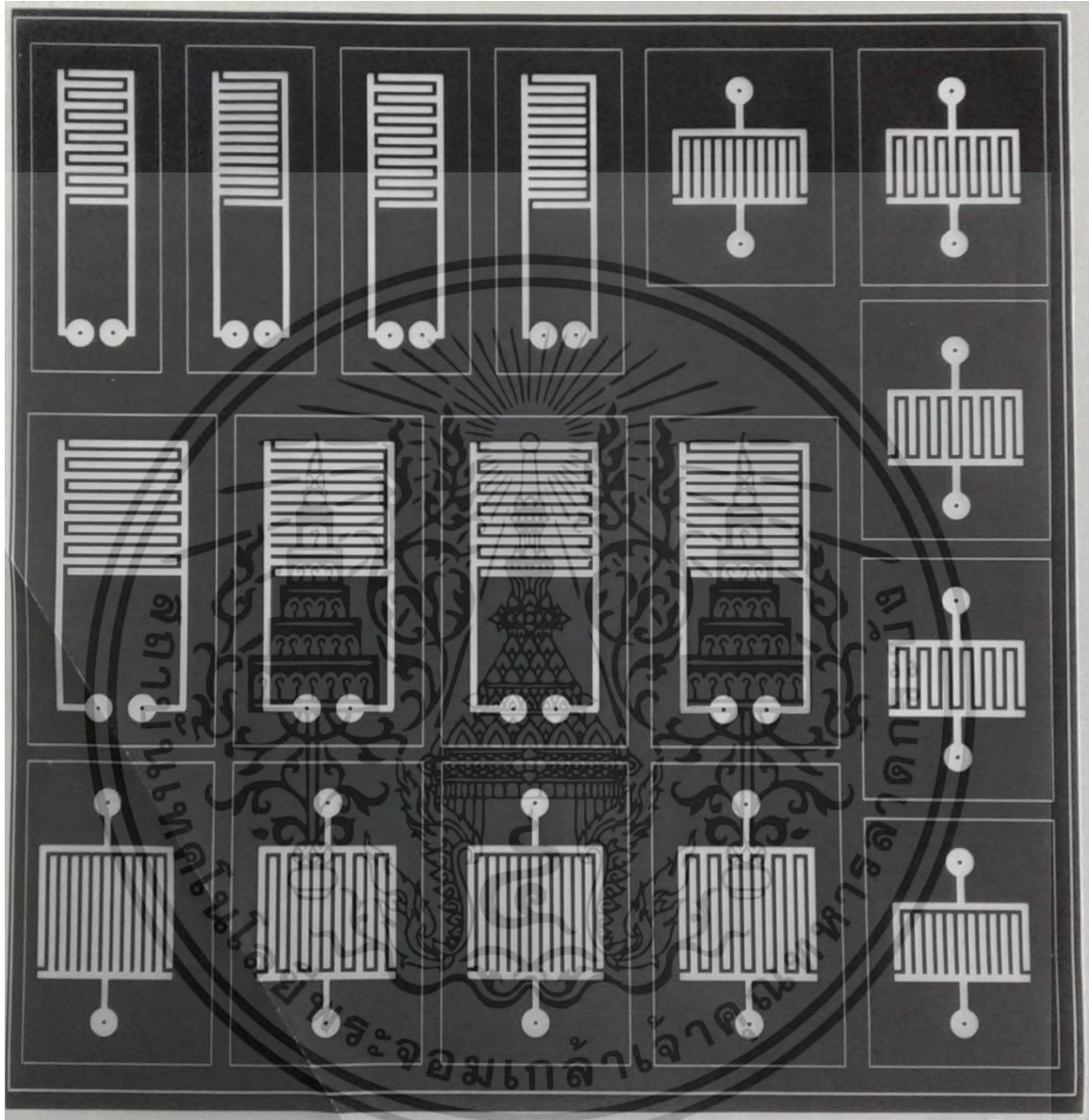
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลทั้ง 8 รูปแบบรวมลงในแผ่นพีซีบีเดียวกัน

จากรูปที่ 4.31 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลทั้ง 8 รูปแบบที่รวมลงในแผ่นพีซีบีเดียวกันจะถูกนำไปถ่ายลงบนฟิล์มแบบ Negative ดังแสดงในรูปที่ 4.32

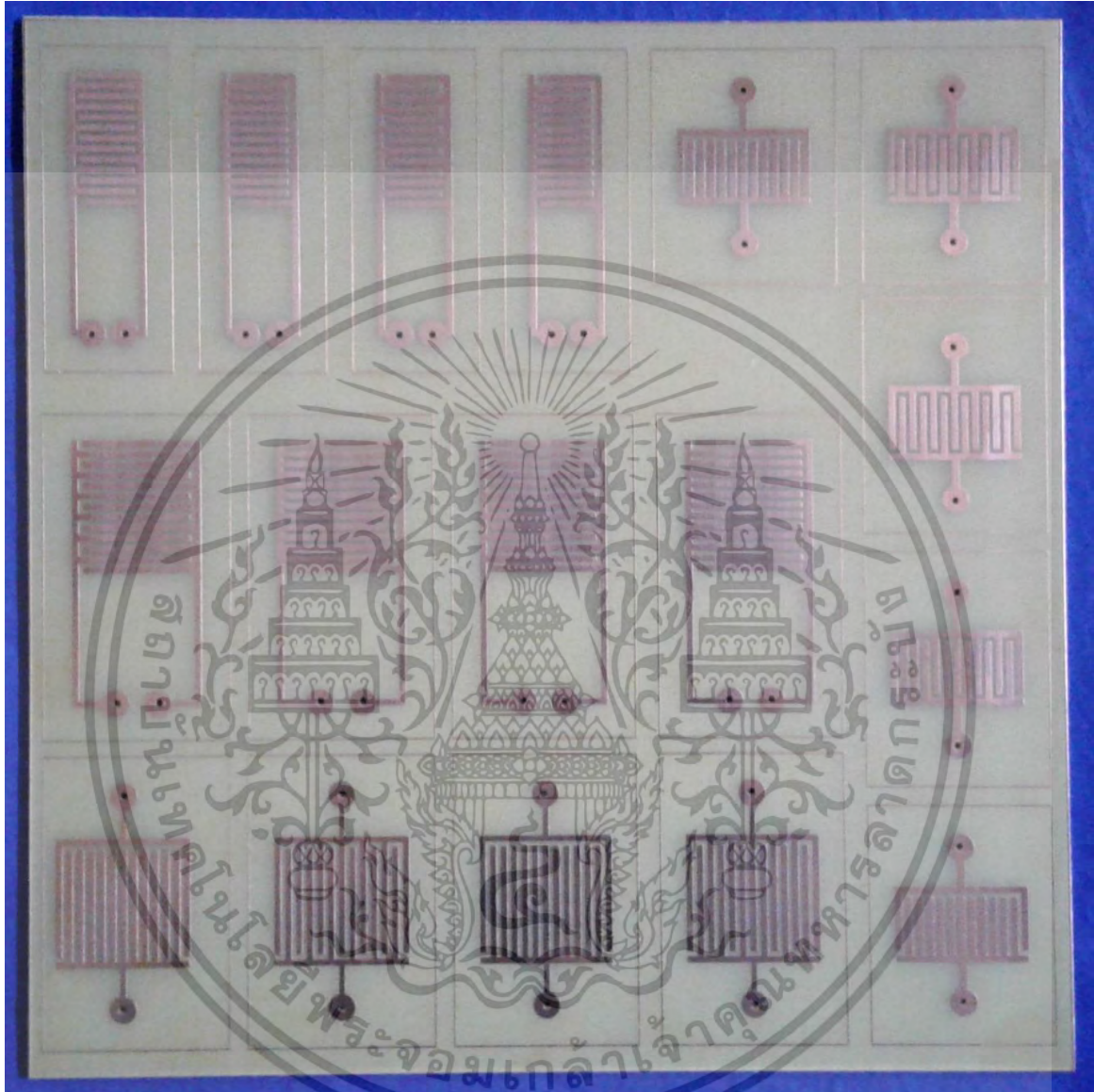
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 फिल्मแบบ Negative ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิฟิรอลทั้ง 8 รูปแบบ

จากรูปที่ 4.32 फिल्मแบบ Negative ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิฟิรอลทั้ง 8 รูปแบบ จะถูกนำไป ถ่ายลงฟิล์มแห้งที่ติดบนแผ่นพีซีบี ก่อนที่จะทำการฉายด้วยแสงยูวี ซึ่งส่วนของฟิล์มแห้งที่ถูกแสงยูวีจะ แข็งตัวเกาะอยู่กับแผ่นพีซีบี สำหรับส่วนที่ไม่ถูกแสงยูวีก็จะหลุดออกไปจากการล้าง ซึ่งเราจะนำเอาแผ่น พีซีบีนี้ไปกัดทองแดงออก ได้เป็นเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิฟิรอลทั้ง 8 รูปแบบดังรูปที่ 4.33

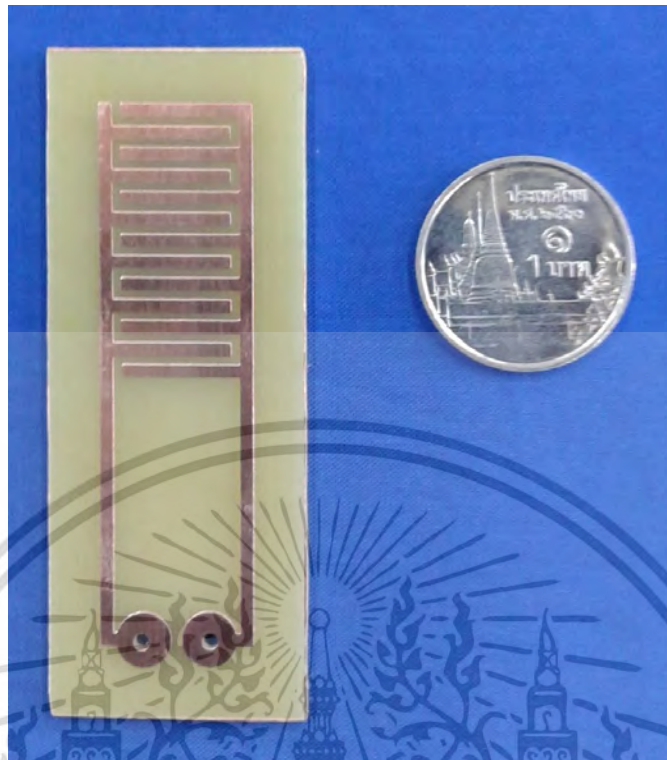
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 แผ่นเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลทั้ง 8 รูปแบบ หลังกัดทองแดงออกไป

จากแผ่นรูปที่ 4.33 เมื่อทำการกัดทองแดงออกจากแผ่นพีซีบีจะได้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลทั้ง 8 รูปแบบที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งจะนำไปตัดแยกเป็นเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลตามที่ได้ออกแบบไว้ดังรูปที่ 4.34 ถึงรูปที่ 4.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

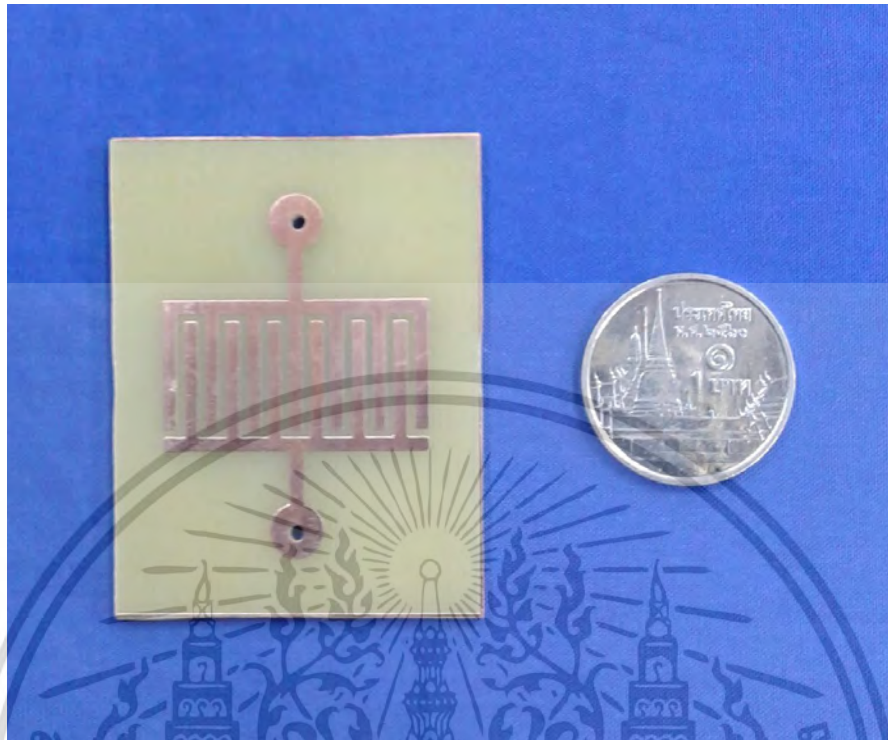


รูปที่ 4.34 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 1 ที่ทำการสร้างขึ้นมา



รูปที่ 4.35 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2 ที่ทำการสร้างขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

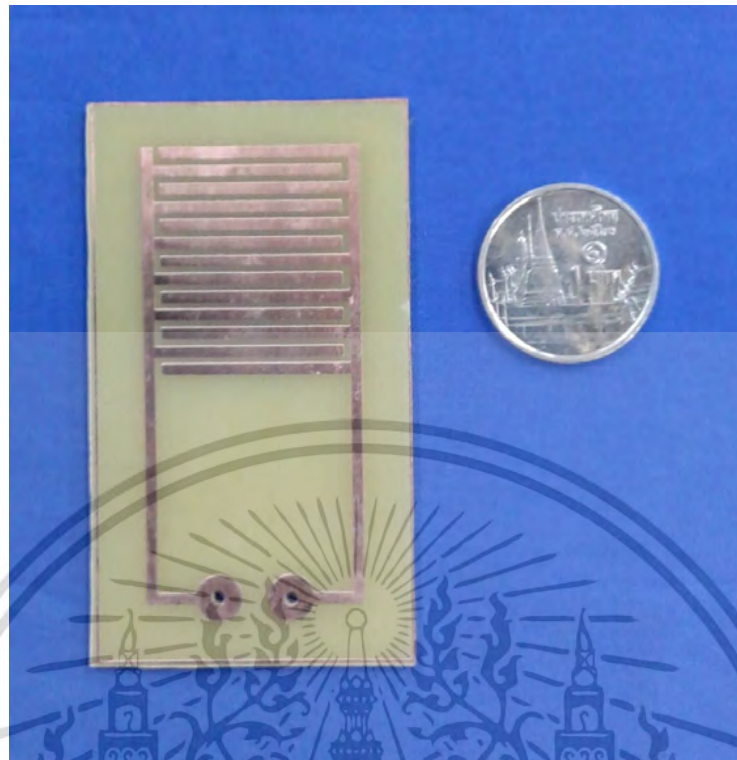


รูปที่ 4.36 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 3 ที่ทำการสร้างขึ้นมา

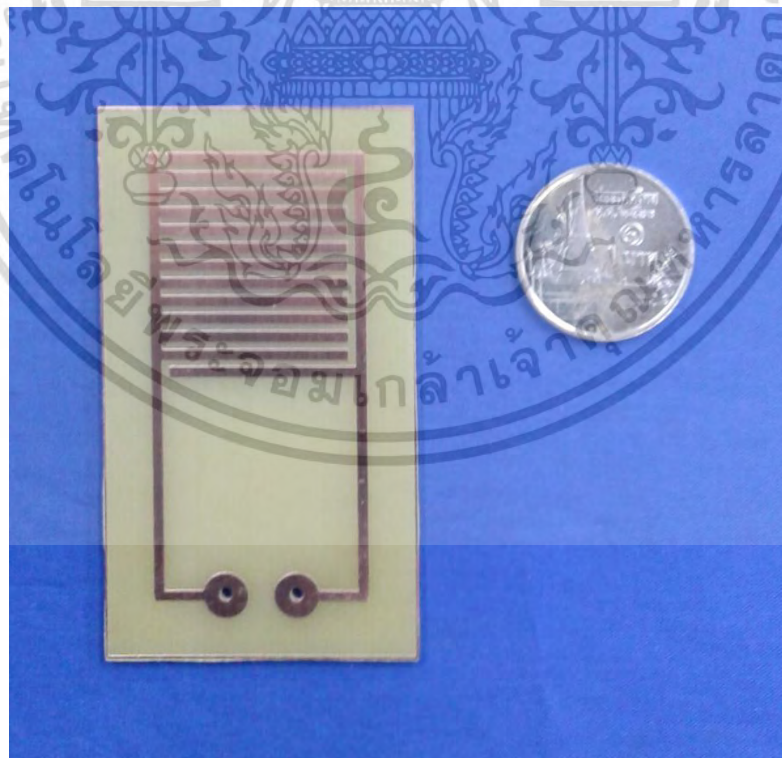


รูปที่ 4.37 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 4 ที่ทำการสร้างขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

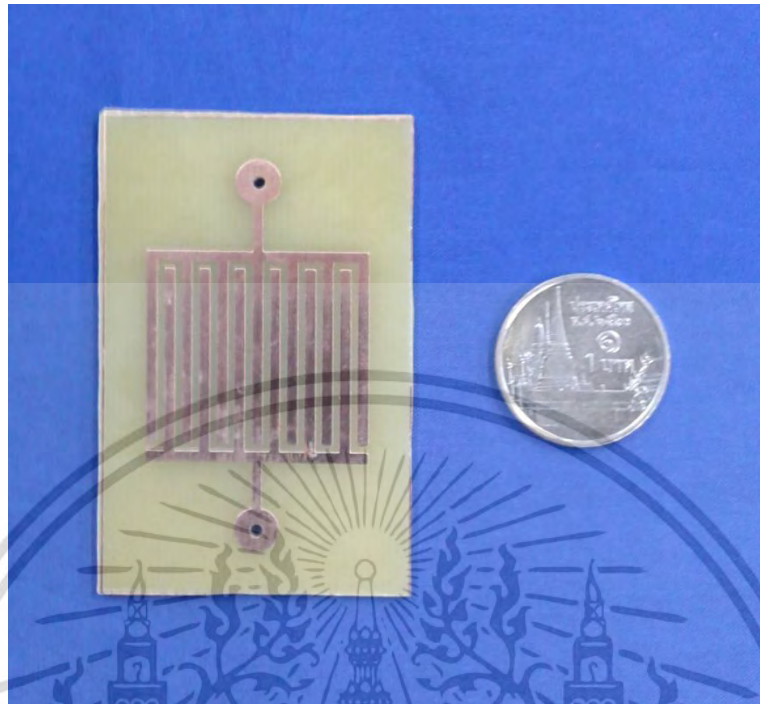


รูปที่ 4.38 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 5 ที่ทำการสร้างขึ้น



รูปที่ 4.39 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 6 ที่ทำการสร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 7 ที่ทำการสร้างขึ้น



รูปที่ 4.41 เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 8 ที่ทำการสร้างขึ้น

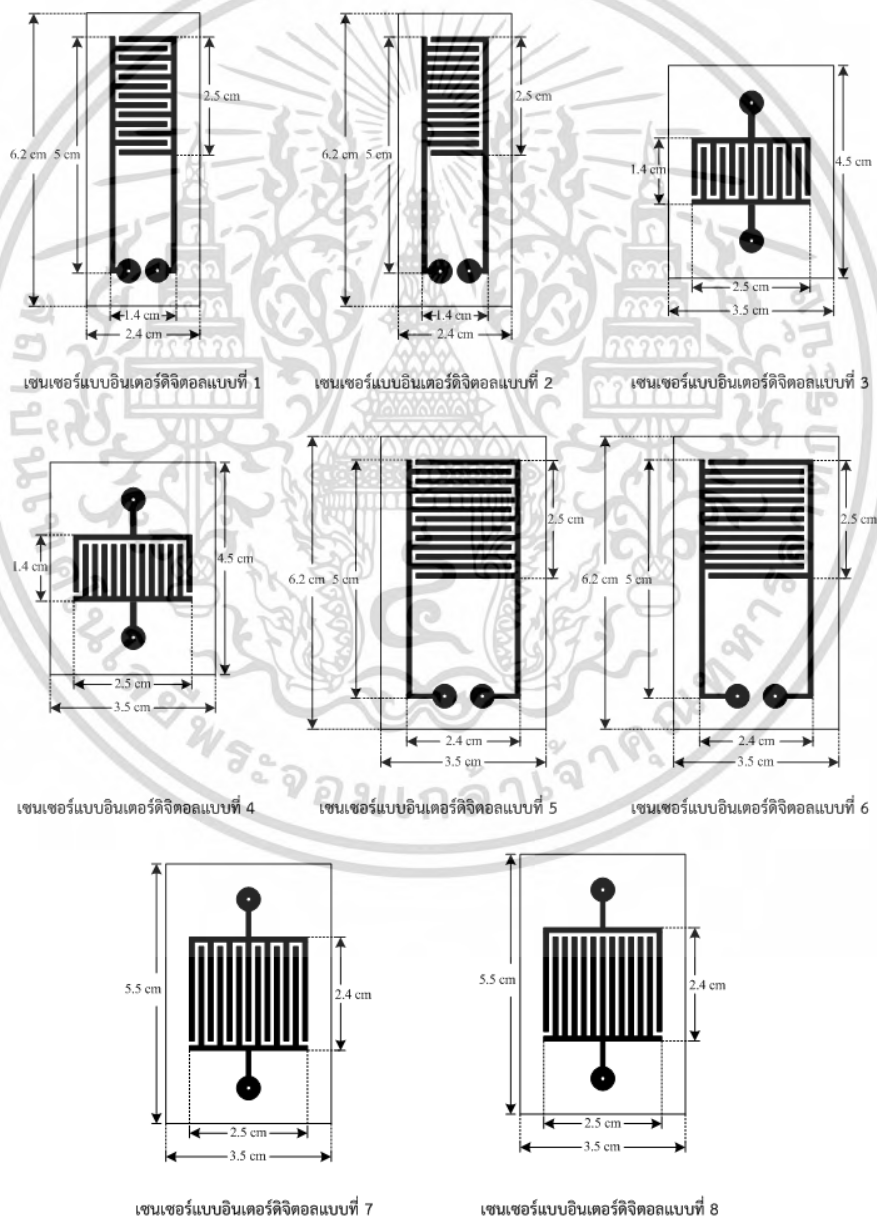
จากรูปที่ 4.34 ถึงรูปที่ 4.41 แสดงเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลทั้ง 8 รูปแบบที่ได้ทำการสร้างขึ้น ซึ่งเรานำเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นมาไปทดสอบกับระบบที่พัฒนาขึ้นต่อไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เป็นการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ซื้อเห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5 การทดสอบระบบ

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบระบบต่างๆ ของระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลที่ทำการสร้างขึ้นมาดังรายละเอียดต่อไปนี้

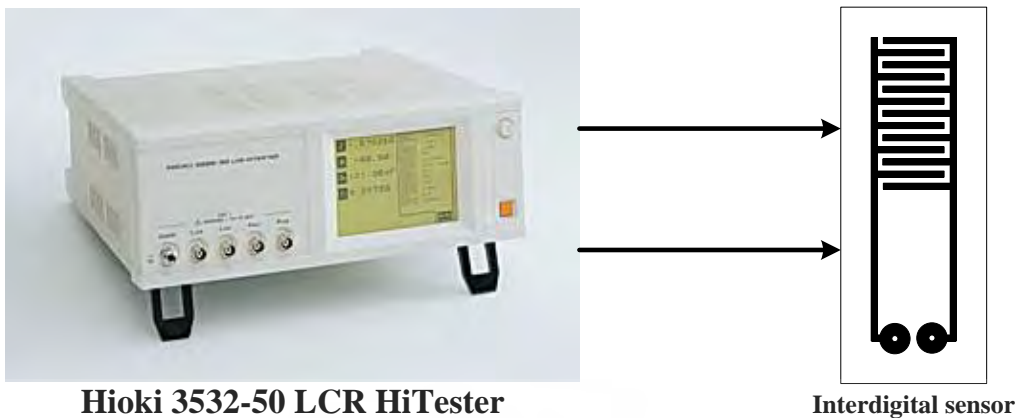
### 5.1 การวัดหาคุณสมบัติของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล

สำหรับการทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลที่ทำการสร้างมาทั้ง 8 แบบ ด้วยเครื่องวัด Hioki 3532-50 LCR HiTester โดยลักษณะของเซนเซอร์ที่นำมาทดสอบและการติดตั้งเครื่องมือวัดสามารถแสดงในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 ลักษณะของเซนเซอร์ที่นำมาทดสอบทั้ง 8 แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยูเอตเห็นการใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 การวัดหาค่าอิมพีแดนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล

จากรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 ในการทดสอบจะใช้ค่าแรงดันในการทดสอบเท่ากับ 1 Vp-p และ ความถี่ในการทดสอบเท่า 10 KHz และ 100 KHz โดยผลการวัดหาค่าอิมพีแดนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแต่ละแบบสามารถแสดงดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 ผลการวัดหาค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล

เซนเซอร์แบบ อินเตอร์ดิจิตอล	ความถี่ในการ ทดสอบ 10 KHz	ความถี่ในการ ทดสอบ 100 KHz
แบบที่ 1	1.3419 MΩ	128.91 KΩ
แบบที่ 2	2.2543 MΩ	201.86 KΩ
แบบที่ 3	1.8918 MΩ	171.84 KΩ
แบบที่ 4	6.3527 MΩ	606.93 KΩ
แบบที่ 5	2.0418 MΩ	191.224 KΩ
แบบที่ 6	2.4759 MΩ	232.04 KΩ
แบบที่ 7	1.7889 MΩ	473.09 KΩ
แบบที่ 8	5.1154 MΩ	489.78 KΩ

ตารางที่ 5.2 ผลการวัดหาคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล

เซนเซอร์แบบ อินเตอร์ดิจิตอล	ความถี่ในการ ทดสอบ 10 KHz	ความถี่ในการ ทดสอบ 100 KHz
แบบที่ 1	11.865 pF	13.307 pF
แบบที่ 2	7.152 pF	8.499 pF
แบบที่ 3	8.364 pF	10.039 pF
แบบที่ 4	2.512 pF	2.827 pF
แบบที่ 5	7.804 pF	8.873 pF
แบบที่ 6	6.917 pF	7.311 pF
แบบที่ 7	8.886 pF	9.191 pF
แบบที่ 8	3.112 pF	3.248 pF

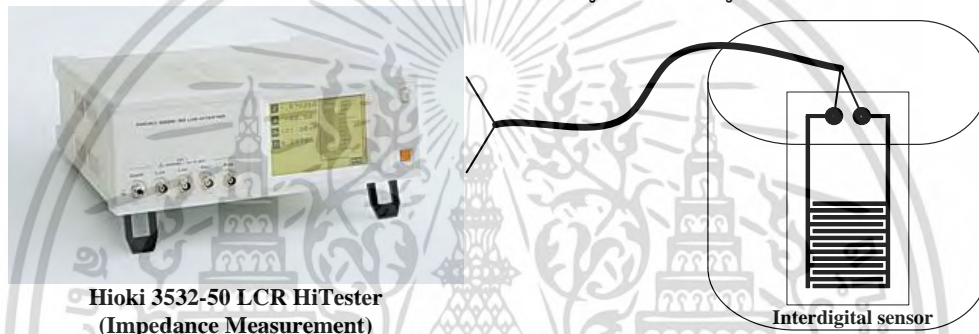
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 การทดสอบวัดคุณสมบัติของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลกับตัวอย่างอาหารทะเล

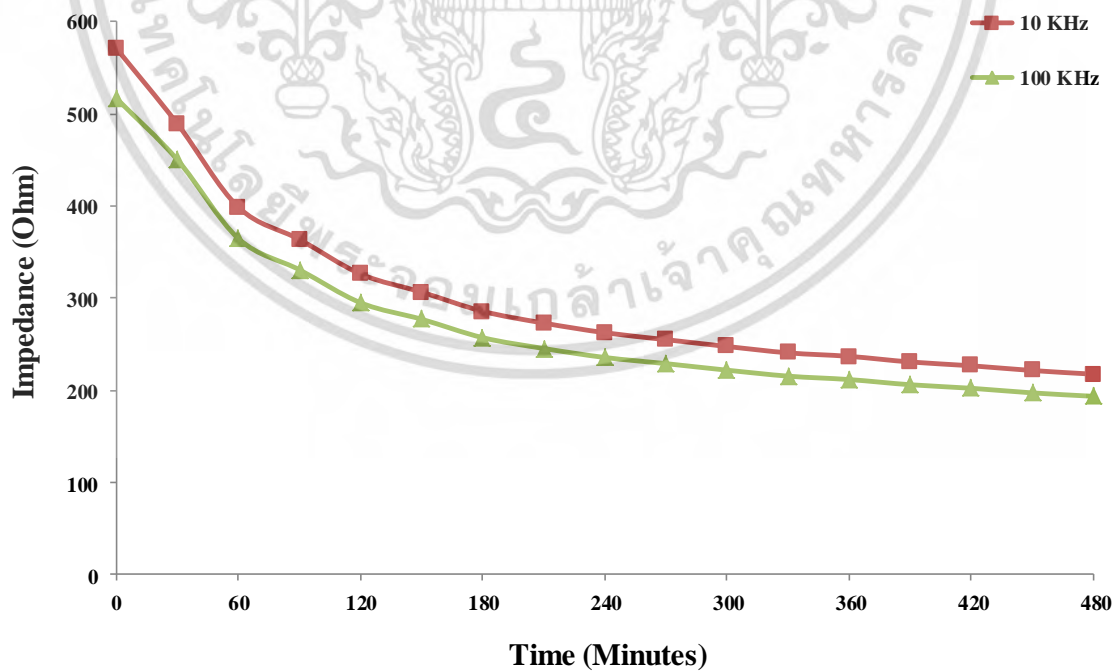
สำหรับการทดสอบนี้เป็นการทดสอบวัดคุณสมบัติของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลกับตัวอย่างอาหารทะเล โดยในการทดสอบจะทำการวัดคุณสมบัติของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลด้วยเครื่องวัด Hioki 3532-50 LCR Meter โดยทำการวัดค่าต่างๆ ดังนี้

### 5.2.1 การทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลกับตัวอย่างอาหารทะเล

สำหรับการทดสอบนี้เป็นการทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลกับตัวอย่างอาหารทะเล โดยในการทดสอบจะใช้เซนเซอร์แบบที่ 1,2,5 และ 6 มาทำการทดสอบ ซึ่งในการทดสอบจะทำการแช่เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (ปลาหมึกและหอยนางรมสด) จากนั้นทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์ด้วยเครื่องวัด Hioki 3532-50 LCR HiTester เมื่อเทียบกับระยะเวลาต่างๆ สำหรับการทดสอบจะใช้ค่าแรงดันในการทดสอบเท่ากับ 1 Vp-p และความถี่ในการทดสอบเท่า 10 KHz และ 100 KHz ตามลำดับ โดยผลการวัดหาค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแต่ละแบบสามารถแสดงดังรูปที่ 5.3 ถึงรูปที่ 5.11

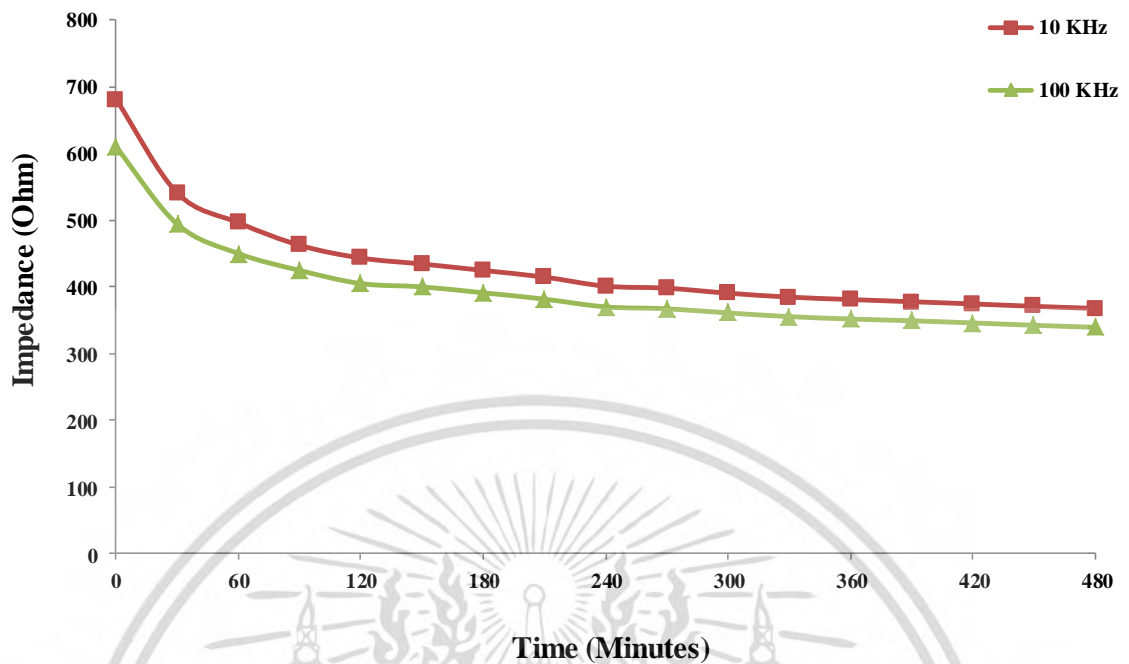


รูปที่ 5.3 การวัดหาค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล

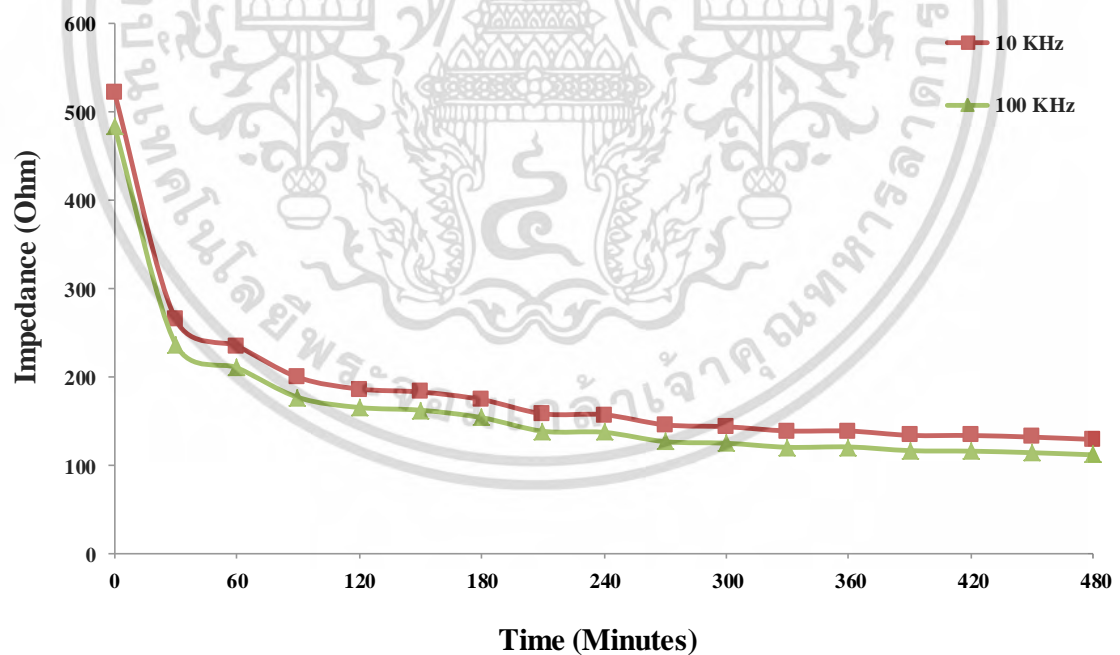


รูปที่ 5.4 ค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 1 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ที่ระยะเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

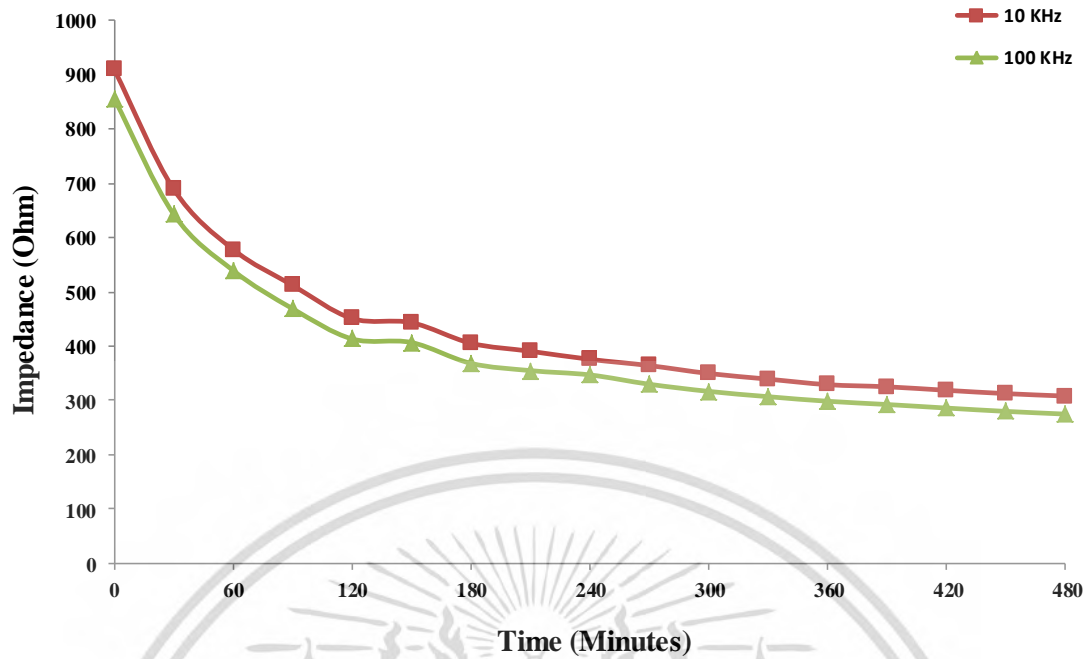


รูปที่ 5.5 ค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 2 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ที่ระยะเวลาต่างๆ



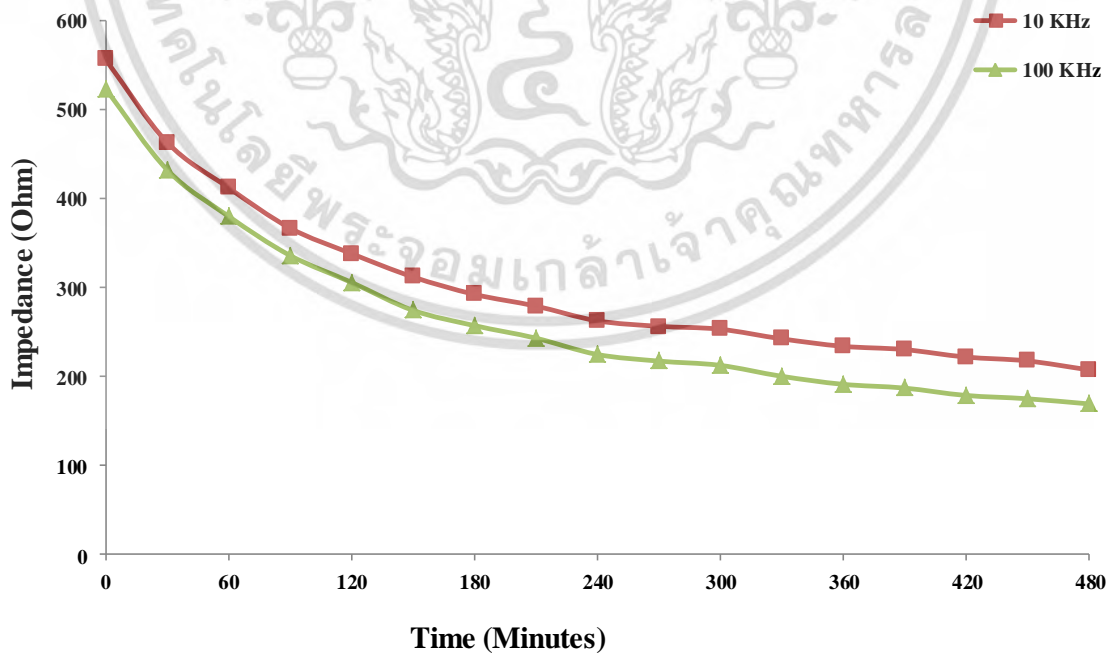
รูปที่ 5.6 ค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 5 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ที่ระยะเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



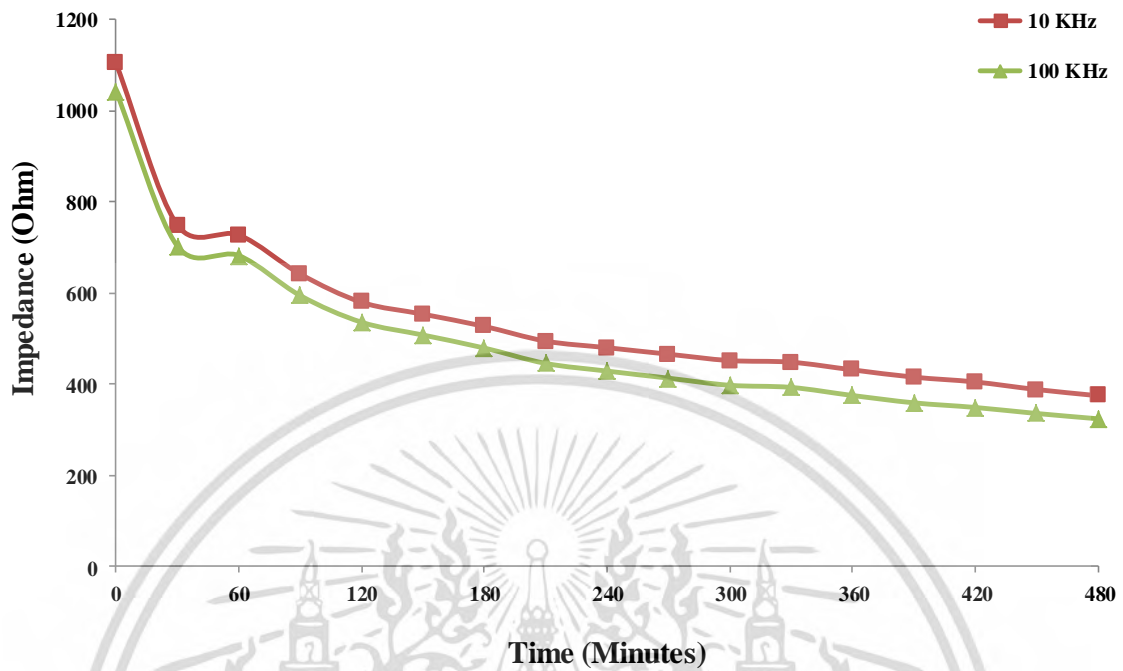
รูปที่ 5.7 ค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 6 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ที่ระยะเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 5.4 ถึงรูปที่ 5.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลที่แช่ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ที่ระยะเวลาต่างๆ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลทั้ง 4 แบบจะมีค่าอิมพีแดนซ์ลดลงตามระยะเวลาในการแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ซึ่งต่อไปทางผู้วิจัยจะทำการเปลี่ยนชนิดของอาหารทะเลมาเป็นหอยนางรมแล้วทำการทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 ถึงรูปที่ 5.11

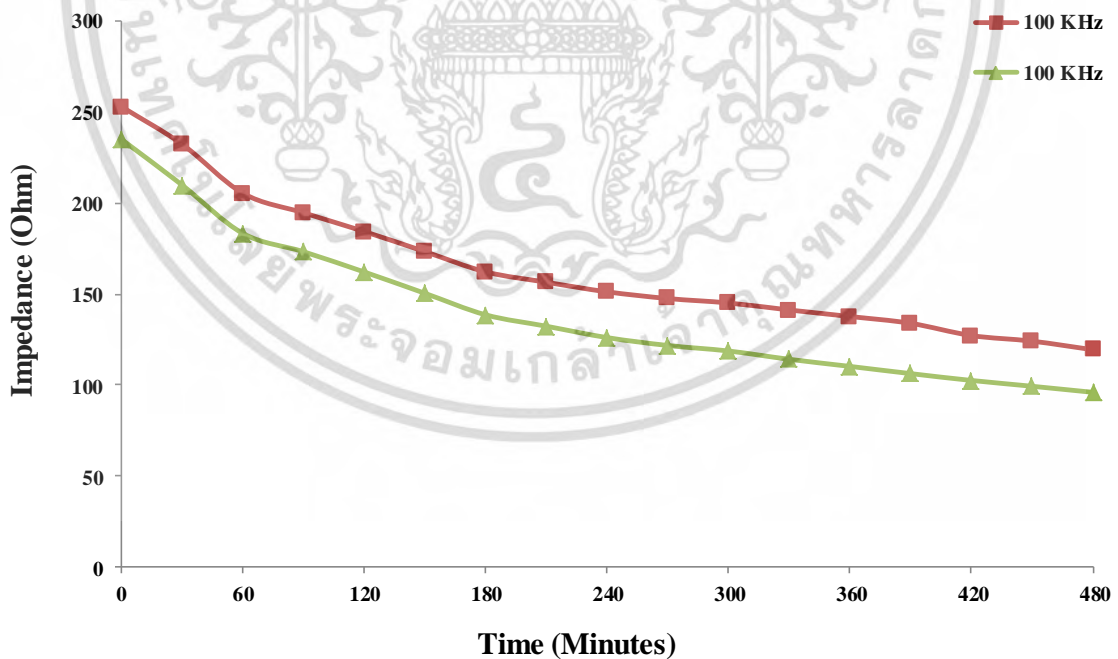


รูปที่ 5.8 ค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 1 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) ที่ระยะเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

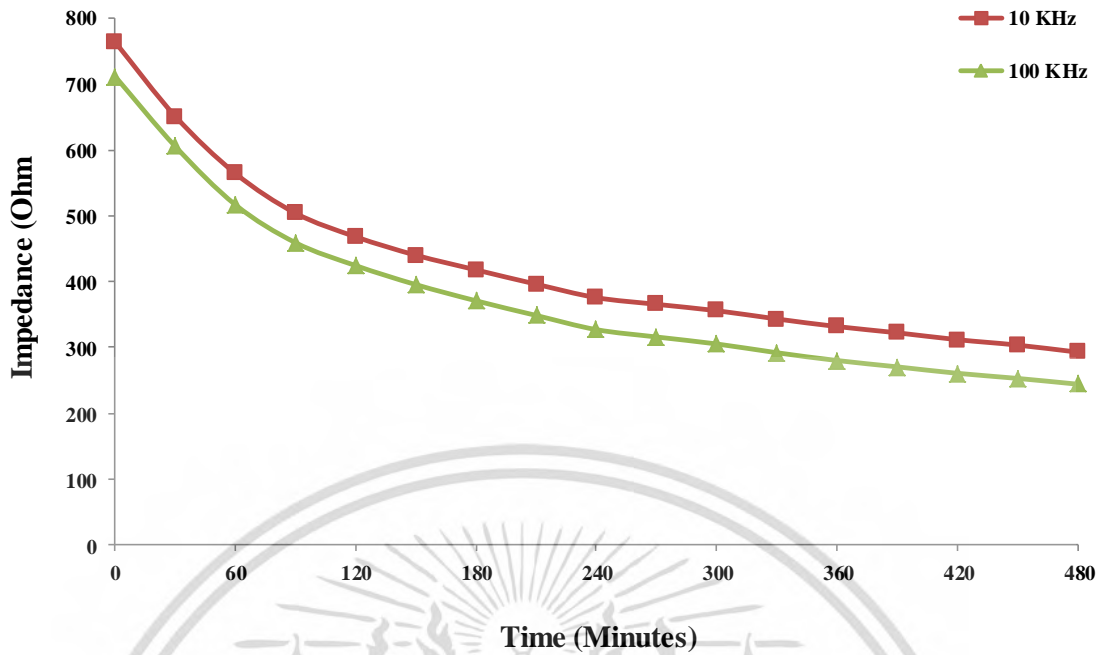


รูปที่ 5.9 ค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 2 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) ที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 5.10 ค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 5 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) ที่ระยะเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 ค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 6 ที่แช่ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) ที่ระยะเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 5.8 ถึงรูปที่ 5.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลที่แช่ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) ที่ระยะเวลาต่างๆ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลทั้ง 4 แบบจะมีค่าอิมพีแดนซ์ลดลงตามระยะเวลาในการแช่อาหารทะเล (หอยนางรม)

### 5.2.2 การทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลกับตัวอย่างอาหารทะเล

สำหรับการทดสอบนี้เป็นการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลกับตัวอย่างอาหารทะเล โดยในการทดสอบจะใช้เซนเซอร์แบบที่ 1,2,5 และ 6 มาทำการทดสอบ ซึ่งในการทดสอบจะทำการแช่เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (ปลาหมึกและหอยนางรมสด) จากนั้นทำการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์ด้วยเครื่องวัด Hioki 3532-50 LCR HiTester เมื่อเทียบกับระยะเวลาต่างๆ สำหรับในการทดสอบจะใช้ค่าแรงดันในการทดสอบเท่ากับ 1 Vp-p และความถี่ในการทดสอบเท่า 10 KHz และ 100 KHz ตามลำดับ โดยผลการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแต่ละแบบสามารถแสดงดังรูปที่ 5.13 ถึงรูปที่ 5.20



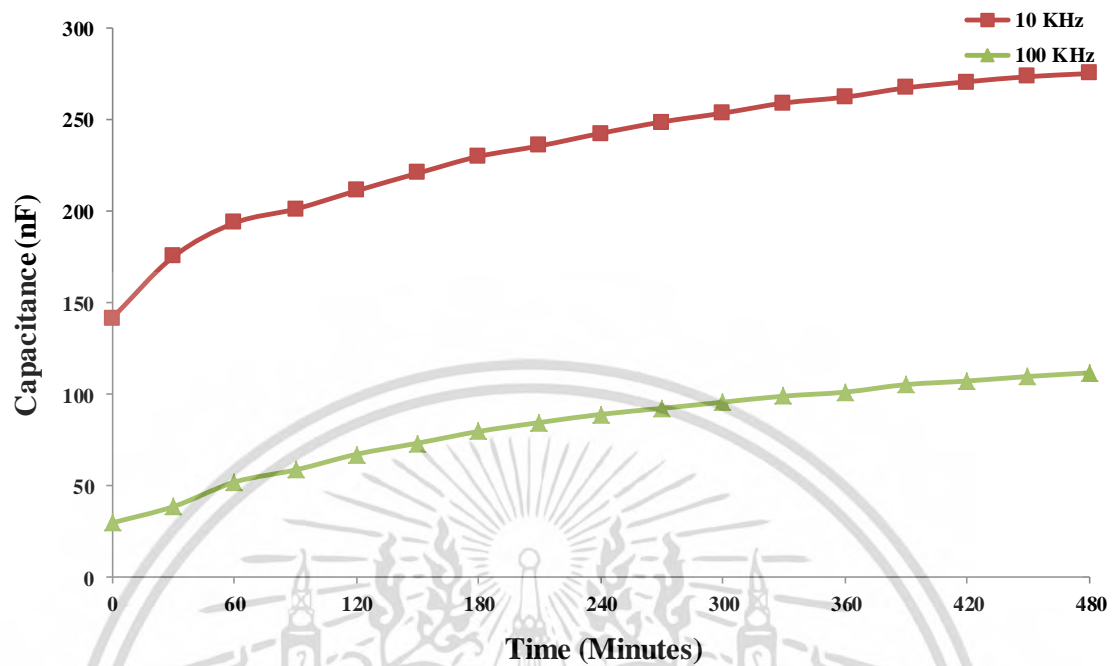
Hioki 3532-50 LCR HiTester  
(Capacitance Measurement)

Interdigital sensor

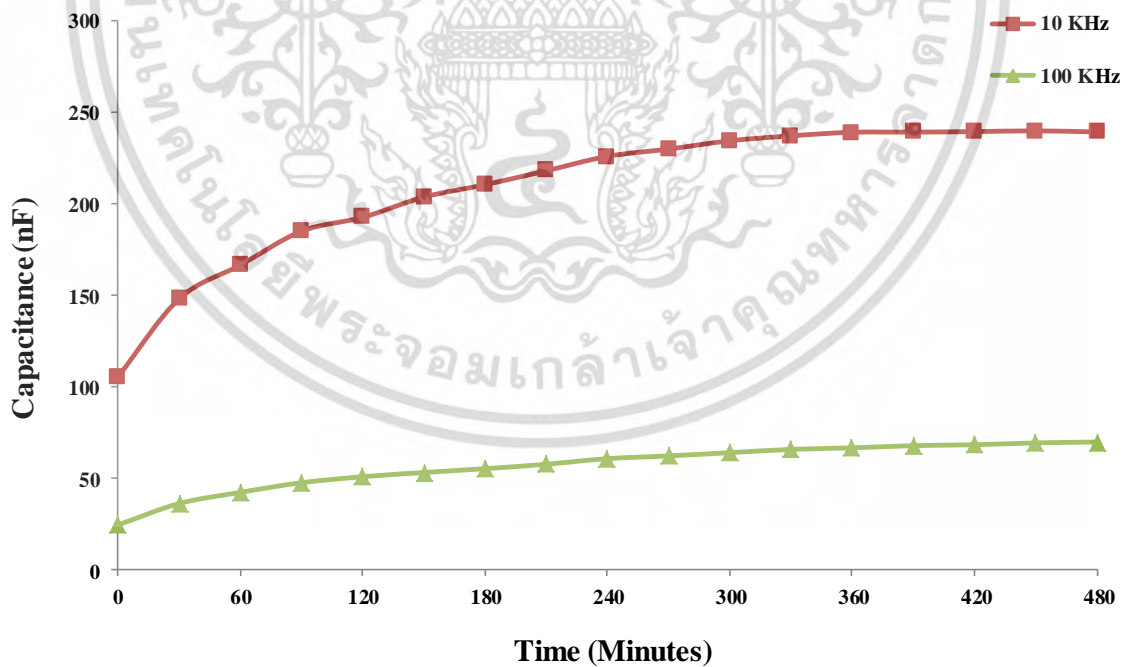
รูปที่ 5.12 การวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหาร

ทะเล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

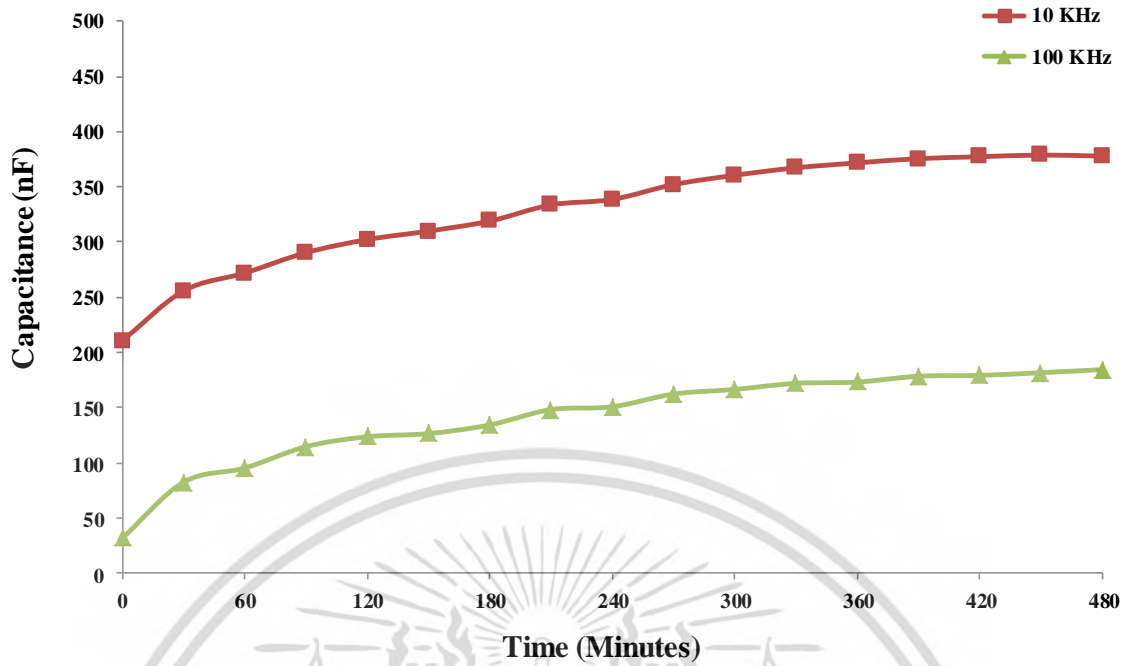


รูปที่ 5.13 ค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 1 ที่ใช้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ที่ระยะเวลาต่างๆ

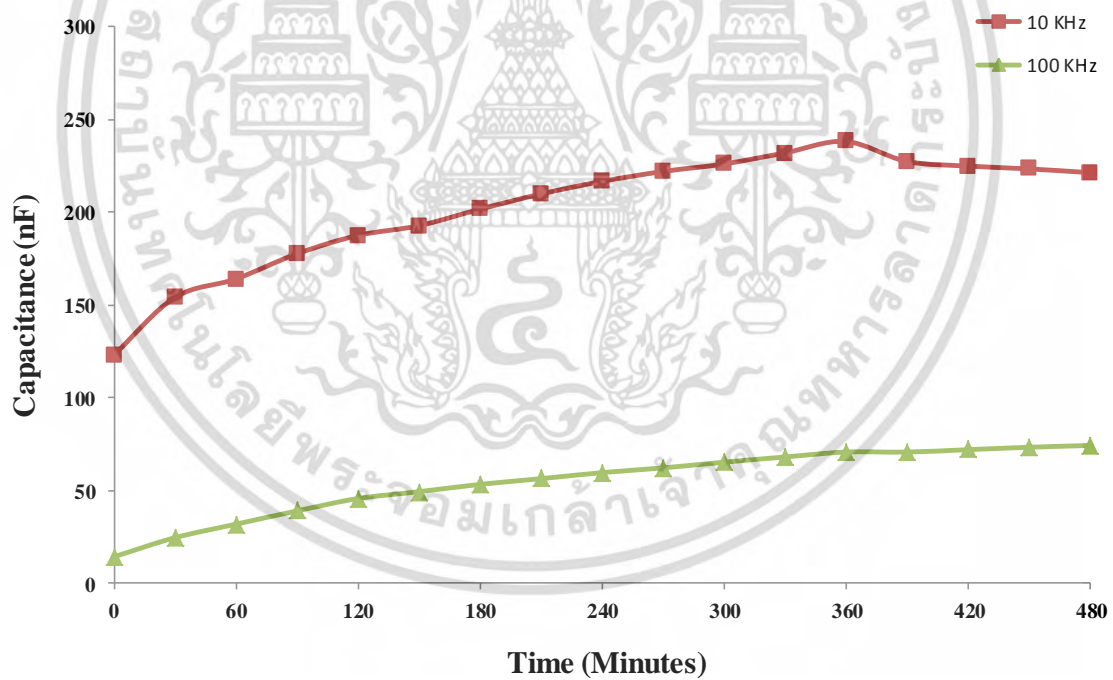


รูปที่ 5.14 ค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 2 ที่ใช้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ที่ระยะเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



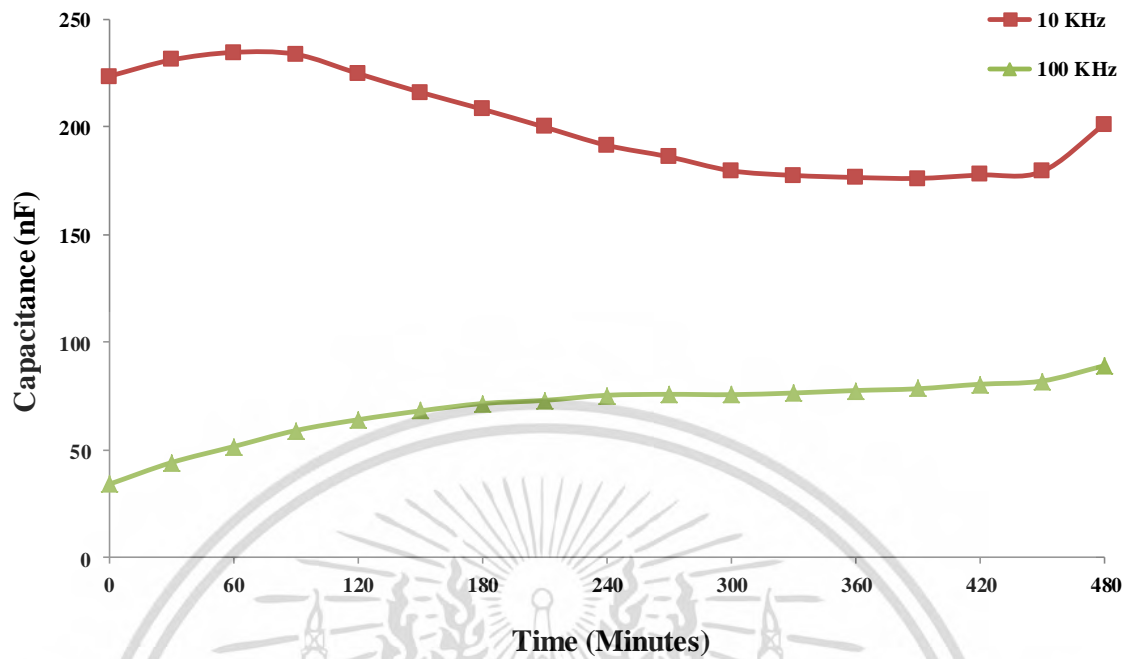
รูปที่ 5.15 ค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 5 ที่ใช้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ที่ระยะเวลาต่างๆ



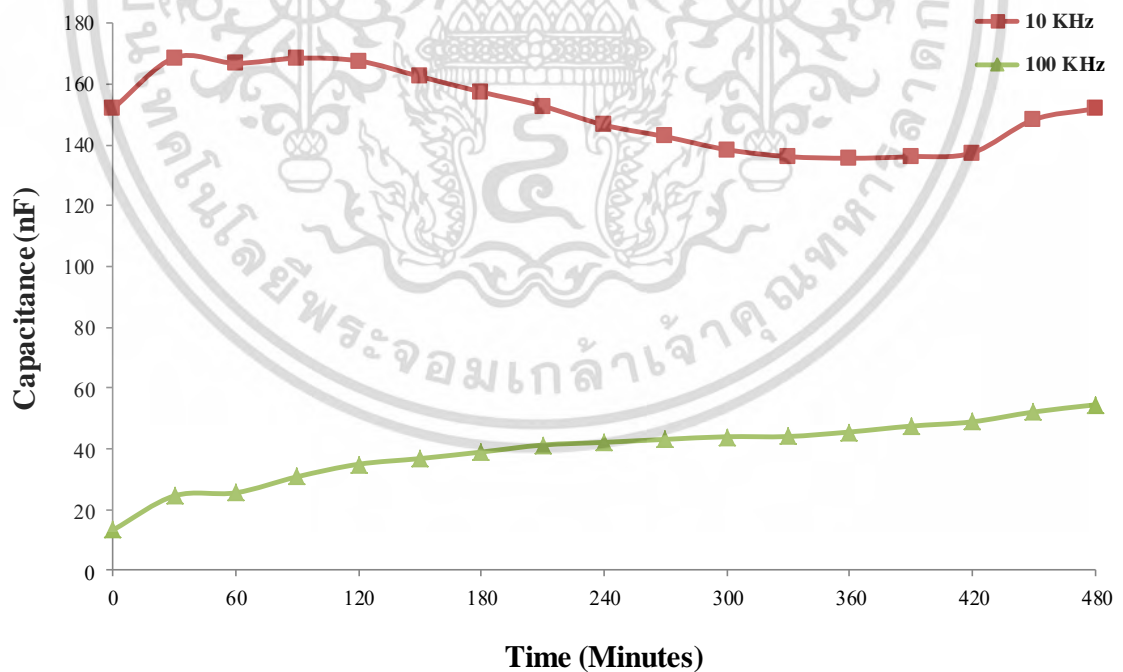
รูปที่ 5.16 ค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 6 ที่ใช้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ที่ระยะเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 5.13 ถึงรูปที่ 5.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล ที่ใช้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ที่ระยะเวลาต่างๆ ซึ่งค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลทั้ง 4 แบบจะมีค่าคาปาซิแตนซ์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก) ซึ่งต่อไปทางผู้วิจัยจะทำการเปลี่ยนชนิดของอาหารทะเลมาเป็นหอยนางรมแล้วทำการทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.17 ถึงรูปที่ 5.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

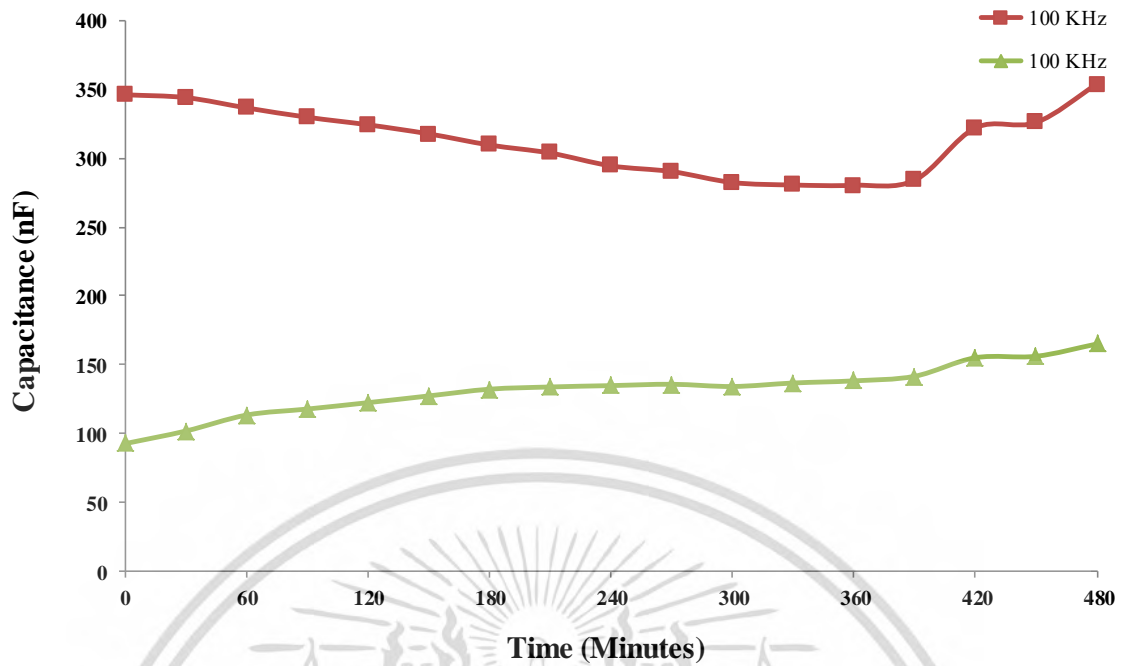


รูปที่ 5.17 ค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 1 ที่ใช้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) ที่ระยะเวลาต่างๆ

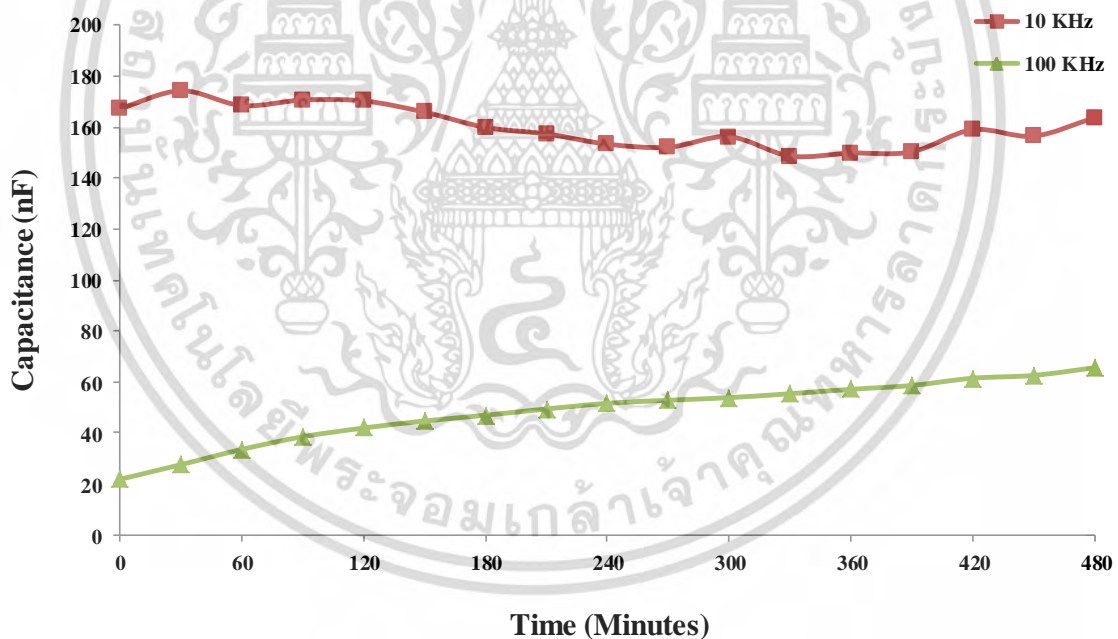


รูปที่ 5.18 ค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 2 ที่ใช้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) ที่ระยะเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 ค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 5 ที่ใช้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) ที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 5.20 ค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบที่ 6 ที่ใช้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) ที่ระยะเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 5.17 ถึงรูปที่ 5.20 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล ที่ใช้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) ที่ระยะเวลาต่างๆ ซึ่งค่าคาปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลทั้ง 4 แบบ จะมีค่าคาปาซิแตนซ์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการแช่อาหารทะเล (หอยนางรม) เมื่อใช้ความถี่ในการทดสอบ 100 KHz

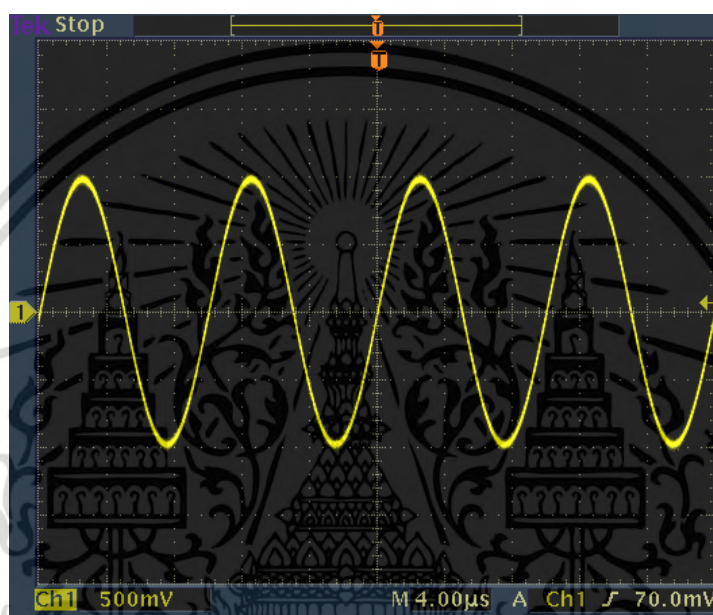
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 การทดสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

สำหรับในการทดสอบนี้ จะเป็นการทดสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ของระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลที่ทำการสร้างขึ้นมา โดยการทดสอบจะทำการทดสอบวงจรที่สำคัญต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### 5.3.1 การทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์

สำหรับการทดสอบการสร้างสัญญาณของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์สามารถแสดงผลการวัดได้ ดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 ผลการทดสอบสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่สร้างขึ้นมา

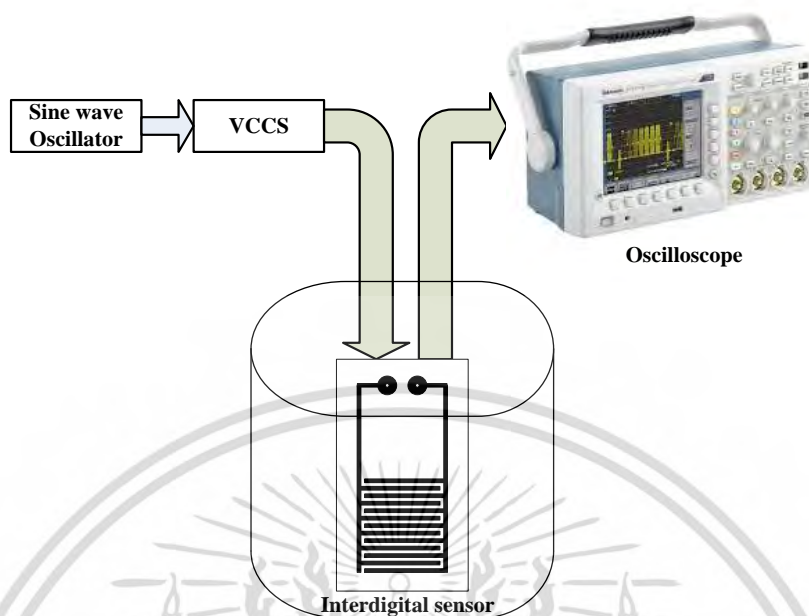
จากรูปที่ 5.21 แสดงผลการทดสอบสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ (Sine wave oscillator) ที่สร้างขึ้นมา ซึ่งสัญญาณที่ได้จะถูกส่งไปยังวงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมกระแสที่จ่ายให้กับเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล โดยสามารถทำการปรับขนาดสัญญาณให้เหมาะสมและเพิ่มความสามารถในการจ่ายกระแสให้กับเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล

#### 5.3.2 การทดสอบสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล

สำหรับการทดสอบนี้จะทำการแช่เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลไว้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล ซึ่งจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบ คือ

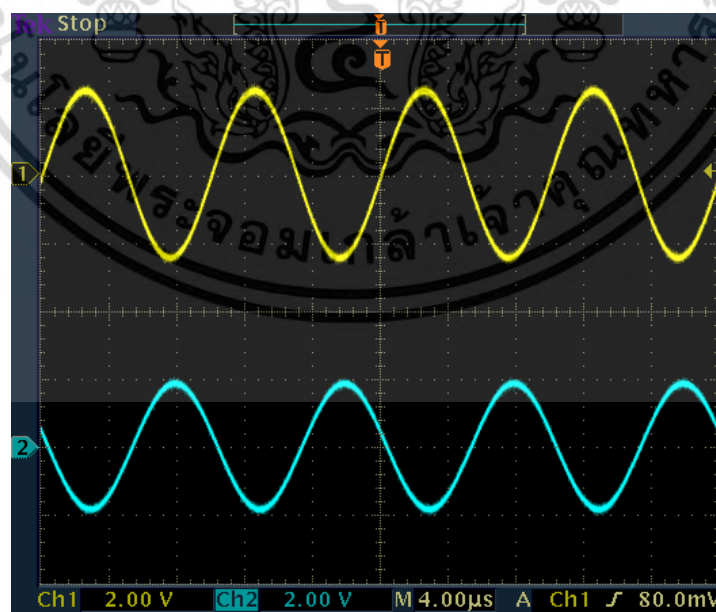
- การทดสอบระบบกับของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลปกติ
  - การทดสอบระบบกับของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลเมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง
- โดยการทดสอบจะทำการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดดังรูปที่ 5.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



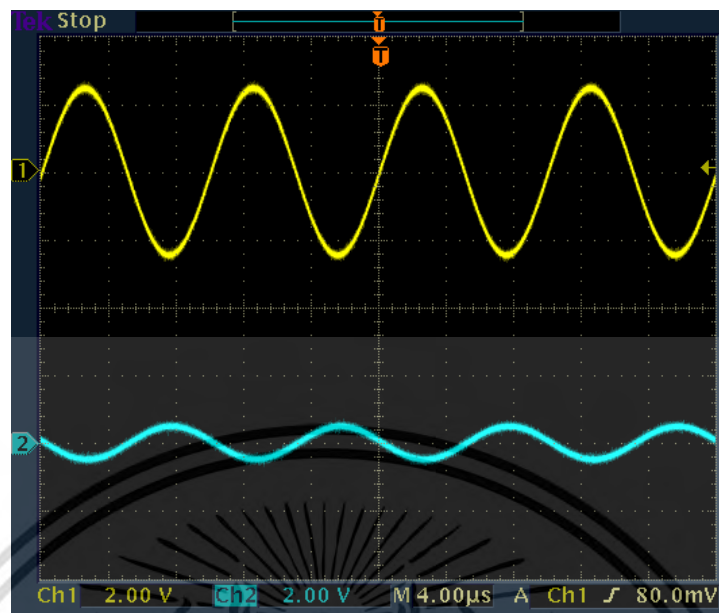
รูปที่ 5.22 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดในการทดสอบสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล

จากรูปที่ 5.22 การทดสอบนี้จะทำการแช่เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลไว้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลที่มีสภาพปกติ และของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลเมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงสภาพโดยผลการวัดสัญญาณเอาต์พุตจากเซนเซอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.23 และรูปที่ 5.24 ตามลำดับ



รูปที่ 5.23 ผลการทดสอบวัดสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์และสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล (ของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลปกติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประชาชนโดยไม่คิดค่าบริการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

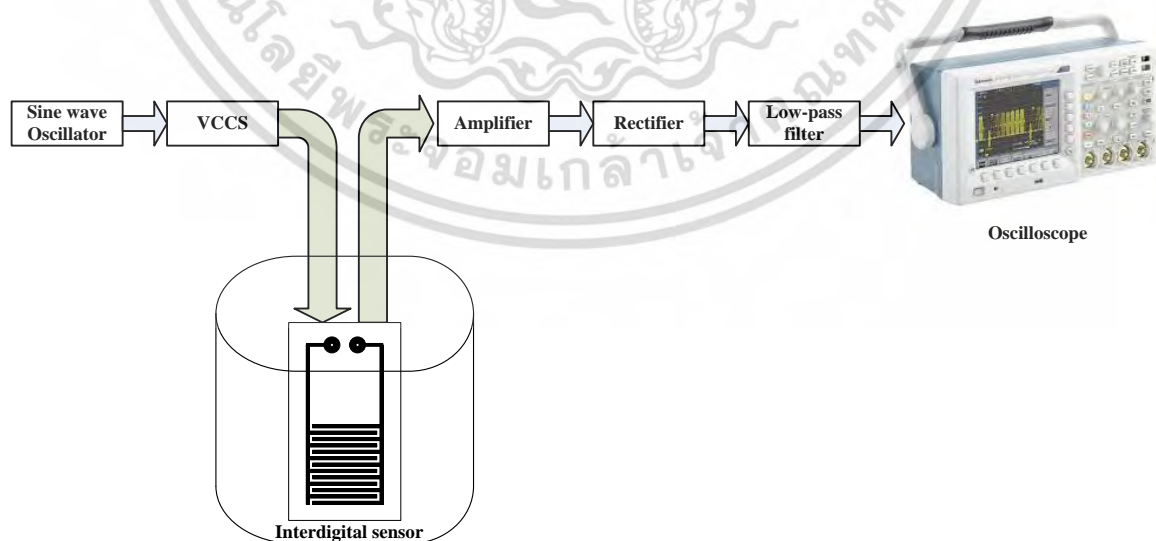


รูปที่ 5.24 ผลการทดสอบวัดสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์และสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล (ของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลเมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนสภาพ)

### 5.3.3 การทดสอบสัญญาณที่ได้จากวงจรเรียงกระแส

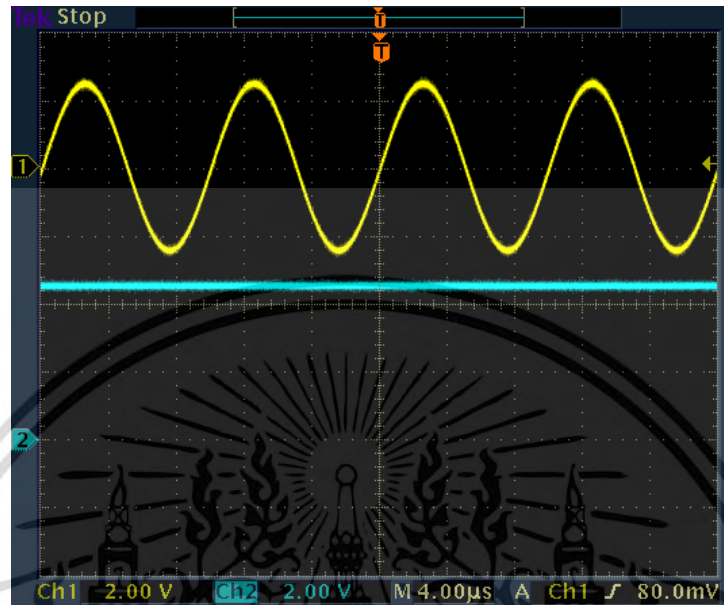
สำหรับการทดสอบนี้จะทำการแช่เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลไว้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล ซึ่งจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบเช่นกัน คือ

- การทดสอบระบบกับของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลปกติ
  - การทดสอบระบบกับของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลเมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนสภาพ
- โดยการทดสอบจะทำการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดดังรูปที่ 5.25

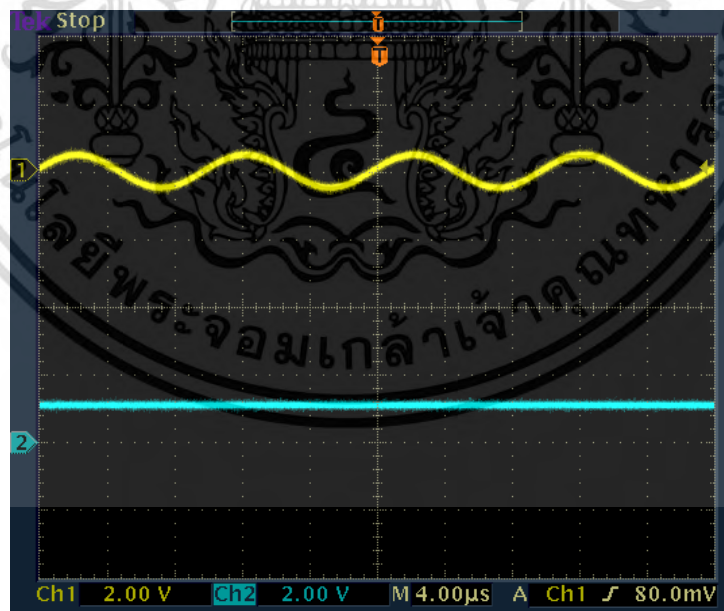


เอกสารนี้รูปที่ 5.25 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดในการทดสอบสัญญาณที่ได้จากวงจรเรียงกระแสการแช่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.25 การทดสอบนี้จะทำการแช่เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลไว้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลที่มีสภาพปกติ และของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลเมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนสภาพโดยผลการวัดสัญญาณที่ได้จากวงจรเรียงกระแสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.26 และรูปที่ 5.27 ตามลำดับ



รูปที่ 5.26 ผลการทดสอบสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลและสัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส (ของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลปกติ)



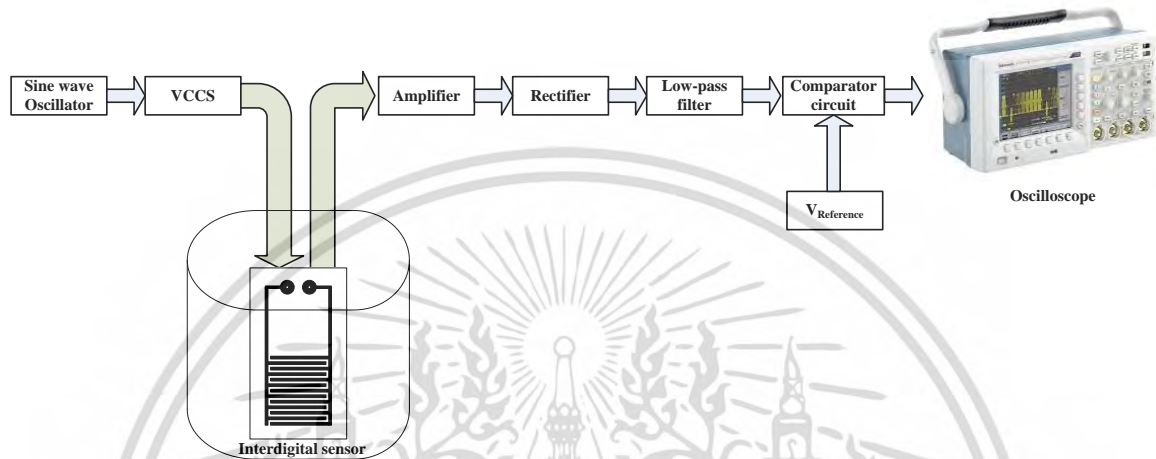
รูปที่ 5.27 ผลการทดสอบสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลและสัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส (ของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลเมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนสภาพ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.4 การทดสอบสัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

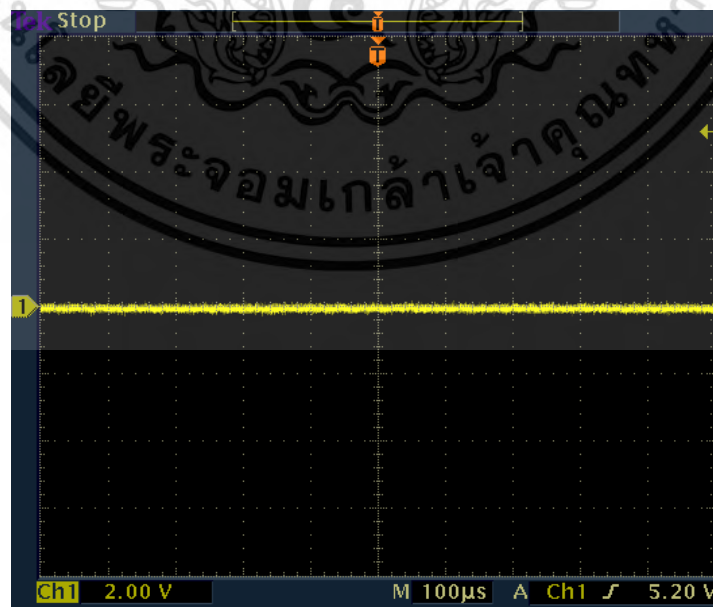
สำหรับการทดสอบนี้จะทำการแชนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิทัลไว้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล ซึ่งจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบเช่นกัน คือ

- การทดสอบระบบกับของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลปกติ
  - การทดสอบระบบกับของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลเมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนสภาพ
- โดยการทดสอบจะทำการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดดังรูปที่ 5.28

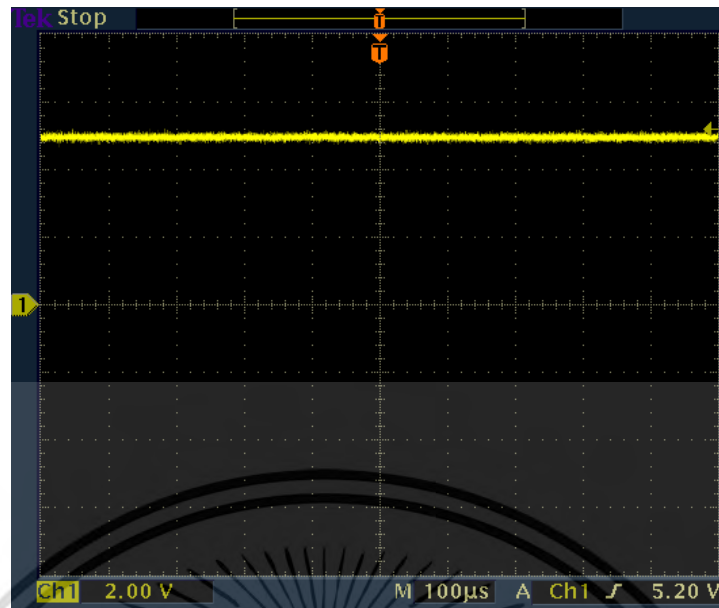


รูปที่ 5.28 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดในการทดสอบสัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

จากรูปที่ 5.28 สำหรับการทดสอบนี้จะทำการแชนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิทัลไว้ในของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลที่มีสภาพปกติ และของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลเมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนสภาพ และทำการตั้งค่าแรงดันอ้างอิงไว้ที่ 2 โวลต์ โดยผลการวัดสัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบแรงดันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.29 และรูปที่ 5.30 ตามลำดับ



รูปที่ 5.29 ผลการวัดสัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบแรงดัน (ของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลปกติ) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นการที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.30 ผลการวัดสัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (ของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลเมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนสภาพ)

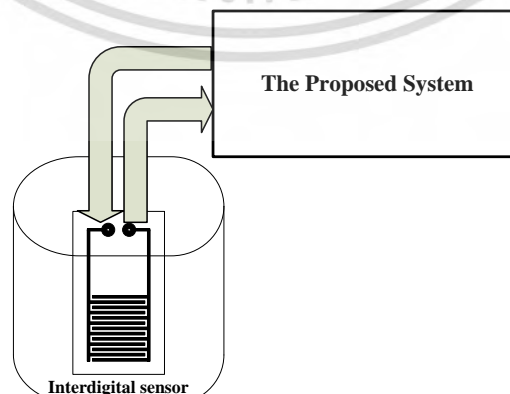
จากรูปที่ 5.29 รูปที่ 5.30 แสดงผลการทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นมากับของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลเมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนสภาพ ซึ่งจะเห็นว่าเอาท์พุทของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณจะมีค่าเท่ากับ 5 V ซึ่งสัญญาณที่ได้จะถูกส่งไปขับสัญญาณเตือนไปยังผู้ใช้งานให้ทราบว่าของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลเมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนสภาพไป

### 5.3.5 การทดสอบการติดตามการเปลี่ยนสภาพของอาหารทะเล

โดยทางผู้วิจัยจะได้ทำการทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นในการติดตามการเปลี่ยนสภาพของอาหารทะเล โดยเลือกใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิทัลแบบที่ 6 โดยการทดสอบจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบ คือ

- การทดสอบระบบกับของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (ปลาหมึก)
- การทดสอบระบบกับของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเล (หอยนางรม)

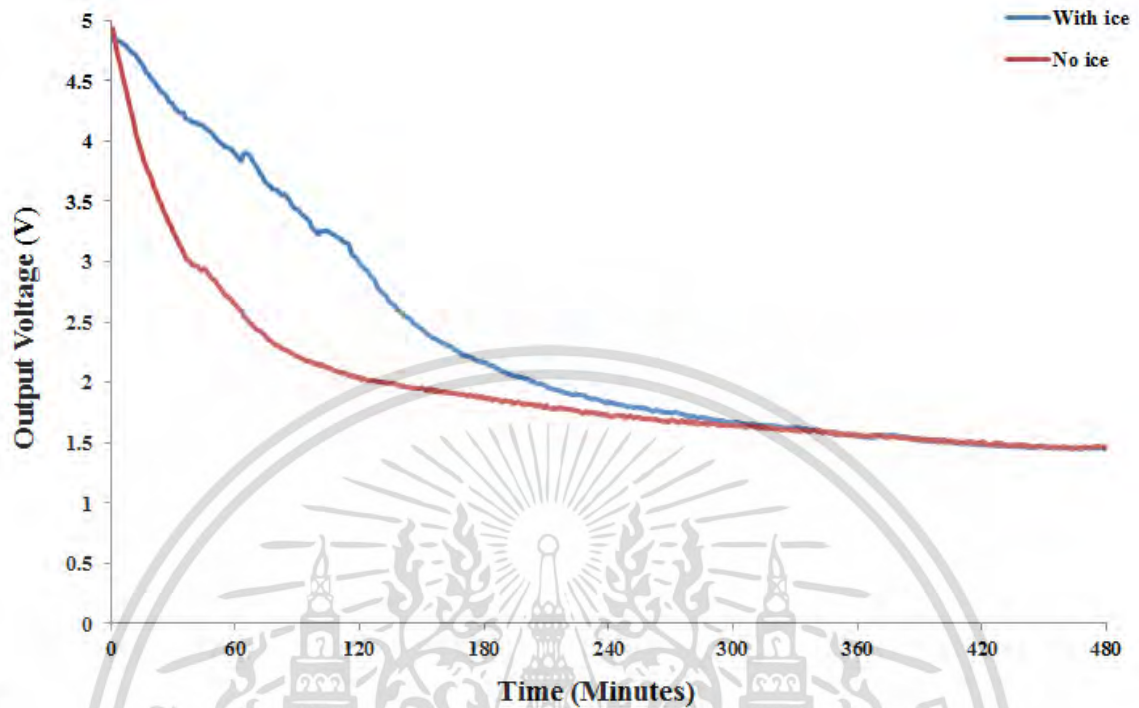
โดยในการทดสอบแต่ละแบบจะแยกออกเป็น 2 กรณีคือ การแช่อาหารทะเลในน้ำปกติและน้ำที่มีการใส่น้ำแข็งลงไปเพื่อช่วยเพิ่มระยะเวลาในการเก็บรักษา โดยการทดสอบจะทำการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดดังรูปที่ 5.31



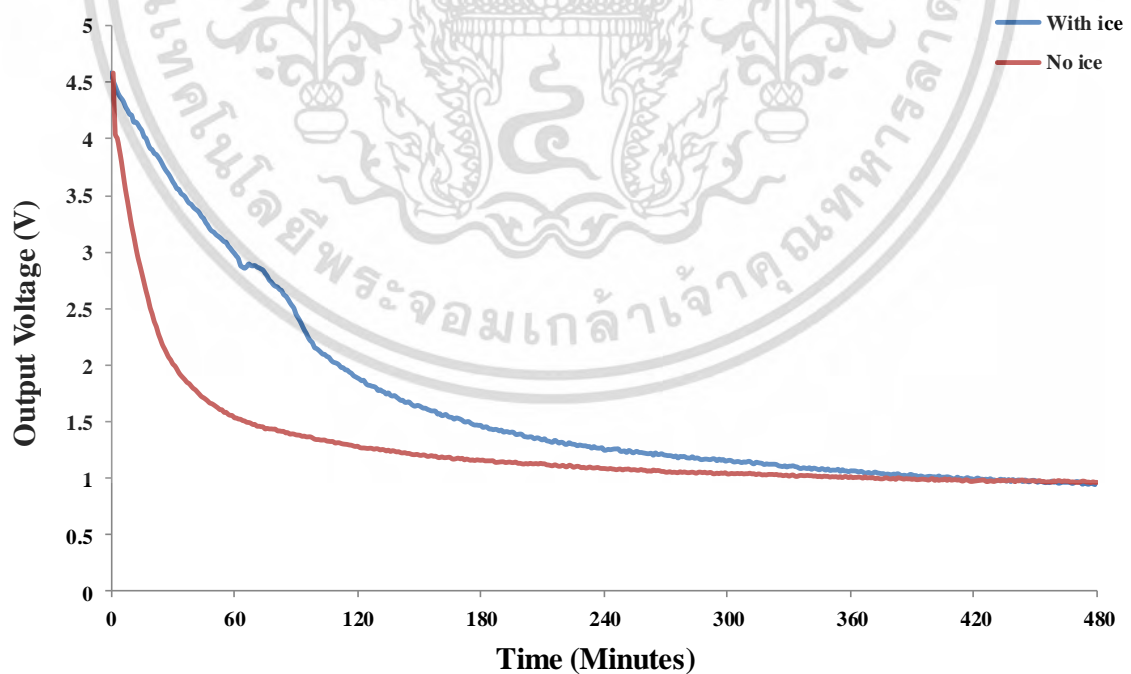
รูปที่ 5.31 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทดสอบการติดตามการเปลี่ยนสภาพของอาหารทะเล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยผลการทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นในการติดตามการเปลี่ยนแปลงสภาพของอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 6 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.32 และรูปที่ 5.33 ตามลำดับ



รูปที่ 5.32 ผลการทดสอบการติดตามการเปลี่ยนแปลงสภาพของอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 6 (ปลาหมึก)



รูปที่ 5.33 ผลการทดสอบการติดตามการเปลี่ยนแปลงสภาพของอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 6 (หอยนางรม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6 บทสรุป

จากการทดสอบระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล ระบบที่สร้างขึ้นมาจะประกอบไปด้วย วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล วงจรขยายสัญญาณ วงจรเรียงกระแส วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรเปรียบเทียบแรงดัน และวงจรแสดงผล จากผลการทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นมาสามารถแยกแยะของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลปกติและของเหลวที่ใช้ในการแช่อาหารทะเลเมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนสภาพได้ ซึ่งจากเทคนิคที่พัฒนาขึ้นมาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการเปลี่ยนสภาพของอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอล แต่อย่างไรก็ตามในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงมีการผสมเกลือลงในน้ำแข็งที่แช่อาหารทะเลในอัตราส่วนที่ไม่แน่นอน ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบที่พัฒนาขึ้นมาทำให้ผลการตรวจสอบเกิดความผิดพลาดได้ ซึ่งทางผู้วิจัยสามารถสรุปข้อแนะนำแก่ผู้สนใจที่จะนำระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลที่ทำการสร้างขึ้น ไปพัฒนาต่อดังนี้

1. ในการใช้งานจริงควรมีการกำหนดอัตราส่วนผสมของเกลือกับน้ำแข็งในการแช่อาหารทะเลเพื่อให้ผลการทดสอบโดยระบบที่นำเสนอมีความถูกต้อง
2. จัดทำฐานข้อมูลอัตราส่วนผสมของเกลือกับน้ำแข็งในเงื่อนไขต่างๆ เพื่อใช้ในการอ้างอิง
3. ผู้สนใจสามารถนำเทคนิคที่พัฒนาขึ้นไปใช้กับผลิตภัณฑ์อื่นๆได้

## บทที่ 7

### สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

จากผลการพัฒนาเทคนิคในการตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดแรงงานและค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเล ก่อนที่จะขายให้กับผู้บริโภค ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้บริโภคที่ซื้ออาหารทะเลไปรับประทาน ทางผู้วิจัยได้ทำการนำเทคนิคและผลการทดลองของระบบที่พัฒนาขึ้นมาทำการเขียนบทความเพื่อส่งเข้ารับการพิจารณาตีพิมพ์ในหัวข้อเรื่อง “Interdigital Sensor for Seafood Quality Inspection” ดังรายละเอียดในภาคผนวก ข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้าแห่งประเทศไทย, "ลักษณะและรูปแบบการผลิตอาหารทะเลแช่แข็งเพื่อการส่งออก," ทิศทางการส่งออกและลงทุน เล่ม 3, กรุงเทพฯ : บริษัท เปรียว จำกัด, 2543 , หน้า 141-143.
- [2] A.V. Mamishev, A.R. Takahashi, Y. Du, B.C. Lesieutre and M. Zahn. "Parameter estimation in dielectrometry measurements" Journal of Electrostatics, Volume 56, Issue 4, November 2002, Pages 465-492.
- [3] A.R. Mohd Syaifudin, K. P. Jayasundera<sup>2</sup> , and S. C. Mukhopadhyay "A novel planar interdigital sensor based sensing and instrumentation for detection of dangerous contaminated chemical in seafood" I2MTC 2009 - International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Singapore, 5-7 May 2009. pp. 701 – 706.
- [4] S. C. Mukhopadhyay, S. D. Karunanayaka, V. Suri and G. Sen Gupta. "A Novel Bio-sensor for Non-invasive Meat Inspection" IEEE SENSORS 2006, EXCO, Daegu, Korea, October 22-25, 2006.
- [5] A. R. Mohd Syaifudin, K. P. Jayasundera and S. C. Mukhopadhyay. "Novel Planar Interdigital Sensors for Detection of Domoic Acid in Seafood" New Developments and Applications in Sensing Technology. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2011, Volume 83, 253-278.
- [6] A.R. Mohd Syaifudin, M. A. Yunus, S. C. Mukhopadhyay K. P. Jayasundera. "A novel planar interdigital sensor for environmental monitoring" IEEE SENSORS 2009, Christchurch, New Zealand. 25-28 Oct. 2009.
- [7] S.C.Mukhopadhyay and C. P. Gooneratne. "Comparison of Electromagnetic Response of Planar Interdigital Sensors: Quality Testing of Pork Meat" Proceedings of the Third IEEE International Workshop on Electronic Design, Test and Applications (DELTA'06).2005.
- [8] Mohd Amri Md Yunus, Gerard Rudolph Mendez and Subhas Chandra Mukhopadhyay. "Development of a Low Cost System for Nitrate and Contamination Detections in Natural Water Supply based on a Planar Electromagnetic Sensor" 2011 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Hangzhou, China, May 10-12, 2011.
- [9] Gourab Sen Gupta and Subhas Chandra Mukhopadhyay. "Embedded Microcontroller Based Non-destructive Seafood Inspection System" Engineering Embedded Microcontroller Interfacing Lecture Notes in Electrical Engineering, 2010, Volume 65, 199-213.
- [10] ALEXANDER V. MAMISHEV, KISHORE SUNDARA-RAJAN, FUMIN YANG, YANQING DU, MARKUS ZAHN. "Interdigital Sensors and Transducers" PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 92, NO. 5, MAY 2004.

- [11] A.R. Mohd Syaifudina, K.P. Jayasunderab, S.C. Mukhopadhyaya. “A low cost novel sensing system for detection of dangerous marine biotoxins in seafood” *Sensors and Actuators B* 137 (2009) 67–75.
- [12] A.R. Mohd Syaifudin, P.L. Yu, S. C. Mukhopadhyay, Michael J. Haji-Sheikh, Cheng-Hsin Chuang. “Novel Interdigital Sensors; Analysis, Measurement and Evaluations” 2011 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Hangzhou, China, 10-12 May 2011.
- [13] Di Wu, Da-Wen Sun, Yong He, “Application of long-wave near infrared hyperspectral imaging for measurement of color distribution in salmon fillet”, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 16 (2012), 361–372.
- [14] Jong Hyun Lim, Juhun Park, Jung Ho Ahn, Hye Jun Jin, Seung hun Hong, Tai Hyun Park, “A peptide receptor-based bioelectronic nose for the real-time determination of seafood quality”, *Biosensors and Bioelectronics*, 39 (2013), 244–249.
- [15] Mohamed K. Morsy, Kinga Zor, Nathalie Kostesha, Tommy Sonne Alstrøm, Arto Heiskanen, Hassan El-Tanahi, Ashraf Sharoba, Dmitri Papkovsky, Jan Larsen, Hassan Khalaf, Mogens Havsteen Jakobsen, Jenny Emneus, “Development and validation of a colorimetric sensor array for fish spoilage monitoring”, *Food Control*. 60 (2016), 346-352.
- [16] María Ruiz-Rico, Ana Fuentes, Rafael Masot, Miguel Alcañiz, Isabel Fernández-Segovia, José Manuel Barat, “Use of the voltammetric tongue in fresh cod (*Gadus morhua*) quality assessment”, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 18 (2013), 256–263.
- [17] Hee Jun Shina, Seung Jae Ohb, Min-Cheol Lima, Sung-Wook Choia, Gyeongsik Oka, “Dielectric traces of food materials in the terahertz region”, *Infrared Physics and Technology*, 92 (2018), 128–133.
- [18] M. Kitsara, D. Goustouridis, S. Chatzandroulis, M. Chatzichristidi, I. Raptis, Th. Ganetsos, R. Igreja, C.J. Dias, “Single chip interdigitated electrode capacitive chemical sensor arrays”, *Sensors and Actuators B*, 127 (2007), 186–192.
- [19] V. Tsoutia, C. Boutopoulosb, I. Zergioti, S. Chatzandroulisa, “Capacitive microsystems for biological sensing”, *Biosensors and Bioelectronics*, 27 (2011), 1–11.
- [20] Cheng-Long Zhao, Qing-An Huang, Ming Qin, and Wei-Hua Li, “A CMOS Interdigital Capacitive Humidity Sensor with Polysilicon Heaters”, *IEEE Sensors 2010 Conference*, November 1-4, 2010, Kona, HI, USA, 382-385.
- [21] Mohd Syaifudin Abdul Rahman, Subhas Chandra Mukhopadhyay, Pak-Lam Yu, Javier Goicoechea, Ignacio R. Matias, Chinthaka P. Gooneratne, Jürgen Kosel, “Detection of bacterial endotoxin in food: New planar interdigital sensors based Approach”, *Journal of Food Engineering*, 114 (2013), 346–360.

- [22] G. Hagen, M. Feulner, R. Werner, M. Schubert, A. Müller, G. Rieß, D. Brüggemann, R. Moos, “Capacitive soot sensor for diesel exhausts”, *Sensors and Actuators B*, 236 (2016), 1020–1027.
- [23] V. Kasturi and S. C. Mukhopadhyay, “PLANAR INTERDIGITAL SENSORS BASED LOOSENESS ESTIMATION OF LEATHER”, 3rd International Conference on Sensing Technology, Nov. 30 – Dec. 3, 2008, Tainan, Taiwan, 462-466.
- [24] Caglar Elbuen, Tomasz Glawdel, Danny Chan, Carolyn L. Ren, “Detection of microdroplet size and speed using capacitive sensors”, *Sensors and Actuators A*, 171 (2011), 55– 62.
- [25] Mohd Syaifudin, Abdul Rahman Subhas, Chandra Mukhopadhyay, Pak-Lam Yu, “Novel Sensors for Food Inspection: Modelling, Fabrication and Experimentation”, Springer International Publishing, Switzerland, 2014.
- [26] [www.dielectriccorp.com](http://www.dielectriccorp.com)
- [27] [www.farnell.com](http://www.farnell.com)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

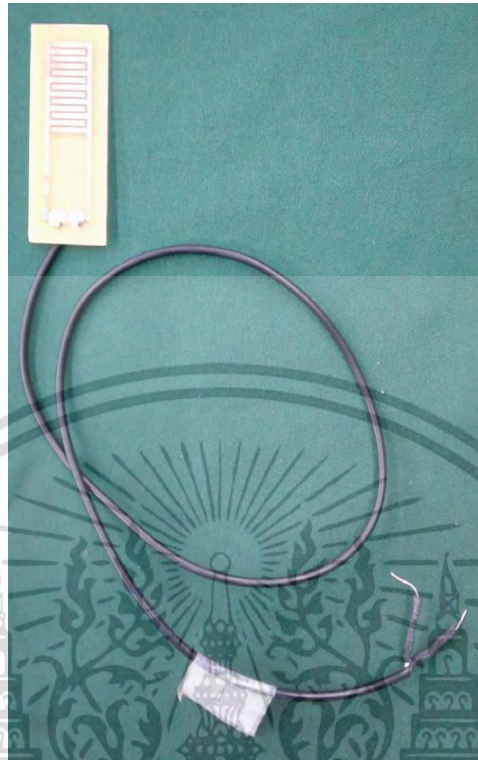
ระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล



รูปที่ 1ก ระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล (ด้านหน้า)



รูปที่ 2ก ระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล (ด้านหลัง)  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

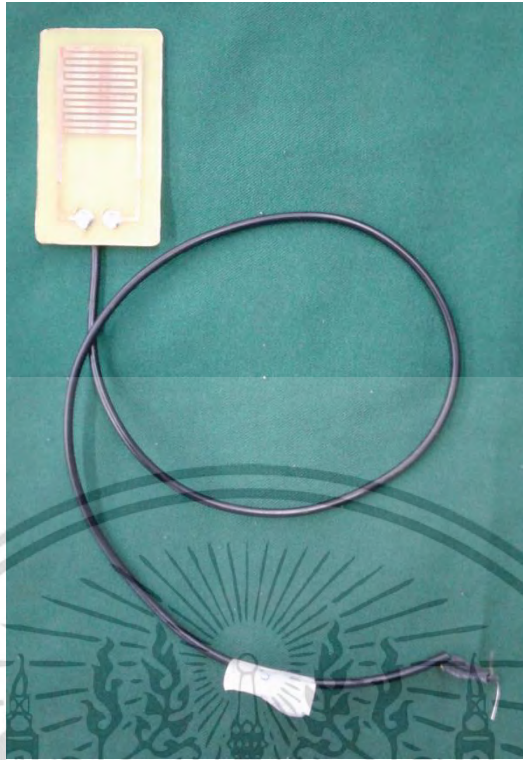


รูปที่ 3ก เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 1



รูปที่ 4ก เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5ก เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 5



รูปที่ 6ก เซนเซอร์แบบอินเทอร์ดิจิตอลแบบที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ข

## ร่างบทความวิจัย

### Interdigital Sensor for Seafood Quality Inspection

Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand 10520  
apinai@gmail.com

#### ABSTRACT

Many studies shown that seafood consumption contains many health benefits. However, the spoilage of such products causes the vast economic loss each year. Effective monitoring and inspection of quality are required during storage of these products. In this study, the interdigital sensor was developed and applied to inspect the spoilage of seafood. The sensor was designed to monitor the change of impedance during spoilage progression of seafood. The result revealed that impedance of liquid decrease overtime. This coincides with the fact that spoilage of seafood generates ammonium ion which causes decrease in the impedance of the liquid. The sensor was then merged with the proposed system which consists of a sine wave circuit, voltage control current source circuit, interdigital sensor, amplifier circuit, rectifier circuit, low-pass filter circuit, comparator circuit and display circuit. This circuits adjust signals from the sensor to be proper to the application. The experiment is designed to have conditions similar to the real-world situation of how seafood is stored. The experimental results show that the proposed system effectively indicates the change of seafood quality.

#### Keywords

Interdigital sensor; Impedance measurement; seafood inspection.

#### 1. INTRODUCTION

Seafood is an important source of energy and protein for humans. It contains nutrients such as Eicosapentaenoic acid (EPA) and Docosahexaenoic acid (DHA). Seafood that popular among consumers includes fish, squid, crab, shrimp, oyster, etc. Seafood demand has increased steadily due to its health benefits. The major problem in seafood product relates to contamination of bacteria such as *Listeria monocytogenes*, *Salmonella*, *Escherichia coli*, etc. An illness caused by bacteria includes Gastroenteritis, Septicemia, Typhoid fever, etc. The virulence depends on the type and amount of bacteria intake [1-2]. The techniques often used for seafood quality inspection are culturing method, polymerase chain reaction (PCR) test, and quantitative PCR (QPCR) test. Such methods are not practical for application in the detection of bacteria in seafood stall or food market since they require laboratory test, technical skills, high cost, and long period of time[3-4]. This paper develops a system for seafood quality inspection. The proposed system is based on the measurement of the impedance change of the liquid soaking the seafood.

#### 2. INTERDIGITAL SENSORS

Seafood is a perishable product which the quality declines after trawled from the sea. The spoilage is caused by bacterial contamination. Seafood contains organic compounds including lipid, protein (enzyme), and carbohydrate. The degradation of these compounds by heterotrophic bacteria, spoilage-causing microorganisms, results in the release of inorganic components including carbon dioxide, water and ammonia. Ammonia from

decomposition of protein can dissolved in water and become ammonium ions ( $\text{NH}_4^+$ ). Presence of such compound in water decreases impedance of the water. Thus, investigation of impedance values may be a promising approach for seafood-spoilage monitoring and inspection. In this study, a sensor measuring impedance in liquid soaking in seafood is developed and its application for measuring in quality of seafood is evaluated.

#### 2.1 SENSOR FABRICATION

From the proposed concept, the variation in the impedance of the liquid used to soak the seafood is related to the change of seafood quality. In this section, the interdigital sensor is designed to measure the impedance of the liquid used to soak the seafood [5-9]. The proposed interdigital sensor is made of a printed circuit board (PCB) FR-4 with dielectric constant ( $\epsilon_r$ ) of 4.7. Four types of sensors with different sizes and electrode configurations have been designed. Figure 1 shows the electrode configurations of each sensor and corresponding dimensions. Figure 2 shows four types of the fabricated interdigital sensors.

#### 2.2 EXPERIMENTAL DESIGN

To study the performance of the designed sensor, the impedance of two types of seafood, cuttlefish and oyster, were measured in the experiment. Each type of seafood was tested at 2 frequencies.

In the first part, the reference impedances of the sensors were measured to observe the characteristics of the sensor when no subject was connected to the sensors. Proper frequencies selected in the experiment were 10 kHz and 100 kHz. The impedance measurements were performed using Hioki 3532-50 LCR HiTester in LCR measurement mode. The amplitude of test voltage was set to 1 V<sub>p-p</sub>.

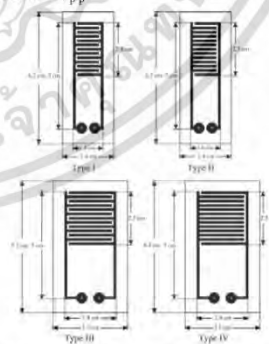


Fig. 1 The size and electrode configurations of each sensor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

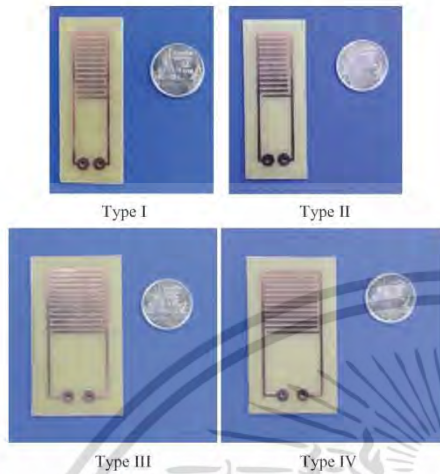


Fig. 2 Four type of the fabricated interdigital sensors.

In the second part, the performances of the proposed interdigital sensors were evaluated through the experiment by using the samples. For each type of the sample, 20 grams of the seafood samples, cuttlefish or oyster, were placed in a container with 100 ml water. The impedance of interdigital sensor was recorded every 30 minutes for 8 hours by using 1101ki 3532-50 LCR HiTester.

2.3 EXPERIMENTAL RESULTS

The results of reference impedance measurement for each type of sensor at 10 kHz and 100 kHz are show in Table 1.

Table 1. The results of impedance measurement each sensors

Interdigital sensor	Test Frequency	
	10 kHz	100 kHz
Type I	1.3419 MΩ	128.91 KΩ
Type II	2.2543 MΩ	201.86 KΩ
Type III	1.3918 MΩ	171.84 KΩ
Type IV	6.3527 MΩ	606.93 KΩ

The values of impedance as a function of time for cuttlefish using interdigital sensor type I, II, III, and IV are shown in Figure 3-6, respectively. Similarly, the values of impedance measured as a function of time for oyster using interdigital sensor type I, II, III, and IV are plotted in Figure 7-10. From the experimental results of four types of fabricated interdigital sensors, the sensor type IV is the most appropriate in this application since it provides smooth responses. The sensor is selected to be used in the system proposed in the next section.

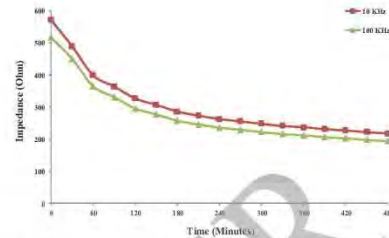


Fig. 3 The values of impedance varying as a function of time using interdigital sensor type I for cuttlefish sample.

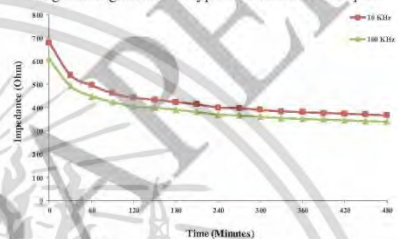


Fig. The values of impedance varying as a function of time using interdigital sensor type II for cuttlefish sample.

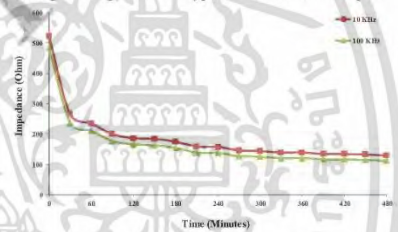


Fig. 5 The values of impedance varying as a function of time using interdigital sensor type III for cuttlefish sample.

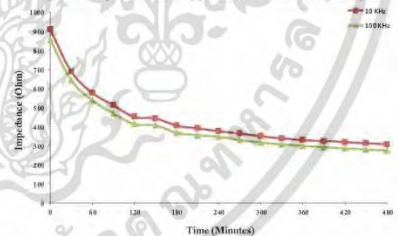


Fig. 6 The values of impedance varying as a function of time using interdigital sensor type IV for cuttlefish sample.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

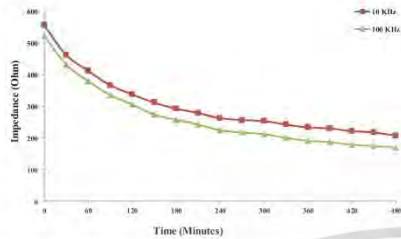


Fig. 7 The values of impedance varying as a function of time using interdigital sensor type I for oyster sample.

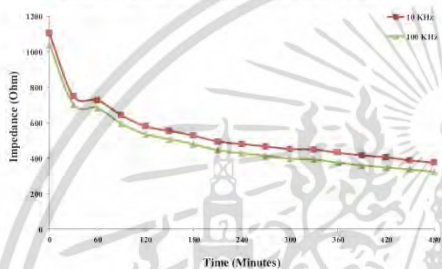


Fig. 8 The values of impedance varying as a function of time using interdigital sensor type II for oyster sample.

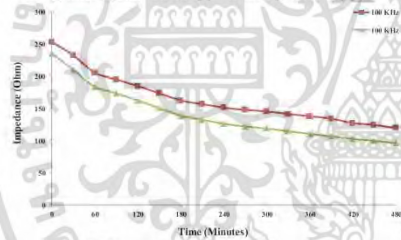


Fig. 9 The values of impedance varying as a function of time using interdigital sensor type III for oyster sample.

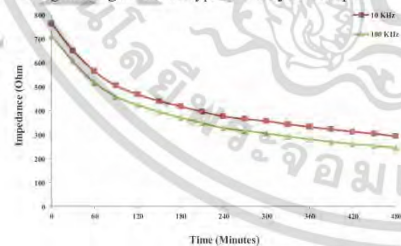


Fig. 10 The values of impedance varying as a function of time using interdigital sensor type IV for oyster sample.

### 3. THE PROPOSED SYSTEM

To observe the value of impedance using the designed interdigital sensor, more circuits are required to amplify, compare and display the signal received from the sensor. The proposed system consists of a sine wave circuit, a voltage control current source circuit, an interdigital sensor, an amplifier circuit, a rectifier circuit, a low-pass filter circuit, a comparator circuit and a display circuit.

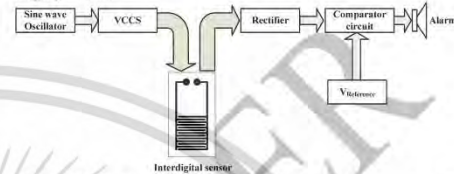


Fig. 11 Block diagram of proposed system for seafood quality inspection using interdigital sensor.

Figure 11 shows a block diagram of the proposed system for seafood quality inspection using interdigital sensor. Sine wave oscillator is used to generate 100 kHz sine wave signal with amplitude  $10 V_{p-p}$ . A voltage control current source circuit (VCCS) is used to control the output current injection to the interdigital sensor with amplitude  $1 mA_{p-p}$ . The signal received from the interdigital sensor is the impedance of the liquid contacting to the sensor. Then, the rectifier circuit converts the signal to direct current (DC) signal. The low-pass filter circuit rejects the ripple voltage of the rectifier circuit and sends output signal to the comparator circuit. The comparator circuit compares the signal received with reference voltage, and generates output signal to drive buzzer and LED if the output signal from the low-pass filter circuit less than the reference voltage.

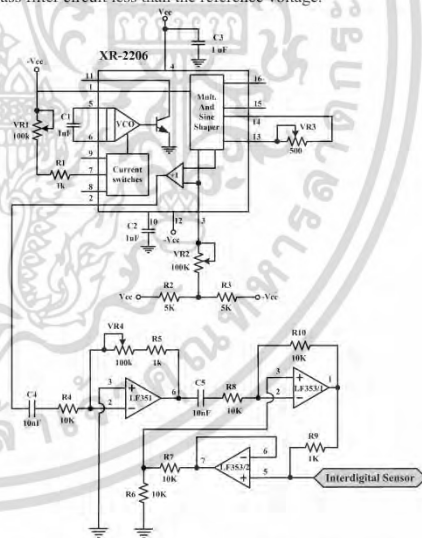


Figure 12 The proposed circuit for current injection to the interdigital sensor with amplitude  $1 mA_{p-p}$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

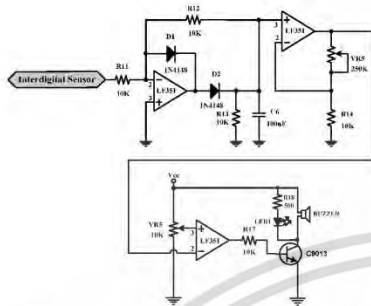


Figure 13 The proposed circuit for detection signal from the interdigital sensor.

The implementation circuit of proposed system for seafood quality inspection using interdigital sensor can be divided into two parts as shown in Figure 12 and Figure 13. For the first part, the circuit is used for injection current to the interdigital sensor with control amplitude at 1 mA<sub>p-p</sub>. For the second part, the circuit is used to detect signals from the interdigital sensor, compare the output signal with reference voltage, and turn on the alarm circuit when the impedance is lower than reference point.

4. SYSTEM EVALUATION

The proposed circuit with the selected sensor type IV in Figure 12 and Figure 13 were constructed using commercially available devices. The power supply voltage used was set to ±12 V. The performance of the proposed system was evaluated through the experiment by using two types of the seafood samples, cuttlefish and oyster. Each type of seafood was tested in two conditions, water without ice and water with soaked ice, to imitate real conditions of how seafood is usually kept in the food stall.

The procedure for each measurement can be explained as follows.

Case 1: Seafood soaked in water without ice

- (1) Prepare the seafood sample, 20 grams of cuttlefish or oyster
- (2) Place the seafood sample in a container.
- (3) Fill 100 ml of water into the vessel.
- (4) Measure the output voltage of the proposed system every 30 minutes for 8 hours.

The relationships between the time and the output voltage of the proposed system of each seafood sample in case 1 are shown in Figure 14-15.

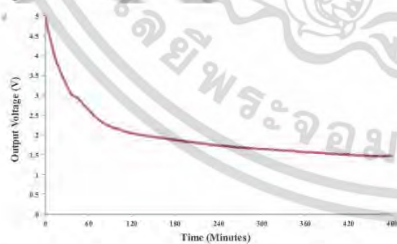


Fig. 14 The relationship between the time and the output voltage of the proposed system of cuttlefish sample (No ice).

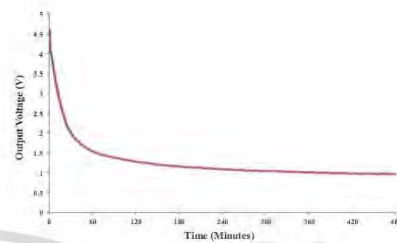


Fig. 15 The relationship between the time and the output voltage of the proposed system of oyster sample (No ice).

Case 2: Seafood soaked in water with ice

- (1) Prepare the seafood sample, 20 grams of cuttlefish or oyster
- (2) Place the seafood sample in a container.
- (3) Put 20 grams of ice and in fill 80 ml of water into the container.
- (4) Measure the output voltage of the proposed system every 30 minutes for 8 hours.

The relationships between the time and the output voltage of the proposed system of the seafood samples in case 2 are shown in Figure 16-17.

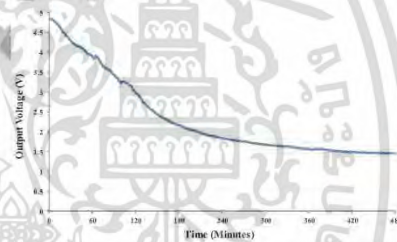


Fig. 16 The relationship between the time and the output voltage of the proposed system of cuttlefish sample (With ice).

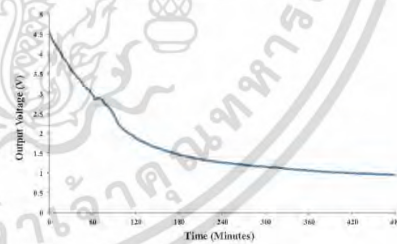


Fig. 17 The relationship between the time and the output voltage of the proposed system of oyster sample (With ice).

Figure 18 and Figure 19 show the comparison of output voltage of proposed system in case 1 and case 2 of each seafood sample.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

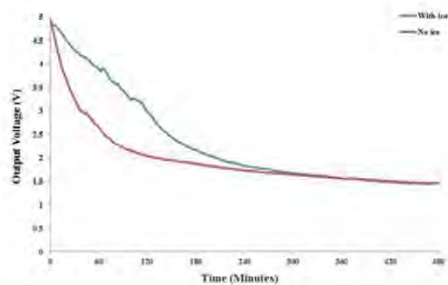


Fig. 19 The comparison of output voltage of proposed system in case 1 (No ice) and case 2 (With ice) of cuttlefish sample.

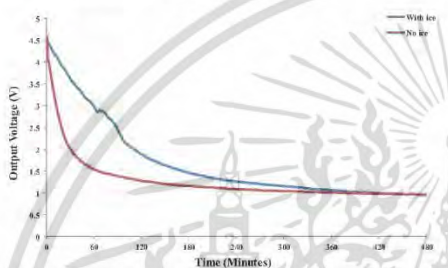


Fig. 20 The comparison of output voltage of proposed system in case 1 (No ice) and case 2 (With ice) of oyster sample.

## 5. CONCLUSION

This paper presents the system development for seafood quality inspection using interdigital sensor. First, four types of sensors for impedance measurement of liquid soaking in seafood are designed and evaluated. Sensor type IV is chosen to be used in the system since it provides the smoothest response among the four types. Then, the proposed system using the interdigital sensor with additional circuits is verified in the experiment. The experiment imitates condition of how seafood is kept in real world market where seafood is soaked in water or soaked in water with ice. The experimental results show that the proposed system can be used to detect the change of seafood quality well. The application is practical and provides result fast with a warning when the quality of seafood is below the selected threshold.

## 6. ACKNOWLEDGMENTS

This work is supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang [Grant number : A118-59-002].

## 7. REFERENCES

- [1] Leo M.L. Nollet and Fidel Toldra, "Hand Book of Seafood and Seafood Products Analysis", CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010.
- [2] Ioannis S. Bozaris, "Seafood Processing Technology, Quality and Safety", John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [3] Cesaretin Alasalvar, Fereidoon Shahidi, Kazuo Miyashita, and Udaya Wanasundara, "Handbook of Seafood Quality, Safety and Health Applications", Blackwell Publishing Ltd., 2011.

- [4] Genç İsmail Yüksel, Esteves Eduardo, and Diler Abdullah, "Handbook of seafood : quality and safety maintenance and applications" Nova Science Publishers, Inc., 2016.
- [5] A.V. Mamishev, K. Sundara-Rajan, Fumin Yang, Yanqing Du, and M. Zahn, "Interdigital sensors and transducers", Proceedings of the IEEE, Vol. 92, Issue 5, May 2004.
- [6] Mohd Syaifudin Abdul Rahman, Subhas Chandra Mukhopadhyay, and Pak-Lam Yu, "Novel Sensors for Food Inspection: Modelling, Fabrication and Experimentation", Springer International Publishing Switzerland, 2014.
- [7] Subhas Chandra Mukhopadhyay, Aimé Lay-Ekuakille, and Anton Fuchs, "New Developments and Applications in Sensing Technology", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [8] A. R. Mohd Syaifudin, P. L. Yu, S. C. Mukhopadhyay, Michael J. Haji-Sheikh, Cheng-Hsin Chuang, "Novel interdigital sensors; analysis, measurement and evaluations", 2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Hangzhou, China, May 10-12, 2011, pp. 1-6.
- [9] Thanh-Tuan Ngo, Hamidreza Shirzadfar, Djilali Kourtiche, and Mustapha Nadi, "A Planar Interdigital Sensor for Bio-impedance Measurement: Theoretical analysis, Optimization and Simulation", J. NANO- ELECTRON. PHYS. 6, 2014.

## ภาคผนวก ค

### สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึกการรายการรับ-จ่ายเงิน โครงการวิจัย สัญญาเลขที่ A118-59-002 ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 28 มีนาคม 2560

แหล่งทุน: เงินงบประมาณแผ่นดินปี 2559  
 ชื่อโครงการ : การพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเทอร์แอคทีฟ  
 ชื่อหัวหน้าโครงการ: นาย อมต หลงพล

ว/ด/ป	รายการ	เลขอ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายการจ่าย						รวม					
			รับ	จ่าย	คงเหลือ	รายรับ	งบบุคลากร	ค่าจ้างชั่วคราว	ค่าตอบแทน	ค่าวัสดุ	ค่าวัสดุ		ค่าเช่ารถ	ค่าวัสดุ	งบลงทุน	รายจ่าย	
	งบประมาณที่ได้รับอนุมัติ (ตามแผน)	399,000.00															
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 1 = 85%	339,150.00															
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 2 = 15%)	59,850.00															
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 3)																
	หัก ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 1)			351,644.70													351,644.70
	ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 2)			67,980.15													67,980.15
	ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 3)																
	ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 4)																
	งบประมาณคงเหลือ				624.85												
	รายละเอียดค่าใช้จ่าย																
ครั้งที่ 1																	
11 ต.ค. 58	บริษัท เอเชียสมเดส จำกัด	เล่มที่ 100 เลขที่ 500															9,095.00
5 ก.พ. 59	แอดวานซ์ แมทริเรียล เซอร์วิส	SD590205001															45,880.00
21 มี.ค. 59	แอดวานซ์ แมทริเรียล เซอร์วิส	SD59021001															37,460.00
18 เม.ย. 59	แอดวานซ์ แมทริเรียล เซอร์วิส	SD590418001															43,200.00
17 พ.ค. 59	แอดวานซ์ แมทริเรียล เซอร์วิส	SD590517001															33,870.00
26 มิ.ย. 59	บริษัท สปรอทคอม จำกัด	187825															32,185.60
28 มิ.ย. 59	แอดวานซ์ แมทริเรียล เซอร์วิส	SD590628001															28,510.00
8 ก.ค. 59	บริษัท สปรอทคอม เซอร์วิส จำกัด	187893															26,546.70

บันทึกการรายการรับ-จ่ายเงิน โครงการวิจัย สัญญาเลขที่ A118-59-002 ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 28 มีนาคม 2560

แหล่งทุน: เงินงบประมาณแผ่นดินปี 2559  
 ชื่อโครงการ : การพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพอาหารทะเลโดยใช้เซนเซอร์แบบอินเทลลิเจนท์  
 ชื่อหัวหน้าโครงการ: นาย อมต หลงพงพล

ว/ด/ป	รายการ	เลขอ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			งบบุคลากร	รายการจ่าย			งบคงทุน	รวม
			รับ	จ่าย	คงเหลือ		รายการรับ	งบดำเนินงาน	รวม		
25 ก.ค. 59	เมื่อดำเนินงาน มหาวิทยาลัย เพอร์ริวส์	SD590729002					24,520.00			24,520.00	
9 ส.ค. 59	บริษัท ภูมิพงษ์ เทคโนโลยีแอมบัตเตอร์ริส จำกัด	23B/1.6080622					1,080.00			1,080.00	
9 ส.ค. 59	บริษัท ภูมิพงษ์ เทคโนโลยีแอมบัตเตอร์ริส จำกัด	23B/1.6080623					1,768.00			1,768.00	
19 ส.ค. 59	บริษัท ภูมิพงษ์เทคโนโลยี เพอร์ริวส์ จำกัด	188061					47,529.40			47,529.40	
	<b>รวมครั้งที่ 1</b>						331,644.70			331,644.70	
	<b>ครั้งที่ 2</b>										
19 ส.ค. 59	บริษัท ภูมิพงษ์เทคโนโลยี เพอร์ริวส์ จำกัด	188085					45,630.15			45,630.15	
25 ส.ค. 59	เมื่อดำเนินงาน มหาวิทยาลัย เพอร์ริวส์	SD590826001					22,350.00			22,350.00	
	<b>รวมครั้งที่ 2</b>						67,980.15			67,980.15	
	<b>ครั้งที่ 3</b>										
	<b>รวมครั้งที่ 3</b>										
	<b>ครั้งที่ 4</b>										
	<b>รวมครั้งที่ 4</b>										

ลงชื่อหัวหน้าโครงการ .....

วันที่ ..... หน้า 2

ภาคผนวก ง  
ข้อมูลประวัติผู้วิจัย

**หัวหน้าโครงการวิจัย**

1. ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) นาย อมต หลวงพล  
(ภาษาอังกฤษ) Mr. AMATA LUANGPOL

2. ตำแหน่งปัจจุบัน นักวิจัย

3. หน่วยงานที่สังกัดและที่อยู่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 02-329-8341 โทรสาร 02-329-8343 E-mail : klamata@kmitl.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

วุฒิ	ปี พ.ศ. ที่จบ	ชื่อสถานศึกษา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า)	2553	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ. (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์)	2543	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

วงจรรีเลย์ทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์และระบบควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ผู้ร่วมวิจัย**

1. ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) นายอภิไนย์ ฤกษ์รัตน์  
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Apinai Rerkratn

2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

**3. หน่วยงานที่สังกัดและที่อยู่ติดต่อได้สะดวก**

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 02-329-8347 โทรสาร 02-329-8349

E-mail : apinai@yahoo.com

**4. ประวัติการศึกษา**

วุฒิ	ปี พ.ศ. ที่จบ	ชื่อสถานศึกษา
วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต วศ.ด. (วิศวกรรมไฟฟ้า)	2556	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า)	2545	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ. (วิศวกรรมโทรคมนาคม)	2541	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ**

ด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์, ระบบเครื่องมือวัดและควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้