



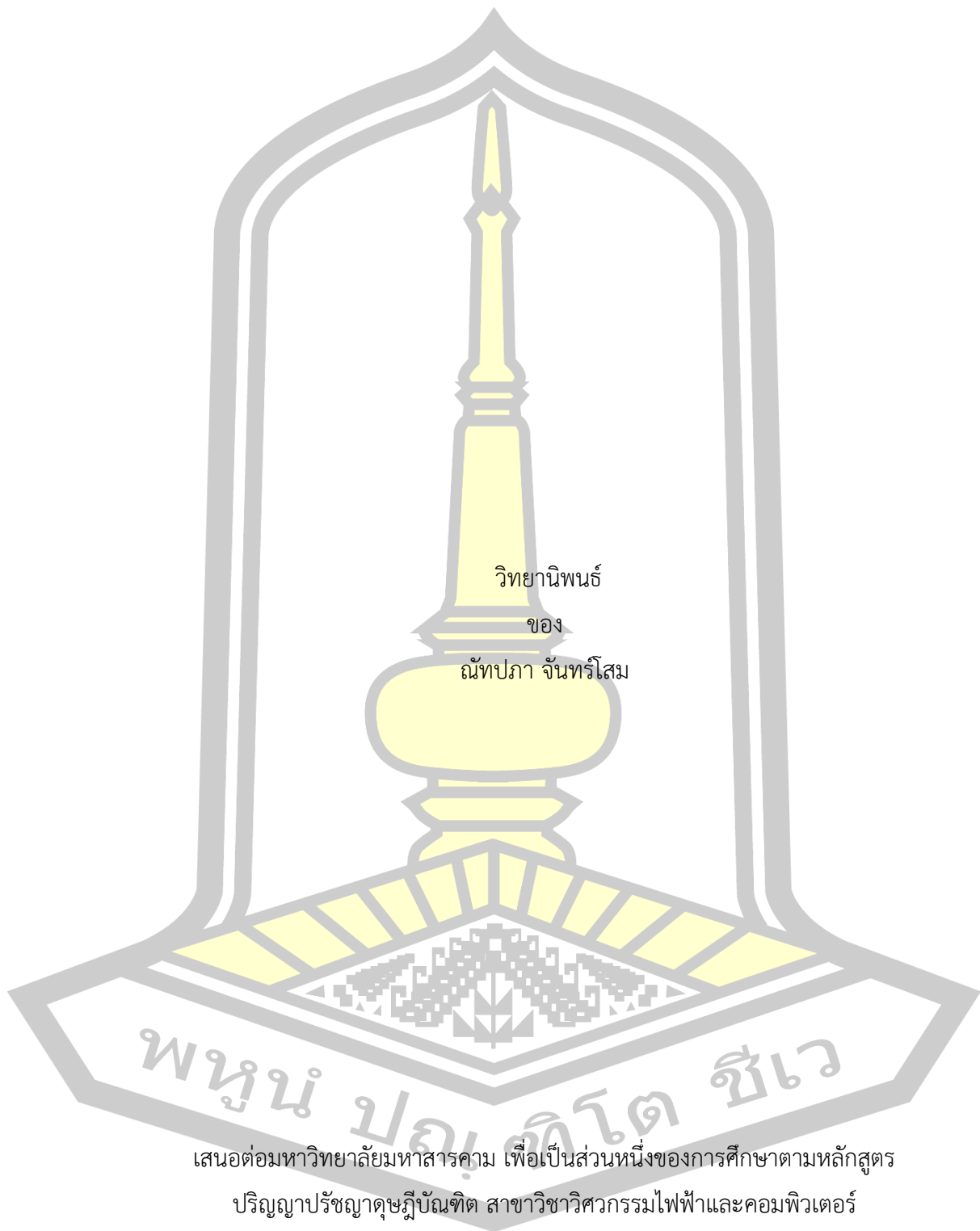
การตรวจสอบการเจ็บน้ำในน้ำนมดิบ โดยอินเตอร์ดิจิตอลแบบ 2 ทาง

วิทยานิพนธ์
ของ
ณัฏภา จันทรโสม

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
กรกฎาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การตรวจสอบการเจือปนน้ำในน้ำมันดิบ โดยอินเตอร์ดิจิตอลแบบ 2 ทาง

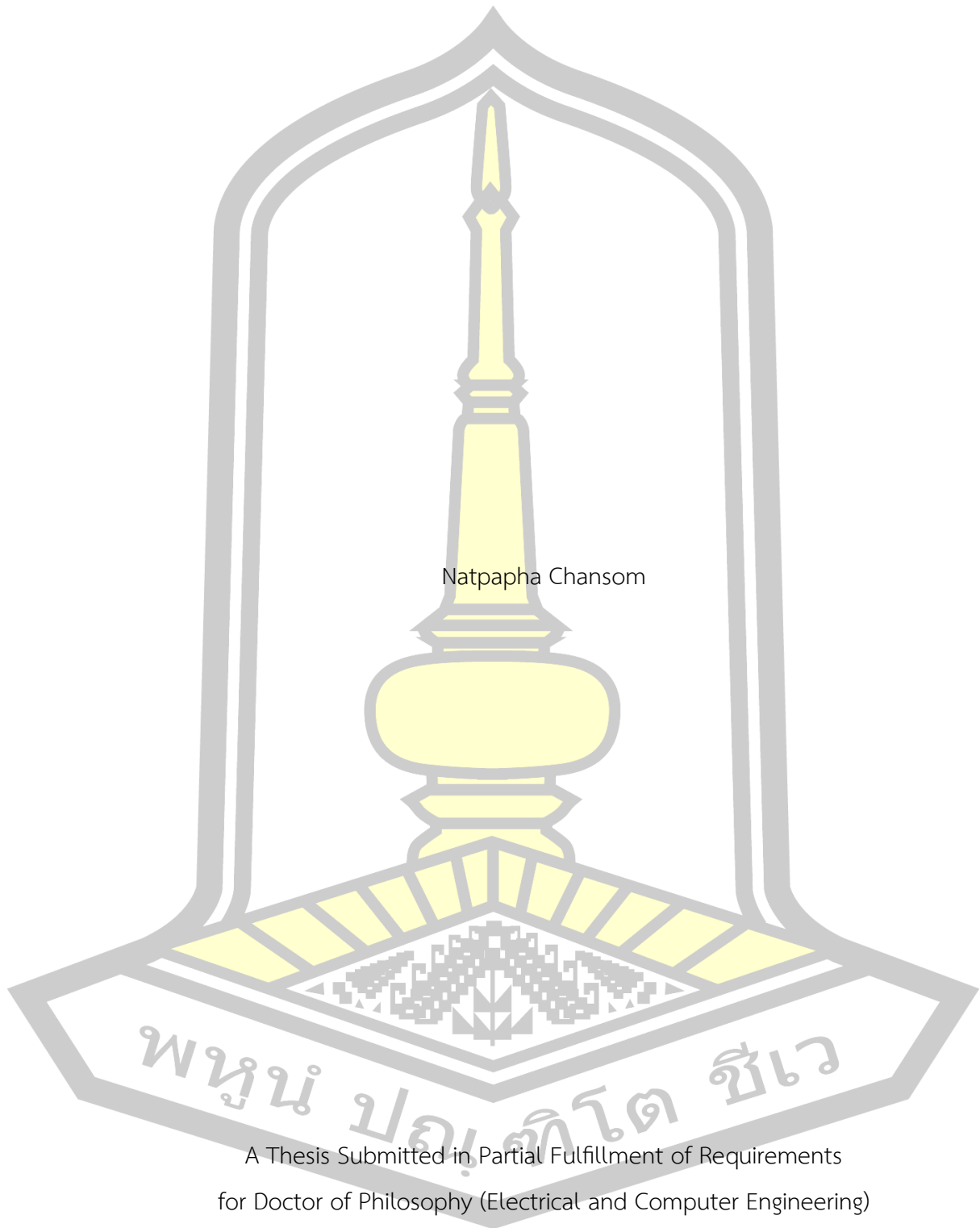


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

กรกฎาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Determination of Water Added in Raw Milk by Two Side Interdigital Capacitor Sensor



Natpapha Chansom

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

July 2023

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวณัทภา จันทร์โสม
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศ. ดร. วรวัฒน์ เสียมวิบูล)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. นิวัตร อังควิเศษฐพันธ์)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ณัฐฉิ สุวรรณทา)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยยงค์ เสริมผล)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย
มหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การตรวจสอบการเจือปนน้ำในน้ำมันดิบ โดยอินเทอร์ดิจิตอลแบบ 2 ทาง

ผู้วิจัย ณัทปภา จันทร์โสสม

อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล

ปริญญา ปรัชญาคุณภูมิบัณฑิต **สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม **ปีที่พิมพ์** 2566

บทคัดย่อ

การตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันดิบ ก่อนการรับซื้อน้ำมันดิบจากเกษตรกรผู้เลี้ยงโคนม รายย่อย ณ จุดรับซื้อน้ำมันดิบ เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการกำหนดราคาของน้ำมันดิบ การวิจัยครั้งนี้ มีความมุ่งหมายเพื่อ ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า วิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า วิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้า ค่าความต้านทาน และค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมัน ที่ส่งผลต่อตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง กลุ่มตัวอย่างในการวิจัย คือ น้ำมันดิบจากสหกรณ์ผู้เลี้ยงโคนมจังหวัดขอนแก่น เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยเก็บรวบรวมข้อมูล โดยการเจือปนน้ำในน้ำมันดิบในช่วงความเข้มข้น 0 ถึง 50 % โดยนำตัวอย่าง 150 cc. ใส่ในภาชนะแก้วขนาด 300 cc. แล้วเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตัวอย่างละ 5% จนปริมาณน้ำเท่ากับ 300 cc. สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ ค่าเฉลี่ย สหสัมพันธ์พหุคูณ การถดถอยเชิงเส้น

ผลการวิจัยปรากฏดังนี้ ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมันดิบ โดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง พบว่าที่ทุกระดับเปอร์เซ็นต์การเจือปนน้ำในน้ำมันดิบ จะมีอิทธิพลต่อค่าความจุทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยได้อินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง แบบ a3b3L15 ที่ความถี่การวัด 1kHz สามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าได้ 22.23 ไมโครฟารัด ที่ค่าความเชื่อมั่น (R^2) 0.97 มีอัตราส่วนการเพิ่มความจุทางไฟฟ้า 41.12 pF ต่อการปนน้ำ 1%

คำสำคัญ : น้ำมันดิบ, อินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์, ตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แบบ 2 ข้าง

TITLE	Determination of Water Added in Raw Milk by Two Side Interdigital Capacitor Sensor		
AUTHOR	Natpapha Chansom		
ADVISORS	Professor Worawat Sa-Ngiamvibool , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Electrical and Computer Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2023

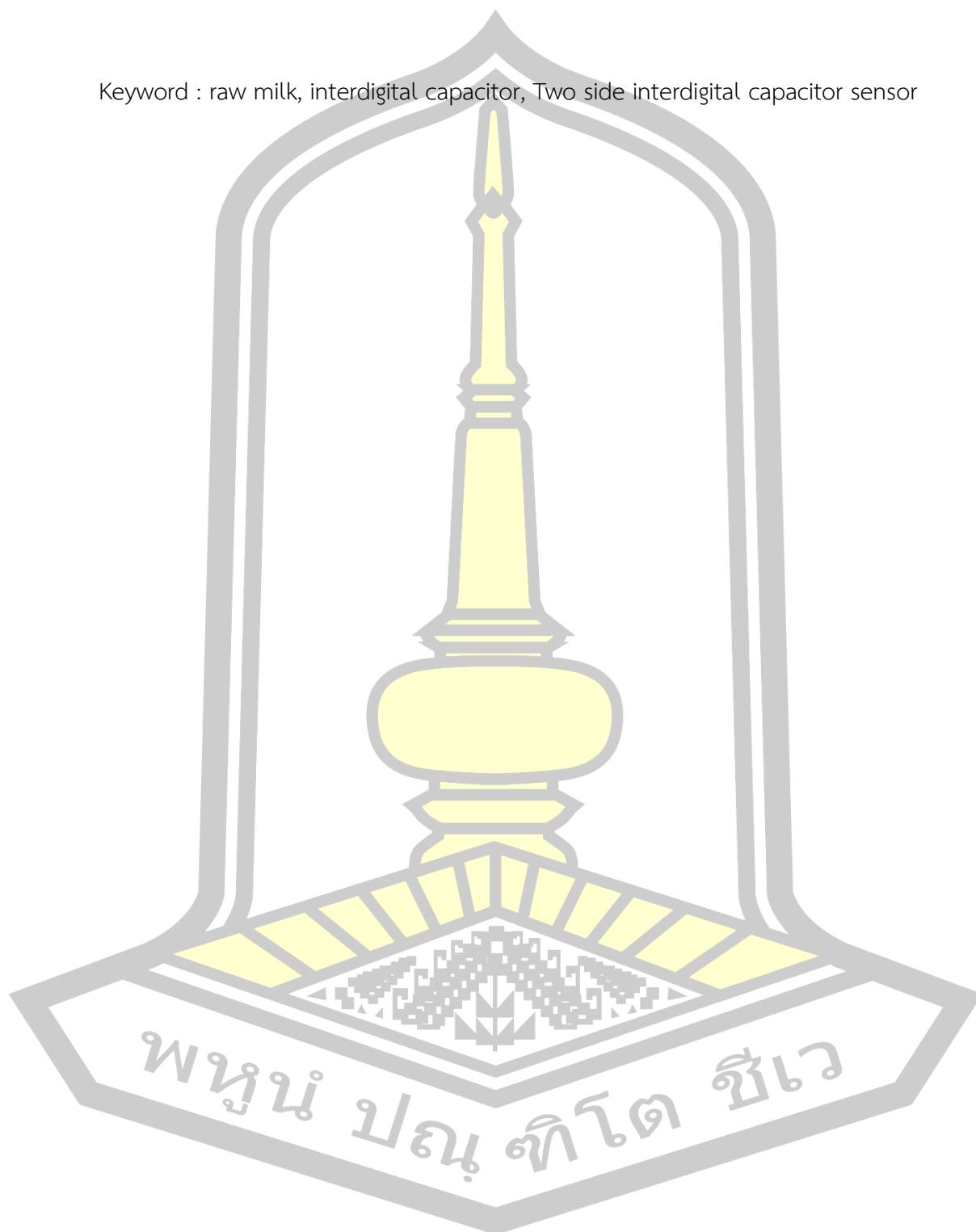
ABSTRACT

The quality assessment of raw milk before purchasing from local dairy farmers at raw milk collection points is an important factor that affects the pricing of raw milk. The objective of this research is to study the electrical properties and analyze the relationships between electrical capacitance, resistance, frequency, and the water content in raw milk affect the perception of Two side interdigital capacitor sensor (2sICS). The research sample consists of raw milk obtained from a dairy cooperative in KhonKaen province. The research data was collected by examining the water content in raw milk samples with varying concentrations from 0% to 50%. Each sample of 150 cc. was placed in a 300 cc. glass container, and the water concentration was increased by 5% increments until the total volume reached 300 cc. Statistical analysis methods used in data analysis include mean values, correlation coefficients, and linear regression.

The results of the research are as follows: The analysis of electrical properties based on the water content in raw milk using a 2sICS revealed that at every percentage level of water content, there is a significant impact on the electrical capacitance. 2sICS, specifically the a3b3L15 model, at a measuring frequency of 1 kHz, was able to measure the electrical capacitance of 22.23 microfarads with a confidence level (R2) of 0.97. The rate of increase in electrical

capacitance per 1% water content was found to be 41.12 pF.

Keyword : raw milk, interdigital capacitor, Two side interdigital capacitor sensor



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากบุคคลหลายท่านได้กรุณาช่วยเหลือให้
ข้อเสนอแนะ คำปรึกษา แนะนำ ความคิดเห็น และกำลังใจแก่ผู้เขียน

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล ประธานกรรมการควบคุม
วิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. จักรพันธ์ ออบมา ที่ได้ให้แนวคิดความรู้ทางวิชาการ ตรวจสอบวิทยานิพนธ์
ทุกขั้นตอน ตลอดจนกำลังใจแก่ผู้เขียน ซึ่งเป็นผลให้ผู้เขียนมีความสามารถในการทำและพัฒนางานวิจัย
ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ท้ายสุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของผู้เขียน ที่ได้ช่วยส่งเสริม
สนับสนุนกระตุ้นเตือน และเป็นกำลังใจตลอดมา

ณัฏฐา จันทร์โสม

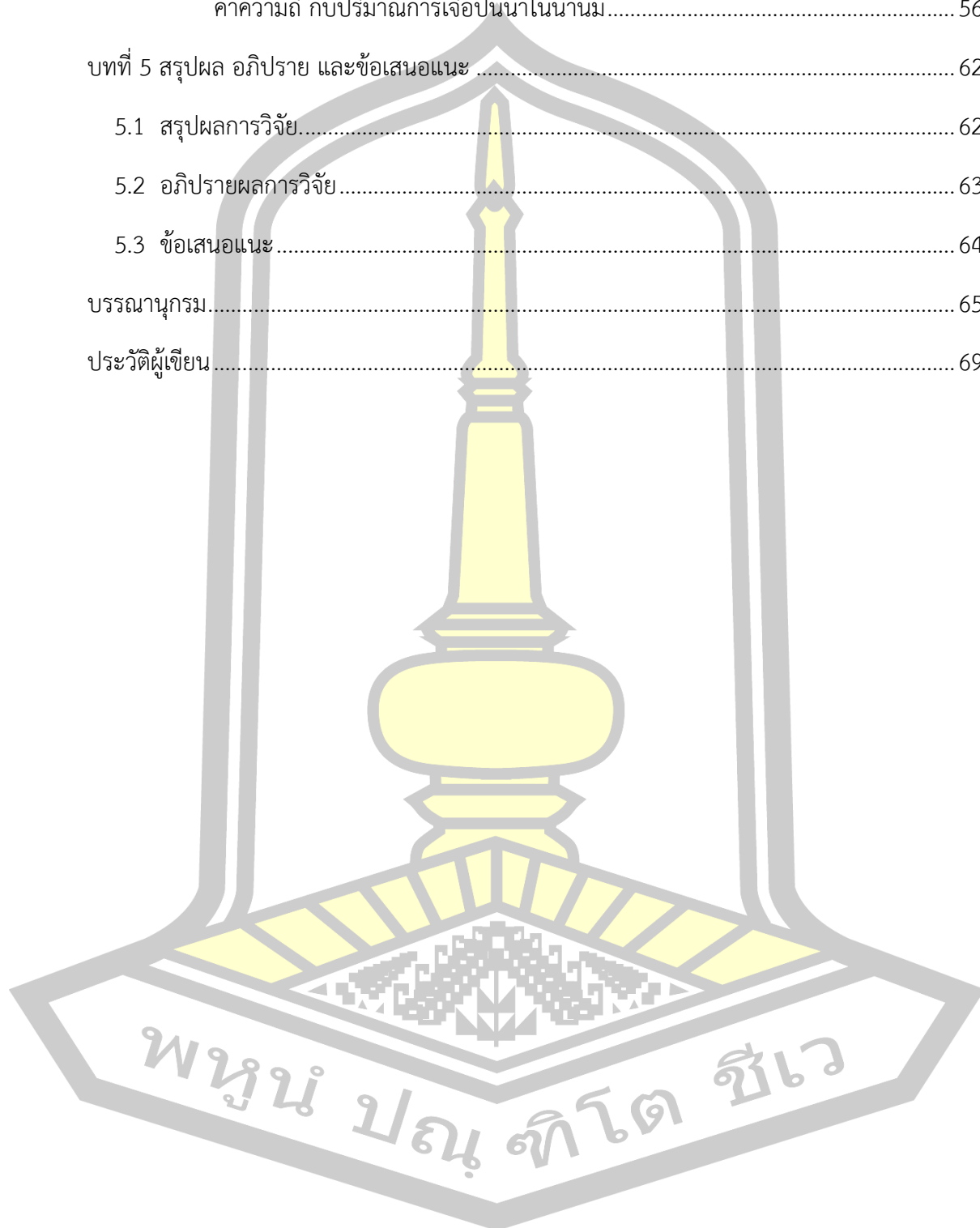


สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมุติฐานการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5. ประโยชน์ของการวิจัย.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 น้ำนมดิบ.....	3
2.1.1 ความสำคัญของน้ำนมและผลิตภัณฑ์นม.....	4
2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำนมดิบ.....	7
2.2 การตรวจสอบคุณภาพของน้ำนมดิบ.....	8
2.2.1 การเจือปนน้ำในน้ำนมดิบ.....	8
2.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจหาการเจือปนน้ำในน้ำนมดิบ.....	10
2.2.3 วิธีการคำนวณเปอร์เซ็นต์การเจือปนน้ำในน้ำนมจากองค์ประกอบของน้ำนม.....	12
2.2.4 เทคโนโลยี วิธีการ และแนวทางการพัฒนาเพื่อตรวจหาการเจือปนน้ำในน้ำนมดิบ....	12

2.2.5	วิธีการวัดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำนมดิบ.....	15
2.2.6	หลักการและวิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสง.....	16
2.2.7	โครงสร้างโมเลกุลของน้ำและผลึกน้ำแข็ง.....	17
2.3	คุณสมบัติของค่าการเก็บประจุทางไฟฟ้า.....	19
2.3.1	ตัวเก็บประจุ (Capacitor).....	19
2.3.2	ความจุไฟฟ้า (capacitance; C).....	20
2.3.3	ปัจจัยที่มีต่อการเก็บประจุ.....	21
2.4	ตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิจิทัล.....	26
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	36
3.1	กลุ่มตัวอย่าง.....	36
3.2	เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	36
3.3	วิธีการดำเนินการทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล.....	37
3.3.1	การออกแบบและการสร้างตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง.....	37
3.3.2	การทดลองวัดค่าการปนน้ำในน้ำนมดิบ.....	38
3.4	การวิเคราะห์ข้อมูล.....	40
บทที่ 4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	41
4.1	สัญลักษณ์ที่ใช้ในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	41
4.2	ลำดับขั้นในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	41
4.3	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	42
4.3.1	ผลการศึกษาคงสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนมดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง.....	42
4.3.2	วิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนมดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง.....	51

4.3.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้า ค่าความยาวของซีทีที่เพิ่มขึ้นและ ค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมัน.....	56
บทที่ 5 สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ.....	62
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	62
5.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	63
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	64
บรรณานุกรม.....	65
ประวัติผู้เขียน.....	69

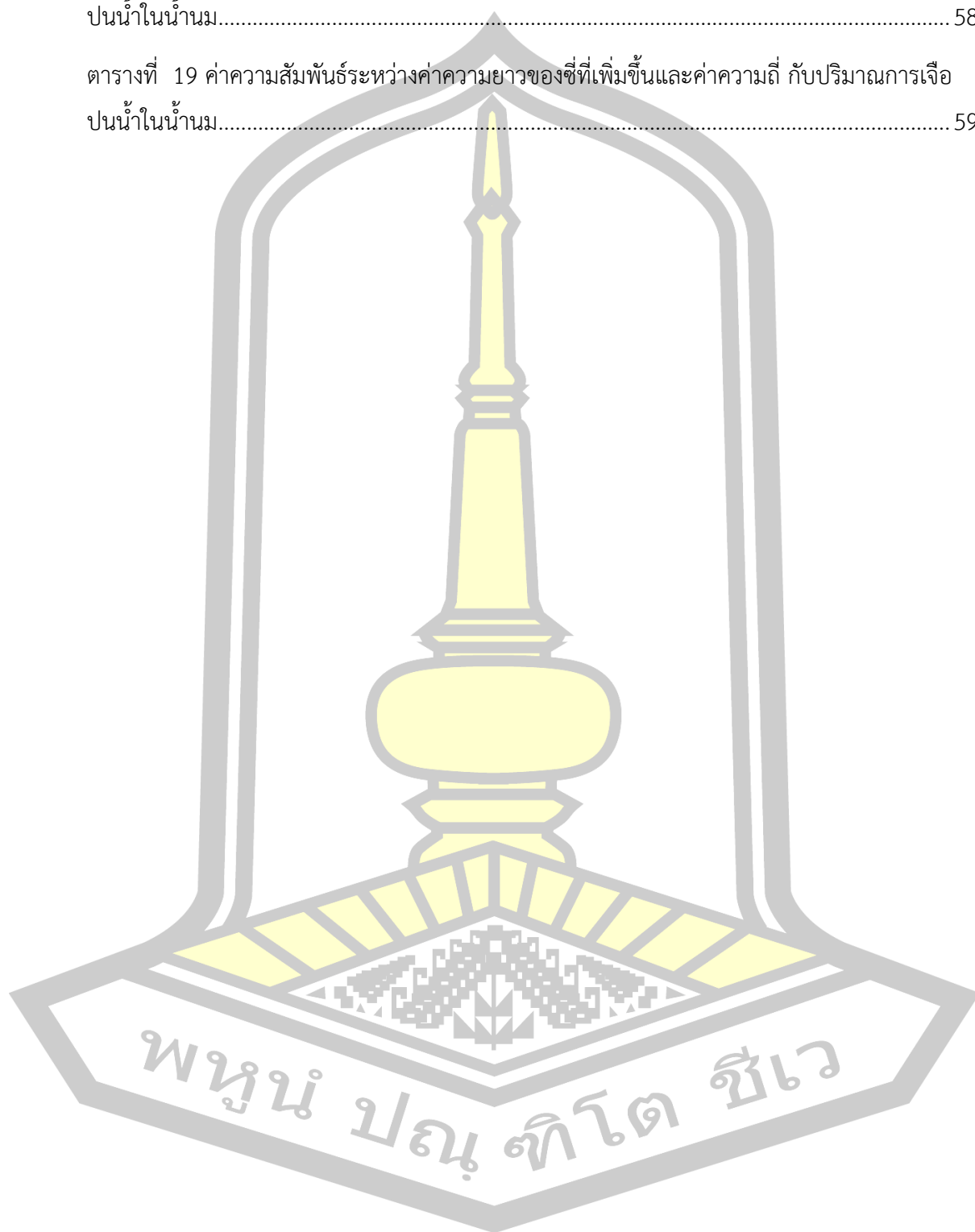


สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สิ้นค้าอุตสาหกรรมเกษตรส่งออก 15 อันดับแรก ของไทย.....	4
ตารางที่ 2 ข้อมูลการส่งออกนมและผลิตภัณฑ์นมปี พ.ศ. 2560 - 2561	4
ตารางที่ 3 สิ้นค้าอุตสาหกรรมนำเข้า 15 อันดับแรก ของไทย.....	5
ตารางที่ 4 ข้อมูลการส่งออกนมและผลิตภัณฑ์นมปี พ.ศ. 2560 - 2561	6
ตารางที่ 5 ปริมาณการเลี้ยงโคนมและการผลิตนํ้านมดิบของประเทศไทย ระหว่างปี พ.ศ. 2558 ถึง พ.ศ. 2563	7
ตารางที่ 6 ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (K) ของวัสดุ.....	23
ตารางที่ 7 ตารางแสดงขนาด และสัญลักษณ์ (Code) ที่ใช้กับอินเตอร์ดิจิตัล 2 ทาง แต่ละขนาด.....	38
ตารางที่ 8 ตารางการเติมปริมาณนํ้า	39
ตารางที่ 9 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรูนีเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 1kHz.....	42
ตารางที่ 10 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรูนีเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 1kHz.....	44
ตารางที่ 11 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรูนีเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 1kHz.....	45
ตารางที่ 12 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรูนีเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 10kHz ...	47
ตารางที่ 13 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรูนีเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 10kHz ...	48
ตารางที่ 14 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรูนีเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 10kHz ...	50
ตารางที่ 15 ค่าเส้นแนวโน้มและค่า R-Square ของตัวรับรูนีเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง โดยใช้ความถี่ในการวัดเท่ากับ 1kHz	52
ตารางที่ 16 ค่าเส้นแนวโน้มและค่า R-Square ของตัวรับรูนีเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง โดยใช้ความถี่ในการวัดเท่ากับ 10kHz	54
ตารางที่ 17 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวของซีทีที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนนํ้าในนํ้านม.....	56

ตารางที่ 18 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวของซีที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมัน..... 58

ตารางที่ 19 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวของซีที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมัน..... 59



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ตลาดส่งออกนมและผลิตภัณฑ์นม 5 อันดับแรก	5
ภาพที่ 2 ลักษณะการเกิดจุดเยือกแข็งของนํ้านม [6]	9
ภาพที่ 3 เครื่อง Cryoscope ของบริษัท Advance Instrument, Inc รุ่น 4D3_8].....	10
ภาพที่ 4 เครื่อง Cryoscope ของบริษัท Geneq, Inc รุ่น Lactoscan60 [9].....	11
ภาพที่ 5 เครื่อง Cryoscope ของบริษัท Foss รุ่น MilkoscanFT120 [10].....	11
ภาพที่ 6 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องมือวัดจุดเยือกแข็งของของเหลว.....	13
ภาพที่ 7 แสดงอันตรกิริยาของสารเคมีกับการแผ่รังสีหรือแสง [15].....	17
ภาพที่ 8 โครงสร้างโมเลกุลของน้ำและผลึกน้ำแข็ง	18
ภาพที่ 9 ตัวเก็บประจุแผ่นเพลตแบบขนาน [16].....	20
ภาพที่ 10 โครงสร้างทั่วไปตัวเก็บประจุ[16]	21
ภาพที่ 11 (ก) ไดอิเล็กทริกแบบอากาศว่าง (ข) ไดอิเล็กทริกแบบไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลาง	24
ภาพที่ 12 ตัวเก็บประจุต่ออนุกรม และตัวเก็บประจุสมมูล	25
ภาพที่ 13 ตัวเก็บประจุต่อขนาน และตัวเก็บประจุสมมูล	25
ภาพที่ 14 ค่าคาปาซิแตนซ์เพิ่มขึ้นเมื่อมีวัสดุไดอิเล็กทริกวางในสนามไฟฟ้า [19].....	26
ภาพที่ 15 ลักษณะของลายวงจรที่มีการออกแบบ [19]	27
ภาพที่ 16 โครงสร้างอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ [20].....	27
ภาพที่ 17 รูปแบบและแนวตัดโครงสร้างของตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตัล [21]	28
ภาพที่ 18 รูปแบบและตัวแปรของตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตัล [22].....	29
ภาพที่ 19 ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัลและการทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์ของเนื้อหุ้ม [23]	30
ภาพที่ 20 ออกแบบโครงสร้างและระบบวัดการปนน้ำในนํ้านมและผลการทดสอบ [24].....	30

ภาพที่ 21 ตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิตอลคู่ขนานสำหรับป้องกันการทำลายของฉนวนในระบบสายส่งไฟฟ้า [25].....	31
ภาพที่ 22 การวัดความชื้นในคอนกรีตโดยตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตอลสนามระยะใกล้ [26].....	31
ภาพที่ 23 การวัดค่าความเข้มข้นของน้ำตาลโดยใช้ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุแบบอินเทอร์ดิจิตอล [21]	32
ภาพที่ 24 การวัดค่าความเข้มข้นและเจือปนของน้ำมัน [27]	32
ภาพที่ 25 ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิจิตอลแบบใหม่[28]	33
ภาพที่ 26 เครื่องวัดความเข้มแสงดิจิตอลเพื่อวัดปริมาณน้ำที่เติมในน้ำมัน [29]	33
ภาพที่ 27 การพิมพ์และแผ่นอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบการวัดระดับโดยใช้ค่าการเก็บประจุต้นทุนต่ำ [31].....	34
ภาพที่ 28 วงจร Schering Bridge [30].....	34
ภาพที่ 29 การทดสอบด้วย Electrochemical Impedance Spectroscopy(EIS) [31].....	35
ภาพที่ 30 LCR Meter ยี่ห้อ KEYSIGHT รุ่น E4980AL	36
ภาพที่ 31 อินเทอร์ดิจิตัล 2 ทาง กำหนดให้ a =ความกว้างของซี่, b =ระยะห่างระหว่างของซี่, L =ความยาวของซี่, N =จำนวนของซี่ในแต่ละข้าง	37
ภาพที่ 32 รายละเอียดของตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์.....	38
ภาพที่ 33 ตัวอย่างการวัดค่าความจุทางไฟฟ้าของน้ำมันดิบด้วยอินเทอร์ดิจิตัล 2 ทาง	39
ภาพที่ 34 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 1kHz.....	43
ภาพที่ 35 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 1kHz.....	44
ภาพที่ 36 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 1kHz.....	46
ภาพที่ 37 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 10kHz	47
ภาพที่ 38 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 10kHz	49
ภาพที่ 39 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 10kHz	50
ภาพที่ 40 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 1kHz.....	53
ภาพที่ 41 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 10kHz	55

ภาพที่ 42 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวของซี่ที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปน
 น้ำในน้ำมัน ที่ความหนาซี่และระยะระหว่างซี่ เท่ากับ 1 mm..... 57

ภาพที่ 43 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวของซี่ที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปน
 น้ำในน้ำมัน ที่ความหนาซี่และระยะระหว่างซี่ เท่ากับ 2 mm..... 58

ภาพที่ 44 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวของซี่ที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปน
 น้ำในน้ำมัน ที่ความหนาซี่และระยะระหว่างซี่ เท่ากับ 3 mm..... 60



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและปัญหา

ส่วนประกอบของนม ประกอบด้วยไขมันดีเพิ่มพลังงาน โปรตีนสูงสร้างเม็ดเลือดและกระดูก แคลเซียมสูง ลดความดันโลหิต ลดความเสี่ยงมะเร็งลำไส้ มีผลดีต่อสมอง เสริมสร้างพัฒนาการ อีคิว ไอคิว ทุกประเทศนิยมสนับสนุนให้ประชากรภายในประเทศดื่มนม โดยเฉพาะในเด็ก จึงมีการสนับสนุนและส่งเสริมการเลี้ยงโคนมอย่างแพร่หลาย ส่งผลให้มีจำนวนเกษตรกรผู้เลี้ยงโคนมเพิ่มขึ้น มีน้ามนดิบออกสู่ท้องตลาดเพิ่มขึ้นไม่ว่าจะเป็นน้ามนดิบไปแปรรูปเป็นนมพร้อมดื่ม หรือน้ามนดิบไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ

การตรวจสอบคุณภาพของน้ามนดิบ ก่อนการรับซื้อน้ามนดิบจากเกษตรกรผู้เลี้ยงโคนมรายย่อย ณ จุดรับซื้อน้ามนดิบ เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการกำหนดราคาของน้ามนดิบ การตรวจสอบการเจือปนของน้ามนดิบ โดยส่วนมากนิยมใช้ แลคโตมิเตอร์ (Lactometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้หลักในการวัดค่าการเจือปนของน้ามนดิบ โดยใช้หลักการวัดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ามนดิบที่ปนกับน้า แล้วจึงนำค่ามาคำนวณเพื่อหาค่าการเจือปนของน้ามนดิบออกมาเป็นร้อยละ แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือวัดชนิดนี้ไม่สามารถวัดค่าออกมาได้ในทันที ต้องนำค่าที่ได้ไปคำนวณอีกครั้งหนึ่ง ได้มีการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้วัดการเจือปนของน้ามนดิบที่เรียกว่า Cryoscopy ซึ่งเป็นการวัดที่ใช้วัดค่าจุดเยือกแข็ง ซึ่งมีความรวดเร็ว และแม่นยำ นอกจากนี้ยังมีวิธีการวัดโดยการใช้เทคนิคสะท้อนเสียงของคลื่นอัลตราโซนิก และการส่องผ่านของคลื่นอินฟราเรด เพื่อใช้ตรวจหาการเจือปนของน้ามนดิบ แต่เครื่องมือเหล่านี้มีราคาสูง และมีความยุ่งยากในการทำงานจึงไม่เป็นที่นิยมที่จะนำมาใช้ในการตรวจหาการเจือปนของน้ามนดิบ ณ จุดรับซื้อน้ามนดิบ ในปัจจุบันมีการออกแบบ สร้าง และทำการทดสอบใช้อินเตอร์ดิจิทัล มาใช้เพื่อทำการวัดค่าความจุทางไฟฟ้าของน้ามนดิบที่มีการเจือปนของน้า แต่ก็ยังไม่สามารถ หาค่าความถูกต้องแม่นยำเพียงพอที่จะสามารถนำไปใช้งานได้จริง

จากปัญหาที่พบในพื้นที่ในการตรวจสอบคุณภาพน้ามนดิบและการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า คุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญที่สามารถนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ในการตรวจสอบหรือใช้เป็นเครื่องมือวัดหาปริมาณ ความจุ หรือผลปฏิกิริยาทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆได้ เช่น ความเข้มข้น การเจือปน การหาปริมาณ เป็นต้น โดยการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้วางกรอบงานวิจัยเพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุของน้ามนดิบและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของระดับน้าแต่ละระดับด้วยตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัล 2 ข้าง

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมันดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล 2 ข้าง
- 2) วิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมันดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล 2 ข้าง
- 3) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้า ค่าความต้านทานและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมัน

1.3 สมมุติฐานการวิจัย

น้ำมันดิบที่มีการเจือปนของน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุทางไฟฟ้ากับความกว้างของแผ่นตัวนำ (a) ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (b) และความยาวของแผ่นตัวนำ (L) ระยะห่างของแผ่นตัวนำของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์และตามอัตราส่วนร้อยละการเจือปนน้ำในน้ำมันดิบ

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย คือ น้ำมันดิบจากสหกรณ์ผู้เลี้ยงโคนมจังหวัดขอนแก่น

ตัวแปรที่ศึกษา ตัวแปรตาม คือ ค่าความจุทางไฟฟ้าของน้ำมันดิบ ขณะที่ตัวแปรอิสระของอินเตอร์ดิจิตอลแบบ 2 ข้าง ประกอบด้วย ความกว้างของซี (1, 2 และ 3 mm.) ความยาวของซี (5, 10 และ 15 mm.) และความถี่ที่ใช้ในการวัด ที่ความเข้มข้นของน้ำเจือปนในน้ำมันดิบ 10% 20% 30% 40% และ 50%

1.5 ประโยชน์ของการวิจัย

- 1) ได้ความแตกต่างทางไฟฟ้าของปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมันดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล 2 ข้าง
- 2) ได้พารามิเตอร์ทางอิเล็กทรอนิกส์ของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมันดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล 2 ข้าง
- 3) ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้า ค่าความต้านทานและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมันดิบ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า คุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญที่สามารถนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ในการตรวจสอบหรือใช้เป็นเครื่องมือวัดหาปริมาณ ความจุ หรือผลปฏิกิริยาทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ ได้ เช่น ความเข้มข้น การเจือปน การหาปริมาณ เป็นต้น โดยการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้วางกรอบงานวิจัยเพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างการปนน้ำในน้ำนมดิบและคุณสมบัติทางไฟฟ้าแต่ระดับด้วยตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิทัล 2 ข้าง ดังนี้

- 2.1 น้ำนมดิบ
- 2.2 การตรวจสอบคุณภาพน้ำนมดิบ
- 2.3 คุณสมบัติของค่าการเก็บประจุทางไฟฟ้า
- 2.4 ตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเทอร์ดิจิทัล
- 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำนมดิบ

น้ำนม (Milk) หมายถึง น้ำที่เกิดจากการสกัดหรือผลิตจากนมของสัตว์ เช่น นมวัว, นมแพะ, นมแกะ หรือนมจากสัตว์อื่นๆ น้ำนมมักถูกกรองและปรับคุณภาพก่อนจะถูกบรรจุใส่ขวดหรือภาชนะอื่นๆ เพื่อนำมาใช้เป็นเครื่องดื่มหรือส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มต่างๆ น้ำนมมีคุณสมบัติทางโภชนาการและอุดมไปด้วยโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต วิตามิน และแร่ธาตุที่สำคัญ ซึ่งมีประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตและสร้างสุขภาพของมนุษย์ในช่วงวัยเด็กและผู้ใหญ่ทุกเพศวัย

น้ำนมโคดิบ (Raw Cow Milk) [มกษ. 6003-2553] [1] หมายถึง น้ำนมที่ได้จากแม่โคหลังคลอดลูกแล้ว ไม่น้อยกว่า 3 วัน หรือ 72 ชั่วโมง ต้องไม่มีนมน้ำเหลือง (Colostrum) ปน ไม่ผ่านการแยกองค์ประกอบ ใดๆ ใดอย่างหนึ่งของน้ำนมออก หรือเติมสารอื่นใด และ ไม่ผ่านกรรมวิธีใดๆ ยกเว้นการทำให้เย็น

ผลิตภัณฑ์นม (Milk Product, Dairy Product) [Codex] [2] ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากนมของสัตว์ เช่น นมวัว, นมแพะ, นมแกะ ซึ่งนมเหล่านี้จะถูกกรองและปรับคุณภาพก่อนจะได้รับการบรรจุเป็นผลิตภัณฑ์นมที่เราใช้บ่อยๆ เช่น นมข้น, นมสด, นมเปรี้ยว (โยเกิร์ต), เนย, เครม, โอวัน, และผลิตภัณฑ์นมอื่นๆ ที่ผู้คนบริโภคเป็นประจำวัน เช่น ชีส, ไอศกรีม, ผลิตภัณฑ์จากนมเชื้อเพลิง และอื่นๆ

2.1.1 ความสำคัญของน้ำมันและผลิตภัณฑ์นม

2.1.1.1 การส่งออก นมและผลิตภัณฑ์นม ในประเทศไทยเป็นส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมอาหารและเกษตรของประเทศ นมไทยเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและได้รับการยอมรับในตลาดสากลภายในประเทศไทย นมและผลิตภัณฑ์นมส่วนใหญ่มีการผลิตจากบริษัทและฟาร์มนมทั้งในระดับใหญ่และระดับเล็กทั่วประเทศ การส่งออกนมและผลิตภัณฑ์นมไทยไปยังตลาดนานาชาติเป็นไปตามข้อกำหนดและเงื่อนไขของแต่ละประเทศปลายทาง ซึ่งอาจรวมถึงเรื่องราคา ระเบียบการนำเข้า และมาตรฐานคุณภาพ ประเทศที่เป็นผู้นำเข้านมไทยส่วนใหญ่ได้แก่ จีน ญี่ปุ่น สิงคโปร์ มาเลเซีย และประเทศในกลุ่มยูเออี (EU) อีกทั้งยังมีการส่งออกนมและผลิตภัณฑ์นมไทยไปยังตลาดอื่นๆ รวมถึงอเมริกาเหนือ ออสเตรเลีย และอาหรับเอมิเรตส์ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคระหว่างประเทศและ เป็นสินค้าอุตสาหกรรมเกษตรส่งออก 1 ใน 15 อันดับแรกของไทย ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สินค้าอุตสาหกรรมเกษตรส่งออก 15 อันดับแรก ของไทย

1. อาหารทะเลกระป๋องและแปรรูป	9. ผักกระป๋องและผักแปรรูป
2. น้ำตาลทราย	10. ผลิตภัณฑ์ข้าว
3. ผลิตภัณฑ์ข้าวสาลี อาหารสำเร็จรูป	11. เนื้อสัตว์และของปรุงแต่ง
4. เครื่องดื่ม	12. นมและผลิตภัณฑ์นม
5. อาหารสัตว์เลี้ยง	13. หมากฝรั่งและขนมที่ไม่มีโกโก้ผสม
6. ผลไม้กระป๋องและแปรรูป	14. ไอศกรีม
7. สิ่งปรุงรสอาหาร	15. โกโก้และของปรุงแต่ง
8. ไขมันและน้ำมันจากพืชสัตว์	

ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์โดยความร่วมมือจากกรมศุลกากร (2562)

มูลค่าการส่งออกนมและผลิตภัณฑ์นมไทยไปยังตลาดนานาชาติสร้างมูลค่ากว่า 7,500 ล้านบาทต่อปี ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อมูลการส่งออกนมและผลิตภัณฑ์นมปี พ.ศ. 2560 - 2561

	2560	2561
มูลค่า (ล้านบาท)	7,506.6	7,741.6
อัตราการขยายตัว (%)	5.38	3.13

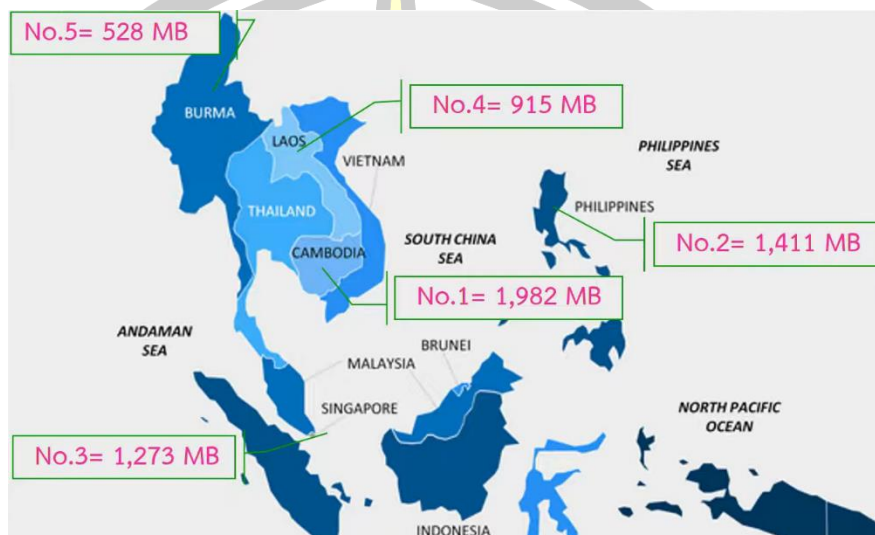
สัดส่วน คิดเป็น 0.10%

มูลค่าเฉลี่ยประมาณ 7,600 ล้านบาท

มูลค่าสินค้าอุตสาหกรรมเกษตรทั้งหมด 7,000,000 ล้านบาท

ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์โดยความร่วมมือจากกรมศุลกากร (2562)

ตลาดส่งออกนมและผลิตภัณฑ์นม 5 อันดับแรก ในปี 2561 ประกอบด้วย กัมพูชา ฟิลิปปินส์ มาเลเซีย สวา และพม่า ซึ่งมีปริมาณการส่งออกตามภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ตลาดส่งออกนมและผลิตภัณฑ์นม 5 อันดับแรก

ที่มา [<https://www.sketchbubble.com/en/powerpoint-south-east-asia-map.html>]

2.1.1.2 การนำเข้า นมและผลิตภัณฑ์นม เป็น 1 ใน 15 อันดับแรกของสินค้าอุตสาหกรรมที่นำเข้าจากต่างประเทศ ตามตารางที่ 3 คิดเป็นมูลค่าประมาณ 20,400 ล้านบาทต่อปี ตามตารางที่ 4 ตารางที่ 3 สินค้าอุตสาหกรรมนำเข้า 15 อันดับแรก ของไทย

1. เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้าน	9. ผลิตภัณฑ์อาหารอื่นๆ
2. ผลิตภัณฑ์เวชกรรมและเภสัชกรรม	10. เนื้อสัตว์สำหรับการบริโภค
3. ผัก ผลไม้และของปรุงแต่ง	11. นาฬิกาและส่วนประกอบ
4. เครื่องใช้เบ็ดเตล็ด	12. นมและผลิตภัณฑ์นม
5. สบู่ ผงซักฟอก และเครื่องสำอาง	13. รองเท้า
6. เสื้อผ้าสำเร็จรูป	14. ผลิตภัณฑ์สิ่งทออื่นๆ
7. เครื่องใช้และเครื่องตกแต่งภายในบ้าน	15. เลนส์ แว่นตาและส่วนประกอบ
8. เครื่องประดับอัญมณี	

ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์โดยความร่วมมือ
จากกรมศุลกากร (2562)

ตารางที่ 4 ข้อมูลการส่งออกนมและผลิตภัณฑ์นมปี พ.ศ. 2560 - 2561

	2560	2561
มูลค่า (ล้านบาท)	20,574.7	20,336.0
อัตราการขยายตัว (%)	25.34	-1.16

สัดส่วน คิดเป็น 0.26%

มูลค่าเฉลี่ยประมาณ 20,455 ล้านบาท

มูลค่าสินค้าอุตสาหกรรมเกษตรทั้งหมด 7,062,000 ล้านบาท

ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์โดยความร่วมมือ
จากกรมศุลกากร (2562)

เนื่องจากรัฐบาลได้มีนโยบายส่งเสริมให้มีการเลี้ยงโคนมในประเทศมากขึ้น จึงส่งผลให้มี
แนวโน้มของการเลี้ยงโคนมในแต่ละปีเพิ่มสูงขึ้น ปี 2557 - 2561 จำนวนโคนมทั้งหมดของไทยมี
แนวโน้มเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.82 ต่อปี โดยในปี 2563 (ณ วันที่ 1 มกราคม) ตามตารางที่ 5 เนื่องจากลูก
โคนมเกิดใหม่ในรอบปี และจำนวนแม่โครีดนมเฉลี่ยในรอบปีมีจำนวนเพิ่มขึ้น จากแม่โคสาวที่เข้ามา
ทดแทน ประกอบกับภาครัฐมีนโยบายพัฒนาคุณภาพน้ำนมโค เน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต โดย
เน้นไปที่อาหารในการเลี้ยงโคนมซึ่งส่งผลให้น้ำนมดิบมีปริมาณเพิ่มขึ้นและมีคุณภาพดีขึ้น รวมทั้งราคา
น้ำนมดิบอยู่ในเกณฑ์ดี จึงจูงใจให้เกษตรกรมีการพัฒนาการเลี้ยงโคนมโดยการบริหารจัดการฟาร์มที่
เป็นระบบตามมาตรฐานฟาร์มที่ดีและมีประสิทธิภาพในการเลี้ยง โดยการปลดแม่โครีดนมที่ให้ผลผลิต
น้อยและสุขภาพไม่ดีออกจากฟาร์ม พบว่าแนวโน้มของมูลค่าการส่งออกนมและผลิตภัณฑ์นมเพิ่ม
มากขึ้นทุกปี สำหรับประเทศที่มีการนำเข้านมและผลิตภัณฑ์นมจากประเทศไทยมากที่สุด ได้แก่
ฟิลิปปินส์ กัมพูชา เมียนมาร์ มาเลเซีย และสิงคโปร์ ตามลำดับ (สุพัตรา จันทร์ดาประดิษฐ์, 2548)

พูน ปณ ทิโต ชีเว

ตารางที่ 5 ปริมาณการเลี้ยงโคนมและการผลิตนํ้านมดิบของประเทศไทย ระหว่างปี พ.ศ. 2558 ถึง พ.ศ. 2563

รายการ	2558	2559	2560	2561	2562 ^{1/}	อัตราเพิ่ม (ร้อยละ)	2563 ^{2/}
โคนมทั้งหมด ณ 1 ม.ค. (ตัว)	608,094	626,193	645,305	676,415	691,349	3.39	708,901
แม่โคนม ณ 1 ม.ค. (ตัว)	267,182	288,302	285,976	297,757	305,676	3.06	313,044
ผลผลิตนํ้านมดิบ (ตัน)	1,179,338	1,214,193	1,210,584	1,254,767	1,295,348	2.23	1,371,133
อัตราการให้นมของแม่โค (กก./ตัว/วัน)	12.09	11.51	11.6	11.55	11.61	-0.77	12.00
การบริโภคนม (ตัน)	1,124,498	1,156,569	1,150,424	1,191,294	1,212,750	1.82	1,284,999

หมายเหตุ: ^{1/} ข้อมูลเบื้องต้น ^{2/} คาดคะเน

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร

2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของนํ้านมดิบ

นํ้านมดิบมีองค์ประกอบส่วนใหญ่ ได้แก่ นํ้า ไขมัน โปรตีน แลคโตส และแล็ก ตามลำดับ ส่วนสมบัติทางกายภาพของนํ้านมดิบ คือ สีนํ้านมค่อนข้างเหลือง ความหนาแน่นบอกในค่าของเทอมความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.0135 – 1.0510 มีค่าความเป็นกรด หรือ pH ประมาณ 6.3 ถึง 6.9 มีค่าความนำไฟฟ้า ประมาณ $46.1-49.2 \times 10^{-4}$ mho มีค่าแรงดึงผิว 50 ดายน์ต่อเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และมีจุดเยือกแข็งประมาณ -0.525 ถึง -0.565 องศาเซลเซียส [3]

วิธีการตรวจสอบคุณภาพนํ้านมดิบเบื้องต้น ณ จุดรับนํ้านมดิบ ก่อนส่งเข้าสู่กระบวนการแปรรูปนํ้านม เพื่อให้เป็นเกณฑ์การตัดสินและกำหนดราคารับซื้อนํ้านมดิบจากเกษตรกร [4] ประกอบด้วย

1. การตรวจโดยใช้ประสาทสัมผัส เช่น สี รส และกลิ่น
2. การวัดอุณหภูมิ ใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดโดยตรง อุณหภูมิ นํ้านมไม่ควรสูงถึง 60 ฟาเรนไฮต์ หรือสูงกว่า 18 องศาเซลเซียส
3. การตรวจความหนาแน่น (Density) โดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer)
4. ตรวจการตกตะกอนด้วยแอลกอฮอล์ (Alcohol Test) ถ้ามีจุลินทรีย์ปนเปื้อนจะทำให้เกิดสภาวะไม่คงตัวในนํ้านมหลังจากที่เติม 68% Ethanol ลงไป คือ นมจะตกตะกอน
5. Clot-On-Boiling Test (C.O.B.) เป็นวิธีที่ใช้ยืนยันผลการตรวจด้วยวิธี Alcohol Test แตกต่างกันในนํ้าร้อนแทนแอลกอฮอล์ในการทำให้เกิดตะกอน
6. Alizarin Alcohol Test เป็นวิธีที่พัฒนามาจาก Alcohol Test ซึ่งให้ผลดีกว่า เพราะดูได้ทั้งสีที่เปลี่ยนแปลงของ indicator และดูตะกอนที่เกิดขึ้นได้ด้วย

7. การตรวจวัดฝุ่นผง (Sediment Test) เป็นการวัดสิ่งเจือปนจากภายนอกที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำนม เช่น ฝุ่นผง ขน และ Cellular debris จากเต้านมที่เป็นโรคเต้านมอักเสบ โดยนำน้ำนมมากรองผ่านกระดาษกรองสีขาวแล้วสังเกตลักษณะและปริมาณของสิ่งตกค้างบนแผ่นกรอง

8. การตรวจวัดจุดเยือกแข็ง (Freezing Point) โดยทั่วไปแล้วจุดเยือกแข็งของน้ำนมมีค่าค่อนข้างคงที่เฉลี่ย -0.540 องศาเซลเซียส การลดต่ำของอุณหภูมิจุดเยือกแข็งสามารถบ่งบอกถึงการเจือปนน้ำลงในน้ำนม จุดเยือกแข็งขึ้นอยู่กับจำนวนไอออน หรือจำนวนโมเลกุลของของแข็งที่ละลายอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคลอไรด์และน้ำตาลแลคโตส

2.2 การตรวจสอบคุณภาพของน้ำนมดิบ

2.2.1 การเจือปนน้ำในน้ำนมดิบ

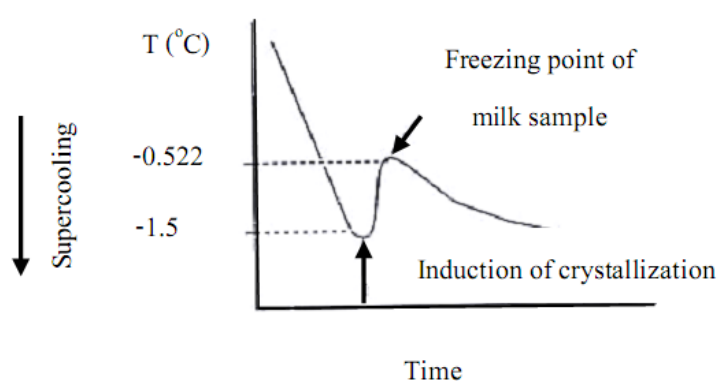
จากการตรวจสอบคุณภาพน้ำนมดิบเบื้องต้น ณ จุดรับน้ำนมดิบ พบว่าปัญหาสำคัญที่มีผลกระทบต่อคุณภาพน้ำนมดิบ คือ มีการเจือปนน้ำในน้ำนมดิบ ซึ่งมีสาเหตุมาจาก เกษตรกรผู้เลี้ยงโคนมเจตนาเติมน้ำลงในน้ำนมดิบเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำนม หรืออาจมีน้ำตกค้างในภาชนะบรรจุก่อนการบรรจุน้ำนมดิบ เป็นต้น ซึ่งปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนม มีความสัมพันธ์กับค่าความถ่วงจำเพาะ และจุดเยือกแข็งของน้ำนมดังนี้

1) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนมกับค่าความถ่วงจำเพาะ การเติมน้ำลงในน้ำนมจะทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำนมมีค่าลดลงเข้าใกล้ 1 ซึ่งเป็นค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำ ดังนั้นวิธีการวัดค่าความถ่วงจำเพาะสามารถบ่งบอกถึงการเติมน้ำในน้ำนมได้ เป็นวิธีที่มีความสะดวกรวดเร็ว ราคาถูก วิธีการไม่ยุ่งยาก นิยมใช้ในการตรวจสอบเบื้องต้น แต่มีความแม่นยำน้อย ไม่สามารถบ่งบอกถึงปริมาณน้ำในน้ำนมได้ถูกต้อง

2) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนมกับจุดเยือกแข็งของน้ำนม การเติมน้ำลงในน้ำนมจะทำให้จุดเยือกแข็งของน้ำนมมีค่าสูงขึ้นมีค่าเข้าใกล้ 0 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดเยือกแข็งของน้ำ ดังนั้นวิธีการวัดจุดเยือกแข็งของน้ำนมสามารถบ่งบอกถึงการเติมน้ำในน้ำนมได้ เป็นวิธีการที่มีความแม่นยำสูง สามารถบ่งบอกถึงปริมาณน้ำในน้ำนมได้ถูกต้อง แต่มีราคาแพงมาก

3) จุดเยือกแข็งของน้ำนมโคมีค่าอยู่ในช่วง -0.525 ถึง -0.565 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยประมาณ -0.540 องศาเซลเซียส [4] ซึ่งมีค่าต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำเพราะมีสารละลายพวกแลคโตสและคลอไรด์รวมอยู่ ส่วนสารประกอบโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีนและไขมันจะไม่ค่อยมีผลต่อจุดเยือกแข็งเท่าไรนัก โดยทั่วไปจุดเยือกแข็งของนมแกะและแพะจะต่ำกว่านมโค ในขณะที่จุดเยือกแข็งของนมกระป๋องจะมีค่าใกล้เคียงกับนมโค

4) ลักษณะการเกิดจุดเยือกแข็งของน้ำนมสามารถอธิบายได้จากภาพที่ 2 นั่นคือ ในช่วงแรกเมื่อน้ำนมถูกแช่แข็งอุณหภูมิของน้ำนมลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความร้อนถูกดึงออกไปและเมื่อใกล้ถึงอุณหภูมิของจุดเยือกแข็งอุณหภูมิของน้ำนมจะลดลงอย่างช้าๆจนกระทั่งถึงจุด Super cooling หรือที่เรียกว่า สถานะเย็นยวดยิ่ง เป็นปรากฏการณ์ที่น้ำยังคงสภาพเป็นของเหลวอยู่แม้ว่าอุณหภูมิจะอยู่ที่จุดเยือกแข็งจากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้น (เนื่องจากการปลดปล่อยความร้อนแฝง) แล้วเข้าสู่อุณหภูมิของจุดเยือกแข็งซึ่งจะค่อนข้างคงที่ ณ ช่วงเวลาหนึ่ง ลักษณะของกราฟช่วงนี้เรียกว่า Plateau หลังจากนั้นอุณหภูมิก็น่าจะลดลงอีกครั้ง [5]



ภาพที่ 2 ลักษณะการเกิดจุดเยือกแข็งของน้ำนม [6]

5) ปัจจัยที่มีผลต่อจุดเยือกแข็งของน้ำนม ได้แก่ อายุของสัตว์ สายพันธุ์ อาหาร สุขภาพ ฤดูกาลช่วงเวลาของการรีดนมโดยน้ำนมที่รีดได้ในช่วงเช้ามีจุดเยือกแข็งอยู่ในช่วง -0.566 ถึง -0.555 องศาเซลเซียส [4] ส่วนช่วงบ่ายอยู่ในช่วง -0.531 ถึง -0.526 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามแม้จะมีความแตกต่างกันบ้างในส่วนประกอบของสารละลาย จุดเยือกแข็งก็ยังคงค่อนข้างคงที่ โดยทั่วไปจึงใช้จุดเยือกแข็งเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเติมน้ำลงไปให้น้ำนม การแข็งตัวของน้ำจะเริ่มจากผิวหน้าก่อนซึ่งจะแตกต่างจากน้ำนมที่แข็งตัวในบริเวณรอบนอกทั้งหมดซึ่งเป็นน้ำและ สารละลายก่อน ส่วนธาตุน้ำนมที่เหลือส่วนใหญ่จะรวมตัวกันเป็นของเหลวอยู่ในแก่นกลางซึ่งจะต้องใช้อุณหภูมิต่ำกว่า -10 องศาเซลเซียสจึงจะทำให้แข็งได้ทั้งหมด การแข็งตัวของน้ำนมจะทำให้ส่วนประกอบของน้ำนมไม่สม่ำเสมอจะเป็นการแยกน้ำและธาตุน้ำนมออกจากกัน เมื่อปล่อยให้เย็นลงน้ำนมที่แข็งตัวละลายใหม่ก็ไม่อาจคืนสู่สภาพเดิมได้ และรสของนมจะเจือจางเหมือนน้ำ ดังนั้นจึงไม่ควรลดอุณหภูมิของน้ำนมลงจนถึงจุดเยือกแข็ง [6]

2.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจหาการเจือปนน้ำในน้ำมันดิบ

1) เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจหาจุดเยือกแข็งของน้ำมันส่วนใหญ่ เรียกว่า Cryoscope ส่วนประกอบหลักของเครื่องมือชนิดนี้ ได้แก่ อุปกรณ์ทำความเย็น อุปกรณ์วัดอุณหภูมิหรือเทอร์มิสเตอร์ และแท่งคนน้ำมันขณะแช่แข็งเพื่อช่วยให้การแช่แข็งน้ำมันรวดเร็วยิ่งขึ้น ในปี ค.ศ. 1990 Horwitz [7] ได้ออกแบบเครื่องตรวจหาจุดเยือกแข็งของน้ำมันโดยออกแบบอุปกรณ์ทำความเย็นให้มีเอทิลีนไกลคอลเป็นสารทำความเย็น และใช้ Semi-conductor resistance thermometer วัดอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำมัน และตัวอย่างน้ำมันที่จะนำมาทดสอบด้วยเครื่องมือชนิดนี้ต้องมีอุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส ต่อมาบริษัท Advance Instrument, Inc (1993) [8] พัฒนาเครื่อง Cryoscope ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เมื่อนำหลอดตัวอย่างน้ำมันใส่ลงในช่องแช่แข็งน้ำมันแล้วกดปุ่ม Start เครื่องจะทำงานแบบอัตโนมัติ มีการควบคุมอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำความเย็นให้มีอุณหภูมิกคงที่ และสามารถอ่านค่าจุดเยือกแข็งของน้ำมันได้ที่หน้าจอแสดงผล ซึ่งเครื่องมือชนิดนี้สามารถตรวจหาค่าจุดเยือกแข็งของน้ำมันได้ถึง 35 ตัวอย่างต่อชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 เครื่อง Cryoscope ของบริษัท Advance Instrument, Inc รุ่น 4D3 [8]

2) นอกจากนี้เครื่องมือตรวจหาจุดเยือกแข็งของน้ำมันที่ใช้ในเชิงการค้ายังได้มีการพัฒนา โดยบริษัท Geneq, Inc (2004) [9] นำหลักการสันสะเทือนของคลื่นอัลตราโซนิกมาใช้ในการวิเคราะห์หาจุดเยือกแข็งของน้ำมัน การวิเคราะห์จุดเยือกแข็งด้วยวิธีนี้จะคำนึงถึงองค์ประกอบอื่น ๆ ของน้ำมัน เช่น ไชมัน ของแข็งที่ไม่ใช่ไชมัน เป็นต้น เนื่องจากองค์ประกอบเหล่านี้ในน้ำมันค่อนข้างที่จะไม่คงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับอาหาร อายุ และสุขภาพของโค ข้อดีสำหรับเครื่องมือชนิดนี้ คือมีความแม่นยำสูง รวดเร็ว

(35-40 ตัวอย่างต่อชั่วโมง) แต่มีข้อเสีย คือต้องใช้ตัวอย่างในการทดสอบปริมาณมากถึง 100 มิลลิลิตร ต่อตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 เครื่อง Cryoscope ของบริษัท Geneq, Inc รุ่น Lactoscan60 [9]

3) เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจหาจุดเยือกแข็งในเชิงการค้าอีกริธีหนึ่ง คือการใช้ Fourier Transform Infrared (FTIR) ของบริษัท Foss (2004) [10] ริงสีที่ใช้อยู่ในย่าน mid-Infrared ซึ่งมีสเปกตรัม ประมาณ 3 - 10 ไมโครเมตร เครื่องมือชนิดนี้สามารถตรวจหาจุดเยือกแข็งของน้ำนมได้ 120 ตัวอย่าง ต่อชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 เครื่อง Cryoscope ของบริษัท Foss รุ่น MilkoscanFT120 [10]

2.2.3 วิธีการคำนวณเปอร์เซ็นต์การเจือปนน้ำในน้ำมันจากองค์ประกอบของน้ำมัน

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเจือปนน้ำในน้ำมัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของน้ำมันที่เป็นของแข็ง ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้ล้วนมีผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะ และจุดเยือกแข็งของน้ำมันทั้งสิ้น ดังนั้นการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเจือปนน้ำในน้ำมันจึงต้องทำการวัดองค์ประกอบต่าง ๆ ของน้ำมันด้วยเครื่องมือมาตรฐาน แล้วนำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การเจือปนน้ำในน้ำมันดังสมการต่อไปนี้ [4]

1) สมการคำนวณเปอร์เซ็นต์การเจือปนน้ำในน้ำมัน (%W) จากปริมาณของแข็งที่ไม่รวมไขมัน (Solid-not-fat, S) ในน้ำมัน

$$\%W = \frac{8.5 - S}{8.5} \times 100 \quad (2.1)$$

2) สมการคำนวณเปอร์เซ็นต์การเจือปนน้ำในน้ำมันจากเปอร์เซ็นต์ไขมัน (F) กับค่าความถ่วงจำเพาะ (G)

$$\%W = 100 - \frac{G + F}{34.5} \times 100 \quad (2.2)$$

3) สมการคำนวณเปอร์เซ็นต์การเจือปนน้ำในน้ำมันจากค่าจุดเยือกแข็งของน้ำมัน

$$\%W = \frac{0.550 - \Delta T}{0.550} \times 100 \quad (2.3)$$

หรือ

$$\%W = \frac{0.550 - \Delta T}{0.550} \times (100 - T.S.) \quad (2.4)$$

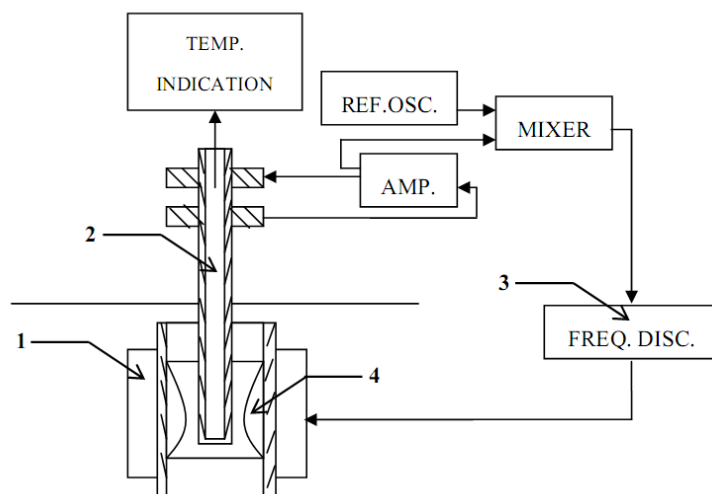
เมื่อ ΔT คือจุดเยือกแข็งของน้ำมันที่ได้จากการวัด

T.S. คือปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำมัน

2.2.4 เทคโนโลยี วิธีการ และแนวทางการพัฒนาเพื่อตรวจหาการเจือปนน้ำในน้ำมันดิบ

เทคโนโลยีและวิธีการตรวจหาการเจือปนน้ำในน้ำมันนั้นมีมาตั้งแต่อดีต และได้มีการพัฒนากันมาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน เทคนิคสำคัญที่ถูกนำมาใช้หาปริมาณน้ำที่เจือปนลงในน้ำมัน คือ การหาจุดเยือกแข็งของน้ำมัน ซึ่งในยุคเริ่มต้นได้ทำการตรวจวัดอุณหภูมิของจุดเยือกแข็งเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ปัจจุบันได้มีการหาจุดเยือกแข็งของน้ำมันร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ อีก เช่น อัลตราโซนิก อินฟราเรด เป็นต้น เพื่อให้ได้เครื่องมือที่มีความสะดวก รวดเร็ว มีความถูกต้อง และแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ดังเช่นในปี 1976 Johnston ได้ออกแบบเครื่องมือเพื่อหาจุดเยือกแข็งของของเหลว โดยใช้แผ่น Peltier cooling cells เป็นอุปกรณ์ทำความเย็น ใช้ Resistance thermometer เป็นตัววัดอุณหภูมิ และมีอุปกรณ์สร้างความถี่เพื่อตรวจจับการเติบโตของผลึกของของเหลว เมื่อผลึกของของเหลวก่อตัวเข้าใกล้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ สำหรับการเปลี่ยนแปลงความถี่นี้จะนำมาใช้ควบคุมการทำความเย็น ซึ่งสามารถหาจุดเยือกแข็งของของเหลวได้อย่างแม่นยำ ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องมือวัดจุดเยือกแข็งของของเหลว

หมายเหตุ

- 1) แผ่น Peltier cooling cells เป็นอุปกรณ์ทำความเย็น
- 2) Resistance thermometer เป็นตัววัดอุณหภูมิ
- 3) Frequency discriminator เป็นอุปกรณ์แยกความถี่
- 4) ผลึกน้ำแข็ง

เพื่อออกแบบเครื่องมือเพื่อหาจุดเยือกแข็งของของเหลว นักวิทยาศาสตร์หรือวิศวกรจะใช้ อุปกรณ์ Thermo-electric ที่มีสองเซนเซอร์หรือตัวตรวจวัดอุณหภูมิ จุดหนึ่งจะตั้งอยู่ในสารหลักที่ต้องการวัดอุณหภูมิ และจุดอีกตัวหนึ่งจะตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นอ้างอิง ซึ่งอาจเป็นสภาพแวดล้อมที่ทราบอุณหภูมิอย่างแน่นอนเช่น น้ำแข็งหรือสารที่มีจุดเยือกแข็งที่ทราบไว้ หรือเป็นอุปกรณ์เช่น สารสีเทอร์โมโครมิก (thermochromic materials) ที่มีการเปลี่ยนสีขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

โดยทั่วไปแล้ว หลักการทำงานของเครื่องมือเพื่อหาจุดเยือกแข็งของของเหลวโดยใช้อุปกรณ์ Thermo-electric จะพึ่งไปที่การวัดและเทียบกับค่าที่รู้จักอย่างแน่นอน เช่น การวัดอุณหภูมิที่ทราบว่าจะเกิดจากสารแข็ง โดยใช้อุปกรณ์ Thermo-electric เพื่อระบุค่าอุณหภูมิของของเหลวที่ต้องการหาจุดเยือกแข็ง อาจใช้วิธีการประมวลผลต่าง ๆ เช่นการวัดความเย็นหรือความร้อนของเส้นทางไฟฟ้าในวัสดุ Thermo-electric และคำนวณค่าอุณหภูมิโดยใช้สมการหรือสูตรที่เกี่ยวข้องกับเอฟเฟกต์เทอร์

โมอิลีกทริกที่ใช้ในวัสดุนั้น การหาจุดเยือกแข็งของของเหลวทำได้โดยหาค่าอุณหภูมิที่ความเย็นหรือความร้อนเท่ากันระหว่างสองจุด ซึ่งแสดงถึงจุดที่ของเหลวกำลังเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งหรือจุดที่ของแข็งกำลังเปลี่ยนสถานะกลับเป็นของเหลว

ต่อมาได้มีการพัฒนาวิธีการวัดจุดเยือกแข็งของของเหลวโดยอาศัยเทคนิคการใช้คลื่นอัลตราโซนิก สำหรับผู้ที่ได้ทำการวิจัยโดยนำหลักการอัลตราโซนิกมาใช้ ได้แก่ Takatoshi (1980) [11] ซึ่งเป็นผู้ออกแบบเครื่องมือและวิธีการวัดจุดเยือกแข็งของของเหลว โดยใช้คลื่นสั้นสะท้อนอัลตราโซนิกส่องผ่านของเหลวที่ถูกลดอุณหภูมิลงจนแข็งด้วยแผ่นทำความเย็น (Cooling plate) สัญญาณจากอุปกรณ์รับคลื่นสั้นสะท้อนอัลตราโซนิกเข้าสู่ไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณจุดเยือกแข็งของของเหลว และต่อมา S. Mohanan et al. (2002) [12] ได้ออกแบบเครื่องมือวิเคราะห์หาจุดเยือกแข็ง ค่าความหนาแน่น และปริมาณขององค์ประกอบในน้ำมัน เช่น ไชมัน โปรตีน โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกชนิด ความถี่ที่กับน้ำมันที่ถูกควบคุมอุณหภูมิในช่วง 15-40 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังได้มีการนำหลักการของคลื่นอินฟราเรดมาใช้อีกด้วย ดังในงานวิจัยของ Lucas de Souza Ribeiro et al. (2016) [13] ทำการออกแบบเครื่องมือและวิธีการประมาณการเจือปนของน้ำในน้ำมันและจุดเยือกแข็งของน้ำมัน โดยใช้คลื่นอินฟราเรด (Infrared) ส่องผ่าน พร้อมทั้งวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันดิบและน้ำมันที่มีการเติมน้ำในปริมาณที่แน่นอน พบว่าสามารถประมาณปริมาณน้ำที่เติมในน้ำมันได้และหาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficients) ที่ได้มาจากวิธี Multivariate calibration เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของคลื่นอินฟราเรดกับปริมาณน้ำที่เติมลงในน้ำมัน ซึ่งเป็นการสอบเทียบกับข้อมูลจุดเยือกแข็งของน้ำมันที่ได้จากเครื่อง Cryoscope รุ่น CII ของบริษัท Advanced Instruments [8]

เนื่องจากเทคโนโลยีและวิธีการหาจุดเยือกแข็งนั้นมีความหลากหลาย อีกทั้งยังมีการนำหลักการต่างๆมาใช้ ดังนั้นจึงได้มีการมุ่งเน้นที่จะพัฒนาอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดจุดเยือกแข็งของสารละลายต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตรวจวัดจุดเยือกแข็งของน้ำมันดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น นอกจากนี้จะคำนึงถึงการออกแบบและประดิษฐ์เครื่องมือในการตรวจวัดจุดเยือกแข็งของน้ำมันแล้ว อิทธิพลขององค์ประกอบต่างๆในน้ำมันที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงจุดเยือกแข็งของน้ำมันนั้นก็ปัจจัยที่สำคัญที่ต้องให้ความสำคัญเช่นกัน การใช้วิธี Leighton ซึ่งเป็นวิธีประมาณค่าเพื่อทำนายจุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์นม รวมทั้งไอศกรีม โดยสมมติให้น้ำตาลและชีร์มเท่านั้นที่มีอิทธิพลต่อจุดเยือกแข็ง สามารถหาจุดเยือกแข็งได้จากสมการที่ 5

$$t_i = \zeta r_i [A + \zeta r_i (B + C \zeta r_i)] \quad (2.5)$$

เมื่อ ζ เป็น mass fraction ณ ตำแหน่งที่ i ในสมการ

A, B, C เป็น empirical coefficients

t_i เป็น จุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์นม

s_i เป็น องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์นม คือ น้ำตาล หรือซีรัม

ในกรณีที่ซีรัมมีเปอร์เซ็นต์ mass fraction อยู่ระหว่าง 0-48 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่า A, B, C เป็น -6.52370 2.04349 และ -33.6760 กรณีที่ซีรัมมีเปอร์เซ็นต์ mass fraction อยู่ระหว่าง 0-33 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่า A B และ C เป็น -5.38392 -10.9964 และ -1.84488 ตามลำดับ อิทธิพลของการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อจุดเยือกแข็งของน้ำนม พบว่าจุดเยือกแข็งของน้ำนมลดลงเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำนมมากขึ้น เนื่องจากจำนวนอิมันและความเข้มข้นของตัวถูกละลาย ซึ่งประกอบด้วย H_2CO_3 , H^+ , HCO^- และ CO_3^{2-} นั้นมีผลต่อความสมดุลของระบบเกลือของน้ำนมเป็นผลให้จุดเยือกแข็งของน้ำนมลดลง ซึ่งได้ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง ดังสมการที่ 6 โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.983

$$Y = -0.5434 - 0.0000510X \quad (2.6)$$

เมื่อ Y เป็นจุดเยือกแข็งของน้ำนม

X เป็นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์

และต่อมาในปี 2003 Ma and Barbano ได้ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นโปรตีน และชนิดของโปรตีนได้แก่ เคซีน และซีรัมโปรตีน ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลง pH และจุดเยือกแข็งของ skim milk โดยมีการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปในนม ณ อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส พบว่า นมที่มีส่วนประกอบของเคซีนในปริมาณมาก และนมที่มีความเข้มข้นของโปรตีนสูง จะช่วยเพิ่มความต้านทานในการเปลี่ยนแปลง pH และจุดเยือกแข็งของนมได้เป็นอย่างดี

2.2.5 วิธีการวัดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำนมดิบ

ความถ่วงจำเพาะเป็นคุณสมบัติทางกายภาพอย่างหนึ่งของน้ำนม ซึ่งคุณสมบัตินี้นิยมนำมาเป็นเกณฑ์ในการตรวจสอบคุณภาพเบื้องต้น เพื่อตรวจสอบน้ำนมที่อยู่ในข่ายสงสัยว่าจะมีการเจือปนน้ำ เนื่องจากการเจือปนน้ำลงในน้ำมนั้นจะทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำนมลดลง สำหรับวิธีการหาความถ่วงจำเพาะของน้ำนมมีหลายวิธีด้วยกัน [14] เช่น

1) การหาความถ่วงจำเพาะของน้ำนมใช้ขวดหาความถ่วงจำเพาะ เป็นวิธีการอย่างง่ายโดยการคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักน้ำนมต่อน้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน แต่วิธีการนี้มีความคลาดเคลื่อนสูงจึงไม่เป็นที่นิยม

2) การหาความถ่วงจำเพาะของน้ำนมโดยใช้แลคโตมิเตอร์ ปัจจุบันวิธีการนี้ยังเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและในระดับโรงงานอุตสาหกรรมนม เนื่องจากมีราคาถูกและมีความสะดวกในการตรวจสอบ แต่มีข้อเสียคือเกิดความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่า แลคโตมิเตอร์เป็นไฮโดรมิเตอร์ที่ทำไว้เพื่อหาความถ่วงจำเพาะของน้ำนมโดยเฉพาะ ก้านของกระเปาะแลคโตมิเตอร์แบ่งออกเป็น 0 ถึง 40 ซึ่งเท่ากับความถ่วงจำเพาะ 1.000 ถึง 1.040 ซึ่งความเที่ยงตรงของค่าความถ่วงจำเพาะที่อ่านได้นั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิขณะที่อ่านค่า แลคโตมิเตอร์ที่ใช้หาความถ่วงจำเพาะของน้ำนมมีสองแบบ แบบควีเวนแลคโตมิเตอร์ (Quevene lactometer) ซึ่งใช้กับนมที่อุณหภูมิ 15.5 องศาเซลเซียส (60 องศาฟาเรนไฮต์) และแบบวัตสันแลคโตมิเตอร์ (Watson lactometer) ซึ่งใช้ที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส (102 องศาฟาเรนไฮต์) ควีเวนแลคโตมิเตอร์จะมีขีดแบ่งตั้งแต่ 15 ถึง 40 ซึ่งเทียบเท่ากับความถ่วงจำเพาะ 1.015 ถึง 1.040 สำหรับวัตสันแลคโตมิเตอร์จะมีขีดแบ่งตั้งแต่ 26 ถึง 37 โดยแบบแรกจะนิยมใช้หาความถ่วงจำเพาะของมากกว่าแบบที่สอง [14]

3) การหาความถ่วงจำเพาะโดยใช้เครื่องชั่งแบบเวสพาล เป็นวิธีการหาค่าความถ่วงจำเพาะที่มีความยุ่งยากไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากต้องทำการปรับสมดุลของลูกตุ้มที่แขวนอยู่บนคาน ในขณะที่ลูกตุ้มจุ่มอยู่ในกระบอกตวงที่บรรจุน้ำนม ให้อยู่ในตำแหน่งที่สมดุล

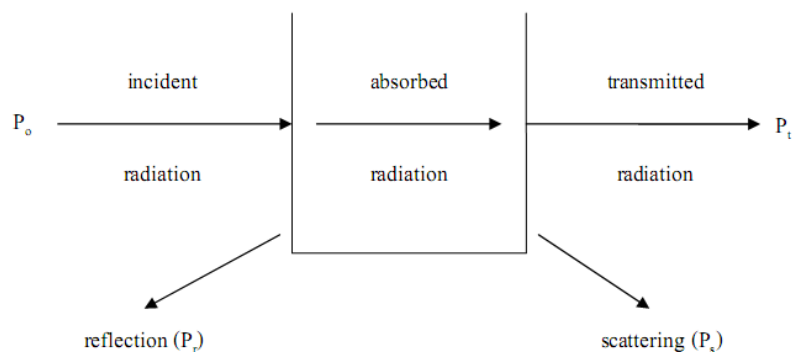
4) การหาความถ่วงจำเพาะของน้ำนมโดยใช้เครื่องชั่งอย่างละเอียด

5) การหาความถ่วงจำเพาะโดยใช้เม็ดพลาสติก วิธีการนี้ทำได้โดยการนำเม็ดพลาสติกที่ทราบความถ่วงจำเพาะใส่ลงไปในน้ำนม สังเกตเม็ดที่ลอยที่บอกตักที่สูงที่สุดคือความถ่วงจำเพาะของน้ำนม

2.2.6 หลักการและวิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสง

วิธีวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณโดยใช้สมบัติการดูดกลืนแสงหรือรังสีที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190-800 นาโนเมตร ของสารเคมีทั้งที่มีสีและไม่มีสี นิยมเรียกว่า สเปกโทรโฟโตเมตรี แต่ถ้าสารที่ทำการวิเคราะห์มีสีหรือทำให้เกิดสีขึ้น สารที่มีสีนั้นจะดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิล อาจเรียกว่า คัลเลอร์เมตรี

เมื่อให้ลำแสงที่เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องกัน (Continuous beam of radiation) ผ่านเข้าไปในวัตถุใส จะพบว่าแสงบางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนเกิดการสะท้อน บางส่วนกระเจิง และบางส่วนผ่านทะลุออกไป ถ้าให้แสงที่ทะลุออกไปนั้นผ่านเข้าเครื่องกระจายแสง เช่น ปริซึม หรือเกรตติง จะเห็นว่าสเปกตรัมหายไปส่วนหนึ่ง ส่วนที่หายไปนี้เรียกว่า absorption spectrum พลังงานที่ถูกดูดกลืนไปนั้นจะทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับของพลังงานจากสถานะพื้น (ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) [15] ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงอันตรกิริยาของสารเคมีกับการแผ่รังสีหรือแสง [15]

สมการการหาค่าการดูดกลืนแสงโดยกฎของเบียร์มีดังนี้

$$A = \epsilon bc = \log \frac{P_0}{P} \quad (7)$$

หรือ

$$-\log T = \epsilon bc \quad (8)$$

โดยที่ A = แอ็บซอร์เบ้นซ์ (absorbance)

ϵ = โมลาร์แอ็บซอร์ปติวิตี (molar absorptivity)

b = ความกว้างของเซลล์ เป็นเซนติเมตร

c = ความเข้มข้น เป็นโมลต่อลิตร

T = ปริมาณการส่องผ่านของแสง (Transmittance)

P_0 = ความเข้มของรังสีก่อนผ่านสารตัวอย่าง

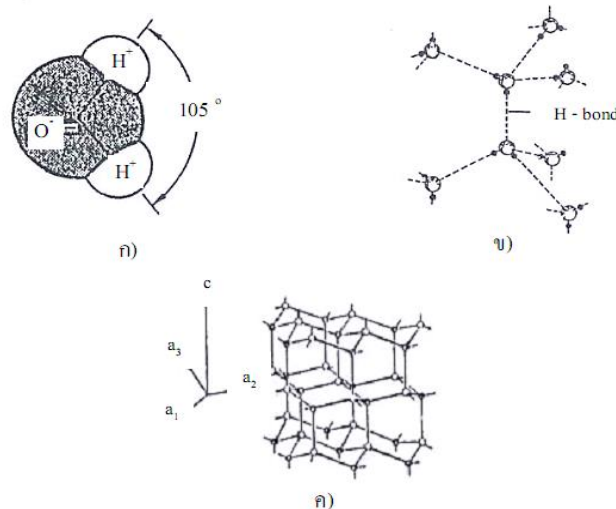
P = ความเข้มของรังสีหลังผ่านสารตัวอย่าง

ทั้ง ϵ และ a เป็นค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารและความยาวคลื่น

2.2.7 โครงสร้างโมเลกุลของน้ำและผลึกน้ำแข็ง

โครงสร้างโมเลกุลของน้ำประกอบด้วยไฮโดรเจนอะตอมและออกซิเจนอะตอมจับกันด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งมีแรงดึงดูดกันสูง โดยแขนทั้งสองจะทำมุมประมาณ 105 องศา โครงสร้างนี้จะทำให้ออกซิเจนมีประจุเด่นลบเล็กน้อยส่วนไฮโดรเจนอะตอมจะเด่นบวกเล็กน้อย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดแรงดึงดูดขึ้นกับโมเลกุลน้ำที่อยู่ใกล้ๆกันได้อีกด้วยพันธะไฮโดรเจนเรียงตัวอยู่ในแบบที่เรียกว่า

โครงสร้างทรงแปดหน้า (tetrahedral structure) พันธะไฮโดรเจนจะมีแรงดึงดูดค่อนข้างต่ำ อาจจะเกาะเกี่ยวกันได้และแยกออกได้ง่ายมาก น้ำที่อยู่ในสภาวะเป็นของเหลวจะมีการเกิดพันธะไฮโดรเจนและสลายตัวแล้วจับกันใหม่อยู่ตลอดเวลา ถ้าน้ำได้รับความร้อนจะเป็นผลทำให้พันธะไฮโดรเจนสลายตัวมาจับกัน เมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นจนกลายเป็นไอ สภาวะเช่นนี้จะไม่มีการเกิดพันธะไฮโดรเจนได้เลย โดยโมเลกุลน้ำจะแยกออกเป็นหน่วยย่อย ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำถูกทำให้เย็นลง โมเลกุลของน้ำจะเพิ่มการเกาะตัวกันโดยพันธะไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ทำให้โครงสร้างที่เป็นทรงแปดหน้านั้นมารวมตัวกันต่อเนื่องออกไปอีกเกิดเป็นชั้นในรูปของ hexagonal ซึ่งจัดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้นเรียกว่าแลตทิซผลึก (crystal lattice) ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 โครงสร้างโมเลกุลของน้ำและผลึกน้ำแข็ง

โดยภาพ ก) โครงสร้างโมเลกุลของน้ำแสดงพันธะโคเวเลนต์ระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจน

ภาพ ข) โครงสร้างการจับตัวของโมเลกุลน้ำด้วยพันธะไฮโดรเจนในรูป Tetrahedral และ

ภาพ ค) โครงสร้างผลึกของน้ำแข็งในรูป Hexagonal

[สายสนม (2543)]

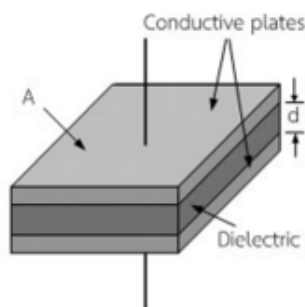
จากการตรวจเอกสารพบว่าวิธีการตรวจหาการเจือปนน้ำในน้ำมันสามารถจำแนกได้ 2 วิธีคือการตรวจหาการเจือปนน้ำในน้ำมันจากค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมัน เป็นวิธีที่สะดวก และมีราคาถูก แต่มีความแม่นยำน้อย เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของน้ำมันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่เป็นของแข็งใน

น้ำนม ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีปริมาณที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อายุ อาหาร สายพันธุ์ และสุขภาพของโค เป็นต้น การตรวจหาการเจือปนน้ำในน้ำนมอีกวิธีหนึ่งคือ การตรวจหาการเจือปนน้ำในน้ำนมจากจุดเยือกแข็งของน้ำนม เป็นวิธีที่มีความแม่นยำสูง เนื่องจากจุดเยือกแข็งของน้ำนมค่อนข้างคงที่ แต่เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดมีราคาแพง งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาการตรวจหาการเจือปนน้ำในน้ำนมดิบโดยอาศัยหลักการแช่แข็งน้ำนมพร้อมกับทดสอบแรงกด ณ อุณหภูมิแช่แข็งโดยอาศัยสมมติฐานที่ว่า การจัดเรียงตัวของน้ำที่เจือปนในน้ำมนั้นมีความแตกต่างกันกับการจัดเรียงตัวของน้ำนมที่ไม่มีการเจือปนน้ำ นอกจากนี้ยังอาศัยหลักการดูคลื่นแสงโดยอ้างอิงจากทฤษฎีของเปียร์ที่กล่าวว่าค่าการดูคลื่นแสงแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย ดังนั้นน้ำนมที่มีการเจือปนน้ำย่อมมีค่าการดูคลื่นแสงแตกต่างไปจากน้ำนมที่ไม่มีการเจือปนน้ำ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดน้ำนมแช่แข็งกับค่าของการดูคลื่นแสงที่มีต่อเปอร์เซ็นต์น้ำที่เพิ่มขึ้นในน้ำนม ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถประมาณเปอร์เซ็นต์การเจือปนน้ำในน้ำนมดิบได้

2.3 คุณสมบัติของค่าการเก็บประจุทางไฟฟ้า

2.3.1 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

ตัวเก็บประจุ เป็นส่วนประกอบวงจร ที่สามารถสะสมพลังงานในรูปแบบสนามไฟฟ้าได้ และเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ตัวเก็บประจุทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า (Charge) และคายประจุไฟฟ้า (Discharge) ตัวเก็บประจุเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า คอนเดนเซอร์ (Condenser) หรือเรียกว่าตัวซี (C) หน่วยของตัวเก็บประจุคือ ฟาราด (Farad) คอนเดนเซอร์จะทำงานเป็นเก็บประจุไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าไว้ในตัวได้โดยอาศัยความสามารถในการประจุไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่วาคักย์ไฟฟ้าต่างกันและดูดกัน เมื่อนำแผ่นโลหะบางสองแผ่นวางใกล้กัน พร้อมจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้แผ่นโลหะทั้งสองต่างศักย์กัน เกิดแรงดันไฟฟ้าทั้งสองแผ่นโลหะดึงดูดกัน การดึงดูดของศักย์ไฟฟ้าจากแผ่นโลหะทั้งสองแผ่นยังคงมีต่อเนื่องถึงแม้จะจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้แผ่นโลหะทั้งสองแผ่น เรียกแผ่นโลหะทั้งสองแผ่นที่อยู่ใกล้กันนี้ว่าคาปาซิเตอร์ แผ่นโลหะอาจเรียกว่าแผ่นตัวนำ (Conductive plate) วางขนานชิดกันมีฉนวนไฟฟ้าเรียกว่า ไดอิเล็กทริก (Dielectric) ซึ่งทำด้วยฉนวนไฟฟ้า เช่น กระดาษไมก้า เซรามิกหรืออากาศ วางคั่นกลางแผ่นโลหะทั้งสองแผ่น แผ่นโลหะทั้งสองมีลวดตัวนำติดไว้แผ่นละเส้น ใช้เป็นขั้วต่อใช้งาน คาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญและพบได้ทุกวงจร เช่น วงจรกรองกระแส (Filter) วงจรให้ผ่านสัญญาณ (By-pass filter) วงจรสตาร์ทเตอร์ (Starter) วงจรถ่ายทอดสัญญาณ (Coupling) เป็นต้น คาปาซิเตอร์เรียกตามสารที่ใช้ทำแผ่นไดอิเล็กทริก เช่น ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกมีแผ่นไดอิเล็กทริกเป็นเซรามิก เป็นต้น ซึ่งมีโครงสร้างตามภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ตัวเก็บประจุแผ่นเพลตแบบขนาน [16]

จากภาพที่ 9 เมื่อขนาดของประจุไฟฟ้าบนแผ่นประจุไฟฟ้าแต่ละแผ่น (Coulombs, q) แปรผันตรงกับ ขนาดของความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง (Volts, V) ดังนั้นความจุทางไฟฟ้า C มีค่าเท่ากับ

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

เมื่อ Q คือ ขนาดของประจุไฟฟ้าบนแผ่นประจุไฟฟ้าแต่ละแผ่น (Coulombs, q)

V คือ ขนาดของความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง (Volts, V)

ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์สองขั้วซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเป็นดังนี้

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

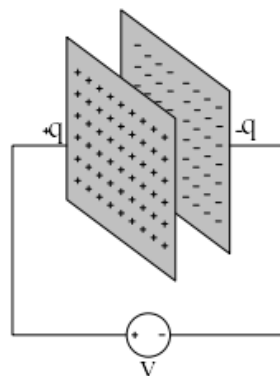
โดยที่ i คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

V คือ แรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุ

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

2.3.2 ความจุไฟฟ้า (capacitance; C)

ความจุไฟฟ้า เป็นค่าที่บอกความสามารถในการเก็บประจุของตัวเก็บประจุ ปริมาณของประจุ แปรผันตามแรงดันไฟฟ้า (V) และแปรผันตามพื้นที่ของแผ่นโลหะตัวนำที่ขนานกัน (A) โดยแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำที่ขนานกัน (d) ในกรณีที่เป็นช่องว่างอากาศ (ϵ_0) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} Farads/meter ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 โครงสร้างทั่วไปตัวเก็บประจุ[16]

การเก็บประจุ คือ การที่เก็บอิเล็กตรอนที่แผ่นตัวนำของตัวเก็บประจุ โดยเมื่อต่อแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุอิเล็กตรอนจากขั้วลบของแบตเตอรี่ อิเล็กตรอนจะเข้าไปรวมกันที่พื้นผิวตัวเก็บประจุทำให้เกิดประจุลบและสร้างสนามไฟฟ้าผลักอิเล็กตรอนออกจากพื้นผิวตัวเก็บประจุ แผ่นตัวนำและแผ่นเหล็กขั้วเหมือนกันจะมาใกล้กันและผลักกัน โดยปกติแผ่นตัวนำจะมีประจุบวกและลบปะปนกันอยู่เมื่ออิเล็กตรอนจากแผ่นตัวนำถูกผลักออกจนหลุดออก เหลือประจุบวกมากกว่าลบ ยิ่งอิเล็กตรอนถูกผลักออกมากเท่าไร แผ่นตัวนำนั้นจะเป็นบวกมากขึ้นเท่านั้น การคายประจุเกิดขึ้นเมื่อไม่นำขั้วตัวเก็บประจุมาต่อกัน อิเล็กตรอนยังคงอยู่ที่แผ่นตัวนำ ถ้าครบวงจรระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง อิเล็กตรอนจะวิ่งจากแผ่นตัวนำทางด้านลบไปครบวงจรที่แผ่นตัวนำบวก นั้นเรียกว่า "การคายประจุ"

2.3.3 ปัจจัยที่มีต่อการเก็บประจุ

ปัจจัยที่มีต่อการเก็บประจุ คือค่าความจุตัวเก็บประจุมีค่าน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ตัวแปร คือ

- 1) พื้นที่หน้าตัดสารตัวนำที่เป็นแผ่นเพลต แทนด้วย A ถ้าพื้นที่หน้าตัดมากสามารถเก็บประจุได้มาก ถ้าพื้นที่หน้าตัดน้อยจะเก็บประจุได้น้อย จะเห็นว่าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปนั้นประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุจำนวนมาก ตัวเก็บประจุที่ขนาดใหญ่จะเก็บประจุได้มากเพราะพื้นที่หน้าตัดมาก
- 2) ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตทั้งสอง แทนด้วย d ถ้าในตำแหน่งที่ใกล้กัน ความจุมีค่ามาก ถ้าในตำแหน่งที่ไกลกันความจุมีค่าน้อย
- 3) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ ϵ ค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการที่จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้น เมื่อนำวัสดุต่างชนิดกันมาทำเป็นฉนวนกัน

ระหว่างแผ่นเพลต ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแต่ละตัวจะแตกต่างกัน ตัวเก็บประจุใช้ไดอิเล็กทริกต่างกัน ถึงแม้จะมีขนาดเท่ากัน ค่าความจุและอัตราหนาแน่นอาจแตกต่างกัน

ในกรณีที่เป็นไดอิเล็กทริก (ϵ) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ดังสมการ 2.4

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

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

ϵ คือ ค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุ

A คือ พื้นที่ของแผ่นโลหะตัวนำ (m^2)

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (m)

ไดอิเล็กทริก คือ เป็นสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัสดุ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความมีขั้ว (polarity) ของวัสดุที่อุณหภูมิต่างๆ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอาหาร มีความสำคัญกับการออกแบบเครื่องจักรอุปกรณ์แปรรูปอาหาร กระบวนการแปรรูปอาหาร เช่น การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

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

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำ คือ น้ำในสถานะของเหลว โมเลกุลของน้ำ เป็นโมเลกุลที่มีขั้วโดยอะตอมของออกซิเจนมีขั้วเป็นลบเล็กน้อย และอะตอมของไฮโดรเจนมีขั้วเป็นบวกเล็กน้อย ทำให้น้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง จัดเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 78.5 และน้ำในสถานะของแข็ง เมื่อน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง เนื่องจากโมเลกุลยึดจับกับน้ำที่อยู่รอบด้วยพันธะไฮโดรเจน ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำแข็งมีค่าเท่ากับ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความมีขั้วกับค่า dielectric constant ของตัวทำละลายดังตารางที่ 6 [17]

พูน ปณ ทิโต ชีเว

ตารางที่ 6 ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (K) ของวัสดุ

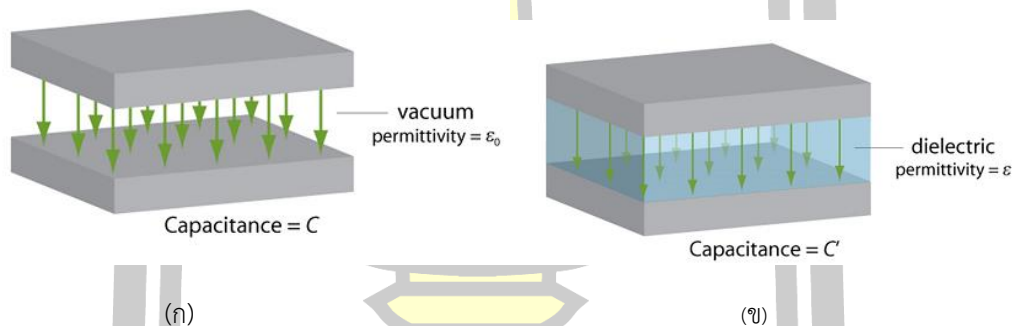
Material	Dielectric Constant	Dielectric Constant , $K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$
Vacuum		1
Air (1 atm)		1.00054
Air (100 atm)		1.0548
Glycerol		42.5
Methanol		32.6
1% Milk**		70.56
3.25% Milk**		67.98
Bakelite (Typical)		4.9
Mylar (Typical)		3.5
Ethanol		24.3
Acetone		20.7
Paper (Typical)		3.5
Porcelain (Typical)		7
Teflon (Typical)		2.04
Isopropyl alcohol		18.3
Benzyl alcohol		13.1
Mineral Oil (Typical)		4.5
Sorbitol solution (70%w/w)		62.0
Syrup USP		56.0

Water	78.5
-------	------

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

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

การทดสอบค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุใด ทำโดยนำวัสดุนั้นไปวางไว้ในสนามไฟฟ้า กระแสสลับวัสดุใดมีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสูงจะกักเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มาก ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ของวัสดุต่อค่าความจุไฟฟ้าของสุญญากาศ (ไม่มีหน่วย) การทดสอบค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 (ก) ไดอิเล็กทริกแบบอากาศว่าง (ข) ไดอิเล็กทริกแบบไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลาง
ที่มา http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dielectrics/dielectric_constant.php [18]

พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุคือพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุจะเก็บอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้า โดยมีสมการดังนี้

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

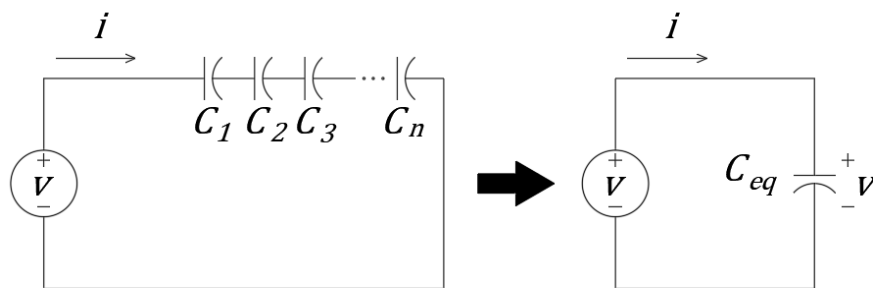
ตัวเก็บประจุในอุดมคติจะดูดกลืนหรือใช้พลังงานไม่ได้ ซึ่งต่างกับตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุได้แต่เก็บพลังงานไว้และสามารถจ่ายพลังงานนั้นออกมาได้ภายหลัง ตัวอย่างเช่น ตัวเก็บประจุ 1 F มีแรงดันคร่อมอยู่ 10 V ดังนั้นพลังงานสะสมจะเป็น

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

ถ้าตัวเก็บประจุที่มีพลังงานสะสมอยู่แล้ว ไม่ได้ต่อกับวงจรหรืออุปกรณ์อื่นๆ เลย กระแสจะไหลไม่ได้ ทำให้ ประจุ แรงแดัน และพลังงาน ยังคงค้างอยู่ในตัวเก็บประจุเท่าเดิม ถ้าเรานำตัวเก็บประจุนี้มาต่อเข้ากับตัวต้านทานเป็นวงจร กระแสก็สามารถไหลได้ จนกระทั่งพลังงานสะสมถูกดูดกลืนกลายเป็นความร้อนที่ตัวต้านทานจนหมดและแรงดันที่คร่อมอุปกรณ์ทั้งสองก็จะกลายเป็นศูนย์

ตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมหรือขนานกันนั้นสามารถถูกแทนได้ด้วยตัวเก็บประจุสมมูลตัวหนึ่ง โดยค่าความเก็บประจุของมันสามารถหาได้ดังนี้ กรณีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกันดัง ภาพที่ 12 เราสามารถเขียนแทนได้ด้วยตัวเก็บประจุสมมูล โดยที่หาค่าความเก็บสมมูลได้จากสมการ

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



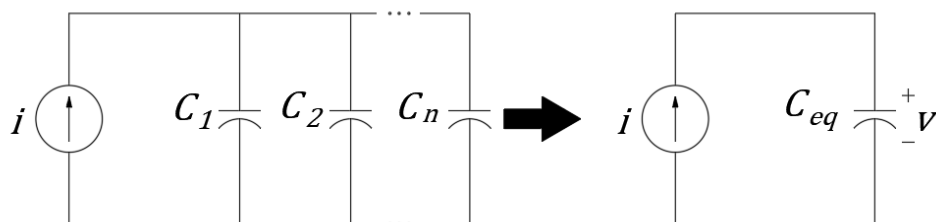
ภาพที่ 12 ตัวเก็บประจุต่ออนุกรม และตัวเก็บประจุสมมูล

จะเห็นว่า การรวมค่าความจุที่ต่ออนุกรมกันจะเหมือนกับการรวมค่าความต้านทานที่ต่อขนานกัน ดังนั้นในกรณีรวมค่าความเก็บประจุสองตัวจะเป็น

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

สำหรับการรวมค่าความจุที่ต่อขนานกันดังภาพที่ 13 เพื่อจะได้ความเก็บประจุสมมูลใน

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

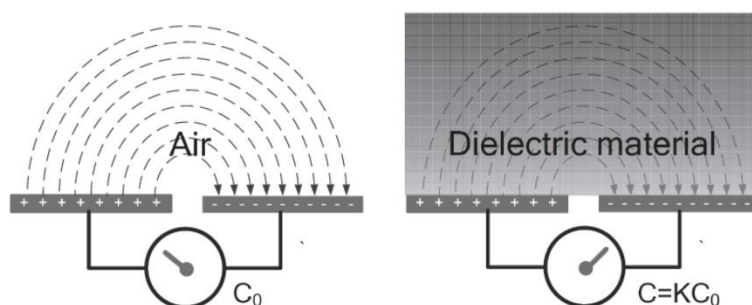


ภาพที่ 13 ตัวเก็บประจุต่อขนาน และตัวเก็บประจุสมมูล

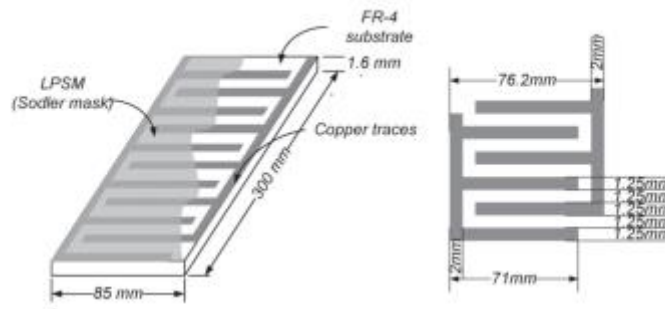
2.4 ตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล

อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แบบระนาบ (Planar Interdigital Capacitor Level Sensor; IDC) เป็นเซนเซอร์หรือตัวตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าอีกรูปแบบหนึ่งที่ใช้การวางแผ่นตัวนำในแนวระนาบ แทนการวางแบบขนาน โดยการวางสลับกันระหว่างซีทีเป็นขั้วบวกและซีทีที่เป็นขั้วลบคล้ายกับการนำคาปาซิเตอร์มาต่อขนาน ทำให้มีค่าความจุไฟฟ้าเกิดขึ้น และโครงสร้างเป็นชั้นเดียวจึงสามารถผลิตโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีทั่วไปได้ เมื่อนำวัสดุไดอิเล็กทริกไปวางไว้ในสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแผ่นตัวนำซึ่งมีประจุไฟฟ้าต่างกัน ผลที่เกิดขึ้นคือค่าความจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำจะเพิ่มขึ้นตามคุณสมบัติของวัสดุที่นำไปวาง ซึ่งวัสดุที่ต่างกันจะมีค่าไดอิเล็กทริกแตกต่างกันด้วย การนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือวัดที่เกี่ยวข้องกับการวัดคุณสมบัติของวัสดุ เช่น การวัดสารพิษในอาหาร ทะเล่ด้วยการวัดปริมาณไขมันในเนื้อสัตว์ การวัดความชื้นในคอนกรีต หรือการวัดเพื่อจำแนกชนิดของวัสดุ เป็นต้น

ชิตินันท์ ตะเกาน้อย ในปี 2010 [19] ได้ทำการออกแบบและพัฒนาตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล (Interdigital Electrode Capacitor) เป็นตัวรับรู้ค่าคาปาซิแตนซ์ อีกรูปแบบหนึ่ง ที่ใช้การวางแผ่นตัวนำในแนวระนาบแทนการวางแบบขนาน โดยวางสลับกันระหว่าง ซีทีเป็นขั้วบวกกับซีทีที่เป็นขั้วลบ คล้ายกับการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกัน ทำให้มีค่าคาปาซิแตนซ์เพิ่มมากขึ้น สามารถต่อการวัดค่าคาปาซิแตนซ์และด้วยโครงสร้างเป็นชั้นเดียว จึงสามารถผลิตโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีอยู่ทั่วไปได้ เมื่อนำวัสดุไดอิเล็กทริกไปวางไว้ในสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแผ่นตัวนำ มีประจุไฟฟ้าต่างกันดัง ภาพที่ 15 และภาพที่ 16 ผลที่เกิดขึ้นคือค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างแผ่นตัวนำจะเพิ่มขึ้นตามคุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กทริกที่นำไปวางวัสดุที่ต่างกัน จะมีค่าไดอิเล็กทริกแตกต่างกันด้วย เราจึงนำหลักการนี้ ไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือวัดที่เกี่ยวข้องกับการวัดคุณสมบัติของวัสดุ เช่น การวัดสารพิษในอาหารทะเลการวัดปริมาณไขมันในเนื้อสัตว์ การวัดความชื้นในคอนกรีตหรือการวัดเพื่อจำแนกชนิด ของวัสดุ เป็นต้น

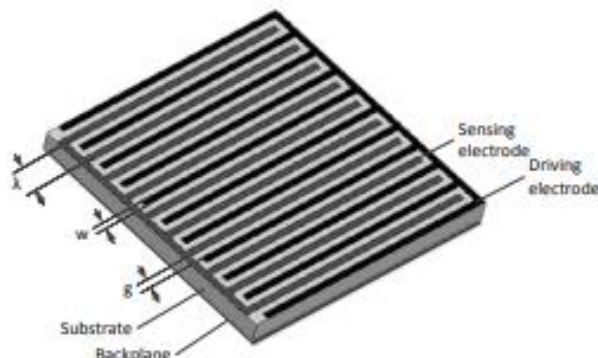


ภาพที่ 14 ค่าคาปาซิแตนซ์เพิ่มขึ้นเมื่อมีวัสดุไดอิเล็กทริกวางในสนามไฟฟ้า [19]



ภาพที่ 15 ลักษณะของลายวงจรที่มีการออกแบบ [19]

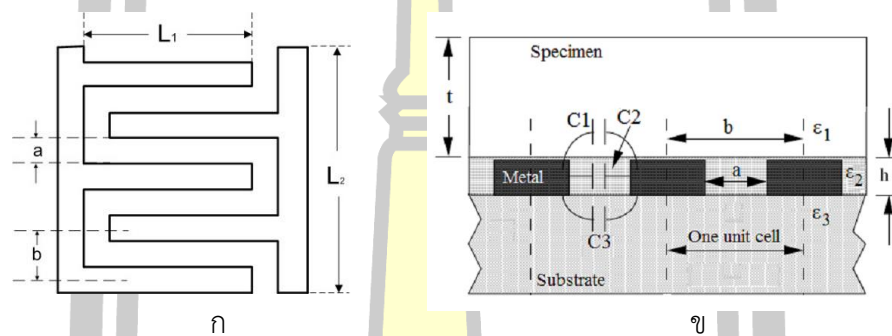
อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ที่เป็นหลายชั้น ดังภาพที่ 16 โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างซี เมื่อระดับไดอิเล็กทริกที่เกาะบนอิเล็กโตรดเปลี่ยนไปไดอิเล็กทริกก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตอลมีโครงสร้างแบบหลายนิ้วที่มีระยะห่างเป็นระยะๆ ตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตอลมีค่าคาปาซิแตนซ์เกิดขึ้นที่ช่องว่างขนาดเล็ก ระหว่างตัวนำแบบฟิล์มบาง ค่าดังกล่าวนี้สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยเพิ่มจำนวนของนิ้วหรือใช้วัสดุที่มีชั้นบางๆ ที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงๆ เช่น ferroelectric ระหว่างตัวนำและชั้นสเตรท ที่ใช้การวางแผ่นตัวนำในแนวระนาบแทนการวางแบบขนาน โดยวางสลับกันระหว่างซีที่เป็นขั้วบวกกับซีที่เป็นขั้วลบคล้ายกับการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกัน ทำให้มีค่าคาปาซิแตนซ์มากกว่าต่อการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ และด้วยโครงสร้างเป็นชั้นเดียวจึงสามารถผลิตโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีอยู่ทั่วไป



ภาพที่ 16 โครงสร้างอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ [20]

Niwat Angkawisitpan และคณะ [21] ได้พัฒนาและออกแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เพื่อนำมาวัดค่าความหวานของน้ำตาล โดยสมการการออกแบบ ดังโครงสร้างในภาพที่ 17 (ก) เริ่มต้นจากหาค่า C_{UC} ในสมการที่ 2.12 ที่สัมพันธ์กับสมการที่ 2.13 และ 2.11 โดยมีองค์ประกอบ ϵ_0 คือ

ค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในอากาศว่าง (permittivity of free space) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m , ϵ_1 คือค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ (the relative permittivity) ของวัสดุที่ใช้นำมาทดสอบเช่น อากาศ น้ำ น้ำมัน , ϵ_2 คือค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุระหว่างทองแดงอิเล็กทรอนิกส์ และ ϵ_3 คือค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง K คือ ฟังก์ชันของปริพันธ์เชิงวงรีของมอดูลัส (elliptic integrals of modulus) โดยมี a เป็นระยะห่างของซี่ b เป็นระยะความกว้างของอิเล็กทรอนิกส์ ต่อมาเป็นการหาค่าการเก็บประจุทั้งหมดของตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล ในสมการที่ 1 ประกอบด้วย L_1 คือความยาวของซี่ และ N คือจำนวนของซี่



ภาพที่ 17 รูปแบบและแนวตัดโครงสร้างของตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิทัล [21]

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

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

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

โดยที่ C = ค่าการเก็บประจุทั้งหมดของอิเล็กทรอนิกส์

C_{uc} = ค่าการเก็บประจุของอิเล็กทรอนิกส์ 1 คู่

N = จำนวนซี่ทั้งหมดของอิเล็กทรอนิกส์

L_1 = ความยาวของซี่อิเล็กทรอนิกส์แต่ละอัน

a = ระยะห่างระหว่างซี่

b = ระยะความกว้างระหว่างทองแดงอิเล็กทรอนิกส์

ϵ_0 = ค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในอากาศว่าง (permittivity of free space)

มีค่า 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_1 = ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุที่ใช้นำมาทดสอบ เช่น อากาศ น้ำ น้ำมัน

ϵ_2 = ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุระหว่างทองแดงอิเล็กโทรด

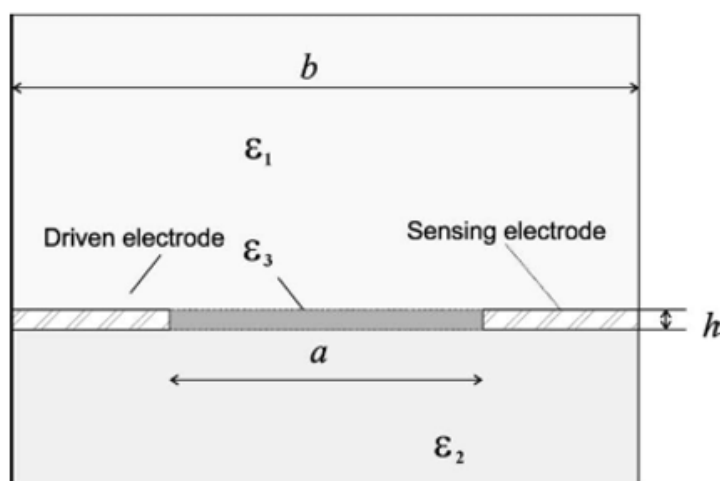
ϵ_3 = ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง

K = ฟังก์ชันของปริพันธ์เชิงวงรีของมอดูลัส

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการปริทัศน์วรรณกรรมกรรมการงานวิจัยในเรื่องของการพัฒนาตัวรับรู้เพื่อตรวจสอบคุณภาพหรือตรวจสอบวัตถุหลากหลายรูปแบบ

ปี 2004 Alexandeer V. Mamishev และคณะ [22] ได้ศึกษาและออกแบบอินเตอร์ดิจิตัลเพื่อตรวจจับความต้านทาน ความจุไฟฟ้า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของวัสดุทดสอบ ทั้งทางด้านเคมีหรือฟิสิกส์ โดยการจำลองและคำนวณ ตัวแปรต่างๆของตัวรับรู้ ดังภาพที่ 18 และเป็นต้นแบบทางของสมการทางคณิตศาสตร์ ที่ถูกนำมาคำนวณหาค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของอินเตอร์ดิจิตัลในยุคปัจจุบัน



ภาพที่ 18 รูปแบบและตัวแปรของตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตัล [22]

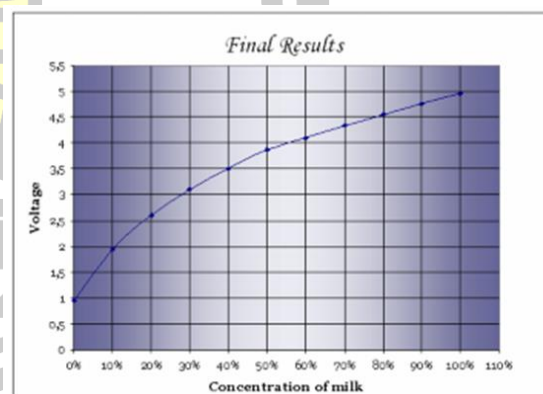
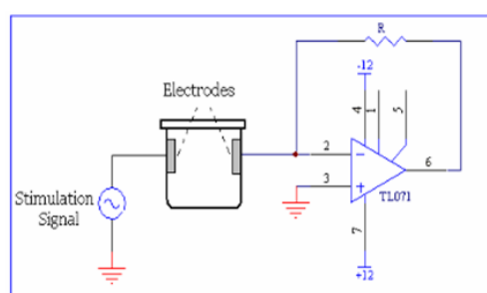
ปี 2005 Subhas C. Mukhopadhyay [23] ได้ออกแบบและพัฒนาตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุนินเตอร์ดิจิตัลเพื่อทดลองเกี่ยวกับผลกระทบของวัสดุฉนวนเช่นนม น้ำมันเนย ชีส ก้อนนมโยเกิร์ต และอื่นๆ ต่อค่าอิมพีแดนซ์ของตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุนินเตอร์ดิจิตัล และแสดงให้เห็นว่าวัสดุฉนวนมีผลมากต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ได้ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุนินเตอร์ดิจิตัล มีประสิทธิภาพในการใช้งานในการกำหนดส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์นมดังภาพที่ 19 โดยกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผ่านเทคนิคการคำนวณที่เหมาะสม

จากค่าอิมพีแดนซ์ ผลการทดลองที่รายงานไว้ในบทความนี้ยังแสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้มีความแม่นยำและประสิทธิภาพสูง



ภาพที่ 19 ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัลและการทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์ของเนื้อหมู [23]

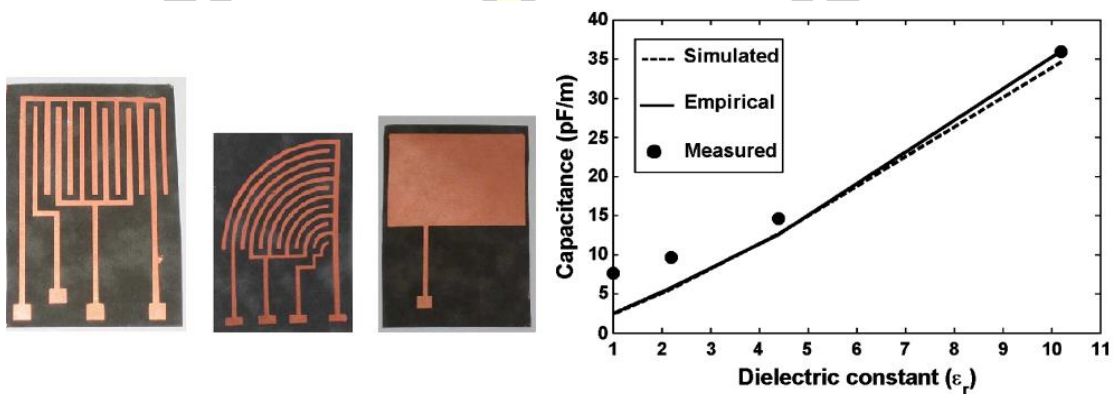
ปี 2006 Luz M. Alonzo และคณะ [24] ได้ออกแบบโครงสร้างและระบบวัดการปนน้ำในน้ำนม โดยการใช้แผ่นอิเล็กโทรดติดไว้ที่ข้างถังบรรจุตามภาพที่ 20 สาเหตุจากการผลิตนมและคุณภาพนมที่ต่ำลงเกี่ยวข้องกับโรคเมสตีติส (โรคของโคนม) และการเจือปนด้วยสารเช่นน้ำอูตสาหกรรมนมได้รับความเสียหายจึงใช้การทดสอบเพื่อประเมินคุณภาพนมบนฟาร์มโดยตลอดด้วยวิธี EC (Electrical conductivity) เพื่อวัดค่าความจุทางไฟฟ้า หาเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่ผสมในนมและหลังจากนั้นปรับให้เหมาะสมเพื่อพยากรณ์การเกิดโรคเมสตีติสผลจากการทดสอบ พบว่า ปริมาณของน้ำที่ผสมในนมเป็นตัวบ่งชี้สำหรับเมสตีติสและเป็นวิธีการวัดที่มีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 20 ออกแบบโครงสร้างและระบบวัดการปนน้ำในน้ำนมและผลการทดสอบ [24]

ปี 2007 Rashed H. Bhuiyan และคณะ [25] ได้พัฒนาตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัล (Interdigital Electrode Capacitor : IDC) หรือที่เรียกกันว่าตัวรับรู้บนแผ่นวงจร

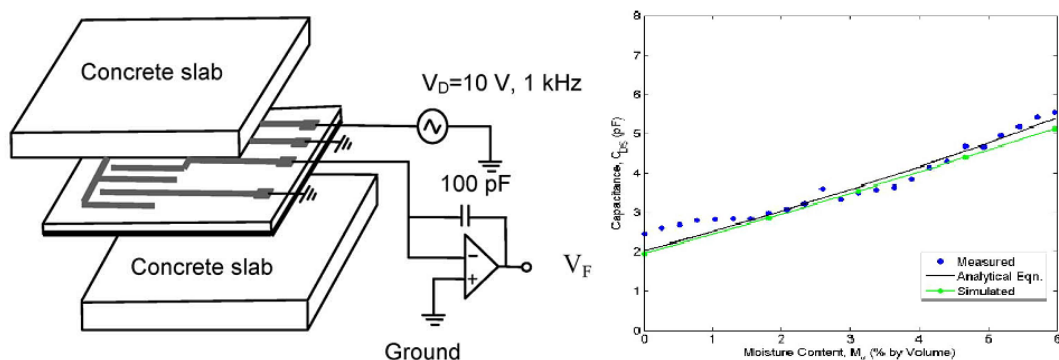
พิมพ์ลายซีวีทีที่มีลักษณะเป็นการกัดแผ่นทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Print Circuit Board : PCB) ที่มีวัสดุฐานรอง (Substrate) วางแผ่นตัวนำในแนวระนาบและวางสลับกันขึ้นไปเพื่อทำให้เป็นคุณสมบัติการขนานของค่าการเก็บประจุ จากงานวิจัยนี้ ตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิตอลคู่ขนานระยะใกล้ สำหรับป้องกันการทำลายของฉนวนในระบบสายส่งไฟฟ้า ได้นำไปวัดความเป็นฉนวนของสายไฟ โดยเป็นตัวรับรู้บนแผ่น PCB แบบคู่ขนานดังภาพที่ 21 ทำเป็น 2 รูปแบบคือแบบคู่ขนานตรงกับแบบโค้ง โดยนำค่าการเก็บประจุมาเปรียบเทียบค่าความเสียหายของฉนวนในลักษณะต่างๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์และซ่อมแซมระบบสายส่งไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 21 ตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิตอลคู่ขนานสำหรับป้องกันการทำลายของฉนวนในระบบสายส่งไฟฟ้า

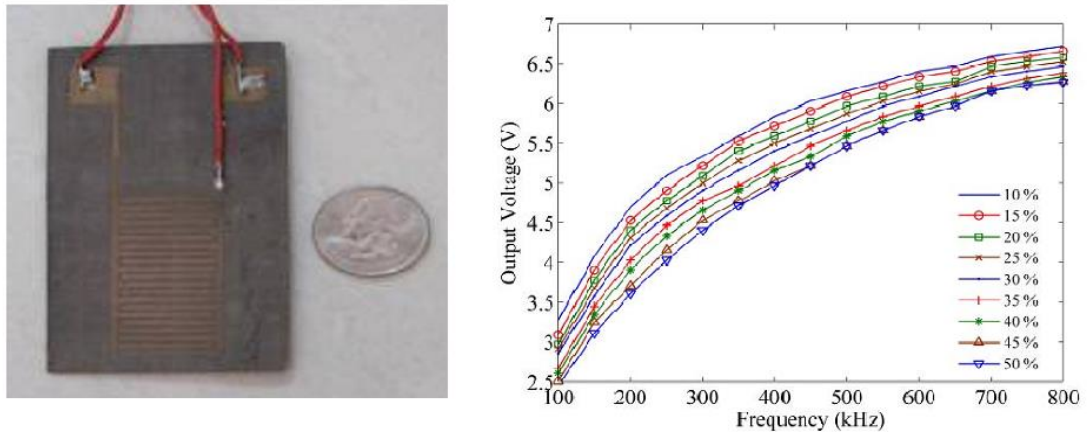
[25]

ปี 2010 Md. Nazmul Alam และคณะ [26] กับงานวิจัยเรื่อง การวัดวัดความชื้นในคอนกรีตโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลสนามระยะใกล้ โดยสร้างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลแบบคู่ขนานจ่ายสัญญาณ $V_p = 1$ โวลต์ ความถี่ 1 kHz และเส้นคู่ขนานอีกคู่หนึ่งสัญญาณผ่าน op-amp เพื่อขยายสัญญาณค่าการเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบระหว่างค่าการเก็บประจุกับ ค่าความชื้นที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่มีในอากาศดังภาพที่ 22



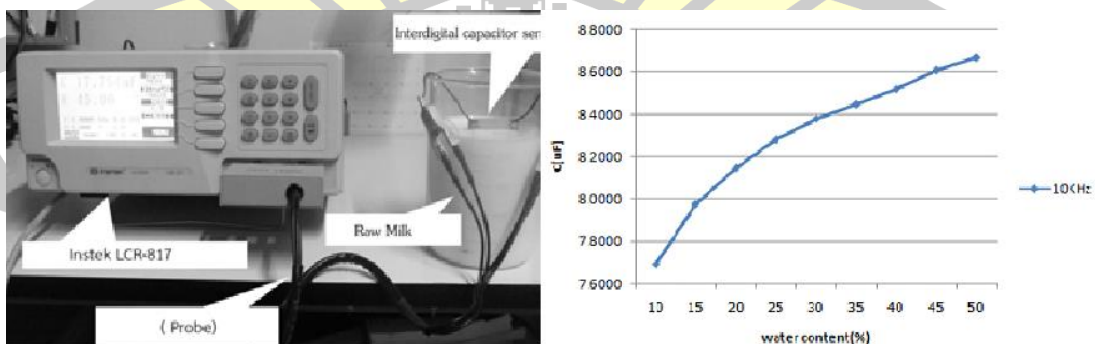
ภาพที่ 22 การวัดความชื้นในคอนกรีตโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลสนามระยะใกล้ [26]

ปี 2012 Niwat Angkawisitpan และคณะ [21] กับงานวิจัยเรื่องการวัดค่าความเข้มข้นของน้ำตาลโดยใช้ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตอล โดยออกแบบตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุแบบดิจิตอลเป็นคู่ขนานและสร้างวงจรกรองความถี่สูง (High-pass Filter) เพื่อเทียบสัญญาณจากราคาออกเป็นแรงดันทางไฟฟ้าในสัญญาณขาขึ้น เพื่อวัดค่าร้อยละความเข้มข้นของน้ำตาลโดยผลการทดสอบค่า % ความเข้มข้นของน้ำตาลจะมีความแตกต่างกันตามสัญญาณที่เกิดขึ้นดังภาพที่ 23



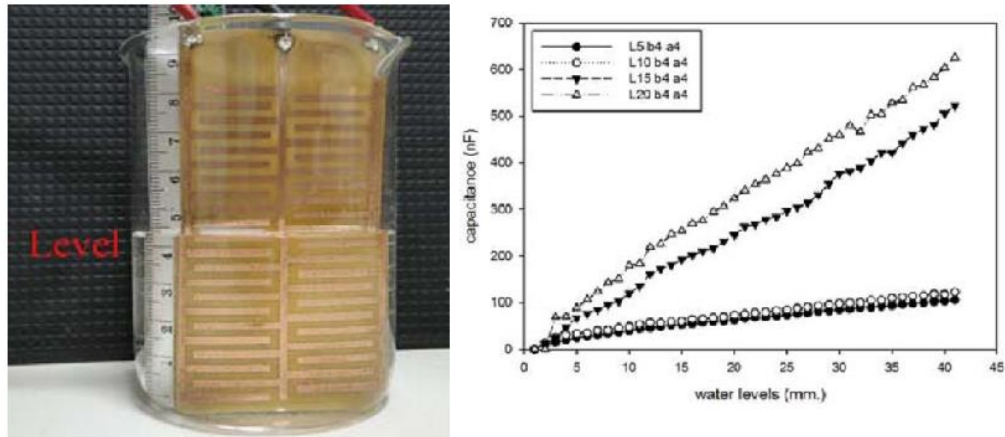
ภาพที่ 23 การวัดค่าความเข้มข้นของน้ำตาลโดยใช้ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตอล [21]

ปี 2015 Songkrod Pimpisarn และคณะ [27] ได้ทำงานวิจัยเรื่องการวัดค่าความเข้มข้นและเจือปนของน้ำนม โดยใช้ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบมีกราวด์เพื่อทำค่าความเข้มข้นและเจือปนของน้ำนมดังภาพที่ 24 โดยนำตัวอย่างของน้ำนมแต่ละประเภทมาทำการวัดเพื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าการเก็บประจุต่อเปอร์เซ็นต์การเจือจางของน้ำที่เกิดขึ้นในน้ำนม



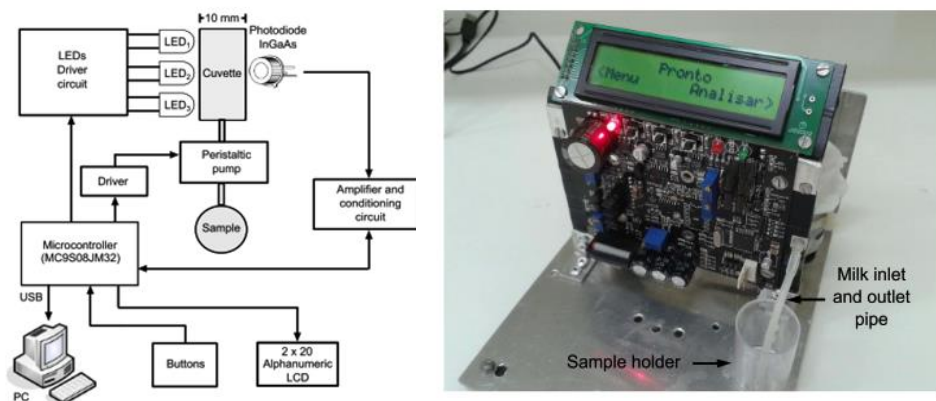
ภาพที่ 24 การวัดค่าความเข้มข้นและเจือปนของน้ำนม [27]

ปี 2015 Sarawoot Boonkirdram และคณะ [28] ได้สร้างตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบใหม่ โดยได้เพิ่มคุณสมบัติของค่าการเก็บประจุจากการออกแบบซี่ลายวงจรรอบ 2 ข้าง เป็นซี่หวีเพื่อให้เกิดคุณสมบัติค่าการเก็บประจุที่มากขึ้น ดังภาพที่ 25



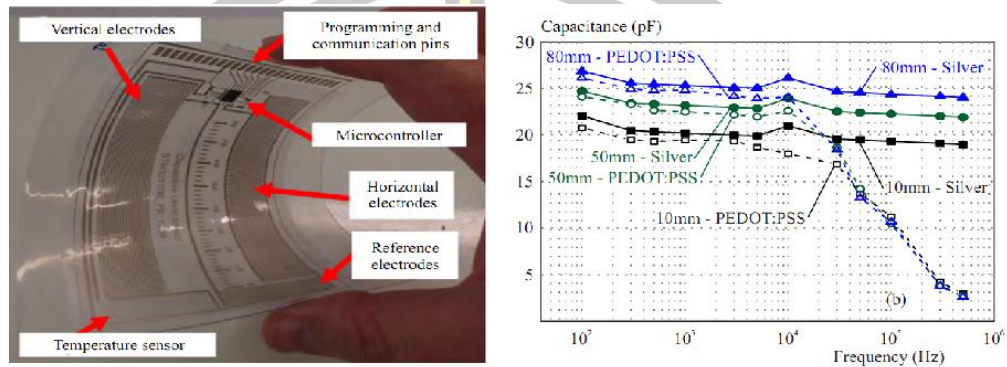
ภาพที่ 25 ตัวรับรู้ค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลแบบใหม่[28]

ปี 2016 Mauricio Moreira และคณะ [29] ได้นำเสนอเครื่องต้นแบบในการวัดค่าการปนน้ำในน้ำมันดิบ ดังรูปที่ 26 เครื่องวัดความเข้มแสงดิจิตอลเพื่อวัดปริมาณน้ำที่เติมในน้ำมัน โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ประกอบเป็นชุดพกพา โดยใช้ LED 3 ดวงที่มีการแผ่รังสีในภาคใกล้เคียงของคลื่นอินฟราเรด (IR) และไม่มีเลนส์ ฟิลเตอร์ หรือชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว การวัดแสงผ่านตัวอย่างน้ำมันเป็นการประเมินปริมาณน้ำที่เติมเข้าไป ผลการทดลองด้วยตัวอย่างน้ำมันที่เจือจางด้วยน้ำ 0% - 25% มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย <math><1\%</math>



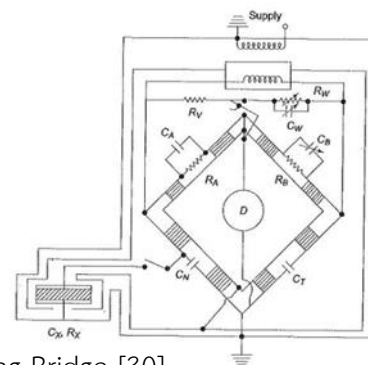
ภาพที่ 26 เครื่องวัดความเข้มแสงดิจิตอลเพื่อวัดปริมาณน้ำที่เติมในน้ำมัน [29]

ปี 2018 Paval Kulha และคณะ [31] กับงานวิจัยเรื่อง การพิมพ์และแผ่นอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบการวัดระดับโดยใช้ค่าการเก็บประจุต้นทุนต่ำ ได้นำตัวรับรู้ระดับแบบค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลลงแผ่นพลาสติกและลามิเนตที่มีคุณสมบัติในการอ่อนตัวและยืดหยุ่นเพื่อนำไปวัดค่าระดับที่มีพื้นที่ผิวโค้งดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 การพิมพ์และแผ่นอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบการวัดระดับโดยใช้ค่าการเก็บประจุต้นทุนต่ำ [31]

ปี 2020 Dinku Worku และคณะ [30] ได้พัฒนาเซ็นเซอร์แบบความจุซึ่งไวต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อทดสอบการปนน้ำในน้ำมันดิบ แล้วนำมาวัดผ่านวงจร Schering Bridge ประกอบด้วยคอยล์และคอนเดนเซอร์ ดังภาพที่ 28 ที่มีค่าความสัมพันธ์ระหว่างความจุแบบไดอิเล็กตริกส์และความสัมพันธ์ระหว่างความจุแบบไดอิเล็กตริกส์และความคงที่ระหว่างการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่วงจร ผ่านการปรับตัวควบคุมคอยล์และคอนเดนเซอร์ จนได้ค่าสัมประสิทธิ์ (Balance) ที่วงจร Schering Bridge และนำไปคำนวณหาค่าความจุของวัสดุที่ทดสอบเพื่อตรวจหาการปนเปื้อนของนมในระดับ % ต่างๆ (ตั้งแต่ 5% ถึง 20%) ในการทดลองใช้น้ำมันจากแหล่งที่มาต่างกัน คือ น้ำมันแพ็คเก็ตและน้ำมันดิบ (ที่เก็บจากฟาร์มนม) เพื่อศึกษาการเจือปนด้วยสารต่างๆ โดยทำการวัดผลการทดลองในระดับการเจือปนต่างๆ เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูลและตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูล



ภาพที่ 28 วงจร Schering Bridge [30]

ปี 2022 Ketaki Ghodinde [31] ได้ออกแบบการทดสอบการปนเปื้อนของน้ำยาล้างจานในน้ำนมด้วย Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) โดยใช้ชุดเครื่องมือตรวจวัด EIS ซึ่งประกอบด้วย Impedance analyzer board และ Phase shift to voltage converter circuitry ดังภาพที่ 29 เพื่อการประเมินค่าความต้านทาน (impedance) ของนม อัตราต้านทานของสาร electrolyte ซึ่งเป็นนมจะเปลี่ยนแปลงเมื่อเติมสารล้างจาน ลักษณะไอออนของสารล้างจานจะมีผลต่อความจุของไฟฟ้าและต้านทานของเซ็นเซอร์ เซ็นเซอร์สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสารซักผ้า ในปริมาณ 0% ถึง 10% ในปริมาณ 100 มิลลิลิตรของนมได้ โดยเวลาที่ใช้ในการตรวจจับประมาณ 35 วินาที

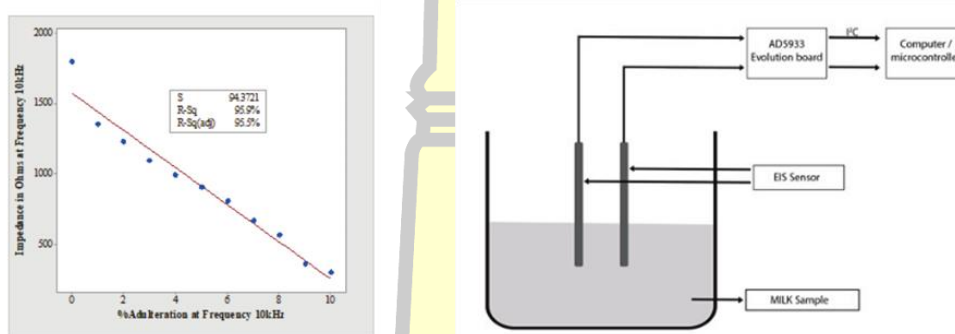


Fig. 7. Impedance Vs Adulteration for Copper at 10KHz

ภาพที่ 29 การทดสอบด้วย Electrochemical Impedance Spectroscopy(EIS) [31]

การทบทวนบทความวิจัยเหล่านี้กล่าวมาขึ้นต้นยังมีจุดด้อยในเรื่องช่องว่างบนแผ่นวงจรพิมพ์ ทำให้หน้าสัมผัสของน้ำนมติดไม่สัมผัสตัวรับรู้ได้ทั่วถึง ส่งผลให้ค่าการเก็บประจุน้อย การวัดที่ไม่ละเอียด ทำให้เกิดแนวคิดโดยการใช้ตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิเจทัลแบบ 2 ข้าง Sarawoot Boonkirdram และคณะ เพื่อวัดความเปลี่ยนแปลงค่าการเก็บประจุเป็นข้อมูลนำไปใช้งานกับตัวประมวลผลนำไปใช้งานวัดระดับที่มีความละเอียดมากขึ้น เป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมกับการและประยุกต์ด้านการวัดการปนน้ำในน้ำนมดิบที่ต้องใช้ความละเอียด สามารถพัฒนาต้นแบบและนำไปใช้ในอุตสาหกรรม เพื่อตรวจสอบคุณภาพน้ำนมดิบต่อไป

พูนุ ปณุกิตโต ชิว

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้แบ่งขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย ออกเป็นลำดับขั้นดังนี้

- 3.1 กลุ่มตัวอย่าง
- 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
- 3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล
- 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 กลุ่มตัวอย่าง

น้ำนมดิบจากสหกรณ์ผู้เลี้ยงโคนมจังหวัดขอนแก่น

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

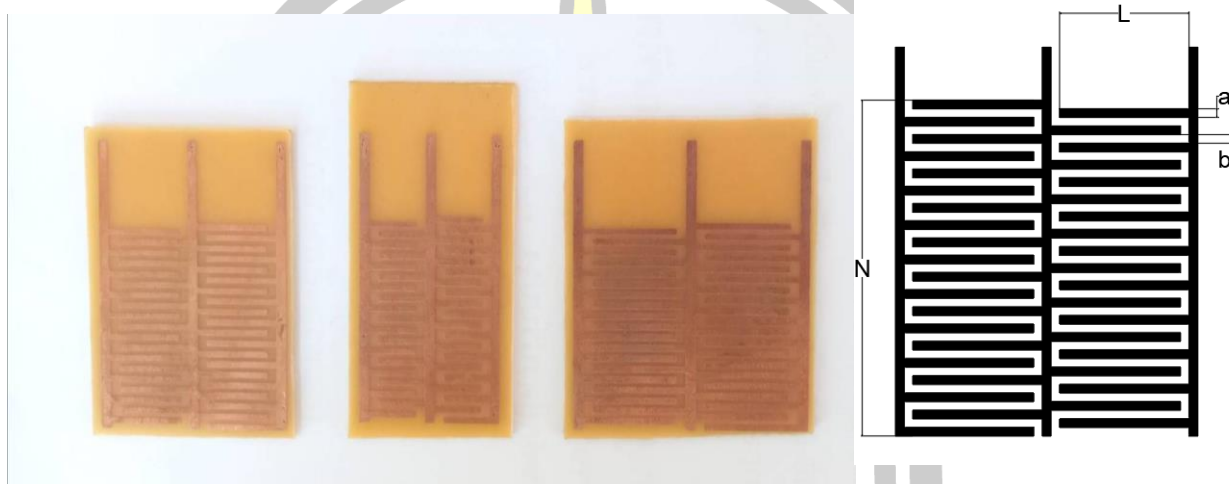
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย เครื่องวัดค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า ค่าความจุทางไฟฟ้า และ ค่าความต้านทางไฟฟ้า (LCR Meter) และอินเตอร์ดิจิทัล 2 ทาง

1) เครื่องวัดค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า ค่าความจุทางไฟฟ้า และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า LCR Meter ยี่ห้อ KEYSIGHT รุ่น E4980AL ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 LCR Meter ยี่ห้อ KEYSIGHT รุ่น E4980AL

2) อินเตอร์ดิจิทัล 2 ทาง ดังภาพที่ 31 ประกอบด้วยอินเตอร์ดิจิทัล 2 ทางขนาดต่างกัน โครงสร้างประกอบด้วยแผ่น PCB (Printed Circuit Board) ใช้เป็นแผ่นชนิด FR4 ที่มีลายของทองแดงมีลักษณะเหมือนซี่หวี 2 ข้าง โดยกำหนดให้ W คือ a =ความกว้างของซี่, b =ระยะห่างระหว่างของซี่, L =ความยาวของซี่, N =จำนวนของซี่ในแต่ละข้าง

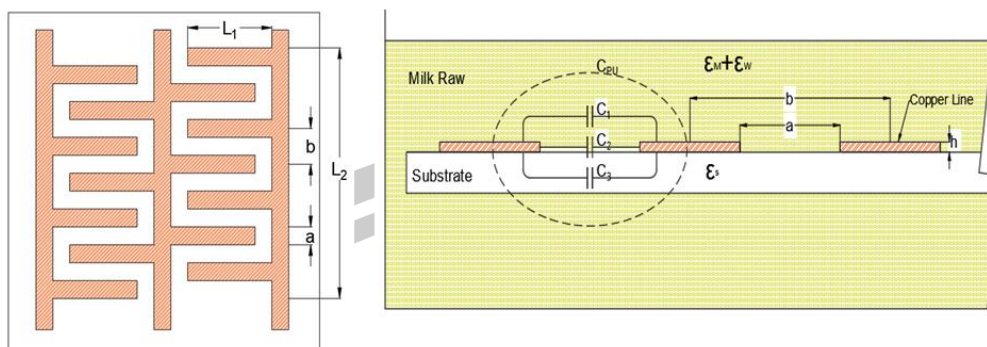


ภาพที่ 31 อินเตอร์ดิจิทัล 2 ทาง กำหนดให้ a =ความกว้างของซี่, b =ระยะห่างระหว่างของซี่, L =ความยาวของซี่, N =จำนวนของซี่ในแต่ละข้าง

3.3 วิธีการดำเนินการทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล

3.3.1 การออกแบบและการสร้างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง

การออกแบบและการสร้าง ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ในการวิจัยครั้งนี้มีทั้งหมด 9 รูปแบบ ดังตารางที่ 7 โดยกำหนดให้ (L) ความกว้างของแผ่นตัวนำ (a) และระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (b) มีความแตกต่างกัน เช่น ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ แบบที่ 1 มี L 5 a 1 b 4 หมายถึง อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์มีความยาวของแผ่นตัวนำ (L) เท่ากับ 5 มม. ความกว้างของแผ่นตัวนำ (a) เท่ากับ 1 มม. และระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (b) เท่ากับ 4 มม. โดยใช้แผ่นปรินท์แบบด้านเดียวชนิดเกรด FR-4 (woven glass and epoxy) ความหนาแผ่นตัวนำ (t) = 0.35 μm ค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุฐานรอง $\epsilon_s = 4.3$ ค่าไดอิเล็กทริกของน้ำ (dielectric constant; ϵ ของน้ำ (ϵ_w) เท่ากับ 80 ที่อุณหภูมิห้องปกติ และ dielectric constant; ϵ ของน้ำมัน (ϵ_M) เท่ากับ 68 ที่อุณหภูมิห้องปกติ



ภาพที่ 32 รายละเอียดของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์

ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการวิจัยนี้อาศัยคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยเมื่อนำอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ไปวางในไดอิเล็กทริก สนามไฟฟ้าที่เกิดจากแผ่นตัวนำซึ่งมีประจุไฟฟ้าที่ต่างกัน ทำให้ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างแผ่นตัวนำจะเพิ่มขึ้นตามคุณสมบัติของไดอิเล็กทริก วัสดุที่ต่างกันมีค่าไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน

การใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์วัดการปนน้ำในน้ำนมดิบ เป็นการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุไดอิเล็กทริก 2 ชนิด คือ น้ำและนม โดยน้ำมีค่าไดอิเล็กทริกมากกว่านม ดังนั้น เมื่อน้ำเพิ่มขึ้น ค่าคาปาซิแตนซ์ของการปนน้ำในน้ำนมดิบจะเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 7 ตารางแสดงขนาด และสัญลักษณ์ (Code) ที่ใช้กับอินเตอร์ดิจิตอล 2 ทาง แต่ละขนาด

Model	a (mm)	b (mm)	L (mm)	Code	Model	a (mm)	b (mm)	L (mm)	Code
1	1	1	5	a1b1L5	6	2	2	15	a2b2L15
2	1	1	10	a1b1L10	7	3	3	5	a3b3L5
3	1	1	15	a1b1L15	8	3	3	10	a3b3L10
4	2	2	5	a2b2L5	9	3	3	15	a3b3L15
5	2	2	10	a2b2L10					

3.3.2 การทดลองวัดค่าการปนน้ำในน้ำนมดิบ

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความกว้างของแผ่นตัวนำ (a) ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (b) และความยาวของแผ่นตัวนำ (L) ระยะห่างของแผ่นตัวนำของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ และการเจือปนน้ำในน้ำนมดิบ

การทดลองและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ ระหว่างความกว้างของแผ่นตัวนำ (a) ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (b) และความยาวของแผ่นตัวนำ (L) ระยะห่างของแผ่นตัวนำของอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์และการเจือปนน้ำในน้ำมันดิบนำเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยเก็บรวบรวมข้อมูล โดยการเจือปนน้ำในน้ำมันดิบในช่วงความเข้มข้น 0 ถึง 50 % โดยนำตัวอย่าง 150 cc. ใส่ในภาชนะแก้วขนาด 300 cc. แล้วเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตัวอย่างละ 5 % จนปริมาณน้ำเท่ากับ 300 cc. เพื่อทำการวัดค่าความจุทางไฟฟ้า ทำซ้ำ 3 ครั้ง ในแต่ละตัวอย่าง ดังภาพที่ 33 และในการเติมน้ำเพิ่มตาม ตารางที่ 8 เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำตามที่ต้องการ



ภาพที่ 33 ตัวอย่างการวัดค่าความจุทางไฟฟ้าของน้ำมันดิบด้วยอินเตอร์ดิจิทัล 2 ทาง

ตารางที่ 8 ตารางการเติมน้ำ

ปริมาณรวม	%การปนน้ำในน้ำมันดิบ	ปริมาณน้ำรวมที่ต้องเติม	ส่วนที่ต้องเติมจริง
150.00			-
157.89	5.0	7.9	
166.67	10.0	16.7	8.8
176.47	15.0	26.5	9.8
187.50	20.0	37.5	11.0

200.00	25.0	50.0	12.5
214.29	30.0	64.3	14.3
230.77	35.0	80.8	16.5
250.00	40.0	100.0	19.2
272.73	45.0	122.7	22.7
300.00	50.0	150.0	27.3

ทำการทดลอง โดยเปลี่ยนตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ ตามตารางที่ 3 และทำการทดลองที่ละรูปแบบ รวมทั้งหมด 9 แบบ เพื่อนำไปวิเคราะห์ทางสถิติต่อไป

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้ใช้การประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. หาค่าเฉลี่ยของการวัดที่ความเข้มข้นต่างๆ
2. สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation) หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เกิดขึ้น ความกว้างของตัวรับรู้ ความยาวของซีตัวรับรู้ ระยะห่างระหว่างซีตัวรับรู้ ความเข้มข้นของน้ำนมดิบ ที่ส่งผลต่อค่าความจุทางไฟฟ้า
3. การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) เพื่อหาสมการการถดถอยเชิงเส้นและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความจุทางไฟฟ้าของอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์

พหุ ประสิทธิภาพ ชีวะ

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลครั้งนี้ ผู้วิจัยได้แบ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็นลำดับ ดังนี้

- 4.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล
- 4.2 ลำดับขั้นในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล
- 4.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูล การนำเสนอผลการวิจัย และการแปลความหมาย จากข้อมูล ผู้วิจัยได้กำหนดความหมายของสัญลักษณ์ในการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

L	แทน	ความยาวของซี่
a	แทน	ความกว้างของซี่,
b	แทน	ระยะห่างระหว่างของซี่,
N	แทน	จำนวนของซี่ในแต่ละข้าง
\bar{X}	แทน	ค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง
R^2	แทน	สัมประสิทธิ์การทำนาย

Capacitance แทน ความสามารถในการเก็บประจุของตัวนำไฟฟ้า หน่วยเป็น μF

4.2 ลำดับขั้นในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยได้ทำการเสนอความมุ่งหมายของการวิจัย โดยจำแนกออก ดังนี้

1. ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนมดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลปาซิเตอร์ 2 ข้าง
- 2) วิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนมดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลปาซิเตอร์ 2 ข้าง
- 3) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้า ค่าความยาวของซี่ที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนม

4.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.3.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนมดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง

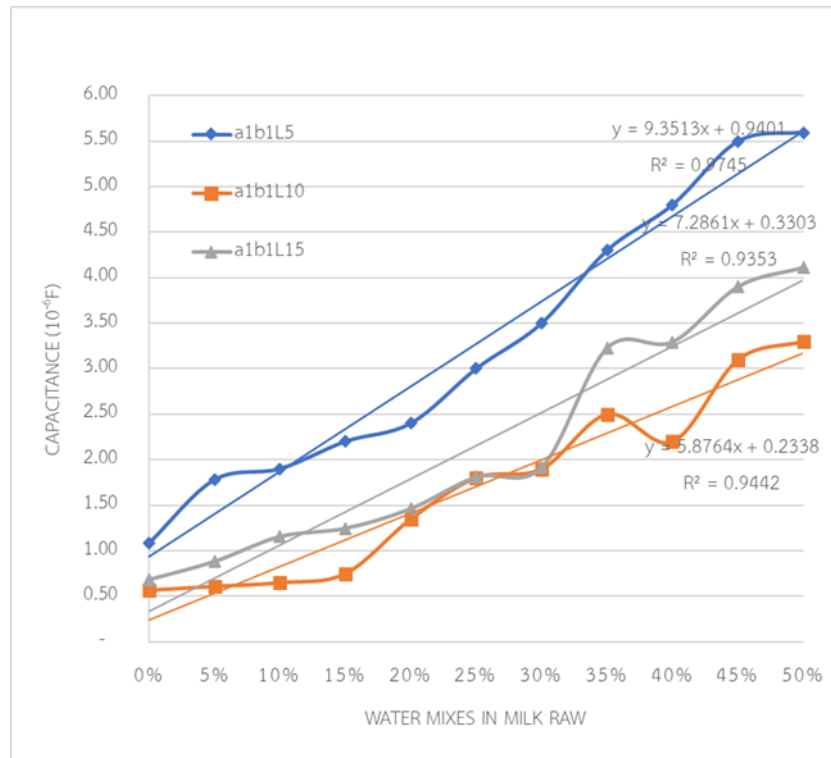
การหาค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง โดยใช้ตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วงความถี่ คือ 1kHz และ 10kHz โดยมีขนาดที่แตกต่างกันทั้งหมด 3 กลุ่ม คือ ขนาดความกว้างของซี 1 mm., 2 mm. และ 3 mm. ซึ่งแต่ละกลุ่มมีความยาวของซี (L) ต่างกัน 3 ขนาด คือ 5 mm., 10 mm. และ 15 mm. ตามลำดับรวมเป็นทั้งหมด 9 ชิ้นทดสอบโดยการใส่น้ำนมดิบปริมาณ 150 cc. และเติมน้ำเพิ่มทีละ 5% จากปริมาณรวม จนได้การเติมน้ำปริมาณรวม 50% จากปริมาณรวม คือ น้ำนมดิบปริมาณ 150 cc. และน้ำ 150 cc. เป็นของเหลวรวม 300 cc. แล้ววัดค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ครั้ง

1) ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนมดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง ที่ความถี่ 1 kHz ขนาดความกว้างของซี 1 mm. ความยาวของซี (L) ต่างกัน 3 ขนาด คือ 5 mm., 10 mm. และ 15 mm. (a1b1L5, a1b1L10 และ a1b1L15) ตามลำดับ ซึ่งได้ผลการทดลอง ค่าสถิติพื้นฐานตามตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 1kHz a1b1L5, a1b1L10 และ a1b1L15

IDC Type	Water mixes in milk raw ($10^{-6}F$)		Transfer Function ($10^{-6}F$)	R^2
	0%	50%		
a1b1L5	1.08	5.60	$y = 9.3513x + 0.9401$	0.9745
a1b1L10	0.57	3.30	$y = 5.8764x + 0.2338$	0.9442
a1b1L15	0.68	4.11	$y = 7.2861x + 0.3303$	0.9353

ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบทั้ง 3 ครั้ง สามารถเขียนอยู่ในรูปเชิงเส้นได้ดังภาพที่ 34 เพื่อหาสมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)



ภาพที่ 34 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 1kHz
a1b1L5, a1b1L10 และ a1b1L15

จากการทดสอบ ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 1kHz ขนาดความกว้างของ ซี่ 1 mm. ความยาวของซี่ (L) ต่างกัน 3 ขนาด คือ 5 mm., 10 mm. และ 15 mm. ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการปนน้ำในนม ได้ผลดังนี้

a1b1L5 การทดสอบในนมนมดิบที่ไม่มีการผสมน้ำเพิ่มมีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 1.08 ไมโครฟารัด และ การทดสอบในนมนมดิบที่มีการผสมน้ำเพิ่ม 50% มีค่าความจุทางไฟฟ้า มากที่สุด เท่ากับ 5.60 ไมโครฟารัด สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) มีค่าเท่ากับ

$$y = 9.3513x + 0.9401 \text{ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R}^2\text{) ที่ } 0.9745$$

a1b1L10 การทดสอบในนมนมดิบที่ไม่มีการผสมน้ำเพิ่มมีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 0.57 ไมโครฟารัด และ การทดสอบในนมนมดิบที่มีการผสมน้ำเพิ่ม 50% มีค่าความจุทางไฟฟ้า มากที่สุด เท่ากับ 3.30 ไมโครฟารัด สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) มีค่าเท่ากับ

$$y = 5.8764x + 0.2338 \text{ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R}^2\text{) ที่ } 0.9442$$

a1b1L15 การทดสอบในนมนมดิบที่ไม่มีการผสมน้ำเพิ่มมีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 0.68 ไมโครฟารัด และ การทดสอบในนมนมดิบที่มีการผสมน้ำเพิ่ม 50% มีค่าความจุทาง

ไฟฟ้า มากที่สุด เท่ากับ 4.10 ไมโครฟารัด สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) มีค่าเท่ากับ

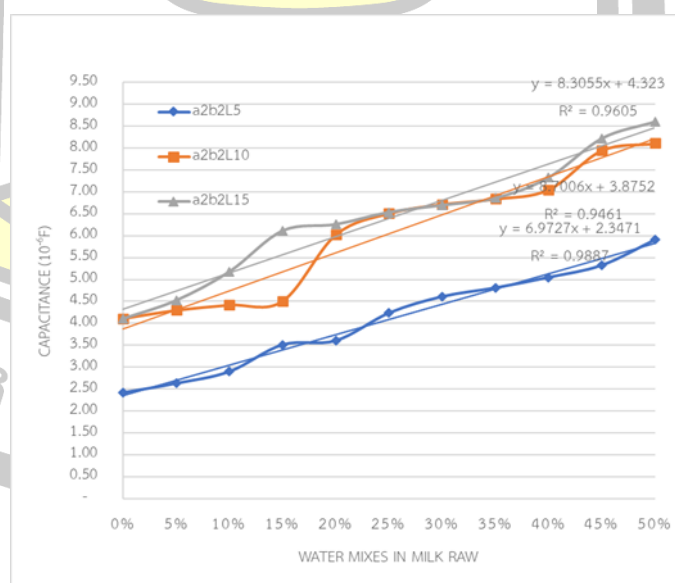
$$y = 7.2861x + 0.3303 \text{ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R}^2\text{) ที่ } 0.9353$$

2) ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือปนน้ำใน นำนมดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง ที่ความถี่ 1 kHz ขนาดความกว้างของ ซี่ 2 mm. ความยาวของซี่ (L) ต่างกัน 3 ขนาด คือ 5 mm., 10 mm. และ 15 mm. (a2b2L5, a2b2L10 และ a2b2L15) ตามลำดับ ซึ่งได้ผลการทดลอง ค่าสถิติพื้นฐานตามตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 1kHz a2b2L5, a2b2L10 และ a2b2L15

IDC Type	Water mixes in milk raw (10^{-6} F)		Transfer Function (10^{-6} F)	R ²
	0%	50%		
a2b2L5	2.41	5.91	$y = 6.9727x + 2.3471$	0.9887
a2b2L10	4.11	8.11	$y = 8.7006x + 3.8752$	0.9461
a2b2L15	4.10	8.60	$y = 8.3055x + 4.323$	0.9605

ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบทั้ง 3 ครั้ง สามารถเขียนอยู่ในรูปเชิงเส้นได้ดังภาพที่ 35 เพื่อหา สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R²)



ภาพที่ 35 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 1kHz a2b2L5, a2b2L10 และ a2b2L15

จากการทดสอบ ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 1kHz ขนาดความกว้างของ ซี 2 mm. ความยาวของซี (L) ต่างกัน 3 ขนาด คือ 5 mm., 10 mm. และ 15 mm. ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการปนน้ำในนม ได้ผลดังนี้

a2b2L5 การทดสอบในนมดิบที่ไม่มีการผสมน้ำเพิ่มมีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 2.41 ไมโครฟารัด และ การทดสอบในนมดิบที่มีการผสมน้ำเพิ่ม 50% มีค่าความจุทางไฟฟ้า มากที่สุด เท่ากับ 5.90 ไมโครฟารัด สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) มีค่าเท่ากับ

$$y = 6.9727x + 2.3471 \text{ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R}^2\text{) ที่ } 0.9887$$

a2b2L10 การทดสอบในนมดิบที่ไม่มีการผสมน้ำเพิ่มมีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 4.11 ไมโครฟารัด และ การทดสอบในนมดิบที่มีการผสมน้ำเพิ่ม 50% มีค่าความจุทางไฟฟ้า มากที่สุด เท่ากับ 8.11 ไมโครฟารัด สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) มีค่าเท่ากับ

$$y = 8.7006x + 3.8752 \text{ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R}^2\text{) ที่ } 0.9461$$

a2b2L15 การทดสอบในนมดิบที่ไม่มีการผสมน้ำเพิ่มมีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 4.10 ไมโครฟารัด และ การทดสอบในนมดิบที่มีการผสมน้ำเพิ่ม 50% มีค่าความจุทางไฟฟ้า มากที่สุด เท่ากับ 8.60 ไมโครฟารัด สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) มีค่าเท่ากับ

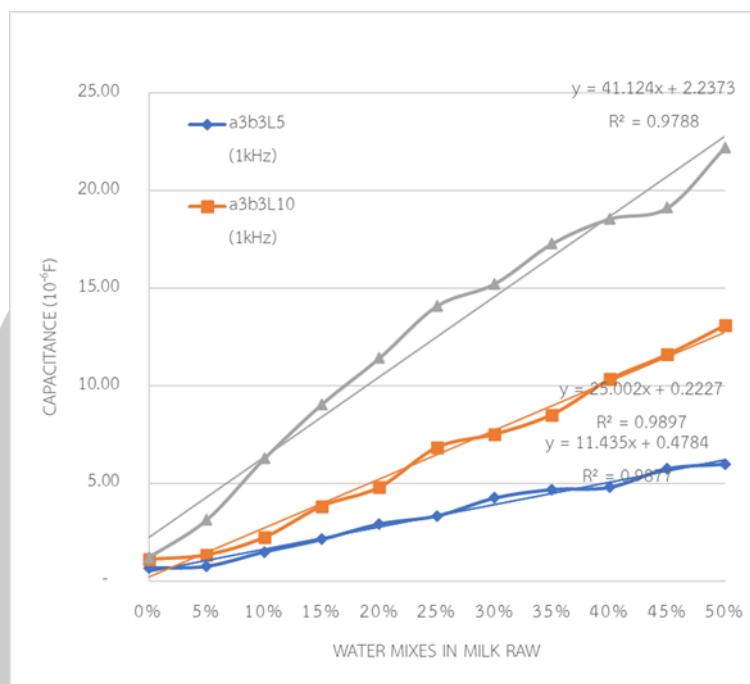
$$y = 8.3055x + 4.3236 \text{ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R}^2\text{) ที่ } 0.9605$$

3) ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือปนน้ำในนมดิบโดยใช้ตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง ที่ความถี่ 1 kHz ขนาดความกว้างของซี 3 mm. ความยาวของซี (L) ต่างกัน 3 ขนาด คือ 5 mm., 10 mm. และ 15 mm. (a3b3L5, a3b3L10 และ a3b3L15) ตามลำดับ ซึ่งได้ผลการทดลอง ค่าสถิติพื้นฐานตามตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 1kHz a3b3L5, a3b3L10 และ a3b3L15

IDC Type	Water mixes in milk raw (10 ⁻⁶ F)		Transfer Function (10 ⁻⁶ F)	R ²
	0%	50%		
a3b3L5	0.66	5.98	$y = 11.435x + 0.4784$	0.9877
a3b3L15	1.10	13.10	$y = 25.002x + 0.2227$	0.9897
a3b3L10	1.22	22.23	$y = 41.124x + 2.2373$	0.9788

ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบทั้ง 3 ครั้ง สามารถเขียนอยู่ในรูปเชิงเส้นได้ดังภาพที่ 36 เพื่อหาสมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R²)



ภาพที่ 36 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 1kHz
a3b3L5, a3b3L10 และ a3b3L15

จากการทดสอบ ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 1kHz ขนาดความกว้างของ ชี 2 mm. ความยาวของชี (L) ต่างกัน 3 ขนาด คือ 5 mm., 10 mm. และ 15 mm. ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการปนน้ำในนม ได้ผลดังนี้

a3b3L5 การทดสอบในนมนมดิบที่ไม่มีการผสมน้ำเพิ่มมีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 0.66 ไมโครฟารัด และ การทดสอบในนมนมดิบที่มีการผสมน้ำเพิ่ม 50% มีค่าความจุทางไฟฟ้า มากที่สุด เท่ากับ 5.98 ไมโครฟารัด สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) มีค่าเท่ากับ

$$y = 11.435x + 0.4784 \text{ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R}^2\text{) ที่ } 0.9877$$

a3b3L10 การทดสอบในนมนมดิบที่ไม่มีการผสมน้ำเพิ่มมีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 1.10 ไมโครฟารัด และ การทดสอบในนมนมดิบที่มีการผสมน้ำเพิ่ม 50% มีค่าความจุทางไฟฟ้า มากที่สุด เท่ากับ 13.10 ไมโครฟารัด สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) มีค่าเท่ากับ

$$y = 25.002x + 0.2227 \text{ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R}^2\text{) ที่ } 0.9897$$

a3b3L15 การทดสอบในนมนมดิบที่ไม่มีการผสมน้ำเพิ่มมีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 1.22 ไมโครฟารัด และ การทดสอบในนมนมดิบที่มีการผสมน้ำเพิ่ม 50% มีค่าความจุทางไฟฟ้า มากที่สุด เท่ากับ 22.23 ไมโครฟารัด สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) มีค่าเท่ากับ

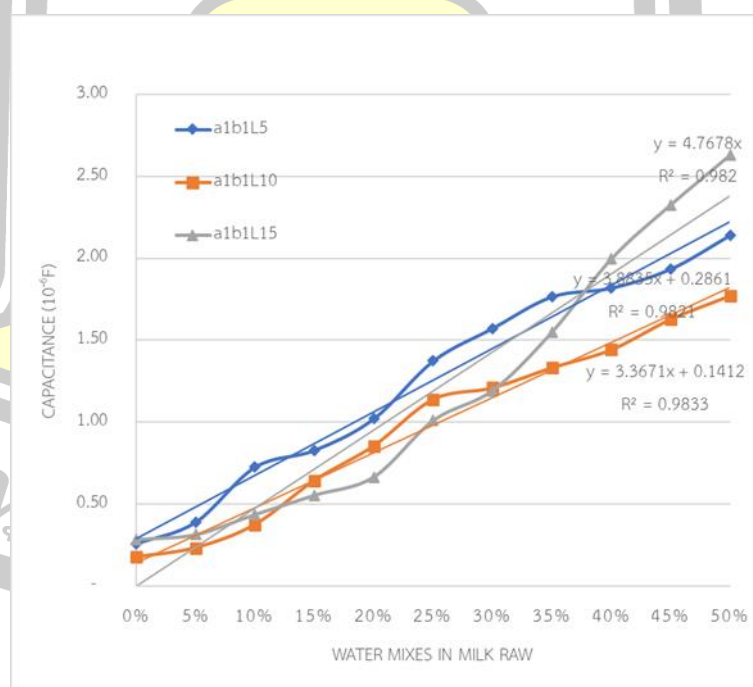
$$y = 41.124x + 2.2373 \text{ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R}^2\text{) ที่ } 0.9788$$

4) ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือปนน้ำใน นํ้านมดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ขั้ว ที่ความถี่ 10 kHz ขนาดความกว้างของ ซี่ 1 mm. ความยาวของซี่ (L) ต่างกัน 3 ขนาด คือ 5 mm., 10 mm. และ 15 mm. (a1b1L5, a1b1L10 และ a1b1L15) ตามลำดับ ซึ่งได้ผลการทดลอง ค่าสถิติพื้นฐานตามตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 10kHz a1b1L5, a1b1L10 และ a1b1L15

IDC Type	Water mixes in milk raw (10^{-6} F)		Transfer Function (10^{-6} F)	R ²
	0%	50%		
a1b1L5	0.26	2.14	$y = 3.8835x + 0.2861$	0.9821
a1b1L10	0.18	1.77	$y = 3.3671x + 0.1412$	0.9833
a1b1L15	0.28	2.63	$y = 4.7678x$	0.9820

ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบทั้ง 3 ครั้ง สามารถเขียนอยู่ในรูปเชิงเส้นได้ดังภาพที่ 37 เพื่อหา สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R²)



ภาพที่ 37 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 10kHz a1b1L5, a1b1L10 และ a1b1L15

จากการทดสอบ ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 10kHz ขนาดความกว้างของ ซี 1 mm. ความยาวของซี (L) ต่างกัน 3 ขนาด คือ 5 mm., 10 mm. และ 15 mm. ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการปนน้ำในนม ได้ผลดังนี้

a1b1L5 การทดสอบในนมนมดิบที่ไม่มีการผสมน้ำเพิ่มมีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 0.26 ไมโครฟารัด และ การทดสอบในนมนมดิบที่มีการผสมน้ำเพิ่ม 50% มีค่าความจุทางไฟฟ้า มากที่สุด เท่ากับ 2.14 ไมโครฟารัด สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) มีค่าเท่ากับ $y = 3.8835x + 0.2861$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.9821

a1b1L10 การทดสอบในนมนมดิบที่ไม่มีการผสมน้ำเพิ่มมีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 0.18 ไมโครฟารัด และ การทดสอบในนมนมดิบที่มีการผสมน้ำเพิ่ม 50% มีค่าความจุทางไฟฟ้า มากที่สุด เท่ากับ 1.77 ไมโครฟารัด สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) มีค่าเท่ากับ $y = 3.3671x + 0.1412$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.9833

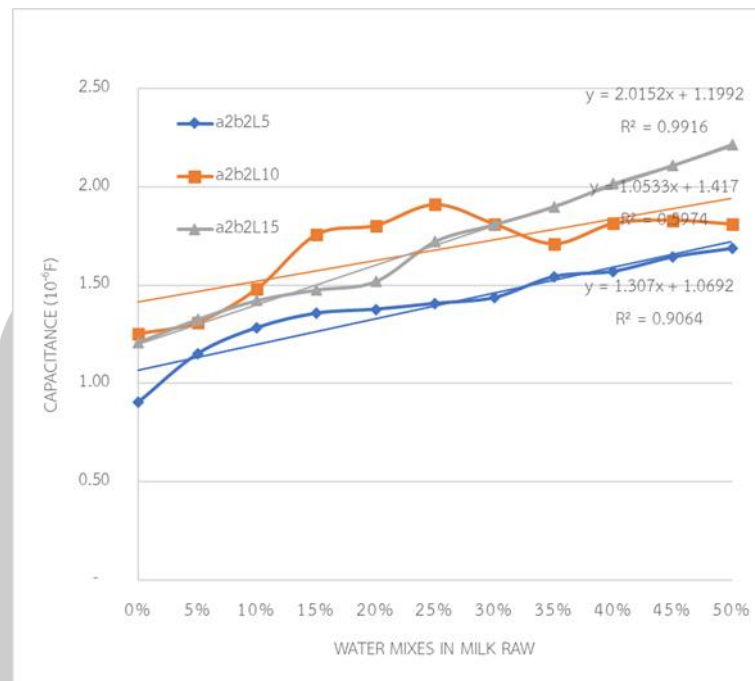
a1b1L15 การทดสอบในนมนมดิบที่ไม่มีการผสมน้ำเพิ่มมีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 0.28 ไมโครฟารัด และ การทดสอบในนมนมดิบที่มีการผสมน้ำเพิ่ม 50% มีค่าความจุทางไฟฟ้า มากที่สุด เท่ากับ 2.63 ไมโครฟารัด สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) มีค่าเท่ากับ $y = 4.7678x$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.9820

5) ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือปนน้ำในนมนมดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง ที่ความถี่ 10 kHz ขนาดความกว้างของ ซี 2 mm. ความยาวของซี (L) ต่างกัน 3 ขนาด คือ 5 mm., 10 mm. และ 15 mm. (a2b2L5, a2b2L10 และ a2b2L15) ตามลำดับ ซึ่งได้ผลการทดลอง ค่าสถิติพื้นฐานตามตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 10kHz a2b2L5, a2b2L10 และ a2b2L15

IDC Type	Water mixes in milk raw (10^{-6} F)		Transfer Function (10^{-6} F)	R^2
	0%	50%		
a2b2L5	0.90	1.69	$y = 1.307x + 1.0692$	0.9064
a2b2L10	1.25	1.81	$y = 1.0533x + 1.417$	0.5974
a2b2L15	1.21	2.22	$y = 2.0152x + 1.1992$	0.9916

ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบทั้ง 3 ครั้ง สามารถเขียนอยู่ในรูปเชิงเส้นได้ดังภาพที่ 38 เพื่อหาสมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)



ภาพที่ 38 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 10kHz

a2b2L5, a2b2L10 และ a2b2L15

จากการทดสอบ ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 10kHz ขนาดความกว้างของ ซี 2 mm. ความยาวของซี (L) ต่างกัน 3 ขนาด คือ 5 mm., 10 mm. และ 15 mm. ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการปนน้ำในนม ได้ผลดังนี้

a2b2L5 การทดสอบในนมดิบที่ไม่มีการผสมน้ำเพิ่มมีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 0.90 ไมโครฟารัด และ การทดสอบในนมดิบที่มีการผสมน้ำเพิ่ม 50% มีค่าความจุทางไฟฟ้า มากที่สุด เท่ากับ 1.60 ไมโครฟารัด สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) มีค่าเท่ากับ

$$y = 1.307x + 1.0692 \text{ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R}^2\text{) ที่ } 0.9064$$

a2b2L10 การทดสอบในนมดิบที่ไม่มีการผสมน้ำเพิ่มมีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 1.28 ไมโครฟารัด และ การทดสอบในนมดิบที่มีการผสมน้ำเพิ่ม 25% มีค่าความจุทางไฟฟ้า มากที่สุด เท่ากับ 1.91 ไมโครฟารัด สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) มีค่าเท่ากับ

$$y = 1.0533x + 1.417 \text{ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R}^2\text{) ที่ } 0.5974$$

a2b2L15 การทดสอบในนมดิบที่ไม่มีการผสมน้ำเพิ่มมีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 1.21 ไมโครฟารัด และ การทดสอบในนมดิบที่มีการผสมน้ำเพิ่ม 50% มีค่าความจุทางไฟฟ้า มากที่สุด เท่ากับ 2.22 ไมโครฟารัด สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) มีค่าเท่ากับ

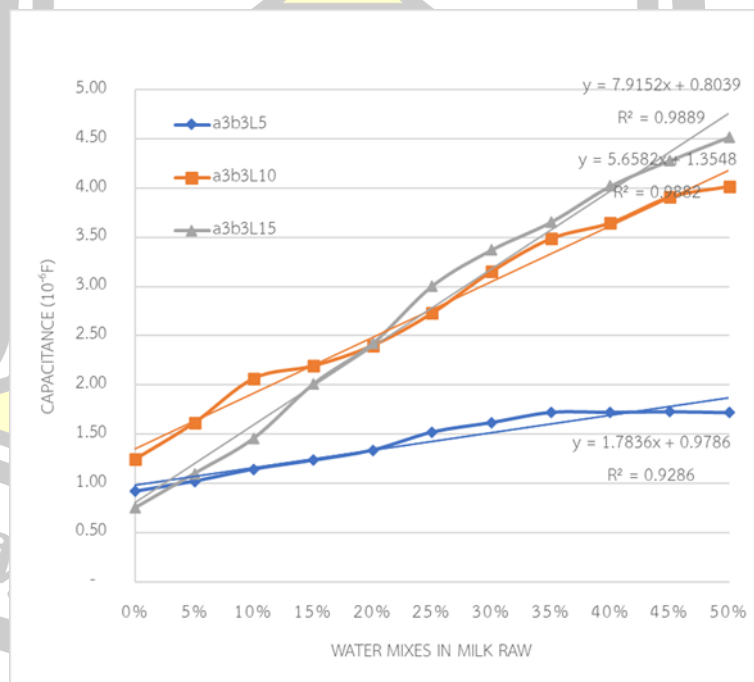
$$y = 2.0152x + 1.1992 \text{ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R}^2\text{) ที่ } 0.9916$$

6) ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือปนน้ำใน นํ้านมดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ขั้ว ที่ความถี่ 10 kHz ขนาดความกว้างของ ซี่ 3 mm. ความยาวของซี่ (L) ต่างกัน 3 ขนาด คือ 5 mm., 10 mm. และ 15 mm. (a3b3L5, a3b3L10 และ a3b3L15) ตามลำดับ ซึ่งได้ผลการทดลอง ค่าสถิติพื้นฐานตามตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 10kHz a3b3L5, a3b3L10 และ a3b3L15

IDC Type	Water mixes in milk raw ($10^{-6}F$)		Transfer Function ($10^{-6}F$)	R ²
	0%	50%		
a3b3L5	0.92	1.72	$y = 1.7836x + 0.9786$	0.9286
a3b3L10	1.24	4.02	$y = 5.6582x + 1.3548$	0.9882
a3b3L15	0.75	4.52	$y = 7.9152x + 0.8039$	0.9889

ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบทั้ง 3 ครั้ง สามารถเขียนอยู่ในรูปเชิงเส้นได้ดังภาพที่ 39 เพื่อหาสมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R²)



ภาพที่ 39 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 10kHz a3b3L5, a3b3L10 และ a3b3L15

จากการทดสอบ ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 10kHz ขนาดความกว้างของ ซี 2 mm. ความยาวของซี (L) ต่างกัน 3 ขนาด คือ 5 mm., 10 mm. และ 15 mm. ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการปนน้ำในน้ำมัน ได้ผลดังนี้

a3b3L5 การทดสอบในน้ำมันดิบที่ไม่มีการผสมน้ำเพิ่มมีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 0.92 ไมโครฟารัด และ การทดสอบในน้ำมันดิบที่มีการผสมน้ำเพิ่ม 50% มีค่าความจุทางไฟฟ้า มากที่สุด เท่ากับ 1.72 ไมโครฟารัด สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) มีค่าเท่ากับ

$$y = 1.7836x + 0.9786 \text{ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R}^2\text{) ที่ } 0.9286$$

a3b3L10 การทดสอบในน้ำมันดิบที่ไม่มีการผสมน้ำเพิ่มมีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 1.24 ไมโครฟารัด และ การทดสอบในน้ำมันดิบที่มีการผสมน้ำเพิ่ม 50% มีค่าความจุทางไฟฟ้า มากที่สุด เท่ากับ 4.02 ไมโครฟารัด สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) มีค่าเท่ากับ

$$y = 5.6582x + 1.3548 \text{ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R}^2\text{) ที่ } 0.9882$$

a3b3L15 การทดสอบในน้ำมันดิบที่ไม่มีการผสมน้ำเพิ่มมีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 0.75 ไมโครฟารัด และ การทดสอบในน้ำมันดิบที่มีการผสมน้ำเพิ่ม 50% มีค่าความจุทางไฟฟ้า มากที่สุด เท่ากับ 4.52 ไมโครฟารัด สมการของเส้นแนวโน้ม (Transfer Function) มีค่าเท่ากับ

$$y = 7.9152x + 0.8039 \text{ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R}^2\text{) ที่ } 0.9889$$

4.3.2) วิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมันดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง

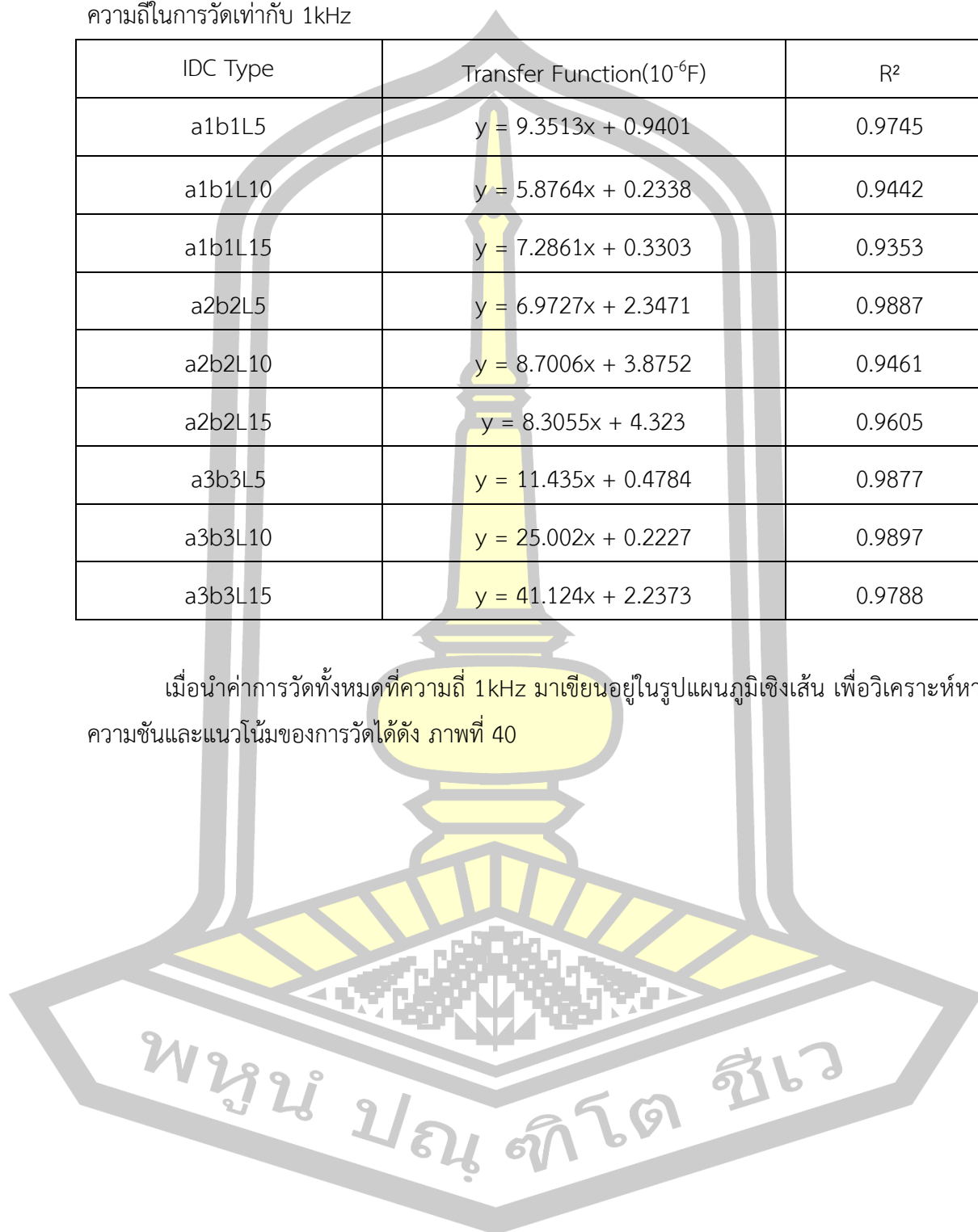
1) การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมันดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง โดยใช้ความถี่ในการวัดเท่ากับ 1kHz เพื่อวิเคราะห์ค่าความชันของแผนภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ต่อสัดส่วนการปนน้ำในน้ำมันดิบที่เพิ่มขึ้น เพื่อหาค่าความเชื่อมั่นที่เกิดขึ้นจากการวัดระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ต่อสัดส่วนการปนน้ำในน้ำมันดิบ หรือค่า R-Square ตามตารางที่ 15

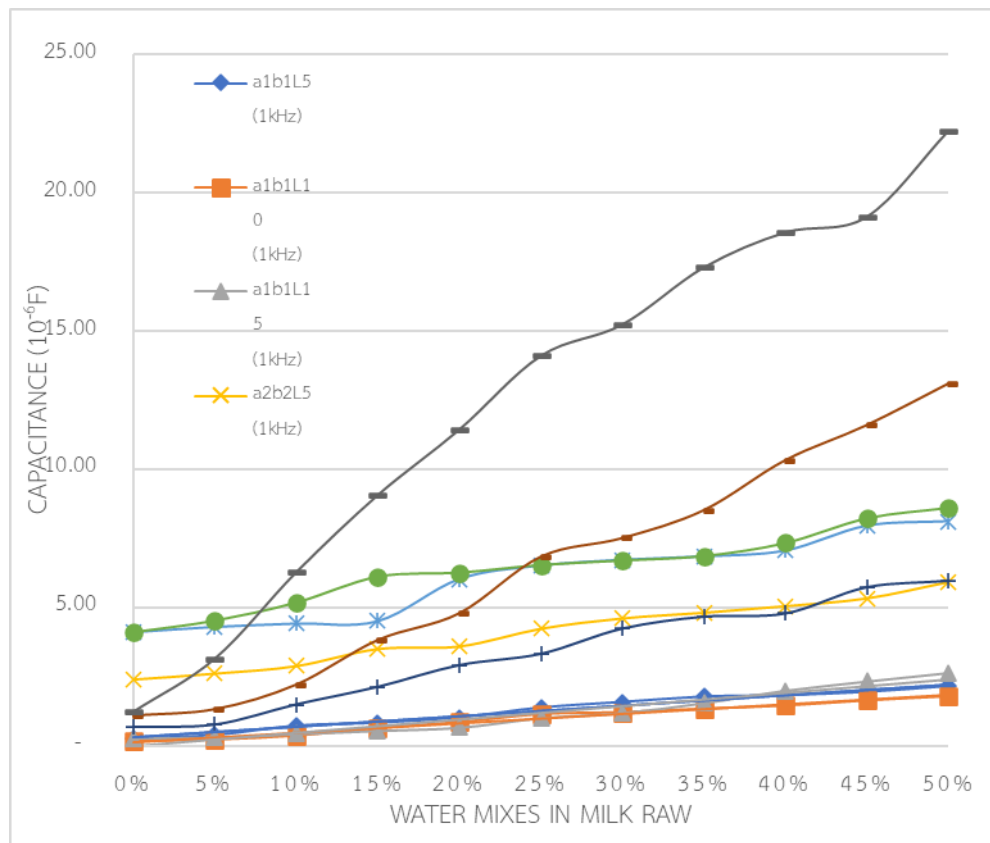
พูน ปณ ทิโต ชเว

ตารางที่ 15 ค่าเส้นแนวโน้มและค่า R-Square ของตัวรับรู้อินเทอร์ดิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง โดยใช้ความถี่ในการวัดเท่ากับ 1kHz

IDC Type	Transfer Function($10^{-6}F$)	R ²
a1b1L5	$y = 9.3513x + 0.9401$	0.9745
a1b1L10	$y = 5.8764x + 0.2338$	0.9442
a1b1L15	$y = 7.2861x + 0.3303$	0.9353
a2b2L5	$y = 6.9727x + 2.3471$	0.9887
a2b2L10	$y = 8.7006x + 3.8752$	0.9461
a2b2L15	$y = 8.3055x + 4.323$	0.9605
a3b3L5	$y = 11.435x + 0.4784$	0.9877
a3b3L10	$y = 25.002x + 0.2227$	0.9897
a3b3L15	$y = 41.124x + 2.2373$	0.9788

เมื่อนำค่าการวัดทั้งหมดที่ความถี่ 1kHz มาเขียนอยู่ในรูปแผนภูมิเชิงเส้น เพื่อวิเคราะห์หาความชันและแนวโน้มของการวัดได้ดัง ภาพที่ 40





ภาพที่ 40 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 1kHz

จากตารางที่ 15 และภาพที่ 40 ค่าเส้นแนวโน้มและค่า R-Square ของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 1 kHz พบว่า

- ค่าความชันของแผนภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ต่อสัดส่วนการปนน้ำในน้ำนมดิบ มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มน้อยที่สุด คือขนาดของตัวรับรู้อ a1b1L10 มีค่าเท่ากับ $y = 5.8764x + 0.2338$

- ค่าความชันของแผนภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ต่อสัดส่วนการปนน้ำในน้ำนมดิบ มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มมากที่สุด คือขนาดของตัวรับรู้อ a3b3L10 มีค่าเท่ากับ $41.12x+2.24$

- ค่าความเชื่อมั่นที่เกิดขึ้นจากการวัดระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ต่อสัดส่วนการปนน้ำในน้ำนมดิบ หรือค่า R-Square น้อยที่สุด คือขนาดของตัวรับรู้อ a1b1L10 มีค่าเท่ากับ 0.9442

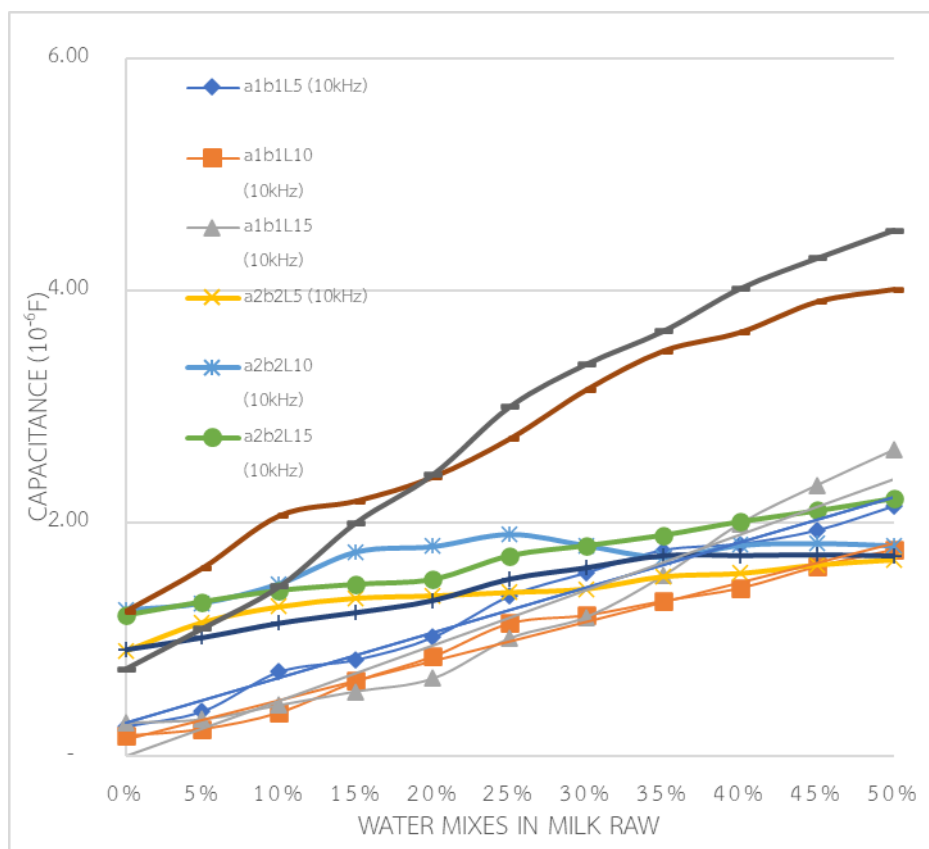
- ค่าความเชื่อมั่นที่เกิดขึ้นจากการวัดระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ต่อสัดส่วนการปนน้ำในน้ำมันดิบ หรือค่า R-Square มากที่สุด คือขนาดของตัวรับรู้ a3b3L10 มีค่าเท่ากับ 0.9897

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมันดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง โดยใช้ความถี่ในการวัดเท่ากับ 10kHz เพื่อวิเคราะห์ค่าความชันของแผนภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ต่อสัดส่วนการปนน้ำในน้ำมันดิบที่เพิ่มขึ้น เพื่อหาค่าความเชื่อมั่นที่เกิดขึ้นจากการวัดระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ต่อสัดส่วนการปนน้ำในน้ำมันดิบ หรือค่า R-Square ตามตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ค่าเส้นแนวโน้มและค่า R-Square ของตัวรับรู้อินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง โดยใช้ความถี่ในการวัดเท่ากับ 10kHz

IDC Type	Transfer Function($10^{-6}F$)	R ²
a1b1L5	$y = 3.8835x + 0.2861$	0.9821
a1b1L10	$y = 3.3671x + 0.1412$	0.9833
a1b1L15	$y = 4.7678x$	0.9820
a2b2L5	$y = 1.307x + 1.0692$	0.9064
a2b2L10	$y = 1.0533x + 1.417$	0.5974
a2b2L15	$y = 2.0152x + 1.1992$	0.9916
a3b3L5	$y = 1.7836x + 0.9786$	0.9286
a3b3L10	$y = 5.6582x + 1.3548$	0.9882
a3b3L15	$y = 7.9152x + 0.8039$	0.9889

เมื่อนำค่าการวัดทั้งหมดที่ความถี่ 10kHz มาเขียนอยู่ในรูปแผนภูมิเชิงเส้น เพื่อวิเคราะห์หาความชันและแนวโน้มของการวัดได้ดัง ภาพที่ 41



ภาพที่ 41 ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 10kHz

จากตารางที่ 16 และภาพที่ 41 ค่าเส้นแนวโน้มและค่า R-Square ของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ที่ความถี่ 10 kHz พบว่า

- ค่าความชันของแผนภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ต่อสัดส่วนการปนน้ำในน้ำนมดิบ มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มน้อยที่สุด คือขนาดของตัวรับรู้อ a2b2L10 มีค่าเท่ากับ $y = 1.0533x + 1.417$

- ค่าความชันของแผนภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ต่อสัดส่วนการปนน้ำในน้ำนมดิบ มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มมากที่สุด คือขนาดของตัวรับรู้อ a3b3L15 มีค่าเท่ากับ $7.9152x + 0.8039$

- ค่าความเชื่อมั่นที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ต่อสัดส่วนการปนน้ำในน้ำนมดิบ หรือค่า R-Square น้อยที่สุด คือขนาดของตัวรับรู้อ a2b2L10 มีค่าเท่ากับ 0.5974

- ค่าความเชื่อมั่นที่เกิดขึ้นจากการวัดระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้อินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ทาง ต่อสัดส่วนการปนน้ำในน้ำนมดิบ หรือค่า R-Square มากที่สุด คือขนาดของตัวรับรู้ a2b2L15 มีค่าเท่ากับ 0.9916

4.3.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้า ค่าความยาวของซี่ที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนม

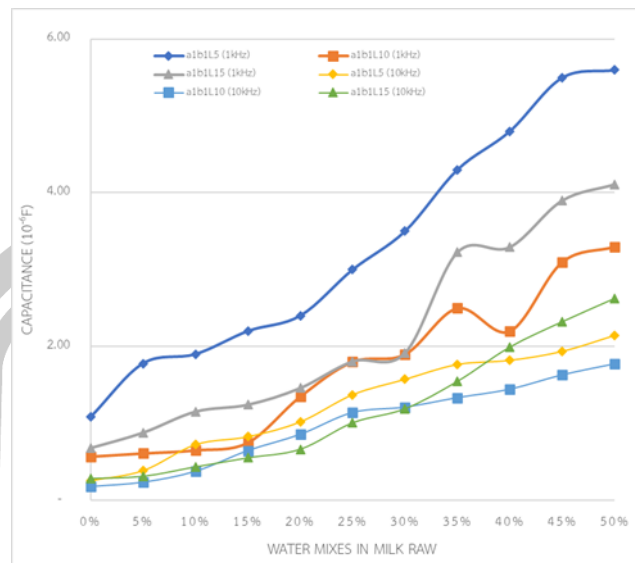
1) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้า ค่าความยาวของซี่ที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนม ที่ความหนาซี่และระยะระหว่างซี่ เท่ากับ 1 mm. ได้ค่าตามตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวของซี่ที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนม

IDC Type	Water mixes in milk raw (10^{-6} F)		Transfer Function (10^{-6} F)	R ²
	0%	50%		
a1b1L5 (1kHz)	1.08	5.60	$y = 9.3513x + 0.9401$	0.9745
a1b1L10 (1kHz)	0.57	3.30	$y = 5.8764x + 0.2338$	0.9442
a1b1L15 (1kHz)	0.68	4.11	$y = 7.2861x + 0.3303$	0.9353
a1b1L5(10kHz)	0.26	2.14	$y = 3.8835x + 0.2861$	0.9821
a1b1L10(10kHz)	0.18	1.77	$y = 3.3671x + 0.1412$	0.9833
a1b1L15(10kHz)	0.28	2.63	$y = 4.7678x$	0.9820

ค่าที่ได้จากการทดสอบเพื่อนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้า ค่าความยาวของซี่ที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนม ได้แผนภูมิตามภาพที่ 42

พหุ ประถมศึกษา



ภาพที่ 42 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวของซีทีที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในนํ้านม ที่ความหนาซีทีและระยะระหว่างซีที เท่ากับ 1 mm.

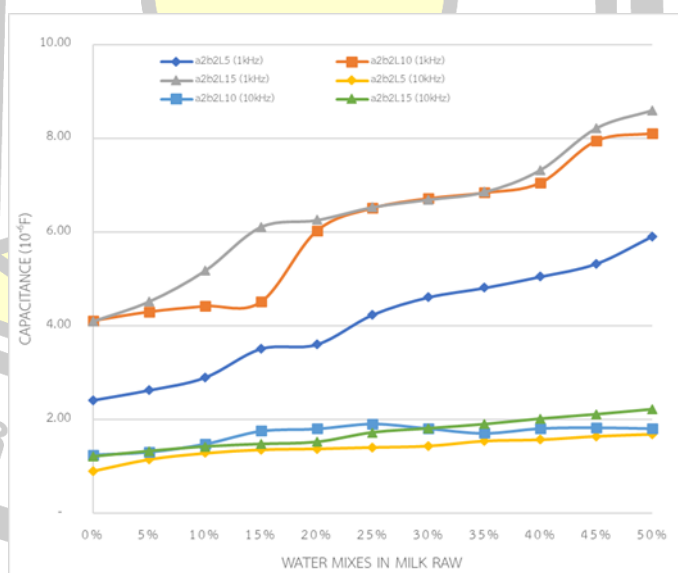
จากตารางที่ 17 และ ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ของค่าความยาวของซีทีที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในนํ้านม ที่ความหนาซีทีและระยะระหว่างซีที เท่ากับ 1 mm. พบว่า ความหนาซีที (a) และระยะระหว่างซีที (b) เท่ากับ 1 mm. วัดที่ความถี่ 1 kHz และความถี่ 10 kHz ค่าความจุไฟฟ้าที่มีค่าสูงที่สุดคือ a1b1L5 เท่ากับ 5.6 ไมโครฟารัด ที่ความถี่ 1 kHz ลำดับถัดมาคือ a1b1L15 เท่ากับ 4.11 ไมโครฟารัด ที่ความถี่ 1 kHz ลำดับถัดมาคือ a1b1L10 เท่ากับ 3.33 ไมโครฟารัด ที่ความถี่ 1 kHz ลำดับถัดมาคือ a1b1L15 เท่ากับ 2.63 ไมโครฟารัด ที่ความถี่ 10 kHz ลำดับถัดมาคือ a1b1L5 เท่ากับ 2.14 ไมโครฟารัด ที่ความถี่ 10 kHz ค่าความจุไฟฟ้าที่มีค่าสูงที่สุดคือ a1b1L10 เท่ากับ 1.77 ไมโครฟารัด ที่ความถี่ 10 kHz ค่าความชันของเส้นแนวโน้มสูงสุด คือ a1b1L5 เท่ากับ $y = 9.3513x + 0.9401$ ค่าความเชื่อมั่น 0.9745 ค่าความชันของเส้นแนวโน้มลำดับถัดมา คือ a1b1L15 ที่ความถี่ 1 kHz เท่ากับ $y = 7.2861x + 0.3303$ ค่าความเชื่อมั่น 0.9353 ค่าความชันของเส้นแนวโน้มลำดับถัดมา คือ a1b1L10 ที่ความถี่ 1 kHz เท่ากับ $y = 5.8764x + 0.2338$ ค่าความเชื่อมั่น 0.9442 ค่าความชันของเส้นแนวโน้มลำดับถัดมา คือ a1b1L10 ที่ความถี่ 1 kHz เท่ากับ $y = 5.8764x + 0.2338$ ค่าความเชื่อมั่น 0.9442 ค่าความชันของเส้นแนวโน้มลำดับถัดมา คือ a1b1L15 ที่ความถี่ 10 kHz เท่ากับ $y = 4.7678x$ ค่าความเชื่อมั่น 0.9820 ค่าความชันของเส้นแนวโน้มลำดับถัดมา คือ a1b1L5 ที่ความถี่ 10 kHz เท่ากับ $y = 3.8835x + 0.2861$ ค่าความเชื่อมั่น 0.9821 และค่าความชันของเส้นแนวโน้มต่ำที่สุด คือ a1b1L10 ที่ความถี่ 10 kHz เท่ากับ $y = 3.3671x + 0.1412$ ค่าความเชื่อมั่น 0.9833

2. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้า ค่าความยาวของซี่ที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมัน ที่ความหนาซี่และระยะห่างระหว่างซี่ เท่ากับ 2 mm. ได้ค่าตามตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวของซี่ที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมัน

IDC Type	Water mixes in milk raw (10^{-6} F)		Transfer Function (10^{-6} F)	R ²
	0%	50%		
a2b2L5(1kHz)	2.41	5.91	$y = 6.9727x + 2.3471$	0.9887
a2b2L10(1kHz)	4.11	8.11	$y = 8.7006x + 3.8752$	0.9461
a2b2L15(1kHz)	4.10	8.60	$y = 8.3055x + 4.323$	0.9605
a2b2L5 (10kHz)	0.90	1.69	$y = 1.307x + 1.0692$	0.9064
a2b2L10 (10kHz)	1.25	1.81	$y = 1.0533x + 1.417$	0.5974
a2b2L15(10kHz)	1.21	2.22	$y = 2.0152x + 1.1992$	0.9916

ค่าที่ได้จากการทดสอบเพื่อนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้า ค่าความยาวของซี่ที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมัน ได้แผนภูมิตามภาพที่ 43



ภาพที่ 43 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวของซี่ที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมัน ที่ความหนาซี่และระยะระหว่างซี่ เท่ากับ 2 mm.

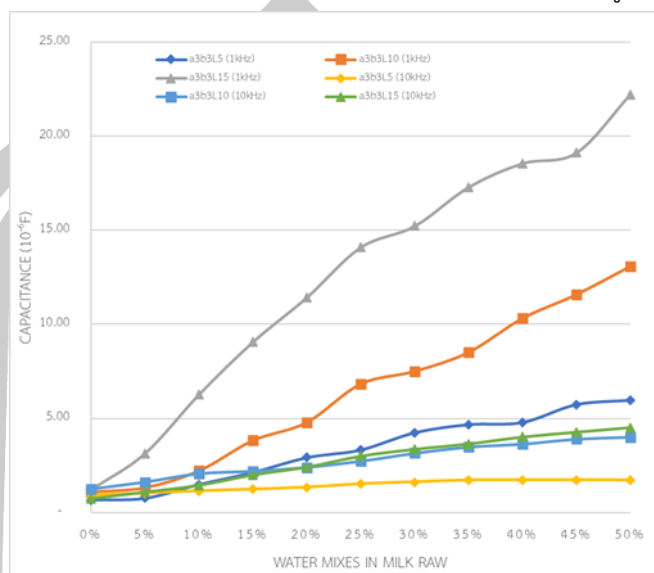
จากตารางที่ 18 และ ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ของค่าความยาวของซี่ที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนม ที่ความหนาซี่และระยะระหว่างซี่ เท่ากับ 2 mm. พบว่า ความหนาซี่ (a) และระยะระหว่างซี่ (b) เท่ากับ 2 mm. วัดที่ความถี่ 1 kHz และความถี่ 10 kHz ค่าความจุไฟฟ้าที่มีค่าสูงที่สุดคือ a2b2L15 เท่ากับ 8.60 ไมโครฟารัด ที่ความถี่ 1 kHz ลำดับถัดมาคือ a2b2L10 เท่ากับ 8.11 ไมโครฟารัด ที่ความถี่ 1 kHz ลำดับถัดมาคือ a2b2L10 เท่ากับ 5.91 ไมโครฟารัด ที่ความถี่ 1 kHz ลำดับถัดมาคือ a2b2L15 เท่ากับ 2.22 ไมโครฟารัด ที่ความถี่ 10 kHz ลำดับถัดมาคือ a2b2L10 เท่ากับ 1.81 ไมโครฟารัด ที่ความถี่ 10 kHz ค่าความจุไฟฟ้าที่มีค่าต่ำที่สุดคือ a2b2L5 เท่ากับ 1.69 ไมโครฟารัด ที่ความถี่ 10 kHz ค่าความชันของเส้นแนวโน้มสูงสุด คือ a2b2L10 ที่ความถี่ 1 kHz เท่ากับ $y = 8.7006x + 3.8752$ ค่าความเชื่อมั่น 0.9461 ค่าความชันของเส้นแนวโน้มลำดับถัดมา คือ a2b2L15 ที่ความถี่ 1 kHz เท่ากับ $y = 8.3055x + 4.323$ ค่าความเชื่อมั่น 0.9605 ค่าความชันของเส้นแนวโน้มลำดับถัดมา คือ a2b2L5 ที่ความถี่ 1 kHz เท่ากับ $y = 6.9727x + 2.3471$ ค่าความเชื่อมั่น 0.9887 ค่าความชันของเส้นแนวโน้มลำดับถัดมา คือ a2b2L15 ที่ความถี่ 10 kHz เท่ากับ $y = 2.0152x + 1.1992$ ค่าความเชื่อมั่น 0.9916 ค่าความชันของเส้นแนวโน้มลำดับถัดมา คือ a2b2L5 ที่ความถี่ 10 kHz เท่ากับ $y = 1.307x + 1.0692$ ค่าความเชื่อมั่น 0.9064 ค่าความชันของเส้นแนวโน้มต่ำสุด คือ a1b1L5 ที่ความถี่ 10 kHz เท่ากับ $y = 1.0533x + 1.417$ ค่าความเชื่อมั่น 0.5974

3. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้า ค่าความยาวของซี่ที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนม ที่ความหนาซี่และระยะห่างระหว่างซี่ เท่ากับ 3 mm. ได้ค่าตามตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวของซี่ที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนม

IDC Type	Water mixes in milk raw (10^{-6}F)		Transfer Function (10^{-6}F)	R^2
	0%	50%		
a3b3L5(1kHz)	0.66	5.98	$y = 11.435x + 0.4784$	0.9877
a3b3L10(1kHz)	1.10	13.10	$y = 25.002x + 0.2227$	0.9897
a3b3L15(1kHz)	1.22	22.23	$y = 41.124x + 2.2373$	0.9788
a3b3L5(10kHz)	0.92	1.72	$y = 1.7836x + 0.9786$	0.9286
a3b3L10(10kHz)	1.24	4.02	$y = 5.6582x + 1.3548$	0.9882
a3b3L15(10kHz)	0.75	4.52	$y = 7.9152x + 0.8039$	0.9889

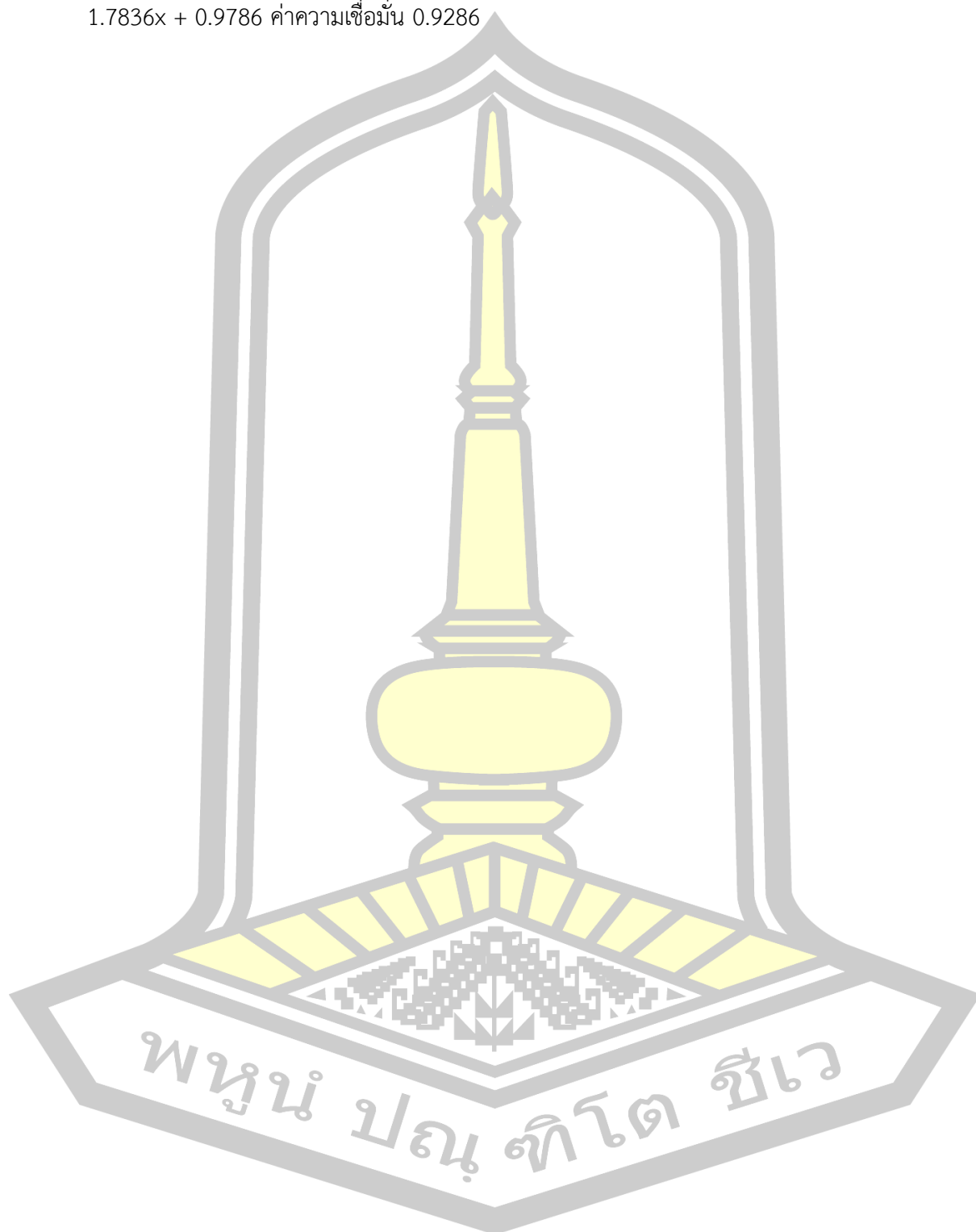
ค่าที่ได้จากการทดสอบเพื่อนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้า ค่าความยาวของซีที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมัน ได้แผนภูมิตามภาพที่ 44



ภาพที่ 44 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวของซีที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมัน ที่ความหนาซีและระยะระหว่างซี เท่ากับ 3 mm.

จากตารางที่ 19 และ ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ของค่าความยาวของซีที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำมัน ที่ความหนาซีและระยะระหว่างซี เท่ากับ 3 mm. พบว่าความหนาซี (a) และระยะระหว่างซี (b) เท่ากับ 3 mm. วัดที่ความถี่ 1 kHz และความถี่ 10 kHz ค่าความจุไฟฟ้าที่มีค่าสูงที่สุดคือ a3b3L10 เท่ากับ 22.23 ไมโครฟารัด ที่ความถี่ 1 kHz ลำดับถัดมาคือ a3b3L15 เท่ากับ 13.10 ไมโครฟารัด ที่ความถี่ 1 kHz ลำดับถัดมาคือ a3b3L5 เท่ากับ 5.98 ไมโครฟารัด ที่ความถี่ 1 kHz ลำดับถัดมาคือ a3b3L15 เท่ากับ 4.52 ไมโครฟารัด ที่ความถี่ 10 kHz ลำดับถัดมาคือ a3b3L10 เท่ากับ 4.02 ไมโครฟารัด ที่ความถี่ 10 kHz ค่าความจุไฟฟ้าที่มีค่าต่ำที่สุดคือ a3b3L5 เท่ากับ 1.72 ไมโครฟารัด ที่ความถี่ 10 kHz ค่าความชันของเส้นแนวโน้มสูงสุด คือ a3b3L15 ที่ความถี่ 1 kHz เท่ากับ $y = 41.124x + 2.2373$ ค่าความเชื่อมั่น 0.9788 ค่าความชันของเส้นแนวโน้มลำดับถัดมา คือ a3b3L10 ที่ความถี่ 1 kHz เท่ากับ $y = 25.002x + 0.2227$ ค่าความเชื่อมั่น 0.9897 ค่าความชันของเส้นแนวโน้มลำดับถัดมา คือ a3b2x3L5 ที่ความถี่ 1 kHz เท่ากับ $y = 11.435x + 0.4784$ ค่าความเชื่อมั่น 0.9877 ค่าความชันของเส้นแนวโน้มลำดับถัดมา คือ a3b3L15 ที่ความถี่ 10 kHz เท่ากับ $y = 7.9152x + 0.8039$ ค่าความเชื่อมั่น 0.9889 ค่าความชันของเส้นแนวโน้มลำดับถัดมา คือ a3b3L10 ที่ความถี่ 10 kHz เท่ากับ $y = 5.6582x + 1.3548$ ค่า

ความเชื่อมั่น 0.9882 ค่าความชันของเส้นแนวโน้มต่ำสุด คือ $a3b3L5$ ที่ความถี่ 10 kHz เท่ากับ $y = 1.7836x + 0.9786$ ค่าความเชื่อมั่น 0.9286



บทที่ 5

สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการประยุกต์ใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าสำหรับการประมาณค่าปริมาณการเจือปนของน้ำในน้ำนมดิบ โดยผู้วิจัยได้สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะตามลำดับดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวัดค่าการปนน้ำในน้ำนมดิบด้วยตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง โดยได้ทำการทดลองคือการวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้ทั้ง 9 รูปแบบ ที่มีขนาดของซี่ 1 mm., 2 mm. และ 3 mm. ระยะห่างระหว่างซี่ 1 mm., 2 mm. และ 3 mm. ความยาวของซี่ 5 mm., 10 mm. และ 15 mm. จำนวนซี่รวมทั้งสิ้น 40 ซี่ ค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุ $\epsilon_r = 2.8$ โดยออกแบบและสร้างขึ้นจำนวนรวม 9 รูปแบบ ทำการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ โดยวัดค่าการเก็บประจุจากเครื่องวัด LCR Meter ยี่ห้อ KEYSIGHT รุ่น E4980AL ทำการเก็บข้อมูล โดยแต่ละขนาดจะวัดค่าการเก็บประจุ ที่ความถี่ 1 kHz และ 10kHz ทำการทดสอบแต่ละย่านวัดซ้ำกันจุดละ 3 ซ้ำและนำมาวิเคราะห์ในเชิงสถิติ การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เพื่อหาสมการเชิงเส้นตรง ที่เกิดขึ้น ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนมดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง สรุปได้ดังนี้

1) ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนมดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง โดยปริมาณน้ำที่เจือปนในน้ำนมดิบมีอิทธิพลต่อความจุไฟฟ้า โดยพบว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า คือ ค่าความจุไฟฟ้าของน้ำนมดิบที่ไม่มีเจือปนน้ำน้อยกว่าน้ำนมดิบที่เจือปนน้ำ และค่าความถี่ที่ใช้ในการวัดส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้

2) ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนมดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้างพบว่า ที่ทุกระดับเปอร์เซ็นต์การเจือปนน้ำในน้ำนมดิบ จะมีอิทธิพลต่อค่าความจุทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และแปรผันตรงต่อเปอร์เซ็นต์ของปริมาณการเจือปนของน้ำในน้ำนมดิบจาก 0% - 50% ค่าความจุทางไฟฟ้าที่ได้จากตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง ที่ทดลองช่วงความถี่ต่ำจะมีค่าความจุทางไฟฟ้ามากกว่าที่ทดลองช่วงความถี่สูง โดยค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำมีค่าความแปรผันมากกว่าที่ความถี่สูง

3) ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้า ค่าความยาวของซี่ที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ กับปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนม พบว่า ตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง ที่มีขนาดของซี่และระยะห่างระหว่างซี่ที่น้อย จะมีค่าความจุไฟฟ้าที่น้อยกว่าตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิทัล

คาปาซิเตอร์ 2 ข้าง ที่มีขนาดของซีและระยะห่างระหว่างซีที่มาก และความยาวของซีตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้างที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นด้วย

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย สามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

1) การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำในน้ำนมดิบ พบว่า คุณภาพของน้ำนมดิบที่มีการเจือปนน้ำ ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป โดยการเจือปนของน้ำในน้ำนมดิบในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าน้ำนมดิบที่เจือปนน้ำ เนื่องจาก ค่าความจุทางไฟฟ้า ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเปอร์เซ็นต์การเจือปนน้ำนั้น เกิดจากค่าไดอิเล็กทริกของน้ำนมดิบมีค่าต่ำกว่าน้ำ เมื่อมีการเติมน้ำเพิ่มขึ้น ค่าไดอิเล็กทริกจึงเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ สรวุฒิ บุญเกิดรัมย์(2559) ที่นำเสนอตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง เพื่อวัดค่าระดับน้ำ และเมื่อนำไปวัดค่าระดับน้ำพบว่า ค่าความจุทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ M.F. Marbrook (2002:136) ได้นำเสนอกระบวนการวัดคุณภาพของน้ำนม พบว่า คุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำในน้ำนม คือค่าความต้านทานจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มน้ำในน้ำนม M.F. Marbrook (2003) เทคนิคสำหรับการตรวจสอบค่าความจุไฟฟ้าของนมอิมตัว เมื่อทำการเพิ่มน้ำพบว่า การเพิ่มสิ่งปลอมปน เช่น น้ำเพียงเล็กน้อย (2-3%) จะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง

2) การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของปริมาณการเจือปนน้ำในน้ำนมดิบโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์ 2 ข้าง จากการศึกษาพบว่า การวัดค่าความจุทางไฟฟ้าของน้ำนมดิบที่มีการเจือปนน้ำ ร้อยละ 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 และ 50 โดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัล พบว่าในการวัดค่าความจุทางไฟฟ้าของน้ำนมดิบที่มีการเจือปนน้ำ ในเปอร์เซ็นต์การเจือปนน้ำที่ต่ำค่าความจุทางไฟฟ้าจะมีค่าต่ำและทำนองเดียวกับค่าความจุทางไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์การเจือปนน้ำที่เพิ่มมากขึ้น ในลักษณะแปรผันตรงต่อเปอร์เซ็นต์ของปริมาณการเจือปนของน้ำในน้ำนมดิบ

3) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้า ค่าความยาวของซีที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ ค่าความจุทางไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อ ขนาดของซีและความยาวของซีเพิ่มมากขึ้น โดยช่วงที่มีค่าความจุทางไฟฟ้ามากที่สุดคือ ขนาดซี 3 mm. ระยะห่างระหว่างซี 3 mm. และความยาวซี 15 mm. ซึ่งสอดคล้องกับ สิทธิศักดิ์ เรืองฤทธิ์ (2557) [32] ได้พัฒนาเทคนิคการตรวจสอบการปนน้ำในน้ำนมดิบโดยอิเล็กทรอนิกส์หิว พบว่า ค่าความจุทางไฟฟ้าของน้ำนมดิบจะเปลี่ยนแปลงไปกับปริมาณน้ำที่ถูกเติมลงในน้ำนมดิบ

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

1) จากผลการวิจัยพบว่า การเจือปนน้ำในน้ำนมดิบมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำนมดิบที่มีการเจือปนน้ำที่แตกต่างกันตามเปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นของน้ำนมดิบ

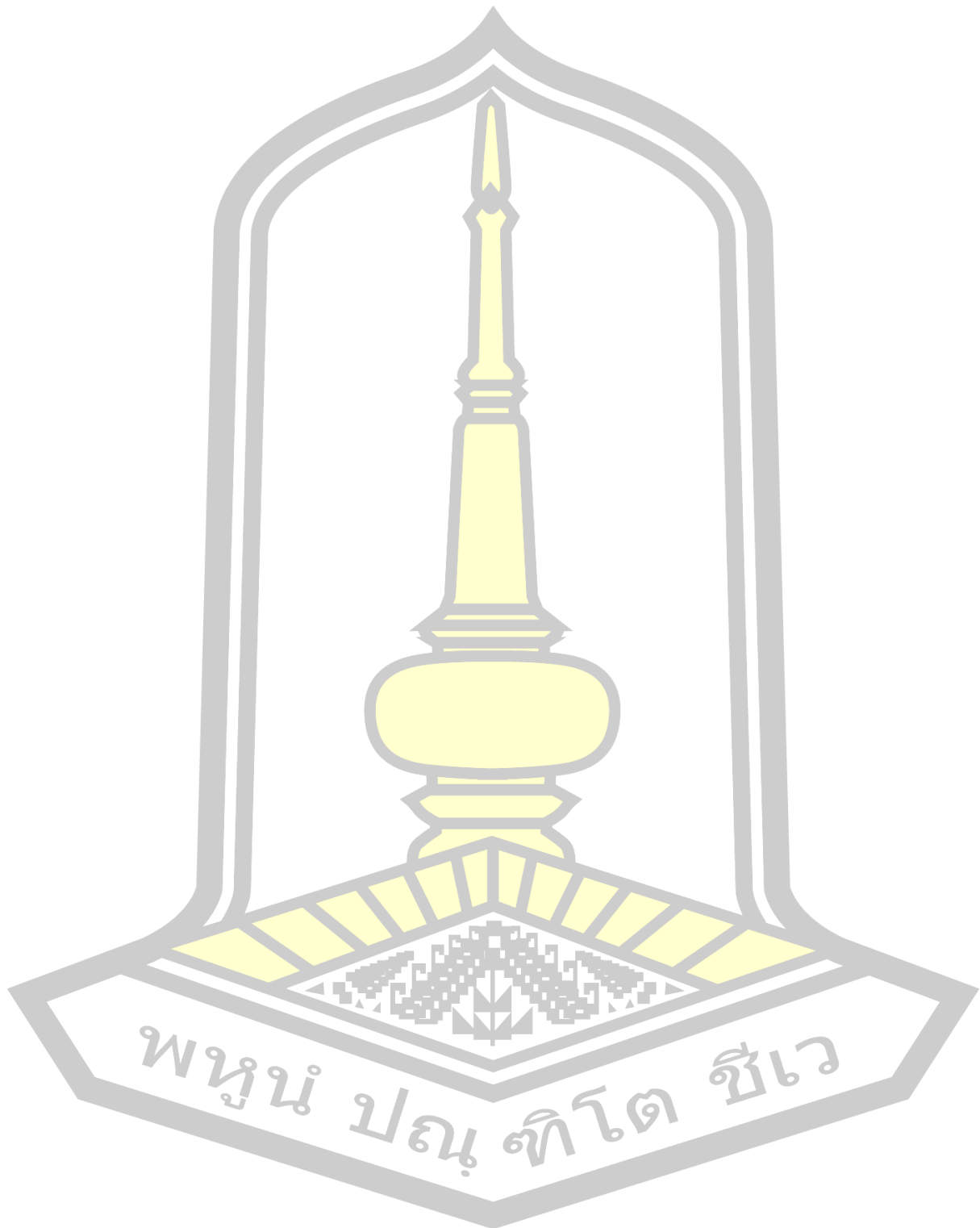
2) จากผลการวิจัยพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างการเจือปนของน้ำในน้ำนมดิบมีอิทธิพลต่อค่าความจุทางไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้า โดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัล 2 ขั้ว และมีความเหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาเพื่อสร้างเครื่องมือในการตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพของน้ำนมดิบ เพื่อให้เกษตรกรนำไปใช้ในการตรวจสอบน้ำนมดิบต่อไป

5.3.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

เพื่อความถูกต้องแม่นยำและมีประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าในการประมาณค่าปริมาณการเจือปนของน้ำในน้ำนมดิบให้ดียิ่งขึ้น ควรทำการศึกษาและทดลองน้ำนมที่มีอุณหภูมิที่มีความแตกต่างกัน เพื่อที่จะได้อุณหภูมิที่เหมาะสม ลักษณะภูมิประเทศในการเลี้ยง และปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำนมดิบในลักษณะต่างๆ ต่อไป เพื่อให้ได้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



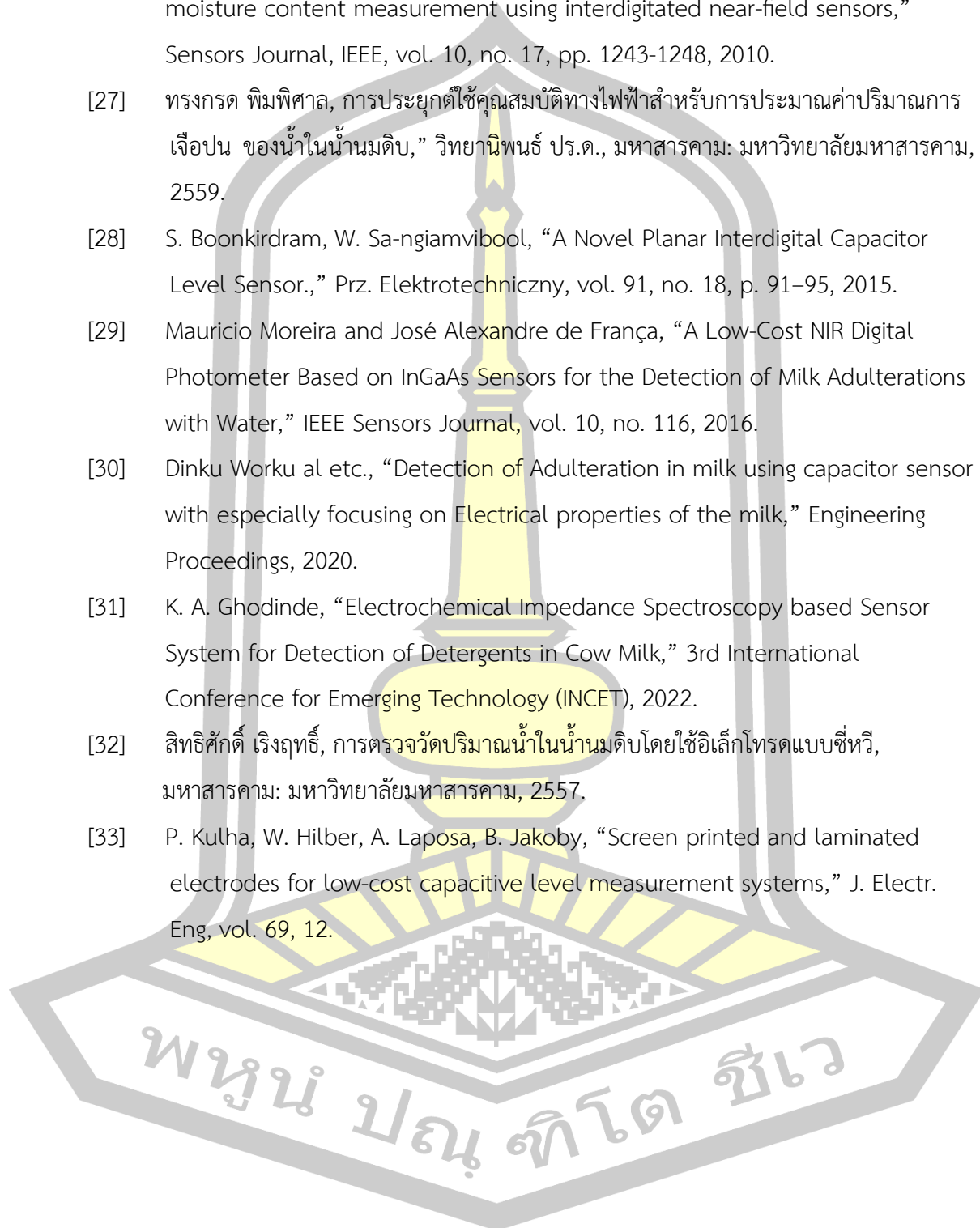
บรรณานุกรม



- [1] มกษ. 6003-2553, “นํ้านมโคดิบ,” สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, กรุงเทพฯ, 2553.
- [2] IDF Special Issue No. 9002, ใน Handbook on Milk Collection in Warm Developing Countries, Brussels, International Dairy Federation (IDF), 1990, pp. 57-58.
- [3] วิบูลย์ศักดิ์ กาวิละ และ วรรรณา ตั้งเจริญชัย, นมและผลิตภัณฑ์นม, กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์, 2531.
- [4] R. Jenness และ S. Patton, “Principles of dairy chemistry,” J. Chem. Educ., vol. 1, no.12, p. 274, 1960.
- [5] C. Z. Ratnayake WM, “ Trans, n–3, and n–6 fatty acids in Canadian human milk. Lipids 1996;31(suppl):S279–82.,” Lipids, no.1 31, pp. 279-282, 1996.
- [6] P. F. Fox, P. L. H. McSweeney, Dairy Chemistry and Biochemistry, Springer Science & Business Media, 1998.
- [7] W. Horwitz, “Nomenclature for sampling in analytical chemistry,” Pure Appl. Chem., vol. 6, no. 162, pp. 1193-1208, 1990.
- [8] advanceinstrument, “advanceinstrument,” advanceinstrument, 1993.
[ออนไลน์]. Available: http://www.advanceinstrument.com/index_en.php.
- [9] GENEQ, GENEQ inc., 2004. [ออนไลน์]. Available: <https://geneq.com/en/company>.
- [10] Foss, “fossanalytics.com,” FOSS, [ออนไลน์]. Available: <https://www.fossanalytics.com/en>.
- [11] Takatoshi, U., “Method of apparatus for measuring freezing point depression using ultrasonic wave,” European Patent. Accession no. JP55042048, 1980.
- [12] S Mohanan, P G Thomas Panicker, Lilly Iype, M Laila, I Domini & RG Bindu, “A new ultrasonic method to detect chemical additives in branded milk,” Pramana, no.159, p. 525–529, 2002.
- [13] L. S. Ribeiro, Fabio Augusto Gentilin, J. D. França, A. Felício, M. B. D. M. França, “Development of a Hardware Platform for Detection,” IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, vol. 7, no. 165, pp. 1698-1706, 2016.

- [14] อรวอล เรืองจันทร์, “การศึกษาเปอร์เซ็นต์ไขมันและความถ่วงจำเพาะของน้ำนม จากแม่โคนมที่เลี้ยงในเขตอำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์,” วิทยาลัยเกษตรกรรมบุรีรัมย์, บุรีรัมย์, 2536.
- [15] แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม, “หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ,” 2535.
- [16] C. Alexander, M. Sadiku. P. Hall, Fundamentals of Electric Circuits: Fifth Edition, Prentice Hall, 2012.
- [17] B. Kumar, G. Rajita, N. Mandal, “A review on capacitive-type sensor for measurement of height of liquid level,” Measurement and Control (United Kingdom), Vol. 47, no. 17, p. 219–224, 2014.
- [18] (DoITPoMS), Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science, “Figure of a capacitor, one of the main applications of dielectric materials,” University of Cambridge, Cambridge, 2008.
- [19] ธิติพันธ์ ตะเกาน้อย , “ระบบฝ้าตรวจวัดระดับน้ำโดยใช้หัววัดอัจฉริยะแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิทีฟอิเล็กทรอนิกส์,” วิทยานิพนธ์ วศ.ม, 2555.
- [20] Yunzhi Huang al. etc., “How Different EEG References Influence Sensor Level Functional Connectivity Graphs,” Front Neurosci, 2017.
- [21] N. Angkawisittpan and T. Manasri, “Determination of sugar content in sugar solutions using interdigital capacitor sensor,” Measurement Science Review, vol. 12, no. 11, p. 8–13, 2012.
- [22] A. V. Mamishev, K. Sundara-Rajan, and F. Yang, “Interdigital sensors and transducers,” Proceedings of the IEEE, vol. 92, no. 15, p. 808–844, 2004.
- [23] SC Mukhopadhyay, CP Gooneratne, Serge Demidenko, G Sen Gupta, “Low cost sensing system for dairy products quality monitoring,” IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, pp. 244-249, 2005.
- [24] Luz M. Alonso.V. and Arturo Minor M., “Design and Construction of a System for Measuring the Concentration of Water in Milk,” CERMA '06, no. 12, p. 47–51, 2006.
- [25] R.H. Bhuiyan, R.A. Dougal, M. Ali, “Proximity coupled interdigitated sensors to detect insulation damage in power system cables,” IEEE Sensors Journal, vol. 7, no. 112, pp. 1589-1596, 2007.

- [26] M. A. Md Nazmul Alam and Rashad H Bhuiyan and Roger A Dougal, "Concrete moisture content measurement using interdigitated near-field sensors," *Sensors Journal, IEEE*, vol. 10, no. 17, pp. 1243-1248, 2010.
- [27] ทรงกรต พิมพิศาล, การประยุกต์ใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าสำหรับการประมาณค่าปริมาณการเจือปน ของน้ำในน้ำมันดิบ," *วิทยานิพนธ์ ปร.ด., มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 2559.
- [28] S. Boonkirdram, W. Sa-ngiamvibool, "A Novel Planar Interdigital Capacitor Level Sensor.," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 91, no. 18, p. 91-95, 2015.
- [29] Mauricio Moreira and José Alexandre de França, "A Low-Cost NIR Digital Photometer Based on InGaAs Sensors for the Detection of Milk Adulterations with Water," *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, no. 116, 2016.
- [30] Dinku Worku al etc., "Detection of Adulteration in milk using capacitor sensor with especially focusing on Electrical properties of the milk," *Engineering Proceedings*, 2020.
- [31] K. A. Ghodinde, "Electrochemical Impedance Spectroscopy based Sensor System for Detection of Detergents in Cow Milk," *3rd International Conference for Emerging Technology (INCET)*, 2022.
- [32] สิริศักดิ์ เรืองฤทธิ์, การตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันดิบโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์, *มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 2557.
- [33] P. Kulha, W. Hilber, A. Laposa, B. Jakoby, "Screen printed and laminated electrodes for low-cost capacitive level measurement systems," *J. Electr. Eng*, vol. 69, 12.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	ณัทปภา จันทรโสม
วันเกิด	18 ตุลาคม 2524
สถานที่เกิด	จังหวัดขอนแก่น
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	246/71 หมู่ 6 ต.สำราญ อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	วิทยาลัยบัณฑิตเอเชีย
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2549 วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2558 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2566 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูนัน ปณุกิตโต ชีวะ