



การตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยางจากค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน
Detection of Contamination in Latex based on Complex Permittivity

ฮุดา โกสุมพันธ์
Huda Kosumphan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Computer Engineering

Prince of Songkla University

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำจากค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน

ผู้เขียน นางสาวสุตา โกสมพันธ์

สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.มิตรชัย จงเขียวชำนาญ)

.....ประธานกรรมการ
(ดร.เกียรติศักดิ์ วงษ์โสภนากุล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มิตรชัย จงเขียวชำนาญ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระวี พรหมหลวงศรี)

.....กรรมการ
(ดร.ไพโรจน์ วุ่นชุม)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มิตรชัย จงเขียวชำนาญ)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ
(นางสาวสุดา โกสุมพันธ์)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นางสาวฮุตา โกสุมพันธ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยางจากค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน
ผู้เขียน นางสาวฮุตา โกสุมพันธ์
สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยางจากสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน ได้นำตัวอย่างเซรามิกรีซที่ไดจากการปั่นน้ำยาง และตัวอย่างเซรามิกรีซที่ปลอมปนด้วยแป้งมันและแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ไปวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนในช่วงความถี่ 0.5 ถึง 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยโพรมิเซนเซอร์ที่ต่อกับเครื่องวิเคราะห์โครมข่ายอัตโนมัติ ในกรณีศึกษาพบว่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ความถี่ 1 GHz ของเซรามิกรีซและเซรามิกรีซที่มีสิ่งปลอมปนสามารถนำไปคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้า (σ), ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่ำ (ϵ_r), ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูง (ϵ_∞) และค่าเวลาผ่อนคลาย (τ) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสิ่งปลอมปนในน้ำยาง จากการทดสอบแบบจำลองที่สร้างขึ้นพบว่าสามารถใช้สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของน้ำยางในการตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยางได้ โดยได้ความถูกต้องร้อยละ 92

Thesis Title	Detection of Contamination in Latex based on Complex Permittivity
Author	Ms. Huda Kosumphon
Major Program	Computer Engineering
Academic Year	2016

ABSTRACT

This thesis proposes a mathematical model for detecting contaminated latex using complex permittivity. The pure serum samples were prepared by centrifuging field fresh latex samples while the contaminated samples were prepared by adding certain amount of cassava and CaCO_3 into the pure samples. Complex permittivity measurements in frequencies range 0.5-6 GHz at 25 °C were performed with Agilent 8510E dielectric probe kit equipped with an automatic network analyzer. From the measured complex permittivity of pure and contaminated serum samples at 1 GHz, their conductivity, static permittivity, high-frequency permittivity, and relaxation time can be calculated. These parameters are crucial for formulating a mathematical model for the pure and the contaminated samples which can be used for developing an algorithm to classify pure and contaminated samples. The model for detecting pure and contaminated samples was tested with complex permittivity of latex. The model achieve 92% of accuracy for detecting.

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินการวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มิตรชัย จงเขี้ยวชำนาญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำงาน ทั้งกระตุ้นให้ข้าพเจ้ามีความมุ่งมั่นในการทำงานให้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดีเรื่อยมา รวมถึงการตรวจและแก้ไขเนื้อหาวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์และบุคลากร ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ที่คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลืออย่างดีในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนการศึกษา ระดับปริญญาโท

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการทุกท่านที่สละเวลามาร่วมเข้าฟังในการสอบปกป้องวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณสากล จุฬรัตน์ และคุณสหพงศ์ สมวงศ์ คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลืออย่างดี

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ และนักศึกษาปริญญาโท คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลืออย่างดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนข้าพเจ้าเป็นอย่างดีตลอดมา

ธูตา โกลุมพันธ์

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	(5)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(6)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(8)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	1
1.2 ทบทวนวรรณกรรม.....	3
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	7
2.1 อุตสาหกรรมน้ำยางพารา.....	7
2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของน้ำยาง.....	8
2.3 คลื่นไมโครเวฟ.....	10
2.3.1 ความหมายของคลื่นไมโครเวฟ.....	10
2.3.2 คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ.....	10
2.3.3 ประโยชน์ของคลื่นไมโครเวฟ.....	11
2.4 วัสดุไดอิเล็กตริก.....	12
2.5 ระยะห่างระหว่างเส้นตรงกับจุด.....	14
2.6 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ.....	15
2.6.1 ประเภทของสมมติฐาน.....	15
2.6.2 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ.....	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	18
3.1 การเตรียมตัวอย่าง และการวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน.....	20
3.1.1 การเตรียมตัวอย่าง.....	20

สารบัญ(ต่อ)

3.1.2 การวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน	23
3.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน.....	24
3.3 การสร้างแบบจำลองไดโพลีแกตริก.....	25
3.4 วิธีการคัดแยกน้ำยางที่ปลอมปนและน้ำยางบริสุทธิ์	26
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	28
4.1 สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน	29
4.1.1 สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรามบริสุทธิ์.....	29
4.1.2 ค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรามที่มีแป้งมันปน.....	31
4.1.3 ค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรามที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปน.....	33
4.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของเซรามบริสุทธิ์และเซรามที่มีสิ่งปลอมปน	36
4.2.1 ความสัมพันธ์ของเซรามบริสุทธิ์และเซรามที่มีสิ่งปลอมปนบนแผนภาพ Cole-Cole	36
4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\omega\epsilon''$ กับ ϵ' ของเซรามบริสุทธิ์และเซรามที่มีสิ่งปลอมปน.....	38
4.3 แบบจำลองสำหรับตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง	42
4.4 การทดสอบแบบจำลองสำหรับตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง	48
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	50
5.1 สรุปผลการวิจัย	50
5.1.1 สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรามบริสุทธิ์และเซรามที่มีสิ่งปลอมปน	50
5.1.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของเซรามบริสุทธิ์และเซรามที่มีสิ่งปลอมปน.....	50
5.1.3 แบบจำลองสำหรับตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง	51
5.1.4 การทดสอบแบบจำลองสำหรับตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง	51
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
บรรณานุกรม.....	53
ภาคผนวก	56
ประวัติผู้เขียน.....	74

รายการรูป

รูปที่ 1.1 การวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของน้ำยางโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ	3
รูปที่ 2.1 สูตรโมเลกุลของไอโซพรีนและพอลิไอโซพรีน	8
รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของคลื่นไมโครเวฟ	10
รูปที่ 2.3 ระยะห่างระหว่างเส้นตรงกับจุด	14
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	18
รูปที่ 3.2 ลักษณะของน้ำยางสดที่ผ่านการปั่น	20
รูปที่ 3.3 ผลผลิตจากการปั่นน้ำยางสด	20
รูปที่ 3.4 การควบคุมการปลอมปนในเซรัมโดยการเติมสิ่งปลอมปน	21
รูปที่ 3.5 ลักษณะเซรัมของน้ำยางที่มีแป้งมันปน	22
รูปที่ 3.6 ลักษณะเซรัมของน้ำยางที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปน	22
รูปที่ 3.7 การเตรียมเครื่องมือเพื่อวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของตัวอย่าง	23
รูปที่ 3.8 แนวกึ่งกลางระหว่างขอบเขตของแบบจำลอง	26
รูปที่ 4.1 สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรัมบริสุทธิ์ช่วงความถี่ 0.5 – 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 °C	29
รูปที่ 4.2 สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรัมที่มีแป้งมันปนช่วงความถี่ 0.5 – 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 °C	31
รูปที่ 4.3 สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรัมที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปนช่วงความถี่ 0.5 – 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 °C	33
รูปที่ 4.4 เซรัมที่มีแป้งมันปนบนแผนภาพ Cole – Cole ช่วงความถี่ 0.5 – 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 °C	35
รูปที่ 4.5 เซรัมที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปนบนแผนภาพ Cole – Cole ช่วงความถี่ 0.5 – 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 °C	36
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\omega\epsilon''$ กับ ϵ' ของเซรัมที่มีแป้งมันปน ช่วงความถี่ 0.5 – 6 GHz ที่ อุณหภูมิ 25 °C	38
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\omega\epsilon''$ กับ ϵ' ของเซรัมที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปน ช่วงความถี่ 0.5 – 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 °C	39

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่ 4.8 ผลลัพธ์ของการคำนวณเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งในน้ำยางสดกับพารามิเตอร์ v	43
รูปที่ 4.9 ผลลัพธ์ของการคำนวณเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งในน้ำยางสด	44
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างกับแนวเส้นกึ่งกลาง.....	46
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งในน้ำยางสดกับระยะห่างของตัวอย่าง	46
รูปที่ 4.12 ระยะห่างของผลลัพธ์ %DRC เทียบกับแนวเส้นกึ่งกลาง	48

รายการตาราง

ตารางที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เรโซแนนซ์กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของน้ำยาง	4
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางสด	9
ตารางที่ 2.2 ความคลาดเคลื่อนในการตัดสินใจ	16
ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบของแบบจำลองไดอิเล็กตริก.....	27
ตารางที่ 4.1 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่ำและค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูง	37
ตารางที่ 4.2 ค่าเวลาผ่อนคลายของเดอบาย	40
ตารางที่ 4.3 ค่าความนำไฟฟ้าของเซรามิสิฐุทธิ์และเซรามิปลอมปน	41
ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ของเซรามิสิฐุทธิ์และเซรามิปลอมปน.....	41
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบของแบบจำลองไดอิเล็กตริก.....	49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากน้ำยางพารามีหลากหลายชนิด เช่น ของเล่นเด็ก ล้อรถ รองเท้า ถุงมือยาง ถุงมือทางการแพทย์ และถุงยางอนามัย ส่งผลให้มีความต้องการน้ำยางพาราเพื่อไปผลิตสินค้าเหล่านี้มากขึ้น เกษตรกรขายน้ำยางพาราเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เหตุผลอีกประการที่ทำให้เกษตรกรมีการซื้อขายน้ำยางมากขึ้น เนื่องจากต้นทุนการผลิตต่ำกว่ายางแผ่น อย่างไรก็ตาม พบว่ามีเกษตรกรบางรายจงใจเติมสิ่งปลอมปนลงในน้ำยางเพื่อหวังให้น้ำหนักของน้ำยางเพิ่มขึ้น ทำให้ได้จำนวนเงินมากขึ้นโดยไม่คำนึงถึงผลกระทบที่จะตามมาในภายหลัง

ปรีดีเปรม ทศนุกุล [1] รายงานว่า เกษตรกรส่วนใหญ่จะเติมสิ่งปลอมปนลงในน้ำยางสด ที่มีลักษณะสีขาวคล้ายกับน้ำยาง เช่น แป้ง ยิปซัม ปูนขาว ปูนซีเมนต์ เกษตรกรบางรายเติมน้ำหมักชีวภาพหรือน้ำส้มควันไม้ ลงในน้ำยางเพื่อให้ น้ำยางจับตัวเป็นก้อนแทนกรดฟอร์มิก นอกจากนี้ยังมีการใส่ซีลีโปลิก ทราย ก้อนหิน เศษยางที่ใช้แล้วหรือยางที่ผ่านการผสมสารเคมีที่เรียกว่า ยางตายผสมเข้ากับยางก้อน เพื่อเพิ่มน้ำหนักของยางก้อนทำให้ขายได้เงินมากขึ้น มีรายงานว่าเกษตรกรบางรายเติมแอมโมเนียสำหรับการรักษาสภาพน้ำยางในปริมาณมากเกินไป ส่งผลต่อความเสถียรของน้ำยางเช่นกัน สิ่งปลอมปนเหล่านี้ที่เกษตรกรเติมลงไป ย่อมส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพของยางส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตยางประเภทอื่นๆ เช่น น้ำยางข้น ยางแผ่น ยางก้อน รวมทั้งกระบวนการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งจำเป็นต้องใช้น้ำยางสดที่สะอาดและไร้สิ่งปลอมปนมา

ลักษณะโดยทั่วไปของน้ำยางสด มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นคล้ายกับน้ำนม [2] มีคุณสมบัติเป็นสารแขวนลอย อนุภาคยางจึงกระจายอยู่ในตัวกลางที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบหรือที่เรียกว่า เซรัม ซึ่งในน้ำยางสดจะมีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content: DRC) จะมีอยู่ประมาณร้อยละ 25 - 45 และอีกส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non Rubber Content) เป็นสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยาง มีสารประกอบต่างๆ หลายชนิด เช่น โปรตีน น้ำหรือเซรัม คาร์โบไฮเดรต ประมาณร้อยละ 55 - 75 ของส่วนที่ไม่ใช่ยาง หากมีการเติมสิ่งปลอมปนลงในน้ำยางสด สิ่งปลอมปนเหล่านั้นจะถูกรวมอยู่ในส่วนที่ไม่ใช่ยาง

กระบวนการหรือวิธีการตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง ทำได้โดยการตรวจสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี (สี กลิ่น การตกตะกอน เป็นต้น) ด้วยการตรวจหาปริมาณตามหรือสไลด์ [3] ที่ตกตะกอนอยู่ที่ก้นภาชนะที่บรรจุ วิธีการตรวจนี้เป็นวิธีทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีตาม

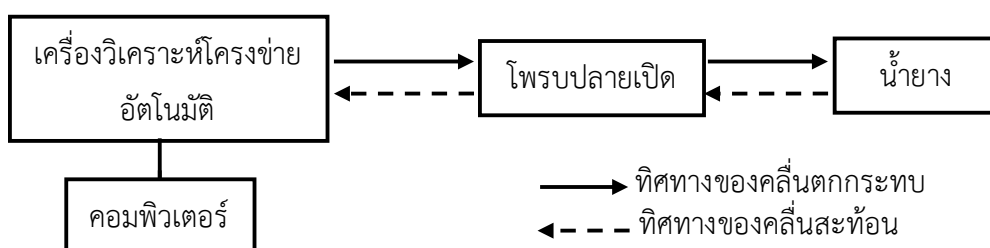
มาตรฐาน ISO 2005-1992 (Rubber Latex, natural, concentrate Determination of sludge content) การเติมสิ่งปลอมปนลงในน้ำยางเป็นการทำลายคุณสมบัติของยาง เนื่องจากผู้ซื้อย่อมต้องการน้ำยางสดที่มีคุณภาพ ไม่มีสิ่งปลอมปนจากผู้ขาย เพื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้คุณภาพ

กระบวนการตรวจสอบสิ่งปลอมปน และการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง เป็นวิธีการที่ไม่สามารถตรวจวัดได้พร้อมกัน โรงงานรับซื้อไม่สามารถรู้ได้ทันที ณ จุดรับซื้อน้ำยางสด ปัจจุบันการซื้อขายน้ำยางสด ใช้ความเข้มข้นของน้ำยางเป็นตัวกำหนดราคา โดยวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง วิธีการวัดมีหลากหลายสามารถวัดได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม [4] การวัดทางตรงเป็นการวัดที่มีมาตรฐานแม่นยำสูงแต่ใช้เวลานาน ส่วนการวัดทางอ้อม เช่น วัดความหนาแน่น การวัดการส่งผ่าน หรือการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟ เป็นวิธีการที่รวดเร็ว ไม่สามารถวัดการปลอมปนได้ มีผู้วิจัยได้คิดค้นเครื่องวัดหรือวิธีวัดที่รวดเร็วและมีความถูกต้องแม่นยำ และหนึ่งในงานวิจัยเหล่านี้ก็คือ เครื่องวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งแบบรีเฟลกโตมิเตอร์หกพอร์ต [4] ซึ่งเป็นเครื่องวัดที่ใช้หลักการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟ ใช้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของน้ำยางทำนายเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง ซึ่งเป็นวิธีการวัดที่มีความรวดเร็ว ถูกต้องแม่นยำ เมื่อเทียบกับวิธีมาตรฐาน แต่เครื่องวัดนี้ วัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งได้เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถวัดสิ่งปลอมปนในน้ำยาง จึงได้มีงานวิจัยที่จะพัฒนาเครื่องวัดนี้ ให้สามารถตรวจสอบสิ่งปลอมปน และวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางได้พร้อมกันในคราวเดียว ทำให้สะดวกและรู้ได้ทันที

วิธีการตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยางถือว่าเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญ ในการซื้อขายน้ำยางสด ควรเป็นวิธีการที่สามารถตรวจสอบได้ทันที ใช้งานง่าย และรวดเร็ว ทำให้คัดแยกน้ำยางสดที่ไร้สิ่งปลอมปนออกจากน้ำยางที่มีสิ่งปลอมปน **งานวิจัยฉบับนี้ จึงนำเสนอวิธีการตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยางจากสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของน้ำยางสด และเทคนิคนี้สามารถนำไปพัฒนาบนเครื่องวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งแบบรีเฟลกโตมิเตอร์หกพอร์ต ทำให้เครื่องวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งสามารถตรวจสอบสิ่งปลอมปนได้**

1.2 ทบทวนวรรณกรรม

จากการศึกษาบทความวิชาการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ในปี ค.ศ. 1982 K. B. Khalid [5] เสนอให้ใช้คลื่นไมโครเวฟวัดน้ำยางเป็นครั้งแรก โดยใช้หลักการลดทอนของคลื่นไมโครเวฟวัดน้ำยางที่ความถี่ 10.7 GHz เพื่อทำนายความชื้นในน้ำยาง ต่อมา Khalid [6] ได้นำเสนอการวัดการสะท้อนของคลื่น เพื่อวัดสภาพยอมทางไฟฟ้าของน้ำยาง โดยใช้โพรบแบบปลายเปิด (Open-ended probe) สำหรับจุ่มลงในน้ำยาง เชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์โคร่งข่ายอัตโนมัติร่วมกับคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 การวัดสภาพยอมทางไฟฟ้าของน้ำยางด้วยคลื่นไมโครเวฟ

จากรูปที่ 1.1 เครื่องวิเคราะห์โคร่งข่ายอัตโนมัติจะปล่อยคลื่นไมโครเวฟผ่านโพรบปลายเปิด คลื่นจะไปตกกระทบน้ำยางแล้วสะท้อนคลื่นกลับสู่โพรบ สัมประสิทธิ์สะท้อนของคลื่นจะขึ้นอยู่กับสภาพยอมไฟฟ้า (Complex permittivity) ของน้ำยาง ในงานวิจัยนี้ Khalid ได้ใช้ทฤษฎีไดอิเล็กตริกแบบผสม (Dielectric Mixture theory) อธิบายว่าน้ำยางประกอบด้วยน้ำและยางที่เป็นของแข็ง ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาแบบจำลอง Weiner's upper bound แบบจำลอง Bruggeman และแบบจำลอง Kraszewski เพื่ออธิบายค่าไดอิเล็กตริกของน้ำยาง

ต่อมามีการนำสภาพยอมทางไฟฟ้าของน้ำยาง มาทำนายปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยาง (Dry Rubber Content, DRC) ในงานวิจัยของประยูทธ อัครเอกมาลิน [7] นำเสนอหลักการเรโซแนนซ์ของคลื่นไมโครเวฟเพื่อออกแบบเครื่องวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง (%DRC) ภายใต้สมมติฐานคือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของน้ำยางมีความสัมพันธ์กับปริมาณเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง พบว่าความถี่เรโซแนนซ์สัมพันธ์กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของน้ำยาง งานวิจัยนี้ได้กำหนดความถี่เรโซแนนซ์ตั้งต้นที่ 3 GHz และออกแบบโปรแกรมให้สามารถจำลอง วัสดุน้ำยางที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกต่างๆ โดยจำลองด้วยค่าไดอิเล็กตริก 1, 10, 20, 30, 40 และ 50 ได้ค่าความถี่เรโซแนนซ์แสดงดังตารางที่ 1.1 ซึ่งสามารถวัดค่า %DRC ได้ในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เรโซแนนซ์กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของน้ำยาง

ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ')
3.01693	1
2.78978	10
2.69010	20
2.63003	30
2.59297	40
2.56613	50

การวัดสภาพยอมทางไฟฟ้าของน้ำยางด้วยคลื่นไมโครเวฟ จะแปรผันกับอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้ [8] ได้แสดงว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric constant, ϵ') และค่าสูญเสียในไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor, ϵ'') แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิของน้ำยางและความถี่ [6], [8] ในงานวิจัยของ Sakol [4] ได้นำเสนอวิธีการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง ซึ่งนำผลกระทบของอุณหภูมิมาพิจารณา วัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าด้วยคลื่นไมโครเวฟความถี่เดียวโดยใช้หลักการคลื่นสะท้อน ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 15 ถึง 39 องศาเซลเซียส ร่วมกับการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ ภายใต้สมมติฐานคือน้ำยางประกอบด้วยน้ำและเนื้อยาง โดยอธิบายอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของน้ำและเนื้อยางด้วยแบบจำลองสภาพยอมทางไฟฟ้าแบบผสม ด้วยแบบจำลองนี้ Sakol สามารถทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางได้ถูกต้องแม่นยำเทียบเท่ากับวิธีมาตรฐาน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์วัดคลื่นสะท้อนวงจรถูกพอร์ด เนื่องจากอุปกรณ์มีขนาดเล็ก ต้นทุนต่ำ และเหมาะสมสำหรับการใช้งานจริง

ต่อมา Sakol [9] ได้นำเสนอคุณลักษณะที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของสภาพยอมทางไฟฟ้าของน้ำยาง พิจารณาในย่านความถี่ไมโครเวฟตั้งแต่ 0.5 – 33 GHz พร้อมทั้งอธิบายผลกระทบของอุณหภูมิ (10 – 40 องศาเซลเซียส) พบว่าค่าสูญเสียในไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่ำกว่า 2.5 GHz เกิดจากการนำไฟฟ้าของอออน ซึ่งมีสาเหตุมาจากส่วนประกอบที่ไม่ใช่ยางแห้ง โดยได้อธิบายผลกระทบต่ออุณหภูมิดังนี้ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความนำไฟฟ้าอออนก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ความนำไฟฟ้าอออนก็จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น จากการศึกษา Sakol จึงนำผลกระทบดังกล่าวมาพิจารณา และปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้ทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางได้ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

การวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งด้วยเทคนิคอื่น ในงานวิจัยของ Zhao [10] ใช้หลักการสะท้อนของแสง เพื่อทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางชั้น โดยพิจารณาความเข้มแสงที่สะท้อนกลับ

ซึ่งอยู่ในลักษณะของแรงดัน และสร้างแบบจำลองจากสมการเส้นตรง จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่สัมพันธ์กับความเข้มแสง และเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้ง ผลจากการทำนายด้วยแบบจำลองสามารถทำนายเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้งในน้ำยางชั้น ถูกต้องแม่นยำ ได้ผลลัพธ์รวดเร็ว นอกจากนี้ Zhao ได้นำเทคนิคดังกล่าวตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แปรงเป็นสิ่งปลอมปนพบว่าแปรงส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้ง ทำให้เปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้มีวิจัยของ Sahapong [11] พบว่าน้ำยางพาราที่ถูกปลอมปนด้วยแป้งมัน และ แคลเซียมคาร์บอเนต มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนในช่วงความถี่ไมโครเวฟตั้งแต่ 0.5 – 2 GHz โดยพบว่าปริมาณของสิ่งปลอมปนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนลดลง แต่เปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้งจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำนายจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ในขณะที่เดียวกันก็สามารถตรวจสอบน้ำยางที่ถูกปลอมปนได้จากค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริก นอกจากนี้ได้นำผลกระทบบดังกล่าว ไปพัฒนาเป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ สำหรับตรวจสอบน้ำยางที่ปลอมปน และประยุกต์กับเครื่องวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้ง

การตรวจสอบหรือวิเคราะห์สิ่งปลอมปนในน้ำยาง สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานอย่าง การวิเคราะห์ทางเคมี ในงานวิจัยของเสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี [12] ได้ใช้เทคนิคการไทเทรตร่วมกับวัดการนำไฟฟ้า สำหรับการตรวจหาปริมาณแอมโมเนียอิสระในน้ำยางธรรมชาติ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าจากปริมาตรของด่างที่ปฏิกิริยาสมมูลพอดีกับแอมโมเนียอิสระที่อยู่ในน้ำยาง เนื่องจากการเติมแอมโมเนียในน้ำยางมากเกินไป ส่งผลต่อความเสถียรของน้ำยาง ทำให้การควบคุมความหนาของแผ่นยางบนแบบชูปได้ยาก

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวกับวิธีการตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง พบว่ายังไม่มีงานวิจัยใด เสนอเทคนิคตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยางสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยางด้วยวัดค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนเพื่อนำไปพัฒนาวิธีการตรวจสอบบนเครื่องวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้งแบบรีเฟล็กโตมิเตอร์หกพอร์ต

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ออกแบบและสร้างแบบจำลองจากสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสำหรับตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

แบบจำลองไดอิเล็กตริกสำหรับตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 วัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของน้ำยางที่มีแป้งมันและแคลเซียมคาร์บอเนตปน
- 1.5.2 ศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์ และพัฒนาแบบจำลองตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยางจากสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของน้ำยาง
- 1.5.3 แบบจำลองสามารถตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 อุตสาหกรรมน้ำยางพารา

ยางพารา เป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทยอีกชนิดหนึ่ง โดยเฉพาะทางภาคใต้ของประเทศ ซึ่งสร้างรายได้ให้กับประเทศปีละหลายล้านบาท นอกจากนี้ยางพารายังเป็นสินค้าอุตสาหกรรมเกษตรที่มียอดส่งออกอันดับ 1 ของประเทศ มีเกษตรกรหลายครัวเรือนปลูกยางพารา อย่งไรก็ดี ในช่วงหลังเงินได้ขยายพื้นที่ปลูกยางพาราเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณการส่งออกยางพาราของประเทศไทยลดลง เนื่องจากการส่งออกยางพาราของไทยไปยังประเทศจีนมากที่สุด [13]

เมื่อปริมาณการผลิตยางพาราล้นตลาด สำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำสวนยาง มีนโยบายลดพื้นที่ปลูกยางพาราให้เหลือพื้นที่สวนยางที่สามารถเปิดกรีดทั้งประเทศไม่ถึง 15 ล้านไร่ เพื่อแก้ปัญหาราคายางและลดปริมาณการผลิตยาง ซึ่งจะเป็นจำนวนที่สอดคล้องกับความต้องการของตลาด เพื่อให้ราคายางสูงขึ้นและมีเสถียรภาพมากขึ้น [14]

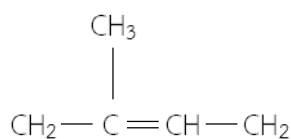
สถานการณ์ยางพาราในปี 2560 ราคายางพารามีแนวโน้มปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และปรับสูงที่สุดในช่วงเดือนธันวาคม ปี 2559 ที่ผ่านมา ทั้งราคายางในตลาดทั้งในและต่างประเทศ มีปัจจัยหลายด้านที่ส่งผลให้ราคายางพาราปรับตัวสูงขึ้น สำหรับปัจจัยภายในประเทศเป็นผลสืบเนื่องจากนโยบายกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ เรื่องการลดพื้นที่ปลูกยางพารา จึงทำให้ปริมาณยางที่สู่ตลาดมีปริมาณที่สมดุลกัน ส่วนปัจจัยภายนอกประเทศได้มีการกำหนดนโยบายควบคุมปริมาณการส่งออกของผู้ส่งออกยางทั้ง 3 ประเทศ คือ ไทย มาเลเซีย และอินโดนีเซีย ในประมาณ 615,000 เมตริกซ์ตันต่อปี จึงส่งผลให้ปริมาณการส่งออกมีความสมดุลกับปริมาณการใช้ยางในโลกมากยิ่งขึ้น [15]

อุตสาหกรรมน้ำยางพารา เป็นกรรมวิธีการแปรรูปน้ำยางสดสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ น้ำยางข้น และยางแท่ง ซึ่งยางแท่งได้แก่ ยางแท่ง ยางแผ่นรมควันและยางแผ่นดิบ เพื่อเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมยางในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ยางล้อรถ รองเท้า ถุงมือทางการแพทย์ หมอน ของเล่นเด็ก ฯลฯ

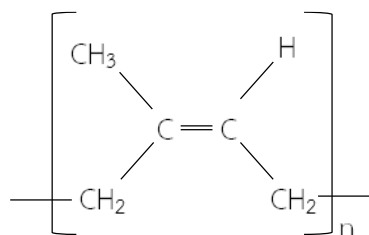
2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของน้ำยาง

น้ำยางพารา เป็นของเหลวมีลักษณะสีขาวขุ่น คล้ายกับน้ำมัน อยู่ในท่อน้ำยางมีการเรียงตัวกันอยู่ในเปลือกของต้นยาง เมื่อกรีดหรือเจาะเปลือกของต้นยางจะทำให้ น้ำยางไหลออกมา และสามารถไหลได้อย่างอิสระ มีความหนืดประมาณ 12-15 centipoises ค่า pH ประมาณ 6.5 ถึง 7.0 รูปร่างของอนุภาคยางเป็นรูปกลม ขนาด 0.05 - 5 ไมโครเมตร [4]

น้ำยางสด มีคุณสมบัติเป็นสารแขวนลอย อนุภาคยางจึงกระจายอยู่ในตัวกลางที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบหรือที่เรียกว่า เซรัม อนุภาคยางดังกล่าวเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนที่มีชื่อทางเคมีว่า 1, 4 - พอลิไอโซพรีน ที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบซิส (cis - 1, 4 - polyisoprene) [2], [16] ดังรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยคาร์บอน (C) 5 อะตอม กับไฮโดรเจน (H) 8 อะตอม เป็นมอนอเมอร์ (monomer) ของไอโซพรีน (isoprene) ต่อกันจำนวนมากเป็นสายโซ่โมเลกุลยาว [11]



ไอโซพรีน (Isoprene)



พอลิไอโซพรีน (cis - 1, 4 - polyisoprene)

รูปที่ 2.1 สูตรโมเลกุลของไอโซพรีนและพอลิไอโซพรีน

น้ำยางสด จัดว่าเป็นสารไม่บริสุทธิ์ มีสัดส่วนของส่วนประกอบของน้ำยางสด [17] แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางสด

องค์ประกอบ	สัดส่วน (ร้อยละ)
เนื้อยางแห้ง	25-45
น้ำตาล	1
โปรตีน	1-1.5
เรซิน	1-1.25
ซีเถ้า	น้อยกว่า 1
น้ำ	ส่วนที่เหลือจนครบ 100

ในส่วนประกอบของน้ำยางสดสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ

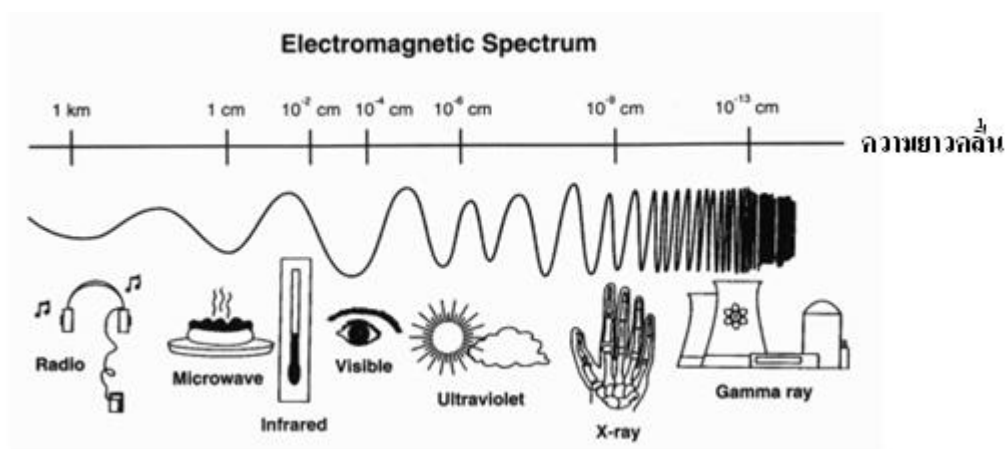
- 1) เนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content: DRC) มีอนุภาคยาง (cis - 1, 4 – poly isoprene) ประมาณร้อยละ 25-45
- 2) สารอื่นๆ (Non Rubber Content) เป็นสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยาง มีสารประกอบต่างหลายชนิด เช่น โปรตีน น้ำหรือเซรัม คาร์โบไฮเดรต เป็นต้น ประมาณร้อยละ 55-75

โดยทั่วไป น้ำยางที่ได้จากการกรีดหน้ายางจะมีส่วนประกอบของเนื้อยางแห้งร้อยละ 25-45 และส่วนอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยางอีกประมาณร้อยละ 55-75 เฉพาะส่วนเนื้อยางแห้งเท่านั้นที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ น้ำยางสดสามารถนำไปแปรรูปได้หลากหลายชนิดทั้งในรูปน้ำยางข้น และยางแห้ง ซึ่งได้แก่ ยางแท่ง ยางแผ่นดิบ ยางแผ่นรมควัน ยางก้อนถ้วย ยางเครพ เป็นต้น เมื่ออนุภาคเกิดการรวมตัวกัน ทำให้เกิดอนุภาคยางขนาดใหญ่ ซึ่งอนุภาคเหล่านี้ถูกนำไปใช้ในวัตเป็นเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง น้ำยางแต่ละสวนจะมีปริมาณเนื้อยางไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น พันธุ์ยาง อายุยาง สถานที่ปลูก ดิน และอื่นๆ ในการซื้อขายจึงต้องวัดปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยาง ราคาน้ำยางสดขึ้นอยู่กับปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยาง น้ำยางสดที่มีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งสูงจะได้ราคาสูง

2.3 คลื่นไมโครเวฟ

2.3.1 ความหมายของคลื่นไมโครเวฟ

เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) เช่นเดียวกับคลื่นประเภทอื่นๆ เช่น คลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) คลื่นรังสีเอ็กซ์ และคลื่นรังสีแกมมา ฯลฯ คลื่นไมโครเวฟ เป็นคลื่นความถี่สูง ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และไม่สามารถสัมผัสได้ แต่สามารถวัดได้โดยใช้เครื่องมือเฉพาะเท่านั้น [18] ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของคลื่นไมโครเวฟ [19]

คลื่นไมโครเวฟ ถือเป็นคลื่นวิทยุชนิดหนึ่งซึ่งมีความถี่ในช่วง 300 MHz ถึง 300 GHz แต่จะนิยมใช้งานกันในช่วงความถี่ 1 GHz ถึง 60GHz เพราะเป็นย่านความถี่ที่ส่งเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ [20]

2.3.2 คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ

1) การสะท้อนกลับ (Reflection)

การสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟ เกิดจากการแพร่กระจายของคลื่นในตัวกลางที่ถูกปิดกั้น หรือตัวกลางที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ส่งผลให้คลื่นบางส่วนสะท้อนกลับ และเกิดปรากฏการณ์คลื่นนิ่งในตัวกลางนั้น ขณะเดียวกันก็มีคลื่นบางส่วนที่สามารถส่งผ่านเข้าไปยังอีกตัวกลางได้

2) การส่งผ่าน (Transmission)

การส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ เกิดจากการแพร่กระจายของคลื่นในตัวกลางกระทบกับวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ ได้แก่ แก้ว พลาสติก กระดาษ เซรามิก และไม้ เป็นต้น คลื่นจะสามารถทะลุผ่านตัวกลางนั้นได้

3) การดูดซับ (Absorption)

การดูดซับของคลื่นไมโครเวฟ เกิดจากการแพร่กระจายของคลื่นในตัวกลางที่มีน้ำหรือความชื้นภายใน คลื่นบางส่วนจะถูกดูดซับเอาไว้ เช่น การปล่อยคลื่นแพร่กระจายในน้ำโมเลกุลของน้ำดูดซับพลังงานคลื่น และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนทำให้น้ำความร้อนขึ้น

2.3.3 ประโยชน์ของคลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟถูกนำไปใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น ในอุปกรณ์หรือระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม ยุทโธปกรณ์ด้านทหาร เครื่องมือทางการแพทย์ อุตสาหกรรม และเครื่องใช้ในครัวเรือน

2.4 วัสดุไดอิเล็กตริก

วัสดุไดอิเล็กตริก คือ วัสดุที่มีความเป็นขั้ว (Polar) และมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสูง จึงไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ หรือมีความเป็นฉนวนที่ดี สมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริกจะอธิบายด้วยสภาพยอมไฟฟ้าของวัสดุที่ความถี่ต่างๆ สภาพยอมไฟฟ้า (ϵ^*) เป็นจำนวนเชิงซ้อนที่บ่งชี้ถึงพลังงานที่สะสมและสูญเสียที่อยู่ภายในของวัสดุนั้นๆ

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.1)$$

จากสมการ (2.1) ϵ^* เป็นจำนวนเชิงซ้อน ประกอบด้วยส่วนจริง (ϵ') จะสัมพันธ์กับปริมาณความสามารถของวัสดุในการกักพลังงานสนามไฟฟ้า ค่า ϵ' นี้เรียกว่า ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และส่วนจินตภาพ (ϵ'') สัมพันธ์กับปริมาณพลังงานสนามไฟฟ้าที่อาจสูญเสียในวัสดุ เรียกค่านี้ว่า ค่าสูญเสียในไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) [21], [22] โดยปริมาณ ϵ'' จะสัมพันธ์กับสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุ (Conductivity; σ) ที่ความถี่ต่ำ [23]

สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสามารถแสดงในรูปของแผนภาพ Cole-Cole ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ' และ ϵ'' จะได้กราฟแสดงค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนบนรูปครึ่งวงกลมซึ่งสอดคล้องกับชุดสมการของเดอบาย (Debye's equations) [9] ดังนี้

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (2.2)$$

$$\epsilon' = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} + \epsilon_\infty \quad (2.3)$$

$$\epsilon'' = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} (\omega\tau) \quad (2.4)$$

เมื่อ ϵ^* คือสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน, ϵ_s คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกความถี่ต่ำ, ϵ_∞ คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูง, σ คือสภาพนำไฟฟ้า, ϵ_0 คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของอากาศมีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m, τ คือค่าเวลาผ่อนคลาย และ ω เป็นความถี่เชิงมุมมีค่าเท่ากับ $2\pi f$

การนำไฟฟ้าในไดอิเล็กตริกส่งผลต่อค่าสูญเสียในไดอิเล็กตริก ดังนั้นสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน คือ [9]

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j(\varepsilon'' + \frac{\sigma}{\omega}) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} + \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (2.5)$$

ดังนั้นค่าสูญเสียในไดอิเล็กตริก (ε'') คือ

$$\varepsilon'' = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2}(\omega\tau) + \frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega} \quad (2.6)$$

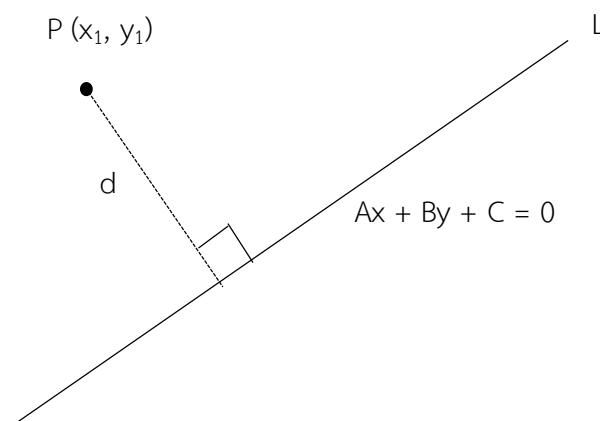
ส่วนค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ε') คือ

$$\varepsilon' = (-\tau)(\omega\varepsilon'' - \frac{\sigma}{\varepsilon_0}) + \varepsilon_s \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.7) ถ้า ε' ถูกแสดงในรูปฟังก์ชันของ $\omega\varepsilon''$ ความสัมพันธ์จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น เมื่อ ω เป็นความถี่เชิงมุมและความชันเท่ากับ $-\tau$ จากนั้นนำค่า τ แทนลงในสมการ (2.6) เพื่อกำหนดค่า σ โดยพิจารณาที่ความถี่ 1 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่สามารถผลิตขึ้นได้ด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังนั้นค่า τ , ε_s , ε_∞ และ σ ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สามารถอธิบายถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุ

2.5 ระยะห่างระหว่างเส้นตรงกับจุด

กำหนดให้ L เป็นเส้นตรงบนระนาบ 2 มิติในพิกัดคาร์ทีเซียน (x, y) สมการเส้นตรง L สามารถเขียนได้ดังนี้ $Ax + By + C = 0$ เมื่อ A, B และ C คือค่าคงตัวใดๆ ที่เป็นจำนวนจริง และให้ $P(x_1, y_1)$ เป็นจุดที่อยู่ห่างจาก L เท่ากับระยะ d [24] ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระยะห่างระหว่างเส้นตรงกับจุด

ดังนั้นระยะ d คือ

$$d = \frac{|Ax_1 + By_1 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (2.8)$$

จากสมการ (2.8) เมื่อแทนค่าจุด $P(x_1, y_1)$ ลงในสมการเส้นตรง L ในรูป $Ax + By + C = 0$ ถ้า d เท่ากับศูนย์ หมายความว่า จุด $P(x_1, y_1)$ อยู่บนเส้นตรง L พอดี

2.6 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

2.6.1 ประเภทของสมมติฐาน

สมมติฐาน(Hypothesis) คือ การคาดคะเนหรือคาดเดาคำตอบของผู้วิจัยไว้ล่วงหน้าอย่างมีเหตุผล อาจจะเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรมากกว่าหรือเท่ากับ 2 ตัว เพื่อใช้ในการตอบสิ่งที่สนใจ **สมมติฐานมี 2 ประเภท [25] คือ**

- 1) **สมมติฐานการวิจัย (Research hypothesis)** เป็นสมมติฐานที่เขียนไว้ในรูปข้อความที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร และเป็นคำตอบที่ผู้วิจัยได้คาดการณ์ไว้ล่วงหน้า แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ
 - 1.1) สมมติฐานการวิจัยแบบมีทิศทาง (Directional hypothesis) เป็นสมมติฐานที่เขียนระบุถึงทิศทางความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไว้อย่างชัดเจน
 - 1.2) สมมติฐานการวิจัยแบบไม่มีทิศทาง (Nondirectional hypothesis) เป็นสมมติฐานที่ไม่เขียนระบุถึงทิศทางความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไว้
- 2) **สมมติฐานทางสถิติ (Statistical hypothesis)** เป็นสมมติฐานที่เขียนในรูปของข้อความสั้นๆ โดยใช้สัญลักษณ์ทางสถิติ ซึ่งอยู่ในรูปแบบของโครงสร้างทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ทดสอบสมมติฐานทางการวิจัยเป็นจริงหรือไม่ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด [26] คือ
 - 2.1) สมมติฐานหลักหรือสมมติฐานกลาง (Null hypothesis) แทนสัญลักษณ์ด้วย H_0 เป็นสมมติฐานที่อธิบายว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างตัวแปร
 - 2.2) สมมติฐานรองหรือสมมติฐานทางเลือก (Alternative hypothesis) แทนสัญลักษณ์ด้วย H_1 หรือ H_a เป็นสมมติฐานที่อธิบายว่ามีความแตกต่างกันระหว่างตัวแปร

2.6.2 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

หมายถึง กฎเกณฑ์หนึ่งที่ถูกกำหนดขึ้น เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจว่า จะยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐาน (H_0) โดยอาศัยข้อมูลที่เก็บรวบรวมมาจากกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งผลของการตัดสินใจมีโอกาสผิดพลาดได้เสมอ [27] การวิเคราะห์สมมติฐานจะสามารถแจกแจงด้วยความคลาดเคลื่อนในการตัดสินใจ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความคลาดเคลื่อนในการตัดสินใจ

ผลการตัดสินใจ	ค่าความจริง		รวม
	H_0 เป็นจริง	H_0 เป็นเท็จ	
ยอมรับ H_0	ตัดสินใจถูกต้อง (TP)	ความผิดพลาดประเภทที่ 2 (FP)	TP+FP
ปฏิเสธ H_0	ความผิดพลาดประเภทที่ 1 (FN)	ตัดสินใจถูกต้อง (TN)	TN+FN
รวม	TP+TN	FP+FN	TP+FP+TN+FN

จากตารางที่ 2.2 สามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) True Positive (TP) หมายถึง จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ให้ผลทดสอบสมมติฐานถูกต้อง ในกรณี H_0 เป็นจริง ผลที่ได้คือ ยอมรับ H_0
- 2) True Negative (TN) หมายถึง จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ให้ผลทดสอบสมมติฐานถูกต้อง ในกรณี H_0 เป็นเท็จ ผลที่ได้คือ ปฏิเสธ H_0
- 3) False Negative (FN) หมายถึง จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ให้ผลทดสอบสมมติฐานผิดพลาด ในกรณี H_0 เป็นจริง แต่ผลที่ได้คือ ปฏิเสธ H_0 ซึ่งเรียกว่า ความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type I error) ดังนั้นค่าความผิดพลาดประเภทที่ 1 โดยทั่วไปจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.05 หมายความว่า ยอมให้เกิดความผิดพลาดจากการปฏิเสธ H_0 ได้ร้อยละ 5 [28] สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.9)

$$\% \text{Type I error} = \frac{\text{FN}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{TN} + \text{FN}} \times 100 \quad (2.9)$$

4) False Positive (FP) หมายถึง จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ให้ผลทดสอบสมมติฐานผิดพลาดในกรณี H_0 เป็นเท็จ แต่ผลที่ได้คือ ยอมรับ H_0 ซึ่งเรียกว่า ความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II error) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.10)

$$\% \text{Type II error} = \frac{\text{FP}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{TN} + \text{FN}} \times 100 \quad (2.10)$$

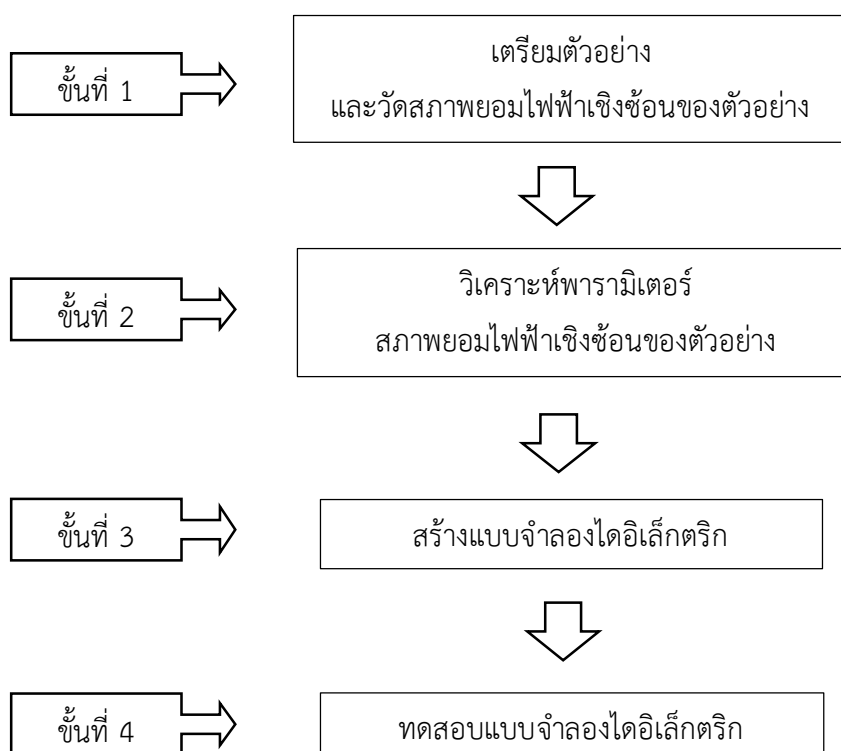
ดังนั้นประสิทธิภาพของเกณฑ์การตัดสินใจ ขึ้นอยู่กับผลการตัดสินใจได้ถูกต้อง หากผลซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2.11)

$$\% \text{Eff} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{TN} + \text{FN}} \times 100 \quad (2.11)$$

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การออกแบบและสร้างแบบจำลองไดโอดีเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้ในการตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง ซึ่งน้ำยางที่ถูกปลอมปน ย่อมส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพของยาง เช่น ความยืดหยุ่น การทนความร้อน ผลจากการศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แบบจำลองจำแนกน้ำยางที่ถูกปลอมปนจากน้ำยางบริสุทธิ์ได้ แบบจำลองนี้สามารถพัฒนาและโปรแกรมในเครื่องวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งแบบหกพอร์ตให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น [4] โดยมีแนวคิดในการดำเนินการวิจัยดังนี้ แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

จากรูปที่ 3.1 เป็นแผนผังสรุปการดำเนินงานแบบคร่าวๆ (ส่วนรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนจะอธิบายในหัวข้อต่อไป) ซึ่งเป็นออกได้ 4 ชั้น คือ

ชั้นที่ 1 การเตรียมตัวอย่าง เพื่อวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของตัวอย่าง

ชั้นที่ 2 การนำสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของตัวอย่างที่ได้จากชั้นที่ 1 ไปวิเคราะห์พารามิเตอร์สำคัญ

ชั้นที่ 3 สร้างแบบจำลองไดอิเล็กตริก สำหรับตรวจสอบสิ่งปลอมปน

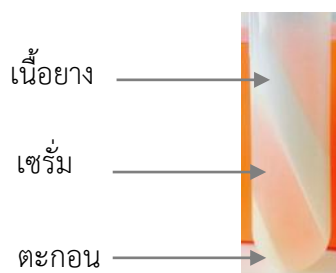
ชั้นที่ 4 ทดสอบแบบจำลองไดอิเล็กตริก

3.1 การเตรียมตัวอย่าง และการวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน

3.1.1. การเตรียมตัวอย่าง

ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดลอง ได้นำน้ำยางสดจากศูนย์วิจัยยางพาราจังหวัดสงขลา มาปั่นแยก (Centrifuge) เนื้อยางออกจากเซรัมด้วยเครื่องปั่น ที่ความเร็วเหวี่ยงเท่ากับ 25,000 รอบต่อนาที นาน 1 ชั่วโมง 15 นาที [29] ผลจากการปั่นที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 3.2

1) ผลจากปั่นน้ำยางสด



รูปที่ 3.2 ลักษณะของน้ำยางสดที่ผ่านการปั่น

จากรูปที่ 3.2 น้ำยางจะถูกแยกออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง เป็นอนุภาคยางที่เกาะตัวกันแน่นอยู่ชั้นบนสุด ส่วนที่สอง เป็นของเหลวใสที่เรียกว่า เซรัม (Serum) และส่วนที่สาม เป็นตะกอนก้นหลอด (Bottom) มีสีเหลืองอ่อน

2) ผลการแยกเนื่อยางออกจากเซรัมของน้ำยาง



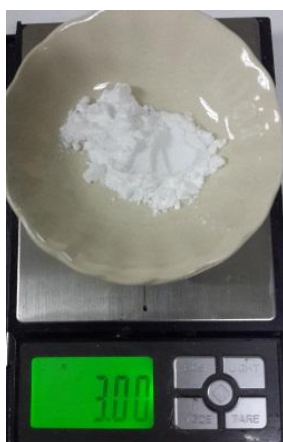
(ก) เซรัมของน้ำยาง (ข) เนื่อยางได้จากการปั่น

รูปที่ 3.3 ผลผลิตจากการปั่นน้ำยางสด

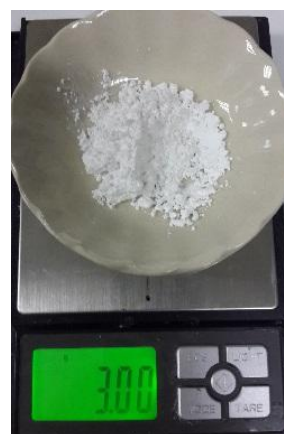
จากรูปที่ 3.3 (ก) เป็นเซรัมของน้ำยาง มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่น ซึ่งเป็นผลมาจากตอนแยกเนื่อยางกับเซรัม จากรูปที่ 3.3 (ข) เป็นเนื่อยาง มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว

3) การชั่งน้ำหนักของแป้งมันและแคลเซียมคาร์บอเนต

น้ำหนักของแป้งมันและแคลเซียมคาร์บอเนตอย่างละ 3 กรัม 6 กรัม และ 9 กรัม ตามลำดับ โดยชั่งน้ำหนักของสิ่งปลอมปนเพิ่มครั้งละ 3 กรัม สำหรับเติมลงในตัวอย่างที่จะปลอมปน เพื่อควบคุมปัจจัยใจที่มีผลต่อการทดลองในแต่ละครั้งจึงมีการปลอมปนจากน้อยไปมากภายในตัวอย่างเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 3.4



(ก) แป้งมัน



(ข) แคลเซียมคาร์บอเนต

รูปที่ 3.4 การควบคุมการปลอมปนในเซรัมโดยเติมสิ่งปลอมปน

รูปที่ 3.4 (ก) การชั่งแป้งมัน 3 กรัม และรูปที่ 3.4 (ข) การชั่งแคลเซียมคาร์บอเนต 3 กรัม แป้งมันและแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นของแข็งมีลักษณะสีขาว แต่แป้งมันมีเนื้อละเอียดกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต

4) การผสมสิ่งปลอมปนลงในเซรัมของน้ำยาง

เซรัมมีปริมาตร 15 ml จะมีมวล 15.3 g เนื่องจากความหนาแน่นของเซรัม คือ 1.02 g/ml ซึ่งมีสัดส่วนของสิ่งปลอมปนดังนี้

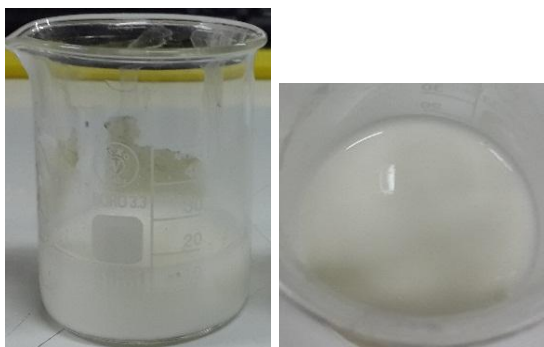
ครั้งที่ 1 เติมสิ่งปลอมปน 3 g ลงในเซรัม

เซรัมที่มีสิ่งปลอมปนผสม 3 g คิดเป็นร้อยละ 16.39 โดยมวล

ครั้งที่ 2 เติมสิ่งปลอมปนอีก 3 g ลงในเซรัม มีสิ่งปลอมปนทั้งหมด 6 g

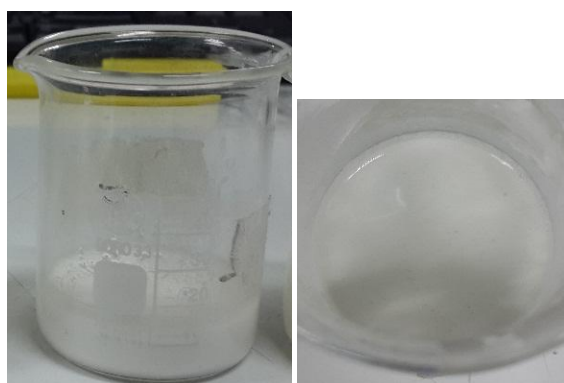
เซรัมที่มีสิ่งปลอมปนผสม 6 g คิดเป็นร้อยละ 28.17 โดยมวล

ครั้งที่ 3 เติมสิ่งปลอมปนอีก 3 g ลงในเซรัม มีสิ่งปลอมปนทั้งหมด 9 g
เซรัมที่มีสิ่งปลอมปนผสม 9 g คิดเป็นร้อยละ 37.04 โดยมวล



รูปที่ 3.5 ลักษณะเซรัมของน้ำยางที่มีแป้งมันปน

จากรูปที่ 3.5 เซรัมของน้ำยางที่มีแป้งมันปน เป็นของเหลวมีลักษณะสีขาวขุ่น
คล้ายน้ำยาสด เมื่อวางทิ้งไว้จะเกิดการตกตะกอน

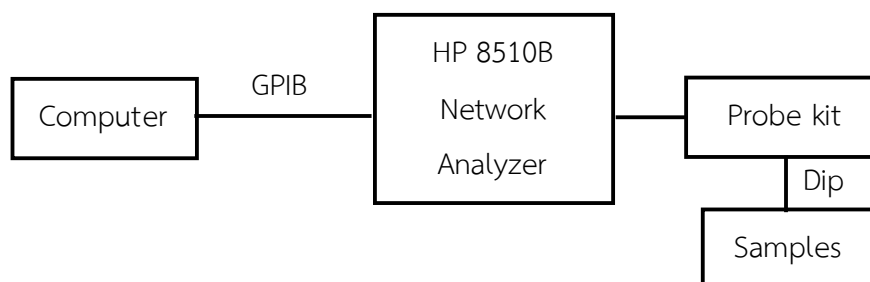


รูปที่ 3.6 ลักษณะเซรัมของน้ำยางที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปน

จากรูปที่ 3.6 เซรัมของน้ำยางที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปน เป็นของเหลวมี
ลักษณะสีขาวขุ่นคล้ายน้ำยาสด เมื่อวางทิ้งไว้จะเกิดการตกตะกอน

3.1.2. การวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน

สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของตัวอย่างจะวัดด้วยโพรบเซนเซอร์ (Agilent 8510E dielectric probe kit) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยจะวัดในช่วงความถี่ 0.5 ถึง 6 GHz โพรบเซนเซอร์จะจุ่มในวัสดุที่จะวัดและข้อมูลทางไฟฟ้าจะถูกประมวลด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติ HP 8510B ดังรูปที่ 3.7 สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนที่วัดได้จะถูกส่งมาแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ผ่านทางสายสัญญาณ GPIB (General Purpose Interface Bus) อย่างไรก็ตาม ก่อนวัดทุกครั้ง จะต้องสอบเทียบโพรบวัดเพื่อให้โพรบวัดและเครื่องมืออยู่ในสถานะพร้อมใช้ วัสดุที่ใช้ในการสอบเทียบโพรบ คือ อากาศ อุปกรณ์ลัดวงจร และน้ำกลั่น ผลที่ได้ต้องสอดคล้องกับสภาพยอมไฟฟ้าของอากาศและน้ำกลั่นที่นำมาสอบเทียบและต้องคลาดเคลื่อนจากค่าอ้างอิงไม่เกิน ± 0.05 [30]



รูปที่ 3.7 การเตรียมเครื่องมือเพื่อวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของตัวอย่าง

3.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์จากสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน

สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรามิกรีสิสตีฟและเซรามิกรีสิสตีฟที่มีสิ่งปลอมปนที่วัดได้ สามารถแสดงความสัมพันธ์บนแผนภาพ Cole-Cole ได้อธิบายไว้ในสมการ (2.2) – สมการ (2.7) และจากสมการ (2.2) ทำให้ทราบค่าของ ϵ_s , ϵ_∞ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัด

จากสมการ (2.7) ความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ' กับ $\omega\epsilon''$ จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น เมื่อ ω เป็นความถี่เชิงมุม และความชันเท่ากับ $-\tau$ สามารถใช้วิธีการสร้างกราฟสมการเส้นตรงระหว่าง ϵ' กับ $\omega\epsilon''$ ในช่วงความถี่ (f) ตั้งแต่ 0.5 ถึง 6 GHz เพื่อหาค่า τ จากนั้นนำค่า τ แทนลงในสมการ (2.6) เพื่อกำหนดค่า σ โดยพิจารณาที่ความถี่ 1 GHz

ดังนั้นค่า τ , ϵ_s , ϵ_∞ และ σ เป็นพารามิเตอร์ที่สามารถอธิบายถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้า เซรามิกรีสิสตีฟและเซรามิกรีสิสตีฟที่มีแป้งมันและแคลเซียมคาร์บอเนตปน พารามิเตอร์เหล่านี้สามารถใช้แยกเซรามิกรีสิสตีฟและเซรามิกรีสิสตีฟที่มีสิ่งปลอมปนได้ นอกจากนี้สามารถนำไปสร้างแบบจำลองสำหรับการตรวจสอบน้ำยงที่มีสิ่งปลอมปนได้เช่นกัน

3.3 การสร้างแบบจำลองไดอิเล็กตริก

ในวิทยานิพนธ์นี้ เรากำหนดให้น้ำยางพาราประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ คือ เนื้อยางและเซรัมของน้ำยาง ดังนั้นแบบจำลองไดอิเล็กตริกนี้รวมผลกระทบของกลไกการโพลาริเซชันของเนื้อยางแห้งและน้ำ (v) คือ [4]

$$\frac{\epsilon_{eff} - \epsilon_w}{\epsilon_{eff} + 2\epsilon_w + v(\epsilon_{eff} - \epsilon_w)} = f \frac{\epsilon_s - \epsilon_w}{\epsilon_s + 2\epsilon_w + v(\epsilon_{eff} - \epsilon_w)} \quad (3.1)$$

เมื่อ ϵ_{eff} คือสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของน้ำยางพารา, ϵ_w คือสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรัมบริสุทธิ์ของน้ำยาง, ϵ_s คือสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเนื้อยางแห้ง, v คือพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายผลกระทบของการโพลาริเซชันของเนื้อยางแห้งและน้ำ และ f คือค่าอัตราส่วนของปริมาณเนื้อยางแห้ง

ในสมการ (3.1) พบว่า v เป็นตัวแปรที่ใช้อธิบายถึงผลกระทบของกลไกการโพลาริเซชันเนื้อยางแห้งและน้ำ ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าตัวแปร v มีผลต่อความแม่นยำของแบบจำลองไดอิเล็กตริก เราสามารถจัดสมการ (3.1) ใหม่โดยให้ f อยู่ด้านซ้ายมือของสมการ ผลลัพธ์คือ

$$f = \frac{\epsilon_{eff} - \epsilon_w}{\epsilon_{eff} + 2\epsilon_w + v(\epsilon_{eff} - \epsilon_w)} \cdot \frac{\epsilon_s + 2\epsilon_w + v(\epsilon_{eff} - \epsilon_w)}{\epsilon_s - \epsilon_w} \quad (3.2)$$

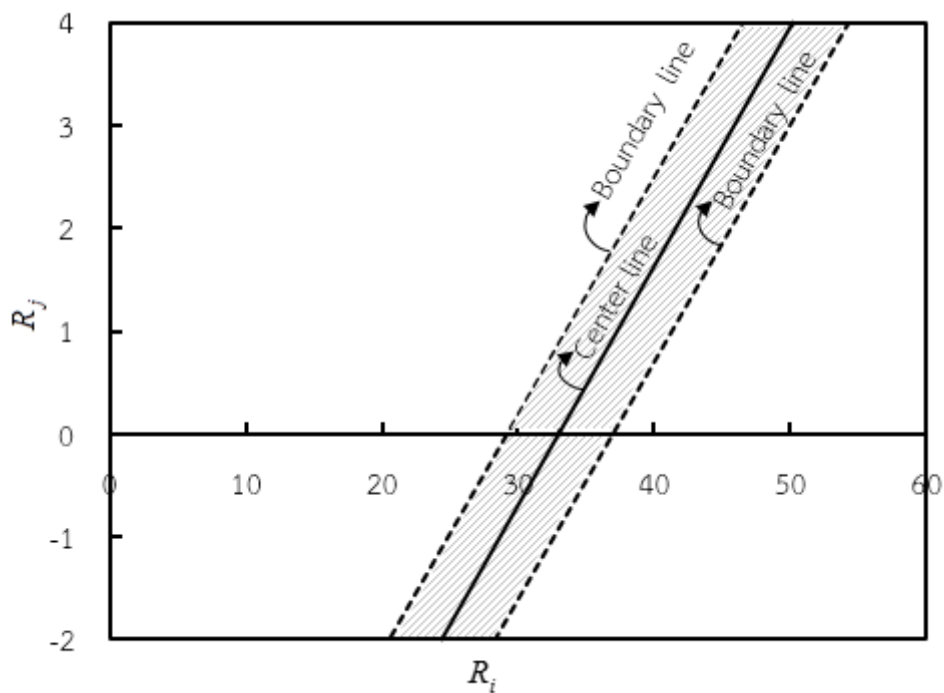
ดังนั้นเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางและการจำแนกน้ำยางที่ปลอมปนสามารถคำนวณได้จากสมการ [4] คือ

$$R = \frac{D_s f}{D_s f + D_w (1 - f)} \quad (3.3)$$

เมื่อ R เป็นจำนวนเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยส่วนจริง (R_r) คือเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยาง และส่วนจินตภาพ (R_j) ซึ่งจะนำมาจำแนกน้ำยางที่ปลอมปน, D_s คือความหนาแน่นของยางแห้งมีค่าเท่ากับ 0.9 g/cm^3 , D_w คือความหนาแน่นของเซรัมบริสุทธิ์ของน้ำยางมีค่าเท่ากับ 1.02 g/cm^3

3.4 วิธีการตัดแยกน้ำยางที่ปลอมปนและน้ำยางบริสุทธิ์

ค่า R ได้จากสมการ 3.3 จะนำไปพัฒนาวิธีการตัดแยกน้ำยางที่ปลอมปน โดยกำหนดขอบเขตของน้ำยางที่ไม่มีการปลอมปน จากนั้นจะคำนวณระยะห่างของ R กับเส้นกึ่งกลาง ซึ่งเป็นเส้นตรงที่อยู่กึ่งระหว่างขอบเขตของตัวอย่าง โดยนำระยะห่างของ R ที่อยู่บนขอบเขตทั้งสองเส้นไปคำนวณหาระยะห่างเฉลี่ย เพื่อใช้ตัดแยกน้ำยางปลอมปนออกจากน้ำยางไม่ปลอมปน แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วิธีการตัดแยกน้ำยางที่ปลอมปน

จากรูปที่ 3.8 สามารถอธิบายได้ว่า ถ้า R อยู่ในบริเวณที่แรเงา ซึ่งเป็นขอบเขตที่กำหนด แสดงว่าน้ำยางที่ไม่มีการปลอมปน หากอยู่นอกบริเวณที่แรเงา แสดงว่าน้ำยางที่มีการปลอมปน

การวิเคราะห์แบบจำลองเพื่อใช้ทดสอบน้ำยางในระบบนี้สามารถแจกแจงได้ ดังตารางที่ 3.1 เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของแบบจำลอง

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบของแบบจำลองไดอิเล็กตริก

ผลการทำนาย	น้ำยาง		รวม
	น้ำยางไม่ปลอมปน	น้ำยางปลอมปน	
น้ำยางไม่ปลอมปน	ทำนายถูกต้อง (TP)	ทำนายผิดพลาดประเภทที่ 2 (FP)	TP+FP
น้ำยางปลอมปน	ทำนายผิดพลาดประเภทที่ 1 (FN)	ทำนายถูกต้อง (TN)	TN+FN
รวม	TP+TN	FP+FN	TP+FP+TN+FN

บทที่ 4

วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นการแสดงผลการวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของน้ำยางสด (DRC ร้อยละ 27) เนื้อยางจากการปั่น เซรัมของน้ำยางหรือเซรัมบริสุทธิ์ และเซรัมปลอมปน ดังในหัวข้อ 4.1 จากนั้นในหัวข้อ 4.2 เป็นการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของเซรัมบริสุทธิ์และเซรัมปลอมปน เพื่อนำพารามิเตอร์มาสร้างแบบจำลองสำหรับตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง ดังหัวข้อ 4.3 และหัวข้อสุดท้าย 4.4 เป็นการแสดงผลการทดสอบแบบจำลองที่ได้จากหัวข้อ 4.3

สำหรับจำนวนตัวอย่างน้ำยางที่ใช้ในการทดลองนี้ สามารถแยกออกเป็น 3 กลุ่มตัวอย่าง คือ กลุ่มที่ 1 ตัวอย่างสำหรับวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน

น้ำยางสดทั้งหมด 5 ตัวอย่าง (โดยไม่สนใจ DRC) มาปั่นแยกส่วนเนื้อยางออกจากเซรัมของน้ำยาง จะได้ตัวอย่างสำหรับการวัดค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนดังนี้

1. เนื้อยางแห้ง วัด 15 ครั้ง
2. เซรัมบริสุทธิ์ วัด 15 ครั้ง
3. เซรัมที่มีแอมันปนร้อยละ 16.39, 28.17, 37.04 โดยมวล วัดอย่างละ 15 ครั้ง
4. เซรัมที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปนร้อยละ 16.39, 28.17, 37.04 โดยมวล วัดอย่าง 15 ครั้ง

ซึ่งผลการวัดทั้ง 15 ครั้ง ของแต่ละตัวอย่างจะถูกนำมาเฉลี่ย ส่วนสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของน้ำยางสดมีเพียงตัวเดียว คือ DRC ร้อยละ 27 เพื่อใช้อธิบายให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างเนื้อยาง เซรัมบริสุทธิ์และเซรัมที่มีสิ่งปลอมปน

กลุ่มที่ 2 ตัวอย่างสำหรับสร้างแบบจำลองสำหรับตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง

น้ำยางสดทั้งหมด 35 ตัวอย่าง ซึ่งมีค่า DCR ร้อยละ 30 – 46

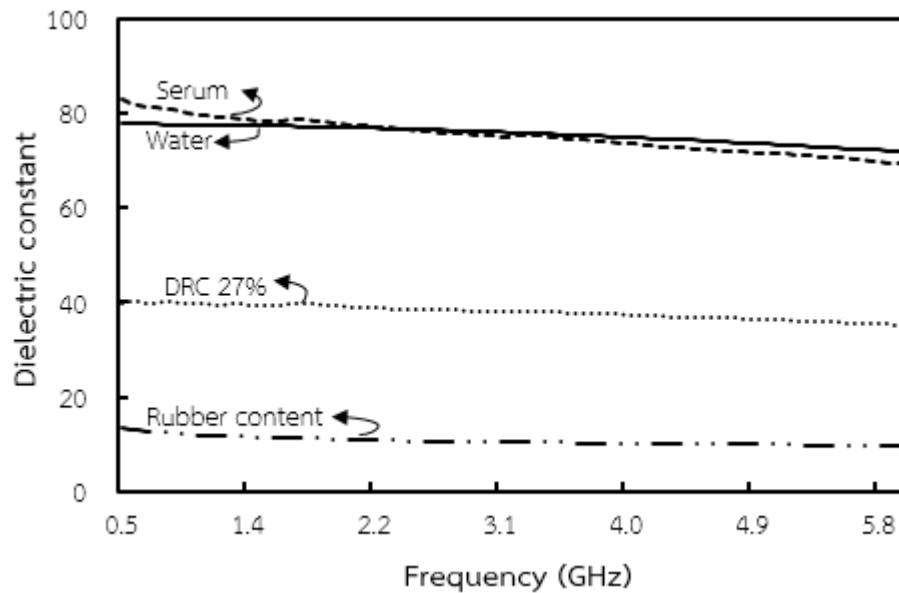
กลุ่มที่ 3 ตัวอย่างสำหรับทดสอบแบบจำลองสำหรับตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง

น้ำยางสดทั้งหมด 100 ตัวอย่าง ซึ่งจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ น้ำยางสดไม่ปลอมปน 52 ตัวอย่าง และน้ำยางสดที่มีการปลอมปน 48 ตัวอย่าง

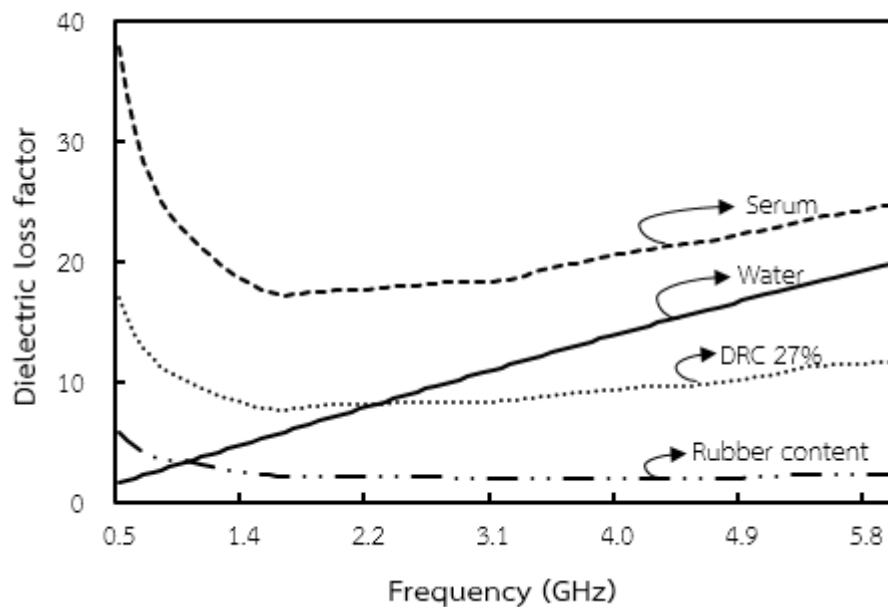
4.1 สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน

4.1.1 สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรัมบริสุทธี

ผลการวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของน้ำ น้ำยางสด (DRC ร้อยละ 27) เนื้อยางหลังการป่น และเซรัมบริสุทธี ในช่วงความถี่ 0.5 ถึง 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



(ก) ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก



(ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กตริก

รูปที่ 4.1 สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรัมบริสุทธี ช่วงความถี่ 0.5 – 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 °C

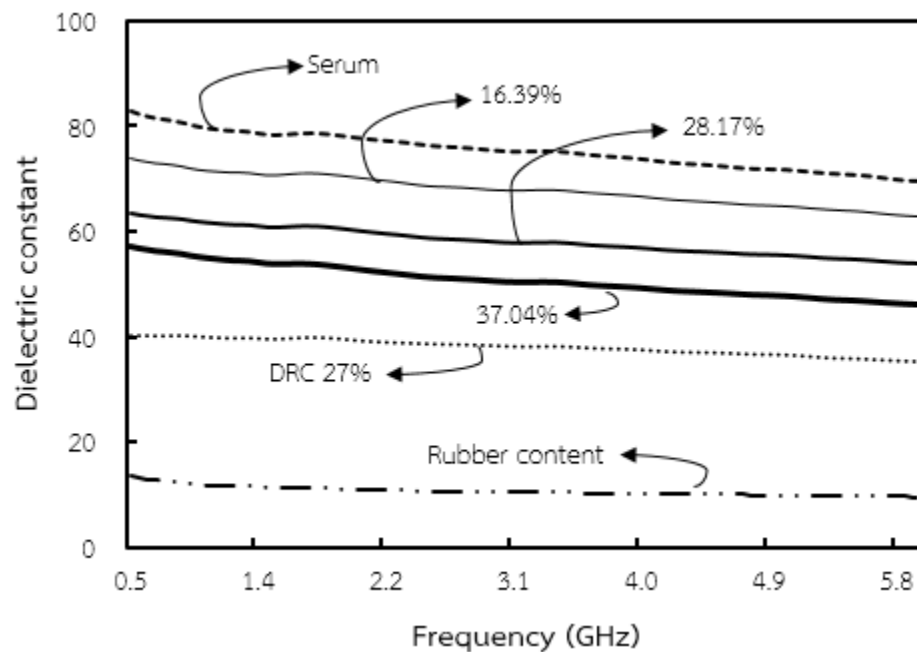
รูปที่ 4.1 (ก) แสดงผลการวัดค่าคงตัวไดอิเล็กตริก และรูปที่ 4.1 (ข) แสดงผลการวัดค่าสูญเสียในไดอิเล็กตริกของน้ำ น้ำยางสด เนื้อยางหลังการป่น และเซรามบิสสุทธี พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าสูญเสียในไดอิเล็กตริกขึ้นกับความถี่ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกจะลดลง ลดลงในช่วงความถี่ 0.5 ถึง 1.6 GHz ค่าสูญเสียในไดอิเล็กตริกมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากสภาพนำไฟฟ้าของอ็อนอิสระจากสารประกอบ แต่จะสูงขึ้นในช่วงความถี่สูงกว่า 1.6 GHz อย่างไรก็ตาม มีเพียงค่าสูญเสียในไดอิเล็กตริกของน้ำเท่านั้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น

เมื่อพิจารณาเฉพาะความถี่ 1 GHz จากรูปที่ 4.1 (ก) พบว่า ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของเซรามบิสสุทธีมีค่ามากที่สุดคือ 79.58 แต่ใกล้เคียงกับน้ำซึ่งมีค่าเท่ากับ 77.58 ในขณะที่น้ำยางสด (DCR ร้อยละ 27) มีค่าเท่ากับ 39.70 และเนื้อยางหลังการป่นมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกน้อยที่สุดคือ 11.98 เนื่องจากเนื้อยางหลังการป่นมีสถานะเป็นของแข็ง

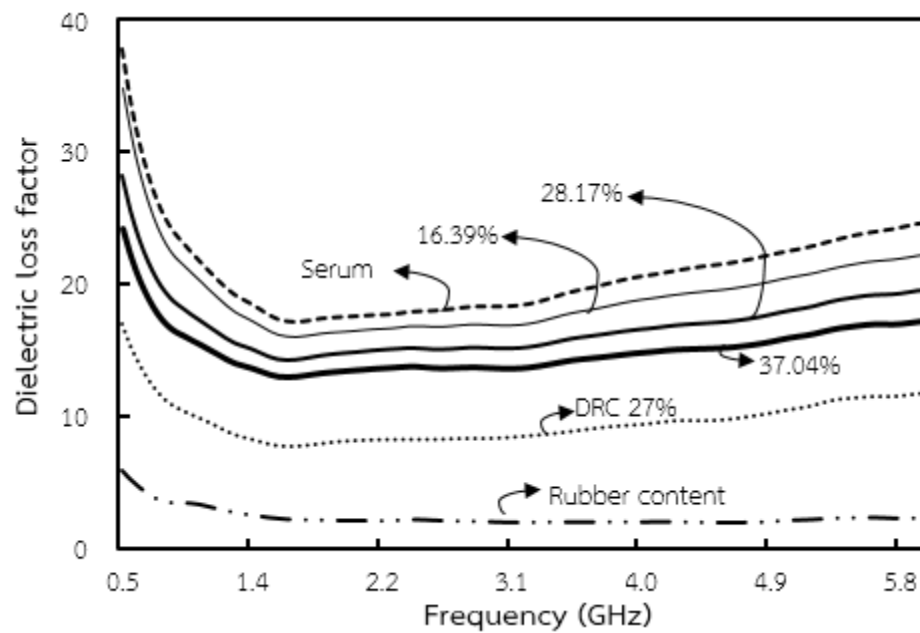
นอกจากนี้ รูปที่ 4.1 (ข) พบว่า ค่าสูญเสียใน ไดอิเล็กตริกของเซรามบิสสุทธีค่ามากที่สุดคือ 21.75 ส่วนค่าสูญเสียในไดอิเล็กตริกของน้ำยางสด (DCR ร้อยละ 27) มีเท่ากับ 9.82 และน้ำมีค่าเท่ากับ 3.55 มีค่าสูญเสียในไดอิเล็กตริกของเนื้อยางหลังการป่นมีค่าน้อยที่สุดคือ 3.31 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำ

4.1.2 สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรั่มที่มีแป้งมันปน

ผลการวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรั่มที่มีแป้งมันปนร้อยละ 16.39, 28.17 และ 37.04 โดยมวล เปรียบเทียบกับน้ำยางสด (DRC ร้อยละ 27) เนื้อยางหลังการปั่น และเซรั่มบริสุทธิ์ ในช่วงความถี่ 0.5 ถึง 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



(ก) ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก



(ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กตริก

รูปที่ 4.2 สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรั่มที่มีแป้งมันปนช่วงความถี่ 0.5 – 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 °C

รูปที่ 4.2 (ก) แสดงผลการวัดค่าคงตัวไดโวลิตริก และรูปที่ 4.2 (ข) แสดงผลการวัดค่าสูญเสียในไดโวลิตริกของน้ำยางสด เนื้อยางหลังการปั่น เซรั่มบริสุทธิ์ และเซรั่มที่มีแป้งมันปน ร้อยละ 16.39, 28.17 และ 37.04 โดยมวล ตามลำดับ พบว่าค่าคงตัวไดโวลิตริกและค่าสูญเสียในไดโวลิตริกขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของความถี่และปริมาณของแป้งมัน

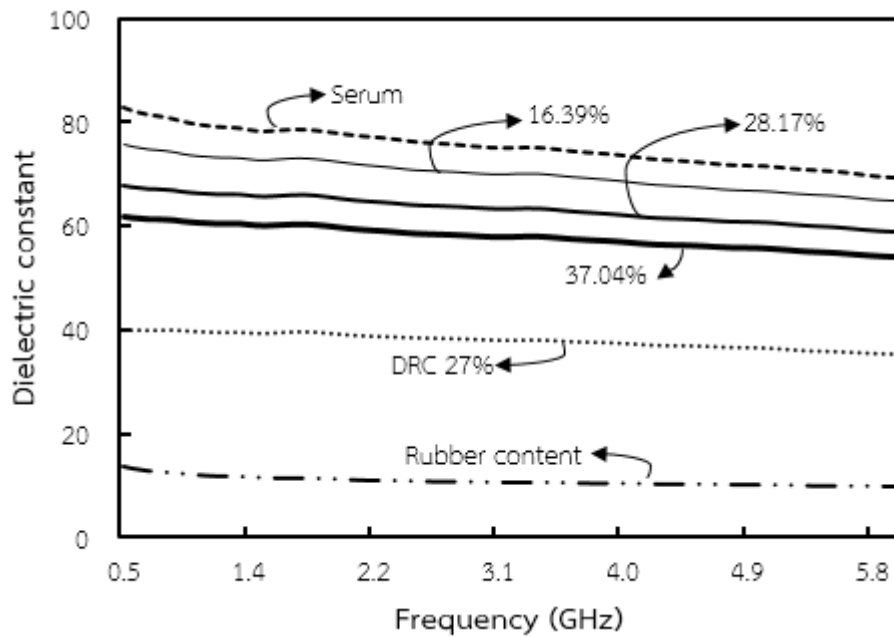
เมื่อความถี่สูงขึ้น พบว่าค่าคงตัวไดโวลิตริกจะลดลง ส่วนค่าสูญเสียในไดโวลิตริกมีค่าลดลงในช่วงความถี่ 0.5 ถึง 1.6 GHz ซึ่งเป็นผลมาจากสภาพนำไฟฟ้าของอิออนอิสระจากสารประกอบที่อยู่ในน้ำยางสด เนื้อยางหลังการปั่น เซรั่มบริสุทธิ์และแป้งมัน

แต่ในช่วงความถี่สูงกว่า 1.6 GHz พบว่าค่าสูญเสียในไดโวลิตริกมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกัน เซรั่มบริสุทธิ์ที่ถูกปนด้วยแป้งมันย่อมส่งผลให้ปริมาณเซรั่มบริสุทธิ์ที่อยู่ในเซรั่มปลอมปนลดลง และสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรั่มบริสุทธิ์จะลดลงเช่นกัน นอกจากนี้ยังมีอีกหนึ่งตัวแปรที่ส่งผลให้สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรั่มบริสุทธิ์ลดลง คือ ค่าคงตัวไดโวลิตริกของแป้งมันมีค่าเท่ากับ 3 ทำให้มีแนวโน้มลดลงเข้าใกล้ค่าคงตัวไดโวลิตริกของน้ำยางสด

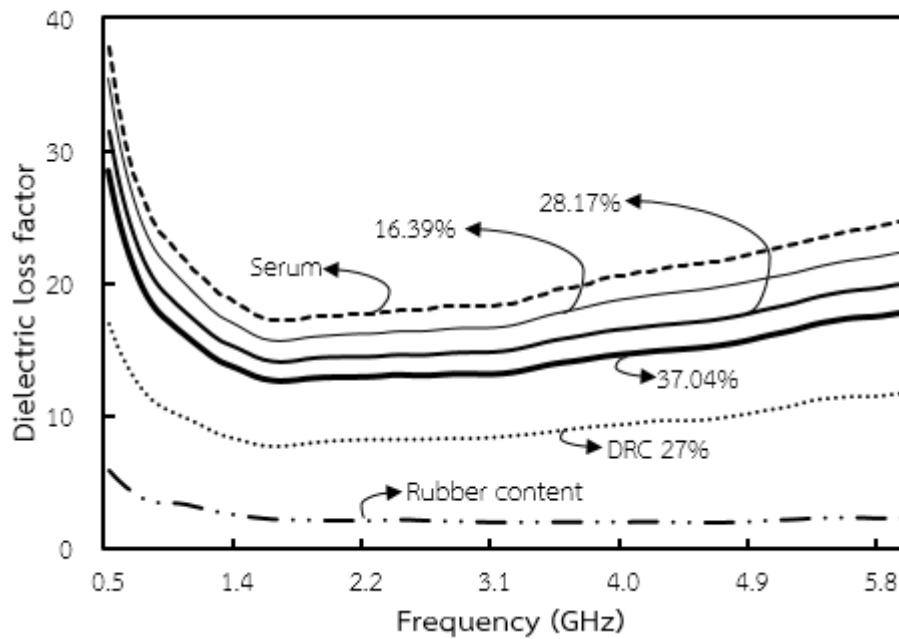
เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 1 GHz จากรูปที่ 4.2 (ก) พบว่า ค่าคงตัวไดโวลิตริกของเซรั่มที่มีแป้งมันปนร้อยละ 16.39, 28.17 และ 37.04 โดยมวล มีค่าเท่ากับ 71.31, 61.59 และ 54.85 ตามลำดับ จะมีค่าอยู่ระหว่างค่าคงตัวไดโวลิตริกของเซรั่มบริสุทธิ์กับน้ำยางสด (DCR ร้อยละ 27) ซึ่งค่าคงตัวไดโวลิตริกของเนื้อยางหลังการปั่นมีค่าน้อยสุดคือ 11.98 นอกจากนี้ รูปที่ 4.2 (ข) พบว่า ค่าสูญเสียในไดโวลิตริกของเซรั่มบริสุทธิ์มีค่ามากที่สุดคือ 21.75 ส่วนค่าสูญเสียในไดโวลิตริกของของเซรั่มที่มีแป้งมันปนร้อยละ 16.39, 28.17 และ 37.04 โดยมวล มีค่าเท่ากับ 20.10, 17.20 และ 15.42 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าสูญเสียในไดโวลิตริกของน้ำยางสด (DCR ร้อยละ 27) มีค่าเท่ากับ 9.82 ซึ่งค่าสูญเสียในไดโวลิตริกของเนื้อยางหลังการปั่นมีค่าน้อยสุดคือ 3.31

4.1.3 สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปน

ผลการวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซราม์ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปนร้อยละ 16.39, 28.17 และ 37.04 โดยมวล เปรียบเทียบกับน้ำยางสด (DCR ร้อยละ 27) เนื้อยางหลังการปั่น และเซราม์บริสุทธิ์ ในช่วงความถี่ 0.5 ถึง 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



(ก) ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก



(ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กตริก

รูปที่ 4.3 สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซราม์ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปนช่วงความถี่ 0.5 – 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 °C

รูปที่ 4.3 (ก) แสดงผลการวัดค่าคงตัวไดโวลิตริก และรูปที่ 4.3 (ข) แสดงผลการวัดค่าสูญเสียในไดโวลิตริกของน้ำยางสด เนื้อยาง เซรั่มบริสุทธิ์ และเซรั่มที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปลอมปนร้อยละ 16.39, 28.17 และ 37.04 โดยมวล ตามลำดับ พบว่าค่าคงตัวไดโวลิตริกและค่าสูญเสียในไดโวลิตริกขึ้นอยู่กับค่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่และปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต

เมื่อความถี่สูงขึ้น พบว่าค่าคงตัวไดโวลิตริกจะลดลง ส่วนค่าสูญเสียในไดโวลิตริกมีค่าลดลงในช่วงความถี่ 0.5 ถึง 1.6 GHz ซึ่งเป็นผลมาจากสภาพนำไฟฟ้าของอออนนิสจากสารประกอบที่อยู่ในน้ำยางสด เนื้อยางหลังการปั่น เซรั่มบริสุทธิ์และแคลเซียมคาร์บอเนต

แต่ในช่วงความถี่สูงกว่า 1.6 GHz พบว่าค่าสูญเสียในไดโวลิตริกมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกัน เซรั่มบริสุทธิ์ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปนยอมส่งผลให้ปริมาณเซรั่มบริสุทธิ์ที่อยู่ในเซรั่มปลอมปนลดลง และสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรั่มบริสุทธิ์จะลดลงเช่นกัน นอกจากนี้ยังมีอีกหนึ่งตัวแปรที่ส่งผลให้ค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรั่มบริสุทธิ์ลดลง คือ ค่าคงตัวไดโวลิตริกของแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ 9 ทำให้มีแนวโน้มลดลงเข้าใกล้ค่าคงตัวไดโวลิตริกของน้ำยางสด

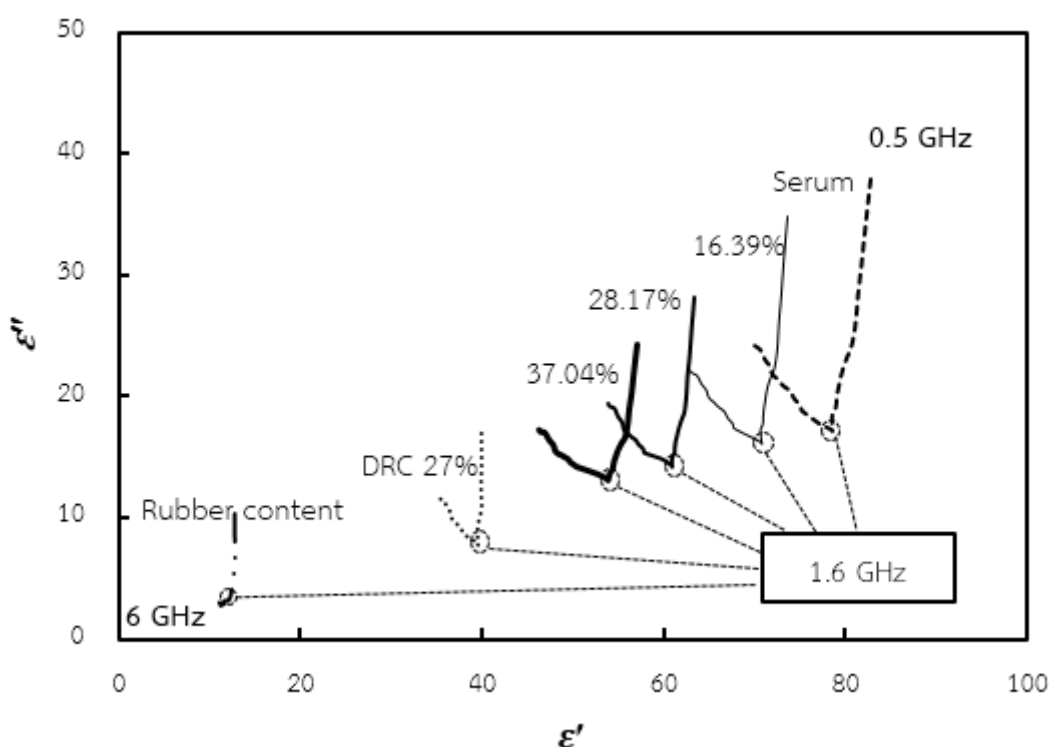
เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 1 GHz จากรูปที่ 4.3 (ก) พบว่า ค่าคงตัวไดโวลิตริกของเซรั่มที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปนร้อยละ 16.39, 28.17 และ 37.04 โดยมวล มีเท่ากับ 73.35, 66.20 และ 60.48 ตามลำดับ จะมีค่าอยู่ระหว่างค่าคงตัวไดโวลิตริกของเซรั่มบริสุทธิ์กับน้ำยางสด (DCR ร้อยละ 27) ซึ่งค่าคงตัวไดโวลิตริกของเนื้อยางหลังปั่นมีค่าน้อยสุด นอกจากนี้ รูปที่ 4.3 (ข) พบว่า ค่าสูญเสียในไดโวลิตริกของเซรั่มบริสุทธิ์ค่ามากที่สุดคือ 21.75 ค่าสูญเสียในไดโวลิตริกของเซรั่มที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปนร้อยละ 16.39, 28.17 และ 37.04 โดยมวล มีค่าเท่ากับ 19.99, 17.78 และ 16.07 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าสูญเสียในไดโวลิตริกของน้ำยางสด (DCR ร้อยละ 27) มีค่าเท่ากับ 9.82 ซึ่งค่าสูญเสียในไดโวลิตริกของเนื้อยางหลังการปั่น ซึ่งมีค่าน้อยสุดคือ 3.31

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.1.2 และ 4.1.3 เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 1 GHz พบว่าปริมาณของสารปลอมปนส่งผลต่อสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรั่มบริสุทธิ์ ในปริมาณที่เท่ากัน พบว่าค่าคงตัวไดโวลิตริกของเซรั่มที่มีแป้งมันปนมีค่าน้อยกว่าค่าคงตัวไดโวลิตริกของเซรั่มที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปน ในขณะที่ค่าสูญเสียในไดโวลิตริกของเซรั่มที่มีแป้งมันและแคลเซียมคาร์บอเนตปนมีค่าใกล้เคียงกัน

4.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของเซรัมบริสุทธิ์และเซรัมที่มีสิ่งปลอมปน

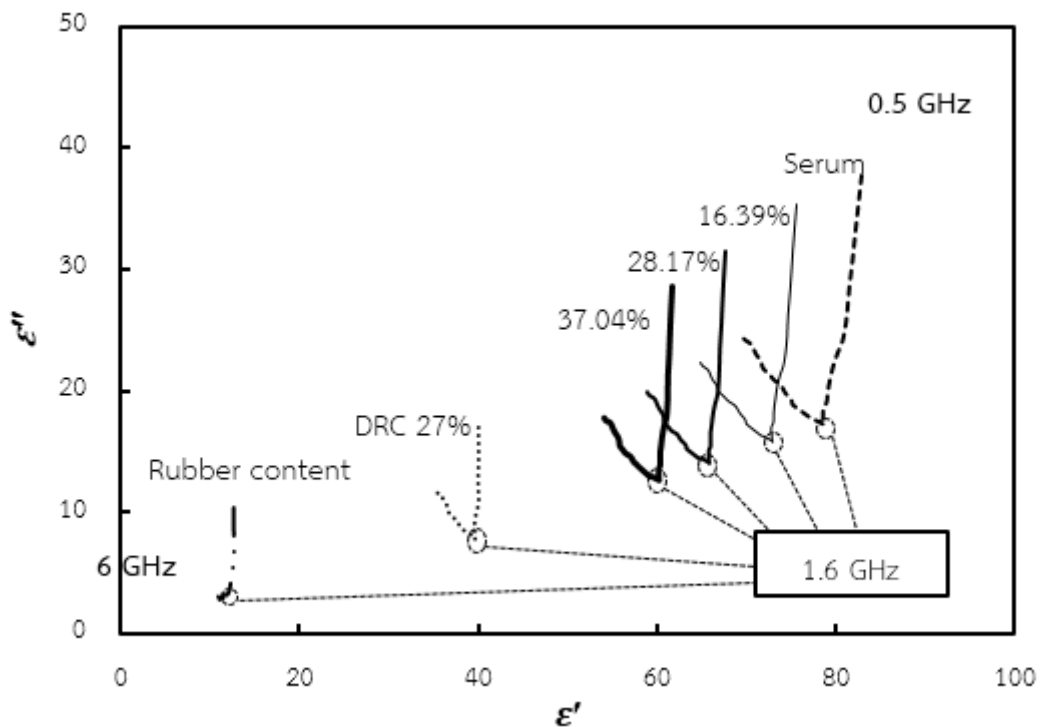
4.2.1 ความสัมพันธ์ของเซรัมบริสุทธิ์และเซรัมที่มีสิ่งปลอมปนบนแผนภาพ Cole-Cole

สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรัมที่ถูกปลอมปน เปรียบเทียบกับน้ำยางสด (DRC ร้อยละ 27) เนื้อยางหลังการปั่น และเซรัมบริสุทธิ์ในช่วงความถี่ 0.5 ถึง 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แผนภาพ Cole-Cole มีลักษณะคล้ายรูปครึ่งวงรี เป็นผลมาจากคุณลักษณะของสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน (ϵ' และ ϵ'') ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการเดอบาย ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 2 สามารถวิเคราะห์ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่ำ (Static dielectric: ϵ_s) และค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูง (High-frequency dielectric: ϵ_∞)



รูปที่ 4.4 เซรัมที่มีแป้งมันปนบนแผนภาพ Cole - Cole ช่วงความถี่ 0.5 - 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 °C

รูปที่ 4.4 สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนบนแผนภาพ Cole-Cole เมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกัน พบว่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรัมบริสุทธิ์สูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ และสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรัมที่มีแป้งมันปนจะลดลง เมื่อปริมาณของแป้งมันเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของแป้งมันมีค่าต่ำกว่าเซรัมบริสุทธิ์ ส่งผลให้สัดส่วนเซรัมบริสุทธิ์ในเซรัมที่ปลอมปนนั้นลดลง จึงทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกนั้นลดลงเช่นกัน



รูปที่ 4.5 เซรัมที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปนบนแผนภาพ Cole - Cole ช่วงความถี่ 0.5 - 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 °C

รูปที่ 4.5 สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนบนแผนภาพ Cole-Cole เมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกัน พบว่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรัมบริสุทธิ์สูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ และค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรัมที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปนจะลดลง เมื่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าต่ำกว่าเซรัมบริสุทธิ์ ส่งผลให้สัดส่วนเซรัมบริสุทธิ์ในเซรัมที่ปลอมปนนั้นลดลง จึงทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกนั้นลดลงไปด้วย

จากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 สามารถสังเกตได้ว่า ในช่วงความถี่ 0.5 ถึง 1.6 GHz ค่าสูญเสียในไดอิเล็กตริกจะลดลงอย่างชัดเจน เกิดจากสภาพนำไฟฟ้าของไอออนอิสระของสารประกอบที่อยู่ในน้ำยางสด เนื้อยางหลังการปั่น เซรัมบริสุทธิ์ และสิ่งปลอมปน ในส่วนของความถี่ที่สูงกว่า 1.6 GHz พบว่าค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนจะลดลงในลักษณะคล้ายกับรูปครึ่งวงรีซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายกับน้ำ [3] เมื่อปริมาณสารปลอมปนมากขึ้นจะทำให้ค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรัมบริสุทธิ์ลดลง นอกจากนี้สามารถวิเคราะห์ค่า ϵ_r และ ϵ_∞ ของเซรัมบริสุทธิ์และเซรัมที่มีแป้งมันและแคลเซียมคาร์บอเนตปน แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่ำและค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูง

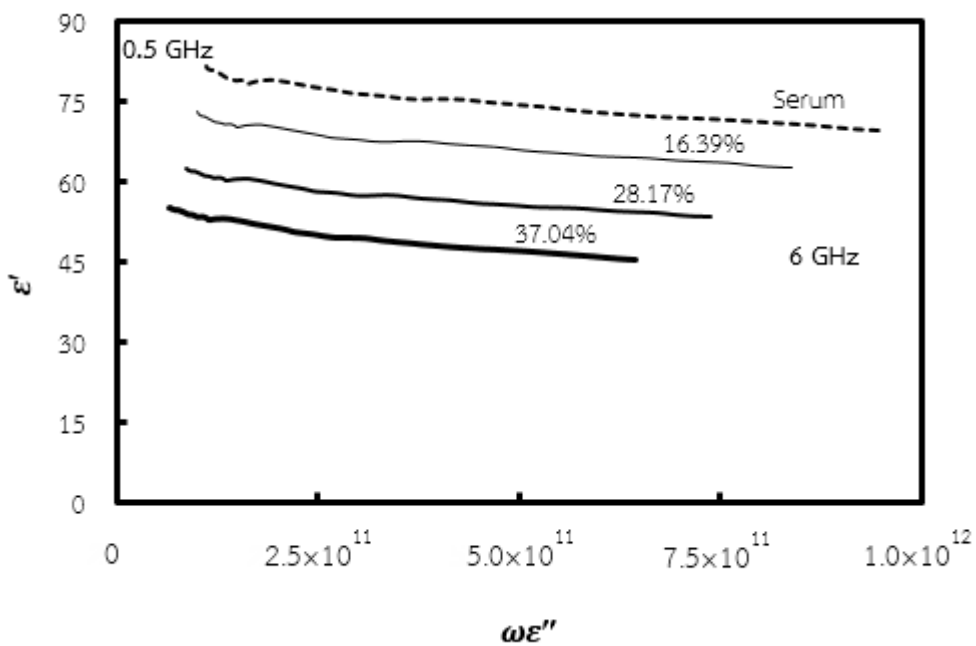
Samples		ϵ_s	ϵ_∞
Pure serum		79.31	22.13
Cassava	16.39%	71.15	20.98
	28.17%	61.05	18.03
	37.04%	53.66	17.33
CaCO ₃	16.39%	73.31	22.76
	28.17%	66.21	21.05
	37.04%	60.52	19.65

4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\omega\varepsilon''$ กับ ε' ของเซรัมบริสุทธิ์และเซรัมที่มีสิ่งปลอมปน

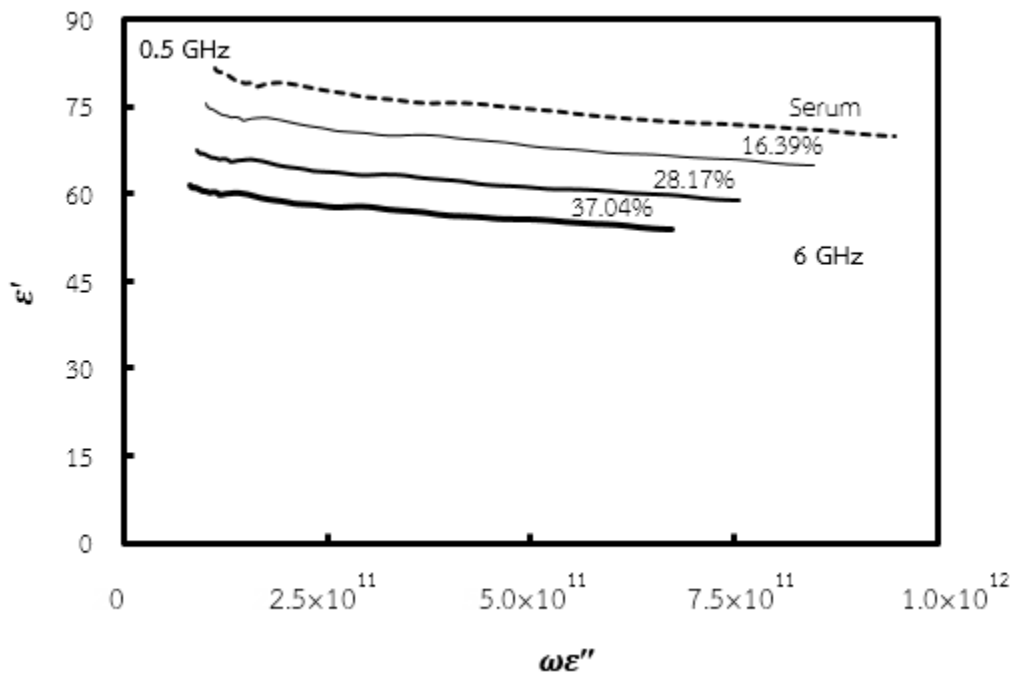
สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรัมบริสุทธิ์และเซรัมที่ถูกปลอมปน ในช่วงความถี่ 0.5 ถึง 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะแสดงอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่าง $\omega\varepsilon''$ กับ ε' โดยที่ ε' ขึ้นกับฟังก์ชันของ $\omega\varepsilon''$ [31] ดังสมการ 4.1

$$\varepsilon' = -\tau(\omega\varepsilon'') + \varepsilon_s \quad (4.1)$$

เนื่องจากสมการดังกล่าวอยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น จึงสามารถวิเคราะห์เวลาผ่อนคลาย (τ) ได้จากความชันของสมการเชิงเส้น ดังรูปที่ 4.6 (เซรัมที่มีแป้งปน) และรูปที่ 4.7 (เซรัมที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปน)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\omega\varepsilon''$ กับ ε' ของเซรัมที่มีแป้งปน
ช่วงความถี่ 0.5 – 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 °C



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\omega\varepsilon''$ กับ ε' ของเซรัมที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปน ช่วงความถี่ 0.5 – 6 GHz ที่อุณหภูมิ 25 °C

จากรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

เซรัมบริสุทธิ์

$$\varepsilon' = -1.26 \times 10^{-11} \omega\varepsilon'' + 81.0 \quad ; R^2 = 0.97 \quad (4.2)$$

เซรัมที่มีแป้งมันปนร้อยละ 16.39 โดยมวล

$$\varepsilon' = -1.26 \times 10^{-11} \omega\varepsilon'' + 72.6 \quad ; R^2 = 0.96 \quad (4.3)$$

เซรัมที่มีแป้งมันปนร้อยละ 28.17 โดยมวล

$$\varepsilon' = -1.25 \times 10^{-11} \omega\varepsilon'' + 62.1 \quad ; R^2 = 0.95 \quad (4.4)$$

เซรัมที่มีแป้งมันปนร้อยละ 37.04 โดยมวล

$$\varepsilon' = -1.57 \times 10^{-11} \omega\varepsilon'' + 54.7 \quad ; R^2 = 0.96 \quad (4.5)$$

เซรัมที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปนร้อยละ 16.39 โดยมีวล

$$\varepsilon' = -1.25 \times 10^{-11} \omega \varepsilon'' + 74.7 \quad ; R^2 = 0.97 \quad (4.6)$$

เซรัมที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปนร้อยละ 28.17 โดยมีวล

$$\varepsilon' = -1.19 \times 10^{-11} \omega \varepsilon'' + 67.3 \quad ; R^2 = 0.97 \quad (4.7)$$

เซรัมที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปนร้อยละ 37.04 โดยมีวล

$$\varepsilon' = -1.18 \times 10^{-11} \omega \varepsilon'' + 61.4 \quad ; R^2 = 0.97 \quad (4.8)$$

จากสมการ (4.2) – สมการ (4.8) พบว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าระหว่าง 0.95-0.97 และสามารถวิเคราะห์ค่า τ ของแต่ละตัวอย่างได้ตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าเวลาผ่อนคลายของเดอบาย

Samples		τ (psec)	R^2
Pure serum		12.6	0.97
Cassava	16.39%	12.6	0.96
	28.17%	12.5	0.95
	37.04%	15.7	0.96
CaCo ₃	16.39%	12.5	0.97
	28.17%	11.9	0.97
	37.04%	11.8	0.97

จากหัวข้อ 4.2.1 และหัวข้อ 4.2.2 ทำให้ทราบพารามิเตอร์ของ ε_s , ε_∞ และ τ จากนั้นนำพารามิเตอร์เหล่านี้แทนลงในสมการ (2.7) เพื่อคำนวณค่า σ ที่ความถี่ 1 GHz ดังตารางที่ 4.3 พบว่า สภาพนำไฟฟ้ามากที่สุดคือ เซรัมบริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 1.27 S/m ส่วนสภาพนำไฟฟ้าของเซรัมที่มีแป้งมันและแคลเซียมคาร์บอเนตปนจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณของสารปลอมปนเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.3 สภาพนำไฟฟ้าของเซรัมบริสุทธิ์และเซรัมที่มีสิ่งปลอมปน

Samples		σ (S/m)
Pure serum		1.27
Cassava	16.39%	1.15
	28.17%	1.00
	37.04%	0.87
CaCO ₃	16.39%	1.14
	28.17%	0.99
	37.04%	0.88

จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ความถี่ 1 GHz พบว่าพารามิเตอร์ ϵ_s , ϵ_∞ , τ และ σ เหล่านี้ ได้อธิบายถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซรัมบริสุทธิ์และเซรัมปลอมปน แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ของเซรัมบริสุทธิ์และเซรัมที่มีสิ่งปลอมปน

Samples		ϵ_s	ϵ_∞	τ (psec)	σ (S/m)
Pure serum		79.31	22.13	12.6	1.27
Cassava	16.39%	71.15	20.98	12.6	1.15
	28.17%	61.05	18.03	12.5	1.00
	37.04%	53.66	17.33	15.7	0.87
CaCO ₃	16.39%	73.31	22.76	12.5	1.14
	28.17%	66.21	21.05	11.9	0.99
	37.04%	60.52	19.65	11.8	0.88

จากตารางที่ 4.4 พบว่าพารามิเตอร์ ϵ_s , ϵ_∞ และ σ สามารถนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายเซรัมบริสุทธิ์และเซรัมที่ถูกปลอมปนได้ และสามารถนำไปพัฒนาเป็นแบบจำลองสำหรับสำหรับตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยางได้เช่นกัน แต่ในงานวิจัยนี้ได้นำสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรัมบริสุทธิ์ที่ความถี่ 1 GHz ไปสร้างแบบจำลองสำหรับตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง เพื่อให้สอดคล้องกับสมมติฐาน

4.3 แบบจำลองสำหรับตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง

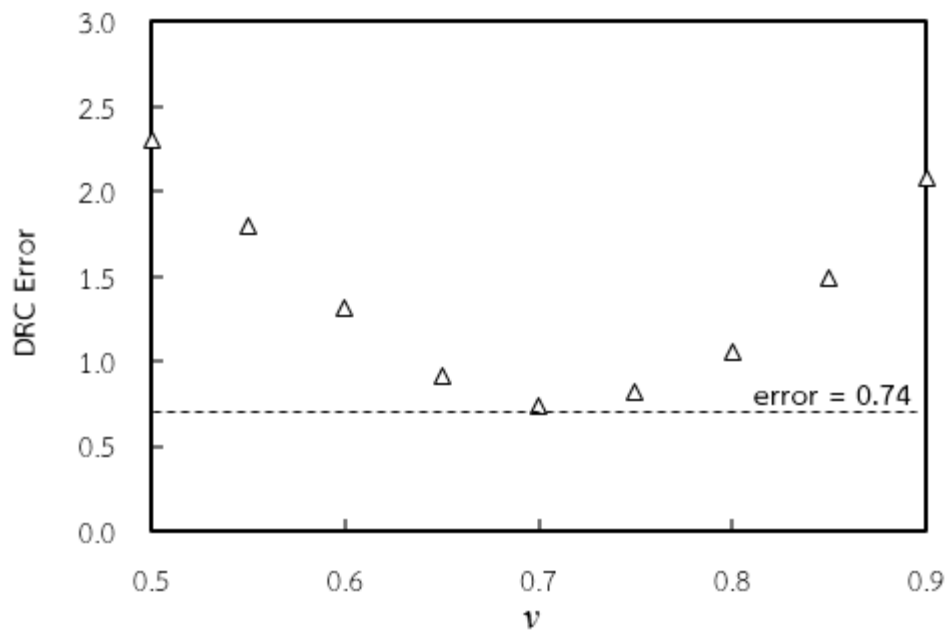
แบบจำลองไดอิเล็กตริกแบบผสม แสดงในสมการ (3.2) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับการทำนายน้ำยางที่มีการปลอมปน และจากสมการ (3.2) เมื่อแทนค่า ϵ_w ได้จากการวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรามิกบริสุทธิ์ของน้ำยางที่ความถี่ 1 GHz ซึ่งมีค่าเท่ากับ $79.37 - 22.25j$, ϵ_s เป็นสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเนื้อยางแห้งที่มีค่าเท่ากับ $2.28 - 0.06j$ จะได้

$$f = \frac{\epsilon_{eff} - 79.37 + 22.25j}{\epsilon_{eff} + 158.74 - 44.5j + v(\epsilon_{eff} - 79.37 + 22.25j)} \times \frac{161.02 - 44.56j + v(\epsilon_{eff} - 79.37 + 22.25j)}{-77.09 - 22.31j} \quad (4.9)$$

จากสมการ (4.9) เมื่อแทนค่า v และ ϵ_{eff} เป็นสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของน้ำยางพาราซึ่งได้จากการวัด สามารถหาค่า f ได้ จากนั้นหาเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางได้จากสมการ (4.10)

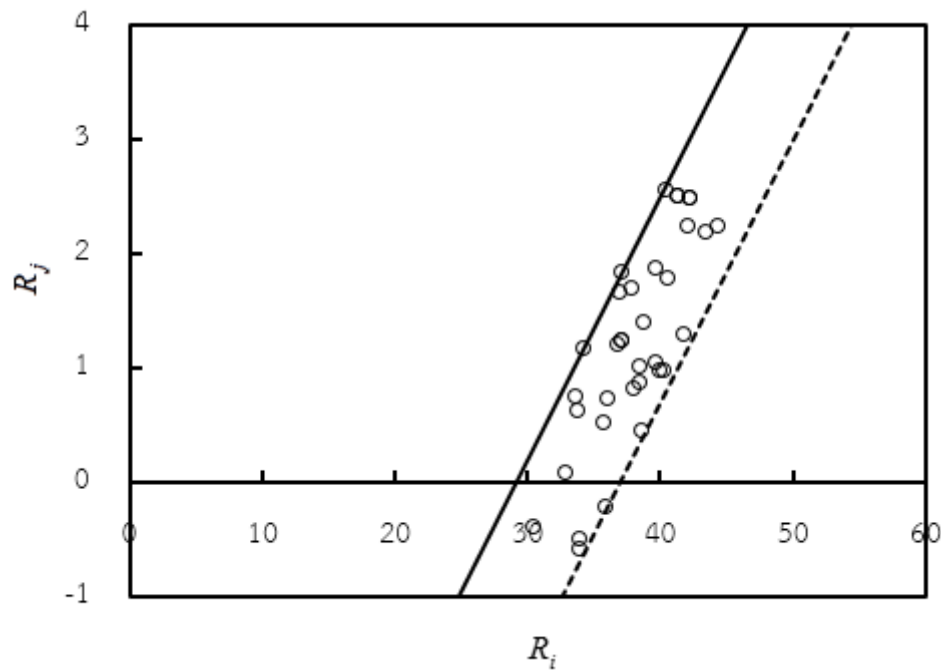
$$R = \frac{0.9f}{0.9f + 1.02(1-f)} \quad (4.10)$$

เมื่อแทนค่า D_s คือค่าความหนาแน่นของยางแห้งที่มีค่าเท่ากับ 0.90 g/cm^3 , D_w คือค่าความหนาแน่นของเซรามิกบริสุทธิ์ของน้ำยางที่มีค่าเท่ากับ 1.02 g/cm^3 , R เป็นจำนวนเชิงซ้อน โดยส่วนจริง (R_r) คือค่า DRC และส่วนจินตภาพ (R_j) แทนองค์ประกอบที่ไม่ใช่ยาง เนื่องจาก v เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความแม่นยำของแบบจำลอง โดยการปรับค่า v ตั้งแต่ 0.5 ถึง 0.9 เพื่อหาค่า v ที่ทำให้แบบจำลองนี้แม่นยำมากที่สุด ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ผลลัพธ์ของการคำนวณเปอร์เซ็นต์เนื้องานแห้งในน้ำอย่างสดกับพารามิเตอร์ ν

จากรูปที่ 4.8 พบว่า ν เท่ากับ 0.7 ทำให้ผลลัพธ์ของการทำนาย DRC มีค่าใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐานมากที่สุด ซึ่งมีความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์น้อยที่สุดคือ 0.74 ดังนั้นค่า ν ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทำนายค่า DRC ที่ความถี่ 1 GHz ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น



รูปที่ 4.9 ผลลัพธ์ของการคำนวณเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสด

ในรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสด (R_i) กับองค์ประกอบที่ไม่ใช่ยาง (R_j) ที่ความถี่ 1 GHz และ ν เท่ากับ 0.7 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสดมีค่าใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐาน (ISO 126:1972 Dry rubber content, DRC) ซึ่งมีความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ร้อยละ 0.82 ของเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง ผลลัพธ์ดังกล่าวนำไปสู่การสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายน้ำยางสดที่มีการปลอมปน โดยการสร้างขอบเขตให้ครอบคลุมตัวอย่างน้ำยางสดบริสุทธิ์ทั้งหมด และกำหนดเส้นขอบบน (เส้นทึบ) และเส้นขอบล่าง (เส้นประ) ดังสมการ (4.11) และ (4.12) ตามลำดับ จะได้ความกว้างระหว่างขอบบนกับขอบล่างเท่ากับ 1.71

$$R_j = 0.23R_i - 6.7 \quad (4.11)$$

$$R_j = 0.23R_i - 8.5 \quad (4.12)$$

จากสมการ (4.11) และ สมการ (4.12) นำไปสู่การหาสมการเส้นตรงที่อยู่กึ่งกลางระหว่างเส้นขอบบนกับขอบล่าง คือ

$$R_j = 0.23R_i - 7.56 \quad (4.13)$$

และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไป ดังนี้

$$0.23R_i - R_j - 7.56 = 0 \quad (4.14)$$

จากสมการ (4.14) จะได้ค่าคงตัว A เท่ากับ 0.23 B เท่ากับ -1 และ C เท่ากับ -7.56 ลงในสมการ (2.8) จะได้

$$d = \frac{|0.23R_i - R_j - 7.56|}{1.026} \quad (4.15)$$

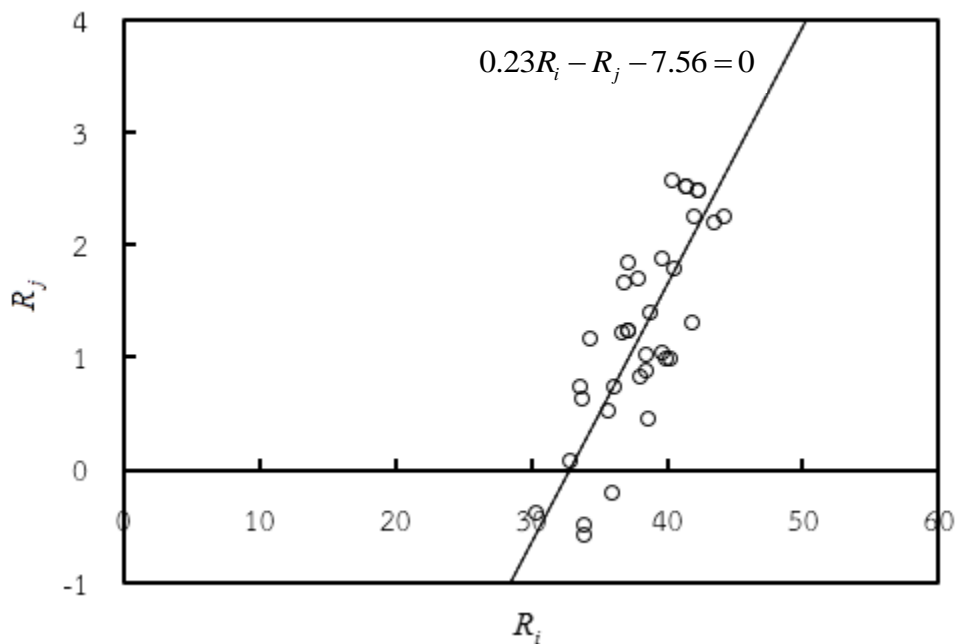
จากสมการ (4.11) – (4.15) จะได้ว่า

R_j คือ ส่วนจินตภาพ

R_i คือ ส่วนจริง

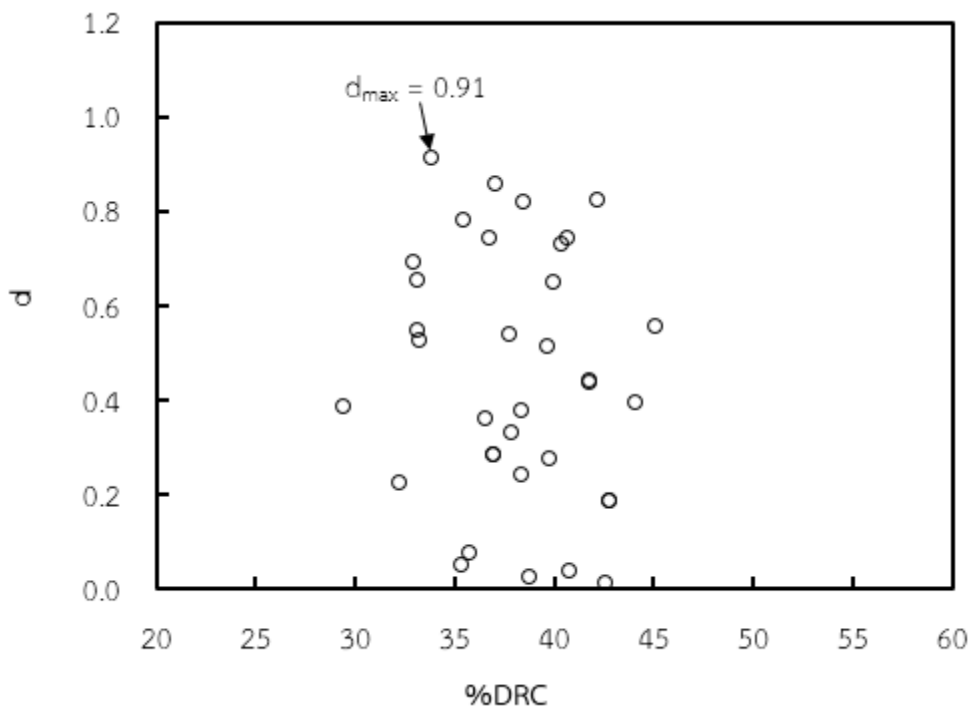
d คือ ระยะห่างระหว่างจุดกับเส้นตรง

แนวเส้นกึ่งกลางหรือเส้นตรงที่อยู่กึ่งกลางระหว่างเส้นขอบบนกับขอบล่าง เพื่อคำนวณหา ระยะห่างของตัวอย่างกับแนวเส้นกึ่งกลาง แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างกับแนวเส้นกึ่งกลาง

จากรูปที่ 4.10 เป็นการนำผลลัพธ์จากการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในสมการ (4.15) เพื่อหาระยะห่างระหว่างตัวอย่างกับเส้นตรง แสดงดังรูปที่ 4.11

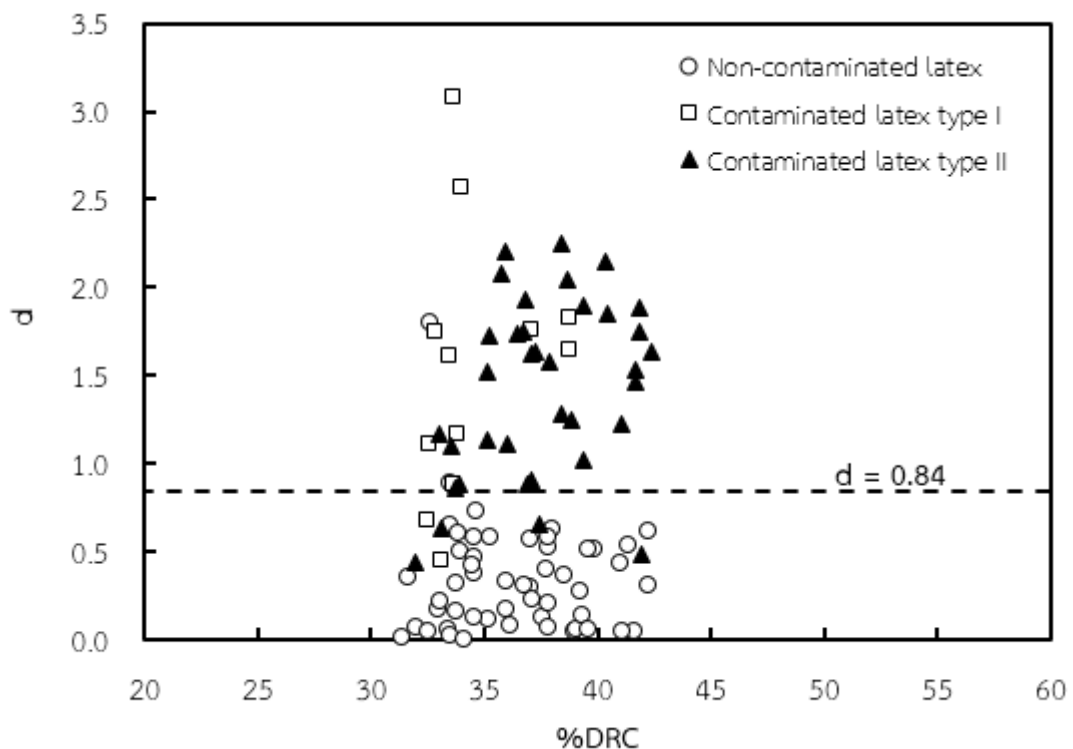


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในตัวอย่างกับระยะห่างของตัวอย่าง

จากรูปที่ 4.11 พบว่าระยะห่างระหว่างตัวอย่างกับแนวเส้นกึ่งกลางมีค่ามากที่สุดคือ 0.91 ระยะห่างที่ใช้สำหรับกำหนดขอบเขตสำหรับการตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยางสด โดยนำระยะห่างของตัวอย่างที่อยู่บนเส้นขอบบนและเส้นขอบล่าง (แสดงในรูปที่ 4.9) มาคำนวณหาระยะห่างเฉลี่ยซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.84 เพื่อให้การกำหนดขอบเขตมีความแม่นยำขึ้น ดังนั้นตัวอย่างน้ำยางสดที่มีระยะห่างจากแนวเส้นกึ่งกลางมากกว่า 0.84 แสดงว่า ตัวอย่างน้ำยางสดนั้นมีการปลอมปน

4.4 การทดสอบแบบจำลองสำหรับตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง

เมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งของแต่ละตัวอย่าง มาคำนวณหาระยะห่าง ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่หนึ่ง เป็นกลุ่มของเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งที่มีระยะห่างน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.84 จะถูกตรวจสอบให้เป็นน้ำยางที่ปราศจากการปลอมปน และกลุ่มที่สอง เป็นกลุ่มของเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งซึ่งมีระยะห่างมากกว่า 0.84 ขึ้นไป จะถูกตรวจสอบให้เป็นน้ำยางที่มีการปลอมปน



รูปที่ 4.12 ระยะห่างของผลลัพธ์ %DRC เทียบกับแนวเส้นกึ่งกลาง

จากรูปที่ 4.12 การนำตัวอย่างเพื่อทดสอบแบบจำลอง สามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ประเภทที่หนึ่งเป็นน้ำยางสดไม่ปลอมปน (Non-contaminated latex) ส่วนประเภทที่สองเป็นน้ำยางสดปลอมปน (Contaminated latex) ได้แก่ น้ำยางสดที่มีแอมโมเนียปลอมปนมากกว่าร้อยละ 0.2 (Contaminated latex type I) และน้ำยางสดที่มีแป้งมันปลอมปนและแคลเซียมคาร์บอเนตปลอมปน (Contaminated latex type II) เมื่อตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลอง เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของแบบจำลอง ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบของแบบจำลองไดอิเล็กตริก

ผลการทำนาย	น้ำยาง		รวม
	น้ำยางไม่ปลอมปน	น้ำยางปลอมปน	
น้ำยางไม่ปลอมปน	50	6	56
น้ำยางปลอมปน	2	42	44
รวม	52	48	100

จากตารางที่ 4.5 ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองมีทั้งหมด 100 ตัวอย่าง ซึ่งจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ น้ำยางสดไม่ปลอมปนมี 52 ตัวอย่าง กับน้ำยางสดปลอมปนมี 48 ตัวอย่าง พบว่า ผลการทำนายของน้ำยางสดไม่ปลอมปนถูกต้อง 50 ตัวอย่าง และผิดพลาด 2 ตัวอย่าง ส่วนผลการทำนายของน้ำยางสดปลอมปนถูกต้อง 42 ตัวอย่าง และผิดพลาด 6 ตัวอย่าง สรุปได้ว่า แบบจำลองนี้ทำนายได้ถูกต้องทั้งหมด 92 ตัวอย่าง และทำนายผิดพลาดทั้งหมด 8 ตัวอย่าง

นอกจากนี้ข้อมูลในตารางที่ 4.5 สามารถจำแนกความผิดพลาดที่เกิดจากการทำนายออกเป็น 2 ประเภท คือ

- 1) ความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type I error) คือ ความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลองทำนายว่าน้ำยางปลอมปน ในขณะที่ความจริงน้ำยางไม่ปลอมปน ดังนั้นค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 2 ซึ่งได้จากสมการ (2.9)
- 2) ความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II error) คือ ความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลองทำนายว่าน้ำยางไม่ปลอมปน ในขณะที่ความจริงน้ำยางปลอมปน ดังนั้นค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 6 ซึ่งได้จากสมการ (2.10)

จากการทดสอบประสิทธิภาพในการตัดสินใจของแบบจำลองในสมการ (2.11) พบว่าแบบจำลองทำนายได้ถูกต้องร้อยละ 92

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอการวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน การวิเคราะห์พารามิเตอร์ซึ่งเป็นคุณลักษณะทางไฟฟ้า การนำค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนมาสร้างแบบจำลองและการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองไดอิเล็กตริกสำหรับการตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรามิกรีพอสิตูทและเซรามิกรีพอสิตูทที่มีสิ่งปลอมปน

การวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่า สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรามิกรีพอสิตูทจะลดลงเมื่อปริมาณของสิ่งปลอมปนเพิ่มขึ้น หากพิจารณาในช่วงความถี่ 0.5 ถึง 1.6 GHz พบว่าคุณลักษณะของค่าสูญเสียในไดอิเล็กตริกจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลกระทบจากสภาพนำไฟฟ้าของอ็อกไซด์สารประกอบในเซรามิกรีพอสิตูทและสิ่งปลอมปน ในขณะที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของเซรามิกรีพอสิตูทและเซรามิกรีพอสิตูทจะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

5.1.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของเซรามิกรีพอสิตูทและเซรามิกรีพอสิตูทที่มีสิ่งปลอมปน

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ ซึ่งอธิบายถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซรามิกรีพอสิตูทและเซรามิกรีพอสิตูทที่มีสิ่งปลอมปน ที่ความถี่ 1 GHz พบว่า ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่ำ (ϵ_r), ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูง (ϵ_∞), สภาพนำไฟฟ้า (σ) และเวลาผ่อนคลายของเดอบาย (τ) จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของสิ่งปลอมปนเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเซรามิกรีพอสิตูทที่มีแบริ่งมันปนหรือเซรามิกรีพอสิตูทที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตปน พบว่าสภาพนำไฟฟ้าของเซรามิกรีพอสิตูทกับเซรามิกรีพอสิตูทมีความแตกต่างกัน มีความเป็นไปได้ว่าสภาพนำไฟฟ้าสามารถใช้จำแนกเซรามิกรีพอสิตูทจากเซรามิกรีพอสิตูทได้ ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ สามารถใช้จำแนกเซรามิกรีพอสิตูทจากเซรามิกรีพอสิตูทได้เช่นกัน

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำค่าสภาพยอมไฟฟ้าของเซรามิกรีพอสิตูทที่ความถี่ 1 GHz เป็นพารามิเตอร์ในการสร้างแบบจำลองไดอิเล็กตริกสำหรับใช้ตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง

5.1.3 แบบจำลองสำหรับตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง

แบบจำลองไดอิเล็กตริกแบบผสมถูกสร้างสำหรับความถี่ 1 GHz เนื่องจากเป็นย่านความถี่ที่สามารถสังเคราะห์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ และนิยมใช้งานกัน ให้ผลการทำนายเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐาน ซึ่งความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์เท่ากับ 0.82 โดยนำผลลัพธ์ค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งคำนวณหาระยะห่างจาก แนวเส้นกึ่งกลางพบว่า ระยะห่างที่มากที่สุดเท่ากับ 0.91 และระยะห่างที่ใช้สำหรับกำหนดเขตขอบสำหรับการตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยางสดมีค่าเท่า 0.84 (ค่าเฉลี่ยระยะห่างของตัวอย่างที่อยู่บนเส้นขอบบนและเส้นขอบล่าง) ถ้าระยะห่างของน้ำยางสดจากแนวเส้นกึ่งกลางมีค่ามากกว่า 0.84 แสดงว่าน้ำยางสดนั้นเป็นน้ำยางสดที่มีสิ่งปลอมปน

5.1.4 การทดสอบแบบจำลองสำหรับตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองพบว่า สามารถทำนายได้ถูกต้องร้อยละ 92 จากตัวอย่างที่ใช้ทดสอบทั้งหมด 100 ตัวอย่าง ซึ่งอยู่ในระดับความเชื่อมั่นที่ยอมรับได้ ส่วนผลการทำนายที่มีความผิดพลาดถูกแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ 1 มีความผิดพลาดคิดเป็นร้อยละ 2 และประเภทที่ 2 มีความผิดพลาดคิดเป็นร้อยละ 6 ซึ่งค่าความผิดพลาดทั้ง 2 ประเภทนั้นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้เช่นกัน

ผลการศึกษาจากการวิจัยนี้ ได้แบบจำลองไดอิเล็กตริกสำหรับตรวจสอบสิ่งปลอมปนในน้ำยาง และแบบจำลองดังกล่าวสามารถจำแนกน้ำยางสดปลอมปนจากน้ำยางสดไม่ปลอมปนได้ ซึ่งผลการทำนายถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ **ดังนั้นงานวิจัยนี้**สามารถนำวิธีการตรวจสอบสิ่งปลอมปนไปประยุกต์กับเครื่องวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งแบบรีเฟลกโตมิเตอร์หกพอร์ต เพื่อวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งและตรวจสอบสิ่งปลอมปนได้ภายในเครื่องเดียว

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ก่อนวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนจำเป็นต้องทำการสอบเทียบโพรบเซนเซอร์และเครื่องมือวัด เพื่อตรวจสอบว่าสามารถใช้งานได้ และในขณะทำการสอบเทียบอุปกรณ์สอบเทียบจะต้องนิ่งสนิทไม่แกว่ง เพราะจะทำให้ผลการสอบเทียบเกิดความผิดพลาดได้
- 5.2.2 ขณะวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของตัวอย่าง จะต้องไม่มีฟองอากาศเกาะที่ปลายโพรบเซนเซอร์และโพรบเซนเซอร์จะต้องนิ่งสนิท เพราะอาจจะทำให้ผลการวัดผิดพลาดได้
- 5.2.3 เมื่อวางตัวอย่างทิ้งไว้จะทำให้เกิดการตกตะกอน แยกเป็นชั้นระหว่างเซรั่มกับสิ่งปลอมปนซึ่งไม่เป็นเนื้อเดียว ดังนั้นก่อนการวัดจะต้องคนตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกัน
- 5.2.4 ผลการวิจัยนี้ ได้ศึกษาการวัดสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของตัวอย่างที่อุณหภูมิเดียว คือ 25 องศาเซลเซียส เนื่องจากการทดลองในแต่ละครั้งอุณหภูมิของตัวอย่างมีความแตกต่างกันและทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นอุณหภูมิถูกกำหนดให้คงที่ เพื่อให้ผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือและถูกต้องมากขึ้น หากนำไปใช้งานจริงจำเป็นต้องออกแบบให้ครอบคลุมอุณหภูมิแวดล้อม

บรรณานุกรม

- [1] “เดือนเกษตรกรอย่าใส่สารปลอมปนในน้ำยาง,” 01-Mar-2014. [Online]. Available: www.dailynews.co.th/Content/agriculture/82703.
- [2] วิภาวี พัฒนกุล, “ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์,” งานนิทรรศการพืชสวน เชียงใหม่, 2554, vol. 2554, pp. 5–6.
- [3] สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), “ประเด็นโจทย์วิจัยยางพารา,” 02-Mar-2014. [Online]. Available: http://ird.mutp.ac.th/old/files_upload/rubber2.pdf.
- [4] S. Julrat, M. Chongcheawchamnan, T. Khaorapapong, O. Patarapiboolchai, M. Kiriksh, and I. D. Robertson, “Single-Frequency-Based Dry Rubber Content Determination Technique for In-Field Measurement Application,” *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 10, pp. 3019–3030, 2012.
- [5] K. B. Khalid, “Determination of dry rubber content of hevea latex by microwave technique,” *Pertanika J Sci Technol*, vol. 5(2), pp. 192–195, 1982.
- [6] K. B. Khalid, “Microwave Dielectric Properties of Hevea Rubber Latex,” *Microw. Conf. 1992 APMC 92 1992 Asia-Pac.*, vol. 2, pp. 611–616, 1992.
- [7] ประยุทธ์ อัครเอกฉាលิน, เสวก พงษ์สำราญ และ สมพร ศรีวัฒนพล, “เครื่องวัด %DRC โดยใช้ความถี่คลื่นไมโครเวฟ,” www.cop.rmutsb.ac.th, 05-June-2556. [Online]. Available: www.cop.rmutsb.ac.th/userfiles/3229900157632/DRC_Somporn.pdf.
- [8] K. Khalid, J. Hassan, and W. D. W. Yusef, “Dielectric phenomena in hevea rubber latex and its applications,” *Proc. 5th Int. Conf. Prop. Appl. Dielectr. Mater. 1997*, vol. 1, pp. 78–81 vol.1, 1997.
- [9] S. Julrat, M. Chongcheawchamnan, and I. D. Robertson, “Characterisation of the dielectric properties of rubber latex from 0.5 to 33 GHz,” *Biosystems Engineering*, vol. 125, pp. 1-8, 2014.
- [10] Z. M. Zhao, X. D. Jin, L. Zhang, and X. L. Yu, “A novel measurement system for dry rubber content in concentrated natural latex based on annular photoelectric sensor,” *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 5(3), pp. 251–260, Mar. 2010.

- [11] S. Somwong, P. Wunchum, and M. Chongcheawchamnan, "Effects of contaminations in rubber latex on relative permittivity at 0.5–2.0 GHz," *Proceeding of ECTI – 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology*, pp. 1–4, 2015.
- [12] เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี และ ฐณภณ สมมาธิ, "การตรวจหาปริมาณแอมโมเนียอิสระในน้ำยางธรรมชาติด้วยเทคนิควัดการนำไฟฟ้า," *สงขลานครินทร์*, 2551.
- [13] "สถานการณ์ยางพาราปี 2557 และแนวโน้มปี 2558," 4-June-2015. [Online]. Available: www.bot.or.th/Thai/MonetaryPolicy/Southern/ResearchPaper/Rubber2014andTrend2015.pdf.
- [14] "รัฐลุยโค่นยางปีนี้ ตัดทิ้ง 4 แสนไร่ - "อภิสิทธิ์" วอน รบ.ดึงราคา ชี้ชาวสวนเดือดร้อนมานาน," 4-June-2015. [Online]. Available: http://www.matichon.co.th/news_detail.php?newsid=1422832245.
- [15] "กยท. เผย ผลประเมินสถานการณ์การค้า-การส่งออกยางพาราไทยใน ปี 2560," 21-Mar-2017. [Online]. Available: www.rubber.co.th/mobile_detail.php?cid=386&nid=4688.
- [16] Marcia M. Rippel, Lay-Theng Lee, Carlos A. P. Leite, and Fernando Galembeck, "Skim and cream natural rubber particles: colloidal properties: coalescence and film formation," *J. Colloid Interface Sci.*, pp. 330–340, Jul. 2003.
- [17] "บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง," 21-Mar-2017. [Online]. Available: www.vcharkarn.com/varticle/38525.
- [18] "คลื่นไมโครเวฟ คุณสมบัติ และประโยชน์คลื่นไมโครเวฟ," 20-Mar-2017. [Online]. Available: kb2tmp.psu.ac.th/psukb/bitstream/2010/6163/9/Chapter2.pdf.
- [19] "ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ," 21-Mar-2017. [Online]. Available: www.vcharkarn.com/varticle/38525.
- [20] "หน่วยที่ 8 เรื่องสื่อสารไมโครเวฟ," 20-Mar-2017. [Online]. Available: wiki.stjohn.ac.th/groups/poly_electronics/wiki/f0de8/.

- [21] โมนัย ไกรฤกษ์, *วิศวกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า*. บริษัท พิมพ์สวย จำกัด, 2544.
- [22] A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, 2nd ed. 2012.
- [23] “การวัดสภาพยอมเชิงซ้อนของเหลวที่ความถี่ไมโครเวฟ,” 22-Mar-2017. [Online]. Available: digi.library.tu.ac.th/thesis/st/0428/title-biography.pdf.
- [24] คณิต มงคลพิทักษ์สุข, *MATH E-BOOK Release2.5*, สำนักพิมพ์ Science Center, 2554.
- [25] สายชล สีนสมบูรณ์ทอง, *สถิติเบื้องต้น*, 7th ed., vol. 2551, 1000 vols. จามจุรีโปรดักท์, 2551.
- [26] กัลยา วานิชย์บัญชา, *การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย Excel*, 1st ed., vol. 2552. ห้างหุ้นส่วนจำกัดสามลดา: ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [27] “การตรวจวินิจฉัย,” 15-Feb -2017. [Online]. Available: www.tn.mahidol.ac.th/tropical-medicine-knowledge/book-clinic/Textbook-of-Clinical-Research/441-466.pdf.
- [28] "Basic statistics," 10-Jun-2017. [Online]. Available: [med.mahidol.ac.th/ceb/sites/default/files/public/pdf/Short_Course/2015/\(12\)%20Manual%20Basic_statistics.pdf](http://med.mahidol.ac.th/ceb/sites/default/files/public/pdf/Short_Course/2015/(12)%20Manual%20Basic_statistics.pdf)
- [29] H.Y. Yeang, Siti Arijia M. Arif, Faridah Yusof, and E. Sunderasan, “Allergenic proteins of natural rubber latex,” *Methods*, vol. 2002, no. 27, pp. 32–45, Mar. 2002.
- [30] “Agilent 85070E Dielectric Probe Kit 200 MHz to 50 GHz,” www.imperial.ac.uk, 25-Mar-2017. [Online]. Available: www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/research-centres-and-groups/centre-for-bio-inspired-technology/11949699.PDF.
- [31] L.C. Haynes and J.P. Locke, “Microwave permittivities of cracker dough, starch and gluten,” *Microwave Power and Electromagnetic Energy*, vol. 30, no. 2, pp. 124-131, 1995.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรามิกระบุสิทธิ์และเซรามิที่มีสิ่งปลอมปน

ตารางที่ ก.1 สภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของเซรัมบริสุทธิ์และเซรัมที่ลิ่งปลอมปนในช่วงความถี่ 0.5 ถึง 6.0 GHz

Frequency (GHz)	Pure serum		Serum with cassava						Serum with CaCo ₃					
			16.39%		18.17%		37.04%		16.39%		18.17%		37.04%	
	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
0.46	82.87	37.80	73.64	34.86	63.39	28.14	57.00	24.20	75.56	35.39	67.65	31.48	61.65	28.51
0.52	82.27	33.82	73.23	31.19	63.07	25.43	56.64	21.97	75.15	31.59	67.37	28.12	61.43	25.45
0.58	81.84	30.74	72.96	28.31	62.86	23.31	56.40	20.22	74.88	28.61	67.21	25.49	61.31	23.04
0.64	81.46	28.34	72.70	26.10	62.63	21.66	56.12	18.86	74.63	26.30	67.03	23.45	61.17	21.18
0.70	81.25	26.44	72.58	24.32	62.53	20.34	55.98	17.77	74.51	24.44	66.98	21.80	61.15	19.67
0.76	80.99	25.02	72.39	23.01	62.41	19.34	55.81	16.98	74.34	23.06	66.89	20.55	61.08	18.54
0.82	80.67	23.96	72.14	22.07	62.25	18.63	55.62	16.44	74.11	22.04	66.76	19.64	60.99	17.72
0.88	80.22	23.20	71.76	21.44	61.98	18.13	55.30	16.11	73.76	21.33	66.51	18.99	60.76	17.15
0.94	79.86	22.45	71.49	20.81	61.76	17.64	55.05	15.75	73.51	20.64	66.33	18.36	60.60	16.59
1.00	79.58	21.75	71.31	20.20	61.59	17.20	54.85	15.42	73.35	19.99	66.20	17.78	60.48	16.07
1.06	79.37	21.06	71.19	19.55	61.45	16.75	54.68	15.05	73.23	19.33	66.12	17.21	60.41	15.54
1.12	79.19	20.39	71.06	18.94	61.30	16.31	54.50	14.69	73.11	18.70	66.02	16.66	60.31	15.03
1.18	79.08	19.77	70.98	18.36	61.21	15.87	54.39	14.31	73.04	18.10	65.98	16.12	60.28	14.53
1.24	79.01	19.24	70.97	17.87	61.19	15.50	54.33	14.01	73.04	17.60	66.00	15.68	60.31	14.11
1.30	78.86	18.88	70.88	17.52	61.12	15.27	54.23	13.82	72.96	17.25	65.97	15.39	60.29	13.84

Frequency (GHz)	Pure serum		Serum with cassava						Serum with CaCo ₃					
			16.39%		18.17%		37.04%		16.39%		18.17%		37.04%	
	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
1.36	78.59	18.52	70.67	17.18	60.92	15.03	54.02	13.63	72.77	16.92	65.80	15.11	60.14	13.58
1.41	78.35	18.11	70.49	16.79	60.74	14.75	53.82	13.40	72.59	16.55	65.64	14.80	59.98	13.29
1.47	78.26	17.70	70.45	16.41	60.68	14.46	53.72	13.16	72.55	16.17	65.58	14.49	59.93	13.00
1.53	78.36	17.39	70.57	16.15	60.75	14.27	53.74	13.02	72.67	15.91	65.65	14.25	60.00	12.79
1.59	78.48	17.23	70.71	16.02	60.84	14.21	53.78	12.98	72.79	15.78	65.74	14.13	60.07	12.68
1.65	78.59	17.17	70.82	15.99	60.91	14.22	53.79	13.01	72.90	15.73	65.83	14.07	60.14	12.62
1.71	78.64	17.22	70.87	16.05	60.93	14.32	53.74	13.09	72.95	15.78	65.89	14.10	60.18	12.64
1.77	78.59	17.32	70.82	16.15	60.87	14.43	53.64	13.19	72.91	15.87	65.88	14.19	60.17	12.70
1.83	78.46	17.43	70.70	16.25	60.75	14.55	53.49	13.28	72.80	15.99	65.78	14.31	60.09	12.80
1.89	78.27	17.50	70.53	16.32	60.57	14.63	53.31	13.35	72.62	16.06	65.61	14.38	59.94	12.86
1.95	78.06	17.54	70.36	16.36	60.39	14.69	53.11	13.41	72.43	16.11	65.42	14.43	59.76	12.89
2.01	77.85	17.57	70.17	16.41	60.18	14.75	52.89	13.46	72.22	16.16	65.20	14.45	59.57	12.91
2.07	77.65	17.61	69.98	16.46	59.99	14.80	52.68	13.51	72.02	16.20	65.01	14.45	59.39	12.92
2.13	77.47	17.65	69.80	16.52	59.80	14.87	52.49	13.56	71.83	16.25	64.84	14.46	59.24	12.92
2.19	77.31	17.69	69.62	16.58	59.63	14.93	52.30	13.61	71.66	16.27	64.71	14.47	59.11	12.93
2.25	77.17	17.71	69.45	16.61	59.46	14.98	52.12	13.65	71.52	16.27	64.60	14.47	59.01	12.94
2.31	77.04	17.75	69.27	16.65	59.31	15.02	51.96	13.69	71.38	16.30	64.50	14.49	58.92	12.96

Frequency (GHz)	Pure serum		Serum with cassava						Serum with CaCo ₃					
			16.39%		18.17%		37.04%		16.39%		18.17%		37.04%	
	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
2.37	76.88	17.82	69.06	16.71	59.14	15.07	51.79	13.73	71.22	16.35	64.39	14.53	58.81	13.01
2.43	76.68	17.91	68.83	16.80	58.95	15.11	51.60	13.78	71.03	16.43	64.24	14.60	58.67	13.08
2.49	76.46	17.97	68.62	16.82	58.77	15.11	51.41	13.77	70.85	16.46	64.09	14.62	58.53	13.09
2.55	76.28	18.00	68.46	16.79	58.61	15.07	51.26	13.72	70.71	16.46	63.97	14.61	58.41	13.07
2.61	76.14	18.02	68.37	16.76	58.51	15.02	51.16	13.66	70.63	16.46	63.89	14.59	58.34	13.04
2.67	76.04	18.07	68.31	16.77	58.43	15.02	51.08	13.65	70.56	16.49	63.84	14.61	58.29	13.04
2.72	75.95	18.15	68.25	16.82	58.37	15.05	51.01	13.66	70.50	16.54	63.79	14.65	58.25	13.07
2.78	75.85	18.23	68.17	16.88	58.30	15.10	50.93	13.69	70.43	16.61	63.73	14.71	58.20	13.11
2.84	75.72	18.30	68.06	16.93	58.21	15.14	50.84	13.72	70.34	16.67	63.67	14.76	58.14	13.15
2.90	75.58	18.34	67.94	16.94	58.10	15.15	50.73	13.71	70.23	16.70	63.58	14.79	58.06	13.17
2.96	75.42	18.35	67.81	16.92	57.97	15.13	50.61	13.69	70.12	16.71	63.48	14.80	57.97	13.17
3.02	75.29	18.34	67.72	16.88	57.87	15.10	50.50	13.66	70.02	16.70	63.38	14.80	57.88	13.15
3.08	75.17	18.35	67.65	16.86	57.78	15.09	50.41	13.63	69.96	16.71	63.31	14.81	57.81	13.15
3.14	75.10	18.37	67.62	16.87	57.72	15.09	50.35	13.63	69.92	16.74	63.26	14.84	57.76	13.16
3.20	75.09	18.43	67.64	16.91	57.71	15.12	50.32	13.65	69.93	16.79	63.25	14.89	57.76	13.20
3.26	75.13	18.52	67.69	17.00	57.73	15.18	50.33	13.71	69.98	16.90	63.28	14.98	57.80	13.27
3.32	75.17	18.67	67.74	17.13	57.77	15.28	50.35	13.80	70.03	17.05	63.32	15.10	57.84	13.38

Frequency (GHz)	Pure serum		Serum with cassava						Serum with CaCo ₃					
			16.39%		18.17%		37.04%		16.39%		18.17%		37.04%	
	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
3.38	75.18	18.86	67.75	17.30	57.80	15.40	50.36	13.91	70.03	17.24	63.33	15.26	57.86	13.52
3.44	75.13	19.06	67.72	17.48	57.78	15.54	50.33	14.03	69.99	17.43	63.30	15.42	57.84	13.66
3.50	75.01	19.27	67.63	17.66	57.70	15.69	50.24	14.15	69.87	17.62	63.20	15.59	57.76	13.81
3.56	74.83	19.45	67.48	17.81	57.57	15.82	50.11	14.26	69.71	17.78	63.05	15.73	57.63	13.93
3.62	74.63	19.60	67.32	17.94	57.41	15.92	49.94	14.34	69.54	17.91	62.89	15.84	57.48	14.03
3.68	74.45	19.73	67.19	18.04	57.27	16.00	49.80	14.40	69.40	18.04	62.74	15.93	57.35	14.10
3.74	74.31	19.88	67.08	18.17	57.16	16.09	49.69	14.46	69.27	18.18	62.63	16.04	57.26	14.20
3.80	74.19	20.04	66.98	18.31	57.07	16.19	49.60	14.53	69.15	18.34	62.53	16.17	57.18	14.30
3.86	74.07	20.20	66.88	18.45	57.00	16.28	49.53	14.61	69.03	18.49	62.43	16.29	57.10	14.41
3.92	73.96	20.36	66.78	18.60	56.93	16.38	49.45	14.69	68.90	18.64	62.33	16.40	57.02	14.51
3.98	73.83	20.50	66.67	18.72	56.84	16.46	49.36	14.77	68.76	18.76	62.21	16.49	56.93	14.59
4.03	73.66	20.61	66.52	18.83	56.72	16.53	49.24	14.83	68.59	18.87	62.07	16.56	56.80	14.65
4.09	73.46	20.71	66.35	18.91	56.58	16.59	49.10	14.88	68.40	18.95	61.91	16.62	56.66	14.70
4.15	73.25	20.81	66.17	19.00	56.43	16.67	48.95	14.94	68.21	19.04	61.75	16.69	56.52	14.77
4.21	73.06	20.93	66.01	19.10	56.30	16.75	48.81	15.01	68.04	19.14	61.62	16.77	56.40	14.84
4.27	72.91	21.05	65.88	19.20	56.19	16.83	48.70	15.06	67.90	19.23	61.51	16.84	56.31	14.90
4.33	72.80	21.16	65.77	19.28	56.12	16.88	48.62	15.09	67.80	19.30	61.45	16.90	56.26	14.95

Frequency (GHz)	Pure serum		Serum with cassava						Serum with CaCo ₃					
			16.39%		18.17%		37.04%		16.39%		18.17%		37.04%	
	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
4.39	72.71	21.26	65.69	19.35	56.07	16.93	48.55	15.11	67.72	19.37	61.40	16.95	56.22	14.99
4.45	72.61	21.36	65.60	19.43	56.01	16.97	48.49	15.13	67.65	19.44	61.35	17.01	56.18	15.04
4.51	72.50	21.44	65.51	19.49	55.95	17.01	48.43	15.15	67.56	19.50	61.29	17.06	56.13	15.09
4.57	72.37	21.51	65.41	19.55	55.87	17.05	48.35	15.17	67.46	19.57	61.21	17.12	56.07	15.14
4.63	72.22	21.59	65.30	19.62	55.77	17.10	48.27	15.21	67.33	19.66	61.11	17.20	55.99	15.21
4.69	72.06	21.70	65.16	19.71	55.66	17.18	48.16	15.28	67.19	19.76	61.00	17.29	55.89	15.29
4.75	71.92	21.82	65.04	19.82	55.56	17.27	48.05	15.35	67.05	19.87	60.90	17.39	55.80	15.39
4.81	71.81	21.96	64.95	19.93	55.50	17.38	47.98	15.43	66.95	19.98	60.83	17.50	55.74	15.49
4.87	71.75	22.10	64.89	20.06	55.46	17.50	47.93	15.54	66.89	20.09	60.80	17.63	55.71	15.62
4.93	71.71	22.25	64.84	20.20	55.43	17.63	47.88	15.67	66.84	20.22	60.78	17.78	55.69	15.77
4.99	71.68	22.39	64.79	20.35	55.39	17.78	47.82	15.81	66.79	20.36	60.74	17.94	55.65	15.93
5.05	71.61	22.52	64.71	20.48	55.32	17.92	47.74	15.94	66.72	20.48	60.68	18.09	55.59	16.08
5.11	71.49	22.64	64.61	20.60	55.23	18.03	47.64	16.04	66.62	20.59	60.59	18.22	55.50	16.22
5.17	71.34	22.77	64.47	20.71	55.10	18.14	47.52	16.14	66.49	20.71	60.46	18.36	55.38	16.35
5.23	71.18	22.93	64.32	20.84	54.97	18.27	47.38	16.26	66.35	20.85	60.32	18.51	55.24	16.49
5.29	71.04	23.10	64.18	21.00	54.84	18.45	47.23	16.42	66.22	21.01	60.18	18.70	55.11	16.68
5.34	70.92	23.28	64.07	21.16	54.74	18.62	47.11	16.58	66.12	21.18	60.07	18.88	54.99	16.86

Frequency (GHz)	Pure serum		Serum with cassava						Serum with CaCo ₃					
			16.39%		18.17%		37.04%		16.39%		18.17%		37.04%	
	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
5.40	70.83	23.46	63.98	21.31	54.66	18.76	47.02	16.70	66.04	21.34	59.98	19.04	54.91	17.01
5.46	70.73	23.61	63.90	21.44	54.61	18.87	46.96	16.78	65.96	21.48	59.91	19.17	54.84	17.12
5.52	70.64	23.76	63.82	21.56	54.54	18.97	46.90	16.86	65.88	21.61	59.82	19.29	54.77	17.23
5.58	70.51	23.88	63.70	21.66	54.44	19.06	46.80	16.94	65.77	21.73	59.71	19.40	54.67	17.33
5.64	70.33	23.98	63.55	21.75	54.32	19.12	46.68	16.99	65.62	21.82	59.57	19.49	54.54	17.41
5.70	70.12	24.08	63.39	21.80	54.19	19.14	46.57	16.98	65.45	21.90	59.42	19.54	54.41	17.44
5.76	69.91	24.18	63.23	21.86	54.06	19.16	46.46	16.97	65.30	21.98	59.27	19.60	54.29	17.47
5.82	69.72	24.31	63.08	21.94	53.95	19.23	46.36	17.00	65.15	22.08	59.14	19.68	54.17	17.53
5.88	69.57	24.46	62.96	22.05	53.85	19.33	46.26	17.08	65.04	22.21	59.03	19.80	54.07	17.63
5.94	69.47	24.59	62.87	22.16	53.79	19.44	46.19	17.17	64.96	22.33	58.95	19.92	54.00	17.74
6.00	69.42	24.66	62.83	22.22	53.76	19.49	46.16	17.21	64.93	22.39	58.92	19.98	53.97	17.79

ภาคผนวก ข

%DRC จากการค้าคำนวณเทียบกับวิธีมาตรฐาน
และระยะห่างของ DRC กับแนวเส้นกึ่งกลาง สำหรับการสร้างแบบจำลองไดอิเล็กตริก

ตารางที่ ข.1 %DRC จากการคำนวณเทียบวิธีมาตรฐาน และระยะห่างของ %DRC (คำนวณ) จาก Center line สำหรับการสร้างแบบจำลองไดอิเล็กตริก

Samples	%DRC (STD)	%DRC (Predicting)		Distance
		R_i (%DRC)	R_j	
1	44.12	42.82	2.48	0.18
2	40.72	41.80	2.50	0.44
3	36.71	36.98	1.24	0.28
4	36.67	35.33	0.51	0.05
5	39.35	39.76	1.86	0.27
6	36.43	35.73	0.73	0.07
7	30.27	29.46	-0.39	0.38
8	33.45	33.24	0.62	0.52
7	34.39	33.85	1.16	0.91
10	33.66	33.01	0.74	0.69
11	37.65	38.38	1.02	0.24
12	37.92	38.82	1.39	0.03
13	37.14	37.87	0.81	0.33
14	33.53	33.14	-0.50	0.54
15	33.73	33.21	-0.59	0.65
16	37.25	36.53	1.21	0.36
17	41.24	42.82	2.48	0.18
18	41.33	41.80	2.50	0.44
19	37.29	36.98	1.24	0.28
20	33.52	32.23	0.08	0.22
21	37.50	37.82	1.69	0.54
22	37.45	38.34	0.87	0.38
23	39.17	39.99	0.97	0.65
24	40.97	40.37	0.98	0.73
25	46.25	45.11	2.25	0.55
26	37.27	35.44	-0.21	0.78

Samples	%DRC (STD)	%DRC (Predicting)		Distance
		R_i (%DRC)	R_j	
27	36.75	37.05	1.84	0.86
28	41.77	42.19	1.30	0.82
29	38.91	38.45	0.44	0.82
30	44.43	42.59	2.25	0.01
31	40.61	39.67	1.04	0.51
32	41.55	40.78	1.78	0.04
33	41.97	40.69	2.56	0.74
34	45.52	44.13	2.19	0.39
35	37.41	36.78	1.66	0.74

ภาคผนวก ค

การตรวจสอบน้ำยางสดโดยใช้แบบจำลองไดอิเล็กตริก

ตารางที่ ค.1 การตรวจสอบน้ำยางสดไม่มีการปลอมปนโดยใช้แบบจำลองไดอิเล็กตริก

Samples	Non-contaminated latex			Detection
	R_i (%DRC)	R_j	Distance	
1	34.01	-0.25	0.50	True
2	39.03	1.37	0.04	True
3	33.80	-0.11	0.31	True
4	35.24	0.43	0.11	True
5	36.03	0.56	0.16	True
6	37.79	1.54	0.40	True
7	39.11	1.38	0.05	True
8	36.24	0.69	0.08	True
9	37.57	0.96	0.12	True
10	37.91	1.23	0.07	True
11	36.05	0.40	0.33	True
12	41.72	1.99	0.04	True
13	33.53	-0.51	0.64	True
14	37.11	1.56	0.57	True
15	37.11	0.67	0.29	True
16	34.62	0.03	0.37	True
17	39.28	1.20	0.26	True
18	39.36	1.35	0.14	True
19	41.12	1.86	0.04	True
20	39.92	1.10	0.51	True
21	38.55	0.94	0.36	True
22	39.68	1.62	0.05	True
23	39.67	1.04	0.51	True
24	37.21	0.77	0.23	True
25	41.07	1.44	0.43	True
26	38.05	1.83	0.62	True

Samples	Non-contaminated latex			Detection
	R_i (%DRC)	R_j	Distance	
27	31.70	0.09	0.35	True
28	31.38	-0.35	0.01	True
29	34.61	0.53	0.12	True
30	32.07	-0.24	0.06	True
31	42.31	2.48	0.30	True
32	36.80	1.21	0.30	True
33	41.40	2.50	0.53	True
34	37.92	1.69	0.52	True
35	37.84	0.55	0.58	True
36	32.70	-1.88	1.80	False
37	42.32	1.55	0.61	True
38	37.88	1.36	0.20	True
39	35.36	-0.02	0.58	True
40	34.57	-0.09	0.47	True
41	33.80	0.05	0.16	True
42	33.06	-0.12	0.16	True
43	33.42	0.07	0.06	True
44	33.54	0.17	0.02	True
45	32.56	-0.03	0.04	True
46	34.58	-0.20	0.58	True
47	34.51	-0.05	0.42	True
48	33.15	0.29	0.22	True
49	34.19	0.31	0.00	True
50	33.52	1.05	0.88	False
51	33.90	0.85	0.60	True
52	34.67	1.15	0.72	True

ตารางที่ ค.2 การตรวจสอบน้ำยางสดไม่มีการปลอมปนโดยใช้แบบจำลองไดอิลีกตริก

Samples	Contaminated latex			Detection
	R_i (%DRC)	R_j	Distance	
1	33.13	0.53	0.46	True
2	32.45	0.60	0.68	True
3	32.54	1.07	1.11	False
4	33.67	1.09	0.89	False
5	33.77	1.41	1.17	False
6	33.45	1.79	1.61	False
7	32.88	1.80	1.75	False
8	34.00	2.90	2.57	False
9	38.74	3.23	1.83	False
10	33.62	3.34	3.08	False
11	37.08	2.78	1.76	False
12	38.77	3.05	1.65	False
13	31.94	-0.67	0.44	True
14	33.89	-0.67	0.88	False
15	33.10	-0.60	0.63	True
16	33.76	-0.68	0.86	False
17	32.99	-1.18	1.17	False
18	35.15	-0.64	1.13	False
19	37.06	0.04	0.90	False
20	35.99	-0.43	1.11	False
21	33.52	-0.98	1.10	False
22	37.04	-0.70	1.62	False
23	37.47	0.38	0.66	True
24	41.90	1.58	0.48	True
25	35.22	-1.23	1.72	False
26	37.27	-0.67	1.64	False

Samples	Contaminated latex			Detection
	R_i (%DRC)	R_j	Distance	
27	35.93	-1.56	2.21	False
28	35.78	-1.46	2.08	False
29	35.12	-1.04	1.52	False
30	38.67	-0.77	2.05	False
31	36.91	0.02	0.88	False
32	37.92	-0.46	1.58	False
33	36.48	-0.96	1.74	False
34	38.43	-0.04	1.28	False
35	41.65	0.52	1.46	False
36	40.43	-0.16	1.85	False
37	39.35	-0.46	1.90	False
38	36.73	-0.91	1.75	False
39	40.37	-0.48	2.15	False
40	38.85	0.09	1.25	False
41	38.39	-1.04	2.25	False
42	36.82	-1.08	1.94	False
43	41.87	0.14	1.88	False
44	41.05	0.62	1.23	False
45	41.71	0.46	1.53	False
46	39.37	0.44	1.02	False
47	41.85	0.27	1.75	False
48	42.36	0.51	1.63	False

ภาคผนวก ง
งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

บทความวารสาร

- ชื่อผู้เขียน Huda Kosumphon, Sahapong Somwong and
Mitchai Chongcheawchamnan
- ชื่อบทความ Electrical Characteristics of Pure and Contamination Latex Serum
- ชื่อวารสาร Songklanakarin Journal of Science and Technology
- ปีที่ฉบับที่:พิมพ์ปี:หน้า Vol.40 No.3 2018 (May – June, 2018)
- วารสารระดับ/ฐานข้อมูล นานาชาติ ฐานข้อมูล SCOPUS

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวฮุตา โกสมพันธ์
รหัสประจำตัวนักศึกษา 5610120082
วุฒิการศึกษา
วุฒิ ชื่อสถาบัน ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2555
(วิศวกรรมคอมพิวเตอร์)

ทุนการศึกษา

ทุนศิษย์ก้นกุฏิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

H. Kosumphan, S. Somwong and M. Chongcheawchamnan, "Electrical characteristics of pure and contaminated latex serum," Songklanakarin Journal of Science and Technology (SJST), Vol. 40 (3), 2018. (Accepted in Songklanakarin Journal of Science and Technology)