



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

**เรื่อง** การศึกษากรรมวิธีการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำ  
ยางด้วยเทคนิคการวัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ

**คณะผู้วิจัย** รศ.ดร.มิตรชัย จงเชื้อวานานุก

**งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จาก คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (ENG540069S)  
ประจำปีงบประมาณ 2554**

## บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอกรรมวิธีการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อมะพร้าวแห้งในน้ำยางด้วยเทคนิคการวัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยประยุกต์ใช้หลักการวัดค่าไดอิเล็กตริกเพอร์มิตติวิตีของน้ำยางจากการวัดคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนกลับจากน้ำยาง แล้วเชื่อมโยงไปสู่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กตริกเพอร์มิตติวิตีของน้ำยางกับค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อมะพร้าวแห้งที่อยู่ในน้ำยาง โดยการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบของแบบจำลองสารไดอิเล็กตริกผสมบนพื้นฐานที่ว่าในน้ำยางมีส่วนประกอบที่สำคัญสองส่วนคือเนื้อมะพร้าวและน้ำ นอกจากนี้ผลกระทบของอุณหภูมิต่อน้ำยางจากสิ่งแวดล้อมได้ถูกนำมาพิจารณาประกอบในแบบจำลองด้วยเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อมะพร้าวแห้งในน้ำยางมากยิ่งขึ้น จากผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบของแบบจำลองสารไดอิเล็กตริกผสมเพื่อทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อมะพร้าวแห้ง พบว่าแนวทางดังกล่าวสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้สำหรับทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อมะพร้าวแห้งได้จริง

## Abstract

This research presents a dry rubber content determination in rubber latex based on a microwave reflection wave measurement technique. The reflected wave from rubber latex is related to the dielectric permittivity of rubber latex that can be used to describe the dry rubber content in rubber latex. Mathematical model with electromagnetic theory approach, the dielectric mixture model is developed for determine the dry rubber content with the assumption that the rubber latex is biphase liquid. To improve the accuracy of the proposed model the temperature effect to rubber latex is taken into account. Validation of the proposed dry rubber content determination based on dielectric mixture model shown that the proposed method can implement for an in-field dry rubber content determination.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่กรุณาให้ทุนวิจัย  
ภายใต้สัญญาทุน ENG540069S

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่กรุณาสับสนุนให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
ที่กรุณาสับสนุนให้ใช้เครื่องมือทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วง



## คำนำ

งานวิจัยฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อรายงานผลการศึกษาระบบวิธีการทำนํายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งในน้ำยางด้วยเทคนิคการวัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ต่อ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ภายใต้สัญญาวิจัยเลขที่ ENG540069S โดยเนื้อหาของรายงานฉบับนี้มุ่งเน้นไปที่การบรรยายผลการศึกษาระบบวิธีการทำนํายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งในน้ำยางด้วยเทคนิคการวัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งประกอบด้วย การอธิบายผลของศึกษาโครงสร้างองค์ประกอบน้ำยางและอันตรกิริยาทางไฟฟ้าของน้ำยาง จากผลการศึกษาดังกล่าวได้นำไปสู่การสังเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของน้ำยางเพื่อใช้ทำนํายค่าค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งในน้ำยาง จากนั้นได้ทำการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอกับข้อมูลวิจัย และทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการวัดน้ำยางจริงในที่สุด ผลสำเร็จของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของน้ำยางเพื่อใช้ทำนํายค่าค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งในน้ำยางที่นำเสนอเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเชิงระบบเครื่องวัดเปอร์เซ็นต์เนื้องอก ซึ่งจะ เป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรชาวสวนยางไทยต่อไป

รองศาสตราจารย์ มิตรชัย จงเขียวชำนาญ

หัวหน้าโครงการวิจัย

## สารบัญ

	หน้า
คำนำ.....	5
สารบัญ.....	6
รายการตาราง.....	7
รายการภาพประกอบ.....	8
ตัวย่อและสัญลักษณ์.....	9
บทนำ.....	10
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	11
ระเบียบวิธีวิจัย.....	12
ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	13
การวิเคราะห์โครงสร้างองค์ประกอบน้ำยาง.....	13
การสังเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของน้ำยาง.....	16
การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับข้อมูลวิจัย.....	17
การวัดค่าไดอิเล็กตริกของน้ำยาง.....	18
แบบจำลองคณิตศาสตร์บนพื้นฐานปรากฏการณ์โพลาไรซ์สำหรับทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ เนื้อยางแห้ง.....	23
แนวคิดการออกแบบเชิงระบบ.....	26
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	28
บรรณานุกรม.....	29

## รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1 สรุปรพารามิเตอร์ทางสถิติของผลทำนาค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อมากในน้ำอย่างด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอ.....	9

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ผลทำนายเปอร์เซ็นต์ค่าความชื้นสัมพัทธ์ด้วยแบบจำลอง.....	18
2 ผังภาพอธิบายการทดลองวัดค่าไดอิเล็กตริกของน้ำยางดิบ.....	19
3 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำยางที่เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งตั้งแต่ 28-61.25 % ที่อุณหภูมิ 15-40 องศาเซลเซียส.....	21
4 ค่าปัจจัยจากการสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริกของน้ำยางที่เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง ตั้งแต่ 28%-61.25 % ที่อุณหภูมิ 15-40 องศาเซลเซียส .....	22
5 ลำดับขั้นตอนแสดงการทำงานแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ทำนายเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยาง.....	23
6 ผลการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางจากแบบจำลองการไหลไรซ์ของน้ำยาง.....	25
7 ค่าความผิดพลาดจากการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางจากแบบจำลองการไหลไรซ์ของน้ำยาง.....	26
8 แนวคิดระบบทำนายน้ำยางด้วยอุปกรณ์รีเฟลกโตมิเตอร์หรือเครื่องวิเคราะห์โครมชาเยออัตโนมัติ.....	28
9 แบบจำลองของสายโพรบเคเบิลแกนร่วมปลายเปิดอย่างง่าย.....	29

## ตัวย่อและสัญลักษณ์

***P*** การโปลาไรซ์

***E*** สนามไฟฟ้า

***X<sub>e</sub>*** ขั้วเซเพติบิลิตีทางไฟฟ้าของสสาร

***ε<sub>0</sub>*** ค่าเพอร์มิตติวิตีของอากาศว่าง

***ε<sub>T</sub>*** ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์

***ε*** ค่าเพอร์มิตติวิตีของสสาร

***ε<sub>eff</sub>*** ค่าเพอร์มิตติวิตีของน้ำยางที่วัดได้

***ε<sub>w</sub>*** ค่าเพอร์มิตติวิตีของน้ำ

***ε<sub>s</sub>*** ค่าเพอร์มิตติวิตีของเนื้อยางแห้ง

***f*** สัดส่วนปริมาตรของเนื้อยางแห้ง

***χ*** พารามิเตอร์ที่อธิบายผลกระทบของกลไกการโปลาไรซ์ของเนื้อยางแห้งและน้ำ

***ε<sub>∞</sub>*** แทนค่าไดอิเล็กตริกเพอร์มิตติวิตีในช่วงความถี่อนันต์ของน้ำ

***ε<sub>0</sub>*** แทนค่าไดอิเล็กตริกเพอร์มิตติวิตีสถิตย์ของน้ำ,

***i*** แทนส่วนจินตภาพและมีค่า  $\sqrt{-1}$ ,

***ω*** ค่าความถี่เชิงมุมของสนามไฟฟ้าภายนอกที่กระตุ้นและ

***τ*** ค่าเวลาผ่อนคลายของน้ำ (Relaxation time)

***Γ*** คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

***j*** จำนวนจินตภาพมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{-1}$

***Z<sub>0</sub>*** ค่าความต้านทานคุณลักษณะของสายส่ง

***C<sub>0</sub>*** ค่าความจุไฟฟ้าของอากาศในโพรบเคเบิลแกนร่วมปลายเปิด

***C<sub>f</sub>*** แทนค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนในโพรบเคเบิลแกนร่วมปลายเปิด

***MC*** ค่าปริมาณความชื้น

**%DRC** ค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยาง

## บทนำ

ในปัจจุบัน มีการเปิดรับซื้อยางในรูปของน้ำยางสดมากขึ้นเนื่องจากน้ำยางสดสามารถแปรรูปเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมยางและอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางหลายประเภท อาทิ น้ำยางข้น ยางแท่ง ยางแผ่น และยางเคพรชนิดี ผลิตภัณฑ์ต่างๆ จากน้ำยางข้น ได้แก่ ถุงมือแพทย์ ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง หัวนมสำหรับทารก ที่นอน หมอน ตุ๊กตาฟองน้ำ ตุ๊กตายาง หุ่นการศึกษา กาวน้ำยาง กาวผสมซีเมนต์ ท่อยาง เป็นต้น ซึ่งเครื่องมือสำคัญของผู้ซื้อในการควบคุมคุณภาพคือการใช้กลไกกำหนดราคาตามสัดส่วนเนื้อยางแห้งในน้ำยางดิบที่จะรับซื้อ กลไกอันเดียวกันนี้เองที่เป็นอุปสรรคและทำให้เกษตรกรในบางพื้นที่มีการเปลี่ยนพฤติกรรมจากเดิมที่ขายน้ำยางดิบเป็นยางแผ่นทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งได้แก่ ความไม่สามารถเข้าถึงเครื่องมือในการวัดค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งทำให้ต้องพึ่งพาเครื่องมือวัดจากผู้ซื้อที่เป็นผู้กำหนดราคาก่อให้เกิดความไม่มั่นใจในคุณภาพ ไม่เชื่อในเครื่องมือวัดของผู้ซื้อ เป็นต้น

ในอดีตที่ผ่านมา การวัดค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสดสามารถแบ่งได้เป็นสองวิธีหลัก วิธีแรกคือวิธีวัดทางตรง (Direct method) โดยวัดในลักษณะของเคมีวิเคราะห์ ซึ่งให้ผลการตรวจแม่นยำแต่เฉพาะด้านและไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ และวิธีที่สองคือวิธีทางอ้อม (Indirect method) โดยวิธีที่นิยมคือใช้หลักการวัดค่าความถ่วงจำเพาะของยางตัวอย่างเช่น การใช้เครื่องมือเมโทรแลค (Metrolac) โดยมีความสัมพันธ์ง่ายๆคือเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสดจะแปรผกผันกับค่าความถ่วงจำเพาะที่วัดได้ อย่างไรก็ตาม การใช้อุปกรณ์เมโทรแลคมีขั้นตอนมาก และเป็นเครื่องมือวัดที่ต้องอ่านค่าจากสเกลซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนมาก อีกวิธีหนึ่งที่มีความรวดเร็วและสามารถพัฒนาให้เป็นระบบอัตโนมัติได้ คือ รูปแบบการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ โดยนำเสนอการวัดค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสดซึ่งมุ่งวัดไปที่ค่าเพอร์มิตติวิตีแบบสัมพัทธ์ (relative permittivity) อย่างไรก็ตามการวัดด้วยวิธีไมโครเวฟในปัจจุบันยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความแม่นยำ และราคายังสูงอยู่

ด้วยเหตุนี้เอง นักวิจัยจึงมุ่งหาแนวทางและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะนำไปสู่การพัฒนาเครื่องวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางที่มีความแม่นยำด้วยเทคนิคไมโครเวฟ โดยผลลัพธ์ที่ได้คาดว่าจะนำไปสู่การสังเคราะห์เครื่องวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ให้ความแม่นยำ น่าเชื่อถือ สามารถทำซ้ำได้ และที่สำคัญเป็นวิธีที่มีราคาถูก

## วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อกำหนดแนวทางในออกแบบระบบสำหรับวัดค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องานแห้งในน้ำยางสดโดยใช้เทคนิคคลื่นไมโครเวฟ
2. เพื่อสังเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องานแห้งในน้ำยางที่สามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ทางกายภาพของน้ำยางดิบได้
3. เพื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปของแบบจำลองสารไดอิเล็กตริกผสม (Dielectric mixture) ที่สามารถนำไปทำนายลักษณะคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนกลับได้
4. เพื่อออกแบบแนวคิดระบบการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้องานแห้งในน้ำยางดิบด้วยคลื่นไมโครเวฟได้จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

## ระเบียบวิธีวิจัย

1. ทบทวนวรรณกรรมงานที่เกี่ยวข้องทั้งบทความวิจัยและสิทธิบัตร ซึ่งประกอบด้วยศิลปวิทยาคารเทคนิคการวัดปริมาณเนื้องอกในน้ำยาง และองค์ความรู้ทางด้านเทคนิคการวัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ
2. ศึกษาโครงสร้างองค์ประกอบน้ำยางและอันตรกิริยาทางไฟฟ้าของน้ำยาง ณ ความถี่คลื่นไมโครเวฟที่สนใจ และอุปกรณ์ทางด้านไมโครเวฟที่ความถี่ดังกล่าวสามารถจัดซื้อได้ง่าย มีการใช้อย่างแพร่หลาย
3. สังเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของน้ำยาง โดยพิจารณาสมการคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนน้อย ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน
4. ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับข้อมูลวิจัยจากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
5. ทดสอบวัดค่าไดอิเล็กตริกของน้ำยาง และทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการวัดน้ำยางจริง
6. ออกแบบเชิงระบบ เครื่องวัดเปอร์เซ็นต์เนื้องอกที่สามารถใช้งานได้จริง



## ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

### การวิเคราะห์โครงสร้างองค์ประกอบน้ำยาง

น้ำยางสดเป็นคอลลอยด์ (Colloids) ซึ่งประกอบด้วยส่วนโมเลกุลพอลิเมอร์ (Polymer) ซึ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำ ในสภาวะปกติ โมเลกุลน้ำและโมเลกุลพอลิเมอร์จะดึงดูดเข้าหากันด้วยปรากฏการณ์แวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ระบบไม่สมดุลกันระหว่างแรงแวนเดอร์วาลส์และแรงจากไฟฟ้าสถิตย์เนื่องจากคุณสมบัติของประจุลบและบวกในน้ำยาง ดังนั้น เพื่อป้องกันการจับตัวกันของโมเลกุลน้ำและพอลิเมอร์จะต้องเติมสารจำพวกเบสเพื่อทานแรงแวนเดอร์วาลส์ยังผลให้น้ำยางคงสภาพความเป็นของเหลวได้ (บางกรณี อาจมีสารอื่นเป็นส่วนประกอบโดยเจตนาเช่น แป้ง เป็นต้น) ส่วนที่เป็นโมเลกุลน้ำซึ่งประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนสองอะตอมและออกซิเจน 1 อะตอมจับตัวกัน การจับตัวกันระหว่างอะตอมของไฮโดรเจนและออกซิเจนจับกันตามลักษณะพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ทั้งนี้ การจัดเรียงตัวของอะตอมไฮโดรเจนสองอะตอมและอะตอมออกซิเจนจะทำมุมในสภาวะอุณหภูมิกปกติที่ 105 องศาทำให้มีสนามไฟฟ้าอ่อนๆเกิดขึ้นภายในแต่ละโมเลกุลน้ำโดยมีทิศชี้จากอะตอมออกซิเจนไปจรดตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างอะตอมของไฮโดรเจนทั้งสองอะตอม ด้วยลักษณะดังกล่าวของน้ำนั่นเองที่ให้น้ำยางจับตอสนองต่อสนามไฟฟ้าภายนอกได้ในสี่ลักษณะได้แก่

- การโพลาไรซ์ระดับอิเล็กตรอน (Electronic polarization) เป็นปรากฏการณ์การตอบสนองต่อสนามไฟฟ้านี้เกิดขึ้นภายในอะตอมของทุกอะตอม ในโมเลกุลน้ำมีอะตอมของออกซิเจนและไฮโดรเจน ส่วนพอลิเมอร์มีอะตอมของไฮโดรเจนและคาร์บอนซึ่งอะตอมทุกอะตอมนั้นประกอบด้วยส่วนที่เป็นนิวเคลียสและกลุ่มเมฆอิเล็กตรอนจับตัวกันโดยตำแหน่งของทั้งนิวเคลียสและกลุ่มเมฆเหล่านั้นสามารถเปลี่ยนแปลงตามแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกที่มากระทำ
- การโพลาไรซ์ระดับไอออน (Ionic polarization) เป็นปรากฏการณ์โพลาไรซ์ภายในโมเลกุลเอง ทั้งนี้เนื่องจากการเรียงตัวของอะตอมแต่ละอะตอม มุมของอะตอมออกซิเจนและไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากพันธะโควาเลนต์แปรเปลี่ยนได้ตามขนาดและทิศของแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกที่มากระทำ
- การโพลาไรซ์ระดับโมเลกุล (Molecular polarization) เป็นปรากฏการณ์โพลาไรซ์ระหว่างโมเลกุล ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของน้ำแต่ละโมเลกุลจะมีสนามไฟฟ้าภายในเองโดยทิศสนามไฟฟ้าของโมเลกุลของน้ำจะสัมพันธ์กับมุมที่เกิดจากการจัดเรียงอะตอมตามพันธะโควาเลนต์
- การโพลาไรซ์บริเวณรอยต่อ (Interfacial polarization) เป็นปรากฏการณ์โพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างกลุ่มโมเลกุลของสารสองชนิดสองกลุ่มที่ต่างกัน

ปรากฏการณ์โพลาไรซ์ทั้งสี่รูปแบบนี้เป็นปรากฏการณ์ทางกายภาพสำคัญและเป็นหลักพื้นฐานที่จะนำไปพัฒนาอุปกรณ์วัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสดได้ การโพลาไรซ์ ( $P$ ) ของสสารใดๆที่มีคุณสมบัติเชิงเส้นจะเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นด้วยตามลักษณะสนามไฟฟ้าภายนอกที่มากระทำ ( $E$ ) ดังสมการ

$$P = \chi_e \varepsilon_0 E \quad (1)$$

ค่า  $\varepsilon_0$  คือค่าเพอร์มิติวิตีของอากาศว่างซึ่งเป็นค่าคงที่และ  $\chi_e$  คือค่าซัสเซพติบิลิตีทางไฟฟ้าของสสารเชิงเส้นนั้น ปรากฏการณ์ทางกายภาพที่สามารถบ่งชี้ให้เห็นถึงการดำรงอยู่ของการโพลาริซของสสารคือปรากฏการณ์การขยับตัวของประจุหรือเรียกว่าการดิสเพลซ (Displacement) ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะอธิบายสำหรับสสารทุกสสาร โดยการขยับตัวของประจุไฟฟ้าหมายถึงการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคที่มีประจุ (เช่น อิเล็กตรอน) ซึ่งอาจเป็นกลุ่มอนุภาคอิสระหรืออนุภาคที่ยึดติดกับอะตอมในโครงสร้างโมเลกุลของสสารก็ได้ ความสัมพันธ์ของการดิสเพลซนี้สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (2)$$

จากสมการจะเห็นสอดคล้องกับปรากฏการณ์ดิสเพลซกล่าวคือ มีทั้งองค์ประกอบของปรากฏการณ์เปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคอิสระ  $\varepsilon_0 E$  และอนุภาคที่ยึดติดกับอะตอม  $P$  องค์ประกอบแรกที่อธิบายด้วยค่าเพอร์มิติวิตีของอากาศว่าง บอกเป็นนัยยะถึงระดับความเป็นอิสระในการเคลื่อนตัวของอนุภาคซึ่งถือว่าอากาศว่างไม่มีแรงจากปัจจัยภายในมากระทำ และเมื่อผนวกสมการ (1) และ (2) ด้วยกันแล้วจะสามารถนิยามคุณสมบัติของสสารที่มีความสามารถในการโพลาริซได้ด้วยค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (Relative permittivity:  $\varepsilon_r$  ของสสารนั้นดังนี้

$$\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0 = 1 + \chi_e \quad (3)$$

โดยที่ความสัมพันธ์ของการดิสเพลซยังมีความสัมพันธ์ในรูปเชิงเส้นกับสนามไฟฟ้าภายนอกที่มากระทำเช่นเดิมตามคุณสมบัติของสสารที่มีความเป็นเชิงเส้น

$$D = \varepsilon E \quad (4)$$

กรณีค่า  $\varepsilon$  คือค่าเพอร์มิตติวิตีของสสาร (Permittivity of material) ที่กำลังพิจารณาและสามารถกล่าวได้ว่าค่า  $\varepsilon$  นี้บ่งชี้ถึงความสามารถในการโพลาริซของสสารนั้น

ค่าเพอร์มิตติวิตีนี้ของสสารนี้จะเป็ค่าจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งประกอบด้วยค่าจำนวนจริง และค่าจำนวนจินตภาพ โดยส่วนที่เป็นจำนวนจริงจะแสดงความสามารถในการโพลาริซของสสารนั้นและเรียกค่านี้อีกว่าค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ในส่วนจำนวนจินตภาพ คือค่าความสามารถในการนำไฟฟ้าของสสาร (Conductivity) ค่านี้อาจเป็นค่าที่กำหนดแล้วทำให้สามารถอธิบายการโพลาริซของสสารใดๆก็ได้ในโลกนี้ได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งการโพลาริซแสดงถึงปรากฏการณ์ดิสเพลซของสสารซึ่งแตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับปรากฏการณ์การนำไฟฟ้าของสสาร ดังนั้น การกำหนดให้มีจำนวนจินตภาพเป็นการทำให้ค่าเพอร์มิตติวิตีของสสารสามารถนิยามสสารในโลกนี้ได้ทุกชนิด !!

หากพิจารณาความสัมพันธ์ในสมการ (3) และ (4) จะพบว่าค่าเพอร์มิตติวิตีของน้ำยางย่อมบ่งชี้ถึงโครงสร้างของน้ำยางได้ทั้งนี้เนื่องจากค่านี้นับถึงความสามารถในการโพลาริซของน้ำยางซึ่งแปรเปลี่ยนตามโครงสร้างของสสารในระดับอนุภาค ดังนั้น หากทราบค่า  $\varepsilon$  ของน้ำยาง(ซึ่งสามารถวัดในทางกายภาพได้โดยเชื่อมโยงกับสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์) ย่อมสามารถทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสดได้ อย่างไรก็ตามจากที่ได้กล่าวในหัวข้อ 1.1 ว่ารูปแบบการโพลาริซในน้ำยางมีได้ถึง 4 ลักษณะตั้งแต่ระดับการโพลาริซในระดับอิเล็กตรอนไปจนถึงระดับกลุ่มโมเลกุล หากไม่ควบคุมคุณลักษณะของ

สนามไฟฟ้าแล้ว กระบวนการเกิดโพลาริซิชันภายในน้ำอาจซับซ้อนและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายอาจยุ่งยาก

เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับน้ำอาจเป็นสิ่งที่เราสามารถควบคุมคุณลักษณะได้ทั้งปริมาณขนาด ทิศทางการป้อน เฟส และ ความถี่ ดังนั้นถ้าควบคุมสนามไฟฟ้าภายนอกให้เกิดการโพลาริซิชันให้เกิดในลักษณะเดียวกันย่อมส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของน้ำสามารถทำได้โดยง่าย ในหัวข้อที่ผ่านมาการโพลาริซิชันมีตั้งแต่ระดับอิเล็กตรอนที่เล็กที่สุดไปจนถึงระดับกลุ่มโมเลกุลที่ใหญ่ที่สุดในสารน้ำ ซึ่งรูปแบบการเกิดโพลาริซิชันทั้ง 4 แบบจะเด่นชัดสุดตามความถี่ของสนามไฟฟ้าภายนอกที่มากกระทำกล่าวคือ การโพลาริซิชันระดับอิเล็กตรอนซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กที่สุดจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นทางไฟฟ้าที่เล็กที่สุด (ความถี่ทางไฟฟ้าของสนามภายนอกประมาณ  $10^{15}$  เฮิร์ตซ์) ในขณะที่กลุ่มโมเลกุลซึ่งมีขนาดที่ใหญ่จะโพลาริซิชันกับสนามไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นยาว (ความถี่ 100 เฮิร์ตซ์) สำหรับความถี่ของสนามไฟฟ้าภายนอกที่เหมาะสมสำหรับทำให้กลไกโพลาริซิชันระดับไอออนและระดับโมเลกุลคือช่วงความถี่ระหว่าง  $10^{10}$ - $10^{13}$  เฮิร์ตซ์และน้อยกว่า  $10^{10}$  เฮิร์ตซ์ตามลำดับ โดยเหตุนี้ การออกแบบควรต้องเลือกความถี่ที่เหมาะสมค่าเดียวในการทำงานจะทำให้กลไกการเกิดโพลาริซิชันรูปแบบเดียวที่ปรากฏชัดและการสังเคราะห์แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าเปอร์เซ็นต์นี้อย่างแท้จริงทำได้ง่าย

การเลือกป้อนสนามไฟฟ้าภายนอกในความถี่ช่วงไมโครเวฟเท่ากับ  $10^9$  เฮิร์ตซ์สำหรับวัตต์น้ำภายในโครงการวิจัยนี้เพราะต้องการวัดกลไกการโพลาริซิชันในโมเลกุลของน้ำซึ่งอยู่ในสภาพที่มีโมเลกุลพอลิเมอร์และโมเลกุลน้ำรายรอบ หากพิจารณาโดยสมมติว่าน้ำเป็นเนื้อเดียวกันหมดและไม่มีสนามไฟฟ้าภายในโมเลกุลพอลิเมอร์ การโพลาริซิชันของโมเลกุลน้ำได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณโมเลกุลน้ำในบริเวณนั้นๆ ซึ่งหากมีการโพลาริซิชันมาก หมายถึงปริมาณน้ำมากแสดงว่าปริมาณนี้อย่างแท้จริง(และเป็นจริงในทางกลับกัน) ทั้งนี้ ช่วงความถี่ที่เลือกห่างจากค่าความถี่สูงสุดซึ่งเป็นขอบเขตระหว่างการโพลาริซิชันแบบไอออนถึง  $10^9$  เท่า นอกจากนี้การเลือกออกแบบความถี่ระดับไมโครเวฟจะลดขนาดอุปกรณ์ได้

โมเลกุลของน้ำมีสนามไฟฟ้าภายใน มีการเคลื่อนที่และอ่อนไหวต่ออุณหภูมิภายนอกที่มากกระทำ ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายนอกทำให้ระดับพลังงานที่กระตุ้นโมเลกุลน้ำเปลี่ยนแปลง ยังผลให้พลังงานของโมเลกุลน้ำเปลี่ยนแปลงและมีผลกระทบต่อปรากฏการณ์โพลาริซิชันของน้ำ ในแง่มุมของการโพลาริซิชันในระดับโมเลกุล หากระดับพลังงานเพิ่มขึ้น ย่อมทำให้โมเลกุลน้ำมีพลังงานจลน์มากขึ้น ผลกระทบดังกล่าวทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนตัวเร็วในลักษณะกระจัดกระจายมากขึ้น ทำให้เราต้องการพลังงานจากสนามไฟฟ้าภายนอกเพิ่มขึ้นเพื่อบังคับให้โมเลกุลของน้ำปรับทิศทางไปตามทิศของสนามไฟฟ้า แต่หากไม่เพิ่มปริมาณสนามไฟฟ้าภายนอกแล้ว ณ อุณหภูมิสูงขึ้น ความสามารถในการโพลาริซิชันของน้ำตามสนามไฟฟ้าภายนอกจะลดลงเนื่องเพราะระดับพลังงานจลน์ที่สูงขึ้นในโมเลกุลของน้ำ สิ่งที่เป็นเครื่องยืนยันในข้อนี้คือปรากฏการณ์ที่ค่าเพอร์มิตติวิตีของน้ำลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

โดยเหตุนี้ การทำนายค่าเปอร์เซ็นต์นี้อย่างแท้จริงในน้ำอาจจะต้องพิจารณาปัจจัยทางด้านอุณหภูมิอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้เนื่องเพราะน้ำประกอบด้วยทั้งโมเลกุลน้ำและโมเลกุลพอลิเมอร์ทำให้ค่าเพอร์มิตติวิตีของน้ำแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ ดังนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นจะต้องสามารถอธิบายปรากฏการณ์ของค่าเพอร์มิตติวิตีของน้ำเมื่อ เปอร์เซ็นต์นี้อย่างแท้จริง เปลี่ยนแปลงและเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

### การสังเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของน้ำยาง

การสังเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของน้ำยางในโครงการวิจัยนี้ใช้แบบจำลองไดโพลไดอิเล็กตริกผสมซึ่งวางภายใต้สมมติฐานสำคัญคือน้ำยางสามารถโพลาริซ์ได้และกลไกสำคัญในการโพลาริซ์คือส่วนของน้ำซึ่งมีค่าไดโพลไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์  $\epsilon_w$  [4] ดังสมการ

$$\frac{\epsilon_{eff} - \epsilon_w}{\epsilon_{eff} - 2\epsilon_w + \nu(\epsilon_{eff} - \epsilon_w)} = f \frac{\epsilon_s - \epsilon_w}{\epsilon_s - 2\epsilon_w + \nu(\epsilon_{eff} - \epsilon_w)} \quad (5)$$

กำหนดให้  $f$  แทนสัดส่วนปริมาตรของเนื้อยางแห้ง,  $\nu$  แทนพารามิเตอร์ที่อธิบายผลกระทบของกลไกการโพลาริซ์ของเนื้อยางแห้งซึ่งไม่มีหน่วย กรณี  $\nu = 0$  แบบจำลองนี้จะสอดคล้องกับแบบจำลองของแมกซ์เวลล์-การ์เนต (Maxwell-Garnett model),  $\nu = 2$  แทนแบบจำลองของบรุ๊กแมน (Bruggemann model), และ  $\nu = 3$  แทนแบบจำลองการประมาณแบบศักย์สัมพัทธ์ (Coherent potential approximation) จากสมการ ค่า  $\nu$  จะไม่มีนัยสำคัญหากปริมาตรเนื้อยางแห้งเล็กและเต็มซึ่งบอกเป็นนัยยะว่าผลกระทบจากการโพลาริซ์ของยางแห้งน้อยมาก จากสมการ (5) แบบจำลองดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นภายใต้สมมติฐานที่ว่ารูปทรงของโครงสร้างโมเลกุลเป็นทรงกลมและมีปรากฏการณ์โพลาริซ์ในระดับโมเลกุลเท่านั้น ในกรณีอื่นๆนอกเหนือจากนี้ เราอาจต้องดัดแปลงสมการ (5) ให้เหมาะสมสอดคล้องในแต่ละกรณี

จาก (5) ค่าไดโพลไดอิเล็กตริกเพอร์มิตติวิตีของน้ำที่แปรผันกับอุณหภูมิจะอธิบายด้วยฟังก์ชันสเปคตรัมแบบเดอเบย์ (Debye-type relaxation spectral function) [5] ดังสมการ

$$\epsilon_w = \epsilon_\alpha + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\alpha}{1 + i\omega\tau} \quad (6)$$

โดยกำหนดให้  $\epsilon_\alpha$  แทนค่าไดโพลไดอิเล็กตริกเพอร์มิตติวิตีในช่วงความถี่อนันต์ของน้ำ

$\epsilon_0$  แทนค่าไดโพลไดอิเล็กตริกเพอร์มิตติวิตีสถิตียของน้ำ,

$i$  แทนส่วนจินตภาพและมีค่า  $\sqrt{-1}$ ,

$\omega$  แทนค่าความถี่เชิงมุมของสนามไฟฟ้าภายนอกที่กระตุ้นและ

$\tau$  แทนค่าเวลาผ่อนคลายของน้ำ (Relaxation time)

จาก (6) เราสามารถเขียนสมการค่าไดโพลไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของน้ำเมื่อแปรผันกับอุณหภูมิได้ดังนี้

$$\epsilon_w = (-0.00047T^2 - 0.0048T + 5.87959) + \frac{(-0.355T + 87.52) - (-0.00047T^2 - 0.0048T + 5.87959)}{1 + i\omega(15.95629e^{(-0.02455T)})} \quad (7)$$

กำหนดให้  $T$  แทนค่าอุณหภูมิน้ำมีหน่วยเป็นเซลเซียส ดังนั้น หากแทนสมการ (7) ในแบบจำลองค่าไดโพลไดอิเล็กตริกผสมใน (5) แล้ว เราจะได้แบบจำลองไดโพลไดอิเล็กตริกผสมของน้ำยางซึ่งอธิบายปรากฏการณ์ทางกายภาพของน้ำยางที่แปรผันกับอุณหภูมิได้ จากนั้นนำค่า  $f$  ที่คำนวณได้จาก (5) มาแทนใน (8) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้คำนวณค่าค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางในที่สุด

$$\%DRC = \frac{D_s f}{D_s f + D_w(1-f)} \quad (8)$$

โดยกำหนดให้ %DRC ค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยาง

$D_s$  แทนความหนาแน่นของเนื้อยางแห้ง (0.94 g/cm)

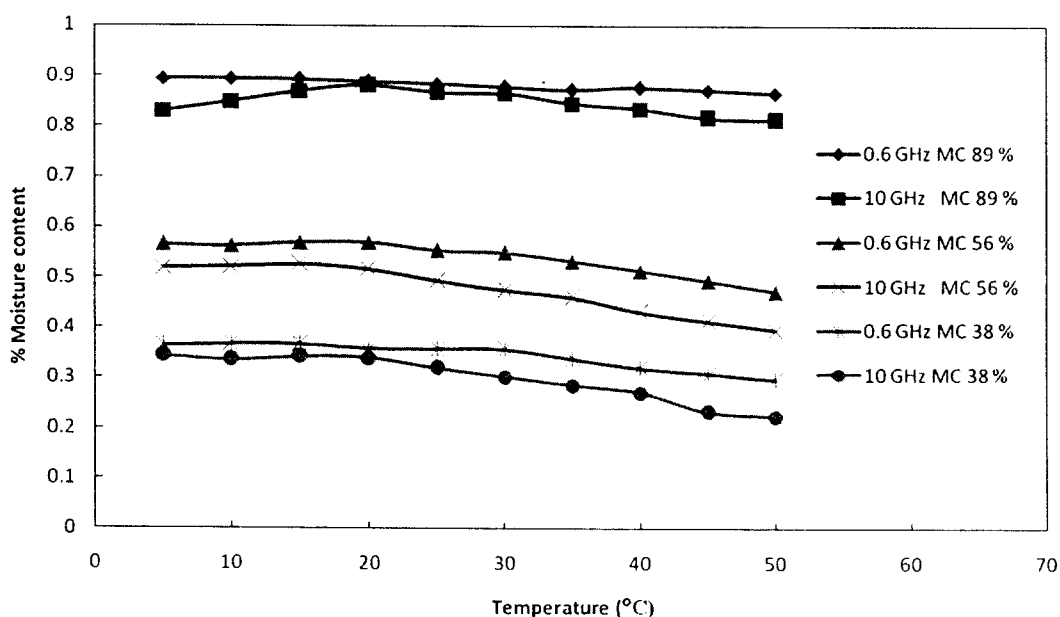
$D_w$  แทนความหนาแน่นของน้ำ

### การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับข้อมูลวิจัย

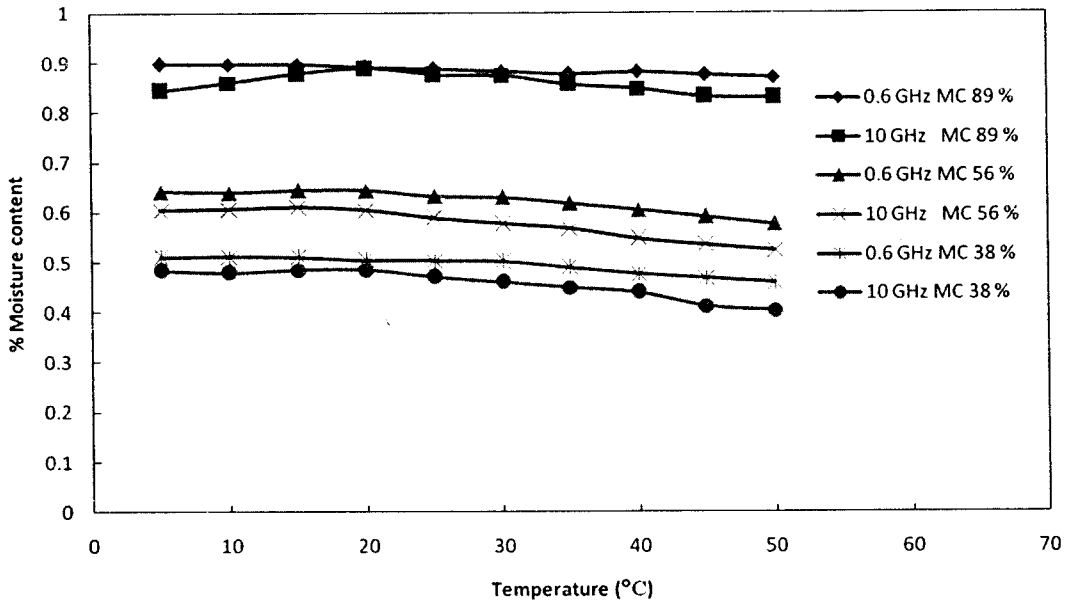
ผลทดสอบแบบจำลองที่นำเสนอสำหรับทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสด ณ อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ระดับค่า 5 จนถึง 50 องศาเซลเซียส การทดสอบในเบื้องต้นจะอ้างอิงข้อมูลทดสอบจากผลข้อมูลที่ทดลองและเผยแพร่ในบทความของนักวิจัยมาเลเซีย ณ ความถี่ไมโครเวฟ 0.6 และ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยทดสอบกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ในน้ำยาง (Moisture Content : MC) ซึ่งแปรผกผันกับค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสด สามระดับค่าคือ 38 56 และ 89 เปอร์เซ็นต์ ผลทดสอบที่ได้เป็นดังรูปที่ 1 ซึ่งผลที่ได้ในรูป 1 ก และ ข แสดงให้เห็นว่า ณ ความถี่และ ณ อุณหภูมิหนึ่ง แบบจำลองที่ทำนายด้วย Maxwell-Garnett แม่นยำกว่า อย่างไรก็ตาม ทั้งสองแบบจำลองต่างยังคงแปรผันกับความถี่และอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป นอกจากนี้แนวโน้มความคลาดเคลื่อนจะค่อนข้างสูง ณ ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ซึ่งนักวิจัยคาดว่าสาเหตุหลักๆ ที่สำคัญได้แก่

- ความถี่ของสนามไฟฟ้าป้อนเข้าที่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ซึ่งนักวิจัยจากมาเลเซียใช้ทดสอบเป็นช่วงความถี่รอยต่อที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์โพลาไรซ์ทั้งสองรูปแบบคือปรากฏการณ์โพลาไรซ์ระดับโมเลกุลและปรากฏการณ์โพลาไรซ์ระดับอออน
- ความคลาดเคลื่อนจากการอ่านผลลัพธ์ในกราฟที่นำเสนอในบทความของนักวิจัยมาเลเซีย

อย่างไรก็ตามหากเทียบกันในภาพรวมแล้ว แบบจำลองของ Maxwell-Garnett สามารถทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น (ซึ่งบ่งชี้ถึงเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสด) ได้เที่ยงตรงกว่าแบบจำลองของ Bruggeman ทั้งนี้เราสามารถเห็นชัดเจนทั้งในแง่ของการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ ความถี่ หรือระดับค่าเปอร์เซ็นต์ของเนื้อยางแห้งในน้ำยางสด



(ก)



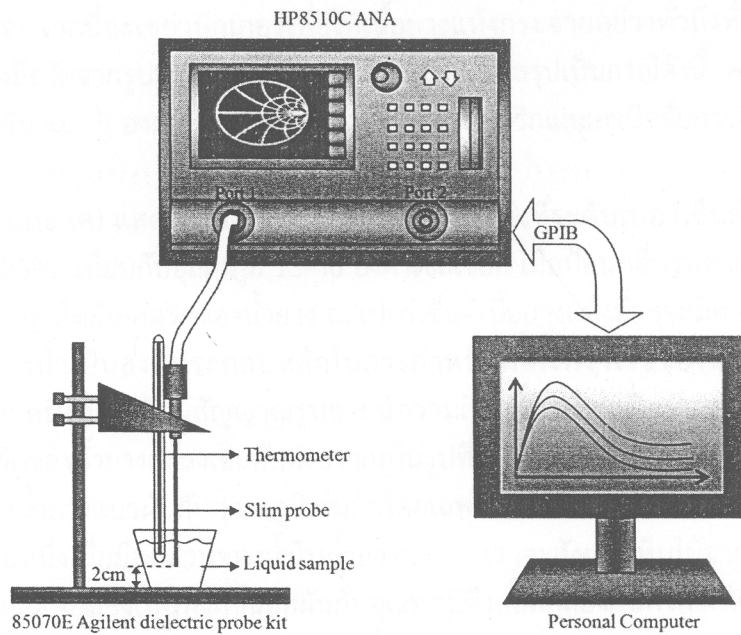
(ข)

รูปที่ 1 ผลทำนายเปอร์เซ็นต์ค่าความชื้นสัมพัทธ์ด้วยแบบจำลอง (ก) Maxwell-Garnett (ข) Bruggemann โดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัย [6]

### การวัดค่าไดอิเล็กตริกของน้ำยาง

จากการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมาซึ่งทดสอบกับค่าไดอิเล็กตริกของน้ำยางซึ่งเป็นผลจากรายงานวิจัยด้วยผลอ่านที่ได้อาจผิดพลาดจากความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการอ่านค่าในรายงาน ดังนั้นการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนหัวข้อที่ผ่านมาจึงยังไม่สามารถสรุปชัดเจนได้เพียงแต่ชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้และแนวโน้มของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเท่านั้น โดยเหตุนี้เองในงานวิจัยนี้จึงต้องทดลองจริงกับน้ำยางที่ค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง ณ อุณหภูมิแวดล้อมต่างๆ การเตรียมค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งที่ค่าต่างๆของน้ำยางจะได้จากการเจือน้ำกลั่นในน้ำยางชั้นที่ค่าระดับความเข้มข้น 61.25 เปอร์เซ็นต์ โดยในน้ำยางชั้นนี้จะข้อมูลการเตรียมน้ำยางพบว่ามีค่าแอมโมเนียระดับความเข้มข้นที่ 0.4% ทั้งนี้ น้ำยางสดจะแตกต่างจากน้ำยางชั้นในส่วนของการประกอบซึ่งในรายงานวิจัยนี้จะสมมติว่าสารประกอบที่เจือในน้ำยางน้อยมากและไม่มีผลต่อปรากฏการณ์โพลาไรซ์เมื่อมีสนามไฟฟ้าจากภายนอกเนื่องจากคลื่นรูปขายนี้น่าจะพ้องให้กับน้ำยาง

เราออกแบบการทดลองโดยเตรียมน้ำยางที่ระดับความเข้มข้นในระดับค่าที่ครอบคลุมทุกค่าที่คาดว่า เป็นไปได้ในภาคสนามและต้องเป็นค่าที่ยอมรับในตลาดการซื้อขายน้ำยางนั้นคือต้องมีค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งใน น้ำยางอย่างน้อย 28% ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมน้ำยางที่เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งตั้งแต่ 28%-61.25% จำนวน 10 ระดับเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งทั้งนี้ ผลลัพธ์จากการเตรียมจะไปทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งวิธีมาตรฐานคือ ISO 126:1972 และในการทดลองจะควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมที่สอดคล้องกับภาคสนามซึ่งครอบคลุมอุณหภูมิประเทศไทยตั้งแต่ 15-40 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2 ภาพถ่ายอธิบายการทดลองวัดค่าไดอิเล็กตริกของน้ำยางดิบ

ในรูปที่ 2 แสดงผังภาพการทดสอบค่าไดอิเล็กตริกของน้ำยางในงานวิจัยนี้ น้ำยางที่ถูกเตรียมจะแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกมีปริมาตร 40 มิลลิลิตรซึ่งบรรจุในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร ในขณะที่ส่วนที่สองจะแบ่งเพื่อไปทดสอบกับวิธีมาตรฐาน ความสูงของตัวอย่างน้ำยางที่ทดสอบในภาชนะจะอยู่ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5 เซนติเมตร ในการทดสอบจะใช้โพรบพอมมาตรฐาน (Standard slim probe) ควบคุมกับซอฟต์แวร์คำนวณมาตรฐานของบริษัทอะจีเลนท์ (Agilent) ตระกูล 85070E โพรบวัดนี้จะจุ่มในน้ำยางที่ต้องการวัดโดยจุ่มลึกลงไป 1 เซนติเมตรและกำหนดวัด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางพื้นที่หน้าตัดของบีกเกอร์ มิติของโพรบและขนาดพื้นที่หน้าตัดของบีกเกอร์จะสอดคล้องตามคู่มือที่บริษัทอะจีเลนท์ (Agilent) แนะนำเพื่อให้แน่ใจว่าขนาดของสนามไฟฟ้าที่ปล่อยออกจากเครื่องมือวัดจะแผ่รอบสม่ำเสมอเท่ากันทุกทิศตามมุมกวาดรอบจากตัวโพรบ ในรูปแสดงโพรบวัดได้ติดตั้งกับขาตั้งเพื่อควบคุมให้โพรบอยู่นิ่งขณะวัดเพื่อลดความแปรปรวนที่เกิดขึ้น การวัดอุณหภูมิจะวัดโดยปรอทวัดอุณหภูมิที่ติดตั้งอยู่ข้างเคียงโพรบวัดไดอิเล็กตริก

โพรบวัดนี้จะติดตั้งกับเครื่องมือวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติ (Automatic Network Analyzer) ผลิตโดยบริษัทอะจีเลนท์รุ่น HP8510C โดยวงจรส่งเคราะห์ความถี่ 1 3 และ 5 กิกะเฮิรตซ์ภายในเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติจะสร้างสัญญาณคลื่นไซน์ต่อเนื่องจากพอร์ท 1 ตามรูปที่ 2 ผ่านสู่โพรบวัด คลื่นรูปไซน์จะกระทบกับน้ำยางทำให้โมเลกุลของน้ำในน้ำยางโพลาริซ์และปรากฏในรูปของคลื่นสะท้อนกลับที่พอร์ท 1 อัตราส่วนของคลื่นสะท้อนกลับที่พอร์ท 1 ต่อคลื่นที่ส่งจากพอร์ท 1 ทั้งในรูปของขนาดและเฟสของอัตราส่วนจะถ่ายโอนไปยังคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งซอฟต์แวร์มาตรฐานที่คำนวณค่าไดอิเล็กตริก 85070E ผ่านพอร์ท General Purpose Interface Bus:GPIB และข้อมูลจะวิเคราะห์ประมวลผลและเก็บในรูปแบบแฟ้มข้อมูลโปรแกรม Microsoft Excel ในรูปของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และค่าปัจจัยการสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)

รูปที่ 3 และ 4 แสดงผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าปัจจัยการสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริก ขั้นตอนการวัดจะเริ่มจากการเตรียมน้ำยางในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 27 องศาเซลเซียส กำหนดระดับการควบคุมอุณหภูมิขึ้นละ 5 องศาเซลเซียสโดยการแช่บีกเกอร์ที่บรรจุน้ำยางในอ่างน้ำและควบคุมอุณหภูมิด้วยการเติมน้ำร้อน 100 องศาเซลเซียสในอ่างหากต้องการเพิ่มอุณหภูมิและเติมน้ำเย็นอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสหากต้องการลดอุณหภูมิ ก่อนวัดจริงจะปล่อยน้ำยางทิ้งไว้ประมาณ 5 นาทีเพื่อให้แน่ใจว่าอุณหภูมิในน้ำยางเท่ากัน

ทุกๆจุดภายในปีกเกอร์นอกจากนี้จะเขย่าปีกเกอร์เพื่อให้เนื้ออย่างแห้งกระจายอย่างทั่วถึงทั้งปีกเกอร์ สำหรับความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดจากรูปแบบทดลองในงานวิจัยนี้สามารถสรุปเป็นกรณีดังนี้ ความไม่แน่นอนจากปรอทวัดอุณหภูมิอยู่ที่ระดับ  $\pm 0.5$  องศาเซลเซียสและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าปัจจัยการสูญเสียเนื่องจากค่าไดอิเล็กตริกคือ  $\pm 0.05$

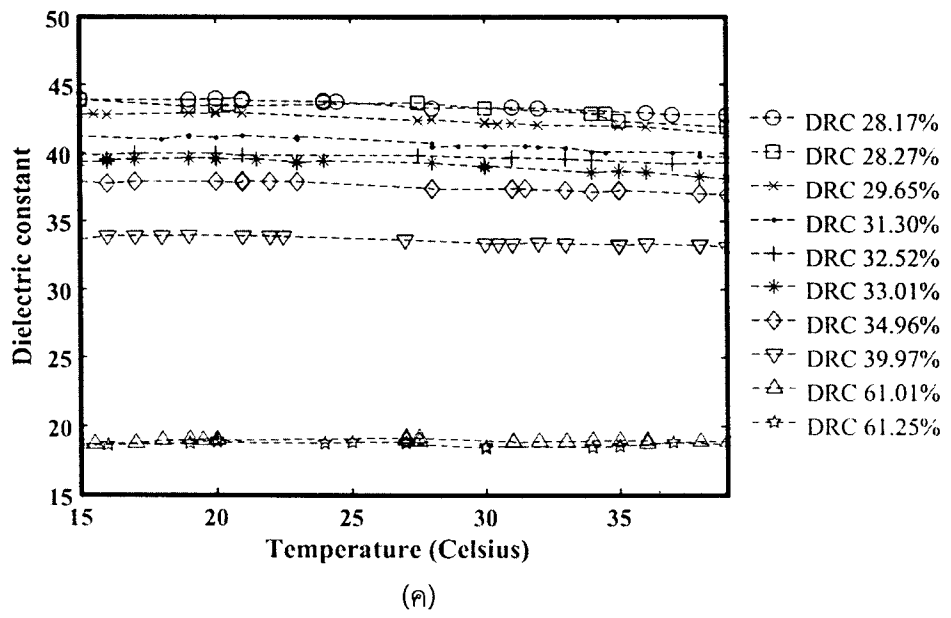
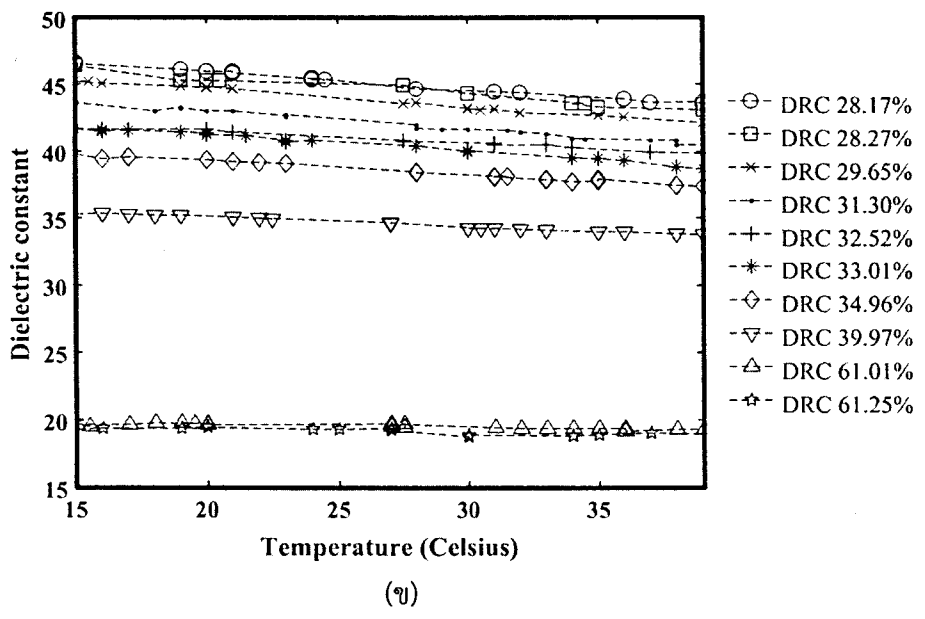
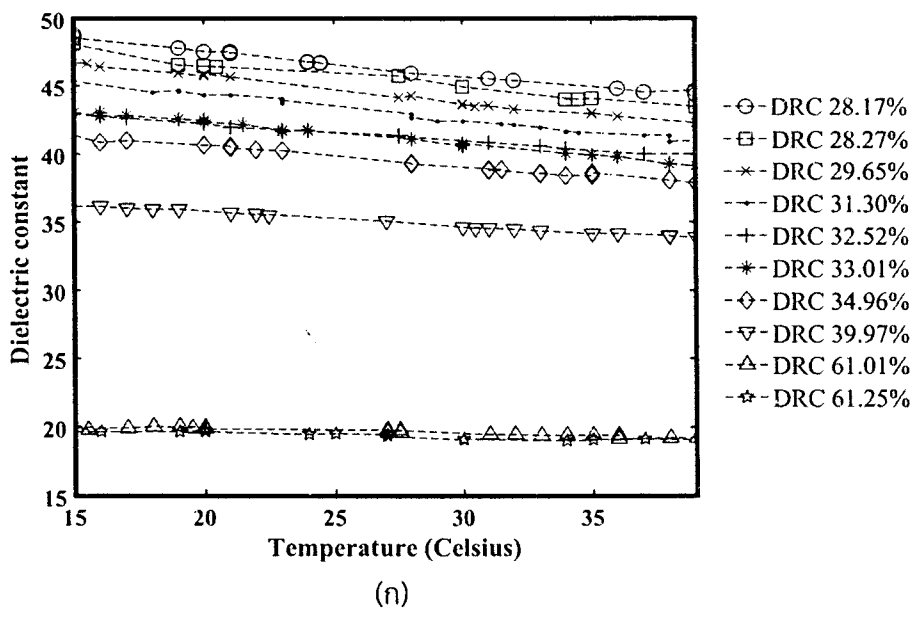
รูปที่ 3 (ก) (ข) และ (ค) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำยางที่ระดับเปอร์เซ็นต์เนื้ออย่างแห้งต่ำสุด 28.17% จนถึงสูงสุด 61.25% เทียบกับอุณหภูมิ 15-40 องศาเซลเซียส เมื่อป้อนคลื่นรูปซายน์ความถี่ 1 3 และ 5 กิกะเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ ค่าไดอิเล็กตริกของน้ำยาง ณ เปอร์เซ็นต์เนื้ออย่างแห้งต่างๆจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบหลักในการกำหนดการโพลาไรซ์ของน้ำยาง สำหรับระดับเปอร์เซ็นต์เนื้ออย่างแห้งค่าหนึ่ง หากป้อนสัญญาณรูปซายน์ความถี่สูงขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำจะลดลงยังผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำยางลดลงเช่นกันดังปรากฏในรูปที่ 3 (ก)-(ค)

ค่าไดอิเล็กตริกของน้ำยางแปรผันกับอุณหภูมิเช่นกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งหากเปอร์เซ็นต์เนื้ออย่างแห้งในน้ำยางมีค่าน้อยๆ(หรืออีกนัยหนึ่งเมื่อมีสัดส่วนของน้ำในน้ำยางมาก) เราจะสามารถสังเกตเห็นได้จากค่าความชันของค่าไดอิเล็กตริกเมื่อเทียบกับอุณหภูมิซึ่งเป็นฟังก์ชันผกผันกับอุณหภูมิซึ่งสอดคล้องกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำที่แปรผกผันกับอุณหภูมิเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ณ เปอร์เซ็นต์เนื้ออย่างมากมาย (ที่ค่า 61.01% และ 61.25%) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกแทบจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ซึ่งผลดังกล่าวเนื่องเพราะมีสัดส่วนของโมเลกุลน้ำที่อ่อนไหวต่ออุณหภูมิน้อยมากจนแทบจะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันแปรกับอุณหภูมิ

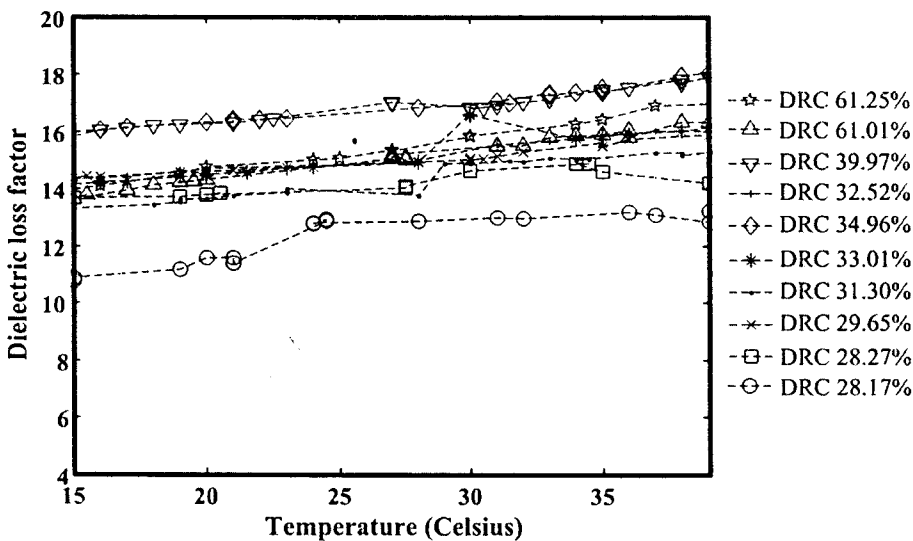
รูปที่ 4 (ก)-(ค) แสดงค่าปัจจัยการสูญเสียเนื่องจากค่าไดอิเล็กตริกของน้ำยางที่ระดับค่าเปอร์เซ็นต์เนื้ออย่างแห้งในน้ำยางค่าต่างๆเมื่อเทียบกับอุณหภูมิเมื่อป้อนสัญญาณรูปซายน์ ณ ความถี่ 1 3 และ 5 กิกะเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ สังเกตว่าลักษณะค่าปัจจัยการสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริกของน้ำยางกรณีรูป 4 (ข) และ (ค) มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและรูปแบบคล้ายคลึงกับคุณลักษณะของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำยางที่แสดงไว้ในรูป 3 (ก)-(ค) ลักษณะดังกล่าวต่างอย่างสิ้นเชิงกับกรณีที่ป้อนสัญญาณคลื่นความถี่ 1 กิกะเฮิร์ตซ์ซึ่งเป็นช่วงสัญญาณความถี่ต่ำกว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าปัจจัยการสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริก ณ ความถี่นี้เปลี่ยนแปลงในทางตรงกันข้ามกล่าวคือ ที่เปอร์เซ็นต์เนื้ออย่างแห้งน้อยๆจะมีค่าปัจจัยการสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริกต่ำ นอกจากนี้ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าปัจจัยการสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริกแปรผันตามค่าอุณหภูมิของน้ำยาง

หากสังเกตลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กตริกและปัจจัยการสูญเสียทั้งรูปที่ 3 และ 4 เมื่อเทียบกับค่าน้ำยางที่เปอร์เซ็นต์เนื้ออย่างแห้งค่าต่างๆจะพบว่า ข้อมูลค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำยางซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติการโพลาไรซ์ของน้ำยางสามารถอธิบายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้ออย่างแห้งในน้ำยาง ณ อุณหภูมิต่างๆได้และเพียงพอที่จะสังเคราะห์แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้ออย่างแห้งในน้ำยางได้ทั้งนี้ น้ำยางประกอบด้วยส่วนที่เป็นโมเลกุลน้ำและโมเลกุลยางโดยระดับการโพลาไรซ์จะครอบคลุมเฉพาะระดับโมเลกุลเท่านั้น สำหรับข้อมูลปัจจัยการสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริกของน้ำยางในรูปที่ 4 นั้นไม่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์แบบจำลองคณิตศาสตร์เนื่องจากไม่เป็นเอกภาพดังที่ปรากฏในรูปที่ 4(ก)-(ค) อันจะทำให้การสังเคราะห์แบบจำลองทำนายกระทำได้อย่างยาก

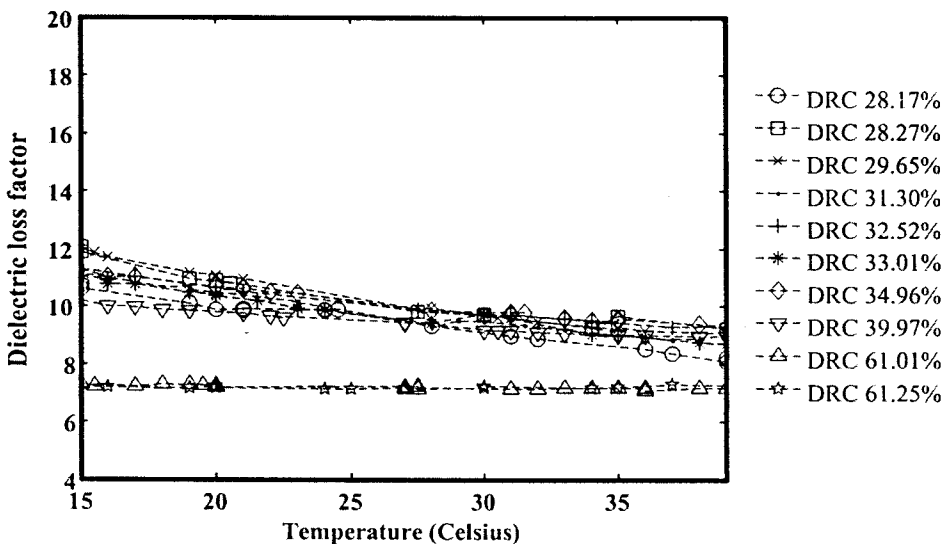




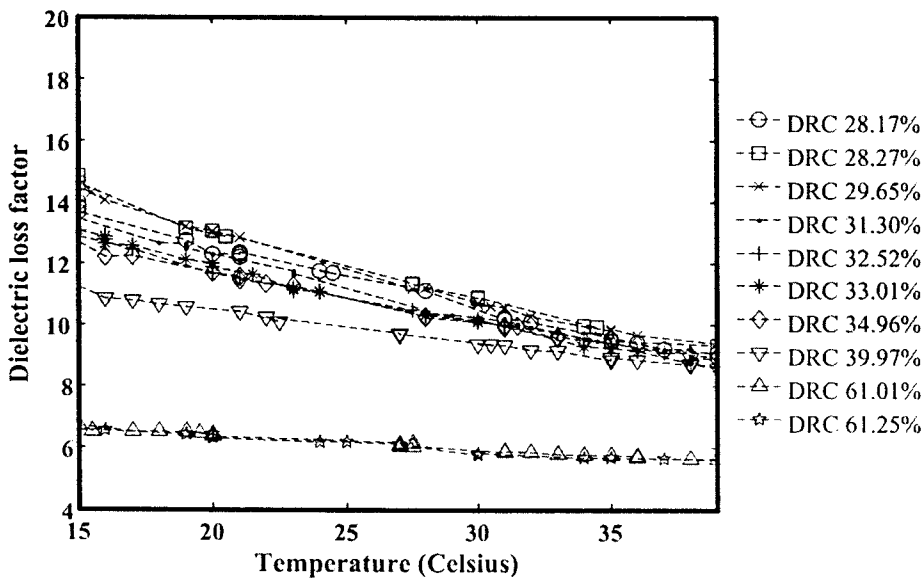
รูปที่ 3 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำยางที่เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งตั้งแต่ 28-61.25 % ที่อุณหภูมิ 15-40 องศาเซลเซียส (ก) 1 กิกะเฮิรตซ์ (ข) 3 กิกะเฮิรตซ์ และ (ค) 5 กิกะเฮิรตซ์



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4 ค่าปัจจัยจากการสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริกของน้ำยางที่เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งตั้งแต่ 28%-61.25 % ที่อุณหภูมิ 15-40 องศาเซลเซียส (ก) 1 กิกะเฮิรตซ์ (ข) 3 กิกะเฮิรตซ์ และ (ค) 5 กิกะเฮิรตซ์

แบบจำลองคณิตศาสตร์บนพื้นฐานปรากฏการณ์โพลาริซสำหรับทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง

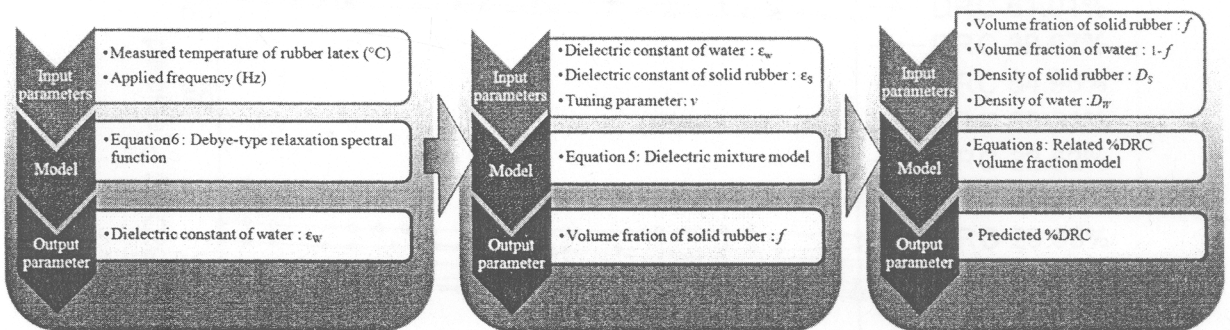
แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาสำหรับอธิบายปรากฏการณ์โพลาริซของน้ำยางเพื่อทำนายเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งถูกพัฒนาภายใต้สมมติฐานที่สำคัญคือน้ำยางประกอบด้วยโมเลกุลน้ำและยางโดยที่โมเลกุลของส่วนผสมอื่นถือว่าส่งผลกระทบต่อปรากฏการณ์โพลาริซน้อยมาก สมมติฐานดังกล่าวค่อนข้างสมเหตุสมผลเนื่องจากสัดส่วนของสารประกอบที่ไม่ใช่น้ำและยางในสภาวะปกติจะมีน้อยมาก ดังนั้น โมเลกุลของสารประกอบที่ไม่ใช่น้ำหรือยางจึงส่งผลกระทบต่อปรากฏการณ์ที่โมเลกุลบิตตัว(โพลาริซ)ตามทิศสนามไฟฟ้าภายนอกที่ป้อนเข้า กรณีสภาวะไม่ปกติได้แก่การตั้งใจเจือสารเพื่อปลอมปนน้ำยางเพื่อตั้งใจลงเครื่องมือวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งนั้นอาจตรวจสอบได้โดยวิธีการตรวจจับเพิ่มเติมคือการวัดค่าปัจจัยการสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริกหรือการวัดโดยป้อนสนามไฟฟ้ามากกว่าหนึ่งความถี่หรือการเพิ่มระดับกำลังงานของสนามไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้เป็นการวัดที่ยุ่งยากและอาจมีข้อผิดพลาดสูง การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำยางที่ป้อนเข้าเป็นกรณีอยู่นอกเหนือขอบเขตของงานวิจัยนี้ซึ่งเป็นโจทย์ที่ทำนายสำหรับผู้วิจัยที่คาดว่าจะได้นำเสนอต่อไป

รูปที่ 5 แสดงลำดับขั้นตอนที่แสดงการทำงานของแบบจำลองคณิตศาสตร์ซึ่งสามารถทำนายเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางดิบได้โดยประกอบด้วยสมการสำคัญทางคณิตศาสตร์ 3 สมการ พารามิเตอร์ป้อนเข้าและผลผลิตของสมการแต่ละสมการพร้อมความสัมพันธ์ระหว่างสมการทั้งสาม จากรูปที่ 5 จะเห็นว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางมีสามขั้นตอนได้แก่

**ขั้นตอนที่ 1** ป้อนข้อมูลเริ่มต้นคืออุณหภูมิขณะวัดและความถี่ของสนามไฟฟ้าจากภายนอก ซึ่งเมื่อป้อนข้อมูลให้กับสมการ (5) แล้วจะคำนวณได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำ

**ขั้นตอนที่ 2** ป้อนค่าไดอิเล็กตริกของน้ำที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ค่าไดอิเล็กตริกของยางแห้งซึ่งเป็นค่าคงที่และพารามิเตอร์ปรับค่าให้กับแบบจำลองไดอิเล็กตริกผสมนียมใน (2) ผลลัพธ์จะได้ค่าอัตราส่วนปริมาตรยางในน้ำ

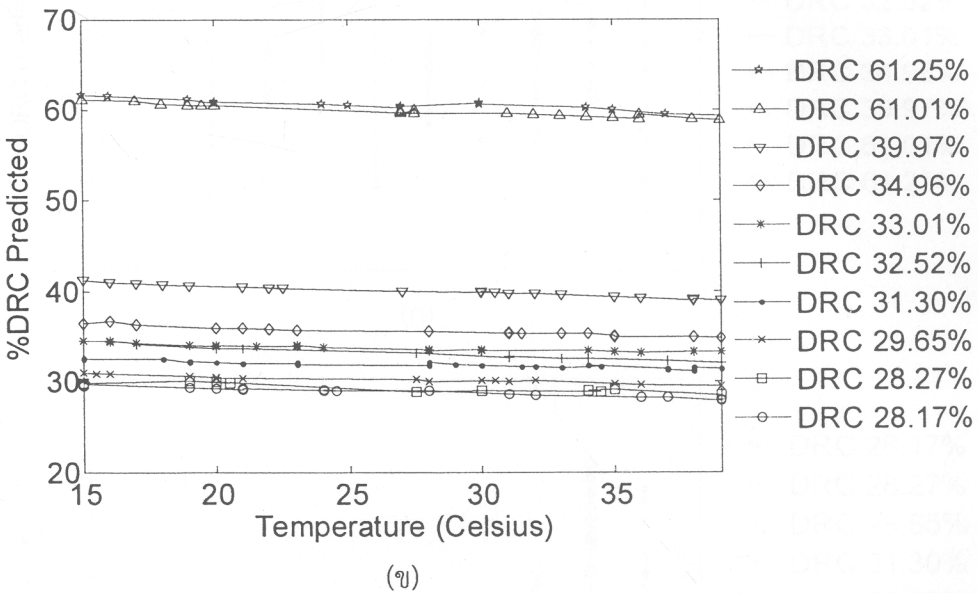
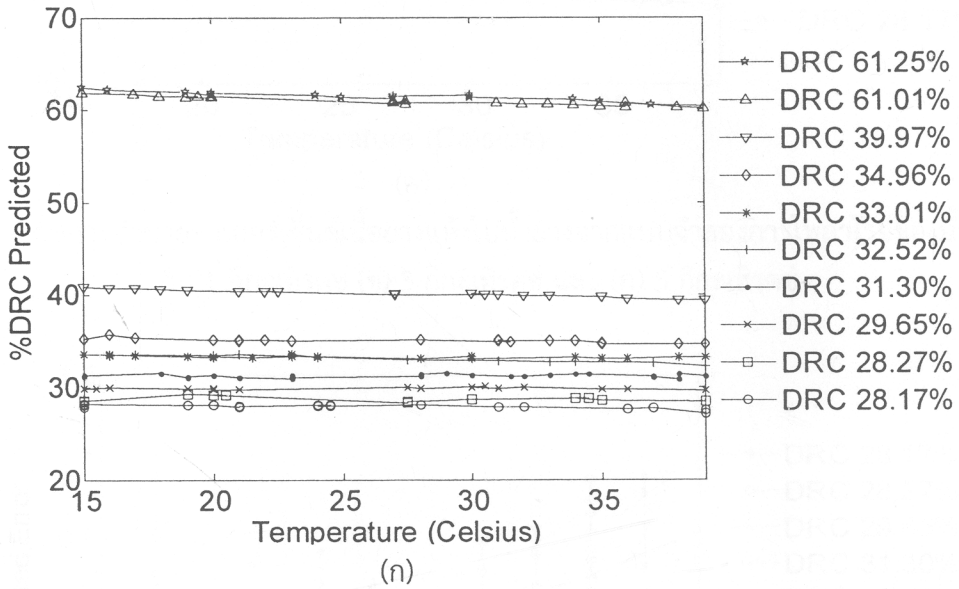
**ขั้นตอนที่ 3** ป้อนค่าอัตราส่วนปริมาตรยางในน้ำที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำ ความหนาแน่นของยางแห้งและความหนาแน่นของน้ำ เมื่อแทนค่าต่างๆเหล่านี้ในสมการ (6) ผลลัพธ์จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยาง



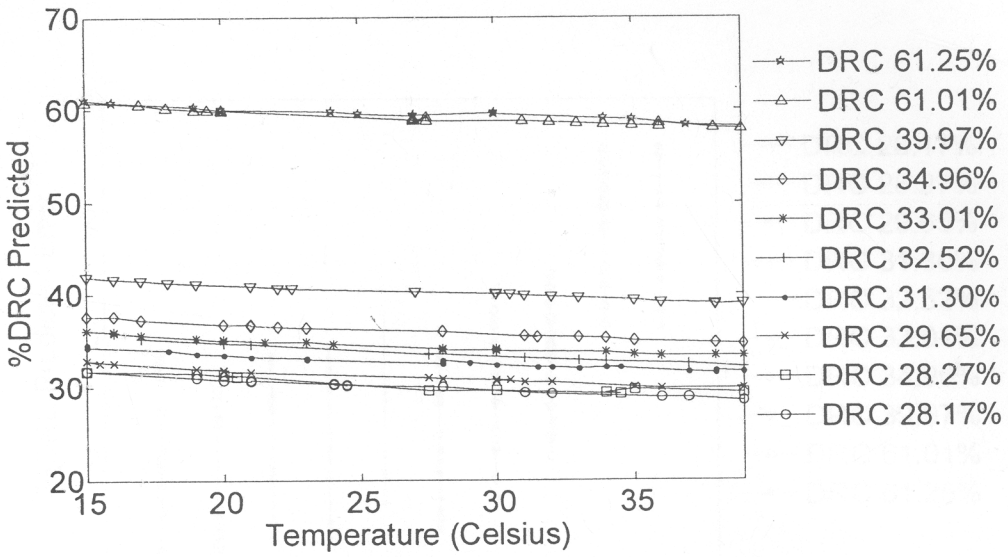
รูปที่ 5 ลำดับขั้นตอนแสดงการทำงานของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ทำนายเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยาง

ผลลัพธ์จากการทำนายด้วยแบบจำลองที่นำเสนอซึ่งสรุปตามแผนภาพในรูปที่ 5 ณ ความถี่ของสนามไฟฟ้าภายนอกแต่ละความถี่ (1 3 และ 5 กิกะเฮิร์ตซ์) เป็นดังรูปที่ 6 แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ของการทำนายที่แม่นยำมากในกรณีการโพลาริซ ณ ความถี่ 1 กิกะเฮิร์ตซ์และแม่นยำน้อยลง ณ ความถี่สูงขึ้น รูปที่ 7 แสดงผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงของผลการทำนายจากแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับกรณีสนามไฟฟ้า ณ ความถี่ต่างๆซึ่งค่าระดับความผิดพลาดจากการทำนายด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่นำเสนอมีความผิดพลาดในระดับต่ำมากและน้อยกว่า 1.1% ณ ความถี่ 1 กิกะเฮิร์ตซ์ สำหรับ ณ ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ตซ์มีค่าขนาดความผิดพลาดสูงที่สุดและอยู่ในระดับไม่เกิน 3.7% ตารางที่ 1 สรุปค่าพารามิเตอร์เชิงสถิติเพื่อแสดงสมรรถนะของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ทำนายเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง

ซึ่งพัฒนาบนหลักการการโพลาริซชันของโมเลกุลน้ำในน้ำยารณ ความถี่ 1 3 และ 5 กิกะเฮิร์ตซ์ ขนาดความผิดพลาดเฉลี่ยจากการทำนาย ณ ความถี่ 1 กิกะเฮิร์ตซ์จะน้อยที่สุดเพียง 0.324% และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.247% ในขณะที่ ณ ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ตซ์จะได้ค่าขนาดผิดพลาดเฉลี่ย 1.493% และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.963% ซึ่งคาดว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมาจากผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอกมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของอนุภาคเนื้อเยื่อแห้ง ทำให้เกิดมีการกระเจิงของสนามไฟฟ้ามากขึ้น และเริ่มสูญเสียการโพลาริซชันตามทิศสนามไฟฟ้าภายนอกที่ป้อนเข้า ซึ่งสังเกตได้ว่าผลความผิดพลาดดังกล่าวจะเกิดขึ้นที่ความถี่สูง



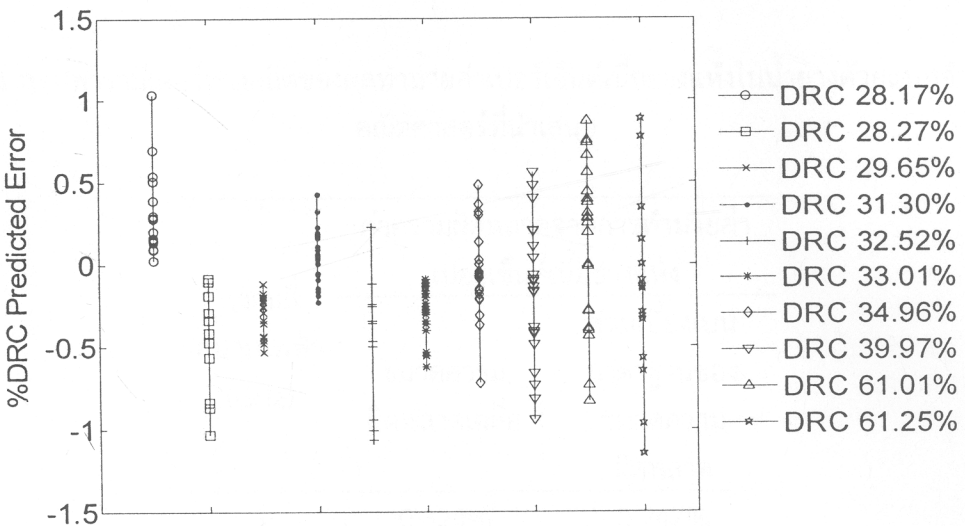
DRC 33.01%  
 DRC 34.96%  
 DRC 39.97%  
 DRC 61.01%  
 DRC 61.25%



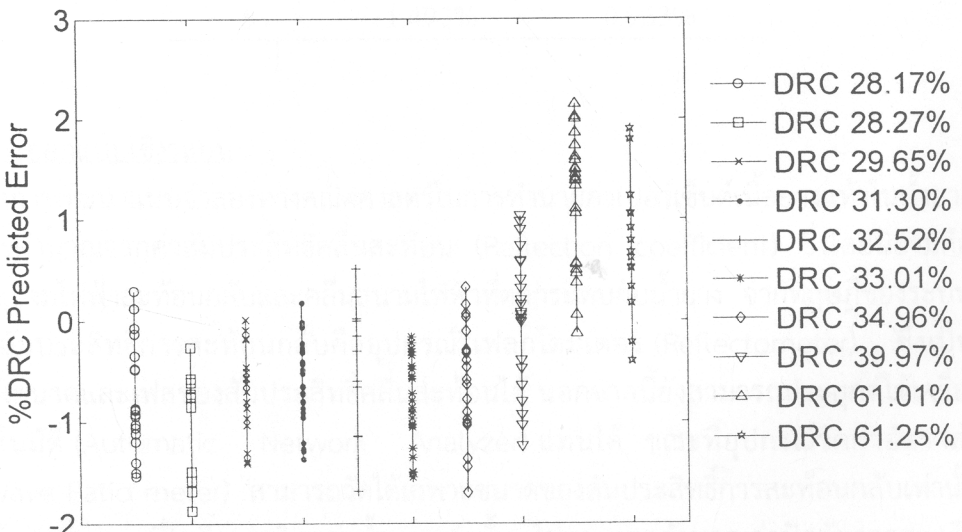
(ค)

รูปที่ 6 ผลการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางจากแบบจำลองการโพลาริซของน้ำยาง

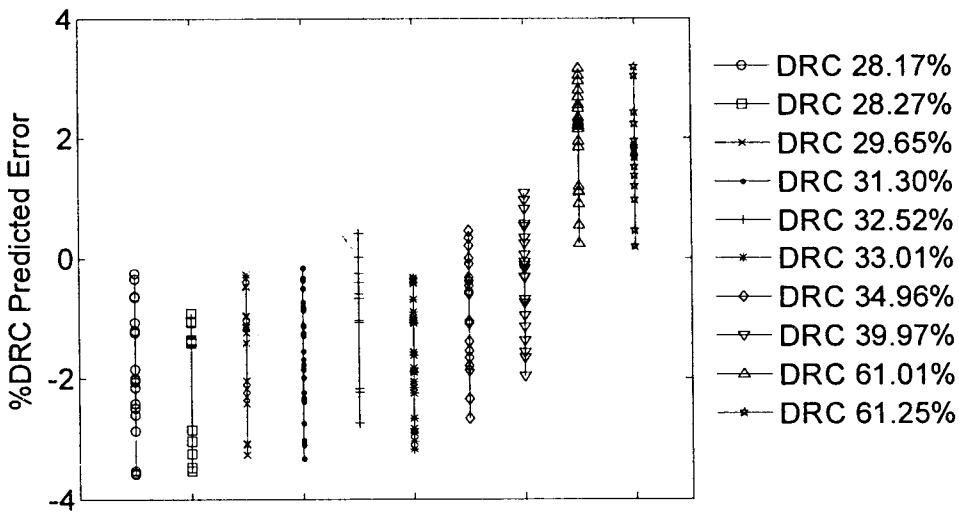
(ก) 1 กิกะเฮิรตซ์ (ข) 3 กิกะเฮิรตซ์ และ (ค) 5 กิกะเฮิรตซ์



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 7 ค่าความผิดพลาดจากการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องานแห้งในน้ำยางจากแบบจำลองการโพลาริซของน้ำยาง (ก) 1 กิกะเฮิร์ตซ์ (ข) 3 กิกะเฮิร์ตซ์ และ (ค) 5 กิกะเฮิร์ตซ์

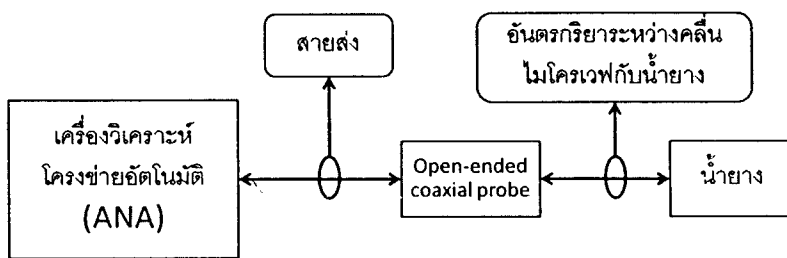
ตารางที่ 1 สรุปพารามิเตอร์ทางสถิติของผลทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องานแห้งในน้ำยางด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอ

ความถี่ สนามไฟฟ้า (GHz)	ค่าความผิดพลาดจากการทำนายค่า เปอร์เซ็นต์เนื้องานแห้ง	
	ขนาดความ ผิดพลาดเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ ขนาดความ ผิดพลาด
1	0.324%	0.247%
3	0.762%	0.510%
5	1.493%	0.963%

**แนวความคิดการออกแบบเชิงระบบ**

แนวความคิดการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องานแห้งในน้ำยางที่นำเสนออาศัยหลักการคำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์คลื่นสะท้อน (Reflection coefficient) ซึ่งโดยนิยามคืออัตราส่วนระหว่างคลื่นสนามไฟฟ้าสะท้อนกลับและคลื่นสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบกับน้ำยาง จากทฤษฎีของระบบไมโครเวฟ อุปกรณ์ที่วัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับคืออุปกรณ์รีเฟลคโตมิเตอร์ (Reflectometer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดทั้งขนาดและเฟสของสัมประสิทธิ์คลื่นสะท้อนได้ นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติ (Automatic Network Analyzer) แทนได้ ขณะที่อุปกรณ์วัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio meter) สามารถวัดได้เฉพาะขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเท่านั้นซึ่งหากไปคำนวณจะได้เฉพาะค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำยางเท่านั้น ไม่สามารถคำนวณค่าปัจจัยการสูญเสียเนื่องจาก

ไดอิเล็กตริกซึ่งเป็นกลไกสำคัญในประยุกต์สร้างอุปกรณ์ทำนายเปอร์เซ็นต์เนื้องอกในน้ำยางสดได้ในทางปฏิบัติ



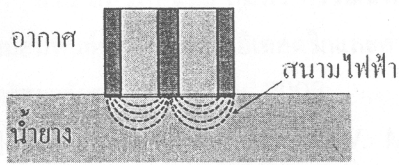
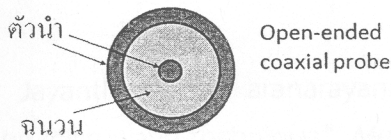
รูปที่ 8 แนวคิดระบบทำนายน้ำยางด้วยอุปกรณ์รีเฟลกโตมิเตอร์หรือเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติ

รูปที่ 8 แสดงแนวคิดการออกแบบอุปกรณ์ทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องอกในน้ำยางด้วยอุปกรณ์ รีเฟลกโตมิเตอร์หรืออาจใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติได้ ทั้งนี้มีโพรบแบบเคเบิลแกนร่วมปลายเปิดที่จะสัมผัสน้ำยางที่ต้องการวัด ระบบจะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติ (Automatic Network Analyzer: ANA) ปล่อกคลื่นไมโครเวฟในช่วงความถี่ 0.5 -20 GHz ผ่านโพรบที่ออกแบบจากสายเคเบิลแกนร่วมปลายเปิด (coaxial open-ended probe) ไปยังน้ำยาง จากนั้นจึงวัดคุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนกลับจากน้ำยาง ซึ่งคุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนกลับจะอยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่นซึ่งขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับน้ำยางและคุณสมบัติของโพรบดังรูปที่ 8

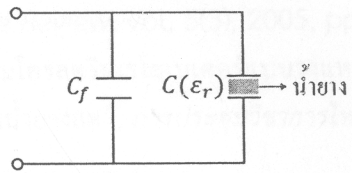
อย่างที่ได้อธิบายในย่อหน้าที่ผ่านมา การทำนายค่าไดอิเล็กตริกเพอร์มิทิวิตีของน้ำยางจะวิเคราะห์จากการนำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่นที่วัดได้มาคำนวณผ่านแบบจำลองทางไฟฟ้าของโพรบเคเบิลแกนร่วมปลายเปิดดังแสดงในภาพประกอบที่ 9 ในภาพแสดงแบบจำลองอย่างง่ายของโพรบซึ่งอธิบายการทำงานของโพรบด้วยค่าความจุไฟฟ้าในรูปที่แสดงความสัมพันธ์กับค่าไดอิเล็กตริกเพอร์มิทิวิตีของน้ำยาง ซึ่งจากแบบจำลองดังกล่าว จะสามารถวิเคราะห์หาค่าไดอิเล็กตริกเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของน้ำยาง ( $\epsilon_r$ ) จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับได้ดังนี้

$$\epsilon_r = \frac{1-\Gamma}{j\omega Z_0 C_0(1+\Gamma)} - \frac{C_f}{C_0} \quad (8)$$

เมื่อ  $\Gamma$  คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติ,  $j$  คือจำนวนจินตภาพมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{-1}$ ,  $\omega$  คือค่าความถี่เชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้วัด,  $Z_0$  คือค่าความต้านทานคุณลักษณะของสายส่งที่ต่อกับโพรบเคเบิลแกนร่วมปลายเปิด,  $C_0$  และ  $C_f$  แทนค่าความจุไฟฟ้าของอากาศและฉนวนในโพรบเคเบิลแกนร่วมปลายเปิดตามลำดับ ทั้งนี้ค่าความจุไฟฟ้าทั้งสองค่าจะคำนวณมาจากกระบวนการสอบเทียบ (calibration) กับวัสดุที่รู้ค่าไดอิเล็กตริกเพอร์มิทิวิตีก่อนวัดน้ำยางจริง



ก. โพรบเคเบิลแกนร่วมปลายเปิด



ข. แบบจำลองของโพรบทางไฟฟ้า

รูปที่ 9 แบบจำลองของสายโพรบเคเบิลแกนร่วมปลายเปิดอย่างง่าย

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

กรรมวิธีการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องานแห้งในน้ำยางด้วยเทคนิคการวัดด้วยคลื่นสะท้อนไมโครเวฟที่นำเสนอ ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำยางและค่าอุณหภูมิของน้ำยาง โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปของแบบจำลองสารไดอิเล็กตริกผสมบนพื้นฐานที่ว่าในน้ำยางมีส่วนประกอบที่สำคัญสองส่วนคือเนื้องานและน้ำ มาประยุกต์ใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำยางและค่าอุณหภูมิของน้ำยางต่อค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องานแห้งในน้ำยาง จากผลการทดสอบการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องานแห้งในน้ำยางพบว่า แบบจำลองดังกล่าวสามารถทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องานแห้งในน้ำยางได้แม่นยำที่สุดที่ความถี่ 1 GHz เมื่อเทียบกับที่ความถี่ 3 และ 5 GHz ด้วยค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 0.324% และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.247% ทั้งนี้แบบจำลองดังกล่าวสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่ายเนื่องจากใช้วิธีการวัดที่ความถี่ต่ำเพียงความถี่เดียว ร่วมกับการวัดอุณหภูมิของน้ำยาง



### บรรณานุกรม

- [1] Jayanthi T., Sankaranarayanan P.E., "Measurement of dry rubber content in Latex using microwave technique", *Measurement Science Review*, vol. 5(3), 2005, pp. 50-54
- [2] ธาณี สมวงศ์ และ สมพร ศรีวัฒนพล "การประยุกต์ใช้ไมโครสตริปเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนสำหรับหาความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าความถี่เรโซแนนซ์ในน้ำยางสด", *การประชุมวิชาการไฟฟ้าครั้งที่ 31*, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2008.
- [3] Khalid K.B. and Daud W. M., "Dielectric properties of natural rubber lates at frequencies from 200 MHz to 2500 MHz", *Journal of National Rubber Research*, vol. 7(4), 1992, pp. 281-289.
- [4] Sihvola A H, "Self-consistency aspects of dielectric mixing theories", *IEEE Transactions on geosciences and remote sensing* 27, 1989, 403-418.
- [5] Kaatze U, "Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature", *J. Chem. Eng. Data* 34, 1989, 371-375.
- [6] K. B. Khalid, "Microwave dielectric properties of hevea rubber latex", *Asia-Pasific Microwave Conference*, 1992, pp.611-616.