



การศึกษาการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของน้ำยางที่อยู่ในภาชนะ
แก้วด้วยสายอากาศ 2 ความถี่ที่ 2.4 และ 5.8 กิกะเฮิรต์ซ์

**A Study of Dielectric Properties Measurement of Rubber Latex in a Glass
Container Using a 2.4 and 5.8 GHz Dual-band Antenna**

วีระยศ คนดี

Veerayot Kondee

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Prince of Songkla University**

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางที่อยู่ในสถานะแก้วด้วย
 สายอากาศ 2 ความถี่ที่ 2.4 และ 5.8 กิกะเฮิรตซ์

ผู้เขียน นายวิระยศ คนดี

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (ดร. ไพโรจน์ วุ่นขุ่ม)

.....ประธานกรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร. มิตรชัย จงเชี้ยวชำนาญ)

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

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุตเขตต์ นาคะเสถียร)

.....กรรมการ
 (ดร. วฤทธิ์ วิชกุล)

.....กรรมการ
 (ดร. ไพโรจน์ วุ่นขุ่ม)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
 วิศวกรรมไฟฟ้า

.....
 (ศาสตราจารย์ ดร. ดำรงค์ดี ฟ้ารุ่งสว่าง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(3)

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(ดร. ไพโรจน์ วุ่นชม)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ

(นายวีระยศ คนดี)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นายวีระยศ คนดี)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางที่อยู่ในภาชนะ
แก้วด้วยสายอากาศ 2 ความถี่ที่ 2.4 และ 5.8 กิกะเฮิร์ตซ์

ผู้เขียน นายวิระยศ คนดี

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางด้วยวิธีแบบไม่สัมผัสกับวัสดุ การวัดด้วยวิธีนี้จะใช้เทคนิคการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่สะท้อนกลับจากน้ำยางด้วยเซ็นเซอร์สายอากาศแพทช์แบบวงกลม การออกแบบสายอากาศแพทช์แบบวงกลมนั้นอาศัยการจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมในภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่นขนาด 100 มิลลิลิตร ด้วยโปรแกรม COMSOL multiphysics จากผลการจำลองพบว่ารัศมีของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมที่เหมาะสมสำหรับการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำกลั่นในภาชนะแก้วคือรัศมี 9 มิลลิเมตร โดยสายอากาศแพทช์แบบวงกลมรัศมี 9 มิลลิเมตรจะมีขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นจากผิวของแพทช์เท่ากับ 40 มิลลิเมตร ที่ระดับขนาดกำลังงานต่ำสุดเท่ากับ -40 dB ดังนั้นสายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดเล็ก (Miniaturized circular patch antenna) จึงถูกสร้างขึ้นเพื่อให้มีขนาดเล็กจากสายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดดั้งเดิม 53% และสามารถตอบสนองได้ที่ 2 ความถี่ คือ 2.4 และ 5.8 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยสายอากาศแบบนี้ได้นำมาใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางที่ความเข้มข้น 20-60 เปอร์เซ็นต์ ผลการวัดที่ได้สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ให้ผลการทำนายเนื้อยางแห้งคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.89 เปอร์เซ็นต์

Thesis Title	A Study of Dielectric Properties Measurement of Rubber Latex in a Glass Container Using a 2.4 and 5.8 GHz Dual-band Antenna.
Author	Mr. Veerayot Kondee
Major Program	Electrical Engineering
Academic Year	2017

ABSTRACT

This research is a study of dielectric properties measurement of rubber latex with non-contact method. This method uses a technique to measure the reflection coefficient of the reflected wave from the rubber latex with a circular patch antenna sensor. The design of a circular patch antenna was achieved by calculating the power distribution region of the circular patch antenna in a 100 ml distilled water glass container with COMSOL multiphysics program. From the result, it was found that the circular patch antenna of radius 9 millimeters was suitable for measuring the dielectric properties of distilled water in the glass container. The 9 millimeters radius patch antenna had the power distribution region of 40 mm from the patch surface at the normalized power of -40 dB. A miniaturized circular patch antenna was constructed in a smaller size from conventional circular patch antennas to 53% and could respond at 2 frequencies of 2.45 and 5.8 GHz. The antenna was used to measure the reflection coefficient of the rubber latex with 20-60% concentration. From the results, the measured data were analyzed and explained with mathematical models. The relationship between dry rubber content percentage and reflection coefficient were evaluated by showing 1.89 % error.

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับการดำเนินการวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัย

ขอแสดงคำขอบพระคุณ ดร.ไพโรจน์ วุ่นชุม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำงาน แนวคิดและการแก้ปัญหาให้การทำงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งการตรวจและแก้ไขเนื้อหาวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มิตรชัย จงเชียวชำนาญ ดร.วฤทธิ์ วิชกุล ผศ.ดร. ระวีพรหมหลวงศรี และ ผศ.ดร.สุตเขตต์ นาเคเสถียร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลามาร่วมเข้าฟังการสอบปกป้องวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์และบุคลากร ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำงานวิทยานิพนธ์ให้แล้วเสร็จและลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนการศึกษาระดับปริญญาโท และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2559

ขอขอบพระคุณ คุณสหพงศ์ สมวงศ์, คุณตั๋ย บัณฑิตศักดิ์ และคุณสลักจิตร นิลบวร ที่คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลือเสมอมา

ขอขอบพระคุณ เพื่อนๆ และนักศึกษาปริญญาโท ที่คอยให้คำแนะนำและกำลังใจในการทำงานวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนข้าพเจ้าเป็นอย่างดีเสมอมา

วีระยศ คนดี

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อ(ภาษาไทย).....	(5)
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ)	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(10)
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 โจทย์วิจัย	5
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	6
1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	7
1.7 ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์.....	8
1.8 แผนการดำเนินงาน	8
1.9 โครงสร้างของรายงานวิทยานิพนธ์.....	9
2. ทบทวนวรรณกรรม	
2.1 บทนำ.....	10
2.2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.2.1 ทฤษฎีการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟ.....	10
2.2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับคุณสมบัติของน้ำยาง	13
2.2.3 การหาปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยาง	15
2.2.4 ทฤษฎีการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นไมโครเวฟ	20
2.2.5 เทคนิคการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยไมโครเวฟ	20
2.2.6 ทฤษฎีการออกแบบสายอากาศแพทช์.....	25
2.2.7 การถอดถอยแบบพหุนาม	27

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
3. การจำลองและการออกแบบสายอากาศ	
3.1 การจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิด.....	34
3.2 การจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลม	45
3.3 การออกแบบสายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดเล็ก	51
3.4 การจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP เมื่อวางใต้ภาชนะ แก้วบรรจุน้ำกลั่น	57
3.5 การจำลองเพื่อตรวจสอบขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่น	62
3.6 ผลการสร้างสายอากาศ MCP (Miniaturize Circular Patch antenna)	63
4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลอง	
4.1 ผลการเจือจางน้ำยางขึ้นแต่ละความเข้มข้น	69
4.2 การวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งของน้ำยางขึ้นที่เจือจางด้วยวิธีมาตรฐาน	71
4.3 ผลการใช้โพรบมาตรฐาน Agilent Probe Kits ในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ...	74
4.4 ผลการออกแบบโมเดลและวิเคราะห์ระยะความสูงของภาชนะแก้ว	82
4.5 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางขึ้นแต่ละความเข้มข้น	93
4.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งกับ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน	96
4.7 การทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนของสมการ	98
5. สรุปผลการทดลอง	
5.1 เนื้อหาโดยสรุป	103
5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย	104
6. บรรณานุกรม	105
7. ประวัติผู้เขียน	107

รายการรูป

รูปที่	หน้า
1.1 มูลค่าสินค้าส่งออกของประเทศไทย	1
1.2 ผลผลิตยางธรรมชาติของประเทศไทย	2
2.1 การสะท้อนและการส่งผ่านเมื่อคลื่นตกกระทบบนตึกกรวยต่อของตัวกลางสองชนิด .	11
2.2 คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นไมโครเวฟหลายรอยต่อ	12
2.3 การชั่งน้ำหนักตัวอย่างน้ำยางสด	15
2.4 การอบแผ่นยางอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.....	16
2.5 เครื่องเมโทรเล็กที่ใช้วัดค่าความถ่วงจำเพาะ	17
2.6 การวัดปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางสดด้วยเมโทรเล็ก	18
2.7 เทคนิคอวกาศว่างโดยที่สายอากาศต่อกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย.....	21
2.8 เทคนิคสายส่งโดยการวางวัสดุไว้ภายในสายส่งและท่อนำคลื่น	22
2.9 เทคนิคโพรงเรโซแนนซ์และการเลื่อนความถี่เรโซแนนซ์	22
2.10 เทคนิคโพรงปลายเปิดในการใช้วัสดุที่เป็นของแข็งและของเหลว.....	23
2.11 โครงสร้างของสายอากาศแพทช์	25
2.12 การถอดอยแบบพหุนามโดยการประดิษฐ์ฟังก์ชันของพหุนามจากชุดข้อมูล	27
2.13 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ 0.2-20 GHz	29
2.14 ค่าตัวประกอบการสูญเสียเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ 0.2-20 GHz.....	29
2.15 โครงสร้างแสดงระบบการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งด้วยเซนเซอร์โพรงปลายเปิด...	31
3.1 รูปแบบการจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรงปลายเปิด.....	35
3.2 รูปแบบการจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรงปลายเปิดด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics	35
3.3 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่น P_{dist} ของโพรงปลายเปิดเมื่อสัมผัสกับน้ำกลั่น	36
3.4 โครงสร้างของโพรงปลายเปิด	37
3.5 การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกโดยใช้โพรงปลายเปิดด้วยเทคนิคการวัดแบบไม่สัมผัสกับวัสดุ.....	38
3.6 โมเดลจำลองโพรงปลายเปิดชนิด SMA และ N-type ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics	39

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7	ปรากฏการณ์ Fringing field 39
3.8	ขอบเขตการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าในทิศ E_p , E_z และ P_{dist} ของโพรบชนิด SMA ในตัวกลางที่เป็นอากาศ 40
3.8	ขอบเขตการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าในทิศ E_p , E_z และ P_{dist} ของโพรบชนิด N-type ในตัวกลางที่เป็นอากาศ 40
3.10	โมเดลจำลองโพรบปลายเปิดชนิด SMA และ N-type วางอยู่ใต้ภาชนะแก้วบรรจุน้ำ กลั่นด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics 41
3.11	การกระจายสนามไฟฟ้าของโพรบชนิด SMA ผ่านภาชนะแก้วหนา 1 มิลลิเมตร สู่น้ำกลั่นในทิศทาง E_p , E_z และ P_{dist} 42
3.12	การกระจายสนามไฟฟ้าของโพรบชนิด N-type ผ่านภาชนะแก้วหนา 1 มิลลิเมตร สู่น้ำกลั่นในทิศทาง E_p , E_z และ P_{dist} 43
3.13	ความสัมพันธ์ของระยะการแผ่กระจายกำลังคลื่นจากภาชนะแก้ว 1.0 1.8 และ 2.0 มิลลิเมตร สู่น้ำกลั่น 44
3.14	การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกโดยใช้สายอากาศแพทช์แบบวงกลม 46
3.15	โมเดลจำลองสายอากาศแพทช์แบบวงกลมวางอยู่ใต้ภาชนะแก้วด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics 47
3.16	ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมที่มีรัศมีเป็น 17 มิลลิเมตร 48
3.17	ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมที่มีรัศมีเป็น 13 มิลลิเมตร 48
3.18	ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมที่มีรัศมีเป็น 9 มิลลิเมตร 49
3.19	ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมที่มีรัศมีเป็น 4 มิลลิเมตร 49
3.20	โครงสร้างของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดเล็ก (MCP antenna) 51
3.21	โครงสร้างของสายอากาศ MCP จากการจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL 51

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.22 การจำลองสายอากาศ MCP เมื่อวางอยู่ใต้ภาชนะแก้วเปล่าด้วยโปรแกรม COMSOL multiphysics	52
3.23 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP เมื่อวางอยู่ในอากาศและวางอยู่ ใต้ภาชนะแก้วเปล่า.....	53
3.24 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรัศมี.....	54
3.25 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP เมื่อเปลี่ยนแปลงความยาว ของโหนดแบบร่อง (ความยาวของ L) เป็น 7, 8.5, 10, 11.5 และ 13 มิลลิเมตร	55
3.26 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศMCPเมื่อเปลี่ยนแปลงจุดลัดวงจรที่ 1	56
3.27 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศMCPเมื่อเปลี่ยนแปลงจุดลัดวงจรที่ 2	56
3.28 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP ผ่านภาชนะแก้วบรรจุ น้ำกลั่น	57
3.29 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศMCPผ่านภาชนะแก้วบรรจุ น้ำยางข้นความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์.....	58
3.30 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศMCPผ่านภาชนะแก้วบรรจุ น้ำยางข้นความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์.....	58
3.31 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศMCPผ่านภาชนะแก้วบรรจุ น้ำยางข้น ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์.....	59
3.32 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศMCPผ่านภาชนะแก้วบรรจุ น้ำยางข้นความเข้มข้น 35 เปอร์เซ็นต์.....	59
3.33 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศMCPผ่านภาชนะแก้วบรรจุ น้ำยางข้นความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์.....	60
3.34 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศMCPผ่านภาชนะแก้วบรรจุ น้ำยางข้นความเข้มข้น 45 เปอร์เซ็นต์.....	60
3.35 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศMCPผ่านภาชนะแก้วบรรจุ น้ำยางข้นความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์.....	61

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.36 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศMCPผ่านภาชนะแก้วบรรจุ น้ำยางข้นความเข้มข้น 55 เปอร์เซ็นต์.....	61
3.37 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศMCPผ่านภาชนะแก้วบรรจุ น้ำยางข้นความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์.....	62
3.38 ผลการเปรียบเทียบระยะขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP กับ โพรบชนิด N-type และ SMA.....	63
3.39 การทดสอบใส่แผ่นเหล็กเพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขอบเขตการแผ่กระจาย กำลังคลื่นผ่านภาชนะแก้วบรรจุอากาศ.....	64
3.40 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อใส่แผ่นเหล็กเข้าไปในแก้วระยะ 10, 20 และ 30 เซนติเมตร.....	64
3.41 สายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดเล็ก (MCP antenna).....	65
3.42 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP.....	66
3.43 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP เมื่ออยู่ในอากาศ.....	67
3.44 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP เมื่อวางใต้ภาชนะแก้ว ขนาด 100 มิลลิลิตร.....	68
3.45 โมเดลสายอากาศ MCP เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยาง.....	67
4.1 การเจือจางน้ำยางข้นด้วยน้ำกลั่นขนาด 200 มิลลิลิตร.....	70
4.2 การเตรียมภาชนะสำหรับใส่น้ำยางข้น.....	71
4.3 เครื่องชั่งน้ำหนักของการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง.....	71
4.4 การจับตัวของน้ำยางด้วยกรดแอซิดิกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์.....	72
4.5 การรีดยางแผ่น.....	72
4.6. การอบไล่ความชื้นแผ่นยาง.....	72
4.7 การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางข้นด้วยโพรบปลายเปิดแบบมาตรฐาน.....	74
4.8 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นที่ความถี่ 1-6 GHz.....	75
4.9 ค่าตัวประกอบการสูญเสียของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นที่ความถี่ 1-6 GHz.....	75

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นจากผลการวัดเทียบกับสมการ ที่ 4.3 ความถี่ 2.45 GHz.....	76
4.11 ค่าตัวประกอบการสูญเสียของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นจากผลการวัดเทียบกับสมการที่ 4.4 ความถี่ 2.45 GHz	76
4.12 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นจากผลการวัดเทียบกับสมการ ที่ 4.5 ความถี่ 5.8 GHz	77
4.13 ตัวประกอบการสูญเสียของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นจากผลการวัดเทียบกับสมการที่ 4.6 ความถี่ 5.8 GHz	78
4.14 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 25°-35° ที่ความถี่ 2.45 GHz	79
4.15 ค่าตัวประกอบการสูญเสียของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 25° - 35° ที่ความถี่ 2.45 GHz	79
4.16 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 25°-35° ที่ความถี่ 5.8 GHz	80
4.17 ค่าตัวประกอบการสูญเสียของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 25° - 35° ที่ความถี่ 5.8 GHz	80
4.18 การจำลองโมเดลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางแต่ละความเข้มข้น ด้วยโปรแกรม COMSOL multiphysics	82
4.19 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างสายอากาศกับภาชนะ แก้วบรรจุน้ำกลั่นที่ความถี่ 2.45 GHz.....	83
4.20 ค่าเฟสเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่นที่ ความถี่ 2.45 GHz	83
4.21 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างสายอากาศกับภาชนะ แก้วบรรจุน้ำกลั่นที่ความถี่ 5.8 GHz.....	84

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ค่าเฟสเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่นที่ ความถี่ 5.8 GHz	84
4.23 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่าง ระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 0 mm ความถี่ 2-3 GHz.....	85
4.24 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่าง ระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 5 mm ความถี่ 2-3 GHz.....	86
4.25 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่าง ระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 10 mm ความถี่ 2-3 GHz.....	86
4.26 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่าง ระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 15 mm ความถี่ 2-3 GHz.....	87
4.27 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่าง ระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 20 mm ความถี่ 2-3 GHz.....	87
4.28 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่าง ระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 0 mm ความถี่ 5.4-6 GHz.....	88
4.29 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่าง ระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 5 mm ความถี่ 5.4-6 GHz.....	88
4.30 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่าง ระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 10 mm ความถี่ 5.4-6 GHz.....	89
4.31 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่าง ระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 15 mm ความถี่ 5.4-6 GHz.....	89
4.32 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่าง ระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 20 mm ความถี่ 5.4-6 GHz.....	90
4.33 โมเดลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้ำกลั่นเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่าง ระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้ว.....	91

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างสายอากาศ กับภาชนะแก้วที่ความถี่ 2.4-2.6 GHz.....	92
4.35 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างสายอากาศ กับภาชนะแก้วที่ความถี่ 5.8-6.2 GHz.....	92
4.36 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางชั้นด้วยสายอากาศ MCP	93
4.37 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางแต่ %DRC ที่ความถี่ 2-3 GHz	94
4.38 ค่าเฟสของน้ำยางแต่ละ %DRC ที่ความถี่ 2-3 GHz.....	94
4.39 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางแต่ %DRC ที่ความถี่ 5-6 GHz	95
4.40 ค่าเฟสของน้ำยางแต่ละ %DRC ที่ความถี่ 5-6 GHz.....	95
4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับค่า %DRC จากผลการวัด และผลการจำลองที่ความถี่ 2.5 GHz	96
4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับค่า %DRC จากผลการวัด และผลการจำลองที่ความถี่ 6 GHz	97
4.43 น้ำยางสดจากจุกูรับซื้อจากเกษตรกรรายย่อยจำนวน 30 ตัวอย่าง	98
4.44 เปรียบเทียบผลการทำนายค่า %DRC ที่ความถี่ 2.5 GHz (สมการที่ 4.5) จำนวน 3 ซ้ำ เทียบกับค่าที่ได้จากการวัดด้วยวิธีแบบมาตรฐาน	99
4.45 เปรียบเทียบผลการทำนายค่า %DRC ที่ความถี่ 6 GHz (สมการที่ 4.6) จำนวน 3 ซ้ำ เทียบกับค่าที่ได้จากการวัดด้วยวิธีแบบมาตรฐาน	99
4.46 ผลการทำนายเปอร์เซ็นต์น้ำยางที่ความถี่ 2.5 และ 6 GHz เทียบกับผลการวัด เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งด้วยวิธีมาตรฐาน	100
4.47 ผลการทำนายเปอร์เซ็นต์น้ำยางรวม 2 ความถี่เทียบกับผลการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยาง แห้งด้วยวิธีมาตรฐาน	101
4.47 ผลการแปลงค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	102
4.48 ผลการแปลงค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งเป็นค่าตัวประกอบการสูญเสีย	102

รายการตาราง

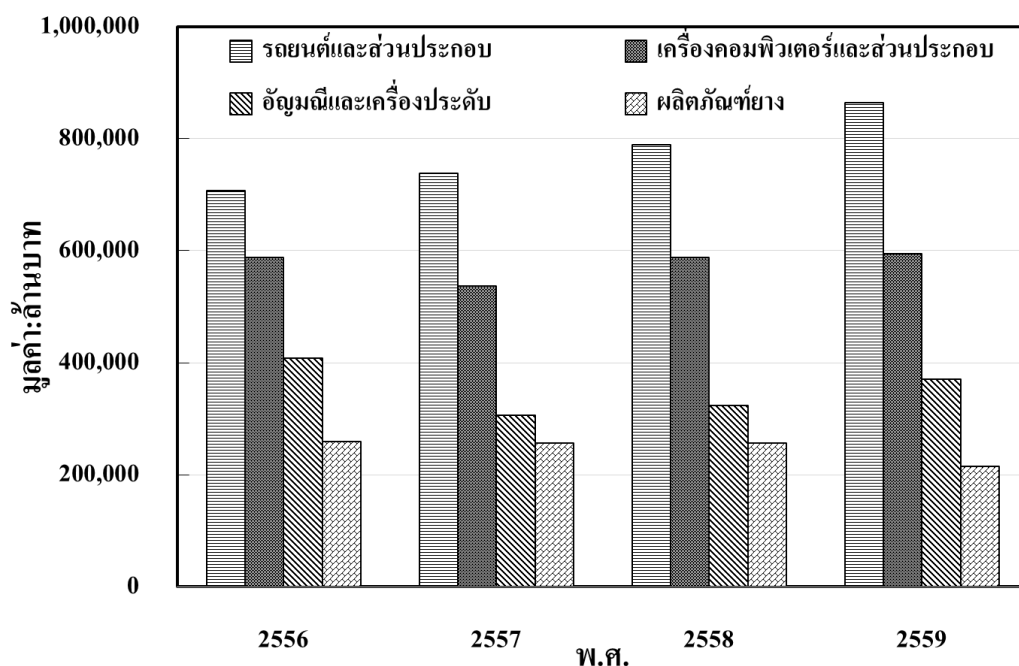
ตาราง	หน้า
1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง	3
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งกับค่าความถ่วงจำเพาะ	18
2.2 การเปรียบเทียบเทคนิคการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก	24
3.1 พารามิเตอร์ของโพรบปลายเปิด	37
3.2 พารามิเตอร์ของวัสดุที่ใช้ในการจำลอง	38
3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองขอบเขตการแผ่กระจายสนามไฟฟ้า	46
3.4 ความถี่ที่สายอากาศ MCP เรโซแนนซ์เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและ ผลการวัด	68
4.1 ปริมาณการเจือจางน้ำยางชั้นกับน้ำกลั่น	70
4.2 ผลการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งของการเจือจางน้ำยางชั้นแต่ละความเข้มข้น	73
4.3 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางชั้นแต่ละความเข้มข้นที่ความถี่ 2.45 GHz	81
4.4 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางชั้นแต่ละความเข้มข้นที่ความถี่ 5.8 GHz	81
4.5 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางแต่ละความเข้มข้น	90

บทที่ 1

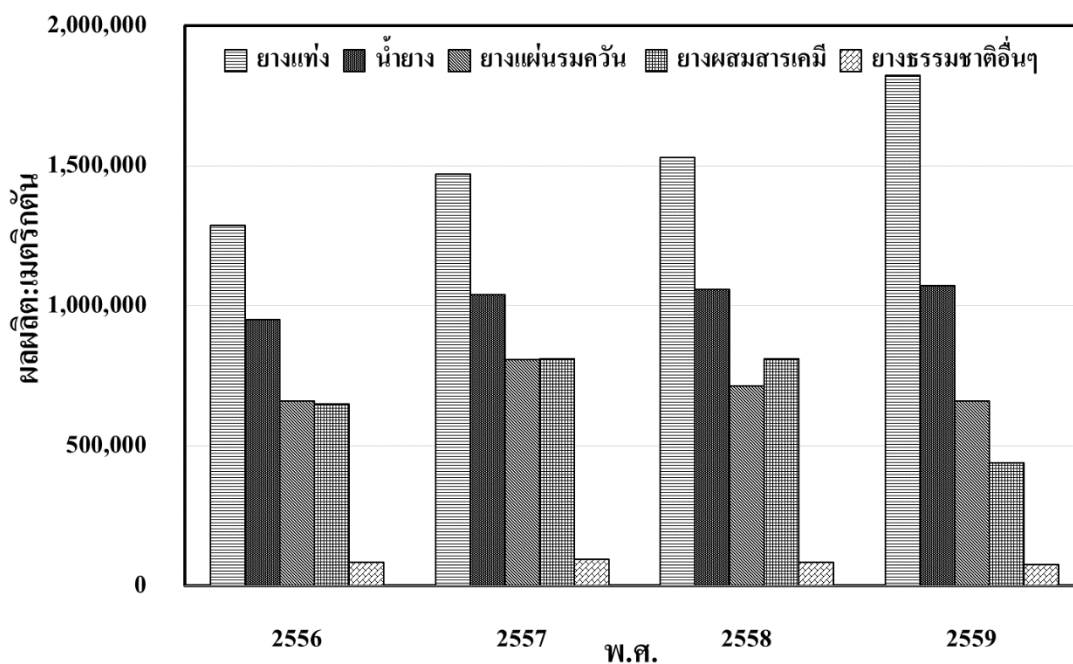
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สร้างรายได้ สร้างงานให้กับประเทศเป็นจำนวนมาก จากข้อมูลปริมาณการผลิตสินค้าส่งออกของประเทศไทย พบว่ายางพาราเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญลำดับต้นๆของประเทศไทย โดยมีมูลค่าการส่งออกในปี 2559 ประมาณ 215,346 ล้านบาท [1] แสดงตามรูปที่ 1.1 จากข้อมูลของสมาคมยางพาราไทย พบว่าประเทศไทยมีผลผลิตยางธรรมชาติเป็นอันดับ 1 ของโลก โดยผลิตได้มากกว่า 4.7 ล้านตัน ซึ่งผลผลิตยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกเป็นประเภทได้ ดังนี้คือ ยางแผ่นรมควัน (Rubber Smoke Sheet) ยางแท่ง (Standard Thailand Rubber) น้ำยางข้น (Concentrated Latex) และยางผสมสารเคมี (Compound Rubber) [2] ในปัจจุบันเกษตรกรมีแนวโน้มซื้อขายน้ำยางสดเพิ่มมากขึ้น โดยในปี 2559 น้ำยางขข้นมีปริมาณการส่งออกถึง 1,072,709 ตัน ดังแสดงตามรูปที่ 1.2 เนื่องจากการซื้อขายน้ำยางสดจะช่วยลดกระบวนการผลิต ประหยัดเวลา ประหยัดต้นทุน และลดการทำงานของเกษตรกร เป็นต้น ในกระบวนการซื้อขายน้ำยางสดจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งที่มีอยู่ในน้ำยางสด ซึ่งเรียกว่า “เปอร์เซ็นต์ยางแห้ง” (% Dry rubber content : %DRC)



รูปที่ 1.1 มูลค่าสินค้าส่งออกของประเทศไทย



รูปที่ 1.2 ผลผลิตยางธรรมชาติของประเทศไทย

น้ำยางสด จะมีส่วนประกอบที่เป็นเนื้อยางแห้งประมาณ 25-45 % ส่วนที่เป็นน้ำประมาณ 50-80 % และสารประกอบอื่นๆอีกประมาณ 2-5 % ซึ่งวิธีการวัดเปอร์เซ็นต์ยางแห้งที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีดังนี้คือ (1) วิธีการวัดปริมาณเนื้อยางแห้งเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำยางสด [3] ซึ่งการวัดด้วยวิธีนี้เป็นการวัดเนื้อยางแห้งภายในห้องปฏิบัติการมาตรฐาน ISO 126:1995 และ ISO 124:1997 โดยเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งจะคิดจากน้ำหนักก่อนการอบและน้ำหนักหลังการอบ ซึ่งวิธีการวัดจะมีรายละเอียดขั้นตอนดังนี้คือ ชั่งน้ำหนักน้ำยางสดให้ได้น้ำหนัก 10 กรัม จากนั้นนำน้ำยางสดที่ได้ไปจับตัวกันด้วยกรดอะซิติกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อน้ำยางจับตัวดีแล้วจากนั้นนำไปรีดให้มีความหนาไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ล้างด้วยน้ำให้สะอาด 2-3 ครั้ง นำแผ่นยางอบให้แห้งในตู้อบอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสประมาณ 16 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถแก้วสุญญากาศที่มีสารดูดความชื้นประมาณ 15 นาที นำตัวอย่างยางแห้งมาชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ยางแห้งเป็นต้น ข้อดีของการวัดด้วยวิธีนี้คือ มีความแม่นยำในการวัดสูง แต่กระบวนการวัดจะต้องใช้เวลาอย่างน้อย 17 ชั่วโมง วิธีนี้จึงไม่เหมาะสมกับการซื้อขายน้ำยางสดในเกษตรกรรายย่อย วิธีที่ (2) การวัดค่าความหนาแน่นของน้ำยางหรือการวัดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำยาง วิธีนี้จะใช้การวัดโดยอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่า เมโทรแล็ก (Metrolac) [4] โครงสร้างของเมโทรแล็กจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นกระเปาะและส่วนก้าน วิธีการวัดด้วยวิธีนี้จะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างระดับลูกลอยที่ลอยอยู่ในน้ำยางสดกับปริมาณน้ำยางขึ้น กล่าวคือปริมาณเนื้อยางสดจะแปรผกผันกับระดับของ

ลูกลอย การวัดด้วยเมโทรแล็กจะมีรายละเอียดขั้นตอนการวัดดังนี้คือ นำน้ำยางสด 1 ส่วน ผสมกับน้ำ 2 ส่วน เทลงในกระบอกตวง (Cylinder) ค่อยๆจุ่มก้านเมโทรแล็กลงไปจนระดับของลูกลอยหยุดนิ่งทำการอ่านค่าที่ได้ จากนั้นนำค่าความถ่วงจำเพาะที่ได้มาหาเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งโดยใช้ความสัมพันธ์ดังแสดงในตารางที่ 1.1 ทำการวัดซ้ำและหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ค่าการวัดที่ได้มีความถูกต้องมากที่สุด การวัดด้วยวิธีนี้นิยมใช้ในการซื้อขายน้ำยางสดในเกษตรกรรายย่อย เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว และสามารถประเมินราคาให้แก่เกษตรกรรายย่อยได้ทันที แต่การวัดด้วยวิธีนี้ยังมีข้อด้อยคือ มีความคลาดเคลื่อนสูง [5] จึงไม่เหมาะสมสำหรับการซื้อขายน้ำยางสดที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำ แต่วิธีนี้จะเหมาะสำหรับใช้งานในโรงงานแปรรูปน้ำยางเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำยางเท่านั้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการวัดที่ได้จากเมโทรแล็กกับมาตรฐานการวัดในห้องปฏิบัติการพบว่า มีความถูกต้องประมาณ 35-45 เปอร์เซ็นต์ [6] นอกจากนี้ผู้รับซื้อน้ำยางสดในบริเวณจตุรวมใกล้กับสวนยางพาราได้ใช้วิธีการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งโดยการอบด้วยเตาไมโครเวฟ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีการวัดที่ดัดแปลงมาจากวิธีมาตรฐาน กล่าวคือการวัดด้วยวิธีนี้จะชั่งน้ำหนักน้ำยางสดให้ได้ 10 กรัม จากนั้นนำไปอบด้วยเตาไมโครเวฟประมาณ 3 นาที และเปรียบเทียบน้ำหนักระหว่างก่อนการอบและการหลังอบเพื่อนำค่าน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์เนื้อยางในน้ำยางสด การวัดด้วยวิธีนี้เป็นวิธีการวัดที่ให้ผลการวัดที่รวดเร็ว สามารถใช้คำนวณเงินให้กับเกษตรกรได้ทันที แต่ผลการวัดที่ได้ยังมีความคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากการใช้เตาไมโครเวฟในการอบจะเป็นการสันโมเลกุลของน้ำทำให้เกิดการกระเด็นของน้ำยางได้ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่วัดได้จะแปรผันตรงกับปริมาณน้ำที่ผสมในน้ำยาง กล่าวคือหากน้ำยางสดมีน้ำผสมอยู่มากจะทำให้ผลการวัดที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูง เป็นต้น

ตารางที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง

ความถ่วงจำเพาะ	เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง
0.988	28
0.986	30
0.983	32
0.981	34
0.979	36
0.976	38
0.974	40

จากการทบทวนวรรณกรรม [บทที่ 2] พบว่าได้มีงานวิจัยของ K. Khalid และคณะ [7] ได้เสนอวิธีการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ซึ่งวิธีการวัดจะใช้โพรบปลายเปิดแบบโคแอกเซียล (HP 85070B) ร่วมกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สะท้อน (Reflection coefficient) และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient) เพื่อนำค่าที่ได้ไปหาคุณสมบัติสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative dielectric permittivity) และตัวประกอบการสูญเสีย (Dielectric loss factor) ทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งด้วยทฤษฎีค่าสภาพยอมไฟฟ้าผสม (Dielectric mixture theory) จากงานวิจัย [5] ดังกล่าวพบว่าตัวแปรอุณหภูมิและความถี่ที่ใช้มีผลต่อค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์และค่าตัวประกอบการสูญเสีย ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าแตกต่างกันชัดเจนที่ความถี่ต่ำ และค่าตัวประกอบการสูญเสียจะมีค่าแตกต่างกันชัดเจนที่ความถี่สูง กล่าวคือที่ความถี่ต่ำกว่า 5 GHz มีความเหมาะสมสำหรับวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและที่ความถี่สูงกว่า 5 GHz เหมาะสำหรับวัดค่าตัวประกอบการสูญเสียของน้ำยางขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงความถี่ 2 GHz น้ำยางจะมีการจัดเรียงเชิงขั้ว (Dipole orientation) ที่ชัดเจนจึงเป็นความถี่ที่เหมาะสมการใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสดได้ เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งโดยใช้สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมจำนวน 4 ตัว [8] ทำหน้าที่รับส่งคลื่นไมโครเวฟ สายอากาศไมโครสตริปถูกออกแบบให้สามารถใช้งานได้ในช่วงย่านความถี่ X คือ 8.48 GHz และ 10.69 GHz ผลจากการวิจัยพบว่า ระบบสามารถจำแนกน้ำยางสดแต่ละความเข้มข้นได้ แต่การใช้คลื่นความถี่สูงและใช้สายอากาศถึง 4 ตัว ทำให้เพิ่มต้นทุนในการสร้างชิ้นงาน และต่อมาในปี ค.ศ. 2008 ธานี สมวงศ์ และคณะ [9] ได้นำเสนอการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งโดยใช้หลักการการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ของน้ำยาง ซึ่งได้ทำการออกแบบวงจรเรโซเนเตอร์ เพื่อนำมาใช้หาค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปน้ำยาง ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าความถี่เรโซแนนซ์ของน้ำยางมีความสัมพันธ์กับปริมาณเนื้อยางแห้ง แต่งานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้พิจารณาผลของอุณหภูมิซึ่งเป็นปัจจัยต่อการวัดค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง ต่อมาในปี ค.ศ. 2012 ได้มีงานวิจัยของ Sakol และ Mitchai [10] สร้างเครื่องวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสดโดยใช้หลักการโพรบปลายเปิด (Open-Ended coaxial probe) ร่วมกับการทำงานของวงจรหาค่าสำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและพิจารณาค่าอุณหภูมิร่วมด้วย ระบบที่ใช้ได้ถูกออกแบบให้ใช้งานที่ความถี่ 2.5 GHz ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถนำไปใช้ในการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสดได้จริง แต่การวัดของเหลวโดยใช้โพรบโคแอกเซียลแบบปลายเปิดนั้น โพรบที่ใช้จะต้องจุ่มลงไปบนของเหลวโดยตรง ซึ่งจะส่งผลให้โพรบเกิดการชำรุด และวัสดุตัวอย่างสามารถเคลื่อนบริเวณโพรบก่อให้เกิดความผิดพลาดในผลการวัดได้

จากที่มาและความสำคัญของงานวิจัย ดังอธิบายในข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการวัดคุณสมบัติไดโพลีกริกของน้ำยางชั้น โดยใช้สายอากาศเพียงอันเดียวที่ออกแบบให้สามารถใช้งานได้ 2 ความถี่ คือที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.8 GHz งานวิจัยนี้ยังได้จำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศที่ออกแบบ จากนั้นสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเพื่อใช้ในการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้วิเคราะห์ค่าของอุณหภูมิร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางชั้นแต่ละความเข้มข้น เพื่อให้ผลการวัดที่ได้มีความถูกต้องมากที่สุด ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเป็นงานวิจัยที่นำเสนอการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางชั้นด้วยคลื่นไมโครเวฟด้วยวิธีแบบไม่สัมผัสกับน้ำยางโดยตรง ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้

1.2 วัตถุประสงค์วิจัย

1. สามารถประยุกต์ใช้คุณสมบัติการสะท้อนหรือการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการวัดคุณสมบัติไดโพลีกริกของน้ำยางชั้นได้ โดยเทคนิคที่ใช้เช่น เซอร์จจะไม่สัมผัสกับน้ำยางโดยตรงหรือเป็นการวัดผ่านภาชนะบรรจุน้ำยาง
2. สามารถออกแบบสายอากาศเพียงตัวเดียวให้สามารถใช้งานได้สองความถี่เพื่อประยุกต์ใช้ในการวัดคุณสมบัติไดโพลีกริกของน้ำยางชั้นได้

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนาระบบการวัดคุณสมบัติไดโพลีกริกของน้ำยางชั้น โดยวิธีการวัดไม่ต้องสัมผัสกับวัสดุโดยตรง
2. เพื่อศึกษาและจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดผ่านภาชนะเปรียบเทียบกับขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ
3. ออกแบบสายอากาศให้สามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.8 GHz เพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้ในการวัดคุณสมบัติไดโพลีกริกแบบไม่สัมผัส
4. เพื่อสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าคุณสมบัติไดโพลีกริกในน้ำยางชั้นได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. กระบวนการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางชั้นที่เป็นวิธีการวัดแบบไม่สัมผัสกับวัสดุ โดยตรงส่งผลให้เพิ่มอายุการใช้งานของอุปกรณ์ตัวเซ็นเซอร์ ไม่ยุ่งยากในการทำความสะดวก และให้ผลการวัดมีความแม่นยำสูงขึ้นได้
2. สามารถออกแบบสายอากาศให้มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยวิธีแบบไม่สัมผัสได้ โดยพิจารณาจากความถี่เรโซแนนซ์และขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่น
3. โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งของน้ำยางชั้น และโมเดลทำนายค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางชั้นได้

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1. ดำเนินการวิจัยตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยในหัวข้อที่ 1.3
2. ศึกษาวิธีการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งเทคนิคการวัดจะประกอบไปด้วย เทคนิคท่อนำคลื่น (Wave guided), เทคนิคโพรงท่อนำคลื่น (Filled cavity), เทคนิคแบบช่องเปิด (Slotted line), เทคนิคอวกาศว่าง (Free space) และเทคนิคโพรบปลายเปิด (Open ended probe) เป็นต้น
3. จำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดและสายอากาศแพทช์ โดยใช้โปรแกรม COMSOL multiphysics ซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองสนามไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธี finite element method (FEM)
4. น้ำยางชั้นที่ใช้ในกระบวนการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งจะมีความเข้มข้น 20-60 เปอร์เซ็นต์ โดยงานวิจัยนี้ได้นำน้ำยางชั้น 60 เปอร์เซ็นต์เจือจางความเข้มข้นเป็น 55, 50, 45, 40, 35, 30, 25 และ 20 เปอร์เซ็นต์
5. ใช้โพรบมาตรฐาน (Dielectric probe kit) ของ Agilent 85070E ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งกับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ที่ความถี่ 2.45 และ 5.8 GHz
6. พิจารณาอุณหภูมิของน้ำยางชั้นตั้งแต่ 25-35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิของน้ำยางสดที่ซื้อขายกันในท้องตลาด โดยจะใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ แบบอินฟราเรด
7. การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Vector Network Analyzer) เนื่องจากมีมาตรฐาน และให้ความแม่นยำในการวัดสูง

1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

1. ทบทวนวรรณกรรม (Literature review) ศึกษากระบวนการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นไมโครเวฟ ศึกษาความต้องการ และศึกษาช่องว่างของงานวิจัยในปัจจุบัน
2. ศึกษาตัวแปรที่สำคัญ และศึกษาแนวทางการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นไมโครเวฟ
3. จำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิด โดยจำลองสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL multiphysics ซึ่งการจำลองถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดในตัวกลางที่เป็นอากาศ และขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นเมื่อโพรบวางอยู่ใต้ภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่น
4. จำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์ที่ความถี่ 2.45 GHz , 5.8 GHz โดยการจำลองสนามไฟฟ้าเมื่อสายอากาศแพทช์วางอยู่ใต้ภาชนะแก้วที่บรรจุอากาศ และสายอากาศแพทช์วางอยู่ใต้ภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่น
5. วิเคราะห์ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์เพื่อออกแบบสายอากาศให้มีความเหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้ในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางในภาชนะแก้ว
6. ออกแบบสายอากาศให้มีความเหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้ในการส่งคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ผ่านภาชนะแก้วที่บรรจุน้ำยาง
7. จำลองสายอากาศที่ได้ออกแบบ ปรับปรุง และสร้างสายอากาศที่ประยุกต์ใช้งานจริงได้
8. เจือจางน้ำยางชั้นความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์เป็น 55, 50, 45, 40, 35, 30, 25 และ 20 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบผลการเจือจางกับผลการวัดด้วยวิธีวัดในห้องปฏิบัติการมาตรฐาน ISO 124:1997
9. วัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นด้วยโพรบมาตรฐาน ของ Agilent 85070E สร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกกับค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง
10. วัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของน้ำยางชั้น วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากการทดลอง
11. ทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางชั้นด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย VNA วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับผลการจำลอง และสรุปผล
12. สรุปผลที่ได้และเขียนรายงานวิทยานิพนธ์

1.9 โครงสร้างของรายงานวิทยานิพนธ์

รายงานวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางที่อยู่
ในสถานะด้วยวิธีแบบไม่สัมผัส ซึ่งเนื้อหาจะมีทั้งหมดจำนวน 5 บท โดยในแต่ละบทมีรายละเอียด
สรุปได้ดังนี้คือ

บทที่ 1 บทนำ จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์
และขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ และได้กล่าวถึงเนื้อหาโดยสรุปของวิทยานิพนธ์ในแต่ละ
บท ตามที่ได้อธิบายรายละเอียดไว้ข้างต้น

บทที่ 2 กล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรม ซึ่งจะนำเสนอการสำรวจงานวิจัยที่
เกี่ยวข้องกับเทคนิคการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นไมโครเวฟ สรุปช่องว่างของงานวิจัยที่มี
ในปัจจุบัน และสรุปประเด็นวิจัยที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 แสดงการจำลองขอบเขตการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าของโพรบปลายเปิด
และสายอากาศแพทช์ โดยการจำลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ เซ็นเซอร์วางอยู่ใต้สถานะแก้วที่
วางเปล่า และส่วนที่เซ็นเซอร์วางอยู่ใต้สถานะแก้วบรรจุน้ำกลั่น ซึ่งในการจำลองจะใช้โปรแกรม
COMSOL multiphysics จำลองสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz

บทที่ 4 ออกแบบและจำลองสายอากาศแพทช์ให้มีความเหมาะสมในการ
ประยุกต์ใช้ในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก โดยพิจารณาจากสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกจากสายอากาศ
ผ่านสถานะแก้วไปยังน้ำกลั่น สร้างสายอากาศที่สามารถใช้งานได้ที่สองความถี่ การทดสอบ
สายอากาศ ปรับปรุงและสรุปผล แสดงการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางชั้นแต่ละความ
เข้มข้น นำเสนอค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 2-6 GHz ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิกับค่า
คุณสมบัติไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลง และโมเดลทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ และผลการวัด
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางแต่ละความเข้มข้น การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัด และการ
สร้างโมเดลแสดงความสัมพันธ์

บทที่ 5 เป็นการกล่าวสรุปผลการวิจัยทั้งหมด ข้อจำกัดของงานวิจัย และ
ข้อเสนอแนะแนวทางสำหรับการพัฒนาการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางด้วยวิธีแบบไม่
สัมผัสต่อไป

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

2.1 บทนำ

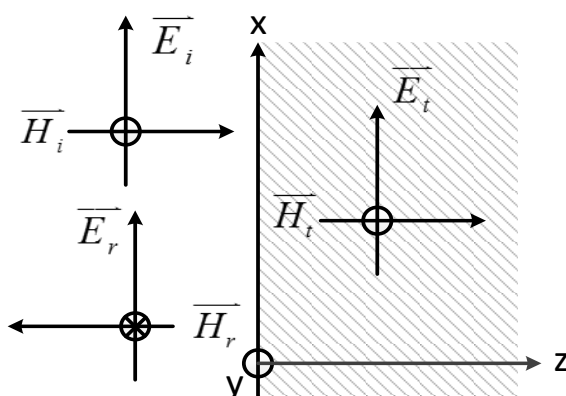
บทนี้จะกล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) ส่วนของทฤษฎีและหลักการ ซึ่งจะกล่าวถึงทฤษฎีดังต่อไปนี้ ทฤษฎีการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟและทฤษฎีการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ ทฤษฎีเกี่ยวกับคุณสมบัติของน้ำยางสด ทฤษฎีการหาปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางสด ทฤษฎีการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ ทฤษฎีการออกแบบสายอากาศแพทช์ ทฤษฎีการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial regression) และ 2) ส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นไมโครเวฟ ดังที่อธิบายไว้เบื้องต้นตามบทที่ 1 ในส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะประกอบไปด้วยงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุชนิดต่างๆ เช่น น้ำยาง ปาล์ม น้ำมัน และวัสดุอื่นๆ นอกจากนั้นยังได้นำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเครื่องมือวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง อีกด้วย

2.2 ทฤษฎีและหลักการ

2.2.1 ทฤษฎีการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟ [18]

คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) เป็นคลื่นวิทยุที่มีความถี่สูง โดยจะมีความถี่อยู่ระหว่าง 0.3 GHz ถึง 300 GHz ซึ่งคลื่นไมโครเวฟได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสาร เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟมีความถี่ที่สูงจึงสามารถส่งข้อมูลได้ในปริมาณที่มาก คลื่นไมโครเวฟมีความยาวคลื่นที่สั้นแต่อำนาจการทะลุทะลวงสูง และตอบสนองกับสิ่งรบกวนได้ดี จึงทำให้คลื่นไมโครเวฟยังถูกนำไปประยุกต์ใช้เพื่อวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ ได้อีกด้วย การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้นจะใช้ทฤษฎีในการวิเคราะห์การแพร่กระจายกำลังคลื่นผ่านตัวกลางต่างชนิด ซึ่งประกอบไปด้วย ทฤษฎีการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟ โดยสามารถกล่าวได้ดังนี้คือ เมื่อคลื่นไมโครเวฟแพร่กระจายไปในตัวกลางที่ถูกปิดกั้น หรือมีคุณสมบัติของตัวกลางที่แตกต่างกัน คลื่นไมโครเวฟจะเกิดการแพร่กระจายกำลังเข้าไปในวัสดุที่ปิดกั้น และคลื่นบางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ แสดงตามรูปที่ 2.1 ซึ่งคำสัมประสิทธิ์การสะท้อน

(Reflection coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient) ที่ได้จะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant: ϵ) และค่าความซึมซาบของสนามแม่เหล็ก (Permeability: μ) ของตัวกลางทั้งสองว่ามีค่ามากหรือน้อย ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟว่าจะมีค่ามากหรือมีค่าน้อยเช่นกัน



รูปที่ 2.1 การสะท้อนและการส่งผ่าน เมื่อคลื่นตกกระทบบนตึกกระทบตั้งฉากรอยต่อของตัวกลางสองชนิด

ถ้าสมมติให้ขนาดของสนามไฟฟ้าเป็น E_0 และมีทิศทางการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าไปตามแนวแกน Z โดยไม่มีการสูญเสียภายในตัวกลาง จะสามารถแสดงสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบบนรอยต่อด้วย \vec{E}_i สนามไฟฟ้าที่สะท้อนกลับ \vec{E}_r และสนามไฟฟ้าที่ส่งผ่าน \vec{E}_t แสดงในสมการที่ 2.1-2.3

$$\vec{E}_i = \hat{a}_x E_0 e^{-j\beta z} \quad (2.1)$$

$$\vec{E}_r = \hat{a}_x \Gamma E_0 e^{+j\beta z} \quad (2.2)$$

$$\vec{E}_t = \hat{a}_x T E_0 e^{-j\beta z} \quad (2.3)$$

โดยที่ β คือค่าคงที่เฟส (Phase constants), Γ เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient) และ T เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient) อาศัยเงื่อนไขขอบเขตที่สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีความต่อเนื่องบริเวณรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง จะได้ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับสัมประสิทธิ์การส่งผ่านดังนี้

$$1 + \Gamma = T \quad (2.4)$$

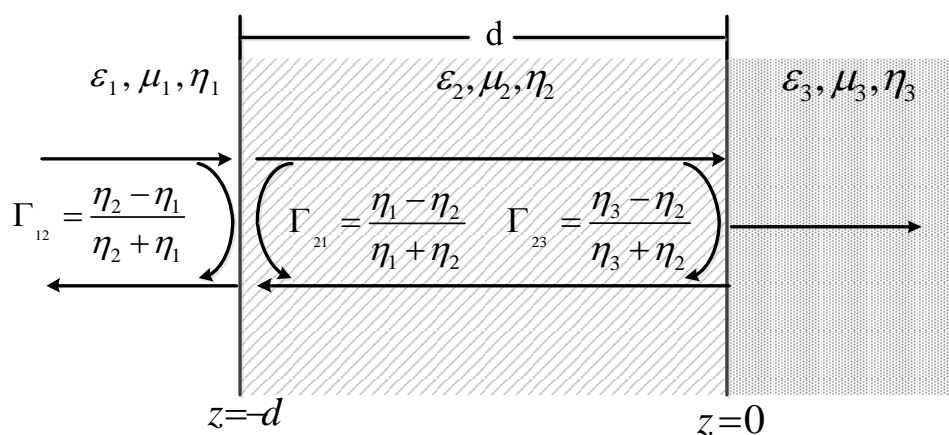
$$\frac{1}{\eta_1}(1 - \Gamma) = \frac{1}{\eta_2}T \quad (2.5)$$

โดยที่ η_1 และ η_2 เป็นอินทรีนลิตีคิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่หนึ่งและสองตามลำดับ เมื่อแก้สมการ 2.4 และ 2.5 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินทรีนลิตีคิมพีแดนซ์กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนตามสมการที่ 2.6

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (2.6)$$

เมื่อคลื่นไมโครเวฟเดินทางผ่านตัวกลางที่มากกว่า 2 ตัวกลางหรือมากกว่า 1 รอยต่อ คลื่นที่ทะลุผ่านรอยต่อแรกจะกลายเป็นคลื่นตกกระทบในรอยต่อที่ 2 และเมื่อเจอรอยต่อระหว่างตัวกลางจะเกิดการสะท้อนและส่งผ่านคลื่น ส่งผลให้คลื่นที่ส่งผ่านไปแล้วเกิดการสะท้อนกลับมาทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นเพิ่มขึ้น แสดงตามรูปที่ 2.2

$$\Gamma_{in}(z = -d^-) = \frac{\Gamma_{12} + \Gamma_{23}e^{-j2\beta d}}{1 + \Gamma_{12}\Gamma_{23}e^{-j2\beta d}} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติการแพร่กระจายของคลื่นไมโครเวฟหลายรอยต่อ

2.2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับคุณสมบัติของน้ำยางสด [19]

น้ำยางสด เป็น วัสดุพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีการกระจายตัวแบบคอลลอยด์ในตัวกลางที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ ยางถูกนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น ถุงมือยาง ยางล้อรถยนต์ และยางผสมสารเคมี เป็นต้น [19] ยางที่ใช้ในการแปรรูปจะได้อาจมาจากยางธรรมชาติ โดยในประเทศไทยส่วนใหญ่จะได้มาจากยางพารา (*Havea brasiliensis*) ยางพาราเป็นพืชที่ปลูกกันอย่างกว้างขวางในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งในภาคใต้ของประเทศไทยก็ถูกนำมาปลูกอย่างแพร่หลาย การเก็บผลผลิตจะใช้วิธีการกรีดเปลือกยาง น้ำยางที่ได้จะมีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณ 20-45 % และส่วนประกอบอื่นๆอีกประมาณ 55-80 % ซึ่งส่วนประกอบของน้ำยางสด แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ส่วนที่เป็นยาง (Dry Rubber Content, DRC) เป็นอนุภาคของยางโซพรีนที่เชื่อมต่อกัน
2. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non Rubber Content) ซึ่งประกอบไปด้วยสารประกอบต่างๆหลายชนิด เช่น น้ำตาล โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต กรดไขมัน เอนไซม์ และสารประกอบไนโตรเจน เป็นต้น

ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยางสด จะมีส่วนที่เป็นเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber) ประมาณ 33 % กับส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non – Rubber) 3 % [4] เมื่อบั่นเป็นน้ำยางข้นแล้วส่วนที่ไม่ใช่ยางจะลดลงเหลือประมาณ 1-2 % ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องบั่น พันธุ์ยาง อายุยาง และฤดูกาลกรีดยาง เป็นต้น น้ำยางสดที่ได้จากการกรีดต้นยางจะมีสถานะเป็นกลาง และมีสารประกอบที่เป็นน้ำตาลซึ่งเมื่อสัมผัสกับอากาศจะทำให้แบคทีเรียและยีสต์ที่อยู่ในอากาศจะปะปนกับน้ำยาง รอยกรีดยาง เปลือกต้นยาง และในถ้วยรับน้ำยาง เป็นต้น ส่งผลให้น้ำตาลเปลี่ยนสภาพเป็นกรดซึ่งทำให้น้ำยางเสียสภาพความเป็นของเหลว ทำให้น้ำยางหนืดขึ้น และจับตัวเป็นเม็ดเล็กๆ การเสียสภาพแบบนี้เรียกว่า การจับตัวที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural or spontaneous coagulation) ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยางเกิดการเสียสภาพจึงต้องผสมสารละลายแอมโมเนีย เพื่อช่วยขัดขวางการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ปะปนในน้ำยาง

น้ำยางข้น เป็นน้ำยางสดที่ผ่านกรรมวิธีเพื่อยืดอายุและรักษาสภาพของน้ำยางสด เมื่อมีการนำน้ำยางสดไปใช้งานในการทำผลิตภัณฑ์ต่างๆในโรงงาน ซึ่งค่อนข้างอยู่ไกลจากสวนยางพารา ทำให้เกิดความไม่สะดวกและไม่เป็นการประหยัดต้นทุนในการขนส่งน้ำยางสดไปยังโรงงาน นอกจากนี้สารบางอย่างที่อยู่ในน้ำยางอาจมีผลให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ไม่ดี ดังนั้น จึงมีการผลิตน้ำยางสดเป็นน้ำยางข้นที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง 60 % ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมกับการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ซึ่งการผลิตน้ำยางข้นจะมีหลายวิธีแต่ที่นิยมใช้กันคือวิธีการปั่น โดยวิธีการปั่นน้ำยางข้นจะมีกรรมวิธีดังนี้คือ

1. รวบรวมน้ำยางสด เป็นการรวบรวมน้ำยางสดจากแหล่งต่างๆคือ โรงงานงานจะมีการตั้งจุดรับซื้อน้ำยาง หรือ จากจุดรับซื้อของพ่อค้ารายย่อยบริเวณใกล้กับสวนยาง ซึ่งน้ำยางสดที่รวบรวมมาได้ จะถ่ายลงถังรวมกัน โดยสิ่งที่จะต้องคำนึง คือ การรักษาความสะอาด และการกำจัดสิ่งที่เป็นพิษปนเปื้อนมา กับน้ำยาง เป็นต้น
2. การตรวจสอบน้ำยางสด จะเก็บตัวอย่างน้ำยางสดในถังรวมมาตรวจสอบ ปริมาณเนื้อยางแห้งเพื่อนำมาใช้ในการปรับคุณสมบัติของน้ำยางสดให้มีความเหมาะสม
3. การปั่นน้ำยางสดเป็นน้ำยางข้น ขั้นตอนนี้จะเป็นการนำน้ำยางสดที่ได้เก็บรวบรวมมาปั่นแยกส่วนที่เป็นน้ำออก โดยน้ำยางที่ได้จากเครื่องปั่นจะประกอบไปด้วย น้ำยางข้นที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณ 60 % และอีกส่วนเป็นผลพลอยได้จากการแยกน้ำยางข้นซึ่งเรียกว่า หางน้ำยาง (Skim Latex) ซึ่งมีปริมาณเนื้อยางแห้งอยู่ประมาณ 8 % จะนำไปผลิตเป็นยางสกิม
4. การรักษาสภาพน้ำยางข้น การรักษาสภาพน้ำยางข้นจะเป็นการผสมสารเคมีเพื่อช่วยยืดอายุของน้ำยางไม่ให้เสียสภาพความเป็นของเหลว โดยส่วนใหญ่มีการเติมสารละลายแอมโมเนียเป็นหลัก เพราะแอมโมเนียเป็นตัวทำลายแบคทีเรีย ซึ่งจะเติมแอมโมเนียประมาณ 0.7 % ต่อน้ำหนักยาง

คุณสมบัติของน้ำยางข้นจะอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบขององค์การมาตรฐานระหว่างประเทศ ISO 2004 – 2000 ระบุคุณภาพของน้ำยางข้นที่ผลิตคือ 1. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids Content, TSC) เป็นประมาณของส่วนที่เป็นเนื้อยางทั้งหมดในน้ำยางรวมทั้งสารอื่นๆ 2. ปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content) เป็นปริมาณของส่วนที่เป็นเนื้อยางทั้งหมดในน้ำยาง ซึ่งได้จากการทำให้น้ำยางจับตัวด้วยกรดอะซิติก ภายใต้การควบคุมสภาพการจับตัวอย่างแน่นอน

2.2.3 การหาปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางสด [20]

การหาปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางสด เป็นการคิดค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งเทียบกับน้ำยางสด 100 ส่วน ซึ่งวิธีการวัดที่นิยมใช้หาเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งมีอยู่ 2 วิธี คือ 1.วิธีการวัดในห้องปฏิบัติการมาตรฐาน ISO หรือที่เรียกกันว่า วิธีการอบแห้ง และ 2. การวัดโดยใช้เมโทรเล็กหรือเรียกอีกอย่างว่า ลาแทคโซมิเตอร์ ซึ่งสามารถอธิบายวิธีการวัดโดยละเอียดได้ ดังนี้คือ

2.2.3.1 การวัดในห้องปฏิบัติการหรือวิธีการอบแห้ง

การวัดในห้องปฏิบัติการหรือวิธีการอบแห้งนั้นเป็นวิธีการวัดที่ได้รับมาตรฐาน ISO 126:1997 ซึ่งผลการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งที่ได้มีค่าจะถูกต้องแม่นยำสูง [20] ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางชั้นของโรงงานอุตสาหกรรม จึงไม่เหมาะสำหรับการซื้อขายน้ำยางสดในพ่อค้ารายย่อย เนื่องจากการวัดด้วยวิธีนี้จะต้องใช้เวลาในการวัดรวมทั้งสิ้นประมาณ 17 ชั่วโมง จึงจะทำให้ทราบผลเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง กระบวนการวัดค่อนข้างซับซ้อน และเครื่องมือในการวัดมีราคาค่อนข้างสูง ซึ่งวิธีการวัดด้วยวิธีมาตรฐานจะมีลำดับขั้นตอน ดังนี้คือ

1. สุ่มตัดตัวอย่างน้ำยางที่ต้องการหาเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง โดยตัดตัวอย่างน้ำยางสดใส่ในถ้วยประมาณ 10 กรัม
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างน้ำยางที่อยู่ในถ้วยโดยลบด้วยน้ำหนักของถ้วยที่ใช้เพื่อให้ได้น้ำหนักที่แท้จริงของน้ำยาง แสดงตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การชั่งน้ำหนักตัวอย่างน้ำยางสด [4]

3. เติมน้ำกรดอะซีติกความเข้มข้น 2 % ลงไปในน้ำยางในถ้วยประมาณ 15-20 ซีซี เพื่อให้ น้ำยาง ตัวอย่างจับตัวเป็นก้อน
4. ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที จนน้ำยางจับตัวได้สมบูรณ์ จากนั้นนำไปรีดเป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดยางแผ่น ให้มีความหนาของแผ่นยางไม่เกิน 2 มิลลิเมตร
5. นำแผ่นยางที่ได้ไปล้างให้สะอาด แล้วนำไปอบแห้งที่ตู้อบอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ระยะเวลาประมาณ 16 ชั่วโมง แสดงตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การอบแผ่นยางอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส [4]

6. นำแผ่นยางที่ได้จากการอบแห้งตั้งทิ้งไว้ให้เย็น แล้วจากนั้นนำแผ่นยางที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อ คำนวณหาเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งจากสมการที่ 2.8

$$\text{เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง} = \frac{\text{น้ำหนักแผ่นยางแห้ง}}{\text{น้ำหนักน้ำยางสด}} \times 100 \quad (2.8)$$

2.2.3.2 การใช้เมโทรเล็กวัดความถ่วงจำเพาะ

เมโทรเล็กเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดหาปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางสด โดยเป็นการวัดค่าความถ่วงจำเพาะและแปลงเป็นค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสด โดยเมโทรเล็กจะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 2 ส่วน คือ 1. ส่วนที่เป็นก้านและ 2. ส่วนที่เป็นกระเปาะ แสดงตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เครื่องเมโทรเล็กที่ใช้วัดค่าความถ่วงจำเพาะ [21]

โดยที่ก้านเมโทรเล็กจะมีขีดกำหนดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำยาง ซึ่งจะมี 2 ระบบ คือ ระบบอังกฤษ ซึ่งจะบอกค่าเป็นปอนด์ต่อแกลลอน และระบบเมตริก ซึ่งจะบอกค่าเป็นกรัมต่อลิตร ซึ่งการวัดด้วยวิธีนี้จะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างระดับของลูกลอยที่ลอยอยู่ในน้ำยางสดสัมพันธ์กับปริมาณเนื้อยางแห้ง ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดขั้นตอนการวัดได้ดังนี้คือ

1. ตักตัวอย่างน้ำยางที่ต้องการวัด 1 ส่วน (ประมาณ 250-300 ซีซี) ผสมกับน้ำสะอาด 2 ส่วน คนให้เข้ากัน จากนั้นเทลงไปในกระบอกตวง (Cylinder) ให้เต็มจนล้น แล้วตักฟองที่เกิดขึ้นออก
2. ค่อยๆ จุ่มก้านเมโทรเล็กลงไปจนระดับของลูกลอยหยุดนิ่ง ซึ่งจะสังเกตค่าที่ได้จากบริเวณที่ผิวของน้ำยางตัดกับก้านของเมโทรเล็ก แสดงตามรูปที่ 2.6
3. จากนั้นนำค่าที่ได้จากการวัดไปคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งตามสมการ (2.9)



รูปที่ 2.6 การวัดค่าปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางสดด้วยเครื่องเมโทรเล็ก

$$\text{เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง} = \text{ค่าที่อ่านได้จากเมโทรเล็ก} \times 0.3 \quad (2.9)$$

โดยได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งไว้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งกับค่าความถ่วงจำเพาะ

ปริมาณเนื้อยางแห้ง	ค่าความถ่วงจำเพาะ
25	0.992
26	0.990
27	0.989
28	0.988
29	0.987
30	0.986
31	0.984
32	0.983
33	0.982
34	0.981
35	0.980

ข้อดีของการวัดด้วยเครื่องเมโทรเล็กคือ ง่าย สะดวก รวดเร็ว และสามารถประเมินราคาน้ำยางให้กับเกษตรกรรายย่อยได้ทันที แต่การวัดด้วยวิธีนี้ยังมีข้อด้อยคือ มีความคลาดเคลื่อนสูง ไม่เหมาะสำหรับการซื้อขายน้ำยางสดที่ต้องการความแม่นยำสูง ซึ่งข้อควรระมัดระวังสำหรับการวัดด้วยเมโทรเล็กดังนี้คือ

1. ตัวอย่างน้ำยางที่ใช้ไม่ควรมีสิ่งใดเจือปน
2. อุณหภูมิของน้ำควรจะเป็นอุณหภูมิห้อง
3. ทำความสะอาดเมโทรเล็กทุกครั้งเมื่อทำการวัดเสร็จ
4. ผสมน้ำในอัตราส่วนที่ถูกต้อง
5. อ่านค่าด้วยความละเอียดรอบคอบ

นอกจากวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว ผู้รับซื้อน้ำยางสดในบริเวณจตุรรมใกล้กับสวนยางพารา ยังได้ใช้วิธีการหาเปอร์เซ็นต์ยางด้วยการอบด้วยเตาไมโครเวฟ ซึ่งเป็นวิธีการวัดที่คัดแปลงมาจากวิธีมาตรฐาน โดยการวัดด้วยวิธีนี้จะมีขั้นตอนดังนี้คือ

1. ตักตัวอย่างน้ำยางประมาณ 10 กรัม มาชั่งน้ำหนักก่อนเข้าเตาไมโครเวฟ
2. นำตัวอย่างไปอบในเตาไมโครเวฟประมาณ 3 นาที
3. นำยางแห้งที่ได้มาชั่งน้ำหนักเปรียบเทียบกับน้ำหนักก่อนเข้าเตาไมโครเวฟ กับน้ำหนักหลังจากผ่านการอบ

ซึ่งการวัดด้วยวิธีนี้จะให้ผลการวัดที่มีความรวดเร็ว ไม่ยุ่งยาก และสามารถคำนวณเงินให้กับเกษตรกรได้ทันที แต่การวัดด้วยวิธีนี้ยังให้ผลการวัดที่มีความคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากการใช้เตาไมโครเวฟในการอบจะเป็นการสัน โมเลกุลของน้ำเพื่อให้เกิดความร้อนจึงส่งผลให้น้ำเกิดการกระเด็น กล่าวคือค่าความคลาดเคลื่อนที่วัดได้จะแปรผันตรงกับปริมาณน้ำในน้ำยาง ซึ่งหากมีน้ำผสมอยู่ในน้ำยางมากจะทำให้ผลการวัดที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูง น้ำยางสดที่จะหาโดยใช้เครื่องไมโครเวฟ สำหรับการหาค่า DRC แบบประมาณค่าเท่านั้น ไม่ควรนำวิธีการนี้ไปใช้ในหลักการซื้อ ขาย เนื่องจากเป็นวิธีการที่คลาดเคลื่อนกับความเป็นจริง แต่สามารถใช้ได้ดีกับการหา DRC รวมของน้ำยางสดเวลานำไปคำนวณการผลิตยางแผ่นรมควันครั้งละปริมาณมากๆ เท่านั้น [21]

2.2.4 ทฤษฎีการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นไมโครเวฟ [12]

เมื่อคลื่นไมโครเวฟแพร่กระจายไปกระทบกับวัสดุไดอิเล็กตริก คลื่นจะเกิดการสะท้อน ส่งผ่าน และดูดกลืนไปในตัวกลาง ซึ่งพฤติกรรมของคลื่นทั้ง 3 ประเภทนี้ถูกระบุอยู่ในส่วนของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ซึ่งจะใช้ในการอธิบายค่าสภาพความยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (2.10)$$

เมื่อ ϵ_r^* เป็นค่าสภาพความยอมเชิงซ้อนสัมพัทธ์ (Relative complex permittivity) ϵ_r' เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) หมายถึงค่าที่แสดงความสามารถในการส่งผ่านพลังงานหรือการสะท้อนพลังงานของวัสดุไดอิเล็กตริก และ ϵ_r'' เป็นค่าตัวประกอบการสูญเสียของไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) หมายถึงค่าที่แสดงความสามารถที่กระจายพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริก โดยค่าตัวประกอบการสูญเสีย และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก มีความสัมพันธ์ดังนี้

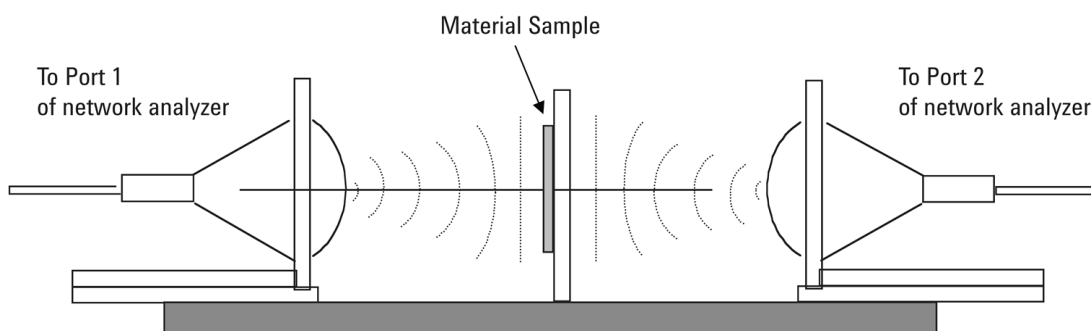
$$\epsilon_r'' = \epsilon_r' \tan \sigma \quad (2.11)$$

เมื่อค่า $\tan \sigma$ แสดงให้เห็นถึงระดับการทะลุทะลวงของสนามไฟฟ้า แสดงถึงความสามารถในการแปรเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับเป็นพลังงานความร้อน

เทคนิคการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นไมโครเวฟมีอยู่หลากหลายเทคนิค [11] เช่น เทคนิคโคแอกเซียลโพรบปลายเปิด (Open-ended coaxial) เทคนิคสายส่ง (Transmission line technique) เทคนิคโพรงเรโซแนนซ์ (Resonant cavity technique) และเทคนิคอวกาศว่าง (Free space technique) เป็นต้น โดยแต่ละเทคนิคจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งานยกตัวอย่างเช่น ลักษณะทางกายภาพของวัสดุตัวอย่าง การไม่ทำลายวัสดุ ความถี่ที่ต้องการใช้งานและความแม่นยำของเทคนิคการวัด เป็นต้น ซึ่งการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นไมโครเวฟจะอาศัยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน สัมประสิทธิ์การสะท้อน และการเลื่อนความถี่ที่เรโซแนนซ์ โดยแต่ละเทคนิคจะมีหลักการและข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไปดังนี้ คือ

1. เทคนิคอวกาศว่าง (Free space technique)

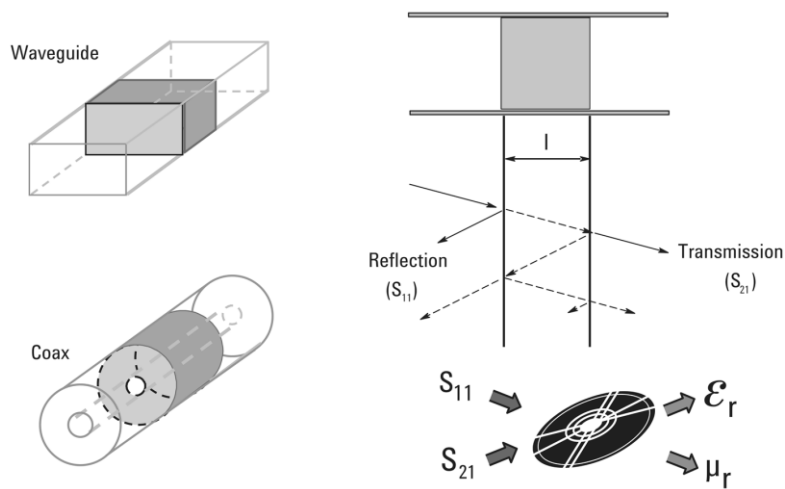
เทคนิคอวกาศว่างเป็นเทคนิคการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ โดยข้อดีของการวัดด้วยวิธีนี้คือไม่ต้องสัมผัสกับวัสดุโดยตรง ไม่ทำลายวัสดุตัวอย่าง และสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง โดยวิธีการวัดจะใช้สายอากาศ 2 ตัวทำหน้าที่เป็นตัวรับและตัวส่งคลื่นไมโครเวฟ จากนั้นวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient) และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient) ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Vector network analyzer) ซึ่งผลการวัดจะนำไปคำนวณคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ โดยวิธีการวัดแสดงตามรูปที่ 2.7 ข้อเสียของการวัดด้วยเทคนิคนี้คือใช้พื้นที่ในการวัดมากและไม่เหมาะสมวัสดุที่เป็นของเหลว เป็นต้น



รูปที่ 2.7 เทคนิคอวกาศว่าง โดยที่สายอากาศตัวรับและตัวส่งต่ออยู่กับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

2. เทคนิคสายส่ง (Transmission line technique)

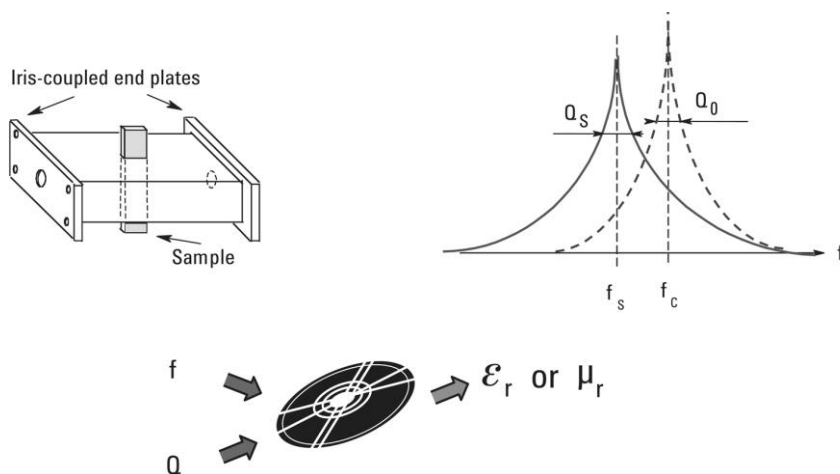
เทคนิคสายส่งเป็นเทคนิคการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ต้องวางวัสดุตัวอย่างไว้ตรงกลางภายในสายส่งหรือท่อนำคลื่น โดยเทคนิคสายส่งจะใช้การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) โดยวิธีการวัดจะแสดงตามรูปที่ 2.8 ข้อดีของการวัดด้วยวิธีนี้คือ ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วและมีความแม่นยำในการวัดสูง แต่การเตรียมวัสดุในการวัดค่อนข้างยุ่งยาก ใช้เวลานานในการเตรียมวัสดุเนื่องจากวัสดุตัวอย่างต้องบรรจุให้เต็มพื้นที่หน้าตัดไม่ให้มีช่องว่างระหว่างวัตถุและผนังสายส่ง



รูปที่ 2.8 เทคนิคสายส่งโดยการวางวัสดุไว้ภายในสายส่งและท่อนำคลื่น

3. เทคนิคโพรงเรโซแนนซ์ (Resonant cavity technique)

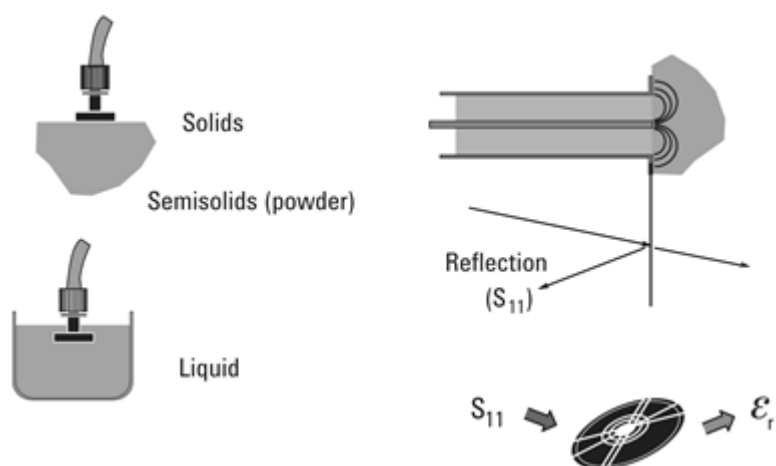
เทคนิคโพรงเรโซแนนซ์เป็นเทคนิคที่ต้องใช้วัสดุโครงสร้างที่มีตัวประกอบคุณภาพสูง (High quality factor) เพื่อต้องการให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่แน่นอน โดยเทคนิคโพรงเรโซแนนซ์จะใช้ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมสร้างเป็นโพรงบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงสุด (กึ่งกลางท่อนำคลื่น) แสดงตามรูปที่ 2.9 โดยท่อนำคลื่นที่ใช้จะทำงานในโหมด TE_{10n} เมื่อวัสดุวางอยู่บริเวณโพรง จำนวนครึ่งของความยาวคลื่น ($n=2k+1$) จะให้สนามไฟฟ้าสูงสุด และจะเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เรโซแนนซ์ตามคุณสมบัติของวัสดุตัวอย่าง โดยเทคนิคโพรงเรโซแนนซ์จะให้ค่าความถูกต้องในการวัดสูง แต่วัสดุตัวอย่างจะต้องมีค่าไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียต่ำ



รูปที่ 2.9 เทคนิคโพรงเรโซแนนซ์และการเลื่อนความถี่เรโซแนนซ์

4. เทคนิคโพรบปลายเปิด (Open-ended coaxial)

เทคนิคโพรบปลายเปิดเป็นการตัดส่วนปลายของสายนำสัญญาณหรือส่วนปลายของคอนเน็คเตอร์แบบแกนร่วมออก เพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายบริเวณขอบของตัวนำ (Fringing field) ข้อดีของเทคนิคโพรบปลายเปิดคือ สามารถใช้วัดวัสดุได้ทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลว ไม่ทำลายวัสดุ และใช้พื้นที่ในการวัดน้อย ในการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ โพรบปลายเปิดจะต้องสัมผัสกับวัสดุแสดงตามรูปที่ 2.10 และใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) แปลงเป็นค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ซึ่งผลการวัดด้วยวิธีนี้จะให้ค่าความแม่นยำสูงเมื่อวัสดุมีค่าการสูญเสียกำลังคลื่นที่สูง



รูปที่ 2.10 เทคนิคโพรบปลายเปิดในการใช้วัดวัสดุที่เป็นของแข็งและของเหลว

จากเทคนิคสำหรับการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยแต่ละวิธีจะมีข้อจำกัดและข้อดีแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับความต้องการการนำไปใช้งาน ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 2.2

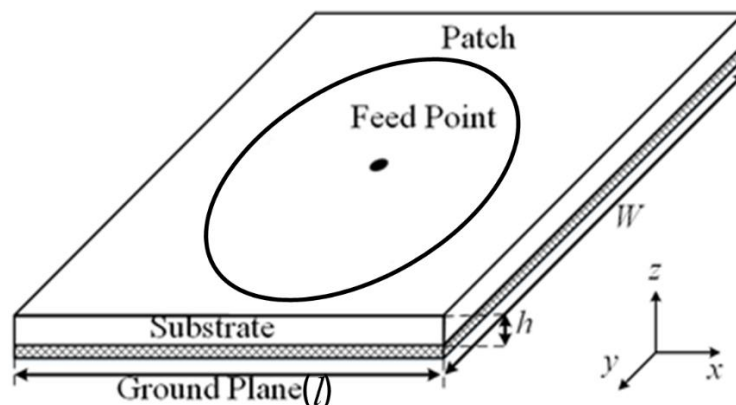
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบเทคนิคการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

เทคนิคการวัด พารามิเตอร์	เทคนิค อวกาศว่าง	เทคนิค สายส่ง	เทคนิคโพรง เรโซแนนซ์	เทคนิคโพรบ ปลายเปิด
ความถี่ที่ใช้งาน	เป็นช่วง	เป็นช่วง	เดี่ยว	กว้าง
ขนาดของวัสดุตัวอย่าง	ใหญ่	ปานกลาง	เล็ก	เล็ก
การควบคุมอุณหภูมิ	ง่ายมาก	ยาก	ง่ายมาก	ง่าย
ความแม่นยำ: วัสดุที่มีการสูญเสียเล็กน้อย	ปานกลาง	ปานกลาง	มาก	น้อย
วัสดุที่มีการสูญเสียมาก	ปานกลาง	ปานกลาง	ไม่เหมาะสม	มาก
การเตรียมวัสดุตัวอย่าง	ง่าย	ยาก	ยากมาก	ง่าย
สถานะวัสดุที่วัดได้	ของแข็ง	ของแข็ง	ของแข็ง ของเหลว	ของแข็ง ของเหลว
การทดสอบวัสดุ	ไม่ทำลาย	ทำลาย	ทำลาย	ไม่ทำลาย

จะเห็นได้ว่าเทคนิคโพรบปลายเปิดและเทคนิคอวกาศว่างเป็นเทคนิคที่มีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้วัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางที่บรรจุอยู่ในภาชนะ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีกระบวนการวัดที่ไม่ยุ่งยาก สามารถใช้ในการวัดกับวัสดุได้ทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลว ใช้พื้นที่ในการวัดน้อย การเตรียมการวัดไม่ยุ่งยากและมีผลตอบสนองต่อวัสดุสูง โดยเทคนิคโพรบปลายเปิดและเทคนิคอวกาศว่างได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ทดสอบวัสดุที่หลากหลาย เช่น การวัด %DRC ในน้ำยาง [9] การวัดความสุกของผลปาล์ม [13] และการวัดความสุกของผลไม้ เป็นต้น

2.2.6 ทฤษฎีการออกแบบสายอากาศแพทช์ [10]

สายอากาศแพทช์จะมีโครงสร้างแบบสามชั้นประกอบไปด้วยชั้นของสารตัวนำประกบเข้ากับสารที่มีคุณสมบัติไม่เป็นแม่เหล็กหรือที่เรียกว่า วัสดุฐานรองหรือซับสเตรท (Substrate) แสดงตามรูปที่ 2.11 สายอากาศแบบแพทช์จะมีการออกแบบรูปร่างได้หลายประเภท เช่น วงกลม สี่เหลี่ยม วงรี และสามเหลี่ยม เป็นต้น ข้อดีของสายอากาศแบบแพทช์ คือ มีน้ำหนักเบา มีขนาดเล็ก ราคาถูก สามารถผลิตได้ง่าย และสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบตามที่ต้องการได้ แต่สายอากาศแพทช์ยังมีข้อเสียที่สำคัญ คือ แบนด์วิธแคบ มีอัตราขยายน้อย และมีกำลังการสูญเสียมาก เป็นต้น การออกแบบสายอากาศแพทช์จะเป็นการกำหนดค่าความกว้างของสตริป ความหนาของวัสดุฐานรอง ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เพื่อให้ได้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้คือ



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของสายอากาศแพทช์

โดยที่แพทช์แบบสี่เหลี่ยมสามารถคำนวณค่าความกว้างของแพทช์ (w) แสดงตามสมการที่ 2.12 และความยาวของแพทช์ (l) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.13-2.16

$$w = \frac{c}{2f_r \sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}} \quad (2.12)$$

ซึ่ง c คือ ความเร็วแสง, f_r คือความถี่ที่การให้เรโซแนนซ์, ϵ_r คือค่าคงที่ของวัสดุฐานรอง และ h คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง

$$l = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{w}\right)^{-ab} \quad (2.14)$$

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left[\frac{\left(\frac{w}{h}\right)^4 + \left(\frac{w}{52h}\right)^2}{\left(w/h\right)^4 + 0.432} \right] + \frac{1}{18.7} \ln \left[1 + \left(\frac{1}{18.2h}\right)^3 \right] \quad (2.15)$$

$$b = 0.564 \left(\frac{\varepsilon_r - 0.9}{\varepsilon_r + 3} \right)^{0.053} \quad (2.16)$$

สายอากาศแพทช์แบบวงกลม เป็นสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก เนื่องจากเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างแบบความสมมาตร ส่งผลให้สนามไฟฟ้าที่แผ่ออกมามีความสมมาตร ซึ่งไม่ว่าจะพิจารณาที่ระนาบใดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็ยังคงมีลักษณะที่สมมาตร เป็นต้น ซึ่งการออกแบบสายอากาศแพทช์แบบวงกลม สามารถคำนวณค่าของรัศมีของแพทช์ได้ตามสมการที่ 2.17

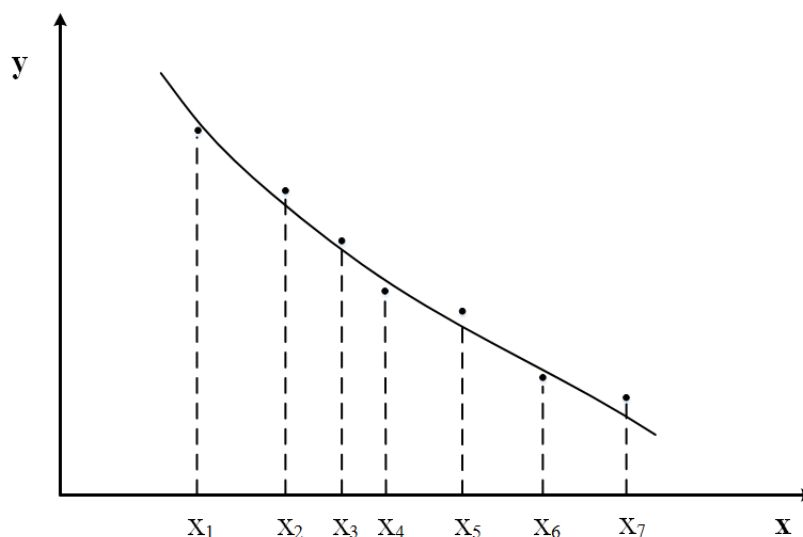
$$R = \frac{F}{\left(1 + \frac{2h}{\pi \varepsilon_r F} \left(\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right) \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.17)$$

เมื่อ $F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\varepsilon_r}}$ และ R คือ รัศมีของแพทช์, h คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง, f_r คือ ความถี่ที่ต้องการใช้งาน และ ε_r คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง

การออกแบบสายอากาศแพทช์แบบวงกลมยังมีเทคนิคการออกแบบอีกหลายอย่างเพื่อให้ได้ความถี่และขนาดของสายอากาศตามต้องการของผู้ใช้ ซึ่งเทคนิคส่วนใหญ่ที่มีการใช้งานกันยกตัวอย่างเช่น การเพิ่มโหลดแบบร่อง (Slit load) การลัดวงจร (Short pin) การขดเพื่อเพิ่มหน้าตัดพื้นที่ (Fractal) เป็นต้น ซึ่งเทคนิคเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับความต้องการและความเหมาะสมในการออกแบบสายอากาศแพทช์ให้สามารถใช้งานได้ตามความถี่ที่ต้องการได้

2.2.7 การถดถอยแบบพหุนาม [22]

การถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial regression) เป็นระเบียบวิธีที่ใช้ประคิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามสำหรับข้อมูลที่มีการกระจายโดยทั่วไปซึ่งไม่อยู่ในรูปแบบของเชิงเส้น กระบวนการในการประคิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามโดยระเบียบวิธีการถดถอยแบบพหุนาม ซึ่งการกระจายของข้อมูลอาจจะเบี่ยงเบนไปมาในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ซึ่งควรจะใช้สมการในรูปแบบของฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial function) จึงจะให้ผลลัพธ์ที่เที่ยงตรงมากขึ้น โดยการใส่ฟังก์ชันพหุนามในรูปแบบทั่วไปของชุดข้อมูลที่ไม่อยู่ในรูปแบบเชิงเส้น แสดงตามรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การถดถอยแบบพหุนาม โดยการประคิษฐ์ฟังก์ชันของพหุนามจากชุดข้อมูล

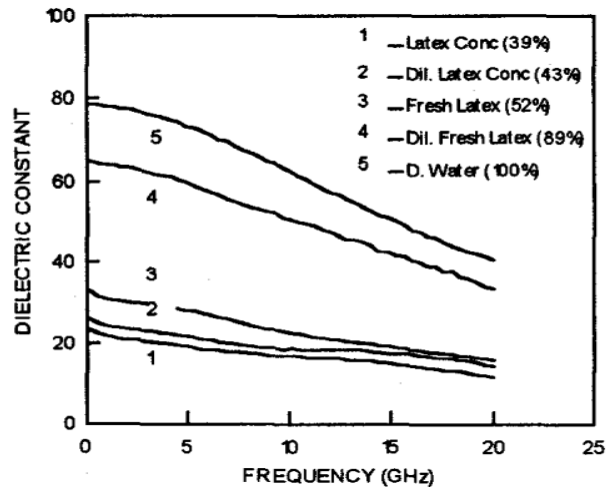
จากความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า x และ y ได้โดยการใช้การถดถอยแบบพหุนามในการสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ขึ้น โดยโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ได้จะเป็นไปตามสมการที่ 2.18

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (2.18)$$

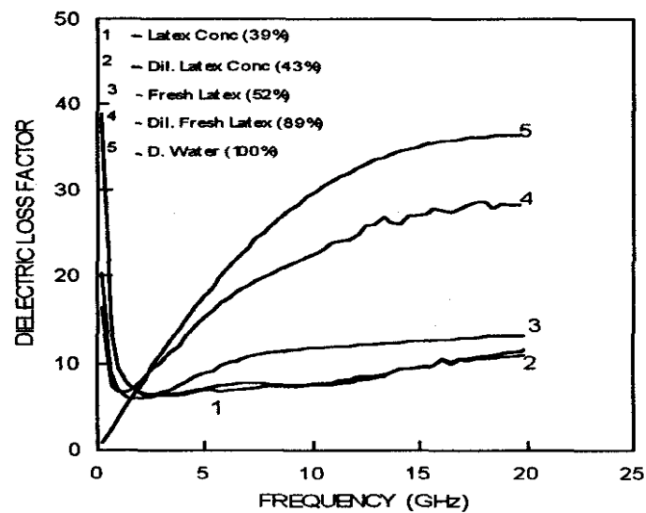
โดยที่ $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ เป็นค่าคงตัวที่ไม่รู้ค่าซึ่งสามารถคำนวณหาเงื่อนไขที่ว่า สมการพหุนามที่ประคิษฐ์ขึ้นมาจะก่อให้เกิดค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยน้อยที่สุดจากข้อมูลทั้งหมดที่กำหนดมาให้ โดยค่าคงตัวที่ได้เป็นค่าที่ใช้ในการปรับความชันของกราฟ เป็นต้น

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสดถือเป็นปัจจัยสำคัญในตลาดการซื้อขายน้ำยางสด เนื่องจากในปัจจุบันยังขาดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง โดยคุณสมบัติของเครื่องมือที่ใช้ในการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งคือ ต้องมีความแม่นยำ ใช้เวลาในการวัดน้อย และสะดวกต่อผู้ซื้อและผู้ขายน้ำยาง เป็นต้น ปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่มีการสร้างเครื่องมือวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งขึ้น เริ่มมีงานวิจัยในปี 1992 ของ K. Khalid และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในน้ำยางที่มีส่วนประกอบพื้นฐานประกอบไปด้วยน้ำ 50-80 เปอร์เซ็นต์ เนื้อยาง 18-45 เปอร์เซ็นต์ โดยงานวิจัยดังกล่าวได้ทำการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่มีความเข้มข้นต่างกัน 5 ความเข้มข้นคือ ปริมาณน้ำยางที่มีน้ำผสมอยู่ 39%(Latex concentrate), 43%(Diluted latex concentrate), 52%(Fresh latex), 89%(Diluted fresh latex) และ 100%(Diluted water) ซึ่งเซ็นเซอร์ที่ใช้เป็นแบบโคแอกเซียลปลายเปิด (Open ended coaxial line) ศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางที่ความถี่ 0.2-20 GHz และทำการทดลอง ณ อุณหภูมิห้อง การทดลองได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Automatic Network Analyzer) ในการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าตัวประกอบการสูญเสีย ซึ่งผลการทดลองจะแสดงตามรูปที่ 2.13-2.14 ผลการทดลอง [5] พบว่าที่ความถี่น้อยกว่า 2 GHz ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นจะมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน แต่ที่ความถี่สูงกว่า 5 GHz ค่าตัวประกอบการสูญเสียของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นจะให้ค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน กล่าวคือ ความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และที่ความถี่สูงเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในการวัดค่าตัวประกอบการสูญเสีย นอกจากการศึกษาคูสมบัติไดอิเล็กตริกสัมพันธ์กับความถี่แล้ว งานวิจัยดังกล่าวยังได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและตัวประกอบการสูญเสียอีกด้วย ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าอุณหภูมิมีผลกับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่างกันมากเช่นอุณหภูมิที่ติดลบ ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางที่ได้ก็จะต่างกันมากเช่นกัน จากผลการทดลองดังกล่าวจึงเป็นเหตุผลการวัดค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางจึงจะต้องมีการวัดค่าอุณหภูมิด้วยเช่นกัน เพื่อให้ผลการวัดที่ได้มีความถูกต้องมากที่สุด



รูปที่ 2.13 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ 0.2-20 GHz



รูปที่ 2.14 ค่าตัวประกอบการสูญเสียเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ 0.2-20 GHz

ต่อมาในปี 2007 K.Khalid และคณะ [6] ได้ทำการสร้างเครื่องวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางสดโดยใช้ไมโครเวฟด้วยวิธีแบบไม่สัมผัส ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้ออกแบบเซนเซอร์เป็นแบบสายอากาศไมโครสติปชนิดวงกลมจำนวน 4 ชั้น ทำหน้าที่เป็นตัวรับตัวส่งคลื่นไมโครเวฟสองความถี่ สายอากาศถูกออกแบบมา 2 ชนิดคือสามารถใช้งานได้ที่ความถี่ X คือ 8.48 GHz และอีก 10.6 GHz งานวิจัยดังกล่าวได้วิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ซึ่งเป็นคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนกลับมาจากน้ำยาง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นของน้ำยางกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน จากนั้นได้สร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ซึ่งได้ใช้สมการการถดถอยทางพหุนามลำดับ 3 โดยมีค่าการทำนายเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.49 เปอร์เซ็นต์

ในปี 2010 You Kok Yeow และคณะ [13] พัฒนาเทคนิคโพรบปลายเปิดในการวัดค่าคงที่ความชื้น (Moisture content) ของปาล์มน้ำมันเพื่อนำไปทำนายค่าความสุกของผลปาล์ม ซึ่งมีค่า Wet-weight อยู่ 30-80 เปอร์เซ็นต์ โดยระบบสามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 1 GHz และ 5 GHz กล่าวคือโพรบปลายเปิดจะถูกเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (VNA HP8270B) เพื่อใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟ และเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายจะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน การคำนวณคุณสมบัติสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative permittivity: ϵ_r) สามารถหาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่บริเวณปลายของโพรบ แต่ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเป็นค่าที่เกิดขึ้นจากการสะท้อนที่บริเวณปลายสายส่งซึ่งเกิดจากการตั้งค่า (Calibrate) ตามสมการที่ 2.19 เพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้เป็นค่าที่บริเวณปลายของโพรบ

$$\Gamma_{Actual} = \Gamma_{measured} e^{(2jk_c k_d)} \quad (2.19)$$

เมื่อ Γ_{Actual} เป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ปลายของโพรบ, $\Gamma_{measured}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย, k_c เป็นความยาวของโพรบ หน่วยเป็นเมตร(m) และ k_d คือค่าคงที่การกระจายกำลังคลื่น จากนั้นเมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่บริเวณปลายของโพรบจะสามารถหาความสัมพันธ์ของค่าสภาพยอมเชิงซ้อนสัมพัทธ์ได้ตามสมการดังนี้

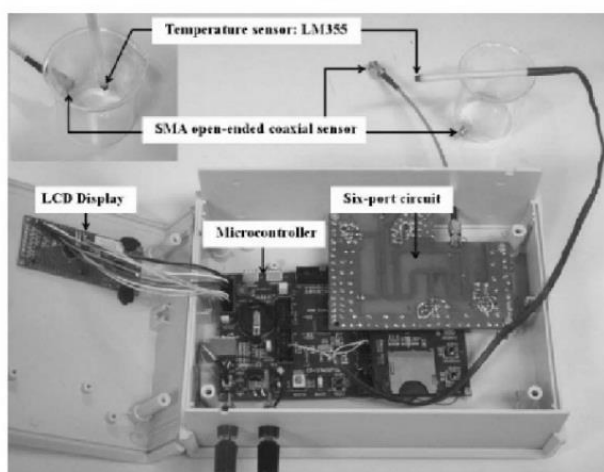
$$\epsilon_r = \frac{Y_0}{j\omega C_t} \left(\frac{1 - \Gamma_{Actual}}{1 + \Gamma_{Actual}} \right) \quad (2.20)$$

เมื่อ ω คือความถี่เชิงมุม, C_t คือแอดมิตแตนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Admittance) และ Y_0 คือผลรวมการเก็บประจุในโคเอกเซียลซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$Y_0 = \frac{2\pi \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_c}}{\sqrt{\mu_0} \ln(b-a)} \quad (2.21)$$

เมื่อ ϵ_0 คือคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในอวกาศว่าง, ϵ_c ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของ เทฟลอน, b คือรัศมีด้านในของโพรบ และ a คือรัศมีด้านนอกของโพรบ จากผลการทดลอง พบว่าโพรบโคแอกเซียลสามารถใช้ในการวัดค่าคงที่ความชื้น โดยผลการวัดจะแม่นยำเมื่อค่าคงที่ ความชื้นมีค่าต่ำๆ กล่าวคือค่าความถูกต้องจะแปรผกผันกับค่าคงที่ความชื้น

ต่อมาในปี 2012 Sakol Julrat และ Mitchai Chongcheawchamnan [9] ได้สร้าง เครื่องมือวัดเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งในน้ำยางสด โดยได้พัฒนาระบบการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้องอก แห้ง ให้ใช้เซ็นเซอร์ที่มีราคาถูก คือเซ็นเซอร์แบบโพรบปลายเปิด (Open ended) และใช้ความถี่เพียง ความถี่เดียวคือ 2.5 GHz โดยใช้การวัดอนุภูมิแทนการวัดเฟสเพื่อให้ผลการวัดที่ได้มีความถูกต้อง งานวิจัยนี้ยังได้พัฒนาระบบพื้นฐานวงจร 6 พอร์ต (Six-port reflectometer) ในการวิเคราะห์ค่า สัมประสิทธิ์การสะท้อนแทนการใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ความเข้มข้นของน้ำยางที่ใช้ในการ ทดลองจะอยู่ในช่วง 28% ถึง 61% ผลที่ได้พบว่าระบบมีค่าความคลาดเคลื่อน (Mean absolute error) เป็น 0.36 % ที่อุณหภูมิ 15-39 องศาเซลเซียส เป็นต้น โดยใช้หลักการของโพรบปลายเปิดร่วมกับ วงจรหกพอร์ตในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S11) และได้พิจารณาค่าอนุภูมิควบคู่ไปในการ วัดเพื่อให้ระบบมีความแม่นยำมากขึ้น ซึ่งวิธีการวัดนี้สามารถใช้งานงานที่ความถี่เดียวคือ 2.5 GHz จากงานวิจัยพบว่าหลักการโพรบปลายเปิดมีความแม่นยำในการวัดที่สูง โดยมีค่า Mean absolute error เป็น 0.36 % แต่การใช้งานโพรบปลายเปิดในการวัดของเหลวนั้นโพรบจะต้องจุ่มลง ไปในน้ำยางโดยตรง แสดงตามรูปที่ 2.15 ซึ่งทำให้เสียเวลาในการทำความสะดวกเครื่องมือ ก่อให้เกิดการชำรุดของโพรบ และส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ เป็นต้น



รูปที่ 2.15 โครงสร้างแสดงระบบการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งด้วยเซ็นเซอร์โพรบปลายเปิด

งานวิจัยดังกล่าวยังได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากสมการดังนี้คือ

$$\%DRC = \frac{D_s f}{D_s f + D_w (1-f)} \quad (2.22)$$

เมื่อ D_s คือความหนาแน่นของยางแห้งมีค่าเท่ากับ 0.90 g/cm^3 และ D_w คือความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 1 g/cm^3 โดย f คือปริมาณเนื้อยางแห้งสามารถหาได้จากสมการดังนี้คือ

$$f = \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_w}{\varepsilon_r + 2\varepsilon_w + v(\varepsilon_r - \varepsilon_w)} / \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_w}{\varepsilon_s + 2\varepsilon_w + v(\varepsilon_r - \varepsilon_w)} \quad (2.23)$$

โดยที่ v คือมีค่าเท่ากับ 2 ε_s คือค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของยางแห้งมีค่าเท่ากับ 2.2-0.5i และ ε_w คือค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของน้ำซึ่งมีค่าดังนี้คือ

$$\varepsilon'_w = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad \text{และ} \quad \varepsilon''_w = \frac{\omega \tau (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.24)$$

$$\tau = 15.4148e^{-0.0244T} \quad \varepsilon_0 = 87.8880e^{-0.0046T} \quad (2.25)$$

$$\varepsilon_\infty = -0.00005T^4 + 0.0051T^3 - 0.1924T^2 + 3.0084T - 10.6922$$

โดยที่ค่าสภาพยอมไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สามารถหาได้จากสมการที่ 2.26 ดังนี้คือ

$$\varepsilon_r = \frac{1-\Gamma}{j\omega z_0 C_0 (1-\Gamma)} - \frac{C_f}{C_0} \quad (2.26)$$

โดยที่ T คือ อุณหภูมิเป็นเซลเซียส z_0 คือค่าความต้านทานของสายส่งมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม และ C_f, C_0 คือพารามิเตอร์ที่ใช้ตั้งค่าโพรบปลายเปิดซึ่งมีค่าเท่ากับ 9 และ 40 pF ตามลำดับ

บทความ [14] งานวิจัยของ รศ.ดร.ประยุทธ์ และคณะ ได้สร้างเครื่องวัดเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งในน้ำยางสดด้วยความถี่ไมโครเวฟ ด้วยหลักการเรโซแนนซ์ความถี่ของน้ำยาง ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้สร้างเครื่องมือวัดเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งที่มีขนาดเล็ก สามารถพกพาได้สะดวก ใช้เวลาในการวัดน้ำยางสดประมาณ 3-5 นาที โดยผลการทดลองพบว่า เครื่องต้นแบบการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถนำไปใช้ในการวัดค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งภายในห้องปฏิบัติการ โดยได้ผลเป็นค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่มีความละเอียดในการวัดที่หลักหน่วยของเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ 1 เมกกะเฮิรซ์ในการทดสอบที่ช่วงการวัดของเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้ง 25-45 % ใช้ปริมาณน้ำยางทดสอบ 5-10 มิลลิลิตร การทดสอบในแต่ละตัวอย่างรวมการทำความสะดวกจรเซนเซอร์ใช้เวลา 3-5 นาที เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้มีบทความ [15] ของ Nor Zakiah Yahaya และคณะ ได้ศึกษาการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ของน้ำยาง โดยได้เปรียบเทียบระเบียบวิธีวิเคราะห์คือ ระเบียบวิธี Finite element, ระเบียบวิธี Moment และ ระเบียบวิธี Variational โดยใช้ผลการเลื่อนความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น (Patch Antenna) เพื่อประยุกต์ใช้ในการวัดความเข้มข้นของน้ำยางโดยค่าความถี่ของน้ำยางที่ใช้ในการวัดมีค่าจาก 35 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ และความถี่ที่ใช้คือ 1 GHz และ 4 GHz ผลการทดลองพบว่าระเบียบวิธี Finite element มีค่าความถูกต้องสูงที่สุดเมื่อเทียบระเบียบวิธีอื่น โดยมีค่าความผิดพลาด (Mean error) เป็น 0.1 นอกจากนี้งานวิจัยที่กล่าวมาเบื้องต้นแล้วยังได้มีบทความของ Shinichiroh Hoshina และคณะ [15] ได้ทำการจำลองสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกมาจากโพรบปลายเปิด (Open-ended) เพื่อใช้ในการหาค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Complex permittivity) โดยใช้ระเบียบวิธีในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าคือ Finite-Difference Time Domain (FDTD) การทดลองพบว่าขอบเขตของบริเวณทดสอบในกรณีที่โพรบจุ่มอยู่ในน้ำเกลือ หาได้จากตำแหน่งของกำลังงานที่กระจายบริเวณโพรบซึ่งไม่น้อยกว่า -39.4 dB เมื่อกำลังงาน ณ ตำแหน่งปลายของโพรบมีค่าเท่ากับ 0 dB

จากการตรวจสอบเอกสารพบว่างานวิจัย [5] ได้สร้างเครื่องมือวัดเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งที่ย่านความถี่สูงคือ 8 GHz และ 10.69 GHz รวมถึงการใช้สายอากาศถึง 4 ตัวทำให้เพิ่มต้นทุนในการสร้างชิ้นงาน จากงานวิจัย [7],[8] พบว่าไม่ได้พิจารณาผลของอุณหภูมิซึ่งเป็นปัจจัยต่อการวัดค่า %DRC และงานวิจัย [7]-[9] พบว่าเป็นกระบวนการวัดแบบสัมผัสน้ำยางสดโดยตรง ทำให้เสียเวลาในการทำความสะอาดเครื่องมือ จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นพบว่ายังไม่มีงานวิจัยใดที่ได้ทำการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก โดยโพรบที่ใช้ไม่สัมผัสกับวัสดุโดยตรง และวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนควบคู่ไปกับการพิจารณาค่าอุณหภูมิ

บทที่ 3

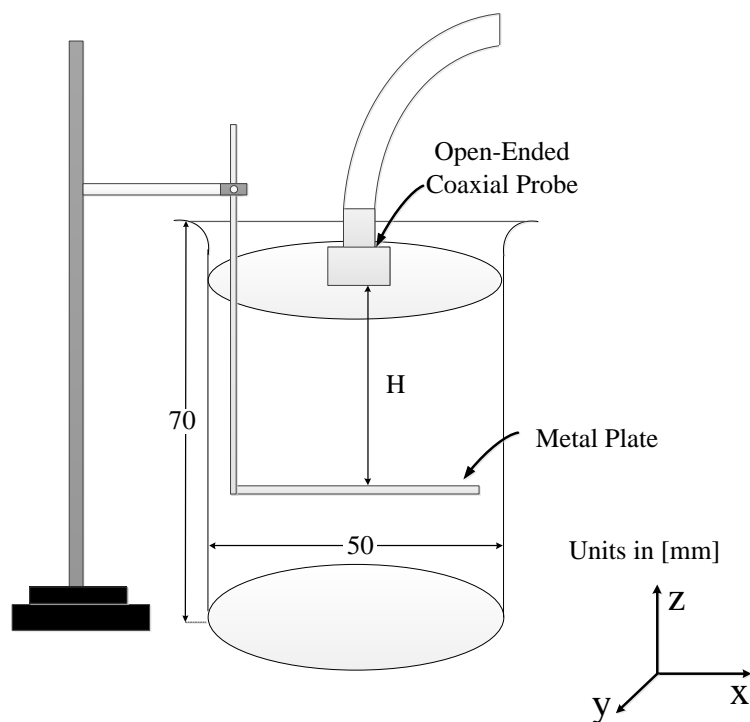
การจำลองและการออกแบบสายอากาศ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการหาปริมาณเนื้อเยื่อข้างในน้ำยางชั้นโดยอาศัยหลักการการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz และที่ความถี่ 5.8 GHz ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนของการจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของเซ็นเซอร์โพรบปลายเปิดเปรียบเทียบกับเซ็นเซอร์สายอากาศแพทช์แบบวงกลม นอกจากนี้ยังได้ออกแบบสายอากาศแพทช์แบบวงกลมให้สามารถใช้งานได้ 2 ความถี่คือความถี่ 2.45 GHz และความถี่ 5.8 GHz โดยการออกแบบให้มีขนาดเล็กเหมาะสำหรับการวัดน้ำยางชั้นด้วยวิธีแบบไม่สัมผัส (ว่าสายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดเล็ก Miniaturize Circular Patch antenna : MCP antenna) การจำลองขอบเขตการแผ่กระจายสนามไฟฟ้านั้นจะใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics ที่จำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธี Finite Element Methods (FEM) การพิจารณาผลการจำลองจะพิจารณาจากระยะทางที่น้อยที่สุดของบริเวณที่ยังคงสามารถทดสอบได้ (Measurement region) โดยเนื้อหาในบทนี้จะแสดงผลตั้งแต่ วิธีการจำลองของวัสดุที่ทดสอบ ผลการจำลองระยะการแผ่กระจายระหว่างโพรบปลายเปิดและสายอากาศแพทช์แบบวงกลม ผลการออกแบบสายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดเล็ก (MCP antenna) ซึ่งจะแสดงทั้งความถี่เรโซแนนซ์และแบนด์วิธของสายอากาศที่สร้างขึ้น โดยทั้งหมดจะแสดงรายละเอียดตามหัวข้อด้านล่างนี้

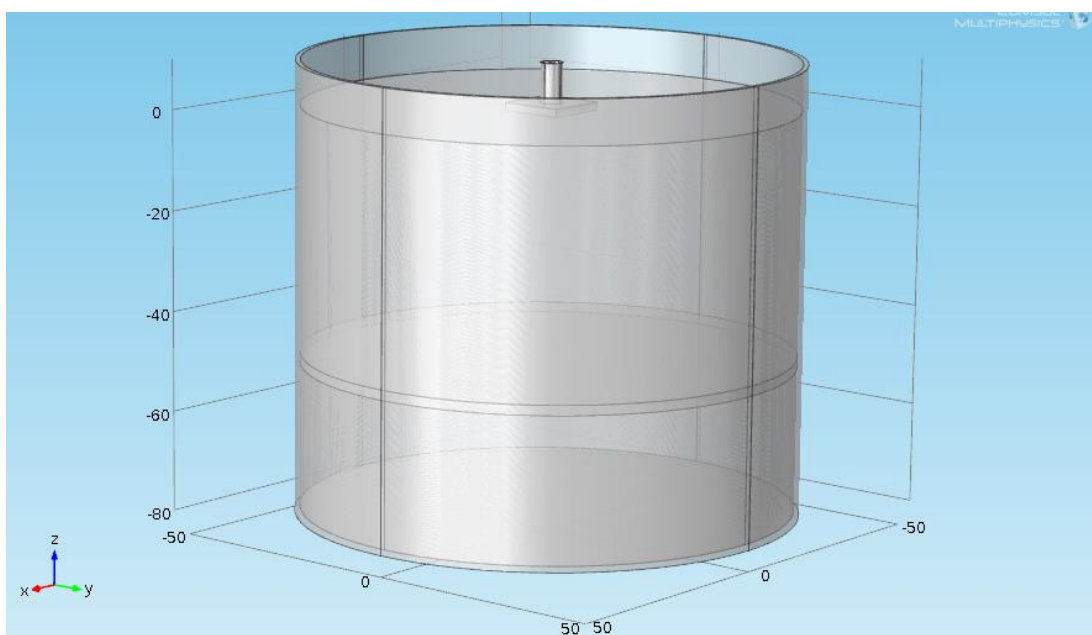
3.1 การจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิด

การจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดเป็นการจำลองเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของโพรบปลายเปิดว่าสามารถใช้สำหรับวัดคุณสมบัติของน้ำยางเมื่อวางอยู่ใต้ภาชนะได้หรือไม่ โดยการจำลองดังกล่าวนี้ได้อ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Hoshina และคณะ [15] ที่ได้นำเสนอการหาขอบเขตการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าหรือขอบเขตบริเวณทดสอบ (Measurement region) เพื่อวิเคราะห์ค่าระยะทางของสนามไฟฟ้าในกรณีที่โพรบจุ่มลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำเกลืออยู่ จากผลการทดลองพบว่าขอบเขตของบริเวณทดสอบจะหาได้จากตำแหน่งของกำลังงานที่กระจายบริเวณโพรบไม่น้อยกว่า -39.4 dB เมื่อกำลังงาน ณ ตำแหน่งปลายของโพรบมีค่าเท่ากับ 0 dB การจำลองดังกล่าวนี้เป็นจำลองขอบเขตการแผ่กระจายของโพรบปลายเปิดในตัวกลางที่เป็นสารละลายน้ำเกลือ (Saline) ดังนั้นเริ่มต้นจึงได้ทำการทดสอบขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดในตัวกลางที่เป็นน้ำกลั่นตามรูปแบบการจำลองของ Hoshina

และคณะ ซึ่งมีรูปแบบการจำลองคือ โพรบปลายเปิดจะสัมผัสกับน้ำกลั่น โดยตรงและในลักษณะ ปีกเกอร์จะใส่แผ่นเหล็กที่สามารถเปลี่ยนแปลงระยะได้ แสดงตามรูปที่ 3.1-3.2

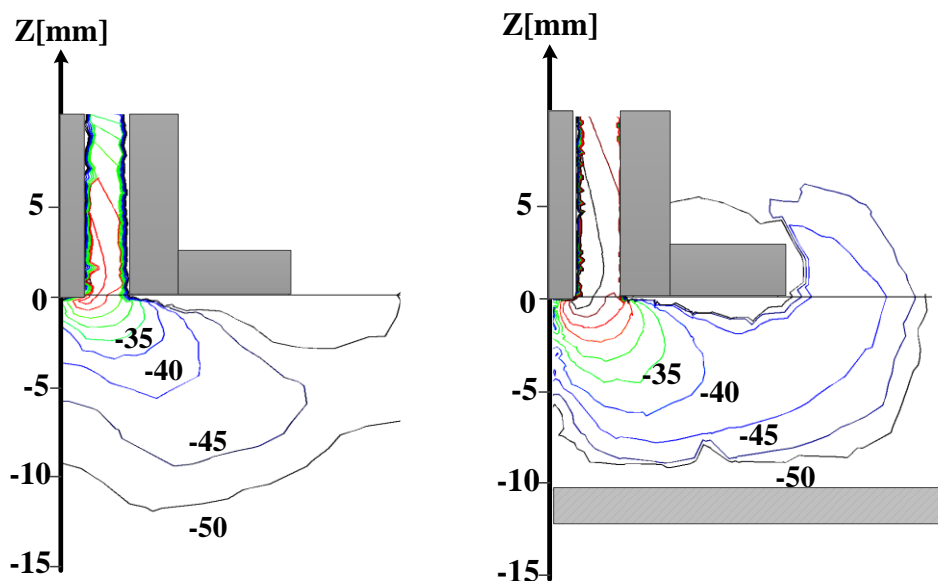


รูปที่ 3.1 รูปแบบการจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิด



รูปที่ 3.2 รูปแบบการจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดด้วย

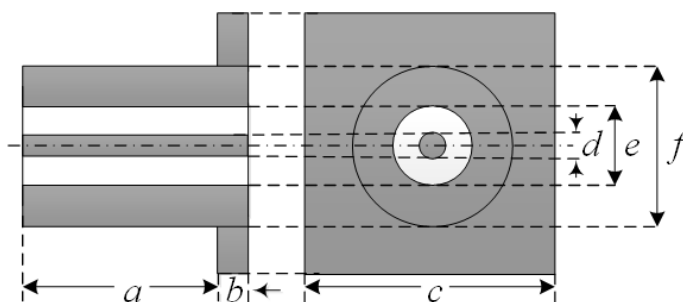
โปรแกรม COMSOL Multiphysics



รูปที่ 3.3 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่น P_{dist} ของโพรบปลายเปิดเมื่อสัมผัสกับน้ำกลั่น

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดเมื่อสัมผัสกับน้ำกลั่นมีค่าระยะการแผ่กระจายเช่นเดียวกับการจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดเมื่อสัมผัสกับน้ำเกลือ (Saline) [15] กล่าวคือขอบเขตของบริเวณทดสอบจะหาได้จากตำแหน่งของกำลังงานที่กระจายบริเวณโพรบไม่น้อยกว่า -39.4 dB เมื่อกำลังงาน ณ ตำแหน่งปลายของโพรบมีค่าเท่ากับ 0 dB ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและจำลองการแผ่กระจายกำลังงานของโพรบปลายเปิดเมื่ออยู่ในอากาศ และจำลองสนามไฟฟ้าเมื่อโพรบปลายเปิดวางอยู่ใต้ภาชนะแก้วบีกเกอร์ โดยจะพิจารณาขอบเขตการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าที่ -40 dB จากผลของงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น

การจำลองจะแบ่งการวิเคราะห์ขอบเขตการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าออกเป็น 2 ส่วนดังนี้คือ 1.การจำลองโพรบปลายเปิดในตัวกลางที่เป็นอากาศ และ 2.การจำลองโพรบปลายเปิดที่วางอยู่ใต้ภาชนะแก้วที่บรรจุน้ำกลั่น ซึ่งโพรบปลายเปิดที่เลือกมาใช้ในการจำลองเพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้านั้น คือโพรบปลายเปิดชนิดคอนเน็คเตอร์แบบแกนร่วมขนาดมาตรฐานจำนวน 2 ชนิดคือ ชนิด N-type และชนิด SMA โดยโครงสร้างของโพรบปลายเปิดจะประกอบไปด้วยแกนตัวนำด้านในและแกนตัวนำด้านนอก ระหว่างขั้วเป็นฉนวนเทฟลอน (PTFE) ปลายของโพรบเป็นกราวด์ทรงสี่เหลี่ยม (Flange) โดยลักษณะโครงสร้างของโพรบแต่ละชนิดแสดงตามรูปที่ 3.4 และมีขนาดของพารามิเตอร์ต่างๆแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของโพรบปลายเปิด

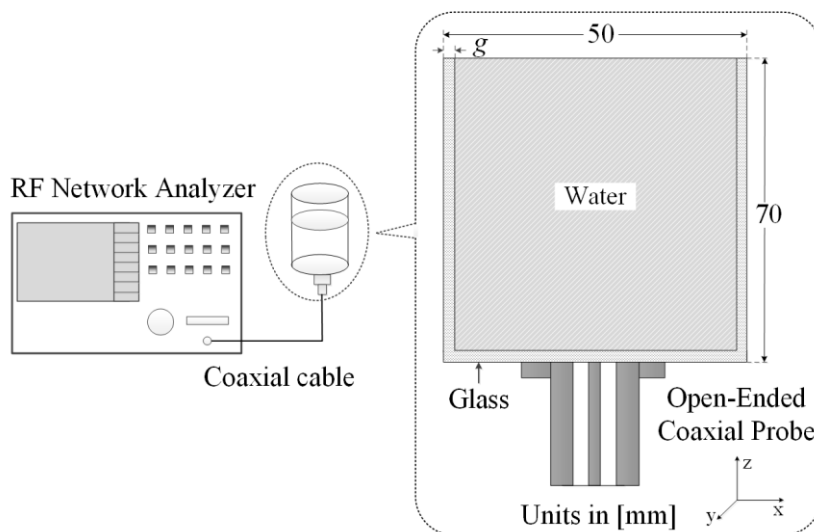
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของโพรบปลายเปิด

ชนิดของโพรบ	พารามิเตอร์ (มิลลิเมตร)					
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
SMA	7.9	1.6	12.7	1.3	4.1	4.5
N-type	16.7	2.0	25.4	2.4	9.1	14.6

การจำลองโพรบปลายเปิดที่วางอยู่ในอากาศว่างนั้นเพื่อต้องการเปรียบเทียบขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิด 2 ชนิด คือ N-type และ SMA ส่วนการจำลองโพรบปลายเปิดที่วางอยู่ได้ภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่นนี้เพื่อต้องการหาขอบเขตบริเวณทดสอบของกำลังงานว่าสามารถผ่านทะลุผ่านภาชนะแก้วสู่น้ำกลั่นได้หรือไม่ ซึ่งการจำลองเช่นนี้จะเป็นการทดสอบโพรบปลายเปิดว่าจะสามารถนำไปใช้งานร่วมกับเทคนิคการวัดคุณสมบัติของเหลวแบบไม่สัมผัสได้หรือไม่ โดยโมเดลการจำลองจะแสดงตามรูปที่ 3.5 และภาชนะแก้วที่ใช้ในการจำลองนี้จะเป็นบีกเกอร์ขนาดมาตรฐาน 100 มิลลิลิตร มีความสูง 70 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของภาชนะแก้วต่อขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นจึงได้เปลี่ยนแปลงความหนาของภาชนะแก้ว (*g*) เป็น 1.0, 1.8, และ 2.0 มิลลิเมตร และเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกจากโพรบปลายเปิดที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกจึงได้พิจารณาองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในพิกัดทรงกระบอกคือ E_ρ , E_z และ E_t คือขนาดของสนามไฟฟ้ารวม โดยที่ E_ϕ มีค่าเป็น 0 จากสนามไฟฟ้าที่ได้จึงสามารถนำไปหาขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่น (Power distribution: P_{dist}) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.1-3.2

$$P_{dist} = \frac{|E_t|^2}{2} \quad (3.1)$$

$$E_t = \sqrt{|E_\rho|^2 + |E_\phi|^2} \quad (3.2)$$

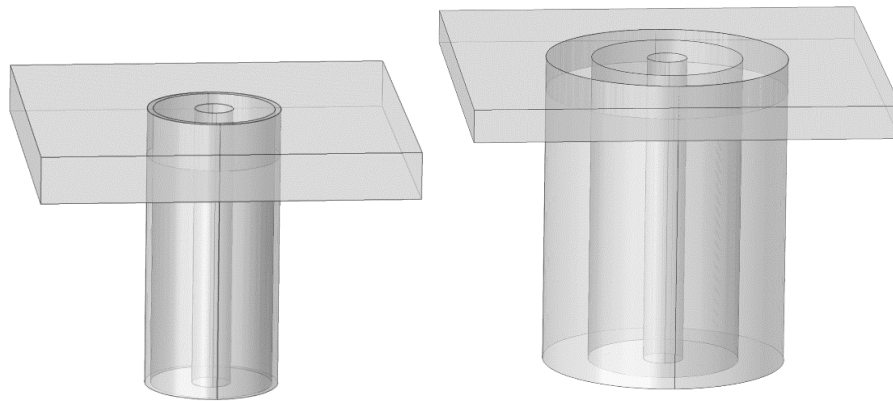


รูปที่ 3.5 การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกโดยใช้โพรบปลายเปิดด้วยเทคนิคการวัดแบบไม่สัมผัสกับวัสดุ

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของวัสดุที่ใช้ในการจำลอง [24]

วัสดุ	พารามิเตอร์	
	สภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ ϵ_r	สภาพนำไฟฟ้า σ (S/m)
น้ำกลั่น	76.58	11.91×10^{-2}
อากาศ	1.00	0.00
แก้ว	4.60	7.20×10^{-2}
ทองแดง	1.00	5.80×10^7
เทฟลอน (PTFE)	2.00	0.00

การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและขอบเขตการแผ่กระจายกำลังงานในตัวกลางที่เป็นอากาศจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีโพรบปลายเปิดชนิด SMA วางอยู่ในตัวกลางที่เป็นอากาศ และกรณีโพรบปลายเปิดชนิด N-type วางอยู่ในตัวกลางที่เป็นอากาศ แสดงตามรูปที่ 3.6 โดยแสดงขนาดขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้า E_ρ , E_z และ E_ϕ ตามลำดับ ซึ่งจะแสดงขนาดของสนามไฟฟ้าในระนาบ 2 มิติ และเพียงครั้งเดียว เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีความสมมาตรจึงแสดงสนามไฟฟ้าเพียงครั้งเดียว และแสดงขนาดต่ำสุดเท่ากับ -50 dB เมื่อกำลังงาน ณ ตำแหน่งปลายของโพรบมีค่าเป็น 0 dB

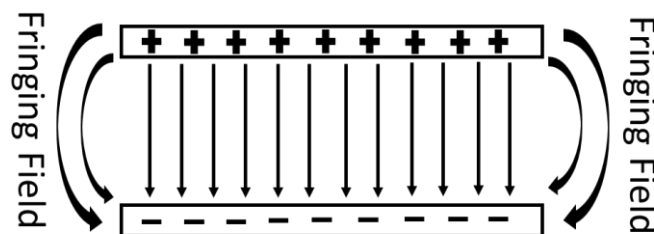


ก. โพรบปลายเปิดชนิด SMA

ข. โพรบปลายเปิดชนิด N-type

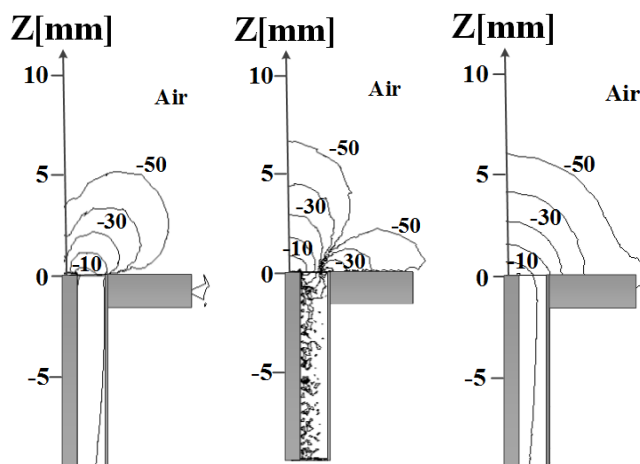
รูปที่ 3.6 โมเดลจำลองโพรบปลายเปิดชนิด SMA และ N-type ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics

สนามไฟฟ้าโดยปกติจะแผ่กระจายอยู่ภายในโพรบเพียงองค์ประกอบ E_p แต่เมื่อสนามไฟฟ้ากระจายออกสู่อากาศ สนามไฟฟ้าจากตัวนำด้านในจะกระโดดออกสู่อากาศแล้ววกกลับมายังตัวนำด้านนอก ซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Fringing field แสดงในรูปที่ 3.7

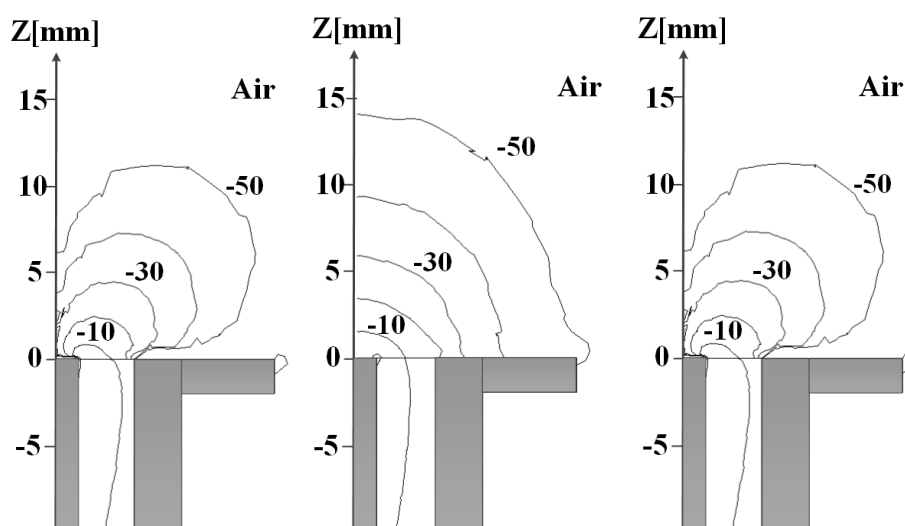


รูปที่ 3.7 ปรากฏการณ์ Fringing field

ส่งผลให้เกิดองค์ประกอบ E_z โดยขนาดขององค์ประกอบ E_p จะมีค่าสูงกว่าองค์ประกอบของ E_z จึงใช้ขนาดขององค์ประกอบ E_p เป็นค่าที่ใช้ในการนอร์มัลไลซ์ขนาดของสนามไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบ จากการจำลองพบว่า สนามไฟฟ้ารวมมีความแรงอยู่บริเวณขอบตัวนำด้านในของโพรบเช่นเดียวกันทั้งสามทิศทางเมื่อสังเกตกำลังงานที่ -40 dB และขนาดความเข้มของสนามไฟฟ้าที่บริเวณปลายของโพรบจะมีค่าลดลง จากการวิเคราะห์ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดชนิด SMA พบว่าเมื่อพิจารณากำลังงานที่ -40 dB เทียบกับบริเวณปลายของโพรบที่มีค่าเท่ากับ 0 dB พบว่ามีระยะขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นเป็น 4.5 มิลลิเมตร ในตัวกลางที่เป็นอากาศ ซึ่งแสดงตามรูปที่ 3.8-3.9



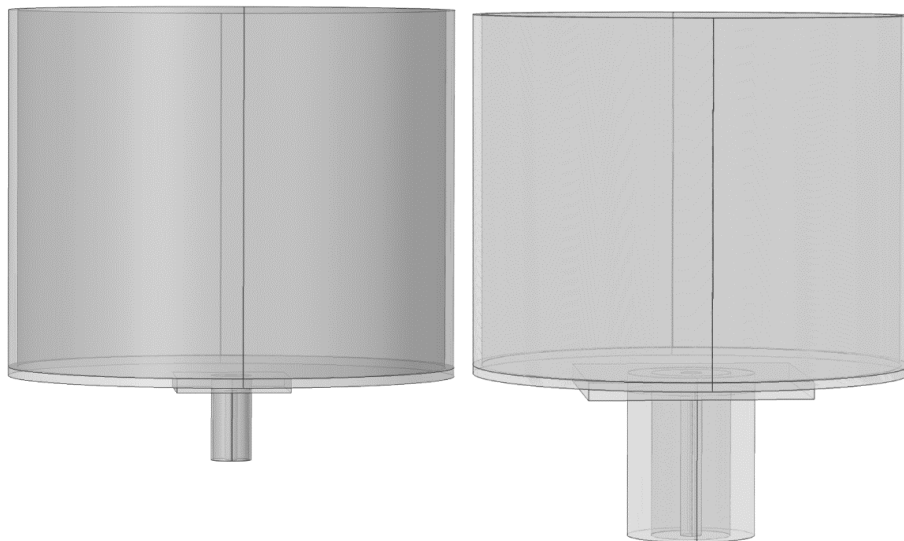
รูปที่ 3.8 ขอบเขตการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าในทิศ E_ρ , E_z และ P_{dist} ของโพรบชนิด SMA ในตัวกลางที่เป็นอากาศ



รูปที่ 3.9 ขอบเขตการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าในทิศ E_ρ , E_z และ P_{dist} ของโพรบชนิด N-type ในตัวกลางที่เป็นอากาศ

จากรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 ขนาดขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าในทิศทาง E_ρ และ E_z มีลักษณะเหมือนกับสนามไฟฟ้าของโพรบชนิด SMA กล่าวคือสนามไฟฟ้ารวมมีความแรงอยู่บริเวณขอบของตัวนำด้านใน แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าขนาดของสนามไฟฟ้าที่ระดับค่าความแรงเท่ากันพบว่า โพรบปลายเปิดชนิด N-type มีขอบเขตระยะการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าที่กว้างกว่า ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกำลังการแผ่กระจาย P_{dist} ที่ -40 dB พบว่าโพรบชนิด N-type มีระยะขอบเขตการแผ่กระจายคลื่นเท่ากับ 9 มิลลิเมตร ซึ่งจากผลการจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดทั้ง 2 ชนิดพบว่าโพรบปลายเปิดชนิด N-type มีระยะการแผ่กระจายกำลังคลื่นเป็น

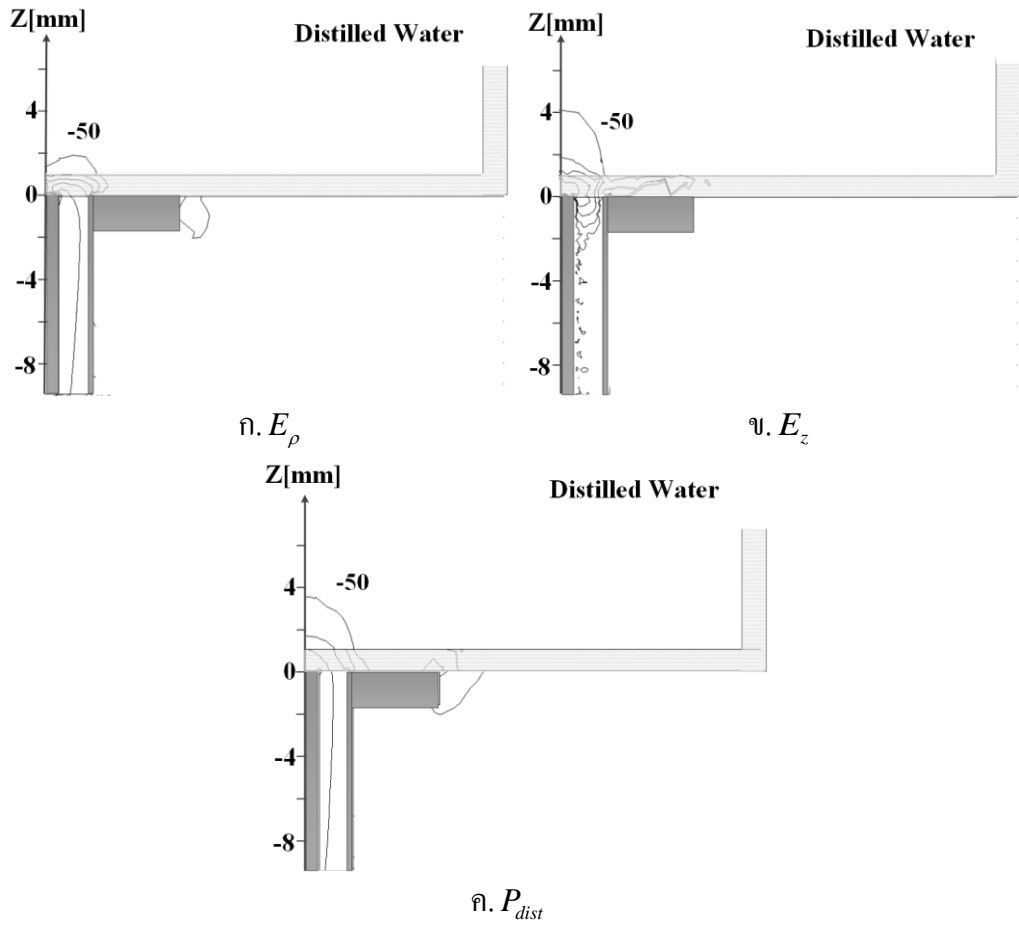
สองเท่าของโพรบปลายเปิดชนิด SMA ดังนั้นจากการจำลองโพรบปลายเปิดในตัวกลางที่เป็น อวกาศว่างของโพรบปลายเปิดชนิด SMA และชนิด N-type จึงนำไปสู่การวิเคราะห์การจำลอง ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดวางอยู่ใต้ภาชนะแก้วบรจูนน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร สูง 70 มิลลิลิตร หนา 1 มิลลิเมตร ภายในภาชนะแก้วบรจูนน้ำกลั่น แสดงตามรูปที่ 3.10 โดยการจำลองในกรณีนี้สามารถแบ่งการจำลองออกเป็น 2 กรณีคือ การจำลองขอบเขตการกระจาย สนามไฟฟ้าของโพรบปลายเปิดชนิด SMA และ การแผ่กระจายสนามไฟฟ้าของโพรบปลายเปิด ชนิด N-type ผลการจำลองได้แสดงขนาดขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าในทิศทาง E_ρ , E_z และ P_{dist} โดยได้แสดงขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นเพียงด้านเดียวเนื่องจากขอบเขตของ สนามไฟฟ้าที่ได้แผ่กระจายนั้นมีความสมมาตร และง่ายต่อการพิจารณาระยะบริเวณทดสอบ รวมถึงใช้ค่าขนาดขององค์ประกอบ E_ρ เป็นค่าที่ใช้ในการนอร์มัลไลซ์ขนาดของสนามไฟฟ้าเพื่อ เปรียบเทียบขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นที่บริเวณปลายของโพรบเป็น 0 dB และวิเคราะห์ ระยะการแผ่กระจายของกำลังคลื่นที่ -40 dB ดังรูปที่ 3.11-3.12



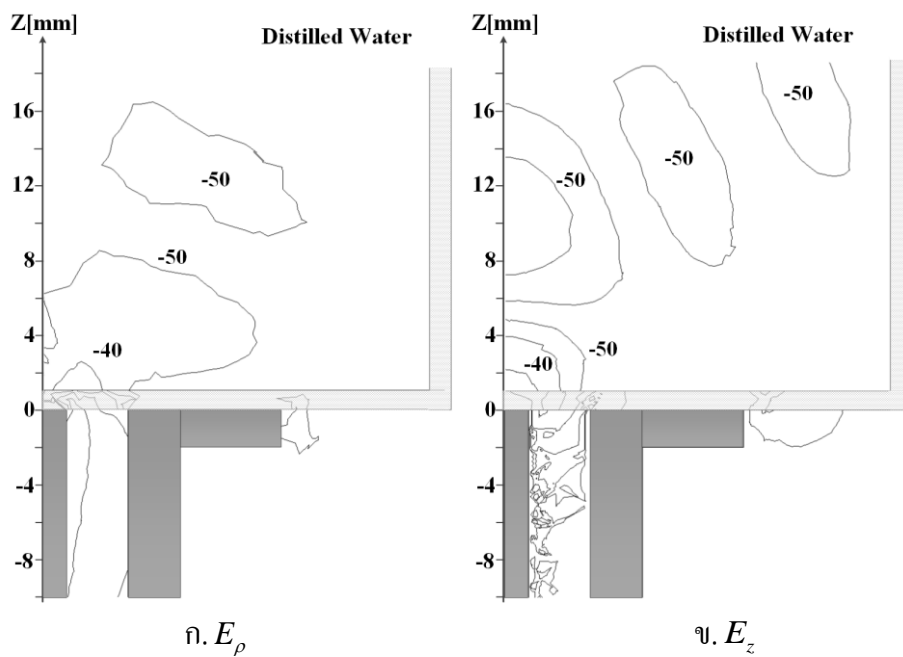
ก. โพรบปลายเปิดชนิด SMA

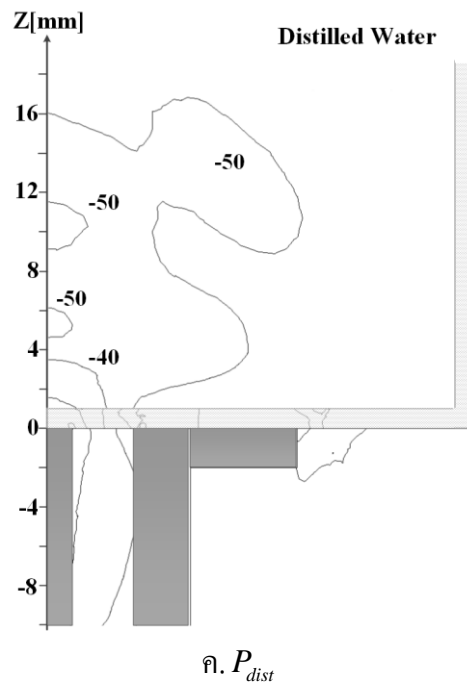
ข. โพรบปลายเปิดชนิด N-type

รูปที่ 3.10 โมเดลจำลองโพรบปลายเปิดชนิด SMA และ N-type วางอยู่ใต้ภาชนะแก้วบรจูนน้ำ กลั่นด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics



รูปที่ 3.11 การกระจายสนามไฟฟ้าของโพรบชนิด SMA ผ่านภาชนะแก้วหนา 1 มิลลิเมตร
 สู่ น้ำกลั่นในทิศทาง E_ρ , E_z และ P_{dist}

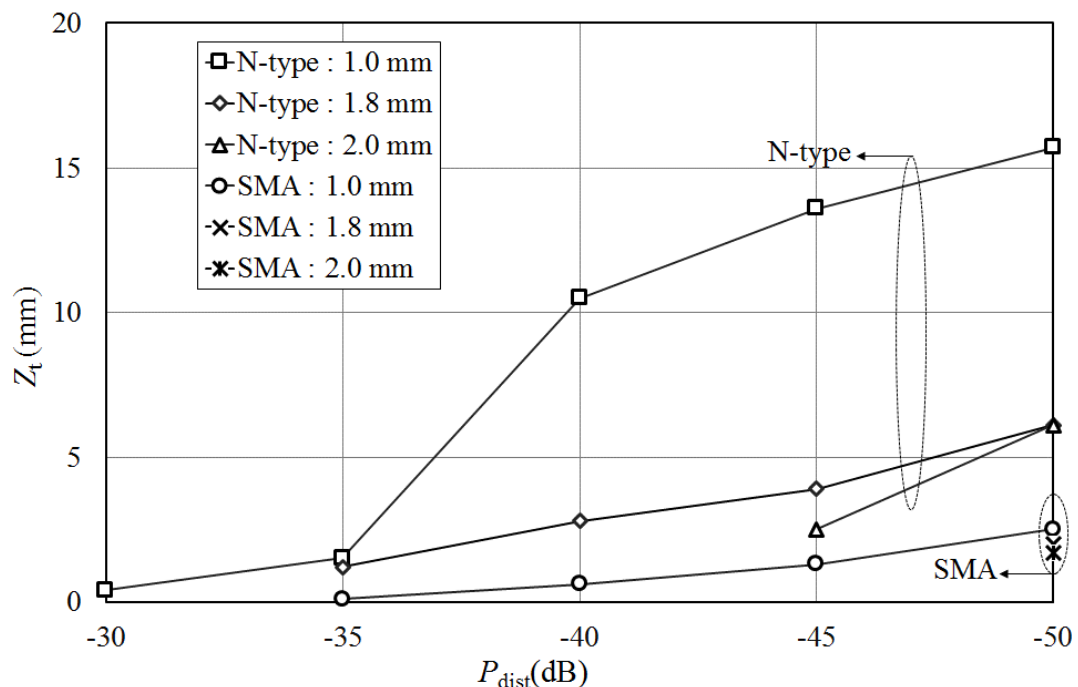




รูปที่ 3.12 การกระจายสนามไฟฟ้าของโพรบชนิด N-type ผ่านภาชนะแก้วหนา 1 มิลลิเมตร
 คู่ น้ำกลั่นในทิศทาง E_ρ , E_z และ P_{dist}

จากผลจำลองพบว่าขอบเขตการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าของโพรบปลายเปิดชนิด SMA วางอยู่ที่ภาชนะแก้วหนา 1 มิลลิเมตร บรรจุ น้ำกลั่น พบว่าขนาดของสนามไฟฟ้ามีความแรงอยู่บนขอบด้านในตัวนำ และขอบเขตของสนามไฟฟ้าจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับโพรบวางอยู่ในอากาศ สนามไฟฟ้าที่ลดลงเนื่องจากมีภาชนะแก้วชั้นระหว่างโพรบกับน้ำกลั่น เมื่อพิจารณาขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบชนิด SMA พบว่าขอบเขตการแผ่กระจายส่วนใหญ่อยู่บริเวณแก้ว คลื่นสามารถทะลุผ่านภาชนะแก้ว น้ำกลั่น ได้เพียงเล็กน้อย โดยโพรบชนิด SMA มีระยะขอบเขตการแผ่กระจายผ่านภาชนะแก้วหนา 1 มิลลิเมตร แผ่กระจายได้ 1.5 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาจากกำลังงานที่ -40 dB ซึ่งเมื่อพิจารณาจากระดับตัวอย่ง น้ำกลั่นที่ใช้ยังมีค่าน้อยจึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดไดอิเล็กตริกของของเหลวด้วยเทคนิคแบบไม่สัมผัส ขอบเขตการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าและการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดชนิด N-type มีรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นเช่นเดียวกับโพรบชนิด N-type แต่มีระยะขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นมากกว่าโพรบปลายเปิดชนิด SMA โดยมีระยะขอบเขตของบริเวณทดสอบเท่ากับ 3.5 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณากำลังงานที่ -40 dB จากการจำลองกำลังงานของโพรบทั้งสองชนิดพบว่าโพรบปลายเปิดทั้งสองชนิดไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดคุณสมบัติของน้ำกลั่นในภาชนะแก้วหนา 1 มิลลิเมตรได้ เนื่องจากมีขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำที่ใส่ลงไป ในภาชนะแก้วปิกเกอร์ จึงได้ทำการวิเคราะห์ระยะการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบ

ปลายเปิดเมื่อวางไว้ได้ภาชนะแก้วบีกเกอร์ขนาดต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบผลของความหนาของภาชนะต่อระยะขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่น โดยเปลี่ยนแปลงความหนาของภาชนะแก้วแตกต่างกันดังนี้คือ 1.0 1.8 และ 2.0 มิลลิเมตร โดยเปรียบเทียบระยะการแผ่กระจายกำลังคลื่นกับความหนาแสดงตามรูปที่ 3.13 ผลการจำลองพบว่าเมื่อความหนาของภาชนะเพิ่มขึ้นบริเวณขอบเขตการกระจายกำลังงานจะลดลงและโพรบชนิด N-type สามารถกระจายกำลังงานผ่านภาชนะแก้วได้ดีกว่าโพรบชนิด SMA ซึ่งผลการจำลองที่ได้สามารถนำโพรบปลายเปิดชนิด N-type ไปประยุกต์ใช้งานในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของของเหลวด้วยวิธีแบบไม่สัมผัสกับวัสดุ โดยพิจารณาจากภาชนะแก้วที่หนาน้อยที่สุดมาประยุกต์ใช้ในการวัด เป็นต้น



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ของระยะการแผ่กระจายกำลังคลื่นจากภาชนะแก้ว 1.0 1.8 และ 2.0 มิลลิเมตร สู่ น้ำกลั่น

ผลการจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นผ่านภาชนะแก้วแต่ละขนาดสามารถสรุปได้ดังนี้คือ ระยะการแผ่กระจายกำลังคลื่นมีระยะลดลงแปรผกผันตามความหนาของภาชนะแก้ว กล่าวคือยิ่งภาชนะแก้วมีความหนาน้อยขอบเขตการแผ่กระจายสนามไฟฟ้ายิ่งมีระยะมากขึ้น และเมื่อวิเคราะห์ผลการจำลองระยะการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดผ่านภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่นด้วยวิธีแบบไม่สัมผัส พบว่าระยะการแผ่กระจายยังมีปริมาณไม่มากพอสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำอย่างขึ้น เนื่องจากมีระยะขอบเขตการแผ่กระจายสูงสุดที่ 10 มิลลิเมตร ซึ่งยังมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำที่ใส่ในภาชนะแก้ว

3.2 การจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลม

จากการจำลองขอบเขตการแผ่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของโพรบปลายเปิดผ่านภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่น พบว่าระยะการแผ่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้ายังมีค่าน้อย จึงทำการจำลองศึกษาขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมผ่านภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่น โดยสายอากาศแพทช์ถูกจำลองให้สามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 2.45 GHz โดยการจำลองได้แบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่สายอากาศแพทช์วางอยู่ได้ภาชนะที่เป็นแก้วเปล่าและกรณีที่สายอากาศแพทช์วางอยู่ได้ภาชนะแก้วที่บรรจุน้ำกลั่น รูปแบบการจำลองแสดงตามรูปที่ 3.14 ซึ่งในการจำลองจะทำการป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณแบบโคแอกเซียลเชื่อมต่อด้วยคอนเน็คเตอร์แบบแกนร่วมชนิด SMA โดยในการจำลองสายอากาศแพทช์จะถูกวางอยู่ได้ภาชนะแก้วขนาด 100 มิลลิเมตร ความสูง 70 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และมีความหนา 1 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังได้ทำการออกแบบสายแพทช์แบบวงกลมให้มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

วิธีการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิคแบบไม่สัมผัสกับวัสดุโดยใช้สายอากาศแพทช์นั้นเป็นการวัดค่าการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟหรือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟ โดยสายอากาศแพทช์ที่ใช้ในการส่งผ่านคลื่นนั้นจะเป็นชนิดสายอากาศแพทช์แบบวงกลม เนื่องจากสายอากาศแพทช์แบบวงกลมเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างแบบสมมาตรส่งผลให้สนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกมามีความสมมาตรด้วย ดังนั้นสายอากาศแพทช์แบบวงกลมจึงมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้วัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำกลั่นด้วยเทคนิคแบบไม่สัมผัสกับวัสดุ การออกแบบสายอากาศแพทช์แบบวงกลมนั้นสามารถคำนวณรัศมีของแพทช์ได้จากสมการที่ 3.3

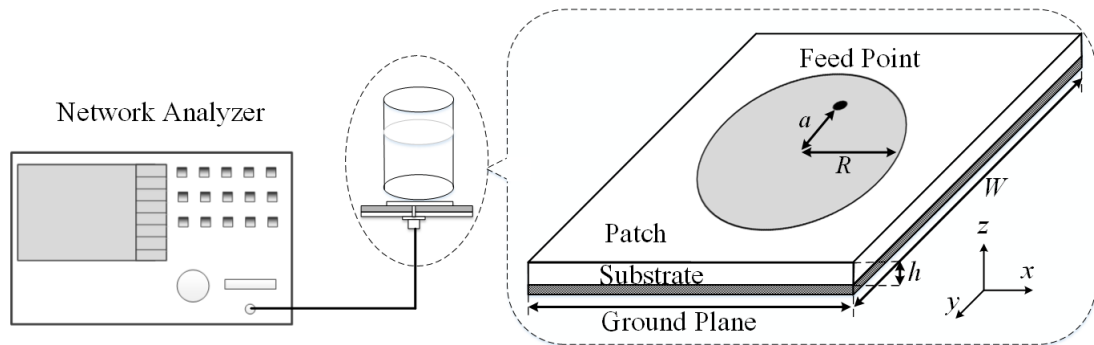
$$R = \frac{F}{\left[1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right]^2} \quad (3.3)$$

เมื่อ $F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}}$ โดยที่ R คือ รัศมีของแพทช์วงกลม, h คือความหนาของวัสดุฐานรอง

(Substrate), f_r คือ ความถี่ที่ต้องการใช้งาน และ ϵ_r คือ สภาพยอมทางไฟฟ้า

จากสมการข้างต้นที่กล่าวมานั้นสามารถออกแบบสายอากาศแพทช์แบบวงกลมที่ความถี่ 2.45 GHz ได้โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแผ่น PCB (FR4 0.8mm Blank PCB board Double Side 12x18" 1 oz) [23] ดังนี้คือ ค่าวัสดุฐานรองหนา 0.8 มิลลิเมตร ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า

เท่ากับ 4.36 ซึ่งจากการคำนวณพบว่า จะได้ค่ารัศมีของแพทช์ (R) เท่ากับ 17 มิลลิเมตร เมื่อจำลอง โมเดลสายอากาศด้วยโปรแกรม COMSOL multiphysics พบว่าตำแหน่งป้อนสัญญาณ a เท่ากับ 7 มิลลิเมตร เมื่อเทียบจากจุดศูนย์กลาง และมีระนาบกราวด์เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด (W) เท่ากับ 45 มิลลิเมตร แสดงตามรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกโดยใช้สายอากาศแพทช์แบบวงกลมด้วยวิธีแบบไม่สัมผัส

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองขอบเขตการแผ่กระจายสนามไฟฟ้า [24]

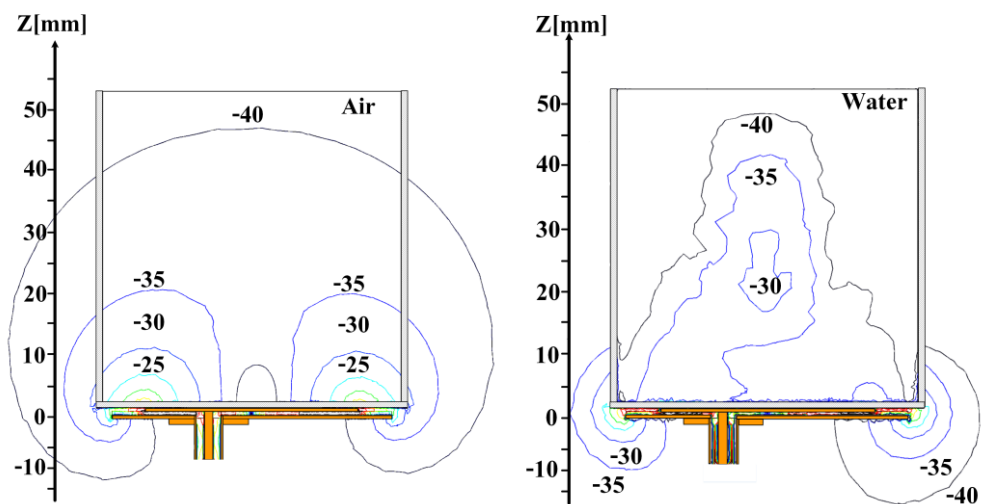
วัสดุ	พารามิเตอร์	
	สภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์, ϵ_r	สภาพนำไฟฟ้า, $\sigma(s/m)$
น้ำกลั่น	76.58	1.191
อากาศ	1.00	0
แก้ว	4.60	0.072
ทองแดง	1.00	5.8×10^7
เทฟลอน (PTFE)	2.00	0
วัสดุฐานรอง	4.36	0.017

จากผลการคำนวณและการจำลองสายอากาศแพทช์ที่สามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 2.45 GHz จากนั้นได้ทำการจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมรัศมี 17 มิลลิเมตร โดยที่สายอากาศแพทช์ที่ออกแบบจะวางอยู่ใต้ภาชนะแก้วที่เป็นแก้วเปล่า และกรณีที่สายอากาศแพทช์ถูกวางไว้ใต้ภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่น การจำลองดังกล่าวจะใช้ค่าพารามิเตอร์ตาม

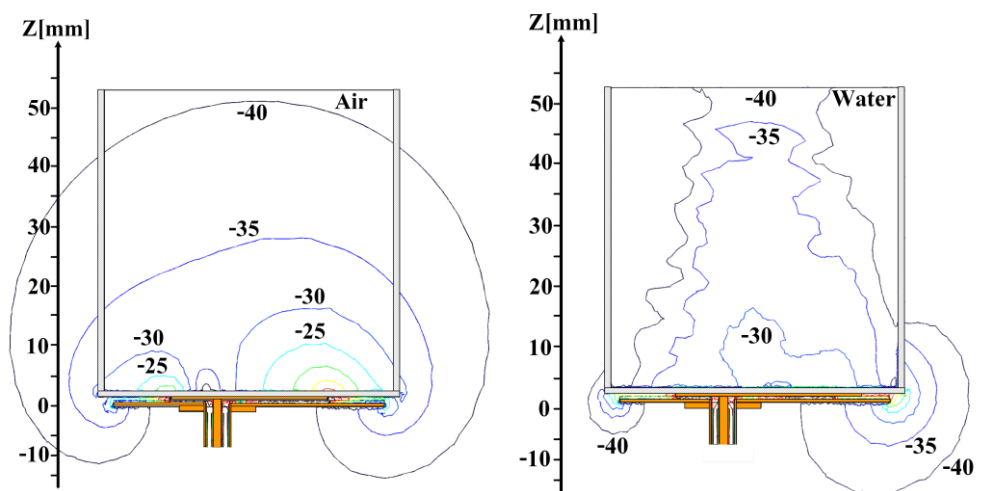
ตามตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะถูกใส่ลงในโปรแกรม COMSOL multiphysics โมเดลการจำลองจะแสดงตามรูปที่ 3.15 การจำลองดังกล่าวจะพิจารณาขนาดของกำลังคลื่นเพียงด้านเดียวคือด้าน yz เนื่องจากในระนาบนี้จะมีขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นที่ไม่สมมาตร ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นที่วิเคราะห์จะแสดงต่ำสุดเท่ากับ -40 dB เมื่อกำลังงาน ณ ตำแหน่งผิวของแพทช์วงกลมเป็น 0 dB เนื่องจากระดับกำลังงานที่น้อยกว่า -40 dB มีผลกับค่ากำลังที่สะท้อนกลับน้อย [15] นอกจากนี้ยังได้ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของรัศมีจากสายอากาศแพทช์เดิมเป็น 13 มิลลิเมตร 9 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร ตามลำดับ ตำแหน่งจุดป้อนสัญญาณก็ได้ทำการลดเป็นสัดส่วนเดียวกับรัศมีที่ลดลงเป็น 5.4 มิลลิเมตร 3.7 มิลลิเมตร และ 1.7 มิลลิเมตร แต่การจำลองที่ขนาดของรัศมีที่ลดลงนั้นสายอากาศจะไม่ตอบสนองที่ความถี่ 2.45 GHz ยังต้องทำการแก้ไขเพิ่มเติม แต่การจำลองดังกล่าวเพื่อเป็นการวิเคราะห์ระยะของขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นจึงทำการนอโมไลซ์ค่าที่บริเวณตำแหน่งของผิวสายอากาศแพทช์วงกลมให้มีค่าเท่ากับ 0 dB ซึ่งผลการจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมวางอยู่ภายใต้ภาชนะแก้วเปล่าและภายใต้แก้วบรรจุน้ำกลั่นจะแสดงตามรูปที่ 3.16-3.19



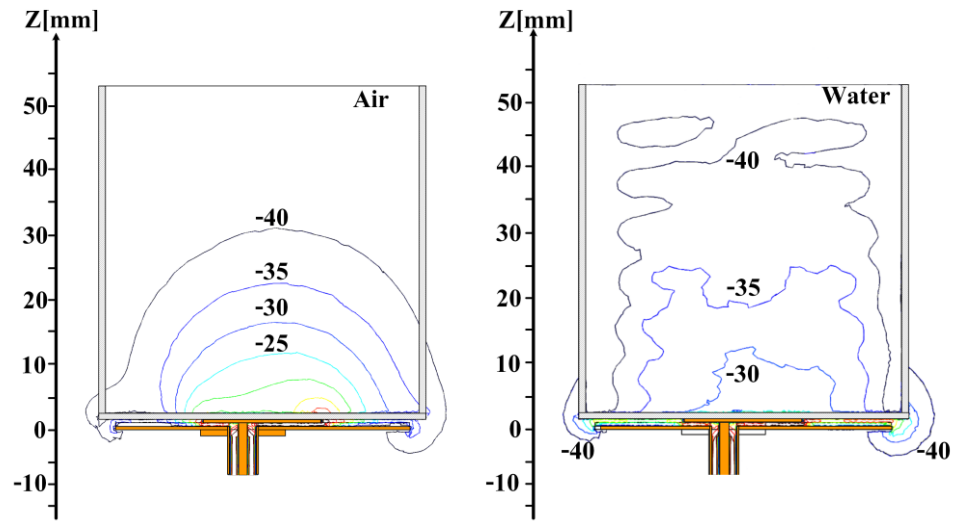
รูปที่ 3.15 โมเดลจำลองสายอากาศแพทช์แบบวงกลมวางอยู่ใต้ภาชนะแก้วด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics



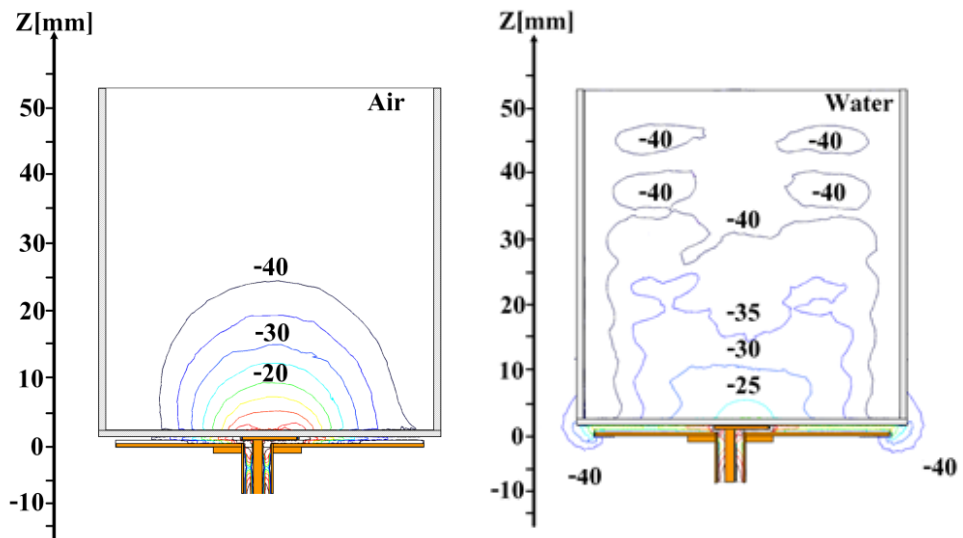
รูปที่ 3.16 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมที่มีรัศมีเป็น 17 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.17 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมที่มีรัศมีเป็น 13 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.18 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมที่มีรัศมีเป็น 9 มิลลิเมตร



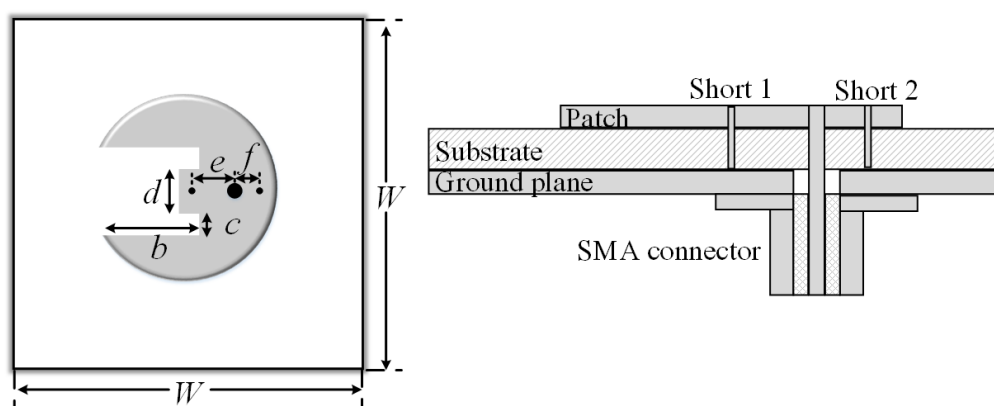
รูปที่ 3.19 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมที่มีรัศมีเป็น 4 มิลลิเมตร

จากผลการจำลองพบว่าขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมที่รัศมี 17 มิลลิเมตร จะมีความแรงมากที่สุดบริเวณปลายของสายอากาศแพทช์ เมื่อตั้งเกดขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นที่ -40 dB ซึ่งจะมีระยะขอบเขตของบริเวณทดสอบเป็น 45 มิลลิเมตร ทั้งในกรณีที่เป็นแก้วเปล่าและแก้วบรรจุน้ำกลั่น ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์รัศมี 17 มิลลิเมตร ยังมีกำลังคลื่นแผ่กระจายออกมาภายนอกภาชนะแก้วเป็นจำนวนมาก ดังนั้นสายอากาศแพทช์แบบวงกลมรัศมี 17 มิลลิเมตร จึงไม่เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางข้นในภาชนะแก้ว เมื่อลดขนาดรัศมีของสายอากาศแพทช์ลงเป็น 13 มิลลิเมตรผลการจำลองพบว่าขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นในบริเวณที่ทดสอบมีการแผ่กระจายออกมาภายนอกภาชนะแก้วและมีระยะขอบเขตการแผ่กระจายเป็นระยะ 50 มิลลิเมตร และเมื่อใส่น้ำกลั่นลงไปในภาชนะแก้วขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นยังคงแผ่กระจายออกมาภายนอกภาชนะแก้วอยู่ ดังนั้นรัศมีของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาด 13 มิลลิเมตร จึงยังคงไม่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางข้น ต่อมาเป็นสายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดรัศมี 9 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศรัศมี 9 มิลลิเมตรนั้นจะมีการแผ่กระจายกำลังคลื่นอยู่ภายในภาชนะแก้วและมีระยะการแผ่กระจายคลื่นเป็น 30 มิลลิเมตร และยังมีขอบเขตของบริเวณทดสอบแผ่กระจายออกมาจากภาชนะแก้วเพียงเล็กน้อยเมื่อภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่น ต่อมาเป็นผลการจำลองของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดรัศมีของแพทช์เป็น 4 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่ามีระยะขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นอยู่ภายในภาชนะแก้ว โดยมีระยะการแผ่เท่ากับ 25 มิลลิเมตร และในกรณีที่แก้วบรรจุน้ำกลั่นจะมีขอบเขตการแผ่กระจายออกมาภายนอกภาชนะแก้วเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับรัศมีของแพทช์ขนาดต่างๆ แต่การนำสายอากาศที่มีขนาดเล็กมากไปทำการแมทซ์ซึ่งให้งานที่ความถี่ 2.45 GHz นั้นเป็นเรื่องยากและนอกจากนี้การสร้างชิ้นงานจริงก็เป็นไปได้ยากเช่นกัน

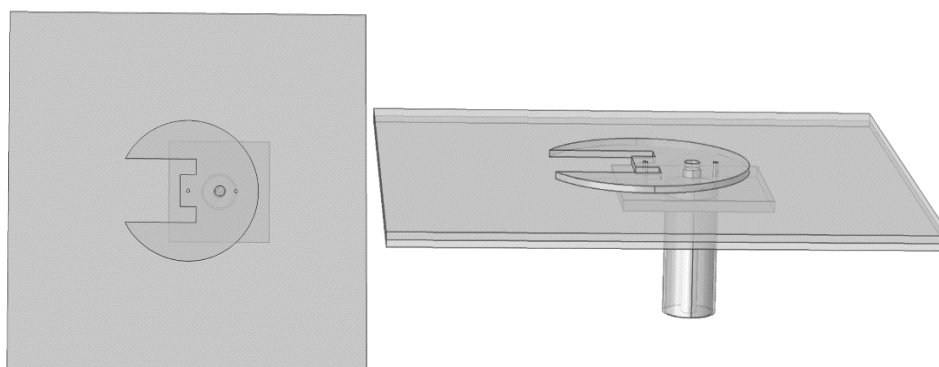
ดังนั้นสายอากาศแพทช์แบบวงกลมที่มีรัศมีเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งของน้ำยางข้นต่อไปคือ สายอากาศอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดรัศมี 9 มิลลิเมตร โดยมีขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ แต่การจะนำสายอากาศแพทช์รัศมี 9 มิลลิเมตร ไปประยุกต์ใช้งานนั้นจะต้องทำการแมทซ์ซึ่งสายอากาศให้สามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 2.45 GHz ก่อน จึงได้ทำการออกแบบสายอากาศแบบวงกลมขนาดเล็ก (Miniaturized antenna) ซึ่งเรียกสายอากาศที่ออกแบบนี้ว่า สายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดเล็ก (Miniaturized Circular Patch antenna : MCP antenna)

3.3 การออกแบบสายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดเล็ก (MCP antenna)

สายอากาศ MCP antenna ได้ออกแบบมาให้มีขนาดของรัศมีเพียง 9 มิลลิเมตร และสามารถใช้งานได้ที่สองความถี่ คือ 2.45 GHz กับ 5.8 GHz ซึ่งการออกแบบนั้นสามารถทำได้ โดยการใช้เทคนิคการเพิ่มโหลดแบบร่อง (Slit load) ร่วมกับเทคนิคการลัดวงจร (Short pin) [14] เพื่อให้สายอากาศที่มีขนาดเล็กตอบสนองที่ความถี่ต่ำลงได้ โดยสายอากาศที่ออกแบบนั้นมี โครงสร้างแสดงตามรูปที่ 3.20 และ 3.21



รูปที่ 3.20 โครงสร้างของสายอากาศ



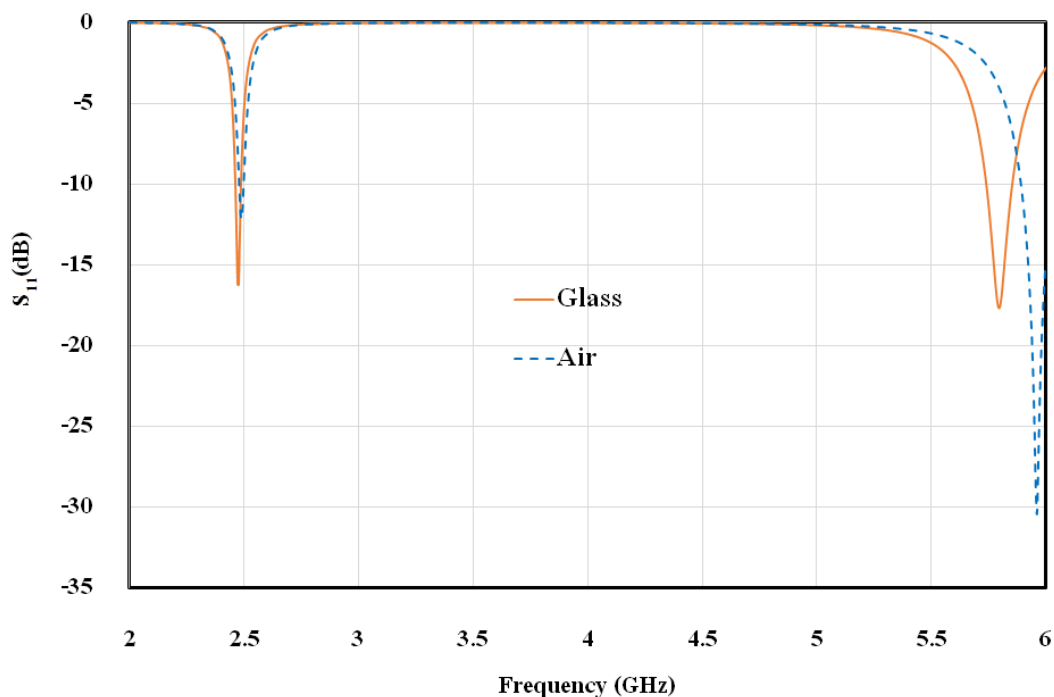
รูปที่ 3.21 โครงสร้างของสายอากาศ MCP จากการจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL multiphysics

การออกแบบสายอากาศ MCP นั้นจะเริ่มต้นจากการจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL multiphysics เพื่อที่จะสามารถปรับพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น การใช้เทคนิคการเพิ่มโหลดแบบร่อง (Slit load) และเทคนิคการลัดวงจร (short pin) เป็นต้น เพื่อให้สายอากาศแพทช์แบบ

วงกลมขนาดรัศมี 9 มิลลิเมตร สามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 2.45 GHz และที่ความถี่ 5.8 GHz ทำการจำลองและปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมสำหรับการนำไปสร้างเป็นสายอากาศจริง นอกจากนี้แล้วยังได้ทำการแมทซ์ซึ่งสายอากาศ MCP กับภาชนะแก้วเปล่า เพื่อเพิ่มระยะขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นเมื่อสายอากาศถูกวางไว้ใต้ภาชนะแก้ว แสดงตามรูปที่ 3.22 การออกแบบดังกล่าวได้พิจารณาความเหมาะสมของค่าพารามิเตอร์โดยดูจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของการจำลองที่ความถี่ 2.45 และ 5.8 GHz ให้มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนลดต่ำกว่า -10 dB การออกแบบดังกล่าวยังไม่ได้พิจารณาค่าแบนด์วิดท์เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่ได้ต้องการสร้างสายอากาศเพื่อต้องการส่งข้อมูลจึงไม่จำเป็นต้องให้แบนด์วิดท์ครอบคลุมแบนด์ 2.4-2.5 GHz



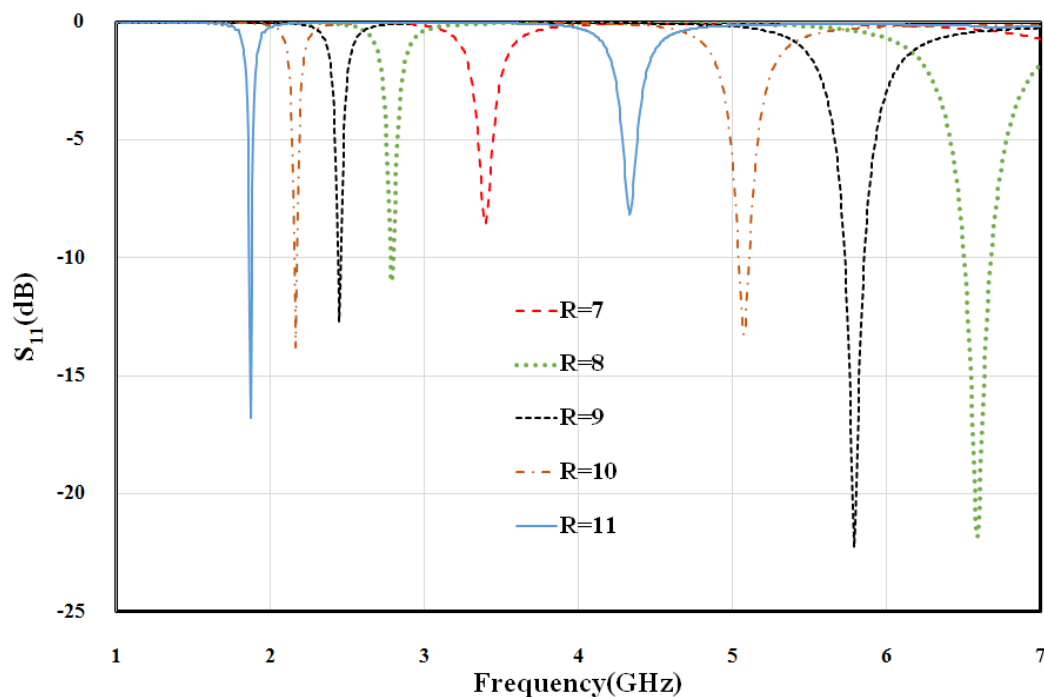
รูปที่ 3.22 การจำลองสายอากาศ MCP เมื่อวางอยู่ใต้ภาชนะแก้วเปล่าด้วยโปรแกรม COMSOL multiphysics



รูปที่ 3.23 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP เมื่อวางอยู่ในอากาศและวางอยู่ใต้ภาชนะแก้วเปล่า

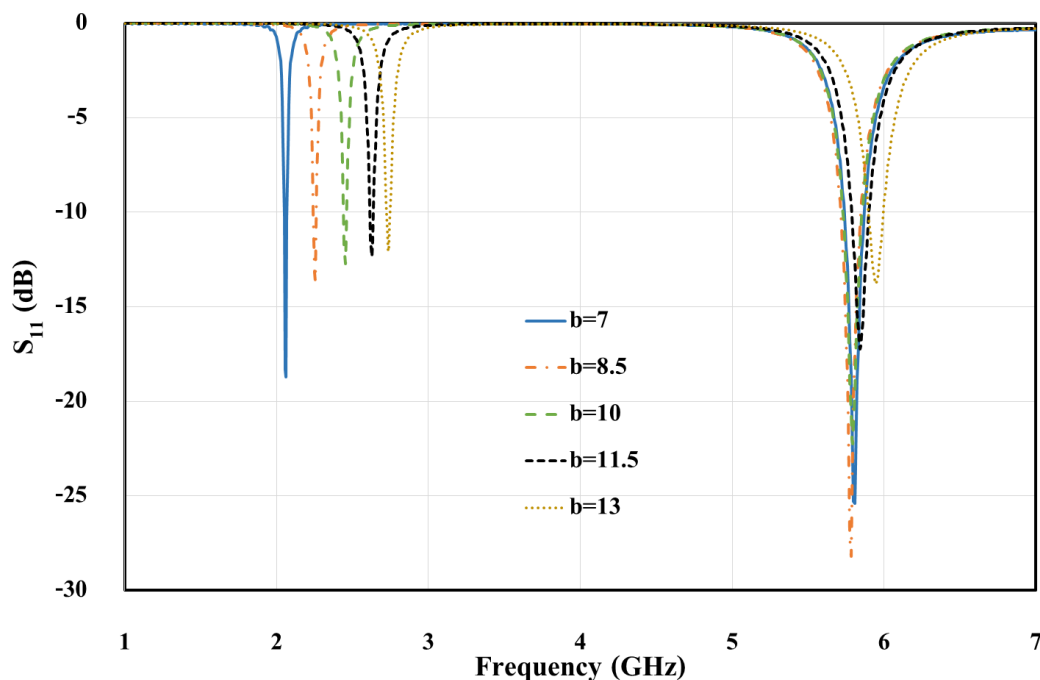
จากผลการออกแบบสายอากาศ MCP และผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสดงตามมีรูปที่ 3.23 พบว่าสายอากาศ MCP เมื่อวางอยู่ในอากาศจะมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ (ความถี่ที่ตอบสนอง) ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz โดยสายอากาศ MCP จะสามารถใช้งานได้ทั้ง 2 ความถี่ คือที่ความถี่ 2.45 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็น -12 dB และที่ความถี่ 5.8 GHz จะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็น -30 dB เมื่อสายอากาศ MCP วางอยู่ใต้ภาชนะแก้วพบว่าความถี่เรโซแนนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย กล่าวคือความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่าลดลงหรือต่ำลง ซึ่งผลการจำลองที่ได้จะนำสู่การปรับจูนสายอากาศให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ โดยทำการจำลองและปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้คือ

1. จำลองการเปลี่ยนแปลงรัศมีเป็น 7.0, 8.5, 10.0, 11.5 และ 13.0 มิลลิเมตร แสดงตามรูปที่ 3.24
2. จำลองการเปลี่ยนแปลงความยาวของโหนดแบบร่อง แสดงตามรูปที่ 3.25
3. จำลองการเปลี่ยนแปลงการตัดวงจรจุดที่ 1 และจุดที่ 2 แสดงตามรูปที่ 3.26 และ 3.27



รูปที่ 3.24 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรัศมี

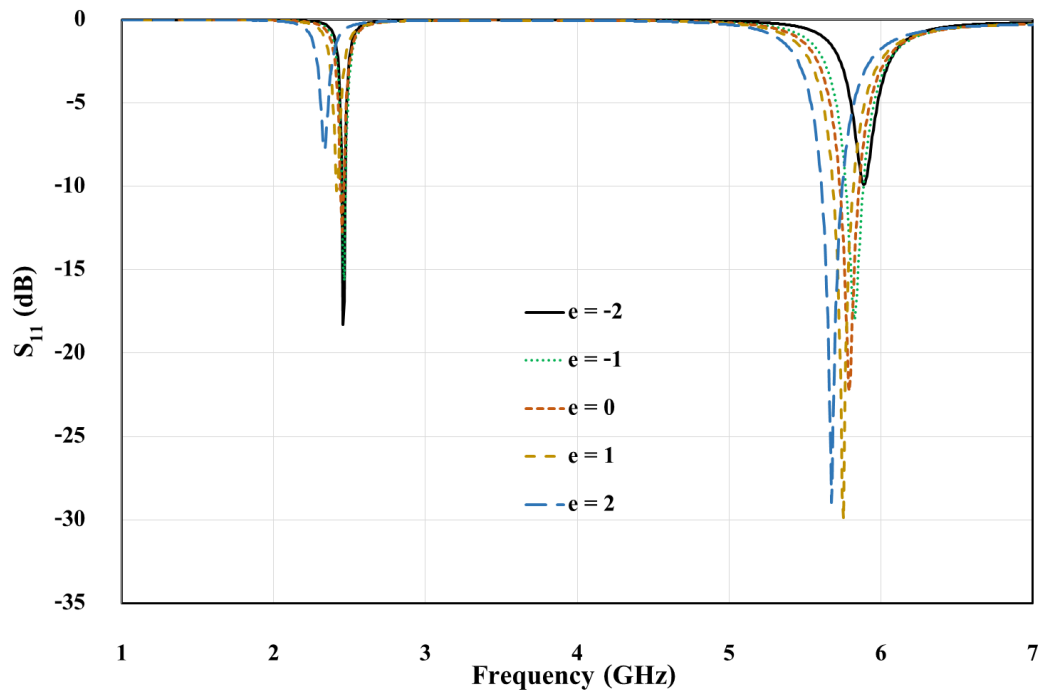
จากผลการจำลองตามรูปที่ 3.24 ซึ่งเป็นผลการจำลองจากการเปลี่ยนแปลงขนาดรัศมีของสายอากาศ MCP ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าเมื่อขนาดรัศมีของสายอากาศ MCP มีขนาดเพิ่มขึ้นความถี่เรโซแนนซ์ก็จะลดลงตามไปด้วย กล่าวคือขนาดของรัศมีมีค่าแปรผกผันกับความถี่เรโซแนนซ์ โดยจะเป็นการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ในสเกลที่ใหญ่ กล่าวคือเป็นการเลื่อนความถี่ตามที่ต้องการได้กว้าง



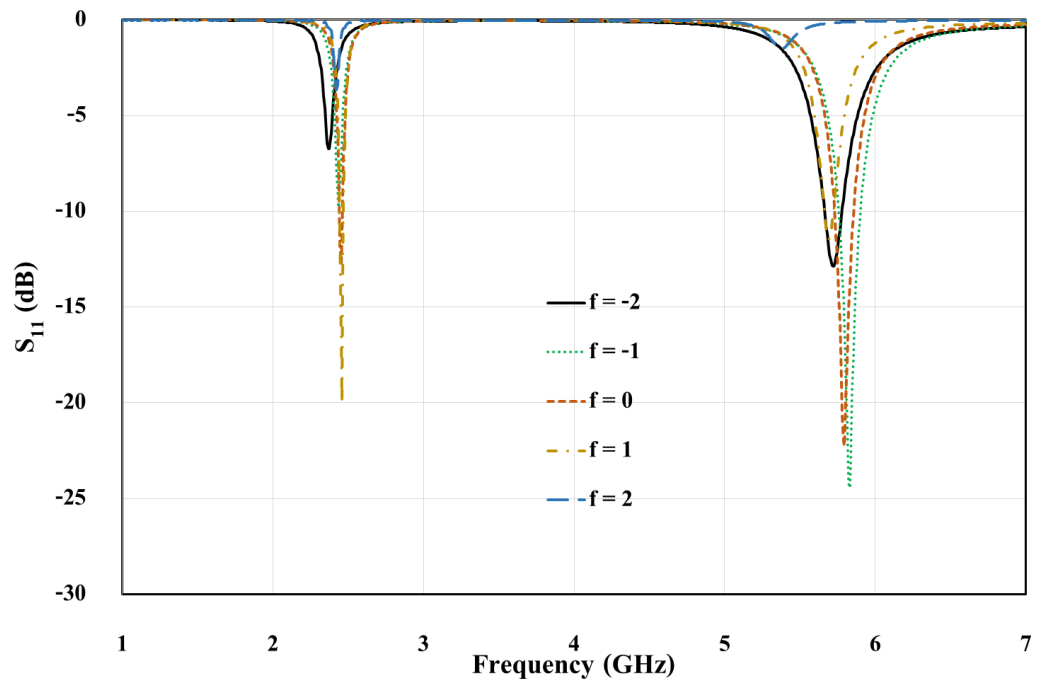
รูปที่ 3.25 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP เมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวของโหลดแบบร่อง (ความยาวของ L)

จากการจำลองตามรูปที่ 3.25 เป็นการเปลี่ยนแปลงความยาวของโหลดแบบร่อง ซึ่งพบว่าโหลดแบบร่องจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์เล็กน้อยเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงขนาดรัศมีของสายอากาศ MCP ความถี่ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความยาวของโหลดแบบร่องคือความถี่ 2.45 GHz แต่ที่ความถี่ 5.8 จะมีการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์น้อย ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบร่องจึงเหมาะสมสำหรับการต้องการแมทซ์ซึ่งเฉพาะความถี่ 2.45 GHz โดยที่ความถี่ 5.8 GHz ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบร่องยังช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนดีขึ้นจึงสามารถนำมาใช้ในการปรับจูนค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนได้อีกด้วย

การจำลองการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการลัดวงจรของจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ตามรูปที่ 3.26-3.27 โดยการเปลี่ยนแปลงการลัดวงจรที่ละตำแหน่งจากตำแหน่งเดิมเป็น -2,-1,0,1,2 มิลลิเมตรตามลำดับ จากการจำลองพบว่าเมื่อมีเปลี่ยนแปลงจุดลัดวงจร จะมีผลการตอบสนองที่ความถี่ 5.8 GHz มากกว่าที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งจุดลัดวงจรทั้ง 2 ตำแหน่งจะให้ผลการเปลี่ยนแปลงความถี่ลักษณะเช่นเดียวกัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดลัดวงจรจึงเหมาะสมสำหรับการต้องการแมทซ์ซึ่งที่ความถี่ 5.8 GHz



รูปที่ 3.26 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP เมื่อเปลี่ยนแปลงจุดลัดวงจรที่ 1 (e)

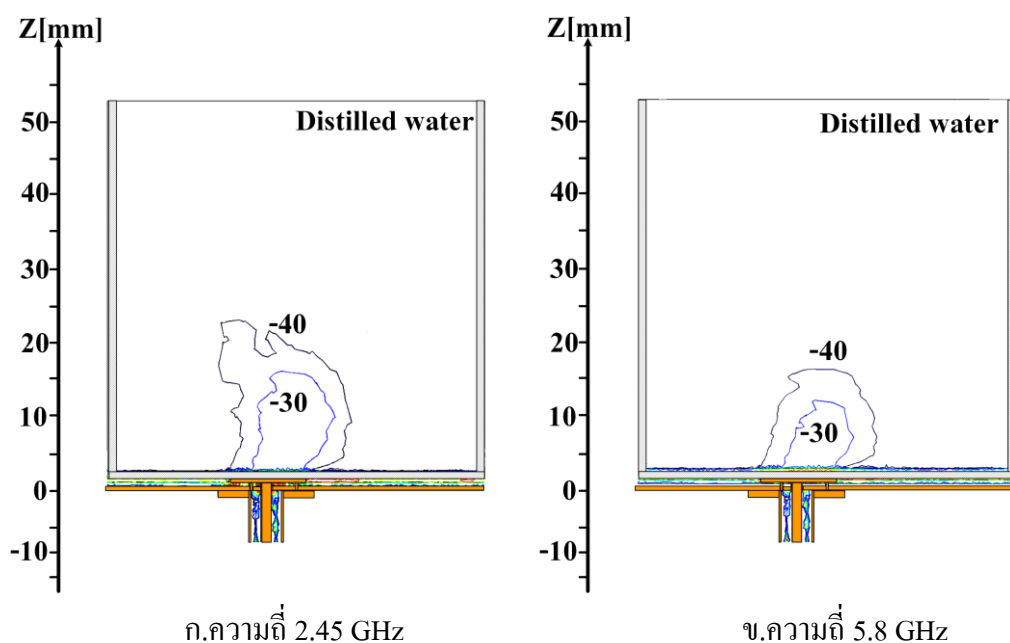


รูปที่ 3.27 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP เมื่อเปลี่ยนแปลงจุดลัดวงจรที่ 2 (f)

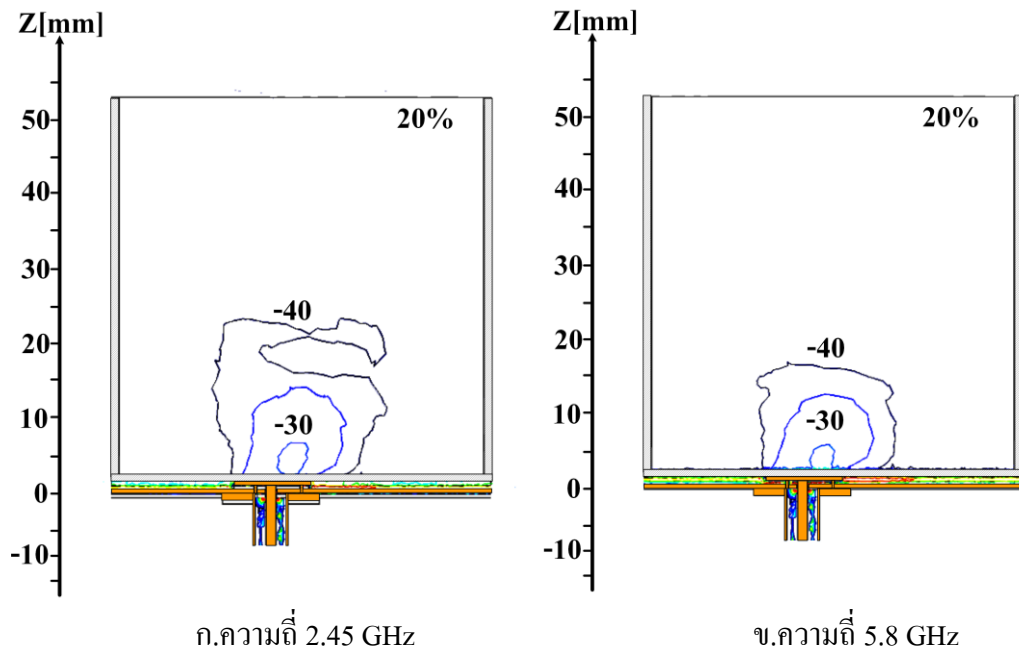
จากผลการจำลองและการออกแบบสายอากาศ MCP จนได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปสร้างเป็นชิ้นงาน ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้มีดังนี้คือ $w = 45$ มิลลิเมตร $b = 9$ มิลลิเมตร $c = 2$ มิลลิเมตร $d = 4$ มิลลิเมตร $e = 4$ มิลลิเมตร และ $f = 6$ มิลลิเมตร โดยวัสดุที่ใช้จำลองสายอากาศแพทช์คือแผ่น PCB วัสดุฐานรองหนา 0.8 มิลลิเมตร และ FR4 ที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็น 4.36 สายอากาศชนิดนี้ใช้การป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลคอนเน็คเตอร์แบบแกนร่วมขนาดมาตรฐานชนิด SMA จากการจำลองที่ได้จึงนำไปสู่การสร้างชิ้นงานจริงและทดสอบ

3.4 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP เมื่อวางใต้ภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่น

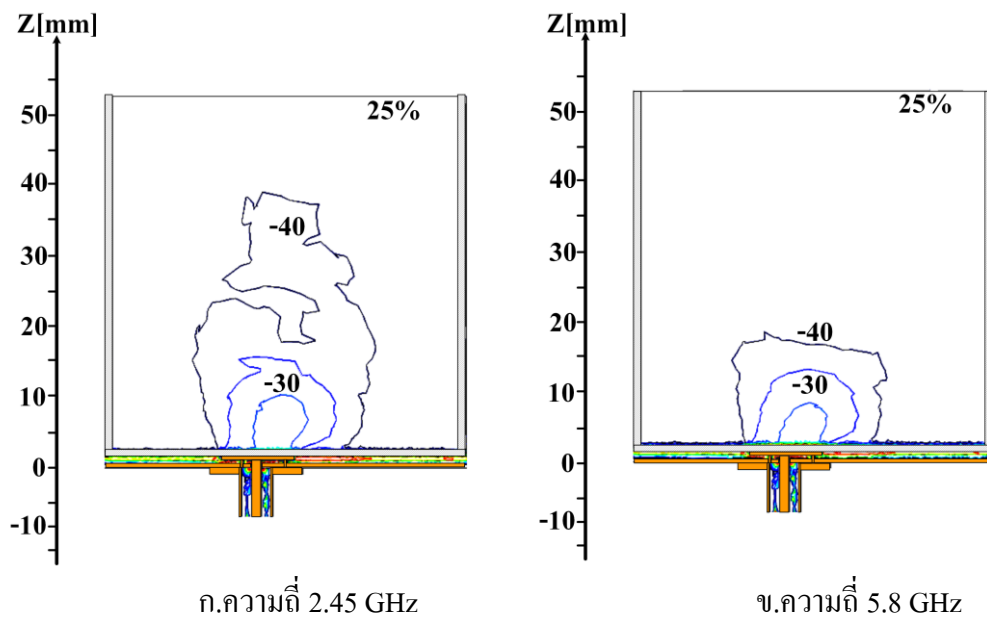
สายอากาศ MCP ที่ได้ออกแบบตามข้างต้น ซึ่งได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดคุณสมบัติของน้ำยางข้นแล้ว จากนั้นจึงได้นำสายอากาศ MCP ที่ได้จากการออกแบบมาทำการจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่น โดยในการจำลองนั้นจะนำสายอากาศ MCP วางอยู่ใต้ภาชนะแก้วปิกเกอร์บรรจุน้ำกลั่น การพิจารณาผลการจำลองจะพิจารณาจากระยะขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นที่ 2 ความถี่คือ 2.45 GHz และ 5.8 GHz แสดงตามรูปที่ 3.25 นอกจากนี้ยังได้จำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP เมื่อวางอยู่ใต้ภาชนะแก้วบรรจุน้ำยางข้นที่มีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งเป็น 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงตามรูปที่ 3.28-3.37



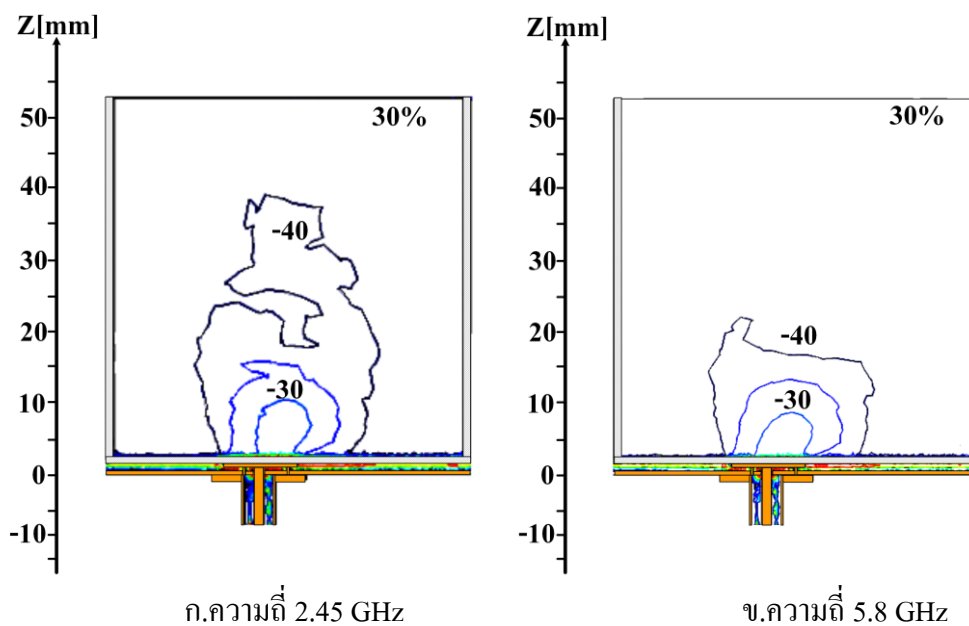
รูปที่ 3.28 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP ผ่านภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่น



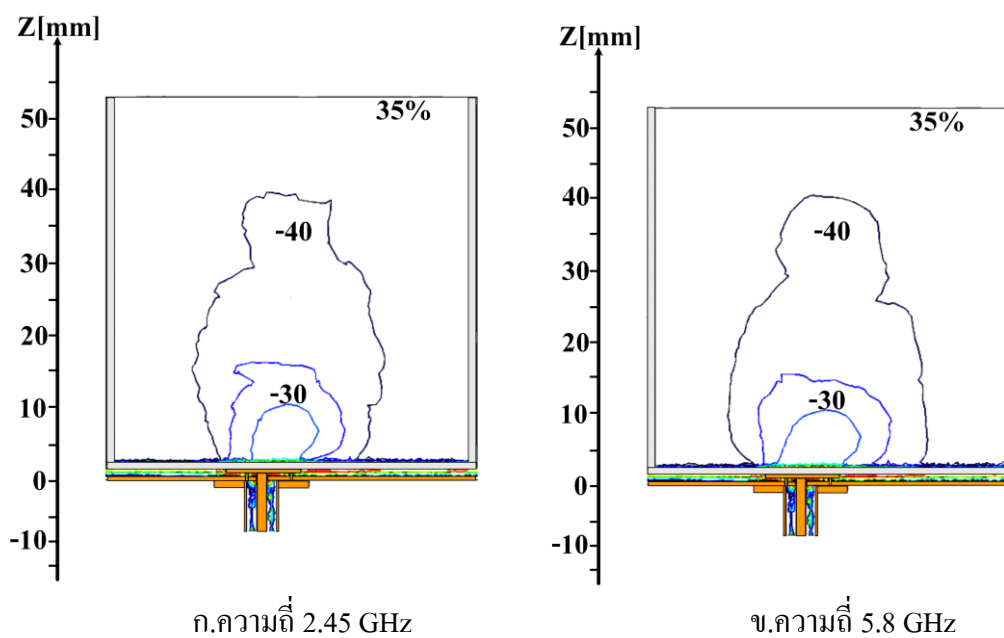
รูปที่ 3.29 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP ผ่านภาชนะแก้ว
บรรจุน้ำอย่างชื้นความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์



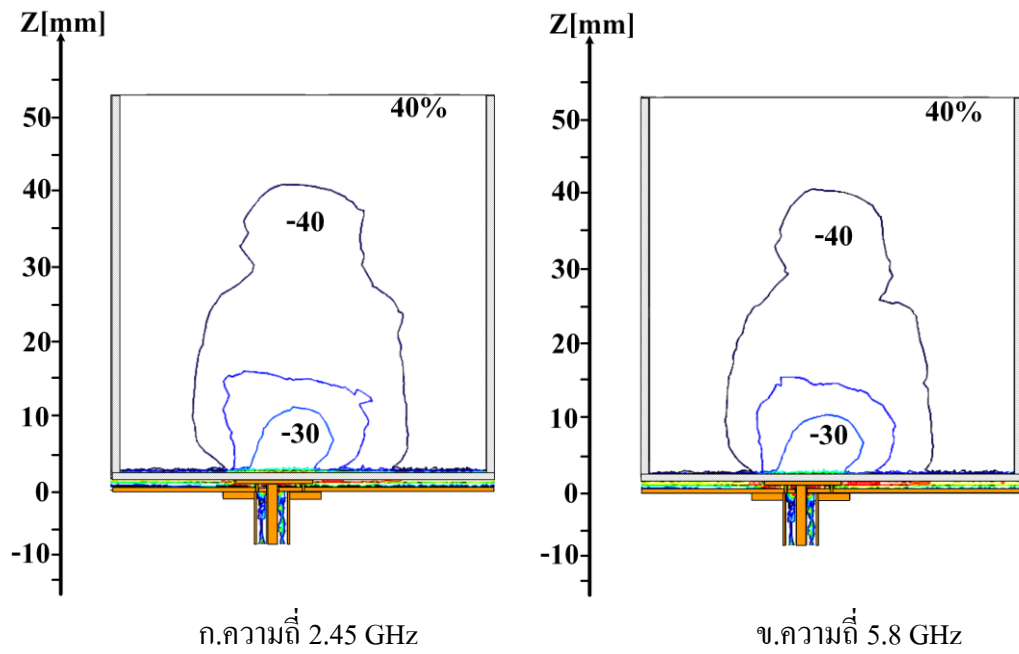
รูปที่ 3.30 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP ผ่านภาชนะแก้ว
บรรจุน้ำอย่างชื้นความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์



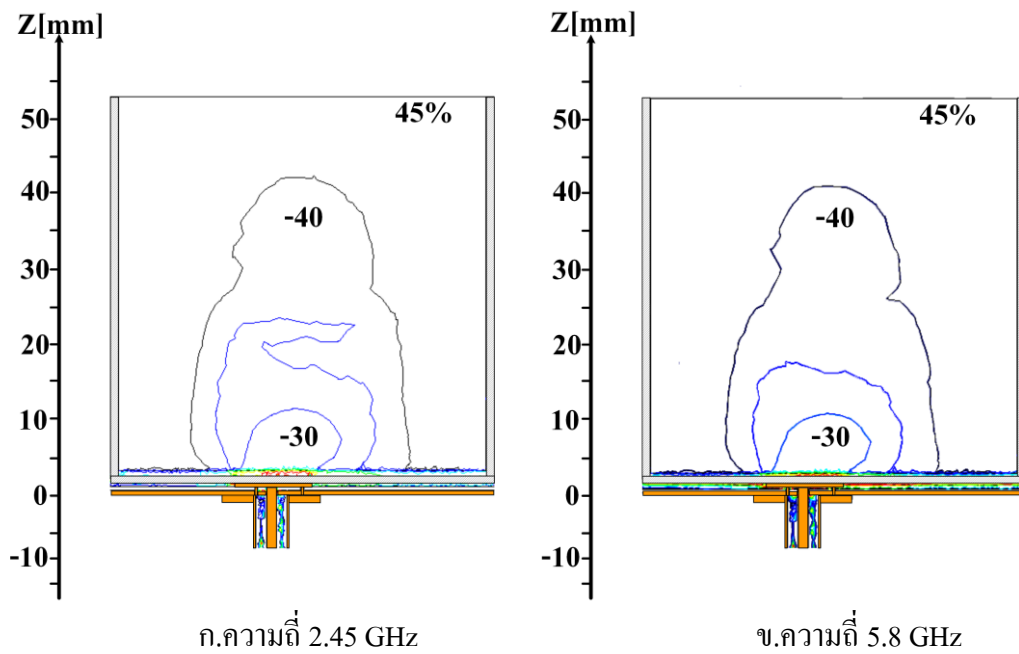
รูปที่ 3.31 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP ผ่านภาชนะแก้ว
บรรจุน้ำอย่างชื้นความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์



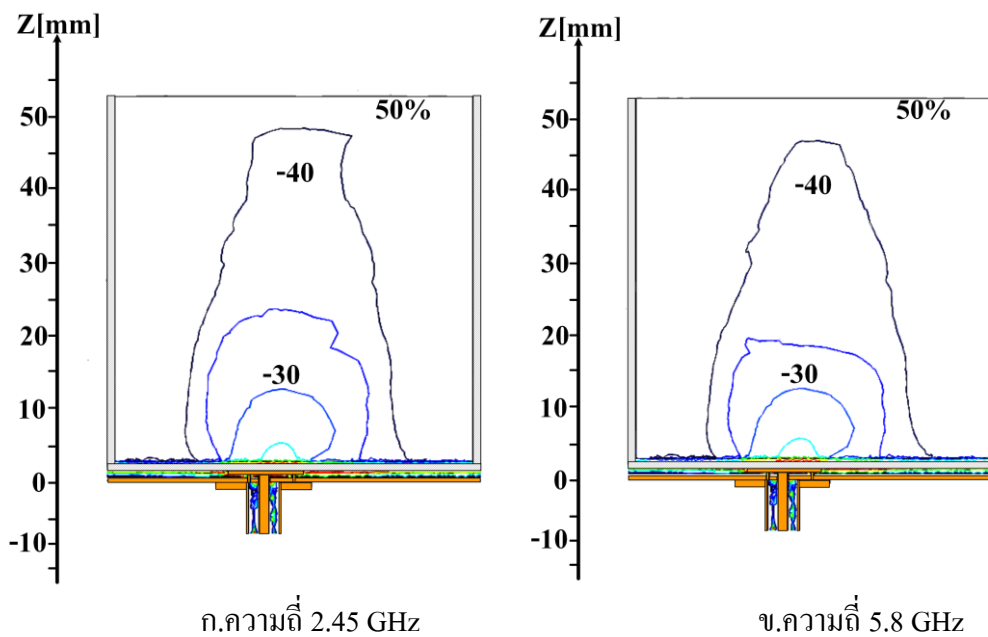
รูปที่ 3.32 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP ผ่านภาชนะแก้ว
บรรจุน้ำอย่างชื้นความเข้มข้น 35 เปอร์เซ็นต์



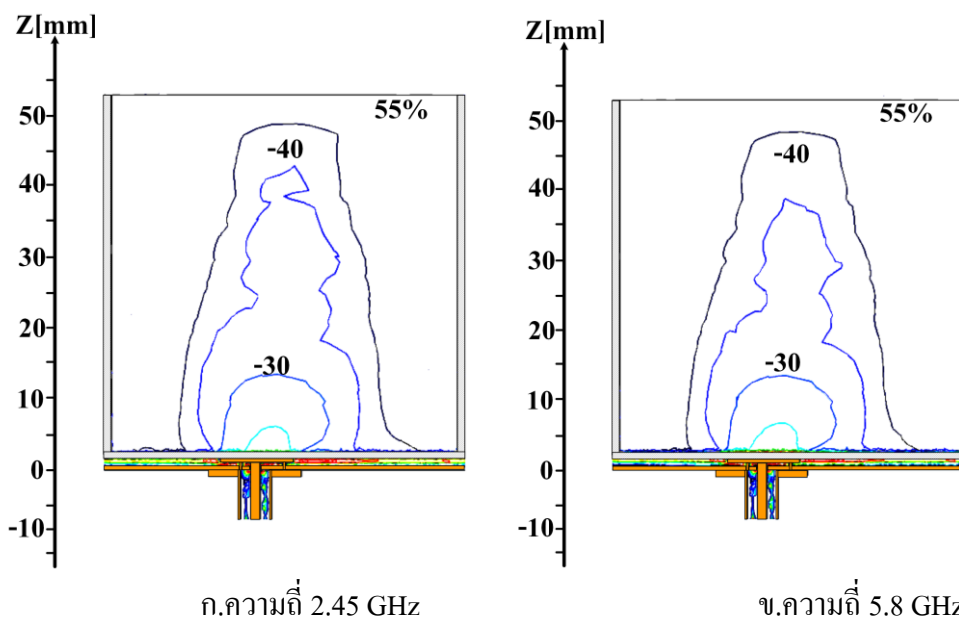
รูปที่ 3.33 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP ผ่านภาชนะแก้ว
บรรจุน้ำอย่างชื้นความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์



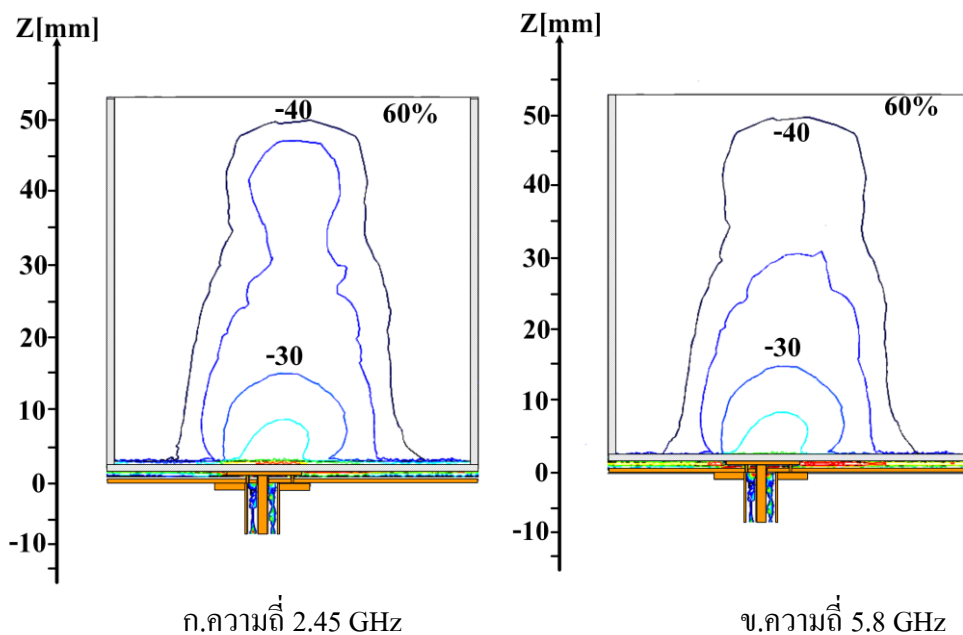
รูปที่ 3.34 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP ผ่านภาชนะแก้ว
บรรจุน้ำอย่างชื้นความเข้มข้น 45 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.35 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP ผ่านภาชนะแก้ว
บรรจุน้ำอย่างชื้นความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์



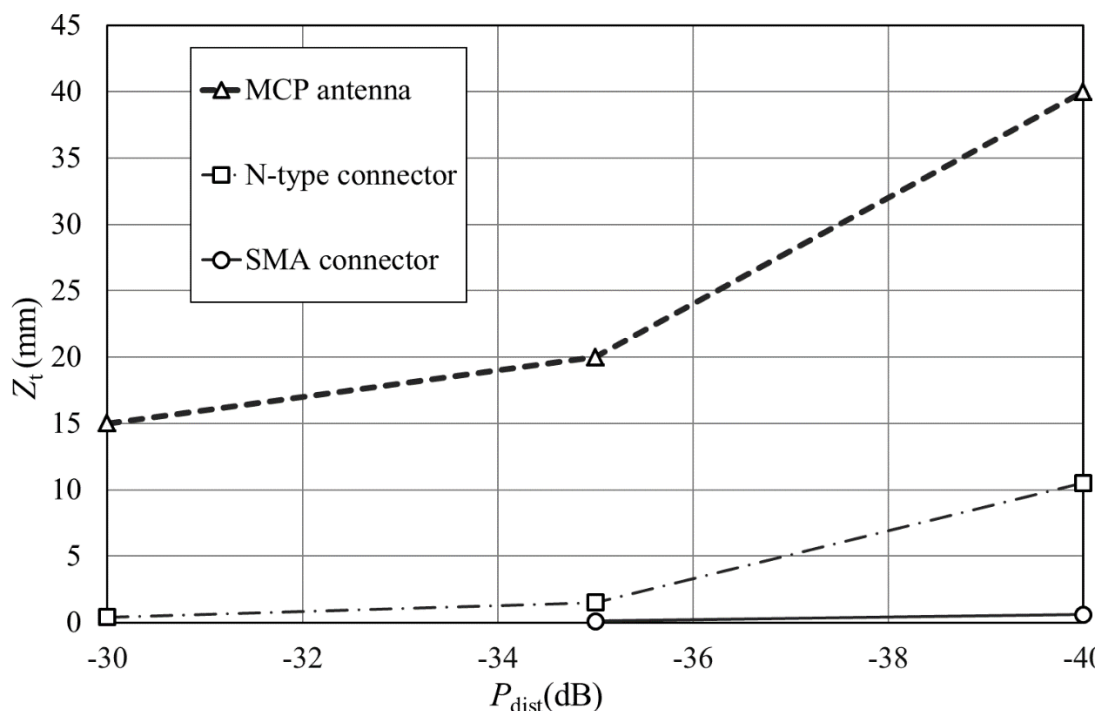
รูปที่ 3.36 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP ผ่านภาชนะแก้ว
บรรจุน้ำอย่างชื้นความเข้มข้น 55 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.37 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP ผ่านภาชนะแก้วบรรจุน้ำอย่างชันความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์

จากผลการจำลองตามรูปที่ 3.28-3.37 พบว่าระยะขอบเขตบริเวณทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz จะมีระยะแผ่กระจายเป็น 25 มิลลิเมตรเมื่อสายอากาศ MCP วางอยู่ใต้ภาชนะแก้วบรรจุน้ำคลื่น และที่ความถี่ 5.8 GHz จะมีระยะการแผ่กระจายเป็น 15 มิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าระยะการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP ยังมีค่ามากกว่าระยะการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดเป็นจำนวนมาก และหากน้ำมีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กทริกที่ลดลงทั้งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าความนำจะส่งผลให้ระยะการแผ่กระจายสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้น จากการจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP วางอยู่ใต้ภาชนะแก้วบรรจุน้ำอย่างชันความเข้มข้น 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสายอากาศ MCP มีขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นอยู่ในภาชนะแก้วและมีระยะขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของน้ำที่ผสมอยู่ในน้ำอย่างชันมีค่าน้อยลง กล่าวคือน้ำอย่างชันความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์จะให้ระยะการแผ่กระจายกำลังคลื่นมากที่สุดโดยพิจารณาที่กำลังคลื่น -40 dB โดยมีระยะการแผ่กระจายถึง 50 มิลลิเมตร หรือกล่าวได้ว่าค่าระยะการแผ่กระจายกำลังคลื่นจะแปรผกผันกับค่าปริมาณน้ำที่ผสมในน้ำอย่างชัน ดังนั้นจากการจำลองที่ได้พบว่าสายอากาศ MCP นั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของน้ำกลั่นด้วยวิธีแบบไม่สัมผัสได้

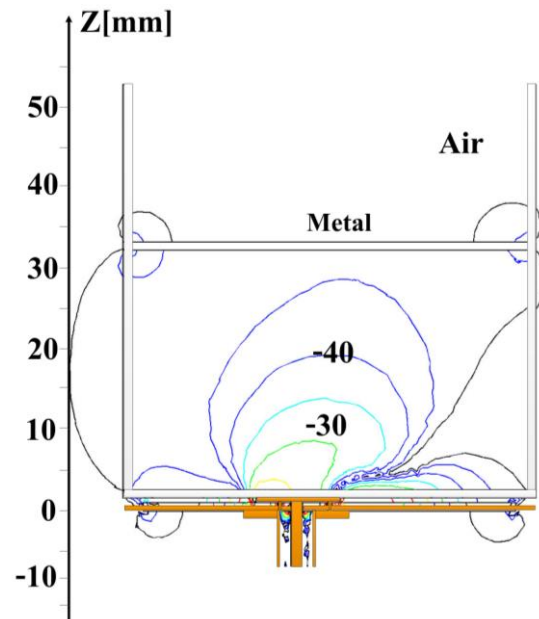
นอกจากนี้ ยังได้ทำการเปรียบเทียบระยะขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP กับ โพรบปลายเปิดชนิด N-type และ โพรบปลายเปิดชนิด SMA แสดงตามรูปที่ 3.38 ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่าระยะการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP จะมีระยะการแผ่กระจายกำลังคลื่นมากกว่าระยะการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดชนิด N-type และ ชนิด SMA ดังนั้นสรุปได้ว่าสายอากาศ MCP มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้วัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางชั้นด้วยเทคนิคแบบไม่สัมผัส



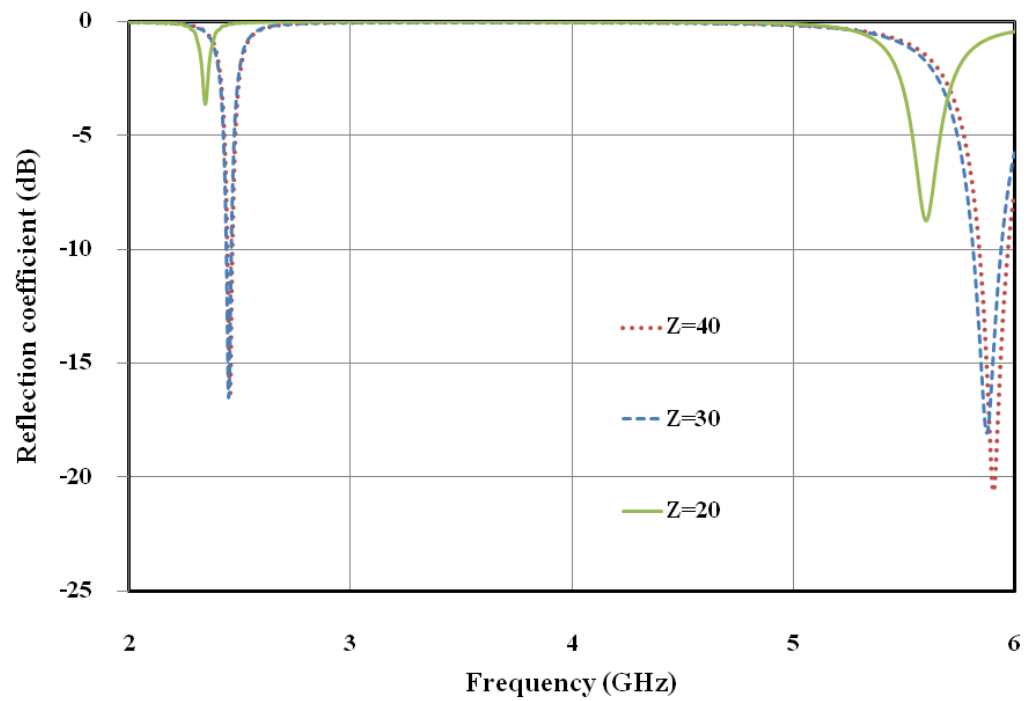
รูปที่ 3.38 ผลการเปรียบเทียบระยะขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP กับ โพรบชนิด N-type และ SMA

3.5 การจำลองค่ากำลังคลื่นเพื่อตรวจสอบขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่น

การจำลองค่ากำลังคลื่นเพื่อตรวจสอบผลของระยะขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศนั้นสามารถทำได้เช่นเดียวกับการจำลองค่ากำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดจากที่กล่าวมาข้างต้น [15] โดยการเพิ่มแผ่นทองแดงขนาดเท่ากับรัศมีของบีกเกอร์ 50 มิลลิเมตร ลงไปในภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่น จากนั้นทำการลดระยะของแผ่นทองแดงลงมาจากจุดปลายสุดของแก้วจนถึงก้นของแก้ว วิเคราะห์ค่าขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นที่เปลี่ยนแปลงร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เปลี่ยนแปลง โดยผลของระยะขอบเขตการแผ่กระจายจะแสดงตามรูปที่ 3.39 และ 3.40



รูปที่ 3.39 การทดสอบใส่แผ่นเหล็กเพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นผ่านภาชนะแก้วบรรจุอากาศ

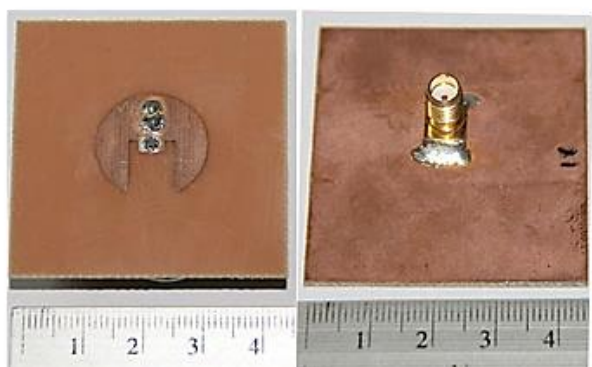


รูปที่ 3.40 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อใส่แผ่นเหล็กเข้าไปในแก้วระยะ 10, 20 และ 30 เซนติเมตร

จากผลการจำลองตามรูปที่ 3.39-3.40 พบว่าเมื่อแผ่นเหล็กเลื่อนลงมาถึงตำแหน่งที่ 30 มิลลิเมตร และมีกำลังคลื่นที่ -40 dB จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังที่สะท้อนกลับเพิ่มมากขึ้น ซึ่งกำลังคลื่นที่ -40 dB จะมีกำลังมากพอที่จะสามารถกลับสะท้อนเข้ามายังสายอากาศ MCP ได้ ซึ่งจะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะยิ่งแผ่นเหล็กเข้าใกล้สายอากาศมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้ก็จะมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากำลังคลื่นที่ -40 dB จะมีผลต่อค่ากำลังสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟ การพิจารณาขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นที่ -40 dB จึงมีค่าที่เหมาะสมที่จะนำสายอากาศ MCP ที่ได้จากการจำลองมาประยุกต์ใช้งานในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางชั้นด้วยเทคนิคแบบไม่สัมผัสได้

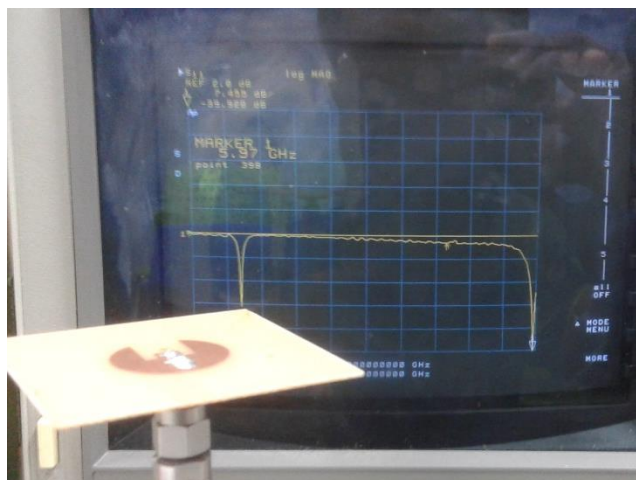
3.6 ผลการสร้างสายอากาศ MCP

สายอากาศ MCP เป็นสายอากาศที่ได้ออกแบบโดยใช้เทคนิคการเพิ่มโหลดแบบร่อง (Slit load) ร่วมกับเทคนิคการลัดวงจร (short pin) ซึ่งได้ทำการจำลองและปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ด้วยโปรแกรม COMSOL multiphysics จนได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสามารถตอบสนองได้ 2 ความถี่ คือ 2.45 GHz และ 5.8 GHz โดยสายอากาศ MCP จะถูกสร้างขึ้นด้วยแผ่น PCB (FR4 0.8mm Blank PCB board Double Side 12x18" 1 oz) [23] ชนิด 2 หน้าหนา 0.8 มิลลิเมตร และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก FR4 มีค่าเท่ากับ 4.3 สายอากาศที่สร้างขึ้นจะใช้การป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลชนิด SMA ขนาดมาตรฐาน แสดงตามรูปที่ 3.41



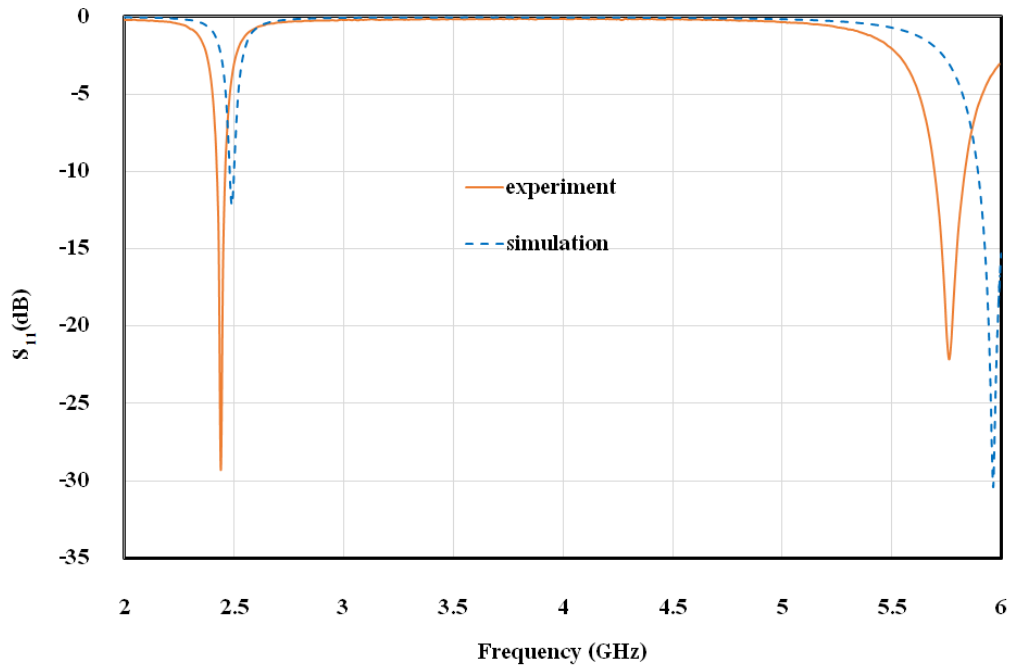
รูปที่ 3.41 สายอากาศ MCP

สายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดเล็ก MCP antenna ที่สร้างขึ้นจะถูกนำมาทดสอบความถี่เรโซแนนซ์ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Vector Network Analyzer (VNA) เพื่อวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ (S11) โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่ 2 GHz ถึง 6 GHz แสดงตามรูปที่ 3.42

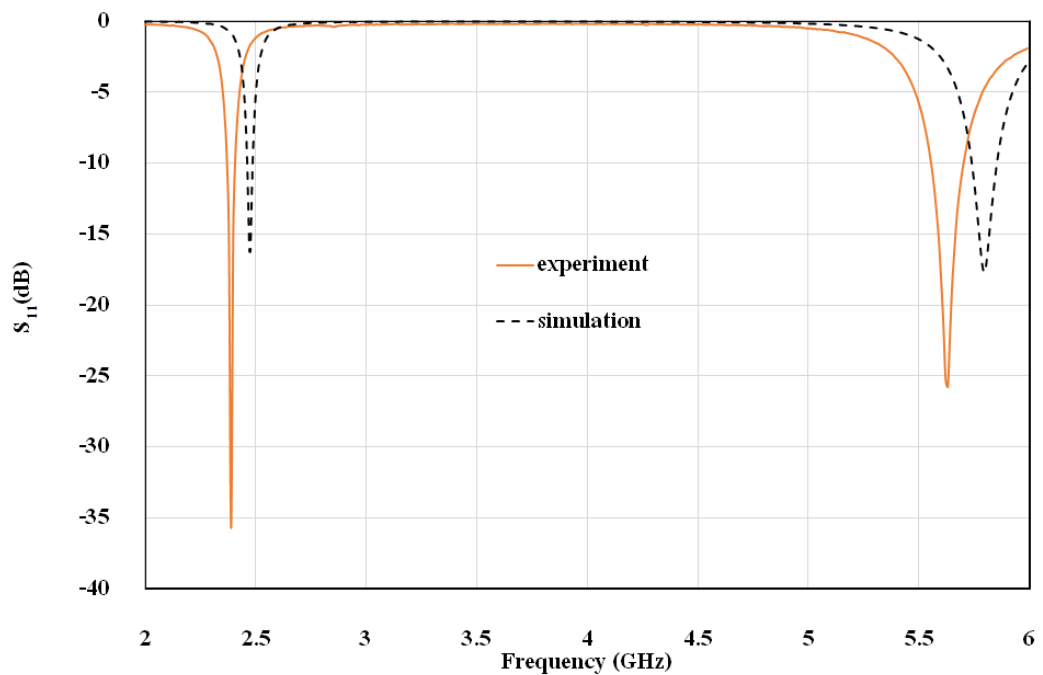


รูปที่ 3.42 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการวัดสายอากาศ MCP ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics โดยจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณีคือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP เมื่อวางอยู่ในอากาศ และเมื่อวางอยู่ใต้ภาชนะแก้วเปล่า ผลการวัดที่ได้จะแสดงตามรูปที่ 3.43 และ 3.44 จากผลที่ได้พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่จากการวัดและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics มีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือจากผลการจำลองสายอากาศ MCP จะมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2.48 GHz เท่ากับ -12.156 dB และที่ความถี่ 5.96 GHz เท่ากับ -30.399dB ส่วนผลการวัดสายอากาศ MCP ด้วยเครื่องวิเคราะห์ Network Analyzer พบว่าจะมีค่าความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนมาที่ความถี่ 2.438 GHz เป็น -29.31 dB และความถี่ 5.760 GHz เป็น -22.15 dB ซึ่งจากผลการทดลองวัดคุณสมบัติของสายอากาศ MCP ค่าความถี่เรโซแนนซ์ และค่าแบนด์วิดท์ ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการจำลอง ต่อมาเป็นผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP เมื่อวางอยู่ใต้ภาชนะแก้วเปล่า จากผลการวัดพบว่ามีค่าความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนมาที่ความถี่ 2.389 GHz เท่ากับ -35.70 dB ความถี่ 5.63 GHz เป็น -25.73 dB แสดงในตารางที่ 3.4 ซึ่งเมื่อเทียบกับผลการจำลองพบว่าความถี่เรโซแนนซ์ที่เลื่อนไปมีค่าความถี่ใกล้เคียงกับผลการวัดและยังมีแบนด์วิดท์ที่ครอบคลุม ดังนั้นจากผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้พบว่าสายอากาศ MCP สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดคุณสมบัติของน้ำยางด้วยวิธีแบบไม่สัมผัสได้



รูปที่ 3.43 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP เมื่ออยู่ในอากาศ



รูปที่ 3.44 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP เมื่อวางได้ภาชนะแก้ว
ขนาด 100 มิลลิลิตร

ตารางที่ 3.4 ความถี่ที่สายอากาศ MCP เรโซแนนซ์เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการวัด

รูปแบบการวัด	ความถี่ (GHz)		ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน	
	ผลจำลอง	ผลการวัด	ผลจำลอง	ผลการวัด
สายอากาศ MCP วางอยู่ในอากาศ	2.48, 5.96	2.44, 5.76	-12.16, -30.40	-29.31, -22.15
สายอากาศ MCP วางอยู่ใต้ภาชนะแก้ว	2.45, 5.80	2.34, 5.63	-15.89, -15.73	-35.70, 25.73

ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP ที่ได้จากข้างต้นนั้น จึงนำไปสู่การออกแบบชุดทดสอบต้นแบบสำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางร่วมกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ซึ่งโมเดลดังกล่าวได้ถูกสร้างจากแผ่นอะคลิลิก และเนื้อดสกรูแบบพลาสติกในการสร้างเป็นชิ้นงาน สายอากาศ MCP จะถูกเชื่อมต่อด้วยสายโคแอกเซียลแบบมาตรฐานที่มีค่ากำลังการสูญเสียต่ำเพื่อไม่ให้กำลังที่สะท้อนกลับเกิดการสูญเสีย และเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์ของน้ำยางขึ้น ตามรูปที่ 3.45



รูปที่ 3.45 โมเดลสายอากาศ MCP เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางขึ้น

ชุดทดสอบที่สร้างขึ้นนี้ได้ถูกออกแบบมาเพื่อประยุกต์ใช้ในการวัดคุณสมบัติของน้ำยางขึ้นด้วยวิธีแบบไม่สัมผัส โดยมีข้อดีของกระบวนการวัดด้วยวิธีนี้คือ ค่าที่ได้จะมีความถูกต้องแม่นยำ สามารถใช้งานได้ง่าย ไม่ซับซ้อน และสามารถทำความสะอาด ยกต่อการเสียหายของเซ็นเซอร์ โมเดลดังกล่าวจึงมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางขึ้นต่อไป

บทที่ 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของผลการทดสอบ และส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ โดยผลการทดสอบจะประกอบไปด้วย 1) ผลการเจือจางน้ำยางชั้นเทียบกับผลการวัดด้วยวิธีแบบมาตรฐาน ที่มีความเข้มข้นของน้ำยางชั้นเป็น 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, และ 60 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ 2) ผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นด้วยโพรบมาตรฐาน Agilent Probe kits ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz และ 3) ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นด้วยสายอากาศ MCP ซึ่งในส่วนของแบบจำลองจะแบ่งออกเป็น 1) แบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบการสูญเสีย 2) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งกับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก และความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 3) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งแต่ละความเข้มข้นด้วยสายอากาศ พร้อมทั้งยังได้อธิบายกระบวนการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน การแปลงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็นค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง เป็นต้น เพื่อสามารถนำกระบวนการวัดดังกล่าวไปใช้ในการวัดค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งด้วยวิธีแบบไม่สัมผัสได้

4.1 การเจือจางน้ำยางชั้นแต่ละความเข้มข้น

เนื่องจากในปัจจุบันเกษตรกรจะซื้อขายน้ำยางสดกันอยู่ในช่วงความเข้มข้น 20-60 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการเก็บรวบรวมไว้ในถัง 1,000 ลิตร ก่อนนำไปขายให้กับโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อพ่อค้าคนกลางนำน้ำยางที่ได้ไปขายให้กับโรงงาน ทางโรงงานจะทำการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งโดยใช้วิธีการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งด้วยวิธีมาตรฐานห้องปฏิบัติการ และให้พ่อค้ามารับเงินในวันต่อไป จากนั้นโรงงานจะทำการปั่นน้ำยางสดให้กลายเป็นน้ำยางชั้นความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ และเติมแอมโมเนียเพื่อยืดอายุของน้ำยางชั้น เพื่อนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป ดังนั้นการเลือกใช้น้ำยางชั้นในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน เพื่อต้องการทราบเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งที่แน่นอนและสามารถเก็บรักษาน้ำยางไว้ได้นาน เพราะฉะนั้นจึงต้องนำน้ำยางชั้นที่ได้จากการปั่นมาตรฐาน 60 เปอร์เซ็นต์ นำมาเจือจางความเข้มข้นด้วยน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้นเป็น 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 และ 55 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยปริมาตรน้ำยางชั้นและน้ำกลั่นที่ใช้ในการเจือจางแสดงตามสมการที่ 4.1 และตารางที่ 4.1

$$V_{water} = \frac{\%DRC \times 100}{60} \quad (4.1)$$

ตารางที่ 4.1 ปริมาณการเจือจางน้ำยางชั้นกับน้ำกลั่น

%DRC	ปริมาณน้ำยางชั้น	ปริมาณน้ำกลั่น
60	100.00	0.00
55	91.67	8.33
50	83.33	16.67
45	75.00	25.00
40	66.67	33.33
35	58.33	41.67
30	50.00	50.00
25	41.67	58.33

การเจือจางน้ำยางชั้นนั้นจะใช้น้ำยางชั้นความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับน้ำกลั่นบริสุทธิ์ โดยใช้กระบอกตวงในการวัดปริมาตรอัตราส่วนของส่วนผสมที่จะเดิม จากนั้นนำน้ำยางชั้นที่ได้ใส่ในภาชนะขวดปริมาตร 200 มิลลิลิตร แสดงตามรูปที่ 4.1 ผลการเจือจางน้ำยางชั้นความเข้มข้น 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ที่ได้จากรายข้างต้นยังคงมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นจากขั้นตอนกระบวนการเจือจาง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของความเข้มข้นเกิดขึ้น จึงต้องนำน้ำยางชั้นที่ได้จากการเจือจางไปวัดด้วยวิธีมาตรฐานในห้องปฏิบัติการมาตรฐาน ISO2004 เพื่อยืนยันผลเจือจางของน้ำยางชั้นแต่ละความเข้มข้น



รูปที่ 4.1 การเจือจางน้ำยางชั้นด้วยน้ำกลั่นขนาด 200 มิลลิลิตร

4.2 การวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งของน้ำยางข้นที่เจือจางด้วยวิธีมาตรฐาน

การวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งด้วยวิธีมาตรฐานเป็นวิธีการวัดที่มีความแม่นยำสูงตามมาตรฐาน ISO จึงมีความเหมาะสมสำหรับนำผลค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งที่ได้ไปใช้ในการอ้างอิงสำหรับการสร้างสมการและสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกกับค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งเพื่อให้สมการมีความถูกต้องและมีความแม่นยำมากที่สุด โดยในการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งด้วยวิธีมาตรฐานจะมีขั้นตอนดังนี้คือ

1. ตักตัวอย่างน้ำยางสดแต่ละความเข้มข้นใส่ลงไปในถ้วยประมาณ 10 กรัม



รูปที่ 4.2 การเตรียมภาชนะสำหรับใส่น้ำยางข้น

2. ชั่งตัวอย่างน้ำยางที่อยู่ในถ้วย จากนั้นลบด้วยน้ำหนักของถ้วยที่ใช้ออกเพื่อให้เหลือแต่ปริมาณของน้ำยางสดเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.3 เครื่องชั่งน้ำหนักของการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง

3. เติมกรดอะซิติกความเข้มข้น 2 % ลงไปในถ้วยแต่ละความเข้มข้น จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้จับตัว เป็นก้อนประมาณ 30 นาที นำไปนึ่งด้วยความร้อนอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้การจับตัวได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 4.4 การจับตัวของน้ำยางด้วยกรดอะซิติกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์

4. นำไปรีดด้วยเครื่องรีดยางแผ่นให้มีความหนาไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ล้างและความสะอาด



รูปที่ 4.5 การรีดยางแผ่น

5. นำแผ่นยางที่ได้ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 70 องศา เป็นระยะเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นเปรียบเทียบน้ำหนักหลังการอบกับน้ำหนักก่อนการอบ



รูปที่ 4.6 การอบไล่ความชื้นแผ่นยาง

จากขั้นตอนการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งด้วยวิธีการวัดในห้องปฏิบัติการดังกล่าว สามารถสรุปน้ำหนักก่อนการวัดและหลังการอบ เพื่อนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งจาก สมการที่ 4.2 ผลการวัดค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งด้วยวิธีมาตรฐานของน้ำยางที่เจอจางไว้แสดงตาม ตารางที่ 4.2

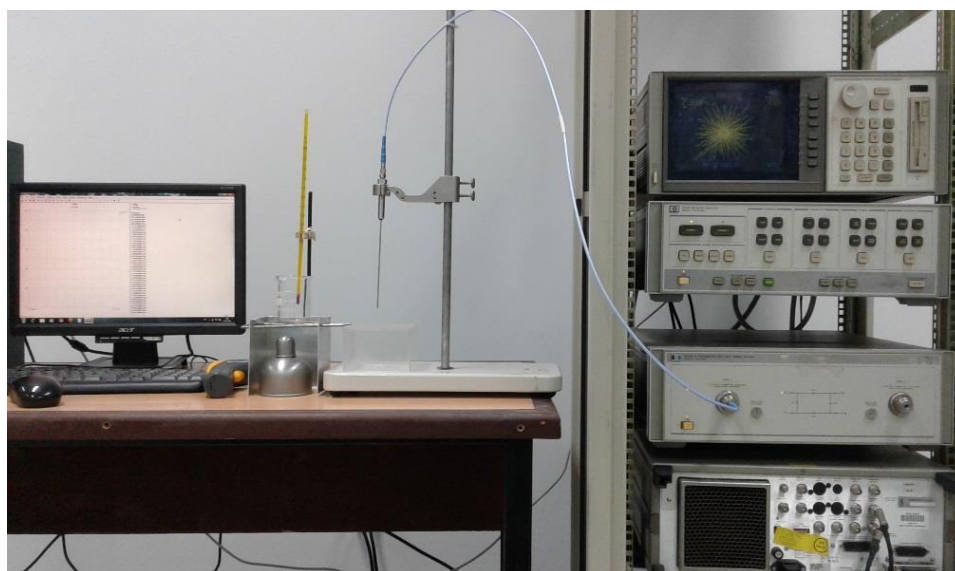
$$\text{เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง} = \frac{\text{น้ำหนักแผ่นยางแห้ง}}{\text{น้ำหนักน้ำยางสด}} \times 100 \quad (4.2)$$

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งของการเจอจางน้ำยางชั้นแต่ละความเข้มข้น

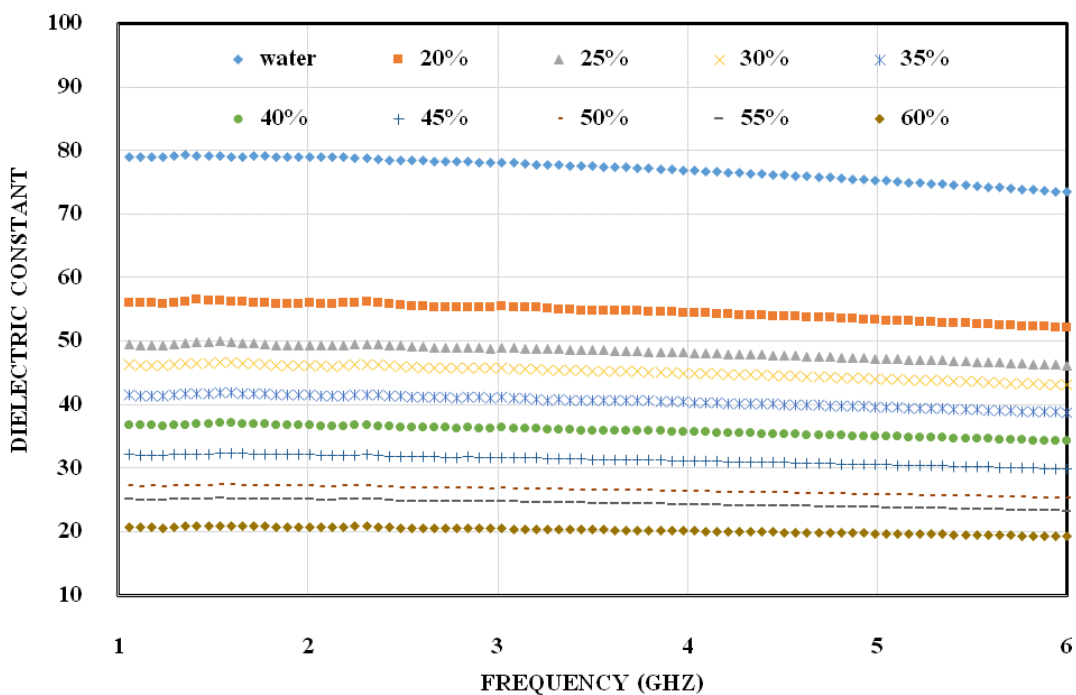
การเจอจาง	น้ำหนัก (กรัม)		น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม)		%DRC
	ก่อนวัด	หลังอบ	ก่อนวัด	หลังอบ	
60%	10.0366	6.0903	10.0332	6.0804	60.6028
	10.0298	6.0705			
55%	10.0304	5.5306	10.0263	5.5588	55.4424
	10.0223	5.5871			
50%	10.0187	4.7928	10.0152	4.9378	49.3028
	10.0118	5.0828			
45%	10.0213	4.5197	10.0126	4.5280	45.2235
	10.0298	4.5364			
40%	10.0321	3.9296	10.0205	3.9163	39.0834
	10.0089	3.9031			
35%	10.0132	3.3653	10.0196	3.3686	33.6206
	10.0260	3.3720			
30%	10.0129	2.8545	10.0217	2.8560	28.4985
	10.0306	2.8576			
25%	10.0205	2.2859	10.0209	2.2839	22.7914
	10.0213	2.2819			
20%	10.0215	1.7523	10.0167	1.7483	17.4542
	10.0120	1.7444			

4.3 ผลการใช้โพรบมาตรฐาน Agilent Probe kits ในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

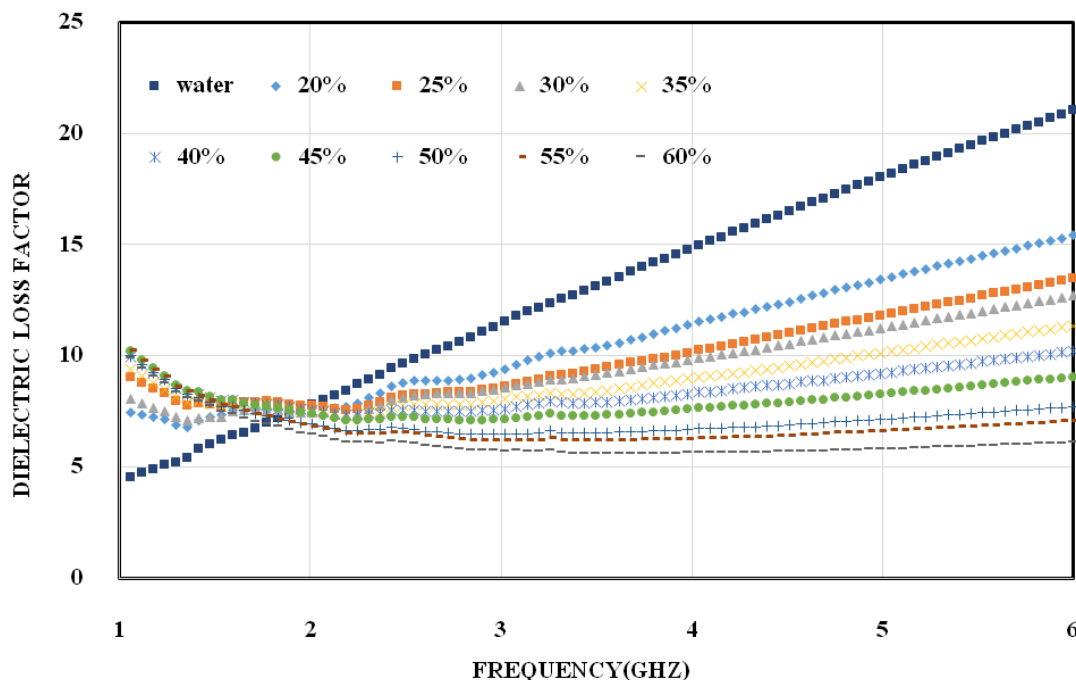
การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของของเหลวด้วยโพรบมาตรฐาน Agilent Probe Kits ซึ่งโพรบ Agilent Probe Kits ได้ออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่เป็นของเหลว โดยอาศัยหลักการการวัดแบบโพรบปลายเปิด ซึ่งโพรบที่ใช้จะเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์โครข่าย VNA หลักการของโพรบปลายเปิดจะวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแปลงเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบการสูญเสีย อินเตอร์เฟซผ่านพอร์ต GPIB เพื่อเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์แปลงผลจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้เป็นค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกแสดงในหน้าต่างของคอมพิวเตอร์ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้น้ำยางชันที่ได้จากการเจือจางมาวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางชันความเข้มข้น 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 1-6 GHz และวัดค่าอุณหภูมิ 25 30 และ 35 องศา เพื่อนำผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ได้มาสร้างเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับค่าเปอร์เซ็นต์เนื้ออย่างแห้ง และค่าตัวประกอบการสูญเสียกับค่าเปอร์เซ็นต์เนื้ออย่างแห้ง กระบวนการวัดจะแสดงตามรูปที่ 4.7 การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางชันแต่ละความเข้มข้นนั้นจะทำการวัดจำนวน 3 ครั้ง พร้อมทั้งวัดค่าอุณหภูมิร่วมด้วย จากนั้นเฉลี่ยผลที่ได้จากการวัด สรุปและแสดงค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกตามรูปที่ 4.8 และ 4.9 หลังจากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำยางชันกับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ความถี่ 2.45 GHz แสดงตามรูปที่ 4.10 และ 4.11



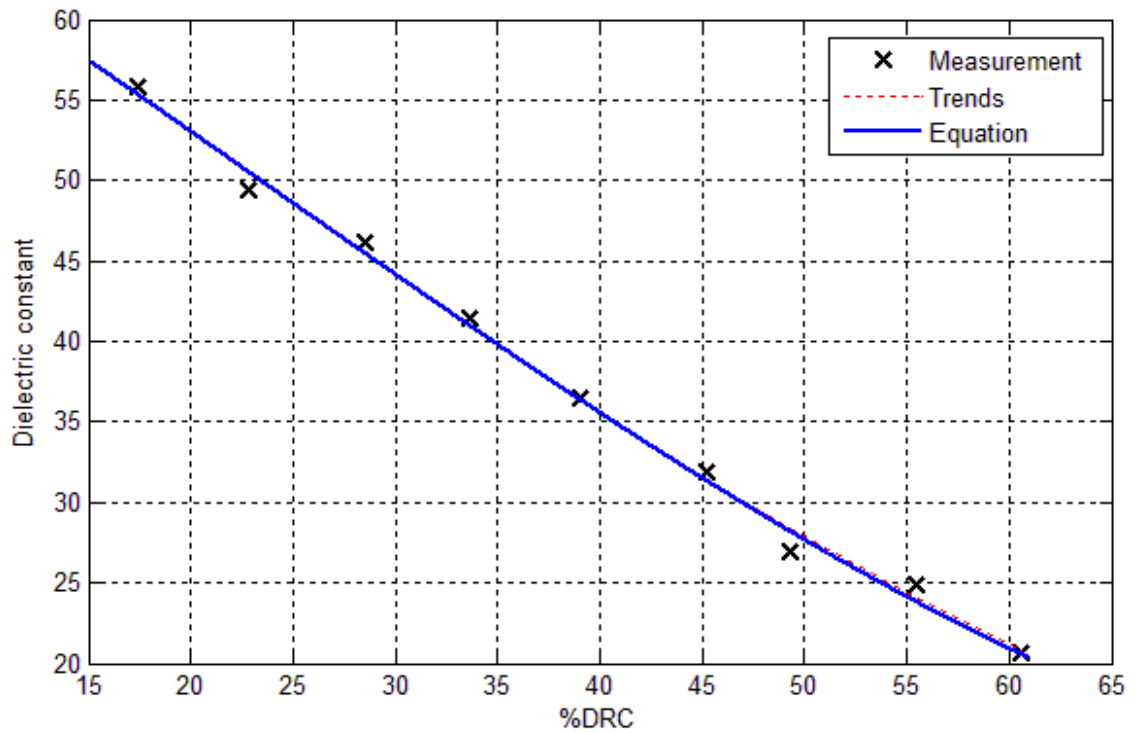
รูปที่ 4.7 การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางชันด้วยโพรบปลายเปิดแบบมาตรฐาน



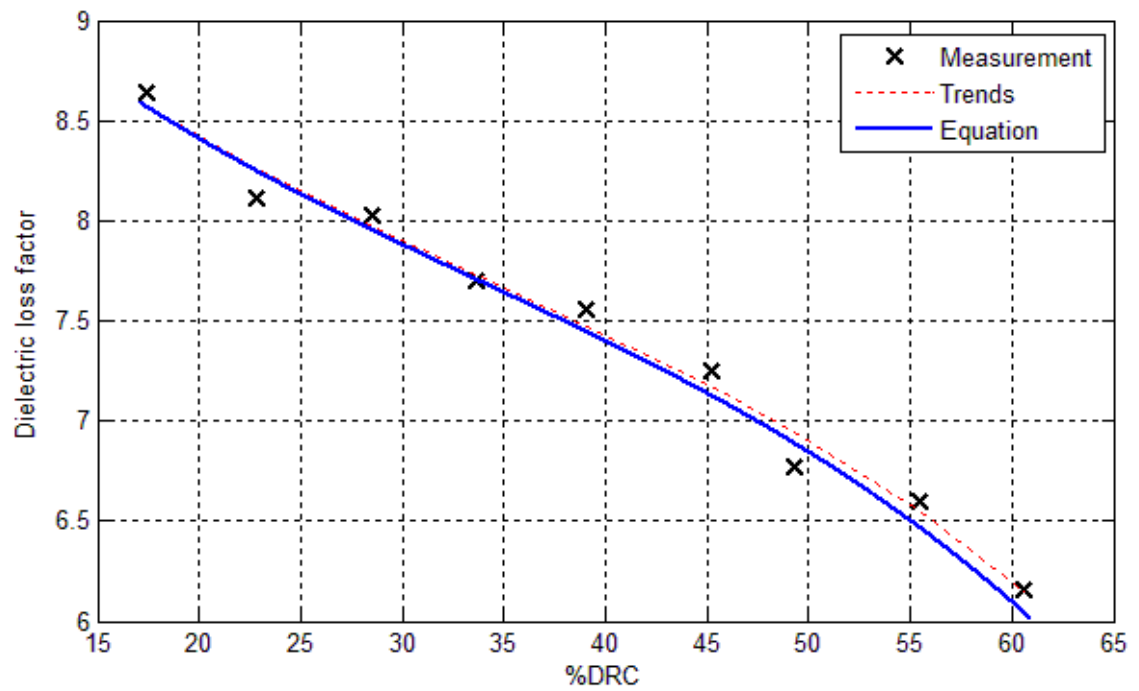
รูปที่ 4.8 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นที่ความถี่ 1-6 GHz



รูปที่ 4.9 ค่าตัวประกอบการสูญเสียของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นที่ความถี่ 1-6 GHz



รูปที่ 4.10 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นจากผลการวัดเทียบกับสมการ 4.3 ที่ความถี่ 2.45 GHz



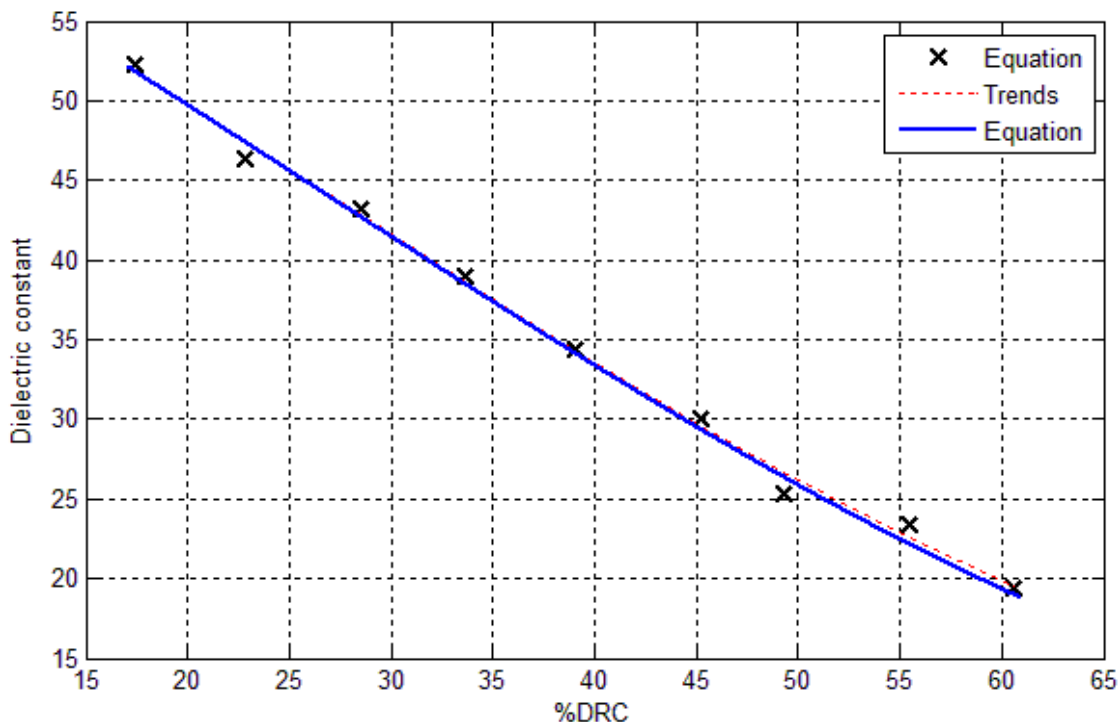
รูปที่ 4.11 ค่าตัวประกอบการสูญเสียของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นจากผลการวัดเทียบกับสมการ 4.4 ที่ความถี่ 2.45 GHz

จากผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางชั้นด้วยโพรบมาตรฐาน Agilence Probe Kits ตามรูปที่ 4.10-4.11 ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง และค่าตัวประกอบการสูญเสียกับค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งที่ความถี่ 2.45 GHz สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์โดยใช้ฟังก์ชันถดถอยพหุนามเมื่อยลำดับ 3 ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งและสมการระหว่างค่าตัวประกอบการสูญเสียกับค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง ที่ได้จากการฟังก์ชันที่ความถี่ 2.45 GHz ตามสมการที่ 4.3 และ 4.4 โดยที่ X คือ %DRC

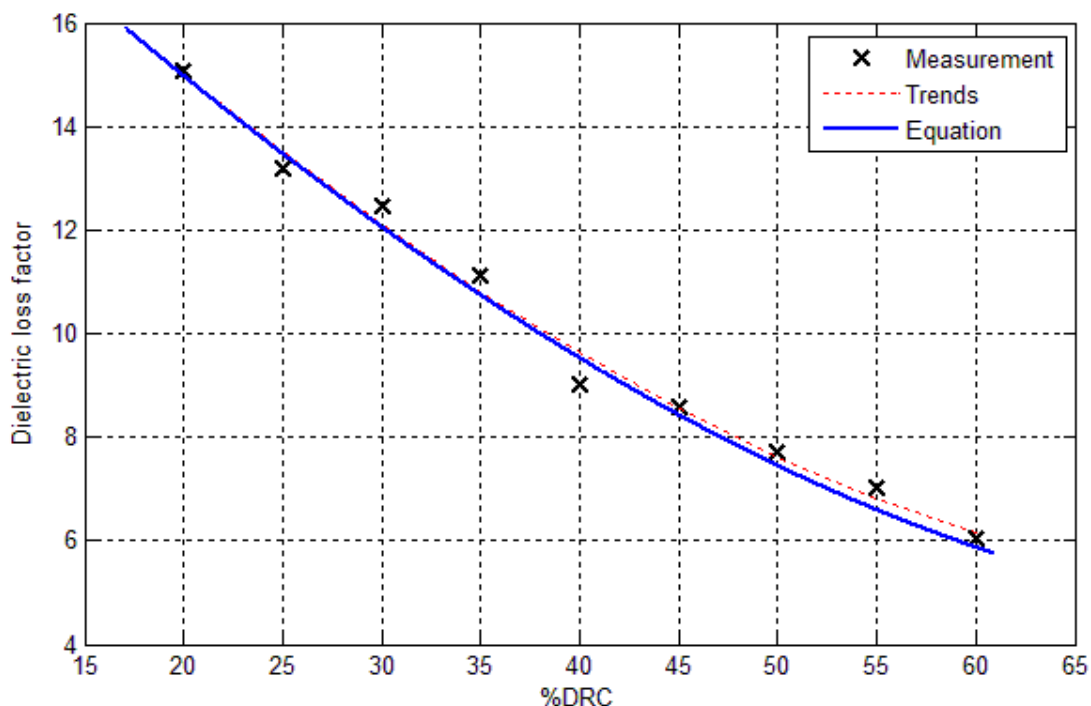
$$\varepsilon'(2.45\text{GHz}) = 70.02708 - 0.77795(X) - 0.00487(X)^2 + 0.00007(X)^3 \quad (4.3)$$

$$\varepsilon''(2.45\text{GHz}) = 10.09478 - 0.11696(X) + 0.00204(X)^2 - 0.00002(X)^3 \quad (4.4)$$

จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง และค่าตัวประกอบการสูญเสียกับเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง ที่ความถี่ 5.8 GHz แสดงตามรูปที่ 4.12 และ 4.13



รูปที่ 4.12 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นจากผลการวัดเทียบกับสมการ 4.5 ที่ความถี่ 5.8 GHz



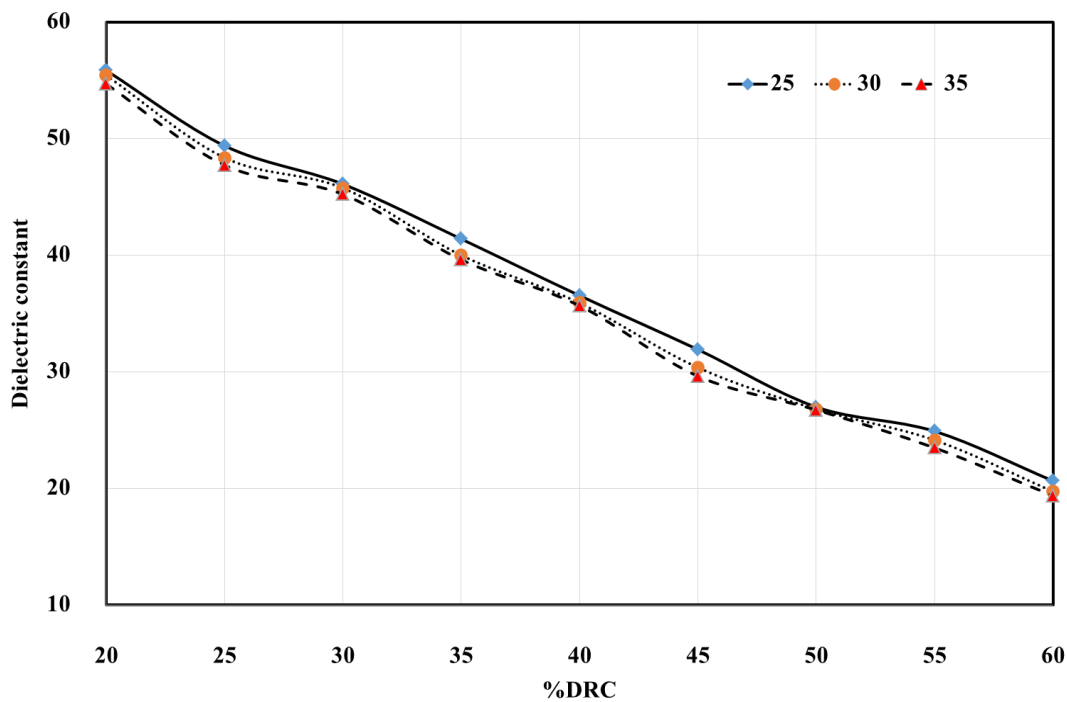
รูปที่ 4.13 ตัวประกอบการสูญเสียของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นจากผลการวัดเทียบกับสมการ 4.6 ที่ความถี่ 5.8 GHz

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ฟังก์ชันการถดถอยลำดับ 3 เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับค่าตัวประกอบการสูญเสียของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นที่ความถี่ 5.8 GHz ตามสมการ 4.5 และ 4.6 โดยที่ X คือ %DRC

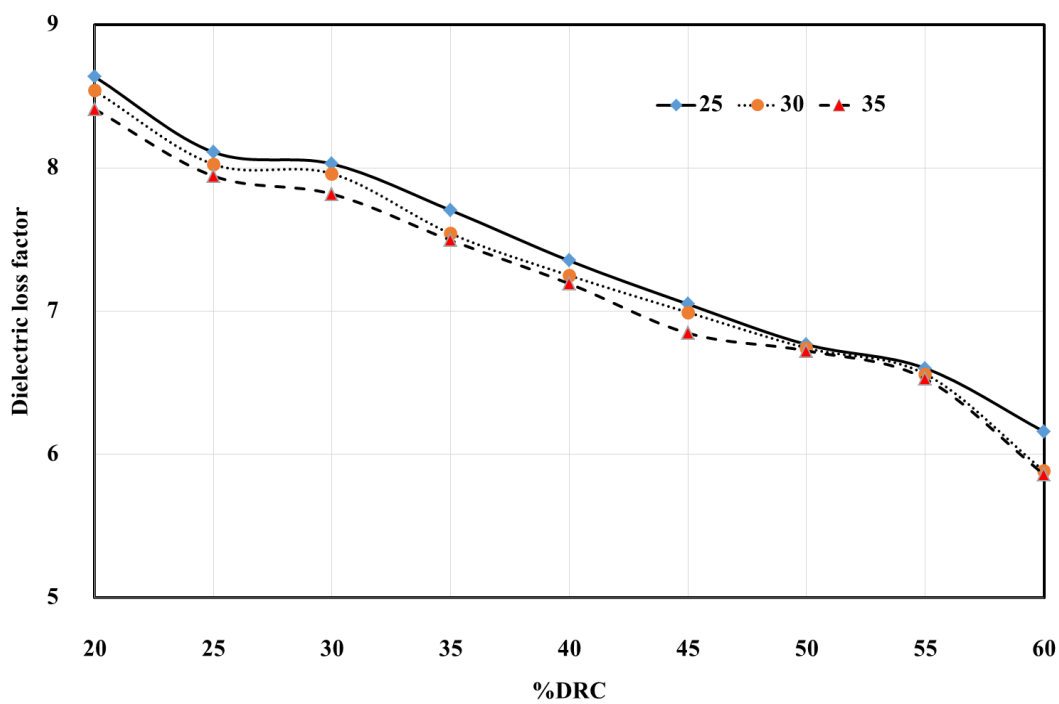
$$\varepsilon'(5.8GHz) = 65.05236 - 0.68226(X) + 0.00552(X)^2 - 0.00007(X)^3 \quad (4.5)$$

$$\varepsilon''(5.8GHz) = 21.74914 - 0.36293(X) + 0.00104(X)^2 - 0.00001(X)^3 \quad (4.6)$$

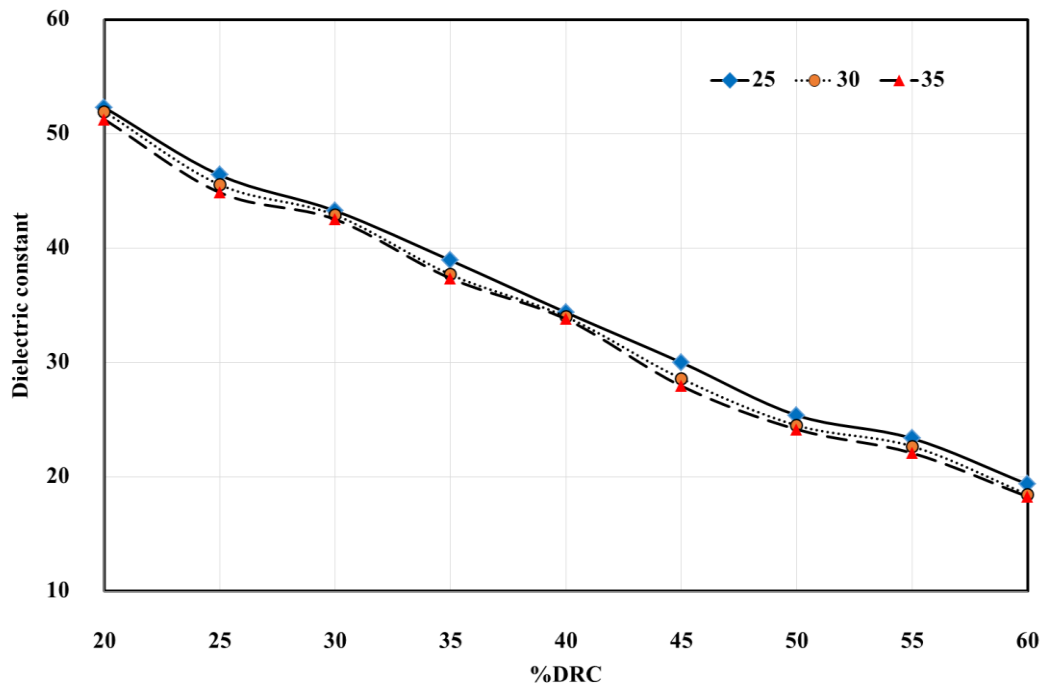
จากผลการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและสมการทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกกับค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งแล้ว จากนั้นจึงได้ทำการศึกษาวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงผลของค่าอุณหภูมิในน้ำยางขึ้นแต่ละความเข้มข้น กล่าวคือเพื่อต้องการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิว่ามีผลกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะส่งผลต่อกรวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกให้มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในการวัดน้ำยางสดของเกษตรกร โดยผลการศึกษาจะแบ่งเป็น 2 ความถี่ คือ 2.45 GHz และ 5.8 GHz แสดงตามรูปที่ 4.14 ถึง 4.17



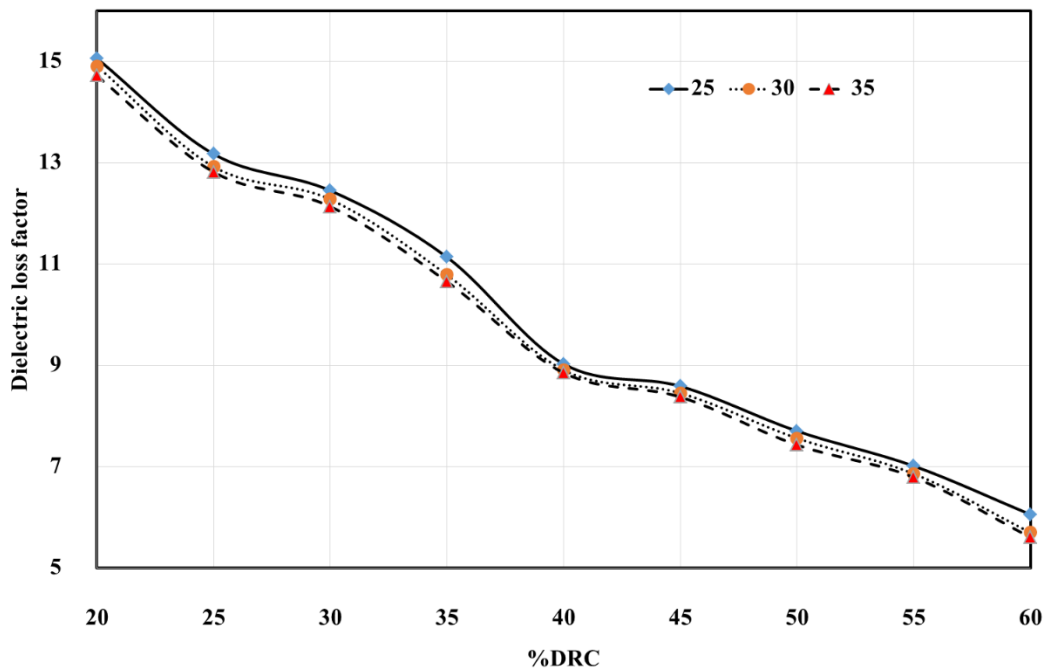
รูปที่ 4.14 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 25°-35° ที่ความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 4.15 ค่าตัวประกอบการสูญเสียของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 25°-35° ที่ความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 4.16 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 25° - 35° ที่ความถี่ 5.8 GHz



รูปที่ 4.17 ค่าตัวประกอบการสูญเสียของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 25° - 35° ที่ความถี่ 5.8 GHz

จากผลการวัดค่าอุณหภูมิพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 25 30 และ 35 องศา โดยจะแปรผันตามค่าเปอร์เซ็นต์ DRC แต่จะมีผลมากในส่วนของค่าตัวประกอบการสูญเสีย ซึ่งยังพบอีกว่าค่าอุณหภูมิจะมีผลน้อยที่ความถี่สูงขึ้น จากผลการวัดที่ได้ส่งผลให้งานวิจัยนี้ ไม่ได้นำค่าอุณหภูมิมาคิดเนื่องจากมีผลต่อค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกน้อยที่ความถี่สูง

ตารางที่ 4.3 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางชั้นแต่ละความเข้มข้นที่ความถี่ 2.45 GHz

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	ค่าตัวประกอบการสูญเสีย	ค่าความนำไฟฟ้า
น้ำกลั่น	78.5389	9.4663	1.2884
น้ำยางชั้น 20%	52.9271	8.3809	1.1407
น้ำยางชั้น 25%	48.3523	8.0786	1.0995
น้ำยางชั้น 30%	44.1562	7.8821	1.0728
น้ำยางชั้น 35%	40.0505	7.7033	1.0485
น้ำยางชั้น 40%	35.8951	7.4861	1.0189
น้ำยางชั้น 45%	31.6978	7.2061	0.9808
น้ำยางชั้น 50%	27.6146	6.8709	0.9352
น้ำยางชั้น 55%	23.9494	6.52	0.8874
น้ำยางชั้น 60%	21.1543	6.2248	0.8472

ตารางที่ 4.4 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางชั้นแต่ละความเข้มข้นที่ความถี่ 5.8 GHz

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	ค่าตัวประกอบการสูญเสีย	ค่าความนำไฟฟ้า
น้ำกลั่น	73.8021	20.5152	6.6104
น้ำยางชั้น 20%	49.6315	14.331	4.6177
น้ำยางชั้น 25%	45.4112	13.0433	4.2028
น้ำยางชั้น 30%	41.5159	11.7184	3.7759
น้ำยางชั้น 35%	37.685	10.4725	3.3744
น้ำยางชั้น 40%	33.7945	9.3753	3.0209
น้ำยางชั้น 45%	29.8573	8.4489	2.7224
น้ำยางชั้น 50%	26.023	7.6685	2.4709
น้ำยางชั้น 55%	22.5777	6.962	2.2433
น้ำยางชั้น 60%	19.9445	6.2105	2.00111

4.4 ผลการออกแบบโมเดลและวิเคราะห์ระยะความสูงของภาชนะแก้ว

การจำลองโมเดลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำข้างชั้นสามารถจำลองได้ด้วยโปรแกรม COMSOL multiphysics แสดงตามรูปที่ 4.18 การจำลองจะประกอบไปด้วย 1) การจำลองหาระยะความสูงที่เหมาะสมระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้ว โดยที่ภายในภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่น พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าเฟสที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนระยะความสูงของภาชนะแก้ว 2) การจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำที่อยู่ในภาชนะแก้ว เพื่อวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าเฟสของโมเดลการวัดความเข้มข้นของน้ำข้าง ระยะห่างระหว่างภาชนะแก้วกับสายอากาศสามารถพิจารณาได้จากการคำนวณแบบสนามระยะไกล (Far field) เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการจัดวางรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.5

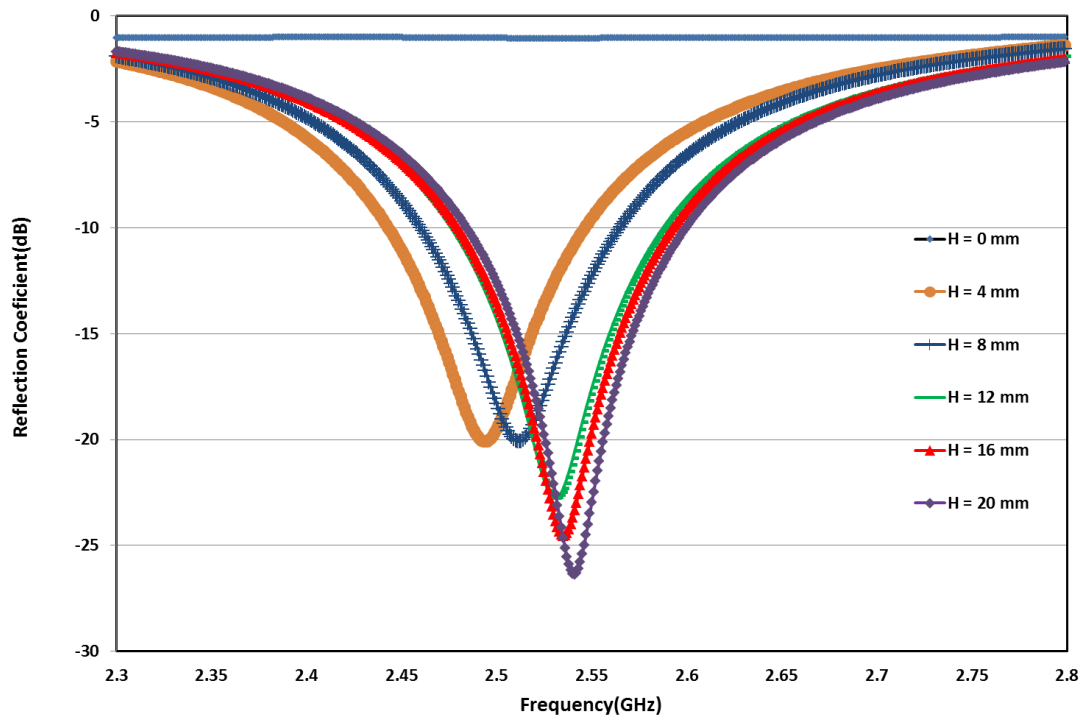
$$farfield = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.5)$$

เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศ (มิลลิเมตร) และ λ คือความยาวคลื่น

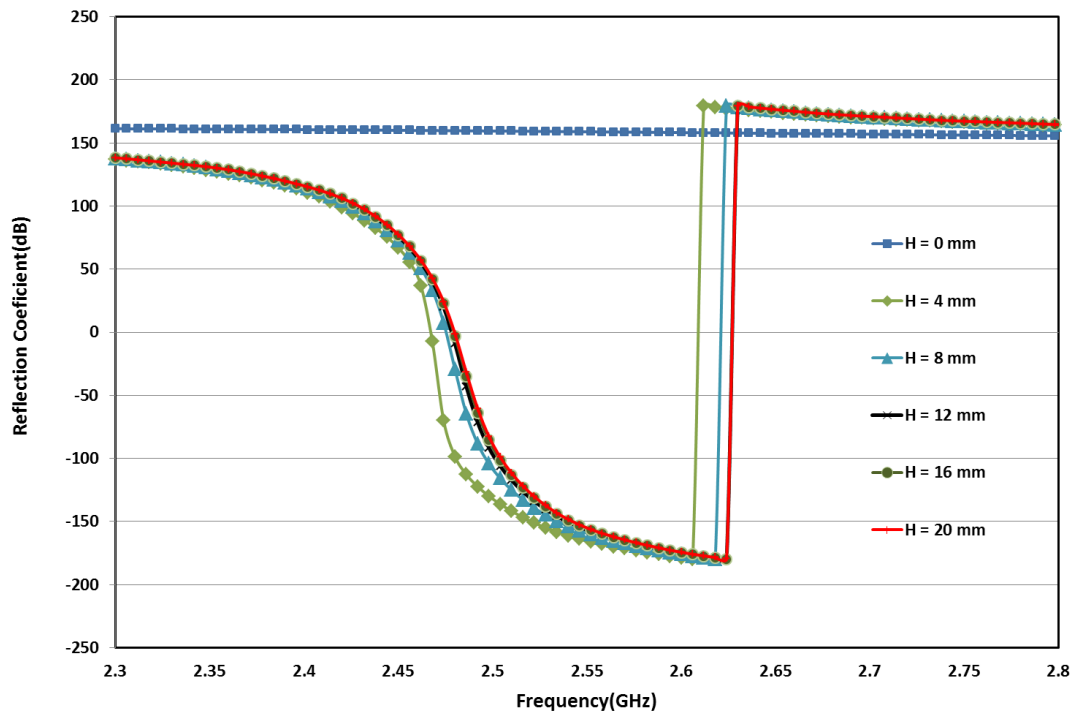
จากผลการคำนวณพบว่าระยะ Farfield ของสายอากาศ MCP ที่ความถี่ 2.45 GHz มีระยะทางเป็น 5 มิลลิเมตร และที่ความถี่ 5.8 GHz มีระยะทางเป็น 13 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงทำการจำลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับค่าการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วตั้งแต่ 0 ถึง 20 มิลลิเมตร โดยภายในภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่นขนาด 100 มิลลิลิตร จำลองผลการเปลี่ยนแปลงด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics จากนั้นวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เปลี่ยนแปลงตามรูปที่ 4.19 ถึง 4.22



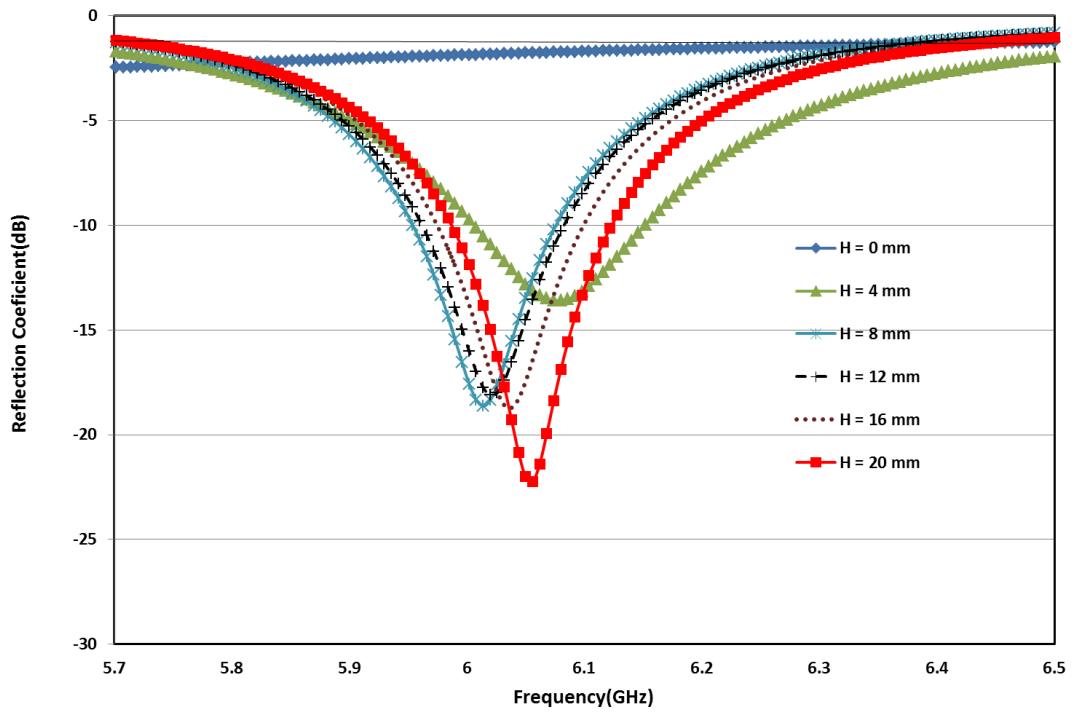
รูปที่ 4.18 การจำลองโมเดลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำข้างแต่ละความเข้มข้นด้วยโปรแกรม COMSOL multiphysics



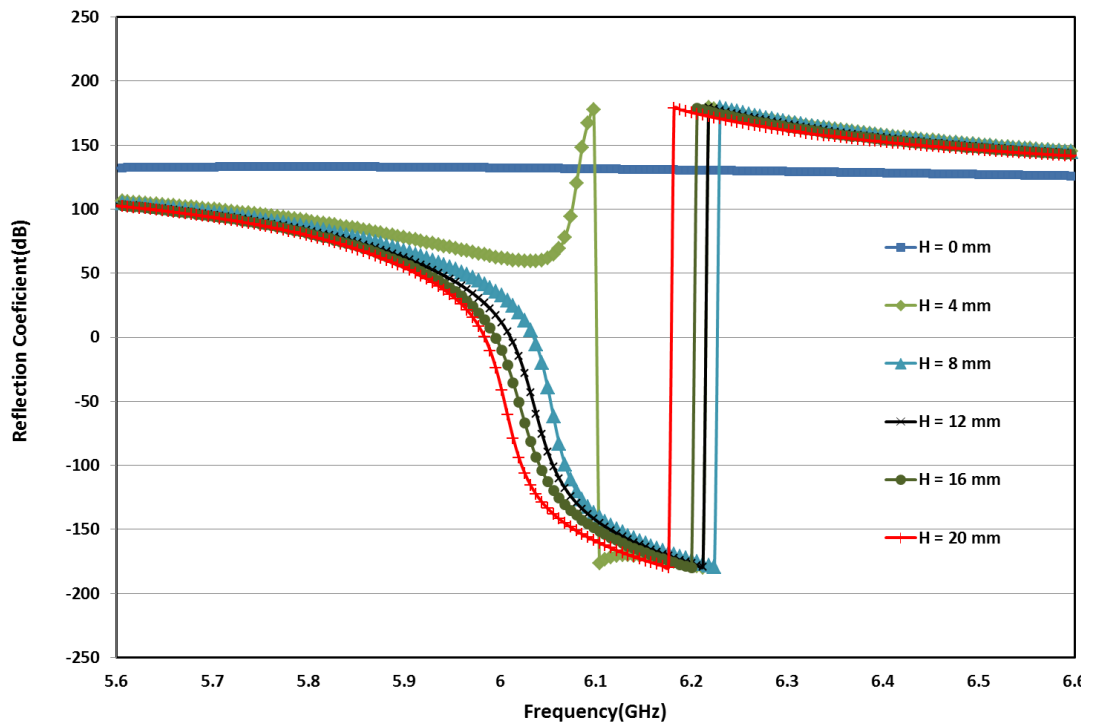
รูปที่ 4.19 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้ว
บรรจุน้ำกลั่นที่ความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 4.20 ค่าเฟสเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่นที่ความถี่
2.45 GHz

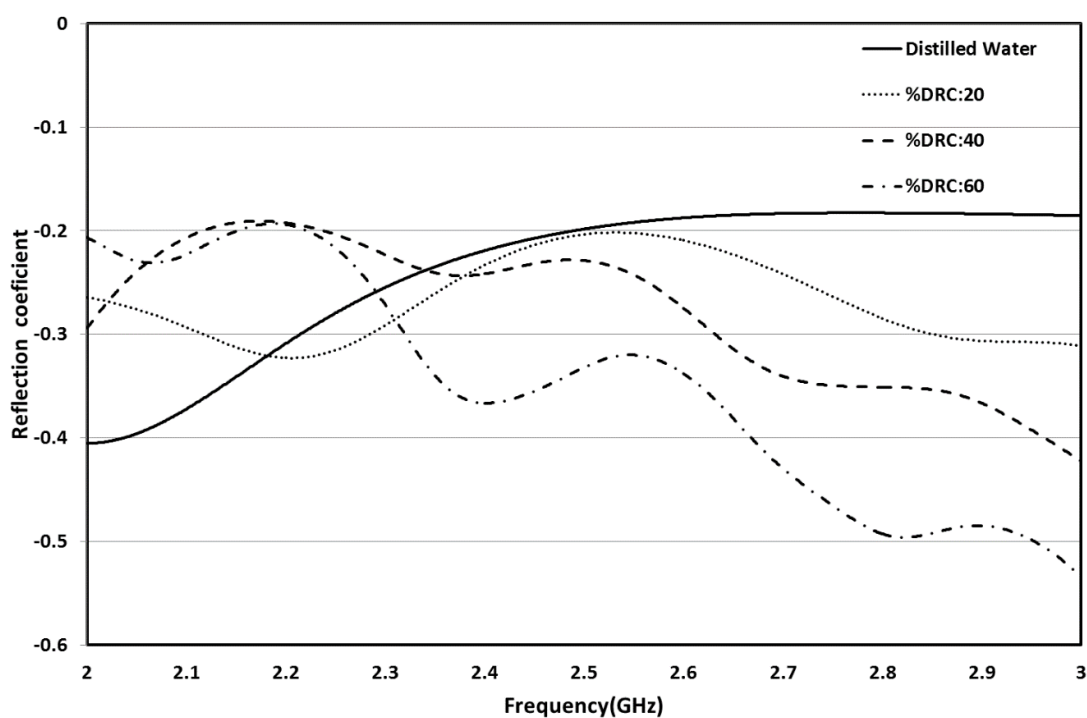


รูปที่ 4.21 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่นที่ความถี่ 5.8 GHz

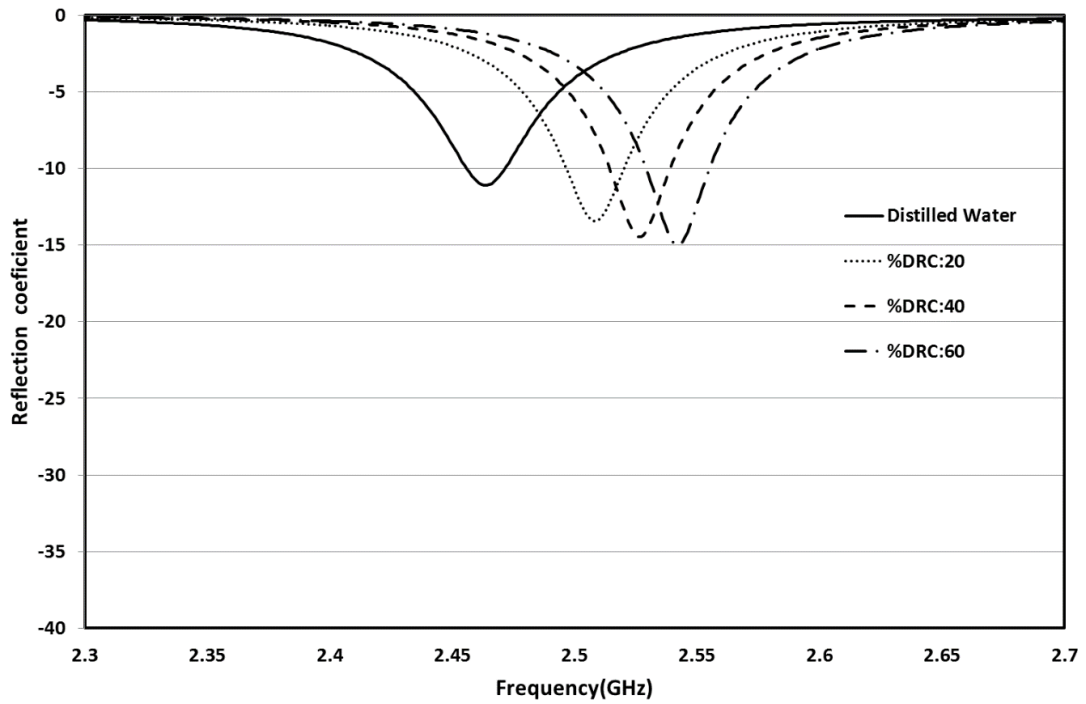


รูปที่ 4.22 ค่าเฟสเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่นที่ความถี่ 5.8 GHz

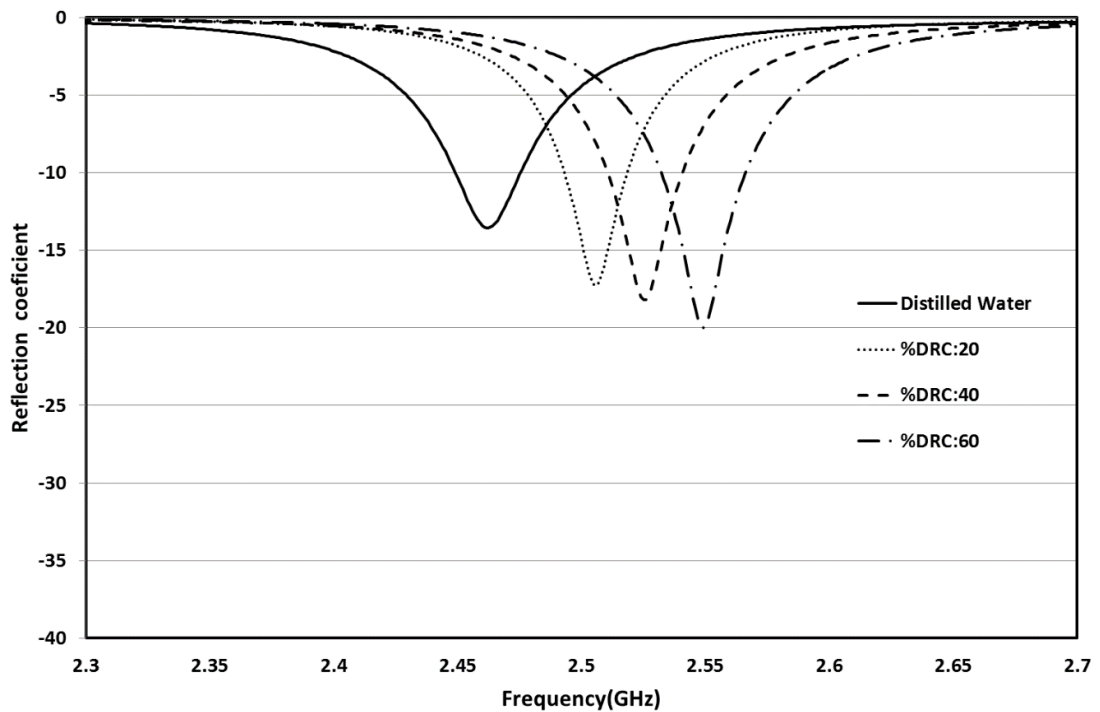
จากผลการจำลองพบว่าระยะห่างระหว่างภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่นกับสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz จะมีค่าระยะห่างมากกว่า 5 มิลลิเมตร และที่ความถี่ 5.8 GHz คือที่ระยะห่างมากกว่า 2 มิลลิเมตร จากนั้นทำการจำลองผลของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำกลั่นในภาชนะแก้วที่มีความเข้มข้นเป็น 20, 40, 60 และ 80 ตามลำดับ พร้อมทั้งเปลี่ยนแปลงระยะห่างเป็น 0, 5, 10, 15 และ 20 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสดงตามรูปที่ 4.24 ถึง 4.33 ซึ่งจากผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติของน้ำกลั่นพบว่า ที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่นแต่ละความเข้มข้น ให้ผลของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนและจะมีค่าที่เหมาะสมคือที่ระยะ 15 มิลลิเมตร ทั้งที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ตามตารางที่ 4.5



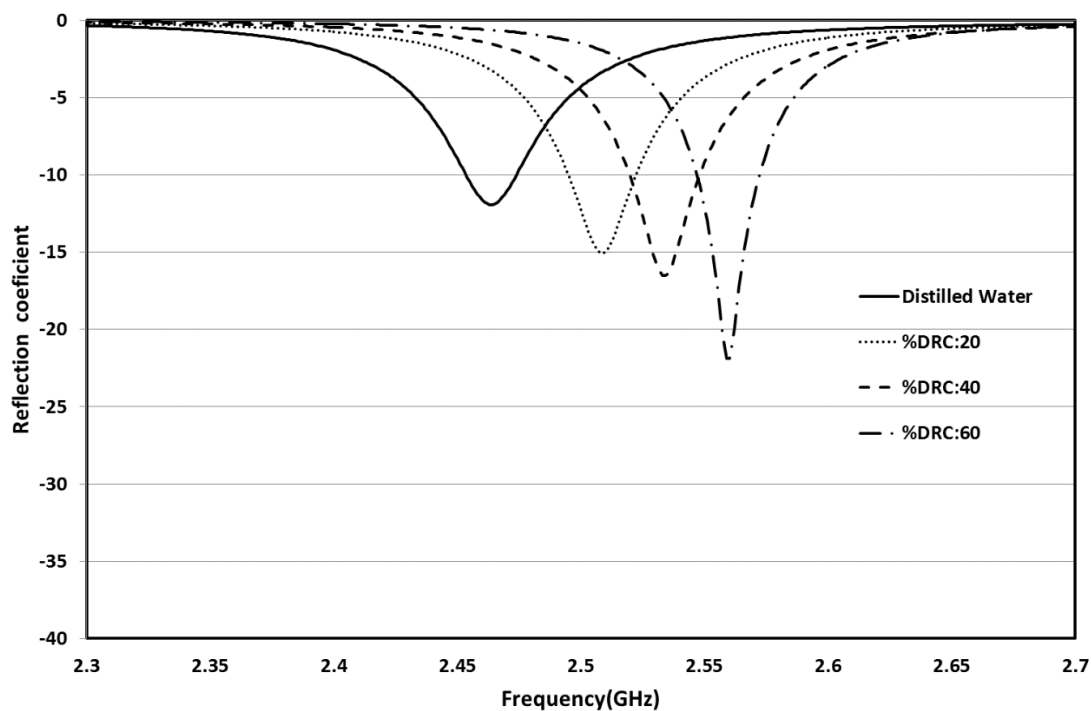
รูปที่ 4.23 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 0 mm ความถี่ 2-3 GHz



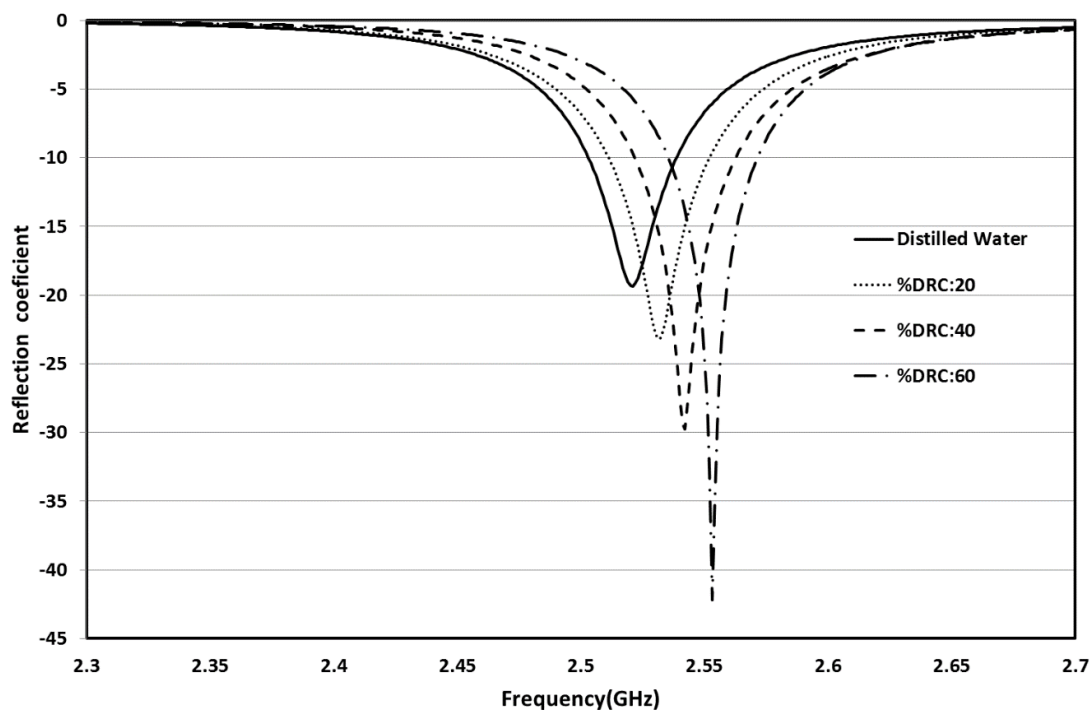
รูปที่ 4.24 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 5 mm ความถี่ 2-3 GHz



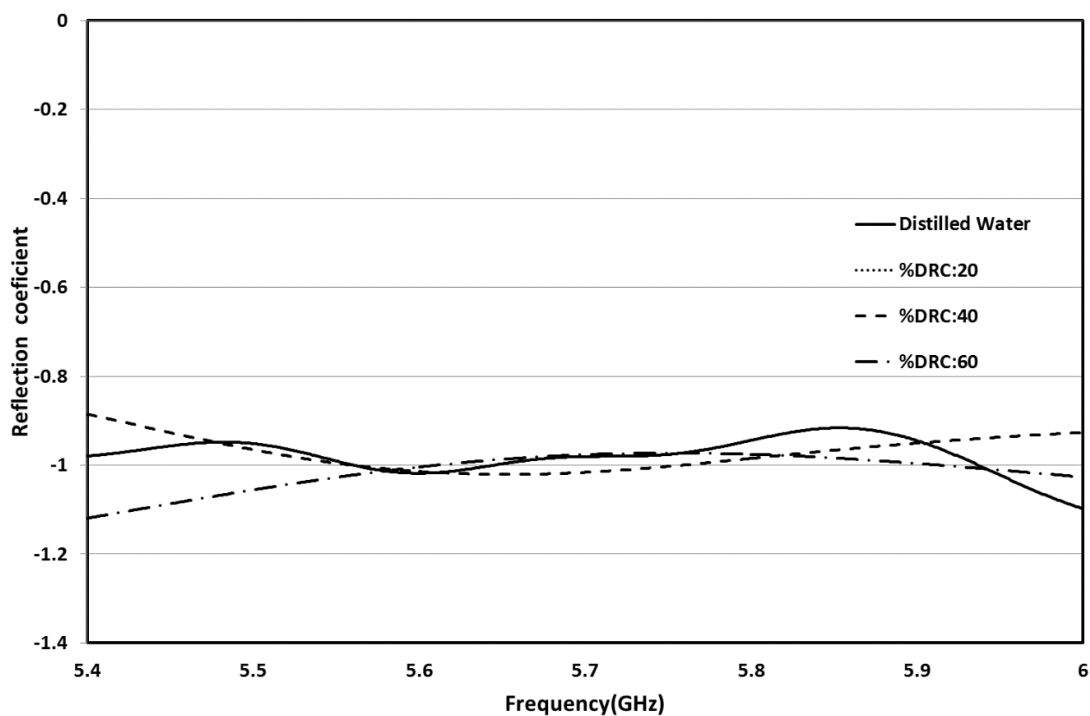
รูปที่ 4.25 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 10 mm ความถี่ 2-3 GHz



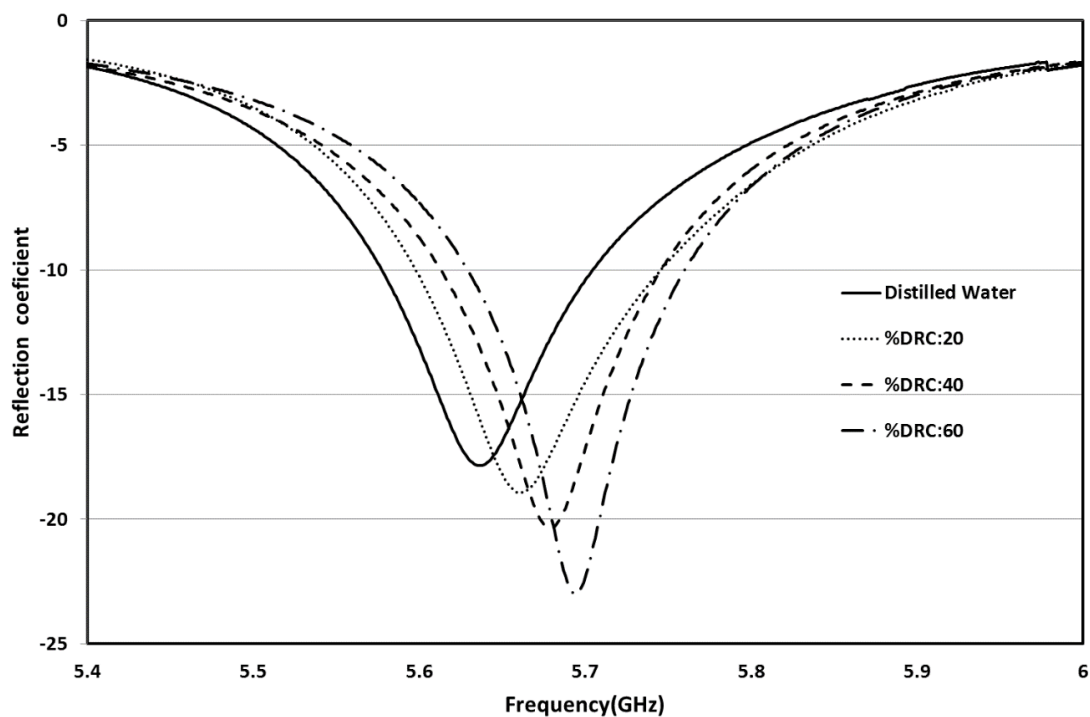
รูปที่ 4.26 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 15 mm ความถี่ 2-3 GHz



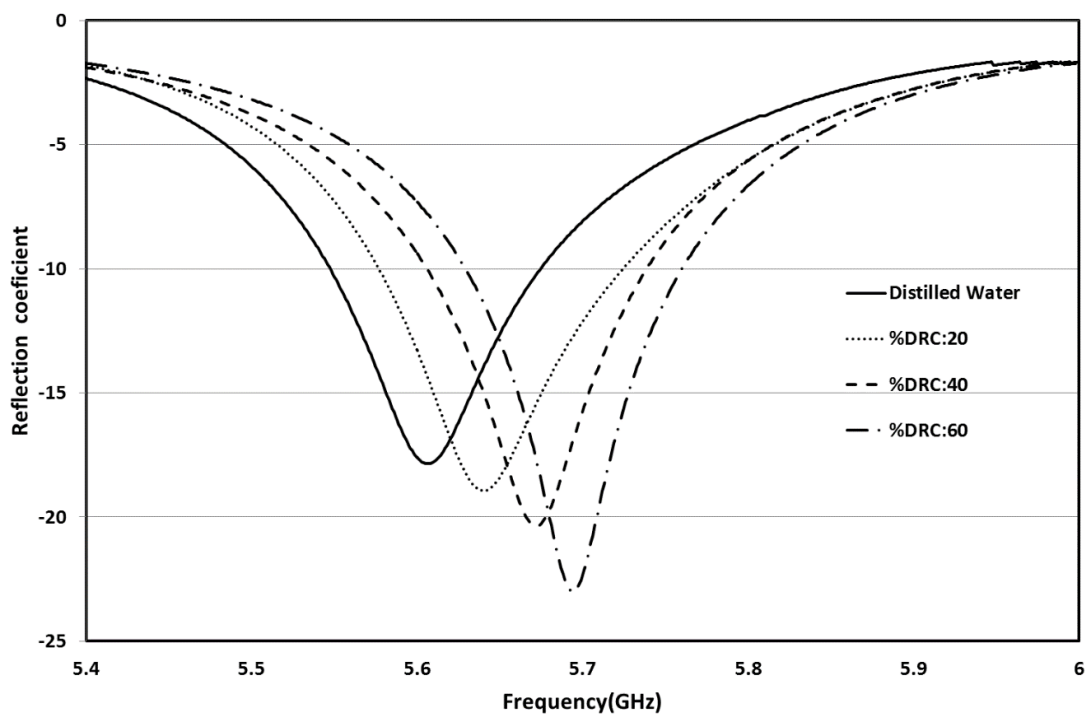
รูปที่ 4.27 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 20 mm ความถี่ 2-3 GHz



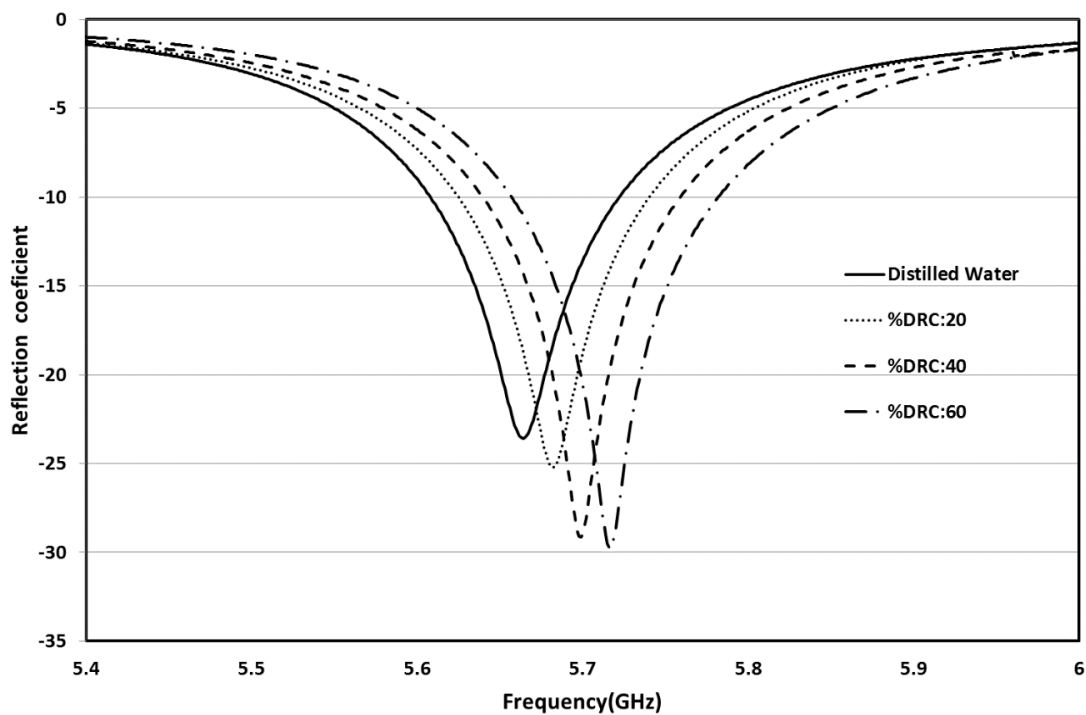
รูปที่ 4.28 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 0 mm ความถี่ 5.4-6 GHz



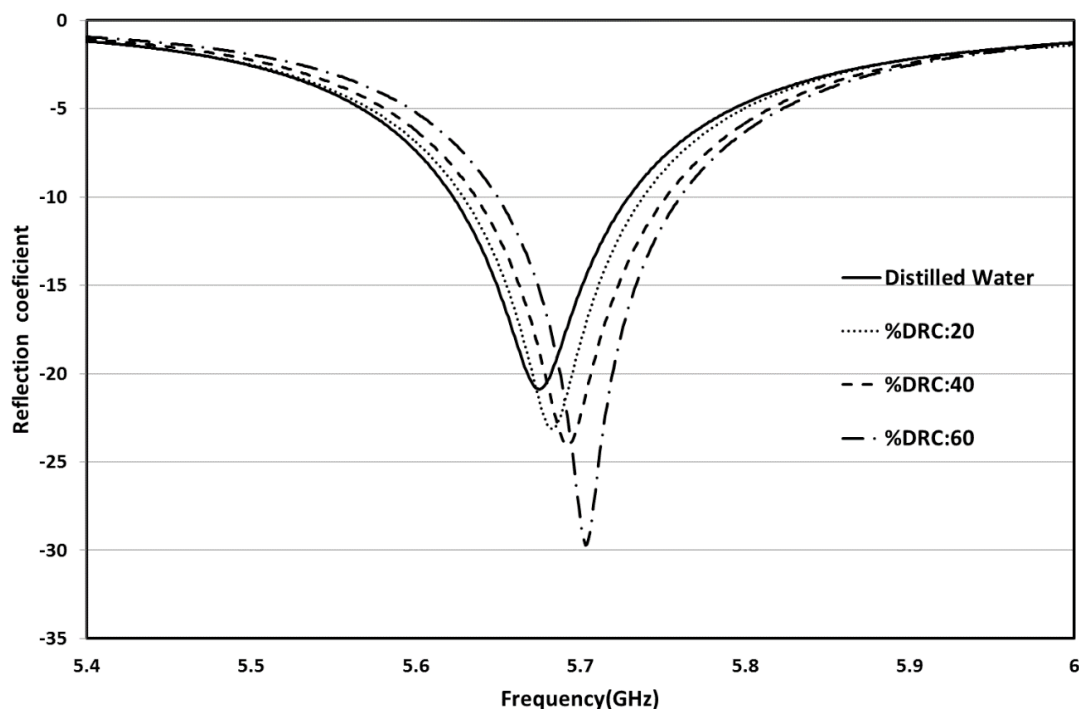
รูปที่ 4.29 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 5 mm ความถี่ 5.4-6 GHz



รูปที่ 4.30 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 10 mm ความถี่ 5.4-6 GHz



รูปที่ 4.31 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 15 mm ความถี่ 5.4-6 GHz



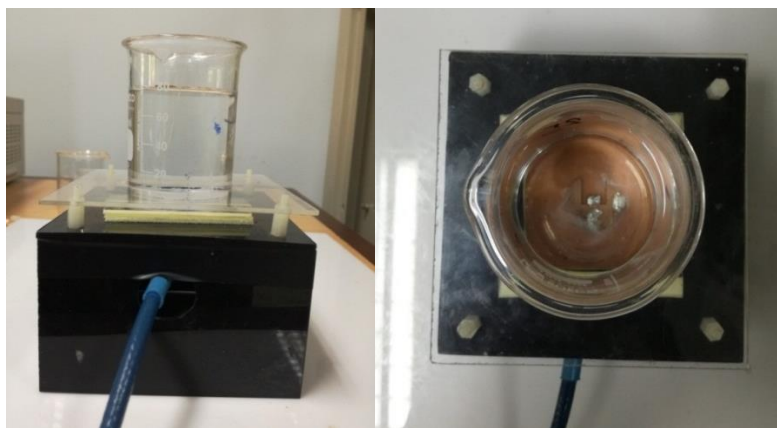
รูปที่ 4.32 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับภาชนะแก้วเป็น 20 mm ความถี่ 5.4-6 GHz

ตารางที่ 4.5 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางแต่ละความเข้มข้น

ระยะห่าง /%DRC	ความถี่ 2.5 GHz				ความถี่ 5.8 GHz			
	60	40	20	Water	60	40	20	Water
0	-0.3199	-0.242	-0.202	-0.192	-0.976	-1.016	-0.980	-0.980
5	-12.322	-6.366	-3.452	-1.239	-22.339	-17.180	-14.499	-10.418
10	-12.868	-6.788	-2.787	-1.393	-25.733	-23.501	-15.908	-11.902
15	-13.110	-9.181	-3.706	-1.314	-23.005	-16.969	-12.744	-8.482
20	-14.826	-8.871	-6.259	-4.160	-26.740	-23.058	-18.923	-15.765

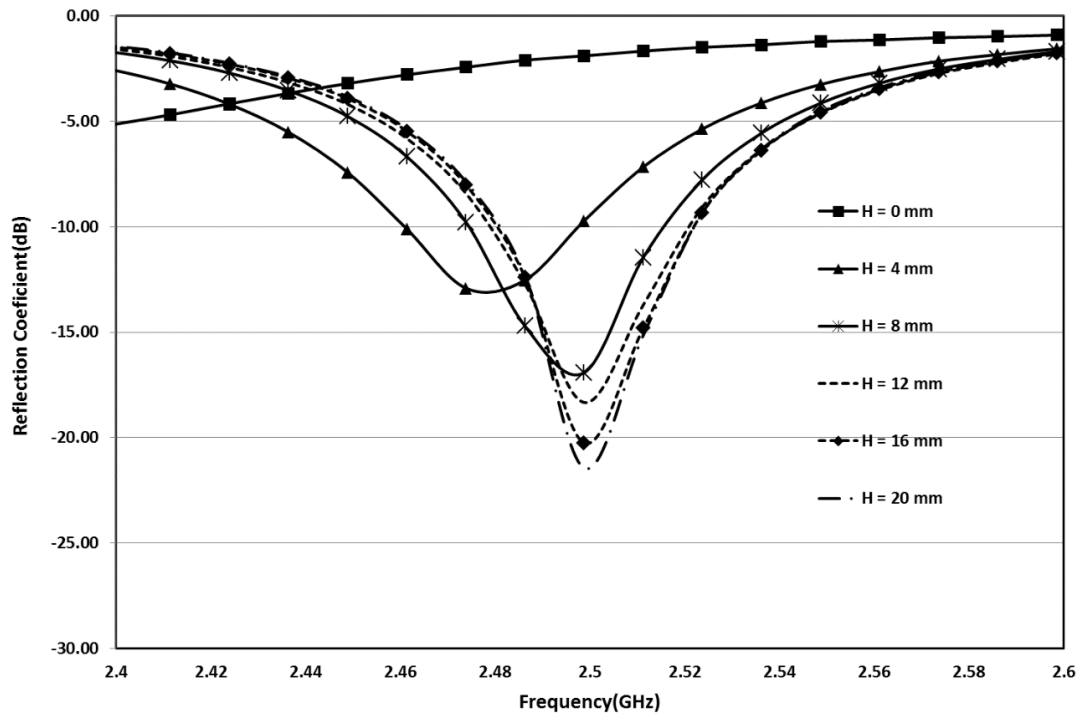
ผลการจำลองระยะห่างระหว่างภาชนะแก้วกับสายอากาศตามรูปที่ 4.23-4.32 พบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างภาชนะแก้วสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนก็จะมีค่าน้อยลง กล่าวคือ ค่าระยะห่างจะแปรผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน และระยะห่างที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางชั้นคือ ระยะ 15 มิลลิเมตร โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.31 ซึ่งระยะ 15 มิลลิเมตร ให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นที่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่ความถี่ 2.5 GHz แตกต่างกันเฉลี่ย 3.598 dB และที่

ความถี่ 5.8 GHz แตกต่างกันเฉลี่ย 4.741 dB และพบยังว่าความถี่เรโซแนนซ์มีการเลื่อนความถี่ขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำกลั่นที่ใส่ลงไป ในสถานะแก้วส่งผลให้เกิดการเลื่อนความถี่ โดยความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปพิจารณาเพื่อแยกแยะค่าความเข้มข้นของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นคือความถี่ 2.55 GHz และที่ความถี่ 5.7 GHz เนื่องจากเป็นความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน จากผลการจำลองระยะห่างระหว่างสถานะแก้วกับสายอากาศ MCP จึงนำไปสู่การออกแบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย VNA โดยเปลี่ยนแปลงความสูงของสถานะแก้วตั้งแต่ 0 ถึง 20 มิลลิเมตร ตามลำดับ และภายในสถานะแก้วปิกเกอร์บรรจุน้ำกลั่นขนาด 100 มิลลิลิตร แสดงตามรูปที่ 4.33

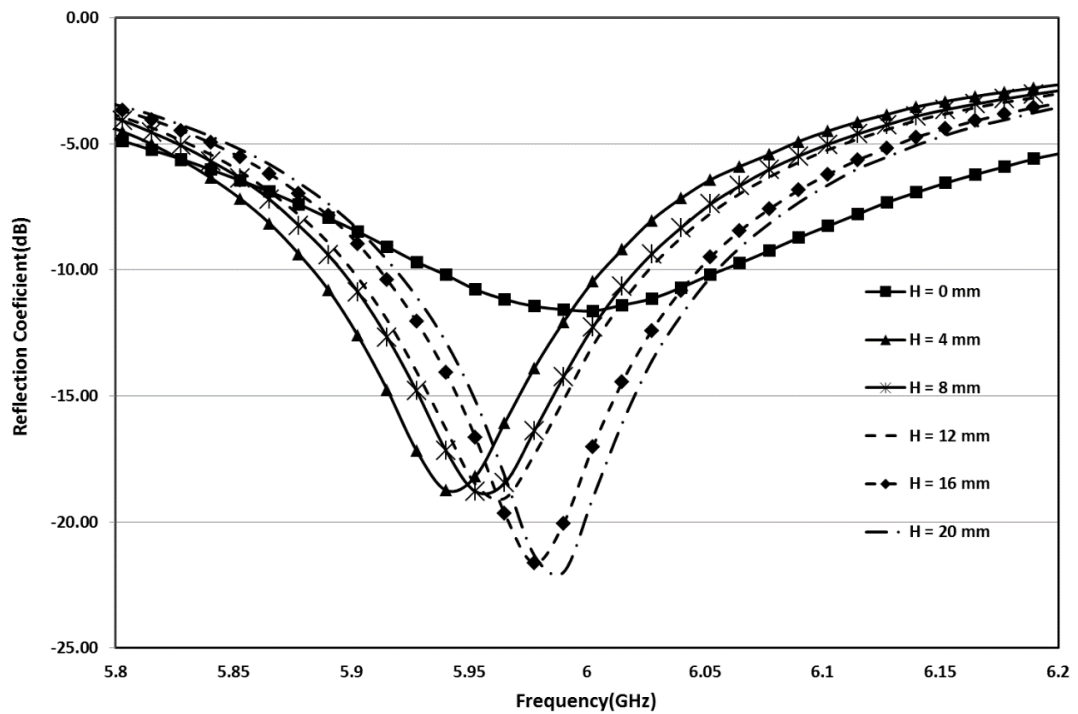


รูปที่ 4.33 ชุดทดสอบต้นแบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำกลั่นเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างสายอากาศกับสถานะแก้ว

จากผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายดังแสดงตามรูปที่ 4.34-4.35 พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศกับสถานะแก้วบรรจุน้ำกลั่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้มีค่าลดลง ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ต่ำกว่า -10 dB พบว่าที่ความถี่ 2.45 GHz จะมีค่าระยะที่เหมาะสมคือที่ระยะ 8 มิลลิเมตร และที่ความถี่ 5.8 GHz จะมีค่าระยะที่เหมาะสมคือที่ระยะ 16 มิลลิเมตร เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนใกล้เคียงกับผลตอบสนองของสายอากาศ MCP และมีระยะห่างที่ไม่มากจนกำลังของคลื่นไม่สามารถสะท้อนกลับมายังสายอากาศได้ ดังนั้นระยะห่างระหว่างสายอากาศกับสถานะแก้วที่มีความเหมาะสม (พิจารณาจากผลการจำลองและจากผลการวัด) คือที่ระยะ 15 มิลลิเมตร สังเกตได้จากเป็นตำแหน่งที่สามารถแยกแยะค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นได้อย่างชัดเจน จากผลการทดลองที่ได้นำไปสู่การสร้างชุดทดสอบต้นแบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางแต่ละความเข้มข้น โดยมีระยะห่างระหว่างน้ำยางกับสายอากาศเป็น 15 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.34 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างสายอากาศกับ ภาชนะแก้วที่ความถี่ 2.4-2.6 GHz



รูปที่ 4.35 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างสายอากาศกับ ภาชนะแก้วที่ความถี่ 5.8-6.2 GHz

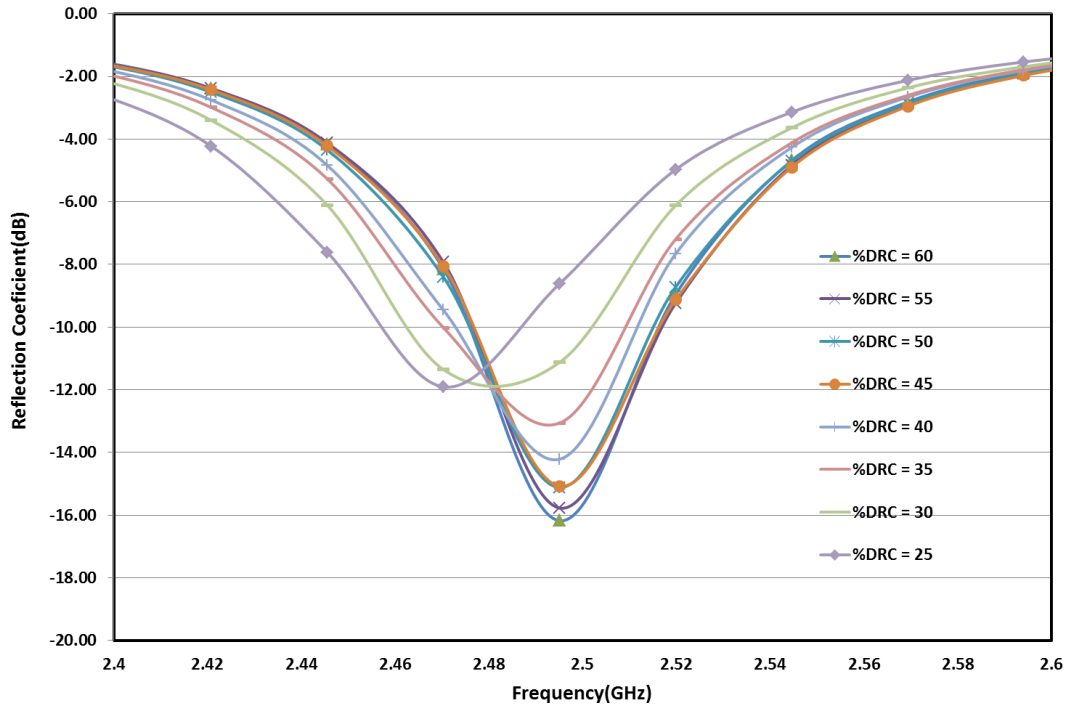
4.5 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางชั้นแต่ละความเข้มข้น

ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางชั้นแต่ละความเข้มข้นนั้นจะเริ่มจากการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้สำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางชั้น พิจารณาจากผลการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน และเฟสของน้ำยางแต่ละความเข้มข้น เพื่อทำการปรับปรุงแก้ไขรูปแบบกระบวนการวัดที่ให้ผลการวัดมีความถูกต้องแม่นยำมากที่สุด จากนั้นจึงทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางชั้นด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายตามสร้างอุปกรณ์ต้นแบบที่ได้จากการจำลอง แสดงตามรูปที่ 4.36 และทำการสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งที่ความถี่ 2.45 GHz และที่ความถี่ 5.8 GHz แสดงผลการวิเคราะห์สมการที่ได้หาค่าผิดพลาดที่เกิดจากโมเดล ซึ่งอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางชั้นได้ถูกออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างภาชนะแก้วกับสายอากาศที่ 15 มิลลิเมตร นอกจากนี้ในการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบยังได้ใช้สายโคแอกเชียลที่มีค่าการลดทอนที่ต่ำ เพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนถูกลดทอนในสายน้อย วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย VNA พิจารณาที่ความถี่ 2-7 GHz พึงค่า Log Mag และค่า Phase

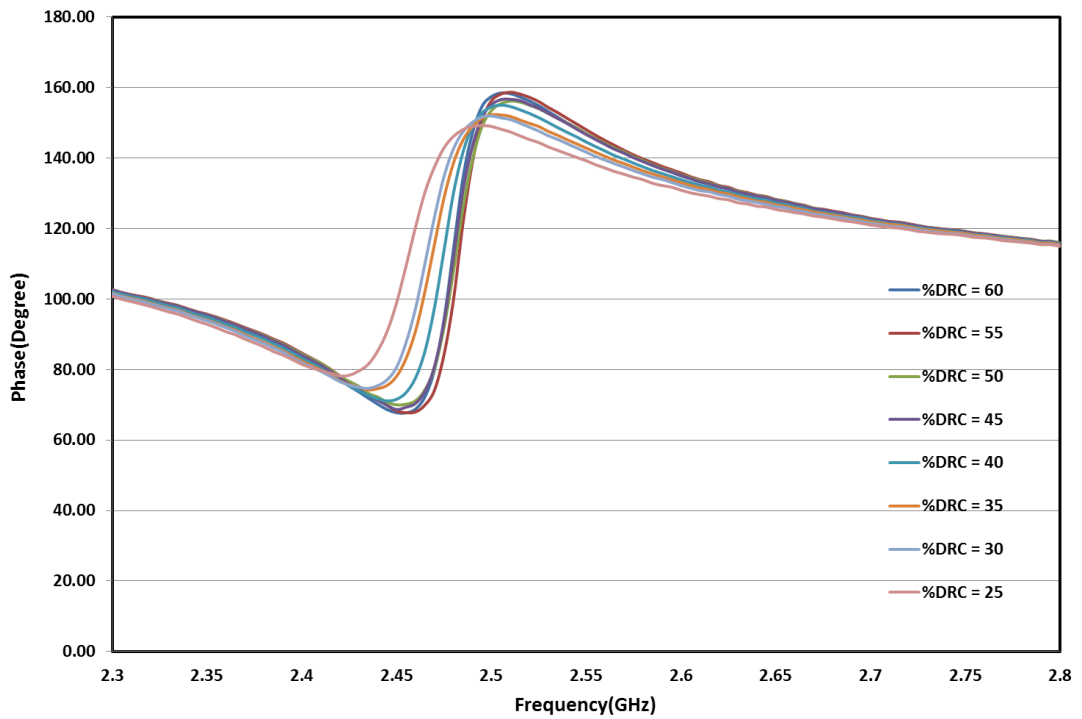


รูปที่ 4.36 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนด้วยชุดทดสอบต้นแบบสายอากาศ MCP

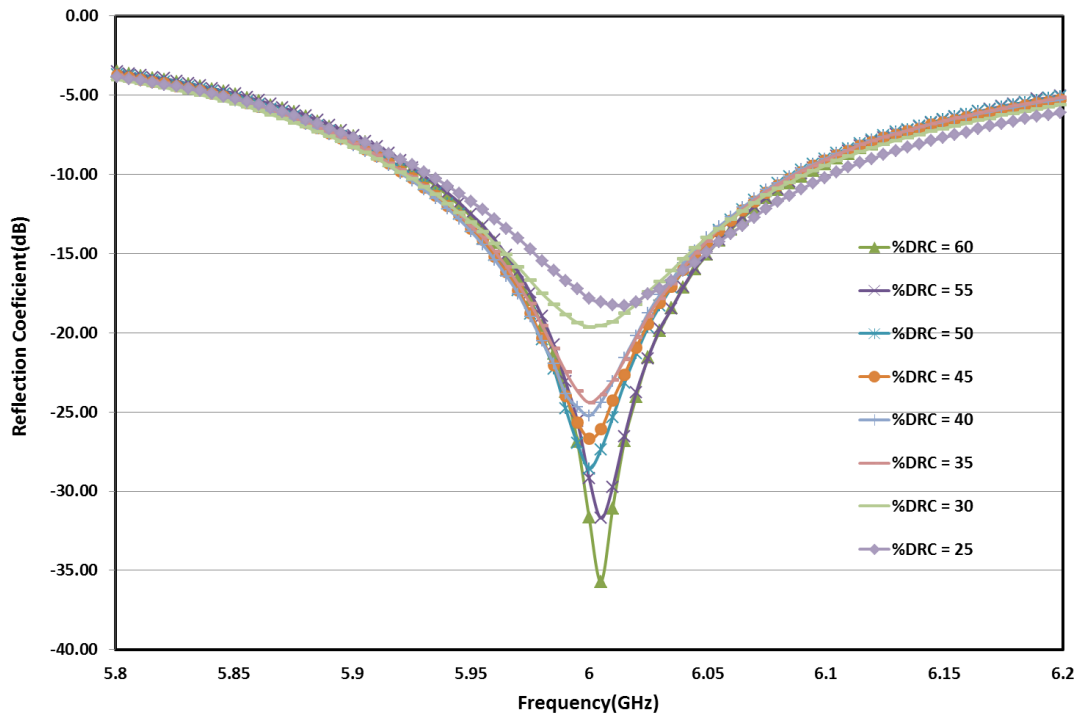
จากผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำยาง 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จำนวน 3 ครั้งและนำมาหาค่าเฉลี่ย พบว่าผลการวัดมีการเลื่อนความถี่เรโซแนนซ์โดยที่ความถี่ 2.5 GHz จะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่แยกกันอย่างชัดเจนของน้ำยางแต่ละความเข้มข้น ซึ่งจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสูงสุดประมาณ -9 dB ที่น้ำยางความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าต่ำสุดประมาณ -16 dB ที่น้ำยางความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ และที่ความถี่ 5.8 GHz เลื่อนเป็นที่ความถี่ 6 GHz เป็นอีกความถี่หนึ่งที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นแยกกันอย่างชัดเจน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสูงสุดประมาณ -17 dB ที่น้ำยางความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์ และค่าต่ำสุดประมาณ -36 dB ที่น้ำยางความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ แสดงตามรูปที่ 4.37 ถึง 4.40



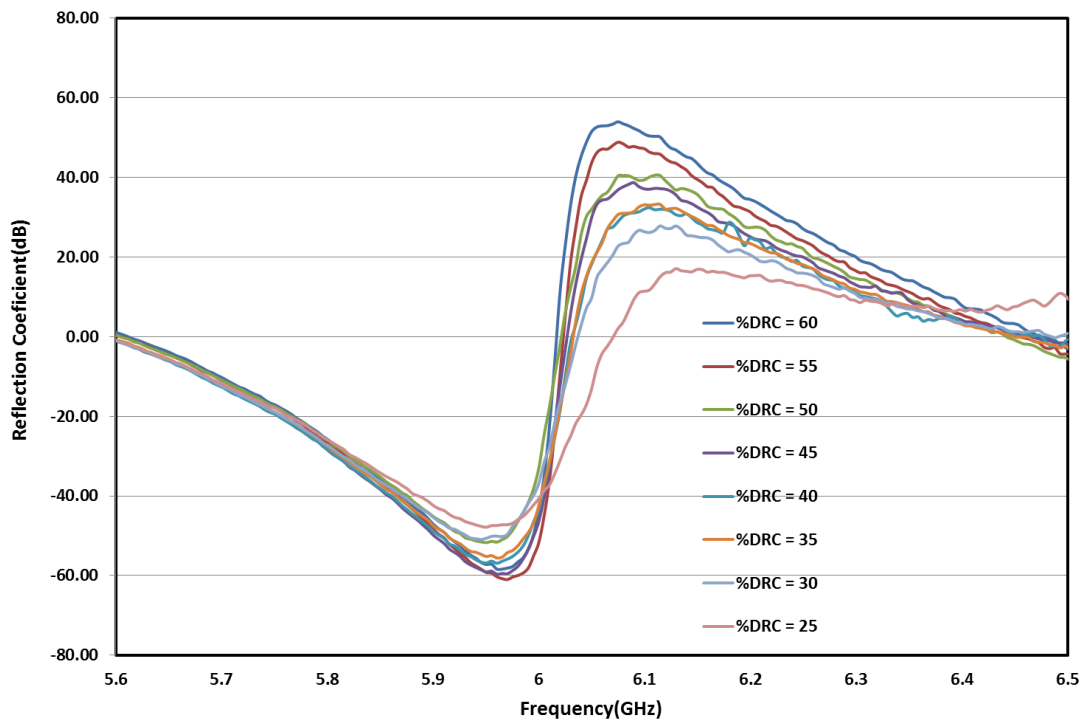
รูปที่ 4.37 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางแต่ละ %DRC ที่ความถี่ 2-3 GHz



รูปที่ 4.38 ค่าเฟสของน้ำยางแต่ละ %DRC ที่ความถี่ 2-3 GHz



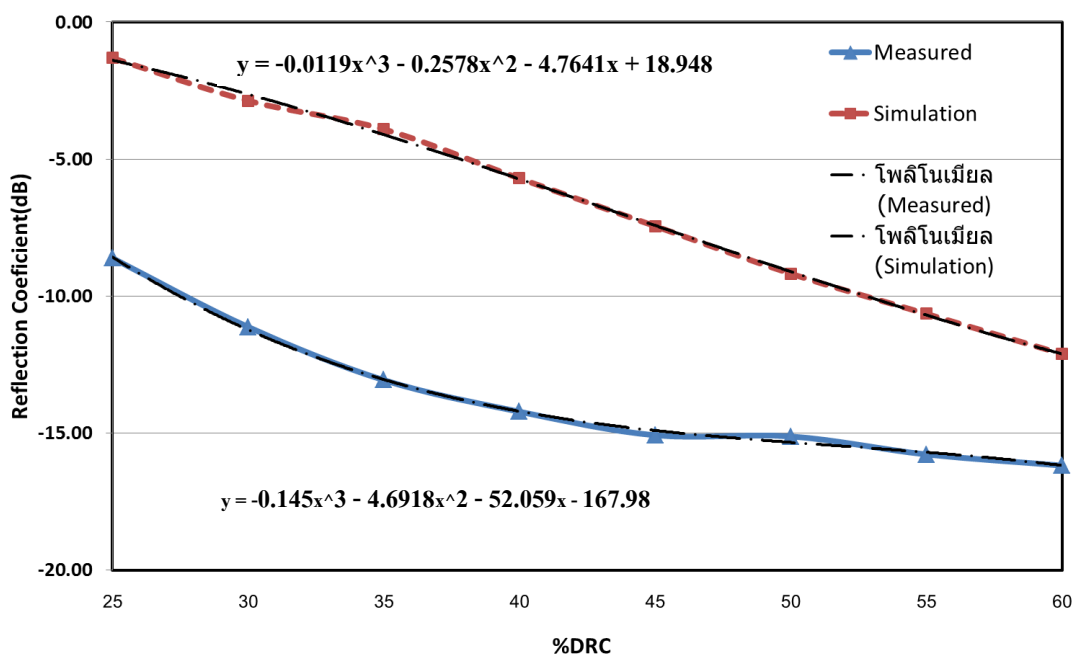
รูปที่ 4.39 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางแต่ %DRC ที่ความถี่ 5-6 GHz



รูปที่ 4.40 ค่าเฟสของน้ำยางแต่ละ %DRC ที่ความถี่ 5-6 GHz

4.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

จากผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางชั้นแต่ละความเข้มข้นด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (VNA) จากนั้นจึงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยอาศัยการสร้างสมการด้วยโพลีโนเมียล ลำดับ 3 เนื่องจากให้สมการที่ไม่ซับซ้อนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเขียนโปรแกรมได้ จากผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางแต่ละความเข้มข้นพบว่าที่ความถี่ 2.5 และ 6 GHz มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่แยกกันอย่างชัดเจนเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำยาง ดังนั้นจึงสามารถสร้างสมการได้เป็น 2 สมการ คือสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่ 2.5 GHz และสมการแสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่ 6 GHz แสดงตามรูปที่ 4.41 และ 4.42



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับค่า %DRC จากผลการวัดเทียบกับผลการจำลองของความถี่ 2.5 GHz

จากรูปที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสามารถสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ได้ดังนี้คือ

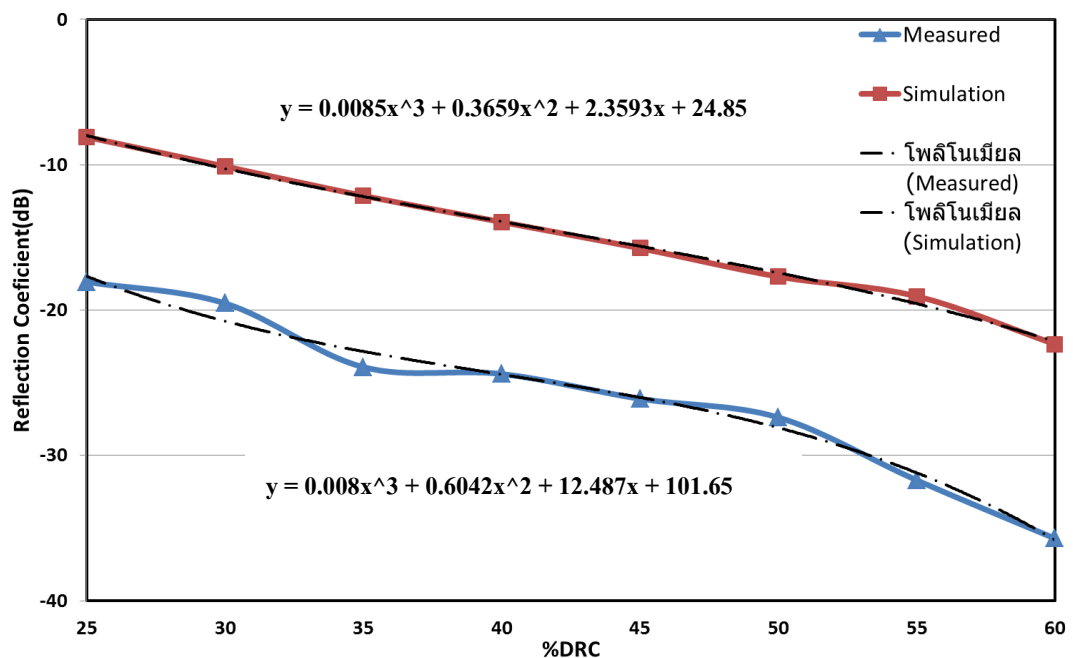
$$\%DRC(2.5GHz) = -0.145x^3 - 4.692x^2 - 52.059x - 167.98 \tag{4.5}$$

เมื่อ %DRC คือค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งที่ความถี่ 2.5 GHz และ x คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (dB)

สมการที่ได้จากการจำลองและสมการที่ได้จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน จะมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากผลของเงื่อนไขผลตอบแทนของความถี่ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้มีค่าแตกต่างกัน และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากผลการจำลองมีค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวัดจริง จึงส่งผลให้สมการทั้งสองมีค่าแตกต่างกันแต่ยังคงมีแนวโน้มของกราฟที่เหมือนกัน และจากรูปที่ 4.42 ที่ความถี่ 6 GHz แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยสามารถสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ได้ดังนี้คือ

$$\%DRC(6GHz) = 0.008x^3 + 0.605x^2 + 12.487x + 101.65 \quad (4.6)$$

เมื่อ %DRC คือค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องานแห่งที่ความถี่ 6 GHz และ x คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (dB) สมการที่ 4.6 เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เนื้องานแห่งกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่ 6 GHz เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องานแห่งกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เกิดขึ้นแล้ว จากสมการทำให้สามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องานแห่งได้จากค่าการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่ 2.5 GHz และ 6 GHz ได้ เนื่องจากสมการดังกล่าวที่สร้างขึ้นมานั้นยังมีค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นภายในระบบจึงต้องทำการวัดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของสมการ โดยการนำผลการทำนายที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้องานแห่งด้วยวิธีแบบมาตรฐาน



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับค่า %DRC จากผลการวัดเทียบกับผลการจำลองของความถี่ 6 GHz

4.7 การทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนของสมการ

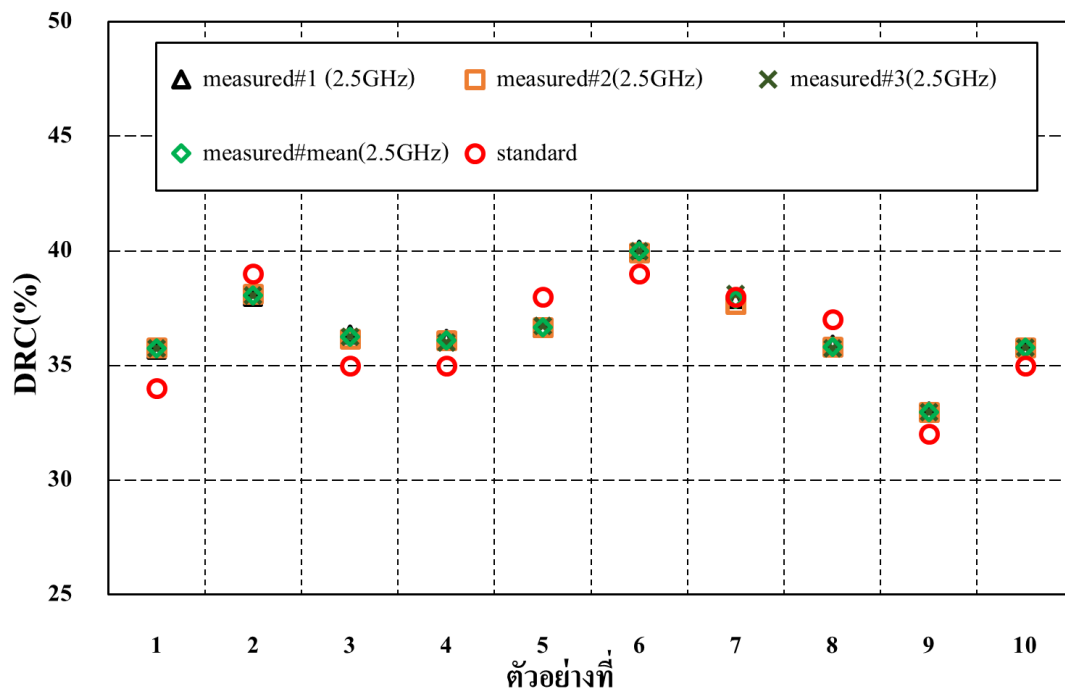
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้งกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้ยังคงมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น การหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Percentage Error) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นสามารถทำได้โดย

1. เก็บตัวอย่างน้ำยางสดของจุกดิบซึ่ได้จากเกษตรกรรายย่อยจำนวน 30 ตัวอย่าง แสดงตามรูปที่ 4.43
2. นำตัวอย่างน้ำยางสดที่ได้มาวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ MCP จำนวน 3 ครั้งแต่ละตัวอย่างเพื่อให้ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้มีความถูกต้องมากที่สุด
3. ตัวอย่างน้ำยางสดที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โคร่งข่าย แล้วนำไปวัดค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้งด้วยวิธีแบบมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ
4. นำผลการวัดที่ได้มาวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

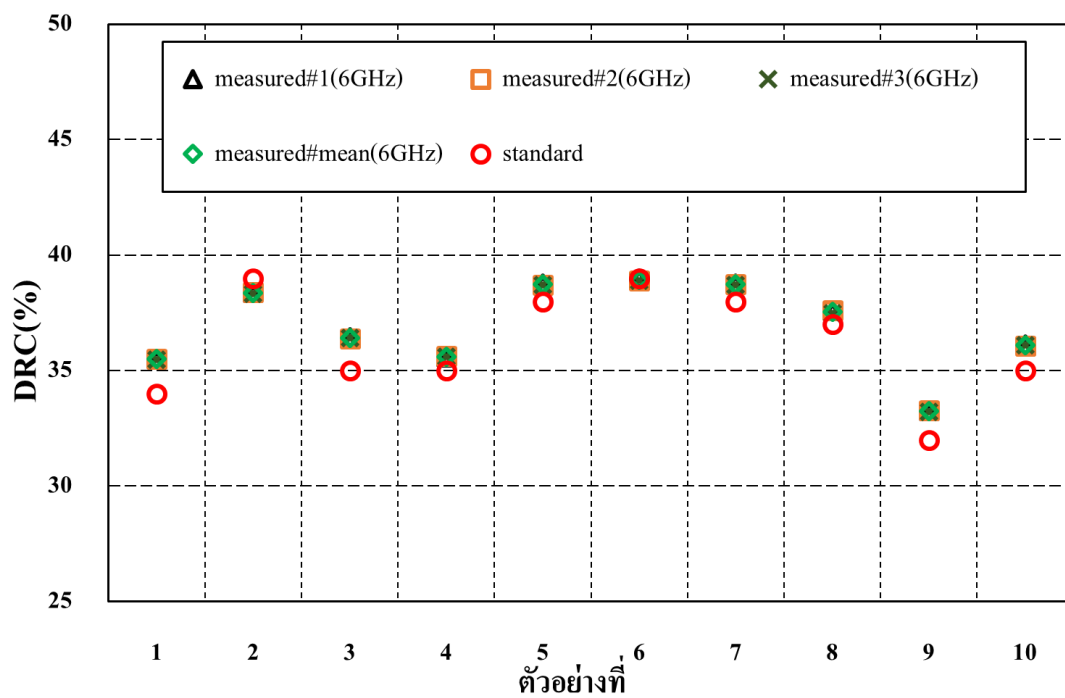


รูปที่ 4.43 น้ำยางสดจากจุกดิบซึ่ได้จากเกษตรกรรายย่อยจำนวน 30 ตัวอย่าง

การทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองนั้นเริ่มต้นจากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางสดแต่ละตัวอย่างจำนวน 3 ซ้่า จากนั้นแปลงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่ 2.5 และ 6 GHz เป็นค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้งด้วยสมการที่ 4.5 และ 4.6 เปรียบเทียบผลการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้งกับผลการวัดด้วยวิธีมาตรฐานแสดงตามรูปที่ 4.44 และ 4.45 ผลการวัดที่ได้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการวัดทั้ง 3 ครั้งมีค่าต่างกันด้วยจุดทศนิยมลำดับที่ 2 ดังนั้นจึงได้ทำการเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการวัดทั้ง 3 ครั้งเพื่อนำค่าผลการวัดเฉลี่ยที่ได้ไปแปลงเป็นค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้ง และวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนต่อไป



รูปที่ 4.44 เปรียบเทียบผลการทำนายค่า %DRC ที่ความถี่ 2.5 GHz (สมการที่ 4.5) จำนวน 3 ซ้ำ เทียบกับค่าที่ได้จากการวัดด้วยวิธีแบบมาตรฐาน



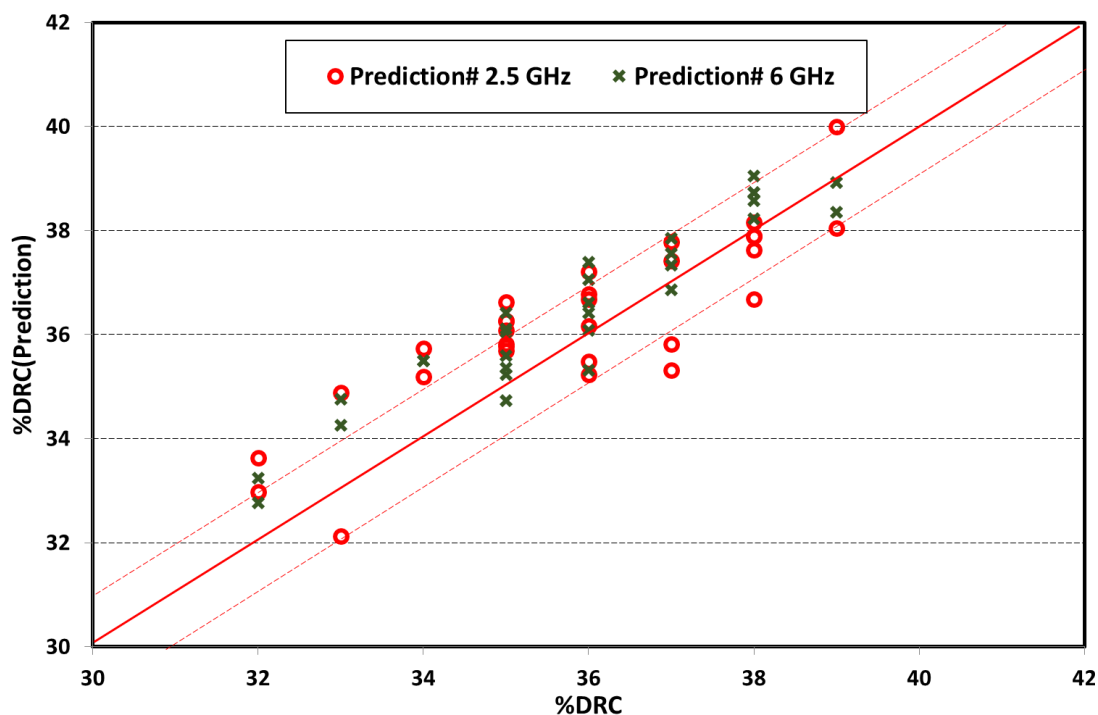
รูปที่ 4.45 เปรียบเทียบผลการทำนายค่า %DRC ที่ความถี่ 6 GHz (สมการที่ 4.6) จำนวน 3 ซ้ำ เทียบกับค่าที่ได้จากการวัดด้วยวิธีแบบมาตรฐาน

ผลการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่ 2.5 และ 6 GHz เทียบกับผลการของเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งด้วยวิธีมาตรฐานแสดงตามรูปที่ 4.46 จากผลการทดสอบพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งที่ได้จากการทำนายทั้งสองสมการยังมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สูงมากกว่าเส้นกรอบ $\pm 1\%$ จากนั้นนำสองสมการทั้งที่ความถี่ 2.5 และ 6 GHz มาทำนายร่วมกันจากนั้นแล้วเฉลี่ยค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งเทียบกับผลการทดสอบด้วยวิธีแบบมาตรฐานแสดงตามรูปที่ 4.47 ผลการทดสอบพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งที่ได้จากการทำนายทั้งสองสมการให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ลดลงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งในน้ำยางสดต่อไป จากผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งที่ได้ สามารถหาค่าความคลาดเคลื่อน (Percentage Error) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination) ได้จากสมการดังนี้

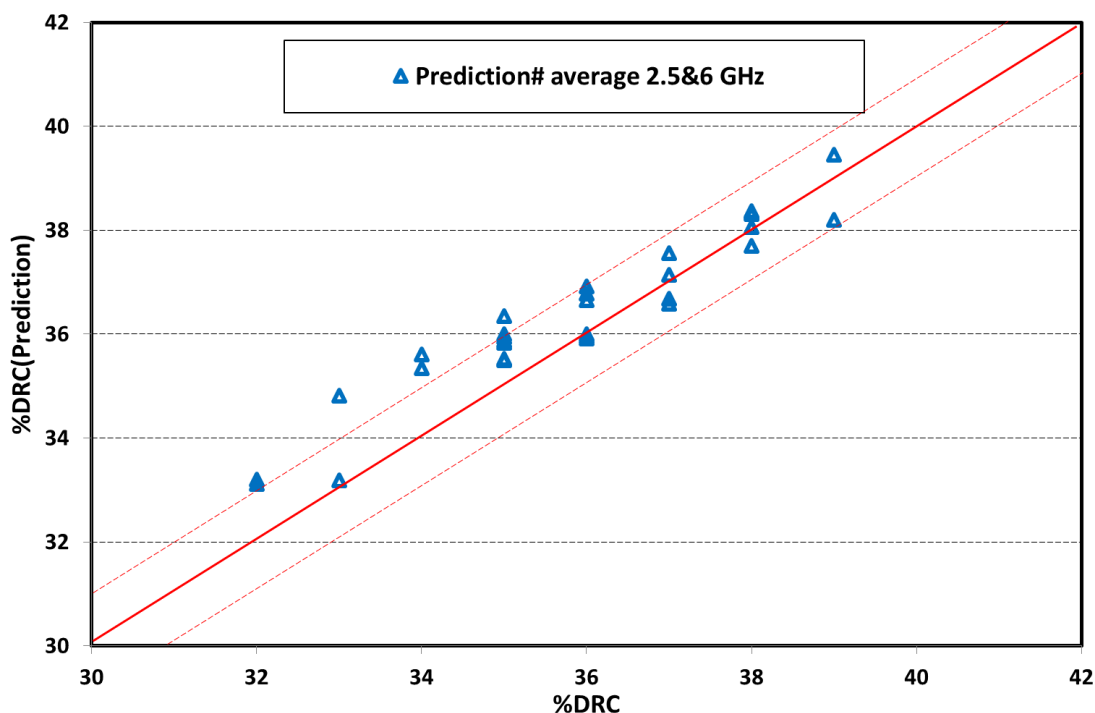
$$\text{Percentage Error} = \frac{|\text{Measured} - \text{Actual}|}{|\text{Actual}|} * 100\% \quad (4.7)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum xy - n(\bar{x} \cdot \bar{y})}{\sqrt{\sum (xi^2 - n\bar{x}^2)} \sqrt{\sum (yi^2 - n\bar{y}^2)}} \right)^2 \quad (4.8)$$

เมื่อ R^2 คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination), n คือ จำนวนตัวอย่าง, \bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปร x , \bar{y} คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปร y



รูปที่ 4.46 ผลการทำนายเปอร์เซ็นต์น้ำยางที่ความถี่ 2.5 และ 6 GHz เทียบกับผลการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้องอกแห้งด้วยวิธีมาตรฐาน



รูปที่ 4.47 ผลการทำนายเปอร์เซ็นต์น้ำยางรวม 2 ความถี่เทียบกับผลการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง ด้วยวิธีมาตรฐาน

ซึ่งจากผลการคำนวณที่ได้พบว่าที่ความถี่ 2.5 GHz มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเป็น 2.64 เปอร์เซ็นต์ ค่า R^2 มีค่าเป็น 0.58 และที่ความถี่ 6 GHz มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเป็น 2.20 R^2 มีค่าเป็น 0.86 และถ้านำ 2 สมการมาพิจารณาจะส่งผลให้มีค่าความคลาดเคลื่อนลดลงเป็น 1.89 เปอร์เซ็นต์ R^2 จะมีค่าเป็น 0.89 ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ที่ยังสามารถนำไปใช้ในการวัดเปอร์เซ็นต์เนื้อยางในน้ำยางสดได้ และหากให้ 2 ความถี่ในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเพื่อทำนายค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งร่วมกันจะส่งผลให้ผลการวัดที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น จากผลการวัดค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งที่ได้ จึงทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งกับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกจากโมเดลทางคณิตศาสตร์ตามสมการดังนี้คือ

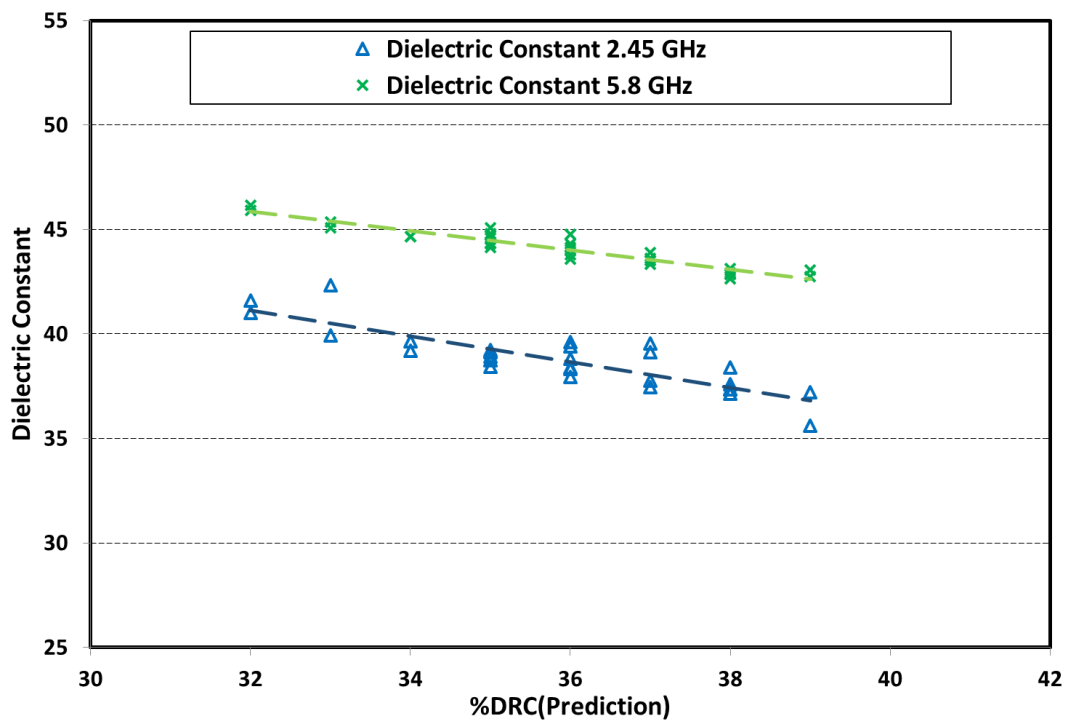
$$\varepsilon'(2.45GHz) = 70.02708 - 0.77795(X) - 0.00487(X)^2 + 0.00007(X)^3 \quad (4.9)$$

$$\varepsilon''(2.45GHz) = 10.09478 - 0.11696(X) + 0.00204(X)^2 - 0.00002(X)^3 \quad (4.10)$$

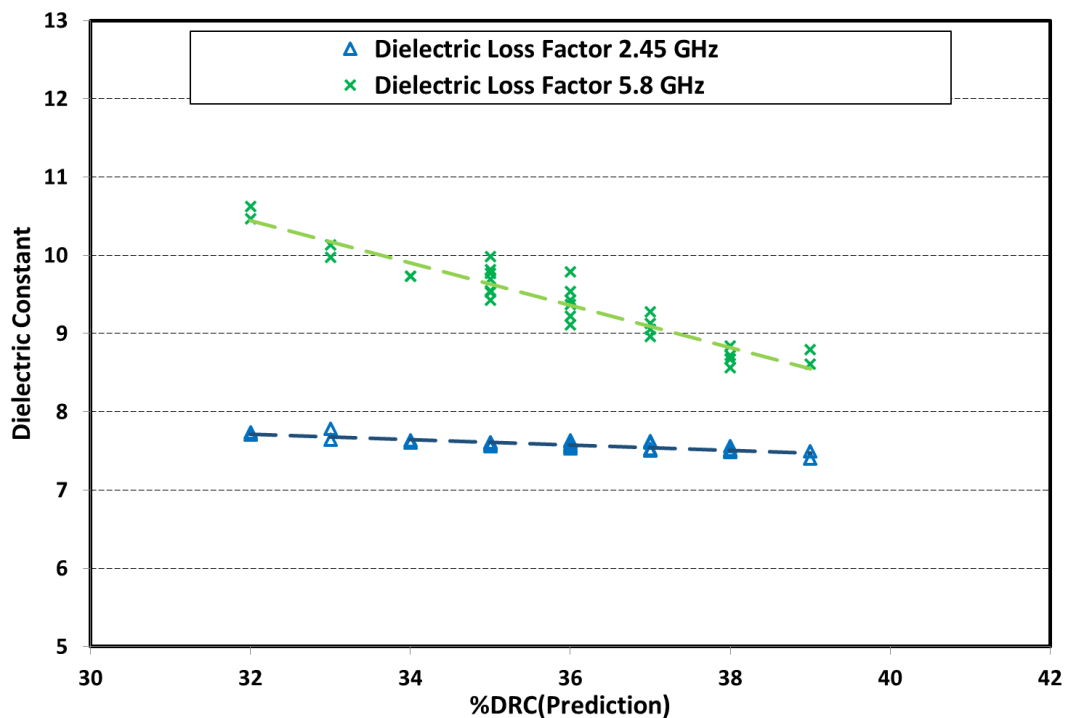
$$\varepsilon'(5.8GHz) = 65.05236 - 0.68226(X) + 0.00552(X)^2 - 0.00007(X)^3 \quad (4.11)$$

$$\varepsilon''(5.8GHz) = 21.74914 - 0.36293(X) + 0.00104(X)^2 - 0.00001(X)^3 \quad (4.12)$$

โดยที่ X คือ %DRC ผลการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามที่กล่าวมาจึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกได้ ตามรูป 4.47-4.48 ซึ่งสามารถนำไปใช้สำหรับการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางข้นด้วยวิธีแบบไม่สัมผัสได้



รูปที่ 4.47 ผลการแปลงค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องอมแห้งเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริก



รูปที่ 4.48 ผลการแปลงค่าเปอร์เซ็นต์เนื้องอมแห้งเป็นค่าตัวประกอบการสูญเสีย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 เนื้อหาโดยสรุป

การศึกษากระบวนการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางชั้นด้วยวิธีแบบไม่สัมผัสได้เริ่มจากการศึกษากระบวนการ และเทคนิคการวัดการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก พบว่าเทคนิคที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานคือ เทคนิคโพรบปลายเปิด และเทคนิคอวกาศว่าง จากนั้นจึงได้ทำการศึกษาขอบเขตการกระจายกำลังงานของโพรบปลายเปิดโดยการประยุกต์กระบวนการเพื่อไม่ให้เซนเซอร์สัมผัสสัมผัสกับน้ำยางโดยตรง โดยทำการจำลองสนามไฟฟ้าของโพรบปลายเปิด 2 ชนิดคือ SMA และ N-type ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics การจำลองแบ่งได้แบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ 1. กรณีโพรบอยู่ในตัวกลางที่เป็นอากาศ และ 2. กรณีที่โพรบวางอยู่ได้ภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่น จากผลการจำลองพบว่าความหนาของภาชนะแก้วมีผลต่อขอบเขตบริเวณการแผ่กระจายกำลังงาน ซึ่งโพรบชนิด N-type ให้ขอบเขตบริเวณการกระจายกำลังงานมากกว่าโพรบชนิด SMA เมื่อพิจารณากำลังงานที่ -40 dB โดยมีขอบเขตบริเวณทดสอบของโพรบชนิด SMA และ N-type มีระยะเท่ากับ 1.5 และ 3.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากผลการจำลองที่ได้พบว่าเทคนิคโพรบปลายเปิดยังไม่เหมาะสำหรับการใช้วัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิคแบบไม่สัมผัส จากนั้นจึงทำการศึกษาเทคนิคอวกาศว่างโดยเริ่มจากการศึกษาออกแบบสายอากาศแพทช์ เพื่อหาขนาดและรูปแบบของสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้วัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำกลั่นในภาชนะแก้วด้วยเทคนิคแบบไม่สัมผัส สายอากาศที่เลือกมาออกแบบคือสายอากาศแพทช์แบบวงกลมเนื่องจากมีสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกมาอย่างสมมาตร ซึ่งขนาดของสายอากาศแพทช์ที่เหมาะสมหาได้จากจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นภายในภาชนะแก้วขนาด 100 มิลลิเมตร จากผลการจำลองพบว่าสายอากาศแพทช์แบบวงกลมที่รัศมี 9 มิลลิเมตร นั้นมีความเหมาะสมสำหรับการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำกลั่นในภาชนะแก้ว ซึ่งให้ระยะบริเวณทดสอบเท่ากับ 40 มิลลิเมตร ต่อมาจึงได้ทำการออกแบบสายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดรัศมี 9 มิลลิเมตรให้สามารถตอบสนองได้ที่ความถี่ 2.45 GHz และความถี่ 5.8 GHz ด้วยเทคนิคการเพิ่มการลัดวงจร และใช้เทคนิคโหลดแบบร่อง ซึ่งสายอากาศต้นแบบที่ออกแบบเรียกว่า สายอากาศ MCP (Miniaturize Circular Patch) สายอากาศดังกล่าวมีขนาดลดลง 53 % เมื่อเทียบกับขนาดดั้งเดิม

ชุดทดสอบต้นแบบการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยสายอากาศ MCP ถูกสร้างด้วยแผ่นอะคลิลิกและน็อคสกรูแบบพลาสติกเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ในส่วนของตัวอย่างสำหรับวัดได้ทำการเจือจางน้ำยางความ

เข้มข้น 20-60 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการทดสอบการเจือจางด้วยวิธีมาตรฐาน และทดสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยโพรบมาตรฐาน Agilent Probe Kits การทดลองดังกล่าวจะได้โมเดลทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกกับค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้ง จากนั้นทดลองเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิ 25-35 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิมีผลกับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกน้อยกว่าความถี่สูงจึงไม่ได้นำค่าอุณหภูมิมาพิจารณาในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน การจำลองกระบวนการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน เริ่มต้นจากการวิเคราะห์ค่าระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์สายอากาศ MCP กับภาชนะแก้ว จากการทดลองพบว่าค่าระยะห่างระหว่างภาชนะแก้วกับสายอากาศที่เหมาะสมคือ ที่ระยะ 15 มิลลิเมตร เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่สูงและให้ผลแตกต่างอย่างชัดเจน ทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของน้ำยางด้วยโมเดลการวัดที่สร้างขึ้นที่ระยะ 15 มิลลิเมตร การทดลองดังกล่าวส่งผลให้ได้โมเดลทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้ง

การทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนของสมการที่ได้สามารถทำได้โดยการนำตัวอย่างน้ำยางจำนวน 30 ตัวอย่างจากเกษตรกรรายย่อยมาทำการวัดเทียบกับวิธีการวัดค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้งด้วยวิธีแบบมาตรฐาน การทดลองพบว่าที่ความถี่ 2.5 GHz จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเป็น 2.64 เปอร์เซ็นต์ ค่า R^2 มีค่าเป็น 0.58 และที่ความถี่ 6 GHz มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเป็น 2.20 เปอร์เซ็นต์ R^2 มีค่าเป็น 0.86 และหากนำ 2 สมการมาพิจารณาร่วมกันจะส่งผลให้มีค่าความคลาดเคลื่อนลดลงเป็น 1.89 เปอร์เซ็นต์ R^2 จะมีค่าเป็น 0.89 ซึ่งเป็นวิธีที่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่ำสุด จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าสายอากาศ MCP สามารถนำไปประยุกต์เพื่อใช้วัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำยางที่อยู่ในภาชนะด้วยวิธีแบบไม่สัมผัสได้

5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

กระบวนการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้ยังเป็นเพียงกระบวนการในห้องปฏิบัติการ ซึ่งยังไม่ได้วิเคราะห์ค่าปัจจัยที่มีผลกระทบ เช่นกรณีที่อยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดคลื่นจากภายนอก เป็นต้น อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณาค่าของอุณหภูมิร่วมด้วยซึ่งค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย เนื่องจากส่งผลให้สมการมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น กระบวนการวัดดังกล่าวจึงยังเป็นเพียงเทคนิคการวัดเบื้องต้นซึ่งยังต้องใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ส่งผลให้กระบวนการวัดดังกล่าวจึงยังไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้ของเกษตรกรรายย่อย เนื่องจากยังมีราคาที่สูง และมีกระบวนการวัดที่ยุ่งยาก แต่กระบวนการวัดดังกล่าวยังสามารถนำไปพัฒนาต่อด้วยการสร้างแหล่งกำเนิดคลื่นด้วยวงจรที่ไม่ซับซ้อน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้

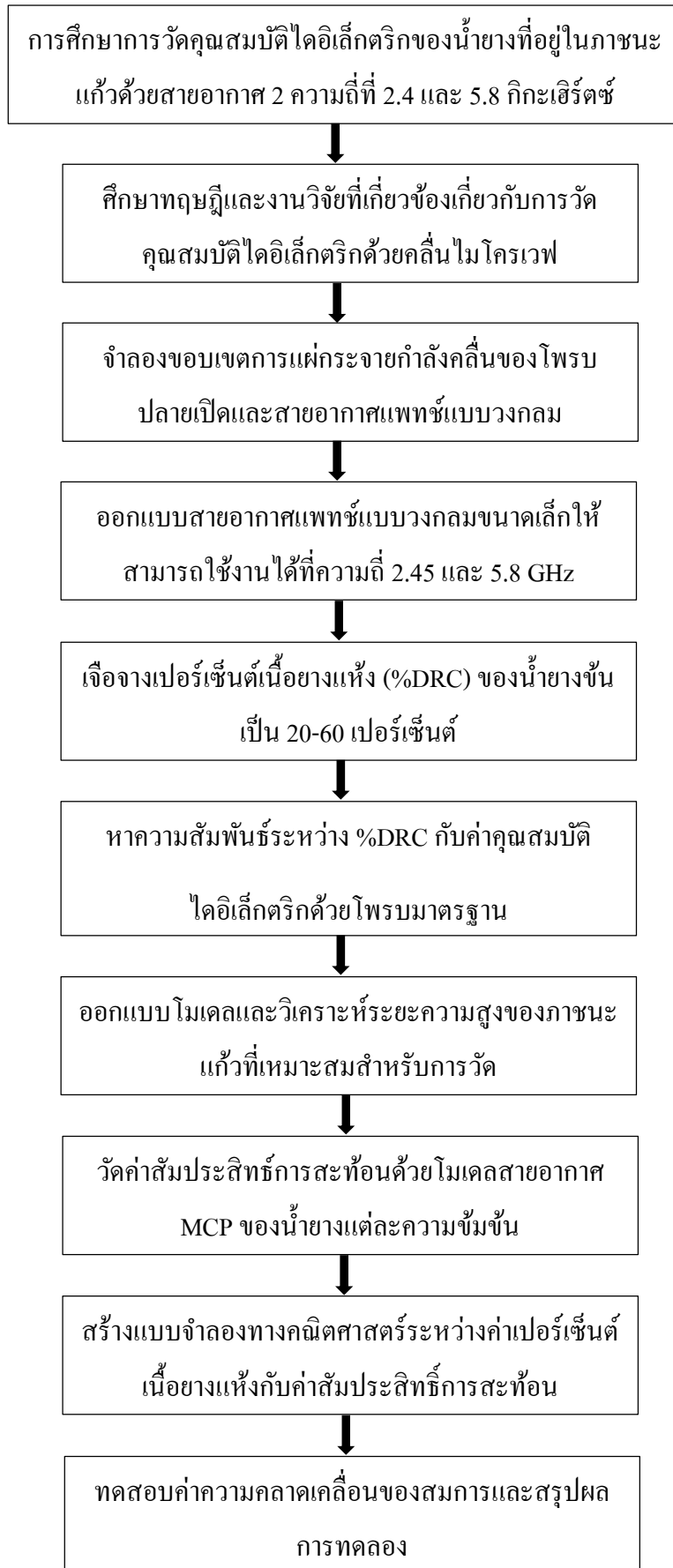
บรรณานุกรม

- [1] “ข้อมูลสถิติการค้าระหว่างประเทศไทย,” ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์, [online]. Available: <http://www.ops3.moc.go.th>, Accessed [10 October 2014]
- [2] “สถิติยางโลก: การผลิตยางธรรมชาติของประเทศต่างๆ,” [สถาบันวิจัยยาง], กรมวิชาการเกษตร, [online]. Available: http://www.rubberthai.com/statistic/stat_index, Accessed [10 October 2014]
- [3] “ปัจจัยที่มีผลเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง,” [ยางพารารวันนี้], [Online]. Available: <http://live-rubber.com>, Accessed [10 October 2014]
- [4] สถาบันวิจัยยาง, กรมวิชาการเกษตร, [Online]. [<http://www.rubberthai.com>, Accessed] [10 October 2014]
- [5] K.Khalid, J. Hassan, and W.M.D.W. “Yusof, Dielectric phenomena in Hevea rubber latex and Its Application,” in proceedings of the 5 th International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials, pp. 78-81, May 1997.
- [6] M. M. Ghretli, K. Khalid, I. V. Grozescu, M. H. Sahri, and Z. Abbas, “Dual-Frequency Microwave Moisture Sensor Based on Circular Microstrip Antenna,” IEEE Sensors Journal, vol. 7, no. 12, pp. 1749–1756, Dec. 2007.
- [7] T.Jayanthi and P.E. Sankaranarayanan, “Measurement of dry rubber content in latex using microwave technique,” Measurement Science Review, vol. 5(3), pp. 50-54, 2005
- [8] ธาณี สมวงศ์ และ สมพร ศรีวัฒนพล “การประยุกต์ใช้คลื่นไมโครสตริปเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนสำหรับหาความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าความถี่เรโซแนนซ์ในน้ำยางสด,” การประชุมวิชาการไฟฟ้าครั้งที่ 31, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2008
- [9] S. Julrat, M. Chongcheawchamnan, T. Khaorapong, O. Patarapiboolchai, M. Kririksh, and I. D. Robertson, “Single-Frequency-Based Dry Rubber Content Determination Technique for In-Field Measurement Application,” IEEE Sensors Journal, vol. 12, no. 10, pp. 3019–3030, Oct. 2012.
- [10] C.A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and design. New York: Wiley, 1982.
- [11] Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materies, Application Note, Agilent Technologies.

- [12] M. S Venkatesh และ G. S. V. Raghavan. “An overview of dielectric properties measuring techniques”. Canadian biosystems engineering 47, no 7 (2005): 15–30.
- [13] Y. Yeow, Z. Abbas, and K. Khalid, “Application of Microwave Moisture Sensor for Determination of Oil Palm Fruit Ripeness,” Measurement Science Review, vol. 10, no. 1, Jan. 2010.
- [14] N. Z. Yahaya, Z. Abbas, B. M. Ali, A. Ismail, and F. Ansarudin, “Intercomparison of Methods for Determination of Resonant Frequency Shift of a Microstrip Patch Antenna Loaded with Hevea Rubber Latex,” Journal of Sensors, vol. 2014, 2014.
- [15] S. Hoshina, Y. Kanai, and M. Miyakawa, “A numerical study on the measurement region of an open-ended coaxial probe used for complex permittivity measurement,” Magnetics, IEEE Transactions on, vol. 37, no. 5, pp. 3311–3314, 2001.
- [16] S. Julrat, M. Chongcheawchamnan, and I. D. Robertson, “Characterisation of the dielectric properties of rubber latex from 0.5 to 33 GHz,” Biosystems Engineering, pp. 1–8, Sep. 2014.
- [17] “การค้าระหว่างประเทศ:การส่งออกสินค้าสำคัญของไทย” Thailand Trading Report, MOC, [online]. http://www.ops3.moc.go.th/export/recode_export_rank/ [10 January 2017]
- [18] “ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครเวฟ” ศูนย์การเรียนรู้ กรมการทหารสื่อสาร, [online]. <http://signalkm.cloud.rta.mi.th/wp-content/uploads/2012/07/wireless.pdf> [10 January 2017]
- [19] “ทฤษฎีการจับตัวของน้ำยาง” Rubber Digest, Management of knowledge in the rubber manufacturing, [online]. <http://signalkm.cloud.rta.mi.th/wp-content/uploads/2012/07/wireless.pdf> [10 January 2017]
- [20] “การขายน้ำยางสด” การยางแห่งประเทศไทย, สำนักงานตลาดกลางยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช, [online]. <http://www.rubberthaiforward.com> [10 January 2017]
- [21] “การหาปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางสด” บริษัท พีเอ็นพี แอนด์เบส จำกัด, [online]. <http://pnpandbest.com> [10 January 2017]
- [22] “การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุ” วัตถุประสงค์และวิจัยทางการศึกษา, วัตถุประสงค์คอม, [online]. http://www.rubberthaiforward.com/page_index.php?page=7 [10 January 2017]
- [23] “FR4 0.8mm Blank PCB board Double Side 12x18" 1oz”, [online]. <http://www.warf.com> [10 January 2017]
- [24] “ค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุ” [online]. <https://www.thoughtco.com/table-of-electrical-resistivity-conductivity-608499> [10 January 2017]

ภาคผนวก

ขั้นตอนและระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย



การศึกษาขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดสำหรับ วัดคุณสมบัติค่าไดอิเล็กตริกของน้ำกลั่นในภาชนะแก้ว

A Study of the Power Distribution Region of an Open-Ended Probe for Measuring Dielectric Properties of Distilled Water in a Glass Container

วีระยศ คนดี ไพโรจน์ วุ่นชุม* และ มิตรชัย จงเขียวชำนาญ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112
Veerayot Kondee, Phairote Wouchum* and Mitchai Chongcheawchamnan
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112
*E-Mail: phairote.w@psu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดสำหรับการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำกลั่นในภาชนะแก้วที่ความถี่ 2.45 GHz เพื่อแสดงให้เห็นขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่น การจำลองจึงได้วิเคราะห์โพรบทั้งชนิด SMA และ N-type โดยโปรแกรม COMSOL ผลการจำลองพบว่ากำลังงานที่แรงที่สุดจะอยู่บริเวณปลายของโพรบ และโพรบชนิด N-type ให้ขอบเขตการกระจายกำลังงานมากกว่าโพรบชนิด SMA ดังนั้นโพรบชนิด N-type จึงเหมาะสมสำหรับวัดคุณสมบัติของของเหลวด้วยเทคนิคแบบไม่สัมผัสมากกว่าโพรบชนิด SMA

คำหลัก ขอบเขตการแผ่กระจายกำลัง, โพรบปลายเปิด, โปรแกรม COMSOL, เทคนิคแบบไม่สัมผัส

Abstract

This paper presents a study of the power distribution region of an open-end probe, which is used for measuring the dielectric properties of distilled water in a glass container at 2.45 GHz. To demonstrate the power distribution region, the simulation that has been analyzed with an SMA and N-type by COMSOL program. From the result, it is obvious that the maximum power is observed at the end of the probe. In addition, an N-type probe has the power distribution region at the end of the probe more than an SMA probe. Therefore, the non-contact method by an N-type probe is more suitable for measuring dielectric properties of distilled water in a glass container than an SMA probe.

Keywords: power distribution region, open-ended probe, COMSOL program, non-contact method

1. บทนำ

ในปัจจุบัน การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) หรือค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเชิงซ้อน (Complex permittivity) ของวัสดุ ด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลังได้รับความนิยม [1] เนื่องจากเป็นวิธีการวัดที่รวดเร็วและมีความแม่นยำสูง การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุมีหลายเทคนิคตัวอย่างเช่น เทคนิคแบบช่องเปิด (Slotted line), เทคนิคท่อนำคลื่น (Guided wave), เทคนิคอวกาศว่าง (Free space), เทคนิคโพรบท่อนำคลื่น (Filled cavity) และเทคนิคโพรบปลายเปิด (Open ended probe) เป็นต้น [2] ซึ่งเทคนิคการวัดเหล่านี้สามารถแยกได้เป็น 2 แบบคือ วิธีการวัดแบบทำลายวัสดุ (Destructive) และวิธีการวัดแบบไม่ทำลายวัสดุ (Non-destructive) ในกรณีการวัดแบบไม่ทำลายวัสดุเป็นการทดสอบวัสดุตัวอย่างที่ไม่ต้องการให้เกิดความเสียหายแก่วัสดุหรือทำให้คุณภาพลดลง เทคนิคโพรบปลายเปิด [3] เป็นการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนจากวัสดุตัวอย่าง ข้อดีของการวัดแบบนี้คือ สามารถใช้งานได้ในย่านความถี่กว้าง ใช้พื้นที่ในการวัดน้อย และสามารถวัดวัสดุที่เป็นของแข็งและของเหลวได้ โดยโพรบปลายเปิดสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น การวัดน้ำมันในผลปาล์มสุก [3] และการวัด %DRC (Dry rubber constant) ของน้ำยางดิบ [4],[5] เป็นต้น ในการใช้งานโพรบชนิดนี้เพื่อวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของของเหลวจะต้องนำโพรบจุ่มลงในของเหลวโดยตรง ซึ่งจะส่งผลให้โพรบชำรุดได้ง่าย และวัสดุตัวอย่างสามารถเคลือบบริเวณโพรบก่อให้เกิดความผิดพลาดในผลการวัดได้ อย่างไรก็ตาม ถ้าต้องการหลีกเลี่ยงการจุ่มโพรบลงไปสัมผัสกับของเหลวโดยตรง จะต้องวัดผ่านภาชนะที่เป็นแก้วหรือพลาสติก แต่กำลังงานที่กระจายออกมาจากโพรบนั้นมีระยะทางอยู่บริเวณใกล้ๆ โพรบ จึงทำให้คลื่นไมโครเวฟทะลุเข้าไปในวัสดุได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่สามารถทะลุเข้าไปได้เลย ส่งผลให้ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

ที่วัดได้มีความผิดพลาด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาระยะทาง อย่างน้อยที่สุดของบริเวณที่ยังคงสามารถทดสอบได้ (Measurement region) โดย Hoshina และคณะ [6] นำเสนอการหาขอบเขตของบริเวณทดสอบในกรณีที่ใช้โพรบจุ่มอยู่ในน้ำเกลือพบว่าขอบเขตของบริเวณนี้หาได้จากตำแหน่งของกำลังงานที่กระจายบริเวณโพรบซึ่งไม่น้อยกว่า -39.4 dB เมื่อกำลังงาน ณ ตำแหน่งปลายของโพรบมีค่าเท่ากับ 0 dB อย่างไรก็ตาม พบว่ายังไม่มีการวิจัยใดที่ได้ทำการหาขอบเขตของบริเวณทดสอบในกรณีนี้ผ่านภาชนะ

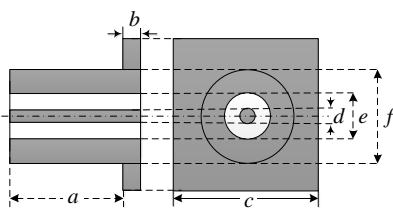
ดังนั้นบทความนี้จึงมุ่งศึกษาการกระจายกำลังงานบริเวณโพรบปลายเปิดสำหรับการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำกลั่นในภาชนะแก้ว การกระจายสนามไฟฟ้าหรือกำลังงาน สามารถจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ซึ่งใช้ระเบียบวิธี finite element method (FEM) ในการศึกษาการกระจายสนามไฟฟ้าของโพรบปลายเปิดผู้วิจัยได้แบ่งการจำลองออกเป็น 2 ส่วนคือกรณีที่โพรบปลายเปิดอยู่ในตัวกลางที่เป็นอากาศ และกรณีที่โพรบปลายเปิดอยู่ใต้อากาศแก้วที่บรรจุน้ำกลั่น นอกจากนี้ได้เปรียบเทียบโพรบ 2 ชนิดคือ SMA และ N-type เพื่อวิเคราะห์หาขอบเขตของบริเวณทดสอบ โดยพิจารณาที่ความถี่ 2.45 GHz

2. วิธีการจำลอง

บทความนี้ได้แบ่งการจำลองเพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าออกเป็น 2 ส่วนดังนี้คือ

2.1 การจำลองโพรบปลายเปิดในตัวกลางที่เป็นอากาศ

โพรบปลายเปิดที่ใช้ในการจำลองเพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าสามารถประยุกต์ใช้คอนเนคเตอร์แบบแกนร่วมขนาดมาตรฐานได้ โดยเลือก 2 ชนิด คือ N-type และ SMA โครงสร้างของโพรบประกอบไปด้วยแกนตัวนำด้านในและแกนตัวนำด้านนอก ระหว่างขั้วเป็นฉนวนวัสดุเทฟลอน (PTFE) ปลายของโพรบเป็นกราวด์สี่เหลี่ยม (Flange) โดยลักษณะโครงสร้างของโพรบแต่ละชนิดดังแสดงในรูปที่ 1 และมีขนาดของพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1



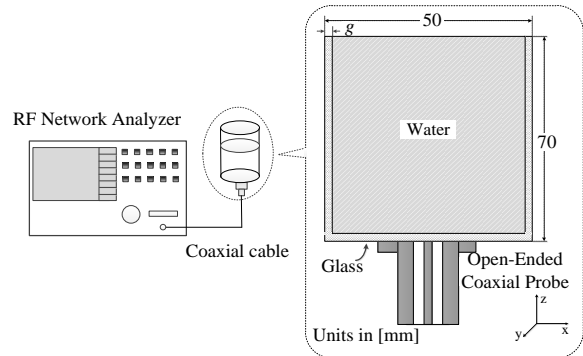
รูปที่ 1 โครงสร้างของโพรบปลายเปิด

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของโพรบปลายเปิด

ชนิดโพรบ	พารามิเตอร์ (มิลลิเมตร)					
	a	b	c	d	e	f
SMA	7.9	1.6	12.7	1.3	4.1	4.5
N-type	16.7	2.0	25.4	2.4	9.1	14.6

2.2 การจำลองโพรบปลายเปิดที่อยู่ใต้อากาศแก้วที่บรรจุน้ำกลั่น

การจำลองนี้เพื่อหาขอบเขตของบริเวณทดสอบในกรณีที่กำลังงานจากโพรบส่งผ่านภาชนะแก้วสู่น้ำกลั่น การจำลองเช่นนี้เป็นการประยุกต์ใช้โพรบปลายเปิดกับเทคนิคการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของของเหลวแบบไม่สัมผัสตั้งรูปที่ 2 โดยภาชนะแก้วที่เลือกใช้ในการจำลองเป็นบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร มีความสูง 70 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และเพื่อวิเคราะห์ความหนาของภาชนะจึงเปลี่ยนแปลงความหนา (g) เป็น 1.0, 1.8 และ 2.0 มิลลิเมตร โดยโพรบจะวางบริเวณใต้อากาศแก้ว



รูปที่ 2 การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกโดยใช้โพรบปลายเปิดด้วยเทคนิคการวัดแบบไม่สัมผัสกับวัสดุ และโครงสร้างของแบบจำลองการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

เนื่องจากสนามไฟฟ้ามีการกระจายอยู่บริเวณใกล้ๆ โพรบ และโพรบมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ดังนั้นจึงพิจารณาองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในพิกัดทรงกระบอกคือ E_ρ และ E_z โดยที่ E_ρ มีค่าเป็น 0 จากสนามไฟฟ้าที่ได้สามารถนำไปหาการกระจายกำลังงาน (Power distribution: P_{dist}) ซึ่งหาได้จาก

$$P_{dist} = \frac{|E_r|^2}{2}, \quad (1)$$

เมื่อ E_r คือขนาดของสนามไฟฟ้ารวม หาได้จาก

$$E_r = \sqrt{|E_\rho|^2 + |E_z|^2}. \quad (2)$$

สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของวัสดุที่ใช้ในการจำลอง

วัสดุ	Parameter	
	Relative permittivity, ϵ_r	Electrical conductivity, σ (S/m)
อากาศ	1	0
ทองแดง	1	5.998×10^7
เทฟลอน	2	0
น้ำกลั่น	78.40	5.500×10^{-6}
แก้ว	4.82	10^{-14}

จากพารามิเตอร์ดังกล่าวจะถูกใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL เพื่อหาการกระจายสนามไฟฟ้าและกำลังในกรณีต่างๆ

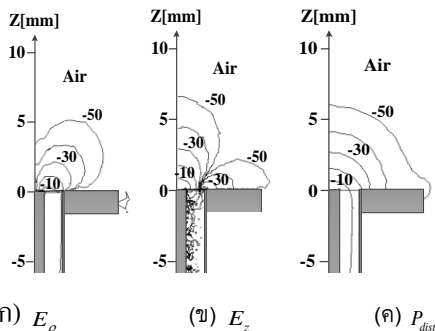
3. ผลการจำลอง

3.1 การกระจายสนามไฟฟ้าและกำลังงานบริเวณโพรบปลายเปิดในอากาศ

การกระจายสนามไฟฟ้าในตัวกลางที่เป็นอากาศแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังหัวข้อต่อไปนี้

3.1.1 การกระจายสนามไฟฟ้าและกำลังงานของโพรบปลายเปิดชนิด SMA ในตัวกลางเป็นอากาศ

รูปที่ 3(ก) และ 3(ข) แสดงขนาดขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้า E_ρ และ E_z ตามลำดับ โดยแสดงขนาดของสนามไฟฟ้าในระนาบ 2 มิติ และเพียงครั้งเดียว เนื่องจากโครงสร้างมีความสมมาตร และขนาดต่ำสุดเท่ากับ -50 dB เมื่อกำลังงาน ณ ตำแหน่งปลายของโพรบ 0 dB โดยปกติสนามไฟฟ้าที่อยู่ภายในโพรบมีเพียงองค์ประกอบ E_ρ และเมื่อสนามจากโพรบกระจายออกสู่อากาศ ซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้าจากตัวนำด้านในกระโดดสู่อากาศแล้ววกกลับมายังตัวนำด้านนอกของโพรบ (fringing field) ดังนั้นสนามในองค์ประกอบ E_z จะเกิดขึ้นมา ขนาดของสนามไฟฟ้าองค์ประกอบ E_ρ จะมีค่าสูงกว่าองค์ประกอบ E_z ดังนั้นจึงใช้ขนาดสูงสุดของ E_ρ เป็นค่าที่ใช้ในการนอร์มัลไลซ์ขนาดเพื่อเปรียบเทียบ จากการจำลองพบว่าสนามไฟฟ้ารวมมีความแรงอยู่บนขอบของตัวนำด้านในของโพรบรูปที่ 4(ค) แสดงกำลังงานที่กระจายบริเวณโพรบ โดยแสดงค่าต่ำสุด -50 dB พบว่ากำลังมีความแรงมากที่สุดอยู่บนขอบของตัวนำด้านในโพรบเช่นเดียวกับสนามไฟฟ้า และเมื่อสังเกตกำลังงานที่ -40 dB พบว่ามีขอบเขตของบริเวณทดสอบเท่ากับ 4.5 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดความเข้มของสนามไฟฟ้าที่บริเวณปลายของโพรบจะมีค่าลดลงตามระยะทาง

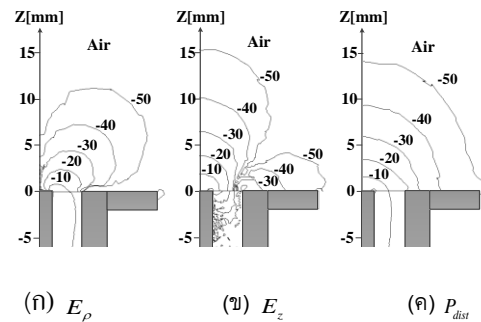


รูปที่ 3 การกระจายสนามไฟฟ้าและกำลังงานบริเวณโพรบชนิด SMA ในตัวกลางเป็นอากาศ

3.1.2 การกระจายสนามไฟฟ้าของโพรบปลายเปิดชนิด N-type ในตัวกลางเป็นอากาศ

รูปที่ 4(ก) และ 4(ข) แสดงขนาดขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้า E_ρ และ E_z ตามลำดับ พบว่าสนามไฟฟ้ารวมมีความแรงอยู่บนขอบของตัวนำด้านในของโพรบเช่นเดียวกับในกรณีของโพรบชนิด SMA แต่เมื่อเปรียบเทียบขนาดสนามไฟฟ้าที่ระดับค่าเท่ากัน โพรบชนิด N-type จะมีระยะขอบเขตที่ไกลมาก

เนื่องจากโพรบ N-type มีปลายเปิดของตัวนำด้านในและด้านนอกที่กว้างกว่า รูปที่ 4(ค) แสดงกำลังงานที่กระจายบริเวณโพรบ พบว่ามีขอบเขตของบริเวณทดสอบเท่ากับ 9 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณากำลังงานที่ -40 dB และขอบเขตของบริเวณทดสอบของโพรบ N-type มีค่าเป็นสองเท่าของโพรบ SMA



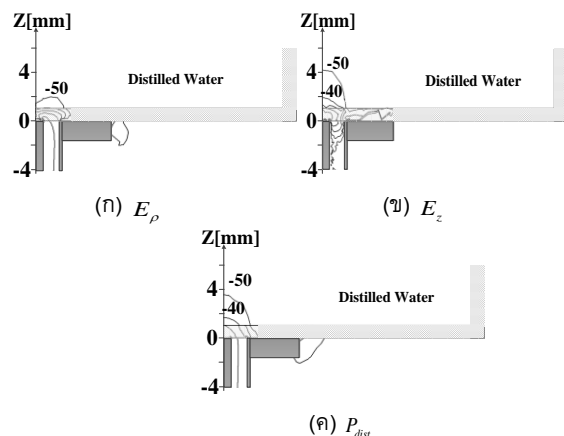
รูปที่ 4 การกระจายสนามไฟฟ้าและกำลังงานบริเวณโพรบชนิด N-type ในตัวกลางเป็นอากาศ

3.2 การกระจายสนามไฟฟ้าและกำลังงานบริเวณโพรบปลายเปิดที่อยู่ใต้ภาชนะแก้วที่บรรจุน้ำกลั่น

การจำลองในกรณีนี้สามารถสร้างแบบจำลองได้ตามรูปที่ 3 และแบ่งการจำลองออกเป็น 2 กรณี ดังหัวข้อต่อไปนี้

3.2.1 การกระจายสนามไฟฟ้าและกำลังงานของโพรบปลายเปิดชนิด SMA ผ่านภาชนะแก้วหนา 1 มิลลิเมตร

ขนาดสนามไฟฟ้าที่กระจายบริเวณโพรบปลายเปิดชนิด SMA เมื่อโพรบวางใต้ภาชนะแก้วหนา 1 มิลลิเมตร และน้ำกลั่นบรรจุอยู่ในภาชนะแก้ว พบว่าขนาดสนามไฟฟ้ามีความแรงอยู่บนขอบด้านในตัวนำ และขอบเขตของสนามลดลงเนื่องจากมีภาชนะแก้วชั้นระหว่างโพรบกับน้ำกลั่น ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) และ 5(ข) ขอบเขตการกระจายกำลังงานโดยส่วนใหญ่อยู่ในภาชนะแก้ว และทะลุผ่านภาชนะแก้วสู่น้ำกลั่นได้เพียงเล็กน้อย โดยมีขอบเขตของบริเวณทดสอบเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณากำลังงานที่ -40 dB ดังแสดงในรูปที่ 5(ค)

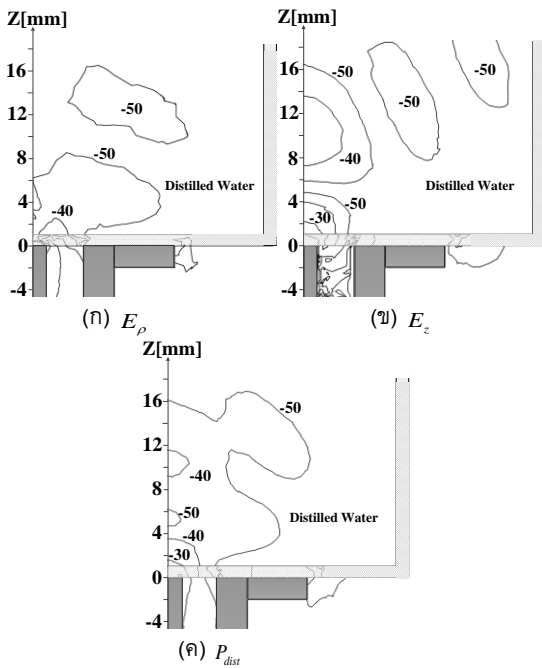


รูปที่ 5 การกระจายสนามไฟฟ้าบริเวณโพรบชนิด SMA ผ่านภาชนะแก้ว 1 มิลลิเมตร สู่น้ำกลั่น

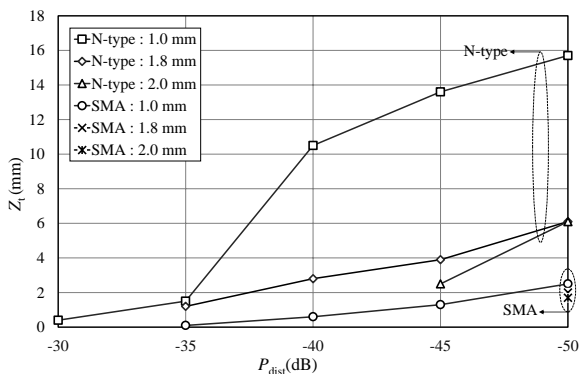
3.2.2 การกระจายสนามไฟฟ้าและกำลังของโพรบปลายเปิดชนิด N-type ผ่านภาชนะแก้วหนา 1 มิลลิเมตร

การกระจายสนามไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 6(ก) และ 6(ข) และการกระจายกำลังงานดังแสดงในรูปที่ 6(ค) ในกรณีที่ใช้โพรบชนิด N-type พบว่าระยะขอบเขตการกระจายกำลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโพรบชนิด SMA และมีขอบเขตของบริเวณทดสอบเท่ากับ 3.5 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณากำลังงานที่ -40 dB

จากผลการจำลองกำลังงานของโพรบทั้งสองชนิดที่ระดับขอบเขตกำลังงานต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบผลของความหนาภาชนะที่มีค่าแตกต่างกัน คือ 1.0 1.8 และ 2.0 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 7 สังเกตว่าเมื่อความหนาของภาชนะเพิ่มขึ้นบริเวณขอบเขตการกระจายกำลังงานจะลดลงและโพรบชนิด N-type สามารถกระจายกำลังผ่านภาชนะได้ดีกว่าโพรบชนิด SMA



รูปที่ 6 การกระจายสนามไฟฟ้าบริเวณโพรบชนิด N-type ผ่านภาชนะแก้ว 1 มิลลิเมตร สุนัขน้ำกลั่น



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของระยะการแพร่กระจายกำลังงานไฟฟ้าจากภาชนะแก้วสู่สุนัขน้ำกลั่น

จากผลการจำลองที่ได้สามารถนำโพรบปลายเปิดชนิด N-type ไปประยุกต์ใช้งานในการวัดคุณสมบัติของของเหลวด้วยเทคนิคการวัดแบบไม่สัมผัสกับวัสดุ โดยควรเลือกภาชนะที่มีความหนาน้อยที่สุด

4. สรุป

การศึกษาขอบเขตการกระจายกำลังงานบริเวณโพรบปลายเปิดทั้งสองชนิดคือ SMA และ N-type สามารถหาได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL ในการจำลองได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ในกรณีโพรบอยู่ในตัวกลางที่เป็นอากาศ และในกรณีที่โพรบวางอยู่ใต้ภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่น จากผลการจำลองพบว่าความหนาของภาชนะแก้วมีผลต่อขอบเขตบริเวณการกระจายกำลังงาน นอกจากนี้โพรบชนิด N-type ให้ขอบเขตบริเวณการกระจายกำลังงานมากกว่าโพรบชนิด SMA เมื่อพิจารณากำลังงานที่ -40 dB ขอบเขตบริเวณทดสอบของโพรบชนิด SMA และ N-type มีระยะเท่ากับ 1.5 และ 3.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการศึกษานี้ควรเลือกโพรบชนิด N-type เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดไดอิเล็กทริกของของเหลวด้วยเทคนิคแบบไม่สัมผัสได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนบัณฑิตศึกษาด้านวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ปี 2557

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kririksh, M., Tiarawut, S., Vanisri, T. and Siriruchatapong, P. 2011. Microwave activities in Thailand. *EuMC*, 41:1352–1355.
- [2] Venkatesh, M.S. and Raghavan, G.S.V. 2005. An overview of dielectric properties measuring techniques. *Canadian biosystems engineering*. 47:15-21.
- [3] Yeow, Y., Abbas, Z. and Khalid, K. 2010. Application of Microwave Moisture Sensor for Determination of Oil Palm Fruit Ripeness. *M.S.R*, 10:7-14.
- [4] Ghretli, M. M., Khalid, K., Grozescu, I. V., Sahri, M. H. and Abbas, Z. 2007. Dual-Frequency Microwave Moisture Sensor Based on Circular Microstrip Antenna. *IEEE Sensors Journal*. 12:1749–1756.
- [5] Julrat, S., Chongcheawchamnan, M., Khaorapapong T., Patarapiboolchai O., Kririksh M. and Robertson I. D. 2012. Single-Frequency-Based Dry Rubber Content Determination Technique for In-Field Measurement Application. *IEEE Trans. Sensors.*, 12:3019–3030.
- [6] Hoshina, S., Kanai, Y. and Miyakawa, M. 2001. A numerical study on the measurement region of an open-ended coaxial probe used for complex permittivity measurement. *IEEE Trans. Magn.*, 37:3311–3314.

การศึกษาขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดเล็กสำหรับ วัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำกลั่นในภาชนะแก้ว

A Study of the Power Distribution Region of Miniaturized Circular Patch Antenna for Measuring Dielectric Properties of Distilled Water in a Glass Container

วีระยศ คนดี ไพโรจน์ วุ่นขุ่ม และ มิตรชัย จงเขี้ยวชำนาญ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ *E-mail: veerayot15034@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดเล็กเพื่อวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำกลั่นในภาชนะแก้วด้วยความถี่ 2.45 GHz สายอากาศ MCP ได้ถูกพัฒนาเพื่อให้มีขนาดเล็กจากสายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดดั้งเดิมเพื่อที่จะออกแบบขนาดของแพทช์ให้เหมาะสมสำหรับการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยวิธีแบบไม่สัมผัส โปรแกรม COMSOL multiphysics นำมาใช้ในการจำลองและแสดงขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นภายในภาชนะแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร จากผลการจำลองพบว่าแพทช์รัศมี 9 มิลลิเมตร มีความเหมาะสมสำหรับการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำกลั่นในภาชนะแก้ว โดยแสดงให้เห็นว่าขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นจากผิวของแพทช์เท่ากับ 40 มิลลิเมตร ที่ระดับขนาดกำลังงานต่ำสุดเท่ากับ -40 dB นอกจากนี้สายอากาศที่นำเสนอมีขนาดลดลง 53 % เมื่อเทียบกับขนาดดั้งเดิม ซึ่งสายอากาศได้แม่ทซ์โดยเพิ่มการลัดวงจรและโหลดแบบร่อง

คำสำคัญ: ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่น, สายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดเล็ก, เทคนิคการวัดแบบไม่สัมผัส, COMSOL multiphysics

Abstract

In this study, a 2.45 GHz miniaturized circular patch (MCP) antenna for measuring the dielectric properties of distilled water in a glass container is presented. The MCP antenna has been developed to achieve size reduction from a conventional size circular patch antenna. In order to design the appropriate patch size for measuring dielectric properties water with non-contact method, COMSOL multiphysics is used for the simulation and demonstration of the power distribution region within the volume of a 100 milliliters glass container. From the result, the patch of radius 9 millimeters is suitable for measuring the dielectric properties of distilled water in a glass container. At the normalized power of -40 dB, it shows that the power distribution region is 40 millimeters from the surface of patch antenna. In addition, the proposed antenna has been

reduced by 53% compared with conventional size, which is matched by inserting shorting pins and slits load.

Keywords: Power distribution region, Miniaturized Circular Patch Antenna, non-contact measurement method, COMSOL multiphysics

1. บทนำ

ในปัจจุบัน คลื่น ไมโครเวฟกำลังได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้วัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของวัสดุ [1] โดยคลื่นไมโครเวฟสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดคุณสมบัติได้หลากหลายชนิดยกตัวอย่างเช่น การวัดค่าความสูงของผลไม้ การวัดคาร์บอนความสูงของผลปาล์ม [2] และการวัดค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้งในน้ำยางดิบ (%DRC: Dry rubber constant) [3] เป็นต้น ซึ่งเทคนิคการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกมีอยู่หลากหลายเทคนิค เช่น เทคนิคท่อนำคลื่น (Wave guided), เทคนิคโพรงท่อนำคลื่น (Filled cavity), เทคนิคแบบช่องเปิด (Slotted line), เทคนิคอวกาศว่าง (Free space) และเทคนิคโพรบปลายเปิด (Open ended probe) เป็นต้น ซึ่งเทคนิคเหล่านี้มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน โดยเทคนิคที่มีความเหมาะสมในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของของเหลวคือเทคนิคแบบโพรบปลายเปิด เนื่องจากเป็นเทคนิคการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่คลื่นสะท้อนกลับจากวัสดุตัวอย่าง ข้อดีของการวัดด้วยเทคนิคนี้คือ สามารถใช้วัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุทั้งของแข็งและของเหลว มีความรวดเร็วในการวัดสูงรวมไปถึงเวลาที่ใช้ในการจัดเตรียมวัสดุในการวัด และใช้พื้นที่ในการวัดน้อย การวัดคุณสมบัติของของเหลวด้วยเทคนิคนี้ยังมีข้อจำกัดคือ โพรบที่ใช้จะต้องสัมผัสกับของเหลวโดยตรงซึ่งส่งผลให้โพรบเกิดการชำรุด และของเหลวจะเคลือบบริเวณผิวของโพรบทำให้ผลการวัดที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อน ยกต่อการล้างทำความสะอาด จึงได้มีการประยุกต์โพรบปลายเปิดไปใช้ในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกแบบไม่สัมผัสกับวัสดุ โดยการนำโพรบไปวางไว้ใต้ภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่น [4] ผลการจำลองพบว่าที่ภาชนะแก้วหนา 1 มิลลิเมตร โพรบชนิด N-type มีระยะขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นเป็น 3.5 มิลลิเมตร โดยโพรบปลายเปิดจะมีลักษณะการแผ่กระจายกำลังคลื่นออกจากแกนตัวนำด้านในไปสู่แกนตัวนำด้านนอกที่เป็น

กราวด์สี่เหลี่ยม (Flange) ระหว่างขั้วเป็นฉนวนวัสดุเพฟลอน (PTFE) ได้มีงานวิจัยของ Hoshina และคณะวิเคราะห์ระยะขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดสามารถหาได้จากตำแหน่งของกำลังงานที่กระจายบริเวณโพรบไม่น้อยกว่า -39.4 dB เมื่อกำลังงานที่ตำแหน่งปลายของโพรบมีค่าเป็น 0 dB [5] ซึ่งระยะการแผ่ที่ได้ยังมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของภาชนะแก้ว อย่างไรก็ตาม พบว่ายังไม่มีความวิจัยใดได้ทำการหาขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์ในการประยุกต์ใช้วัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์ผ่านภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่น โดยจำลองขอบเขตการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าหรือกำลังงานของคลื่นด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ระเบียบวิธี Finite element methods (FEM) และจำลองที่ความถี่ 2.45 GHz การจำลองได้พิจารณาทั้งในกรณีที่สายอากาศแพทช์วางอยู่ใต้ภาชนะแก้วเปล่าที่มีอากาศบรรจุอยู่ภายใน และกรณีที่ภาชนะแก้วบรรจุน้ำกลั่น นอกจากนี้ยังได้ออกแบบสายอากาศแพทช์แบบวงกลมให้มีขนาดเล็กเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกแบบไม่สัมผัสกับวัสดุตัวอย่างได้

2. ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลม

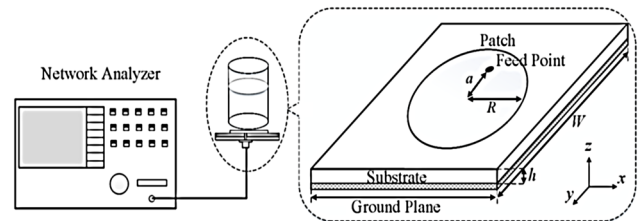
วิธีการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิคแบบไม่สัมผัสกับวัสดุโดยใช้สายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งสามารถจำลองได้โดยการป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลที่สายอากาศแพทช์วางอยู่ใต้ภาชนะแก้วขนาด 100 มิลลิเมตร ความสูง 60 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และมีความหนา 1 มิลลิเมตร โดยสายอากาศที่เลือกมาใช้ในการวิเคราะห์คือสายอากาศแพทช์แบบวงกลมเนื่องจากเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างแบบสมมาตรส่งผลให้สนามไฟฟ้าแผ่กระจายสมมาตรด้วย ดังนั้นสายอากาศแพทช์แบบวงกลมจึงมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้วัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิคแบบไม่สัมผัสกับวัสดุ ในภาชนะแก้วรูปทรงกระบอก การออกแบบสายอากาศแพทช์แบบวงกลมสามารถคำนวณรัศมีได้ดังนี้

$$R = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

เมื่อ $F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}}$ โดยที่ R คือ รัศมีของแพทช์ h คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง (Substrate) f_r คือ ความถี่ที่ต้องการใช้งาน ϵ_r คือ สภาวะยอมทางไฟฟ้า

จากสมการข้างต้นได้ออกแบบสายอากาศแพทช์แบบวงกลมที่ความถี่ 2.45 GHz มีวัสดุฐานรองหนา 0.8 มิลลิเมตร และมีค่าสภาวะยอมทางไฟฟ้าเท่ากับ 4.36 จากการคำนวณพบว่า จะได้ค่ารัศมีของแพทช์เท่ากับ 17 มิลลิเมตร และเมื่อจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรม COMSOL multiphysics พบว่าตำแหน่งการป้อนสัญญาณ (a) เท่ากับ 7 มิลลิเมตร เมื่อวัดจากจุดศูนย์กลาง และระนาบกราวด์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม

จัตุรัสมีขนาด (W) เท่ากับ 45 มิลลิเมตร สายอากาศนี้ (สายอากาศ A) จะให้ผลตอบสนองที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ A เมื่อวางใต้ภาชนะแก้วทั้งในกรณีที่ เป็นแก้วเปล่าบรรจุอากาศและน้ำกลั่น ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยขนาดของกำลังคลื่นจะแสดงเพียงในระนาบ yz เนื่องจากในระนาบนี้จะไม่สมมาตร ซึ่งเกิดจากตำแหน่งการป้อนสัญญาณ การพิจารณาระดับของขนาดกำลังงานจะแสดงค่าสุดเท่ากับ -40 dB เมื่อกำลังงาน ค่าตำแหน่งผิวของแพทช์วงกลมเป็น 0 dB เนื่องจากระดับของขนาดกำลังงานในระดับที่ต่ำกว่า -40 dB จะมีผลน้อย [5] จากการจำลองพบว่าการแผ่กระจายกำลังคลื่นจะมีความแรงมากที่สุดบริเวณขอบของแพทช์วงกลม เมื่อสังเกตขอบเขตที่ระดับกำลังงาน -40 dB จะมีระยะขอบเขตของบริเวณทดสอบเป็น 45 มิลลิเมตร ทั้งในกรณีแก้วเปล่าและบรรจุน้ำกลั่น นอกจากนี้ขอบเขตของบริเวณทดสอบจะเกิดการแผ่กระจายกำลังคลื่นออกมาภายนอกของภาชนะแก้ว ทำให้คุณสมบัติของไดอิเล็กตริกที่วัดเกิดความผิดพลาดได้

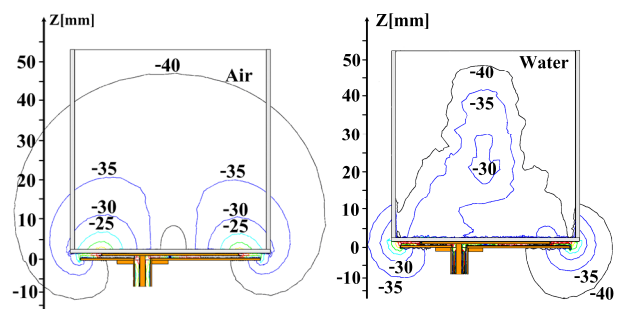


รูปที่ 1 การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิคแบบไม่สัมผัสกับวัสดุโดยใช้สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

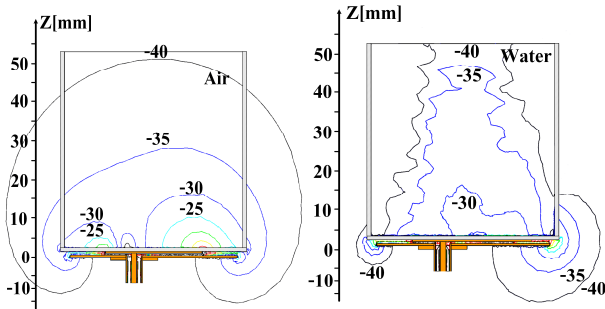
พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของวัสดุที่ใช้ในการจำลอง

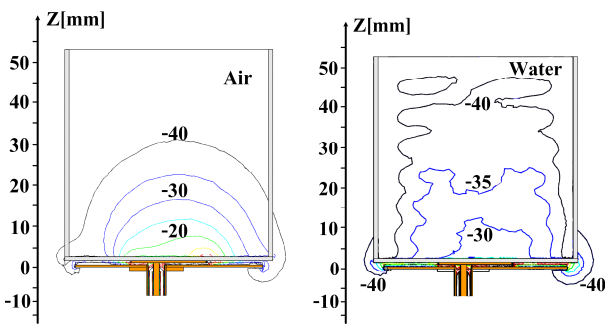
วัสดุ	พารามิเตอร์	
	สภาพยอมสัมพัทธ์, ϵ_r	สภาพนำไฟฟ้า, σ (S/m)
อากาศ	1.00	0
น้ำกลั่น	76.58	1.191
แก้ว	4.60	0.072
ทองแดง	1.00	5.998×10^7
เพฟลอน	2.00	0
วัสดุฐานรอง	4.36	0.017



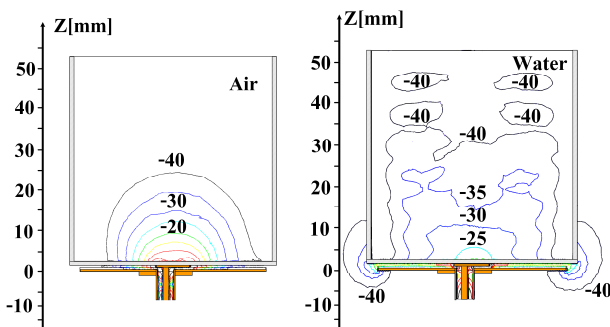
รูปที่ 2 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ A



รูปที่ 3 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ B



รูปที่ 4 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ C



รูปที่ 5 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ D

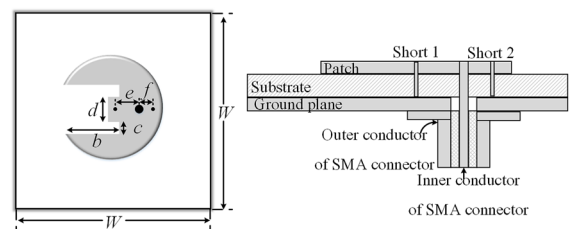
เนื่องจากสายอากาศ A มีขนาดไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงทำการลดขนาดของแพทช์วงกลมเพื่อให้ขอบเขตของบริเวณทดสอบอยู่ในภาวะแห้ง โดยขนาดรัศมีของแพทช์วงกลมที่ลดเป็น 13 (สายอากาศ B), 9 (สายอากาศ C) และ 4 (สายอากาศ D) มิลลิเมตร และตำแหน่งการป้อนสัญญาณจะลดระยะให้เป็นสัดส่วนเดียวกับการลดรัศมีของแพทช์วงกลมคือ 5.4, 3.7 และ 1.7 มิลลิเมตร ซึ่งตำแหน่งการป้อนสัญญาณนี้อาจจะยังไม่ตอบสนองที่ความถี่ 2.45 GHz แต่การวิเคราะห์นี้เพียงเพื่อสังเกตขอบเขตบริเวณทดสอบเท่านั้น ผลการจำลองการขนาดของแพทช์วงกลม B, C และ D แสดงดังในรูปที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ พบว่าสายอากาศ B ขอบเขตของบริเวณที่ทดสอบยังคงแผ่กระจายออกมาภายนอกภาวะแห้ง สายอากาศ C มีขอบเขตของบริเวณทดสอบอยู่ในภาวะแห้ง และมีระยะขอบเขตบริเวณทดสอบเป็น 30 มิลลิเมตร แต่ขอบเขตของบริเวณทดสอบในกรณีที่ภาวะแห้งบรรจุน้ำกลั่นมีการแผ่กระจายออกมาสู่อากาศเล็กน้อย เนื่องจากขนาดของระนาบกราวด์มีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับขนาดของขอบเขตบริเวณทดสอบส่วนใหญ่ที่ยังอยู่ในภาวะแห้งจึงยังคงสามารถนำไปใช้งานได้ และสายอากาศ D

มีระยะขอบเขตของบริเวณทดสอบเป็น 25 มิลลิเมตร และขอบเขตของบริเวณอยู่ในภาวะแห้ง แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านขนาดของรัศมีที่เล็ก ทำให้การสร้างชิ้นงานจริงเป็นไปได้ยาก

ดังนั้นจึงได้เลือกรัศมีที่นำไปใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบคือแพทช์ที่มีรัศมีเท่ากับ 9 มิลลิเมตร เพื่อให้แพทช์หรือสามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 2.45 GHz จะเลือกใช้เทคนิคการสร้างสายอากาศขนาดเล็ก (Miniaturized antenna) ดังนั้นสายอากาศที่นำเสนอจะเรียกว่าสายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดเล็ก (Miniaturized circular patch antenna : MCP antenna)

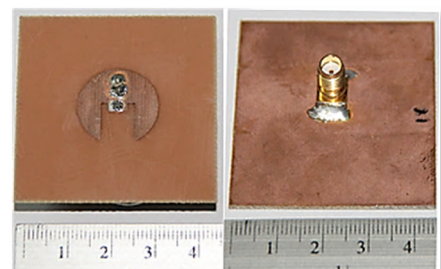
3. ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP

การออกแบบสายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดเล็กที่มีรัศมีเป็น 9 มิลลิเมตร ให้สามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 2.45 GHz ทำได้โดยใช้การเพิ่มโหนดแบบร่อง (slit load) ที่ขอบของแพทช์วงกลมร่วมกับกริดวงจร (short pin) เพื่อให้สายอากาศที่ตอบสนองความถี่สูงมาเป็นสายอากาศที่ตอบสนองความถี่ต่ำลงมา โดยสายอากาศที่ได้ออกแบบและจำลองจะมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้คือ $W = 45$ มิลลิเมตร, $b = 9$ มิลลิเมตร, $c = 2$ มิลลิเมตร, $d = 4$ มิลลิเมตร, $e = 4$ มิลลิเมตร และ $f = 6$ มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยใช้วัสดุฐานรองหนา 0.8 มิลลิเมตร มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็น 4.36 และใช้การป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลด้วยคอนเน็คเตอร์แบบแกนร่วมขนาดมาตรฐานชนิด SMA



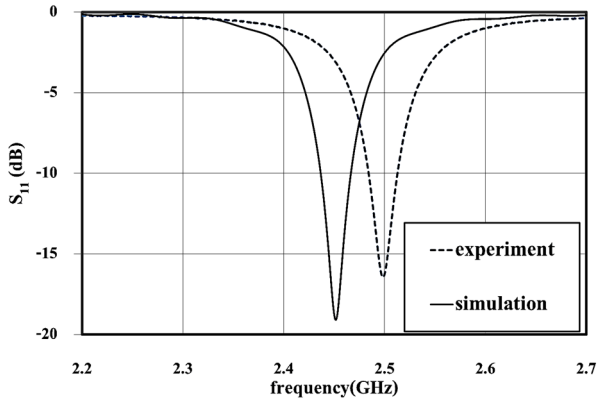
รูปที่ 6 โครงสร้างของสายอากาศ MCP

สำหรับพารามิเตอร์ต่างๆ ที่นำไปสร้างสายอากาศต้นแบบทำได้โดยการจำลองและปรับพารามิเตอร์จนได้ค่าที่เหมาะสม พบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีขนาดลดลง 53 % เมื่อเทียบกับขนาดดั้งเดิม ภาพถ่ายสายอากาศ MCP แสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ภาพถ่ายสายอากาศต้นแบบ MCP

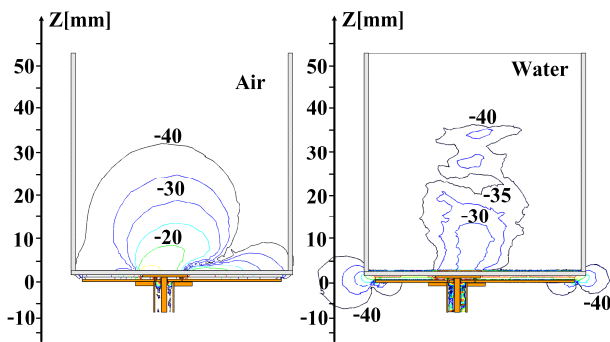
สายอากาศต้นแบบ MCP ที่สร้างขึ้นเมื่อนำมาทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่าย Agilent รุ่น 8714ES และเปรียบเทียบกับผลการจำลองแสดงดังในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการจำลองและผลการทดสอบ

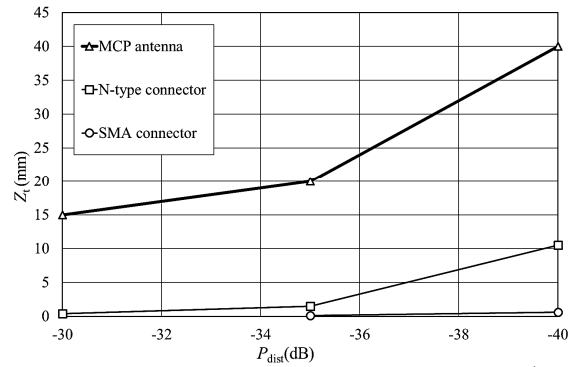
จากผลที่ได้พบว่าผลการทดสอบมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับผลการจำลอง โดยผลการทดสอบจะให้ผลตอบสนองที่มีความถี่มากกว่าผลที่ได้จากการจำลองเท่ากับ 50 MHz เนื่องจากการเป็นผลมาจากการสร้างชิ้นงาน ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของผลการจำลองและผลการทดสอบมีค่าเท่ากับ -18 dB และ -16 dB ตามลำดับ ซึ่งจากผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นสายอากาศที่ออกแบบสามารถใช้งานได้จริง

จากสายอากาศต้นแบบ MCP นำมาจำลองขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นเพื่อวิเคราะห์ขอบเขตบริเวณทดสอบ ผลการจำลองพบว่าสายอากาศ MCP จะมีระยะขอบเขตกำลังคลื่นเป็น 30 มิลลิเมตร และมีขอบเขตบริเวณทดสอบอยู่ภายในภาชนะแก้ว ซึ่งยังคงให้การกระจายกำลังคลื่นมีลักษณะใกล้เคียงกับสายอากาศ C แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศ MCP

นอกจากนี้ จากผลการจำลองขอบเขตการแผ่กระจายคลื่นที่ระดับกำลังงานต่างๆ (P_{dis}) ของสายอากาศ MCP เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระยะขอบเขตบริเวณการแผ่กระจายกำลังคลื่น (Z) ของโพรบชนิด N-type และโพรบชนิด SMA ดังแสดงในรูปที่ 10 สังเกตได้ว่าสายอากาศ MCP จะมีระยะขอบเขตบริเวณทดสอบมากกว่าโพรบชนิด N-type และชนิด SMA ดังนั้นสรุปได้ว่าสายอากาศ MCP มีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้วัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของของเหลวด้วยเทคนิคการวัดแบบไม่สัมผัสกับวัสดุได้



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระยะการแผ่กระจายกำลังคลื่นจากแก้วสู่น้ำกลั่น

4. สรุป

บทความนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาขนาดของสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้วัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำกลั่นในภาชนะแก้วด้วยเทคนิคแบบไม่สัมผัส สายอากาศที่เลือกมาออกแบบคือสายอากาศแพทช์แบบวงกลม ซึ่งขนาดของแพทช์ที่เหมาะสมหาได้จากขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่น การจำลองและการแสดงขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นภายในภาชนะแก้วขนาด 100 มิลลิเมตรทำได้โดยโปรแกรม COMSOL multiphysics จากผลการจำลองพบว่าสายอากาศแพทช์แบบวงกลมที่รัศมี 9 มิลลิเมตร นั้นมีความเหมาะสมสำหรับการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำกลั่นในภาชนะแก้ว ซึ่งให้ระยะบริเวณทดสอบเท่ากับ 40 มิลลิเมตร โดยสายอากาศนี้สามารถทำให้ตอบสนองที่ความถี่ 2.45 GHz โดยการเพิ่มการดัดวงจรและโหลดแบบร่อง ซึ่งสายอากาศต้นแบบ MCP มีขนาดลดลง 53 % เมื่อเทียบกับขนาดดั้งเดิม

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Krairiksh, S. Tiarawut, T. Vanisri, and P. Siriruchatapong, "Microwave activities in Thailand," in *Proc. 41st Eur. Microwave Conf.*, pp.52-55, 2011.
- [2] Y. Yeow, Z. Abbas, and K. Khalid, "Application of Microwave Moisture Sensor for Determination of Oil Palm Fruit Ripeness," *Measurement science review*, vol. 10, pp.7-14, 2010.
- [3] S. Julrat, M. Chongcheawchamnan, T. Khaorapapong, O. Patarapiboolchai, M. Kririksh, and I. D.Robertson, "Single-Frequency-Based Dry Rubber Content Determination Technique for In-Field Measurement Application," *IEEE Trans. Sensors.*, pp.3019-3030, 2012.
- [4] วีระยศ คนดี, ไพโรจน์ วุ่นชุม, มิตรัชย์ จงเข็งข่านานู, "การศึกษาขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดสำหรับการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำกลั่นในภาชนะแก้ว," *PEC-11*, หน้า 176-179, พ.ศ. 2558
- [5] S. Hoshina, Y. Kanai, and M. Miyakawa, "A numerical study on the measurement region of an open-ended coaxial probe used for complex permittivity measurement," *IEEE Trans. Magn.*, pp.3311-3314.

DS-7405

(ANSI : FR-4)

COPPER CLAD LAMINATES

FEATURES

- Good dimensional stability.
- Soldering reliability has been bettered
- Good electrical properties
- High density automatic mounting can be carried out

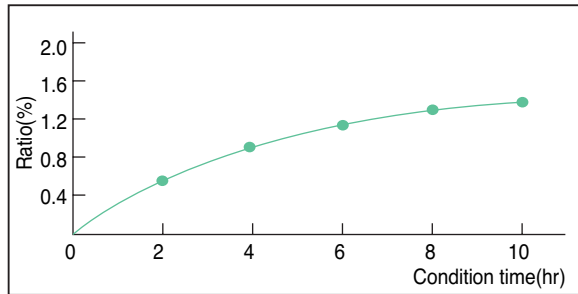
APPLICATIONS

Computer, Instrumentation, VCR, Television, Electronic Toy, etc.,

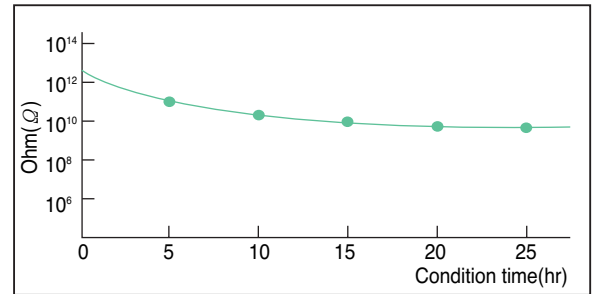
INTERNATIONAL STANDARD RECOGNITION

- UL : E103670
- CSA : LS-93237
- BSI : 6741
- VDE : VDE-Reg-Nr. 4945

Water absorption at pressure cooker

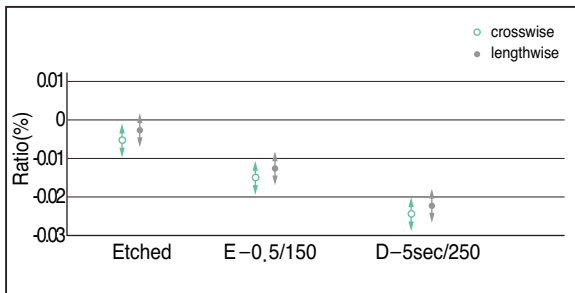


Insulation resistance at pressure cooker



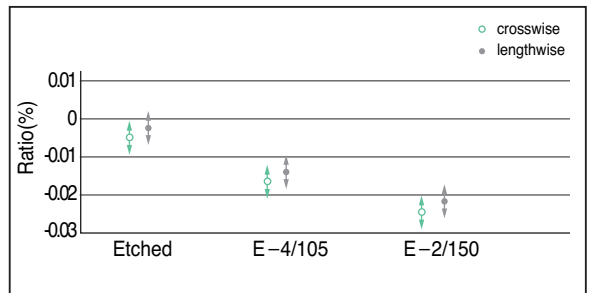
Dimensional stability

PCB process(size360X310mm span310X254mm)

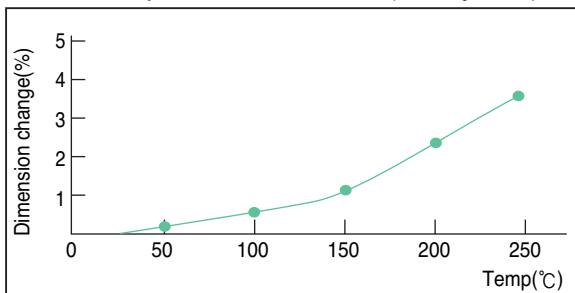


Dimensional stability

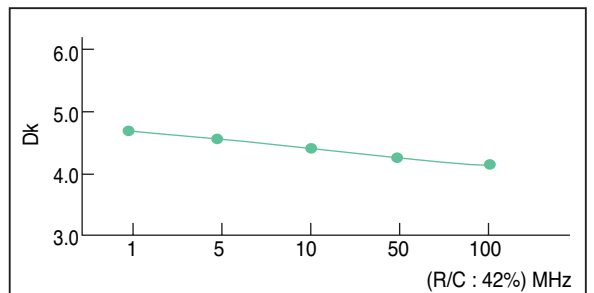
Test method(IPC. TM.650 2. 4. 39)



Thermal expansion of Z-direction (Test by TMA)



Dielectric constant



COPPER CLAD LAMINATES

GENERAL PROPERTIES

Test Item	Unit	Treatment Condition	Designation	DS-7405
			ANSI Grade	FR-4
			Property Data	
			Standard Value	Guaranteed Value
Tg	°C	DSC	135	above 130
		TMA	135	above 130
		DMA	165	above 160
CTE x-axis y-axis z-axis	ppm/°C	Ambient to Tg	18	less than 20
			13	less than 15
			55	less than 60
Flammability	-	UL-94	V-0	V-0
Insulation Resistance	ohm	C-96/20/65	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$	above 5×10^{11}
		C-96/20/65+D-2/100	$1 \times 10^{10} - 1 \times 10^{11}$	above 1×10^9
Volume Resistivity	ohm-cm	C-96/20/65	$1 \times 10^{14} - 1 \times 10^{15}$	above 1×10^{13}
		C-96/20/65+C-96/40/90	$5 \times 10^{13} - 5 \times 10^{14}$	above 5×10^{12}
Surface Resistance	ohm	C-96/20/65	$5 \times 10^{13} - 5 \times 10^{14}$	above 1×10^{12}
		C-96/20/65+C-96/40/90	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$	above 1×10^{11}
Arc Resistance	min.seconds		110	above 60
Dielectric Constant (1 MHz)	-	C-96/20/65	4.5 - 4.8	less than 5.5
		C-96/20/65+D-48/50	4.6 - 5.2	less than 5.8
Dissipation Factor (1 MHz)	-	C-96/20/65	0.015 - 0.020	less than 0.035
		C-96/20/65+D-48/50	0.018 - 0.023	less than 0.045
Comparative Tracking Index	volt	IEC Method	-	-
Solder Float(260°C)	sec	A	above 180	above 120
Peel Strength	Cu.foil 1oz (0.035mm) kgf/cm	A	1.8 - 2.2	above 1.43
Flexural Strength	kgf/mm ²	A	40 - 50	above 32.7
Water Absorption	%	E-24/50+D-24/23	0.10 - 0.15	less than 0.25

Specimen Thickness : 1.6mm

PURCHASING INFORMATION

- Copper foil : 0.5 oz/ft²(0.018 mm), 1 oz/ft²(0.035 mm), 2 oz/ft²(0.070 mm) available.
- Thickness : 0.4mm to 3.2mm

Standard Size		Tolerance(mm)
1,020 X 1,220mm (40" X 48")	915 X 1,220mm (36" X 48")	+3
1,070 X 1,220mm (42" X 48")	970 X 1,220mm (38" X 48")	-0
1,020 X 1,020mm (40" X 40")		

※ Other sheet size and thickness could be available upon request.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายวีระยศ คนดี
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5710120050
 วุฒิกการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์	2557

ทุนการศึกษา

1. ทุนบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
2. ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2559 สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

วิศวกรวางแผนและพัฒนาระบบภาคใต้ บริษัทแอดวานซ์ ไรร์เลส เน็ตเวิร์ค จำกัด (AIS)

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

1. วีระยศ คนดี, ไพโรจน์ วุ่นชุม และมิตรชัย จงเชื้อวานานาญ, “การศึกษาขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของโพรบปลายเปิดสำหรับวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำกลั่นในสถานะแก้ว,” *PEC 11*, พ.ศ. 2558.
2. วีระยศ คนดี, ไพโรจน์ วุ่นชุม และมิตรชัย จงเชื้อวานานาญ, “การศึกษาขอบเขตการแผ่กระจายกำลังคลื่นของสายอากาศแพทช์แบบวงกลมขนาดเล็กสำหรับวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำกลั่นในสถานะแก้ว,” *ECON 38*, พ.ศ. 2558.