

การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลาย
โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ

TESTING OF SOLUTION CONCENTRATION USING MICROWAVE
TRANSMISSION TECHNIQUES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-D-918-954

การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลาย
โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ

TESTING OF SOLUTION CONCENTRATION USING MICROWAVE
TRANSMISSION TECHNIQUES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ 7
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-D-018L054

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TESTING OF SOLUTION CONCENTRATION USING MICROWAVE
TRANSMISSION TECHNIQUES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2016-EN-D-018-054

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

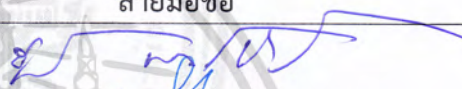




FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

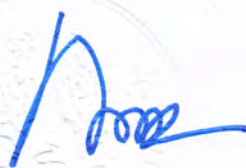
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ
Thesis Title Testing of Solution Concentration using Microwave Transmission Techniques
นักศึกษานายราเชณ คณะนา
รหัสประจำตัว 55610113
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สถาพร พรหมวงศ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-D-018-054

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ชวรงค์	พงศ์เจริญพาณิชย์	
ผศ.ดร.ศรวัดน์	ชีวปรีชา	
ผศ.ดร.ทับทิม	อ่างแก้ว	
ผศ.ดร.พิชญ	สุพรรณกุล	
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังระบบอื่นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ
นักศึกษา	นายราเชณ คณະนา
รหัสประจำตัว	55610113
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.สถาพร พรหมวงศ6

บทคัดย่อ##

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอ การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งสารละลายที่ใช้เป็นตัวอย่งในการศึกษา เป็นสารละลายน้ำตาลที่มีค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ตั้งแต่ 16 ถึง 32 องศาบริกซ์โดยศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาลที่มีความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 10 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้วิธีโพรบแบบแกนร่วมปลายเปิด ซึ่งพบว่า สารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าแพกเตอร์การสูญเสีย ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย และ ค่าความลึกที่แตกต่างกัน จากนั้น ได้ศึกษาขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้จากการส่งผ่านสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นค่าต่าง ๆ โดยการจำลองแบบด้วยโปรแกรมแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าระดับสัญญาณไมโครเวฟที่รับได้นั้น ประกอบด้วย ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับ ความสูงของสารละลายน้ำตาล มุมของสายอากาศส่ง ความถี่ของสายอากาศ และ ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล โดยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลมีค่าเพิ่มขึ้น ขนาดของสัญญาณไมโครเวฟที่รับได้มีค่าลดลง จากนั้น เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองแบบกับผลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย พบว่า มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี นอกจากนี้ ยังได้สร้างมอดูลระบบตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลด้วยเทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ผลการทดสอบแสดงค่าขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้แตกต่างกันสำหรับสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ และผลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า สามารถใช้เทคนิคการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Testing of Solution Concentration using Microwave Transmission Techniques
Student	Mr. Rachen Kanahna
Student ID.	55610113
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Dr.Sathaporn Promwong

ABSTRACT

This thesis proposed the testing of solution concentration using microwave transmission techniques. The studied solution is sugar solution with the total soluble solid of 16 to 32 °Brix. Firstly, the dielectric properties of the sugar solution were studied at the frequency from 1 to 10 GHz using the open-ended coaxial probe method. The results showed that the different concentration of sugar solution provided the different dielectric constant, dielectric loss factor, loss tangent, and penetration depth. Then, the received signal sending through the different sugar concentration was studied by the simulation using the electromagnetic program. The results showed the affected factor that were the distance between the transmitting and receiving antenna, the height of the sugar solution, the angle of transmitting antenna, the frequency of the antenna and the concentration of the sugar solution. The results also revealed that the received signal was decreased with the increasing of the sugar concentration and the simulation results correspond with the measurement ones using the network analyzer. In addition, the module of the sugar solution concentration testing was constructed at the frequency of 2.45 GHz. The same trend of the results also found when compared with the simulation and the measurement using the network analyzer. It can conclude that the microwave transmission techniques can be used to test the sugar solution concentration.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ขอขอบคุณ รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และ รศ.ดร.สมผล โกศลวิตร ที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำวิจัย

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ราเชน คณนะนา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 คุณสมบัติไดโอิเล็กทริกและวิธีการทดสอบ.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับวัสดุไดโอิเล็กทริก.....	5
2.2.1 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	5
2.2.2 คลื่นระนาบแพร่กระจายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย.....	7
2.3 วัสดุไดโอิเล็กทริก.....	10
2.3.1 คุณสมบัติไดโอิเล็กทริก.....	10
2.3.2 กลไกไดโอิเล็กทริกและคุณสมบัติไดโอิเล็กทริกของน้ำตาล.....	12
2.4 การวัดคุณสมบัติไดโอิเล็กทริกด้วยเทคนิคไมโครเวฟ.....	15
2.4.1 วิธีโพรบแบบแกนร่วมปลายเปิด.....	15
2.4.2 วิธีสายส่ง.....	17
2.4.3 วิธีอากาศว่าง.....	18
2.4.4 วิธีโพรงสั้นพ้อง.....	19
2.5 คลื่นสะท้อนและส่งผ่านเมื่อตกกระทบแบบตั้งฉาก.....	21
2.5.1 ขอบเขตระหว่างตัวกลางที่มีการสูญเสีย.....	22
2.6 สรุป.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโดนดสดด้วยวิธีโพรบแบบแกนร่วมปลายเปิด.....	25
3.1 บทนำ.....	25
3.2 การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยวิธีโพรบแบบแกนร่วมปลายเปิด.....	25
3.3 วิธีการทดสอบ.....	26
3.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาล.....	27
3.5 สรุป.....	30
บทที่ 4 การส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสารละลายน้ำตาล.....	31
4.1 บทนำ.....	31
4.2 เทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ.....	31
4.3 วิธีการทดสอบ.....	31
4.4 การจำลองแบบและผลการจำลองแบบการส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสารละลายน้ำตาล.....	32
4.4.1 ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับ (d).....	32
4.4.2 ความสูงของสารละลายน้ำตาล (h).....	34
4.4.3 มุมของสายอากาศส่ง (θ).....	36
4.4.4 ความถี่ของสายอากาศ (f).....	38
4.4.5 ค่า TSS ของสารละลายน้ำตาล.....	39
4.5 การวัดการส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสารละลายน้ำตาล.....	41
4.6 สรุป.....	42
บทที่ 5 มอดูลระบบตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล	
ด้วยเทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ.....	43
5.1 บทนำ.....	43
5.2 วิธีการทดสอบ.....	43
5.3 องค์ประกอบของมอดูลระบบตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล	
ด้วยเทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ.....	44
5.3.1 ตัวกำเนิดสัญญาณ.....	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.2 วงจรตรวจจับสัญญาณ.....	45
5.3.3 หน่วยประมวลผล.....	45
5.4 ผลการทดสอบระบบตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล ด้วยเทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟและการอภิปรายผล.....	46
5.5 สรุป.....	47
บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์.....	48
6.1 บทสรุปและวิจารณ์.....	48
6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา.....	49
เอกสารอ้างอิง.....	50
ภาคผนวก.....	53
ภาคผนวก ก.....	54
ประวัติผู้เขียน.....	71

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างความลึกผิวของอาหารชนิดต่าง ๆ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์.....	9
2.2 การเปรียบเทียบเทคนิคการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุต่าง ๆ.....	20
4.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r') และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก (ϵ_r'') ตามค่า TSS ที่ใช้ในการจำลองแบบ.....	40



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผ่นคาปาซิเตอร์ที่วางขนาน.....	11
2.2 ไดอะแกรมเวกเตอร์แสดงค่าแทนเจนต์การสูญเสีย.....	12
2.3 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของกลไกไดอิเล็กตริก.....	13
2.4 การหมุนของไดโพลในสนามไฟฟ้า.....	14
2.5 วิธีโพรบแบบแกนร่วมปลายเปิด.....	16
2.6 ตัวอย่างโพรบแบบแกนร่วมปลายเปิดของบริษัท Keysight Technologies.....	16
2.7 วิธีสายส่ง.....	18
2.8 สายส่งและวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	18
2.9 วิธีอากาศคว่าง.....	19
2.10 วิธีโพรงสั้นพ้อง.....	20
2.11 ขอบเขตระหว่างตัวกลางที่แตกต่างกัน.....	21
2.12 ขอบเขตระหว่างตัวกลางไดอิเล็กตริก.....	22
2.13 Scattering Parameter (S-parameter).....	23
3.1 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาล (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ข) ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก (ค) ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย และ (ง) ค่าความถี่.....	28
4.1 เทคนิคการส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสารละลายน้ำตาล.....	31
4.2 โครงสร้างการจำลองแบบการส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสารละลายน้ำตาล.....	32
4.3 ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับ (d).....	33
4.4 กราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างค่าต่าง ๆ.....	34
4.5 กราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างค่าต่าง ๆ.....	34
4.6 ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงของสารละลายน้ำตาล (h).....	35
4.7 กราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ้าที่ความสูงค่าต่าง ๆ.....	36
4.8 ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้เมื่อเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างสายอากาศส่งและภาชนะพลาสติก (θ).....	37
4.9 กราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ้าที่มุมค่าต่าง ๆ.....	38
4.10 ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของสายอากาศ (f).....	39

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 กราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ้าที่ความถี่ต่าง ๆ	39
4.12 ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า TSS.....	40
4.13 กราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ้าที่ค่า TSS ต่าง ๆ	41
4.14 ผลการวัดขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า TSS เปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบ.....	42
5.1 มอดูลระบบตรวจสอบ.....	44
5.2 ตัวกำเนิดสัญญาณ.....	44
5.3 วงจรตรวจจับสัญญาณ	45
5.4 หน่วยประมวลผล และหน้าจอแสดงผล.....	46
5.5 ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า TSS.....	47



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน การตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตรวจสอบคุณภาพแบบไม่ทำลาย (Non destructive) ซึ่งวิธีการหนึ่งที่ยิมนนำมาใช้คือ การใช้คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟตรวจสอบคุณภาพผลผลิตทางการเกษตรตรง ๆ เช่น Tongleam และคณะ ไดไซเทคนิคไมโครเวฟในการแยกมังคุดที่มีเนื้อฝวออกจากมังคุดที่มีเนื้อดี โดยใช้ระดับอ้างอิงซึ่งเป็นครุขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนกลับจากมังคุด และพบว่าให้ผลถูกต้องถึง 79% [1] Abbas และคณะ ไดไซครุสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสฟร่นของคลื่นไมโครเวฟศึกษาความขึ้นในผลปาล์มน้ำมัน โดยใช้ท่อนำคลื่นไดอิเล็กทริกสี่เหลี่ยม (Rectangular dielectric waveguide: RDWG) ในช่วงความถี่ 8_12 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งพบความสอดคล้องเป็นอย่างดีระหว่างผลการทำนายและผลการวัด และได้สรุปว่า วิธีการดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการหาความขึ้นในผลปาล์มน้ำมันได้ [2] Ali และคณะ ไดไซสายอากาศไมโครเวฟเป็นเซนเซอร์ในการตรวจสอบปริมาณความขึ้นในน้ำยารักษา โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความขึ้น ในช่วงความถี่ 2.2 ถึง 2.7 กิกะเฮิร์ตซ์ และพบว่าครุทั้งสองมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น [3] จิรัฎฐ์ ได้ศึกษาการหาคุณสมบัติไดอิเล็กทริกด้วยเทคนิคการเชื่อมต่อรรมของสายอากาศที่ความถี่ไมโครเวฟ และนำไปประยุกต์ใช้กับการหาครุความขึ้นของข้าวเปลือก [4] เช่นเดียวกับ Thunyawat ที่ได้ใช้สายอากาศแบบสวิตซ์เป็นเซนเซอร์วัดความขึ้นข้าวเปลือกในระบบการลดความขึ้นแบบปิด [5]

คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุเป็นคุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุชนิดตรง ๆ กับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอกที่กระทำต่อวัสดุนั้น สำหรับการศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของพืชและผลไม้ที่ความถี่ไมโครเวฟ ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของผลผลิตทางการเกษตรตรง ๆ มากมาย เช่น Nelson ได้วัดตัวอย่างผลไม้และผักจำนวน 9 ชนิด คือ แอปเปิ้ล อโวคาโด กลวย แคนตาลูป แครอท แตงกวา องุ่น สม และ มันฝรั่ง ผลการศึกษาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิ โดยครุแพกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกมีครุเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ครุคงที่ไดอิเล็กทริกมีครุเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ความถี่ต่ำ แต่จะมีครุลดลงตามอุณหภูมิที่ความถี่สูง นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาความขึ้นความหนาแน่น และ ค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของผลไม้และผัก แต่พบว่ามีความสัมพันธ์ค่อนข้างน้อยกับคุณสมบัติไดอิเล็กทริก [6] Guo และคณะ วัดคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของเมลอนเพื่อศึกษาช่วงการสุกโดยใช้โพรบแบบแจนรรมปลายเปิด (Open ended coaxial transmission line) และเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (Impedance analyzer) โดยวัดครุของแข็งที่ละลายได้ซึ่งแสดงครุความหวานเพื่อศึกษาความสัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กทริก ซึ่งพบว่ามีความสัมพันธ์กันเป็นอย่างมาก ด้วย

วิธีการนี้ทำให้แยกเปลือกภายนอกและเนื้อภายในได้โดยใช้ครุของแข็งที่ละลายได้ อย่างไรก็ตามไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแข็งที่ละลายได้ที่ทำนายได้และคุณสมบัติไดอิเล็กตริกมีค่าไม่สูงมากอย่างที่คาดหวังไว้ [7] Nelson และคณะ ได้วัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของผลไม้สด ออกโกสต์ และ ขาวสาลี โดยวิธีสเปกโตรสโคปี ซึ่งพบความเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียตามความถี่และอุณหภูมิ [8] Sun และคณะ ได้ทบทวนงานวิจัยเรื่องเทคนิคแบบไม่ทำลาย (Non destructive) สำหรับการตรวจสอบคุณภาพภายในแตงโมและเมลอน ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของแข็งที่ละลายได้ ค่าความแข็ง การเน่าเสียภายใน และ ความสุก โดยเปรียบเทียบการใช้เทคนิคทางเสียง (Acoustic) เทคนิคไดนามิก (Dynamic) เทคนิคทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก (Electrical and magnetic) เทคนิคเอกซเรย์ (X-ray) และ เทคนิคสเปกโตรสโคปีใกล้อินฟราเรด (Near infrared spectroscopy) ซึ่งพบว่าเทคนิคสเปกโตรสโคปีเป็นเทคนิคที่สำคัญสำหรับการพิจารณาคุณภาพภายในของผลไม้ในอนาคต [9] Guo และคณะ ได้ศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเปลือกตานนอก เนื้อภายใน และ น้ำของแอปเปิ้ลพันธุ์ฟูจิด้วยวิธีโพรมบแบบแกนร่วมปลายเปิด [10] ซึ่งพบความสัมพันธ์แบบเป็นเชิงเส้นเป็นอย่างมากระหว่างค่าสภาพยอม (Permittivity) ของน้ำแอปเปิ้ลและค่าของแข็งที่ละลายได้ ซึ่งผู้วิจัยได้แนะนำการศึกษาต่อไปเพื่อหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่สัมพันธ์กับการสุกและคุณภาพภายในของแอปเปิ้ล Vijay และคณะ ศึกษาองุ่น 2 ชนิด คือ องุ่นเขียว (Sultania) และ องุ่นดำ (Black Monukka) โดยใช้โพรมบแบบแกนร่วมปลายเปิด ซึ่งพบความแตกต่างระหว่างองุ่นทั้งสองชนิดนี้ คุณสมบัติความเป็นกรดขององุ่นเขียวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าแฟกเตอร์การสูญเสียตามความถี่ที่ความถี่สูง ในทางกลับกัน น้ำตาลที่อยู่ในองุ่นดำจะลดผลกระทบจากน้ำ ดังนั้นจึงพบการลดลงของผลการเปลี่ยนแปลงที่ความถี่สูง [11]

นอกจากนี้ ยังมีนักวิจัยนำเสนอวิธีการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกแบบใหม่ๆ และวิธีการคำนวณผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกใหญ่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ดังนี้ Jin และ คณะนำเสนอเทคนิคอินดักทีฟ (Inductive) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแตงกวาดองโดยใช้ระบบตรวจสอบจากพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) แรงดันที่วงจรที่สองจะมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณของเกลือ (NaCl) และค่าของแข็งที่ละลายได้ ตามการเพิ่มขึ้นของค่าความนำในขดลวด (Coil) วิธีการที่นำเสนอนี้สามารถนำมาใช้วิเคราะห์คุณลักษณะของอาหารโดยใช้การทำงานร่วมกันระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กและคุณสมบัติของหม้อแปลงได้ [12] ใน [13] และ [14] Guo และคณะ นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยวิธีสเปกโตรสโคปีและใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) เพื่อใช้กับเครื่องวัดค่าของแข็งที่ละลายได้แบบพกพาและเครื่องตรวจวัดผลไม้ใน [13] วิธี Successive Projection Algorithm (SPA) ร่วมกับ Extreme Learning Machine (ELM) เป็นรูปแบบที่ดีที่สุดสำหรับการทดสอบค่าของแข็งที่ละลายได้กับความแข็งของเนื้อสำหรับการวัดการสุกบนต้นของลูกแพร์ ในขณะที่ [14] นำ SPA_ELM ไปใช้กับการวัดแบบไม่ทำลายของแอปเปิ้ล Lewis และคณะ นำเสนอซอฟต์แวร์สำหรับการวัดสภาพยอมเมื่อใช้เทคนิคการวัดแบบอากาศว่าง (Free space) ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้งานง่าย สามารถใช้งานได้ทั้งการวัดแบบความถี่เดียวหรือช่วงความถี่ ผู้ใช้งานสามารถใช้งานซอฟต์แวร์สำหรับการวัดอย่างต่อเนื่องหรือการวัดเพียงครั้งเดียว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียวกันได้ โดยนำเสนอวิธีการสำหรับการวัดค่าสภาพยอมของเมล็ดพืช เมล็ดน้ำมัน ถั่ว และ ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรต่าง ๆ [15]

ปริมาณน้ำตาลในผลไม้ชนิดต่าง ๆ เป็นคุณสมบัติหนึ่งที่มีนำมาใช้ในการทำนายความอ่อนหรือความสุกของผลไม้ชนิดนั้น ๆ ซึ่งปริมาณน้ำตาลในผลไม้มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเช่นกัน โดยมีงานวิจัยที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลในผลไม้ชนิดต่าง ๆ เช่น Tulasidas และคณะ ศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกขององุ่นและปริมาณสารละลายน้ำตาลที่ความถี่ 2.45 GHz โดยวิธีโพรมบแบบแกนรุ่มปลายเปิด พบว่า ค่าไดอิเล็กตริกขององุ่นมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความชื้นและอุณหภูมิ ผลการศึกษาค่าไดอิเล็กตริกของสารละลายในน้ำตาลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียจะลดลงเมื่อปริมาณน้ำตาลมีค่าเพิ่มขึ้น [16] Liao ศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลาย α -กลูโคส ที่ความถี่ 2450 MHz โดยใช้เทคนิคโพรงสั่นพอง (Cavity perturbation) โดยวัดสารละลายที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 10 ถึง 60 % ที่อุณหภูมิ 0-70 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะลดลงอย่างเป็นเชิงเส้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นแบบหนึ่งในสี่ (Quadratic) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ผลการวิจัยที่ได้เป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารที่มีความถี่ไมโครเวฟ [17] Guo และคณะ ได้วัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำผึ้งตามสัดส่วนของน้ำตาลและน้ำที่เป็นส่วนผสมโดยโพรมบแบบแกนรุ่มปลายเปิด พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำผึ้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณน้ำเป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้น และค่าการสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเช่นกัน [18] Isa ได้ศึกษาปริมาณน้ำตาลในแตงโมโดยใช้หลักการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ซึ่งพบว่า คุณสมบัติของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำตาล โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำตาลมีค่าเพิ่มขึ้น [19]

จากงานวิจัยที่กล่าวถึงข้างต้น พบว่า มีผู้วิจัยที่ไดพยายามสร้างเครื่องมือตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรแบบพกพาโดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลกับคุณสมบัติไดอิเล็กตริก เช่น เครื่องมือตรวจสอบความสุกของผลไม้ เครื่องมือตรวจสอบคุณภาพภายในของผลไม้ โดยวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนหรือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน [1], [3], [13]-[15] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การใช้เทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบที่ง่าย ใช้อุปกรณ์น้อย [20] ดังนั้น การสร้างเครื่องมือตรวจสอบคุณภาพสำหรับผลิตผลทางการเกษตรที่ใช้งานง่าย มีความซับซ้อนน้อย โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ จึงมีความน่าสนใจ

1.2 วัดคุณสมบัติและขอบเขตวิทยานิพนธ์!

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอ การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลซึ่งเสมือนเป็นปริมาณน้ำตาลที่อยู่ในผลไม้ โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ โดยศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r') ค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย (ϵ_r'') ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย ($\tan \delta$) และ ค่าความลึกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(δ_p) ของสารละลายน้ำตาลด้วยโพรบแบบแกนรุ่มปลายเปิด ที่คร้ความเข้มข้นของสารละลาย น้ำตาลแตกต่างกันตั้งแต่ 16_32 องศาปริกซ์ ที่ความถี่ตั้งแต่ 1 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 10 กิกะเฮิรตซ์ จากนั้น ศึกษาการส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสารละลายน้ำตาลด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) เพื่อศึกษาคุณสมบัติของสัญญาณไมโครเวฟที่ส่งผ่านสารละลายน้ำตาล เมื่อคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาลมีค่าต่าง ๆ และสร้างมอดูลระบบการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ เนื้อหา ของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบท มีดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์และ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึง ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตรง ๆ ที่เกี่ยวข้อง คุณสมบัติไดอิเล็กตริก และ การวัดคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกด้วยวิธีต่าง ๆ

บทที่ 3 กล่าวถึง การวัดคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาลด้วยวิธีโพรบ แบบแกนรุ่มปลายเปิด โดยอธิบายวิธีการทดสอบ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ผลการทดสอบ และ อภิปราย ผลการทดสอบ เพื่อศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

บทที่ 4 กล่าวถึง การจำลองการส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสารละลายน้ำตาลโดยโซโปรแกรม คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และเปรียบเทียบผลที่ได้กับการวัดโดยโซเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดยอธิบาย วิธีการทดสอบ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ผลการทดสอบ และ อภิปรายผลการทดสอบ

บทที่ 5 กล่าวถึง การส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสารละลายน้ำตาลโดยโซมอดูลระบบทดสอบ โดยอธิบายองค์ประกอบของมอดูลระบบทดสอบ ผลการทดสอบ และ อภิปรายผลการทดสอบ

บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์ กล่าวสรุปวิทยานิพนธ์ ตลอดจน นำเสนอขอเสนอแนะ เพื่อ การพัฒนาให้เหมาะสมต่อไป

บทที่ 2

คุณสมบัติไดอิเล็กตริกและวิธีการทดสอบ

2.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับวัสดุไดอิเล็กตริกความหมายของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุและวิธีการทดสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุแบบต่างๆรวมทั้งอธิบายความหมายของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ได้จากการทดสอบในเบื้องต้น

ห

2.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับวัสดุไดอิเล็กตริก

2.2.1 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

สำหรับตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) แบบไอโซทรอปิกเชิงเส้น (Linear isotropic) ซึ่งมีค่าสภาพยอมไฟฟ้า (Electrical permittivity) ϵ ค่าความซาบซึมแม่เหล็ก (Magnetic permeability) μ และค่าความนำ (Conductivity) σ สมการของแมกซ์เวลล์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา มีค่า [21] ห

ห

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.1ก)ห$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (2.1ข)ห$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.1ค)ห$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\epsilon\vec{E} \quad (2.1ง)ห$$

ห

เมื่อ $\vec{D} = \epsilon\vec{E}$ และ $\vec{B} = \mu\vec{H}$ และอนุพันธ์ของปริมาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลามีค่าเท่ากับ $j\omega$

(1) สภาพยอมเชิงซ้อน

ในตัวกลางที่มีค่าความนำ σ ความหนาแน่นของกระแสความนำ (Conduction current density) \vec{J} สัมพันธ์กับ \vec{E} โดย $\vec{J} = \sigma\vec{E}$ และเมื่อสมมติใหม่มีกระแสอื่นไหลผ่านตัวกลาง สมการที่ (2.1ง) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

ห

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\epsilon\vec{E} \quad (2.1ง)ห$$

$$\nabla \times \vec{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\vec{E} = j\omega\left(\epsilon - j\frac{\sigma}{\omega}\right)\vec{E} \quad (2.2)ห$$

โดยนิยามสภาพยอมเชิงซ้อน (Complex permittivity) ϵ_c มีค่า

ห

$$\epsilon_c = \epsilon - j\frac{\sigma}{\omega} \quad (2.3)ห$$

ดังนั้นสมการที่ (2.2) สามารถเขียนใหม่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \epsilon_c \vec{E} \tag{2.4}$$

ห

เมื่อหาไดเวอร์เจนซ์ทั้งสองข้างของสมการ(2.4)โดยที่ไดเวอร์เจนซ์ของเคิร์ลของเวกเตอร์มีค่าเท่ากับ 0 $\nabla \cdot \nabla \times \vec{H} = 0$ นั่นคือ $\nabla \cdot (j\omega \epsilon_c \vec{E}) = 0$ หรือ $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสมการ(2.1ก)ทำให้ $\rho_v = 0$ เมื่อแทนสมการ(2.1ง)และสมการที่(2.4)และกำหนดให้ $\vec{H} = \nabla \times \vec{A}$ สมการของแมกซ์เวลล์สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

ห

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \tag{2.5ก}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H} \tag{2.5ข}$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \tag{2.5ค}$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \epsilon_c \vec{E} \tag{2.5ง}$$

ห

สภาพยอมเชิงซ้อนในสมการที่(2.3)มักนิยมเขียนในรูปของสวนจริง ϵ' และ ส่วนจำนวนจินตภาพ ϵ'' ดังนี้

$$\epsilon_c = \epsilon' - j \frac{\sigma}{\omega} \tag{2.6}$$

โดยที่

$$\epsilon' = \epsilon' \tag{2.7ก}$$

ห

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega} \tag{2.7ข}$$

สำหรับตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย $\sigma = 0$ ค่า $\epsilon'' = 0$ และ $\epsilon_c = \epsilon' = \epsilon$

(2) สมการคลื่น

เมื่อหาคาเคิร์ลของสมการที่ (2.5ข) ได้

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -j\omega \mu (\nabla \times \vec{H}) \tag{2.8}$$

ห

และแทนสมการ(2.5ง)ลงในสมการ(2.8)จะได้

ห

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -j\omega \mu (j\omega \epsilon_c \vec{E}) = -\omega^2 \mu \epsilon_c \vec{E} \tag{2.9}$$

ซึ่ง

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} \tag{2.10}$$

ห

โดยที่ $\nabla^2 \vec{E}$ คือลาปลาซเซียนของ \vec{E} ซึ่งในพิกัดคาร์ทีเซียนมีค่า

ห

$$\nabla^2 \vec{E} = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \vec{E} \tag{2.11}$$

ห

เมื่อ $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ จากสมการที่ (2.5ก) และแทนสมการที่ (2.10) ใน(2.9) จะได้

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu \epsilon_c \vec{E} = 0 \quad (2.12)$$

ซึ่งเป็นสมการคลื่นของ \vec{E} ในตัวกลางชนิดเดียวกัน

เมื่อนิยามค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่น (Propagation constant: γ) ให้มีค่า

$$\gamma^2 = \omega^2 \mu \epsilon_c - \omega^2 \mu \epsilon_c \quad (2.13)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.12) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\nabla^2 \vec{E} - \gamma^2 \vec{E} = 0 \quad (2.14)$$

และในทำนองเดียวกันสามารถหาสมการคลื่นในรูปของ \vec{H} ได้เป็น

$$\nabla^2 \vec{H} - \gamma^2 \vec{H} = 0 \quad (2.15)$$

เนื่องจากสมการคลื่นของ \vec{E} และ \vec{H} อยู่ในรูปแบบที่คล้ายกัน ดังนั้นผลเฉลยของสมการทั้งสองจะมีรูปแบบที่คล้ายกันเช่นกัน

2.2.2 คลื่นระนาบแพร่กระจายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย จากสมการคลื่น (2.14)

$$\nabla^2 \vec{E} - \gamma^2 \vec{E} = 0 \quad (2.16)$$

$$\gamma^2 = \omega^2 \mu (\epsilon' - j\epsilon'') = \omega^2 \mu (\epsilon' - j\epsilon'') \quad (2.17)$$

เมื่อ $\epsilon' = \epsilon_c$ และ $\epsilon'' = \sigma/\omega$ และเนื่องจาก γ เป็นจำนวนเชิงซ้อนซึ่งอธิบายด้วย

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.18)$$

เมื่อ α คือค่าคงตัวการลดทอนของตัวกลาง (Attenuation constant) และ β คือค่าคงตัวเฟส (Phase constant) เมื่อแทนค่า γ ด้วย $\alpha + j\beta$ ในสมการ (2.17) จะได้

$$\alpha^2 - \beta^2 = \omega^2 \mu \epsilon' \quad (2.19)$$

$$\alpha^2 - \beta^2 = \omega^2 \mu \epsilon' \quad (2.20)$$

$$2\alpha\beta = \omega^2 \mu \epsilon'' \quad (2.21)$$

และเมื่อแก้สมการเพื่อหาค่า α และ β จะได้

ห

ห ห ห

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right]}^{1/2} \quad (\text{Np/m}) \quad \text{หหหหห(2.22ก)ห}$$

ห

ห ห ห

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} + 1 \right]}^{1/2} \quad (\text{rad/m}) \quad \text{หหหหห(2.22ข)ห}$$

ห

สำหรับคลื่นระนาบแบบสม่ำเสมอ (Uniform plane wave) ที่มีคาสนามไฟฟ้า \vec{E} และ \vec{H} เคลื่อนที่ตามทิศ z สมการคลื่นในสมการ (2.16) สามารถลดรูปลงได้เป็น

ห

$$\frac{d^2 \vec{E}_x(z)}{dz^2} + \gamma^2 \vec{E}_x(z) = 0 \quad \text{หหหห(2.23)ห}$$

ผลเฉลยทั่วไปของสมการคลื่นในสมการ (2.23) ประกอบด้วยคลื่น 2 ชนิดคือ ชนิดที่ 1 เคลื่อนที่ในทิศ $+z$ และอีกชนิดหนึ่งเคลื่อนที่ในทิศ $-z$ หากสมมติให้มีเฉพาะคลื่นชนิดที่ 1 เท่านั้น ผลเฉลยของสมการคลื่นมีค่า

ห ห ห

$$\vec{E}(z) = \hat{E}_x(z) = E_{x0} e^{-\gamma z} = E_{x0} e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \quad \text{หหหห(2.24)ห}$$

ห

สนามแม่เหล็กที่สอดคล้องกับ \vec{H} สามารถหาได้จากการใช้สมการ (2.1ข): $\nabla \times \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H}$ หรือใช้สมการ $\vec{H} = (\hat{k} \times \vec{E}) / \eta_c$ เมื่อ η_c เป็นอินทรินซิกอิมพีแดนซ์ (intrinsic impedance) ของตัวกลางที่มีการสูญเสีย นั่นคือ

ห

ห ห ห

$$\vec{H}(z) = \hat{H}_y(z) = \frac{\vec{E}_x(z)}{\eta_c} = \frac{E_{x0}}{\eta_c} e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \quad \text{หหหห(2.25)ห}$$

เมื่อ

ห ห ห

$$\eta_c = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}} \left(1 - j \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^{-1/2} \quad (\Omega) \quad \text{ห(2.26)ห}$$

ห

จากสมการ (2.24) ขนาดของ $\vec{E}_x(z)$ มีค่า

ห

ห ห ห

$$|\vec{E}_x(z)| = |E_{x0} e^{-\alpha z} e^{-j\beta z}| = |E_{x0}| e^{-\alpha z} \quad \text{หหหห(2.27)ห}$$

ห

โดยมีการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามคาบ z ดวยอัตราการลดลงตามคาบตัวการลดทอน α เนื่องจาก $\vec{H}_y = \vec{E}_x / \eta_c$ ดังนั้นขนาดของ \vec{H}_y ลดลงดวยคาบ $e^{-\alpha z}$ เช่นกันเมื่อสนามมีการลดทอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนหนึ่งของพลังงานที่มีอยู่ในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนเนื่องจากความนำของตัวกลาง เมื่อคลื่นเดินทางด้วยระยะทาง $hz = \delta_s$ หนึดยที่

ห

$$h \quad h \quad h \quad \delta_s \quad h = \frac{1}{\alpha} \quad h \quad (m) \quad h \quad h \quad h \quad h \quad (2.28) \quad h$$

ห

ขนาดของคลื่นจะลดลงด้วยค่าแฟกเตอร์ $0e^{-1} \approx 0.37$ หนึดยเมื่อความลึกมีค่า $hz = 3\delta_s$ ขนาดของสนามจะมีค่าน้อยกว่า % ของค่าเริ่มต้นและที่ $z = 5\delta_s$ จะมีค่าน้อยกว่า % ของค่าเริ่มต้น

ระยะทาง δ_s หรือที่เรียกว่าความลึกผิว (Skin depth) ของตัวกลางซึ่งอธิบายถึงความลึกของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถทะลุผ่านตัวกลางที่มีความนำในตัวกลางไดอิเล็กทริกสมบูรณ์ (Perfect dielectric) ซึ่งมี $\sigma = 0$ และ $\epsilon'' = 0$ หนึดยนำค่าแทนลงในสมการ (2.22) ได้ $\alpha = 0$ และ $\delta_s = \infty$ ดังนั้นในอากาศคลื่นระนาบสามารถแพร่กระจายได้โดยไม่มีการสูญเสียตามขนาดหน้าทำนองกลับกันสำหรับตัวกลางที่เป็นตัวนำสมบูรณ์ $\sigma = \infty$ หนึดยเมื่อใช้สมการ (2.22) ได้ $\alpha = \infty$ และ $\delta_s = 0$ ระยะความลึกผิวเป็นค่าที่บอกถึงระยะทางที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทะลุผ่านเข้าไปในตัวกลางแล้วขนาดของคลื่นมีค่าลดลงเท่ากับ $1/e$ เท่าของคลื่นที่ผิววัสดุนั้น

สำหรับวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับสูง (Very lossy material) จะมีความลึกผิวต่ำ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ผลให้ความร้อนเกิดขึ้นที่บริเวณผิวเท่านั้น แต่สำหรับวัสดุประเภทที่มีความสามารถในการดูดซับต่ำ (Low lossy material) เช่น อาหารแช่แข็ง ค่าความลึกผิวมีค่ามากทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเดินทางผ่านด้วยระยะทางที่มากขึ้นด้วย

การคำนวณค่าความลึกผิวจะมีความแม่นยำเมื่อคลื่นที่ตกกระทบวัสดุเป็นคลื่นระนาบ และวัสดุมีความหนาแน่นมากกว่าค่าความลึกผิวหลายเท่า ซึ่งสามารถพิจารณาเป็นวัสดุกึ่งอนันต์ได้ สำหรับวัสดุที่มีความหนาน้อยกว่าค่าความลึกผิว วิถีพลของเรโซแนนซ์ (Resonant) หรือการสั่นพ้องจะเกิดขึ้นภายในวัสดุ เป็นผลให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลจากพื้นผิว

ห

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างค่าความลึกผิวของอาหารชนิดต่าง ๆ ที่ความถี่ 2.45 GHz เฮิร์ตซ์

วัสดุ	ค่าสภาพยอม	ความลึกผิว (เซนติเมตร)
เนื้อ (Beef) หน	40 หน 12 หน	2.08 หน
เนื้อแช่แข็ง (Frozen Beef) หน	4 หน 0.3 หน	26.0 หน
มันเทศ (Mashed Potato) หน	65 หน 20 หน	1.59 หน
แครอท (Carrots) หน	41 หน 11 หน	2.23 หน

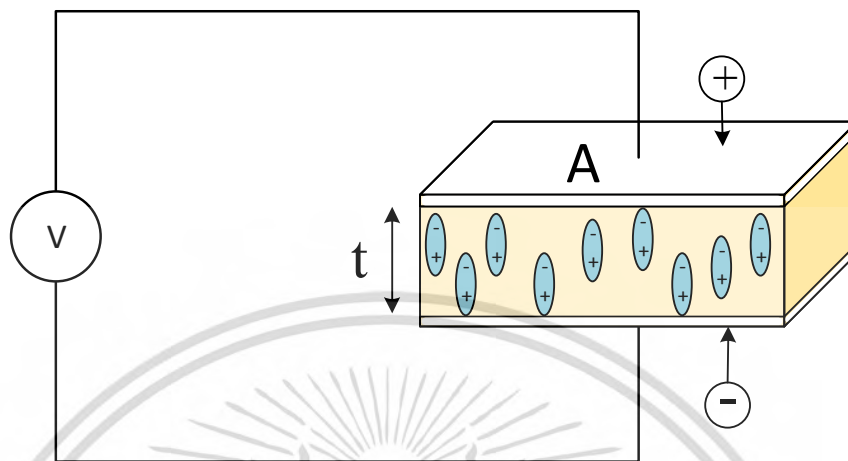
ห

สำหรับตัวกลางที่มีการสูญเสีย $\epsilon'' / \epsilon' \ll \omega \epsilon'' / \omega \epsilon'$ หนึดยมักใช้ ϵ'' / ϵ' หนึดยในการแบ่งชนิดของตัวกลางที่มีการสูญเสีย หนึดยเมื่อ $\epsilon'' / \epsilon' \ll 1$ หนึดยตัวกลางจะถูกพิจารณาเป็นไดอิเล็กทริกที่มีการสูญเสียน้อย (Low loss dielectric) หนึดยและเมื่อ $\epsilon'' / \epsilon' \gg 1$ หนึดยตัวกลางจะถูกพิจารณาเป็นตัวนำที่ดี (Good conductor) หนึดยในทางปฏิบัติตัวกลางอาจถูกพิจารณาเป็นไดอิเล็กทริกที่มีการสูญเสียน้อย ถ้า $\epsilon'' / \epsilon' < 10^{-2}$ หนึดยและพิจารณาเป็นตัวนำที่ดีเมื่อ $\epsilon'' / \epsilon' > 10^2$ หนึดยรวมทั้งพิจารณาเป็นตัวกลางที่คล้ายตัวนำ (Quasi conductor) ถ้า $10^{-2} \leq \epsilon'' / \epsilon' \leq 10^2$ หนึดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปาดิเตอร์ที่วางขนานกันเมื่อมีวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นตัวนำดังกล่าวจะมีประจุที่สะสมอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำจำนวนมากกวาเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่ไม่มืวัสดุใดเทุหนึ่งหรือเป็นอากาศ)อยู่ระหว่างแผ่น

ห



รูปที่ 2.1 แผ่นคาปาซิเตอร์ที่วางขนาน[25]

ห

จากทฤษฎีของสนามแม่เหล็กไฟฟ้านิยามความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าหมีค่า[24]

ห

$$D = \epsilon E \quad (2.32)$$

ห

เมื่อ $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ โดยที่ ϵ_0 คือค่าสภาพยอมสัมบูรณ์ (Absolute permittivity) หรือสภาพยอม (Permittivity) ϵ_0 มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F/m} = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ϵ_r คือค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) และหมีชื่อสนามไฟฟ้า

สภาพยอมจะอธิบายการกระทำระหว่างวัสดุกับสนามไฟฟ้าห และมีค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อน ϵ^* โดยที่ $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ ทั้งนี้[25]-[26]

ห ห

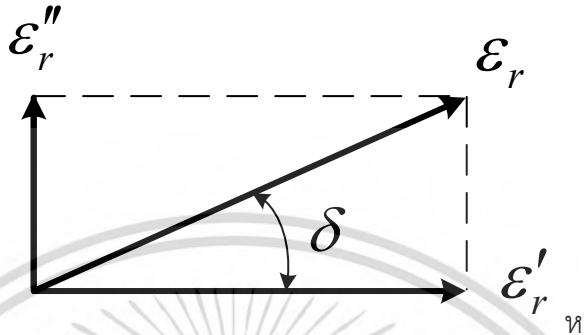
$$\frac{\epsilon^*}{\epsilon_0} = \epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (2.33)$$

ห ห

ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เชิงซ้อน ϵ_r^*)มีค่าเท่ากับค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพยอมสัมบูรณ์เชิงซ้อน ϵ^*)เปรียบเทียบกับค่าสภาพยอมของอากาศว่าง ϵ_0)ส่วนจริงของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ϵ_r')บอกถึงพลังงานจากสนามไฟฟ้าภายนอกที่สะสมอยู่ในวัสดุในขณะที่ส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ϵ_r'')มีชื่อว่าแฟกเตอร์การสูญเสีย (Loss factor) คือการวัดการกระจายหรือการสูญเสียของวัสดุที่มีต่อสนามไฟฟ้าภายนอกส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ϵ_r'')มักมีค่ามากกว่าห และโดยปกติจะมีค่าน้อยกวาส่วนจริงของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ϵ_r')ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียจะรวมผลกระทบจากทั้งการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ห และค่าความนำ (Conductivity) ห

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบของคาสภาพยอมสัมพัทธ์เชิงซ้อนสามารถแสดงในรูปของเวกเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.2 โดยองค์ประกอบส่วนจริงและส่วนจินตภาพจะมีเฟสต่างกัน 90° ผลรวมของเวกเตอร์จะเท่ากับ 90° ทับแกนความจริง (ϵ_r') ความสามารถในการสูญเสีย (Lossiness) ของวัสดุเป็นอัตราส่วนของพลังงานที่สูญเสียในวัสดุต่อพลังงานที่ถูกสะสมในวัสดุ



รูปที่ 2.2 หัดอะแกรมเวกเตอร์แสดงค่าแทนเจนต์การสูญเสีย

ห

ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย (Loss tangent: $\tan \delta$) เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างส่วนจินตภาพ (ϵ_r'') กับส่วนจริง (ϵ_r')

ห

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = D = \frac{1}{Q} = \frac{\text{Energy loss per cycle}}{\text{Energy stored per cycle}} \quad (2.34)$$

D คือแฟกเตอร์การกระจาย (Dissipation factor) และ Q คือแฟกเตอร์คุณภาพ (Quality factor) ในบางครั้งจะใช้ค่าแฟกเตอร์คุณภาพหรือ Q factor ในกรณีของวัสดุไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นค่าที่เป็นส่วนกลับกับแทนเจนต์การสูญเสีย

ห

2.3.2 กลไกไดอิเล็กตริกและคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาล

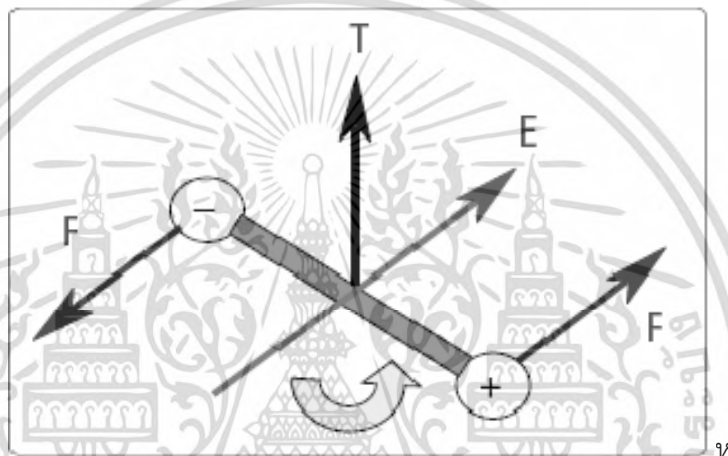
วัสดุแต่ละชนิดอาจมีกลไกไดอิเล็กตริกหรือผลจากการโพลาไรเซชัน (Polarization) ที่แตกต่างกันหลายแบบ ซึ่งจะส่งผลต่อคาสภาพยอมโดยรวมทั้งหมด วัสดุไดอิเล็กตริกจะประกอบด้วยการเรียงตัวของประจุไฟฟ้าซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้โดยการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าภายนอก ประจุจะมีการโพลาไรเซชัน เพื่อชดเชยคาสนามไฟฟ้าดังกล่าว อนุประจุบวกและประจุลบจะเกิดการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ตรงข้ามกัน [22]

ในระดับที่เล็กมาก (Microscopic) กลไกไดอิเล็กตริกหลายรูปแบบจะส่งผลต่อพฤติกรรมไดอิเล็กตริก การปรับตำแหน่งของไดโพล (Dipole Orientation) และความนำไอออนิก (Ionic conduction) มีปฏิสัมพันธ์กันเป็นอย่างมาก ที่ความถี่ไมโครเวฟ ตัวอย่างเช่น โมเลกุลของน้ำ ซึ่งเป็นไดโพลถาวร (Permanent Dipole) จะหมุนตามสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งกลไกเหล่านี้จะทำให้เกิดการสูญเสีย และเป็นเหตุผลที่ไซธิบายสาเหตุที่อาหารร้อนขึ้นเมื่อใส่เตาไมโครเวฟ กลไกแบบอะตอม (Atomic) และอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics) จะมีอิทธิพลค่อนข้างน้อย และปกติมักมีค่าคงที่ในช่วงความถี่ไมโครเวฟ กลไกไดอิเล็กตริกแต่ละชนิดนั้นจะมีคุณสมบัติของความถี่ตัดออฟ (Cutoff frequency) โดยเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น กลไกที่ช้าจะลดบทบาทลง เหลือแต่เฉพาะกลไกที่เร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานหรือการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันถูกยืดออก(Stretch)หายไตสนามไฟฟ้าสำหรับของแข็งที่แห่งการโพลาริเซชันเป็นกลไกการโพลาริเซชันที่สำคัญที่ความถี่ไมโครเวฟเมฆาคาเรโซแนนซ์ที่แท้จริงจะเกิดขึ้นที่ความถี่สูงกวามากๆ ในช่วงอินฟราเรดและแสงที่มองเห็นจะพิจารณาแรงเฉื่อยของอิเล็กตรอนที่เดินทางรอบนิวเคลียสของอะตอมรวมดุษยห อะตอมสามารถถูกโมเดลเสมือนเป็นออสซิลเลเตอร์ที่มีผลของการหน่วง(Damping)ที่คล้ายกับสปริงในทางกลและระบบมวลหน่อมปลิจุดของการออสซิลเลตหจะมีคานขยที่ความถี่อื่นๆที่ไม่ใช่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์มากทุกทลไกอิเล็กทรอนิกส0 และอะตอมจะมีผลต่อคห,'หเพียงเล็กน้อยและเกือบจะไม่มีการสูญเสียเลยโดยความถี่เรโซแนนซ์0สามารถพิจารณาได้จากคำตอบสนองเรโซแนนซ์ของห,'หและยอดสูงสุดของการดูดซับของห,'ห และที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์0ผลกระทบเนื่องจากกลไกนี้จะหมดไปห

ห



รูปที่ 2.4 การหมุนของไดโพลในสนามไฟฟ้า

ห

(3) คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาล

อาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตมักไม่แสดงการโพลาริเซชันเนื่องจากไดโพลารอย่างชัดเจนที่ความถี่ไมโครเวฟ ดังนั้นสำหรับสารละลายคาร์โบไฮเดรตผลกระทบจากน้ำจึงเป็นสิ่งที่ผลต่อคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นอย่างมากปฏิกิริยาจากบอนด์ของไฮโดรเจน(Hydrogen bond)และกลุ่มไฮดรอกซิลของน้ำ(Hydroxyl group water)จะมีบทบาทสำคัญต่อคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของอาหารที่มีน้ำตาลอยู่ในปริมาณมาก[20]

น้ำตาลจะปรับพฤติกรรมไดอิเล็กตริกของน้ำปฏิกิริยาไฮดรอกซิลของน้ำทำให้มีความมั่นคงขยบอนด์ของไฮโดรเจนซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาลระดับปฏิกิริยาไมโครเวฟจะขึ้นอยู่กับความยาวของบอนด์ไฮโดรเจนกลุ่มไฮดรอกซิลของกลูโคสสามารถเขถึงบอนด์ไฮโดรเจนได้ดีกว่ากลุ่มไฮดรอกซิลของแป้ง

มีผู้วิจัยได้ศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาลจำนวนมาก คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายกลูโคสซึ่งมีความเข้มข้นแตกต่างกันตั้งแต่ 10% ถึง 60% จะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความเข้มข้นคาคงที่ไดอิเล็กตริกของกลูโคสเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและมีคาลดลงเมื่อความเข้มข้นของกลูโคสเพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำอิสระ(Free water)ซึ่งจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้ามีปริมาณลดลง ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกจะมีคาลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของน้ำตาลจะทำให้ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียของสารละลายน้ำตาลเพิ่มขึ้นหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิซึ่งอาจเป็นเพราะความสามารถในการละลายได้ของน้ำตาลเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40°C สารละลายกลูโคสจะอิ่มตัวที่ค่าความเข้มข้นและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียจะลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นคุณสมบัติดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าจะมีความเข้มข้นวิกฤตของสารละลายน้ำตาลคาหนึ่งห ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาล

ห

2.4 การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิคไมโครเวฟ

วิธีการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือวิธีแบบเรโซแนนซ์ (Resonant methods) และวิธีแบบไม่เรโซแนนซ์ (Nontresonant methods) หนึ่งวิธีแบบเรโซแนนซ์เป็นวิธีการวัดคุณสมบัติของวัสดุที่ความถี่เดียวหรือหลายความถี่ที่ไม่ต่อเนื่องกันห ในขณะที่วิธีแบบไม่เรโซแนนซ์เป็นวิธีที่ใช้วัดค่าคุณสมบัติของวัสดุได้ในช่วงแถบความถี่ในบางครั้งอาจใช้วิธีการวัดทั้งสองแบบรวมกันได้วิธีแบบเรโซแนนซ์ชนเทคนิคเรโซเนเตอร์แบบโพรง (Cavity Resonator) หรือเทคนิคการรบกวนโพรง (Cavity perturbation) เป็นวิธีการที่คำนวณการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเรโซแนนซ์ของโพรงที่เกิดจากการใส่วัสดุลงไปโพรงในขณะที่วิธีแบบไม่เรโซแนนซ์จะใช้การเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์และความเร็วคลื่นในวัสดุซึ่งทำให้เกิดการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นเทคนิคที่เป็นที่รู้จักกันดีสำหรับวิธีแบบไม่เรโซแนนซ์คือวิธีสายส่ง (Transmission line method) วิธีโพรบแบบแกนรวมปลายเปิด (Open ended หรือ coaxial probe method) และวิธีอากาศว่าง (Free space method) ห

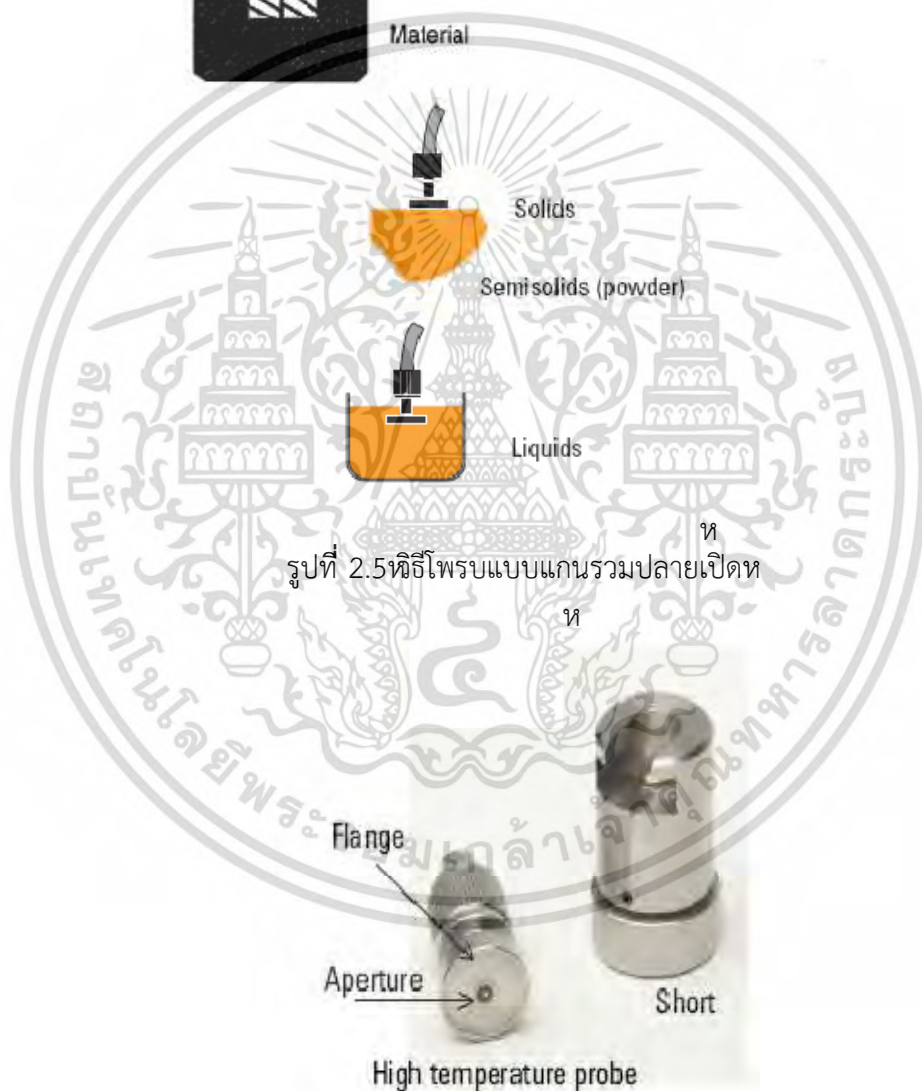
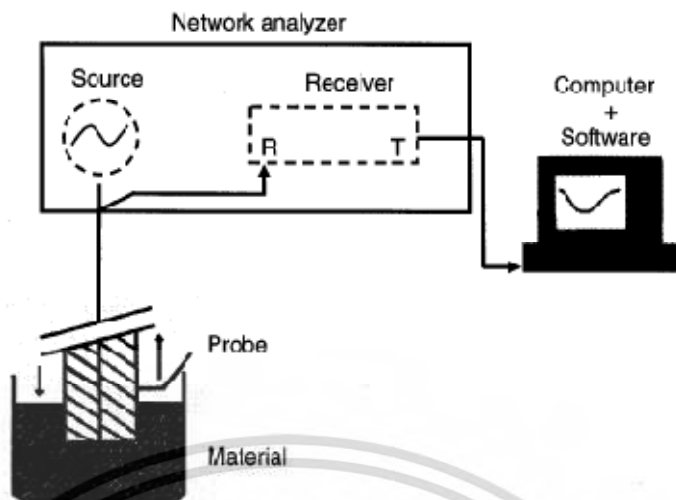
ในหัวข้อนี้จะอธิบายวิธีการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุดังนี้ (1) วิธีโพรบแบบแกนรวมปลายเปิด (Open ended หรือ coaxial probe method) ห (2) วิธีสายส่ง (Transmission line method) ห (3) วิธีอากาศว่าง (Free space method) และ (4) วิธีโพรงสั่นพ้อง (Resonant cavity method) ห โดยแต่ละวิธีมีขั้นตอนการทดสอบหวงความถี่และความเหมาะสมของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบแตกต่างกันดังนี้ห

ห

2.4.1 วิธีโพรบแบบแกนรวมปลายเปิด

การทดสอบด้วยวิธีการนี้คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุจะถูกคำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์และความเร็วคลื่นในวัสดุ นั่นคือหเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง (จากอากาศไปยังวัสดุ) ทำให้คลื่นมีค่าอิมพีแดนซ์และความเร็วคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปห คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบางส่วนเกิดการสะท้อนและบางส่วนเกิดการส่งผ่านที่บริเวณรอยต่อของตัวกลางทั้งสองซึ่งค่าการสะท้อนและการส่งผ่านนี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียได้หวิธีการนี้มีขั้นตอนการทดสอบที่สะดวกและรวดเร็วหแต่การคำนวณคุณสมบัติไดอิเล็กตริกนั้นต้องใช่มิเตอร์และคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงที่สุดที่ทำการทดสอบด้วยวิธีการนี้จะต้องไม่เป็นสารแม่เหล็ก (Nontmagnetic) ห และหสมมติให้วัสดุในบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสโพรบไม่มีผลต่อการวัดค่าไดอิเล็กตริก นั่นคือหวัสดุที่ทำการทดสอบต้องมีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องปลายเปิดของโพรบและวัสดุที่ทำการทดสอบจะต้องมีค่าการสูญเสียที่มากพอห

ห



รูปที่ 2.5 ทิวทัศน์โพรบแบบแกนรวมปลายเปิด

รูปที่ 2.6 ตัวอย่างโพรบแบบแกนรวมปลายเปิดของบริษัท Keysight Technologies

วิธีการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุด้วยโพรบแบบแกนรวมปลายเปิดได้ถูกนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์โดยบริษัทฮีวเลตต์แพคการ์ด (Hewlett Packard) และถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยบริษัท Agilent Technologies (ปัจจุบันคือบริษัท Keysight Technologies) สำหรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการวัดวิธีการนี้เหมาะใช้สำหรับแบบแกนรวมปลายเปิดและหรือเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) หรือเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (Impedance analyzer) วัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของตัวอย่างวัสดุไดอิเล็กตริกที่แตะอยู่กับโพรบแล้วนำผลที่ได้มาใช้ในการคำนวณค่าสภาพยอม

วิธีการนี้เหมาะกับการวัดแบบแถบกว้าง (Broadband measurement) สำหรับวัสดุที่เป็นของเหลว (Liquid) และกึ่งของแข็ง (Semi-solid) พจนานุกรมการวัดด้วยวิธีนี้คือหิมควร์ใหญ่+ เกิดฟองอากาศบริเวณระหว่างปลายโพรบกับตัวอย่างวัสดุอย่างไรก็ดีเช่นเดียวกับเทคนิคการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกอื่น ๆ นั่นคือควรมีการตรวจสอบการวัดกับตัวอย่างที่ทราบค่าสภาพยอมเพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของผลที่ได้ หนึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นการปรับเทียบ (Calibration) โดยใช้อากาศทางอากาศการเทอร์มินเนชันแบบลัดวงจร (Short circuit termination) และน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พจนานุกรมการวัดอีกประการหนึ่งคือ การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่อุณหภูมิต่างจากค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับเทียบ (25°C) หากเทคนิคโพรบแบบแกนรวมปลายเปิดจะมีข้อจำกัดของความถูกต้องเมื่อวัสดุที่ใช้ทดสอบมีค่า ϵ' และ ϵ'' ค่าน้อย [22]-[25]

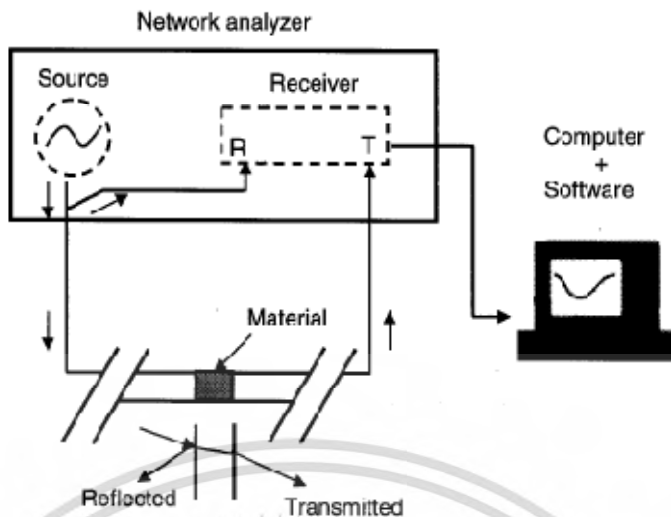
ห

2.4.2 วิธีสายส่ง

วิธีสายส่งจะวางวัสดุไว้ในส่วนหนึ่งของสายส่งที่ตายปกติ และสายส่งจะเป็นท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือสายส่งโคแอกเซียล (ทรงกระบอกกลม) ค่าสภาพยอมสามารถคำนวณได้จากผลการวัดสัญญาณที่สะท้อนกลับ (S_{11}) และสัญญาณที่ส่งผ่าน (S_{21})

วิธีการวัดแบบสายส่งมีข้อดีคือสามารถวัดได้ในช่วงความถี่แบนด์วิดท์เฉพาะที่จำกัดของวิธีนี้คือความยุ่งยากในการเตรียมวัสดุที่จะทดสอบให้มีรูปร่างตามสายส่งที่ใช้งานบนหสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือทรงกระบอกกลมรวมทั้งการหาสายส่งสำหรับการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ความถี่ต่ำจนความถี่ 15 MHz จะใช้เฉพาะสายส่งแบบโคแอกเซียลเท่านั้น เนื่องจากสายส่งแบบท่อนำคลื่นจะมีขนาดใหญ่กว่าที่ความถี่ดังกล่าวนี้ การที่ต่องการวัดคุณสมบัติของของเหลวจะต้องนำตัวอย่างของเหลวใส่ลงในภาชนะก่อนทำการวัดการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยวิธีการนี้จะต้องมีอุปกรณ์ประกอบที่ใช้ในการการวัดคือเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายและโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์

ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้จากการทดสอบวิธีนี้ คือการคำนวณความหนาของวัสดุที่ต่องการทดสอบไม่ถูกต้องรวมทั้งข้อจำกัดในการจัดเตรียมตัวอย่างทดสอบซึ่งใช้เวลาและทั้งทำลายวัสดุทดสอบซึ่งไม่เหมาะกับการทดสอบวัสดุบางประเภทเช่นวัสดุที่มีเสถียรขนาดยาวรวมทั้งการทดสอบที่ความถี่สูงจะมีความยุ่งยากเนื่องจากท่อนำคลื่นมีขนาดเล็ก [22]-[25]



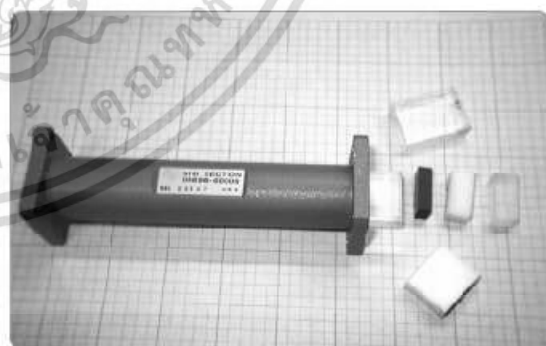
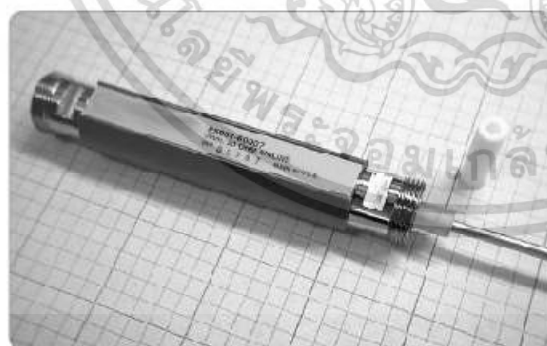
ท



ท

รูปที่ 2.7 หนีสายส่งท

ท



ท

รูปที่ 2.8 หายส่งและวัสดุที่ใช้ในการทดสอบท

ท

2.4.3 วิธีอากาคว่าง

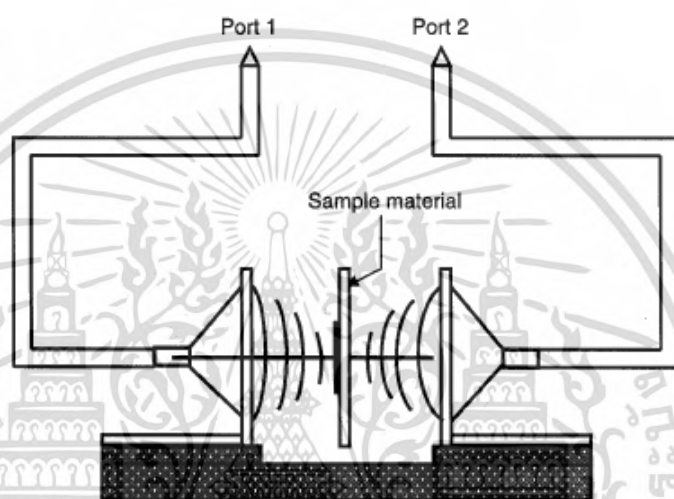
วิธีอากาคว่างหนีวิธีวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุแบบไม่ทำลาย (Nont destructive) และไม่สัมผัส (Contactless) และเป็นวิธีการวัดที่ไม่ต้องเตรียมตัวอย่างวัสดุเป็นพิเศษ เหมาะสำหรับวัสดุที่อุณหภูมิสูงและไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogeneous) นอกจากนี้ยังเหมาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับการนำไปประยุกต์ใช้กับภาคอุตสาหกรรมที่ต้องการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพชิ้นงาน ตรวจสอบความชื้นและความหนาแน่นของวัสดุ

ในวิธีอากาศวางหึ่งจะถูวางอยู่ระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับและวัดค่าการลดทอน(Attenuation)และเฟสที่เลื่อนไป(Phase shift)ของสัญญาณและนำผลที่ได้มาแปลงเป็นคุณสมบัติไดอิเล็กตริกโดยวิธีการนี้จะให้ผลการวัดค่าสภาพยอมที่แม่นยำในช่วงความถี่ของการวัดแบบแบนด์วิดจกว้างเพื่อผลการวัดด้วยวิธีนี้แม่นยำยิ่งขึ้นควรให้ความสำคัญกับสายอากาศส่งและรับหารออกแบบที่ใสหรือจับยึดวัสดุและรูปทรงของวัสดุตัวอย่างรวมทั้งผลกระทบของสภาพแวดล้อมในระหว่างการวัด[22]-[25]

ห



รูปที่ 2.9 วิธีอากาศวางห

ห

2.4.4 วิธีโพรงสั้นพ้อง

วิธีโพรงสั้นพ้องมักถูกใช้ในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่เป็นชนิดเดียวกัน (Homogeneous) ห ขดติของวิธีการนี้คือสามารถทำได้ง่ายลดปริมาณขมูลที่มีความแม่นยำและสามารถวัดค่าไดอิเล็กตริกไดที่อุณหภูมิสูงนอกจากนี้วิธีการนี้ยังเหมาะกับวัสดุที่มีการสูญเสียไดอิเล็กตริกน้อยห

โพรงสั้น(Resonant cavity) หลูกออกแบบตามการแพร่กระจายคลื่นแบบโหมด TM_n (Transverse Magnetic) หรือ E_n (Transverse Electric) ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผลที่วัดได้คือ การเลื่อนไป(Shift) ห ของความถี่เรโซแนนซ(Resonant frequency) ห และการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะการดูดซับ(Absorption characteristics) ของโพรงสั้นที่ถูกปรับเปลี่ยนเนื่องจากการใส่ตัวอย่างของวัสดุลงในโพรงสั้นนั้นห

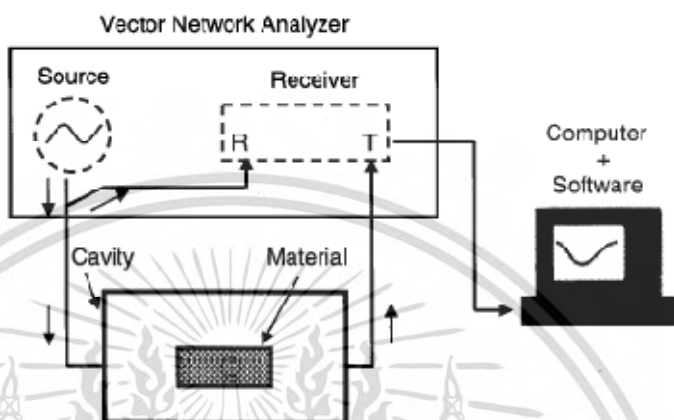
วิธีการวัดนี้หะใส่ตัวอย่างวัสดุลงตรงกลางของทอนาคี่นสี่เหลี่ยมผืนผหหรือหวงกลม) หึ่งนำมาใช้ป็นโพรงหหัดหการเปลี่ยนแปลงความถี่กลาง(Center frequency) ห และหวงแถบความถี่ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการใส่วัสดุหะนำมาใช้ในการคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกหการเปลี่ยนแปลงของค่าแฟกเตอร์ Q (Q factor) หสามารถใช้ในการประมาณค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกหเมื่อใส่วัสดุที่หต้องการทดสอบหเข้าไปในโพรงทรงกระบอกหทำให้หร้อนหขอบเขตของสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปซึ่งส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์และค่าแฟกเตอร์ Q เปลี่ยนแปลงไปโดยวิธีการเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้สามารถคำนวณหาค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ต้องการทดสอบได้

การเตรียมตัวอย่างวัสดุสำหรับวิธีนี้สามารถทำได้ง่ายและใช้เวลานานขยในการทดสอบ ความสะดวกของตัวอย่างจำนวนมากวิธีนี้สามารถใช้ได้กับอุณหภูมิสูงที่สูงกว่า 140°C และ อุณหภูมิต่ำที่ $(\pm 35^{\circ}\text{C})$ [22]-[25]

ห



ห

รูปที่ 2.10 วิธีโพรงสี่เหลี่ยม

ห

จากเทคนิคการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆทั้ง 4 วิธีดังกล่าวสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 2.2

ห

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบเทคนิคการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ

ห	วิธีโพรงแบบ แกนร่วม ปลายเปิด	วิธีสายส่ง	วิธีอากาศว่าง	วิธีโพรงสี่ เหลี่ยม
ความถี่	กว้าง	เป็นช่วง	เป็นช่วง	ความถี่เดียว
ขนาดของวัสดุ	ปานกลาง	เล็ก	ใหญ่	เล็ก
การควบคุม อุณหภูมิ	ห	ห	ห	ห
	ง่าย	ยาก	ง่ายมาก	ง่ายมาก
ความแม่นยำ	ห	ห	ห	ห
เมื่อ	ห	ห	ห	ห
วัสดุมีการ สูญเสียน้อย	น้อย	ปานกลาง	ปานกลาง	มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุมีการ สูญเสียมาก	ห มากห	ห ปานกลางห	ห ปานกลางห	ห ไม่เหมาะสมห
การเตรียมวัสดุ	ง่ายห	ยากห	ง่ายห	ยากห
สถานะ เหมาะสมของ วัสดุ	ของแข็งห ของเหลวห	ห ของแข็งห	ห แผ่นบางใหญ่ห	ห ของเหลวห
การทดสอบ วัสดุ	ไม่ทำลายห	ทำลายห	ไม่ทำลายห	ทำลายห

2.5 คลื่นสะท้อนและส่งผ่านเมื่อตกกระทบแบบตั้งฉาก

ห

เมื่อคลื่นระนาบแบบสม่ำเสมอ (Uniform plane wave) หเดินทางถึงรอยต่อระหว่างวัสดุที่แตกต่างกัน 2 หชนิดซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่แตกต่างกัน คลื่นตกกระทบบางส่วนจะสะท้อนกลับไปยังแหล่งกำเนิดและบางส่วนเดินทางข้ามรอยตอไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง หังแสดงในรูปที่ 2.11 ห [21], ห [26]

ห

ห

ห

ห

ห

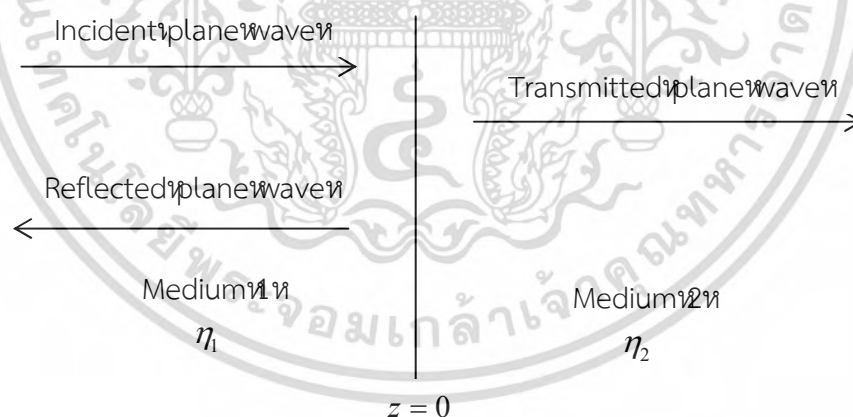
ห

ห

ห

ห

ห



รูปที่ 2.11 หอบเขตระหว่างตัวกลางที่แตกต่างกัน

ห

โดยพิจารณาการตกกระทบแบบตั้งฉาก (Normal incident) หังแสดงในรูปที่ 2.11 หสำหรับตัวกลางที่มีการสูญเสีย

ห

ห

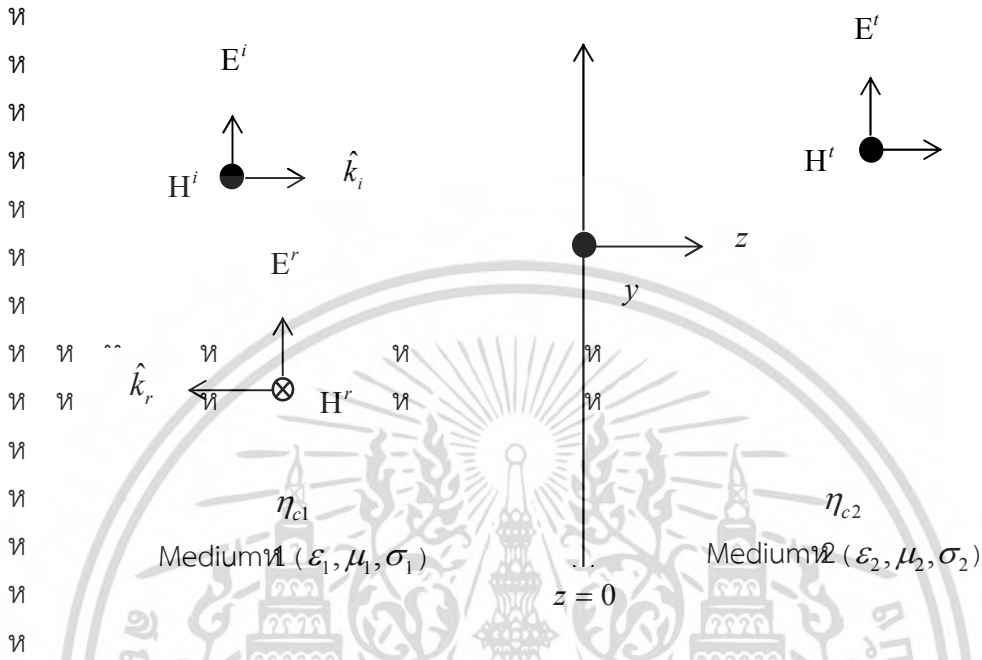
ห

ห

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ หั้งสิ้น อีกหังห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 ขอบเขตระหว่างตัวกลางที่มีการสูญเสีย

ในตัวกลางที่มีพารามิเตอร์ ϵ, μ, σ ทาคงตัวการแพร่กระจาย $\gamma = \alpha + j\beta$ และอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ η_c ซึ่งมีค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อนบนท่วงตัวกลางที่ 1 และ 2 มีค่าพารามิเตอร์ $\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1$ และ $\epsilon_2, \mu_2, \sigma_2$ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.12 ขอบเขตระหว่างตัวกลางไดอิเล็กทริก

สมการที่อธิบายสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กในตัวกลางที่ 1 และ 2 มีค่าดังนี้

ตัวกลางที่ 1

$$\vec{E}_1(z) = \hat{k}_z E_0^i (e^{-\gamma_1 z} + \Gamma e^{\gamma_1 z}) \tag{2.35ก}$$

$$\vec{H}_1(z) = \hat{y} \frac{E_0^i}{\eta_{c1}} (e^{-\gamma_1 z} + \Gamma e^{\gamma_1 z}) \tag{2.35ข}$$

ตัวกลางที่ 2

$$\vec{E}_2(z) = \hat{k}_z \tau E_0^i e^{-\gamma_2 z} \tag{2.36ก}$$

$$\vec{H}_2(z) = \hat{y} \tau \frac{E_0^i}{\eta_{c2}} e^{-\gamma_2 z} \tag{2.36ข}$$

เมื่อ $\gamma_1 = \alpha_1 + j\beta_1$ และ $\gamma_2 = \alpha_2 + j\beta_2$ และ

$$\Gamma = \frac{E_0^r}{E_0^i} = \frac{\eta_{c2} - \eta_{c1}}{\eta_{c2} + \eta_{c1}} \tag{2.37ก}$$

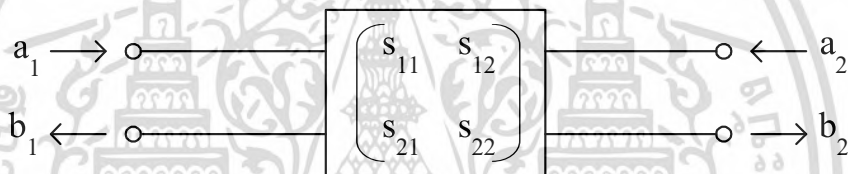
$$\tau = \frac{E_0^t}{E_0^i} = \frac{2\eta_{c2}}{\eta_{c2} + \eta_{c1}} \quad (2.37)$$

ค่า Γ และ τ เรียกว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient) และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่า Γ และ τ คือ

$$\tau = 1 + \Gamma \quad (\text{สำหรับการตกกระทบแบบตั้งฉาก})$$

เนื่องจาก η_{c1} และ η_{c2} มีค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อน Γ และ τ จึงอาจมีค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อนเช่นกัน

เมื่อพิจารณา Scattering Parameter (Sparameter) เพื่อกำหนดความสัมพันธ์ของค่าอินพุตและเอาต์พุตของโครงข่ายในพจน์ของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนโดยกำหนดให้คลื่นตกกระทบนอร์มัลไรซ์มีค่า a_n และคลื่นสะท้อนนอร์มัลไรซ์มีค่า b_n เมื่อหาเป็นตัวเลขแสดงหมายเลขพอร์ตที่ 1 และ 2 โดยมีความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 Scattering Parameter (Sparameter)

ซึ่งสามารถนิยาม Sparameter ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

โดยที่แต่ละพจน์คือ

$$\begin{aligned} S_{11} &= \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \equiv \frac{\text{reflected power wave at port 1}}{\text{incident power wave at port 1}} \\ S_{21} &= \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \equiv \frac{\text{transmitted power wave at port 2}}{\text{incident power wave at port 1}} \\ S_{22} &= \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \equiv \frac{\text{reflected power wave at port 2}}{\text{incident power wave at port 2}} \\ S_{12} &= \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \equiv \frac{\text{transmitted power wave at port 1}}{\text{incident power wave at port 2}} \end{aligned} \quad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ด้านอินพุตจะอยู่ในรูปของ S_{11} ดังสมการ

ห

$$\Gamma_{in} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0} = S_{11} \quad \text{ห} \quad \text{ห} \quad \text{ห} \quad (2.40) \text{ห}$$

ห

และเมื่อพิจารณาค่าขนาดของ S_{11} เป็นค่าลอการิทึม (Logarithm) ห

ห

$$S_{11}(dB) = -20 \log |S_{11}| \quad \text{ห} \quad \text{ห} \quad \text{ห} \quad \text{ห} \quad \text{ห} \quad (2.41) \text{ห}$$

ห

ซึ่งเป็นค่าของการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ส่วนค่า S_{21} ซึ่งสัมพันธ์กับคลื่นตกกระทบที่พอร์ตที่ 1 และคลื่นส่งผ่านที่พอร์ตที่ 2 จะหมายถึงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

ห ห

2.6 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงความหมายของคุณสมบัติไดโอดเล็กทรอนิกส์พาราเมเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง กล่าวคือค่าคงที่ไดโอดเล็กทรอนิกส์พาราเมเตอร์การสูญเสียคาเทจเนตการสูญเสียและหาความสัมพันธ์ วิธีการทดสอบคุณสมบัติไดโอดเล็กทรอนิกส์ของวัสดุด้วยหลักการไมโครเวฟแบบต่างๆและความหมายของ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นพาราเมเตอร์ที่ใช้ประเมิน ประสิทธิภาพของระบบการวัดต่อไปสำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้นได้เลือกใช้วิธีการวัดคุณสมบัติ ไดโอดเล็กทรอนิกส์ของน้ำตาลโตนดสดด้วยวิธีโพรมบแบบแกนร่วมปลายเปิดซึ่งจะนำเสนอผลที่ได้จากการวัด ในบทที่ 3 และให้หลักการของการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟซึ่งจะนำเสนอในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 3

การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาล ด้วยวิธีโพรบแบบแกนร่วมปลายเปิด

3.1 บทนำ

ในบทนี้ นำเสนอผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาลด้วยวิธีโพรบแบบแกนร่วมปลายเปิดโดยครั้งที่วัดได้ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r') และ ค่าคงที่เฟกเตอร์การสูญเสีย (ϵ_r'') จากนั้น นำค่าทั้งสองที่วัดได้มาคำนวณหาแทนเจนต์การสูญเสีย ($\tan \delta$) และ ค่าความลึก (δ_p) ของสารละลายที่ค่าของแฉียงที่ละลายได้ทั้งหมดแตกต่างกันตั้งแต่ 6832 องศาบริกซ์-ที่ความถี่ 1 ถึง 10 กิกะเฮิรตซ์

3.2 การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยวิธีโพรบแบบแกนร่วมปลายเปิด

โพรบแบบแกนร่วมปลายเปิดเป็นส่วนหนึ่งของสายนำสัญญาณ วัสดุจะถูกวัดโดยการจุ่มโพรบลงในของเหลวหรือสัมผัสโพรบกับพื้นผิวเรียบของวัสดุที่เป็นของแข็ง (หรือ ผง) สนามที่ปลายโพรบจะแพร่กระจายเข้าสู่วัสดุและเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับในกรณีที่สนามเข้าสู่ผิวสัมผัสของวัสดุที่ทดสอบ โดยวัดสัญญาณที่สะท้อนกลับ (S_{11}) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า ϵ_r^*

ในการวัดวิธีโพรบแบบแกนร่วมปลายเปิด ประกอบด้วยอุปกรณ์-คือ เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โพรบแบบแกนร่วมและซอฟต์แวร์ ซึ่งซอฟต์แวร์และโพรบจะรวมอยู่ใน 85070E dielectric probe kit และใช้คอมพิวเตอร์ภายนอกเพื่อควบคุมเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในบทนี้ ใช้โพรบของบริษัท Keysight แบบอุณหภูมิสูง ด้วยการผนึกโพรบอย่างแน่นหนาด้วยกระจกและโลหะ ทำให้โพรบมีความทนทานต่อกรดและสารกัดกร่อนทางเคมี โพรบสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ 840 ถึง 200 °C หน้าสัมผัสที่มีขนาดใหญ่ของโพรบทำให้สามารถวัดวัสดุที่เป็นของแข็งที่มีพื้นผิวเรียบ นอกจากของเหลวและวัสดุกิ่งของแข็ง

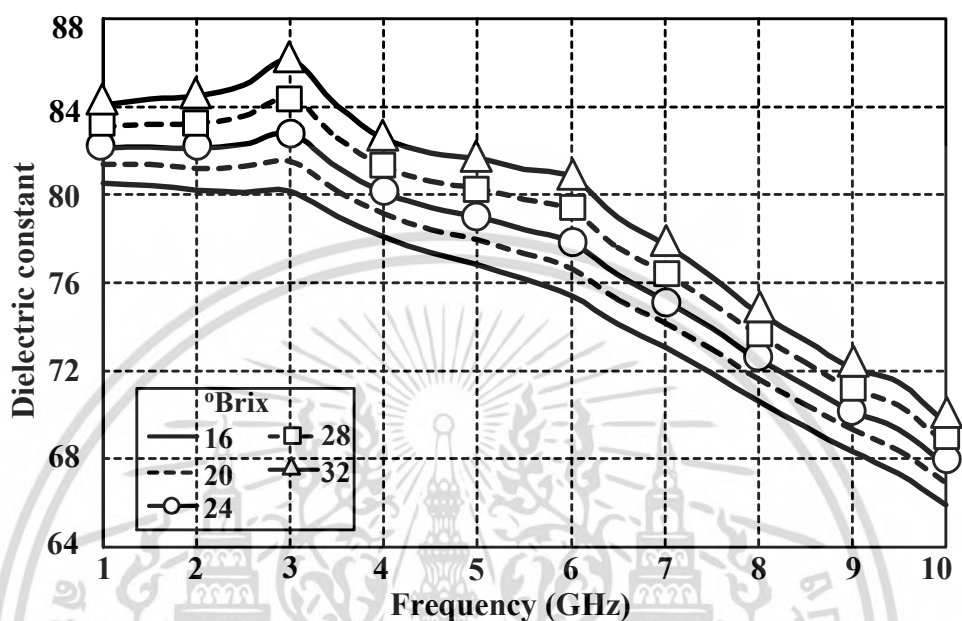
ก่อนทำการวัด ควรทำการปรับเทียบ (Calibration) ที่ปลายของโพรบ การปรับเทียบนี้จะทำให้ค่าจะจงชี้ทิศทาง (Directivity) ค่าการติดตาม (Tracking) และค่าความผิดพลาดจากการแมตซ์แหล่งกำเนิด มีความถูกต้อง โดยใช้ค่าของอากาศ การลัดวงจร และน้ำบริสุทธิ์และไม่แตกตัว (Distillate and deionized water) อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าจะได้ทำการปรับเทียบโพรบแล้ว ก็ยังอาจมีความผิดพลาดซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำในการวัด เช่น ความมั่นคงของสาย ช่องอากาศหรือฟองอากาศ และความหนาของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

สายเคเบิล (ที่เชื่อมต่อระหว่างโพรบกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย) ควรมีความมั่นคงก่อนทำการวัด และควรแน่ใจว่าสายจะไม่ติดงอระหว่างการปรับเทียบและการวัด สำหรับวัสดุที่เป็นของแข็ง ช่องอากาศระหว่างโพรบและวัสดุตัวอย่างเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความผิดพลาด ซึ่งควรปรับพื้นผิววัสดุให้เรียบเหมือนกับหน้าสัมผัสของโพรบ ในกรณีตัวอย่างที่เป็นของเหลว ฟองอากาศที่ปลายโพรบจะส่งผลกระทบต่อค่าของอากาศในวัสดุตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

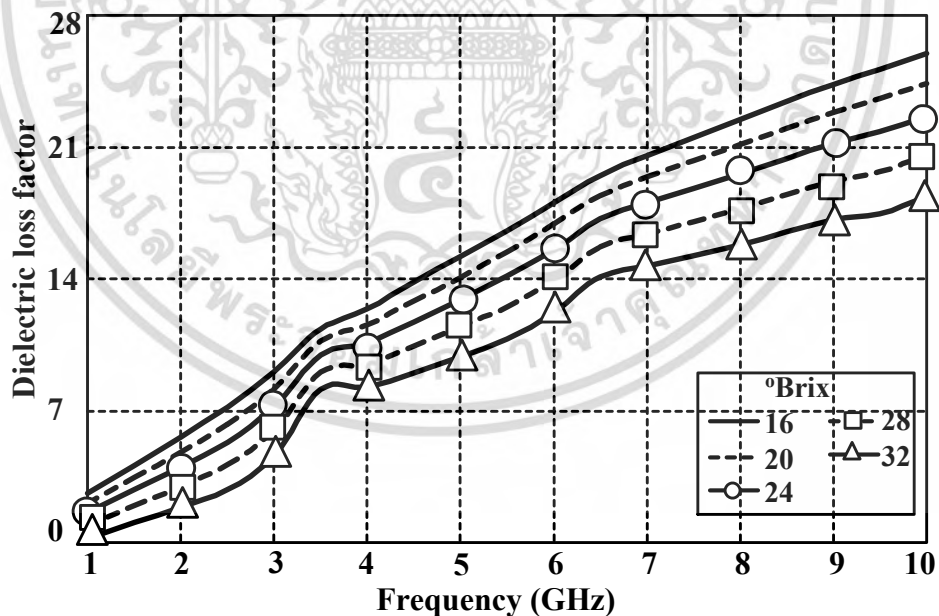
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาล

รูปที่ 3.1 (ก) & (ข) แสดงผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้น 16832 องศาบริกซ์-ที่ความถี่ 1 ถึง 10 กิโลเฮิร์ตซ์-ประกอบด้วย ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย และ ค่าความลึก ตามลำดับ

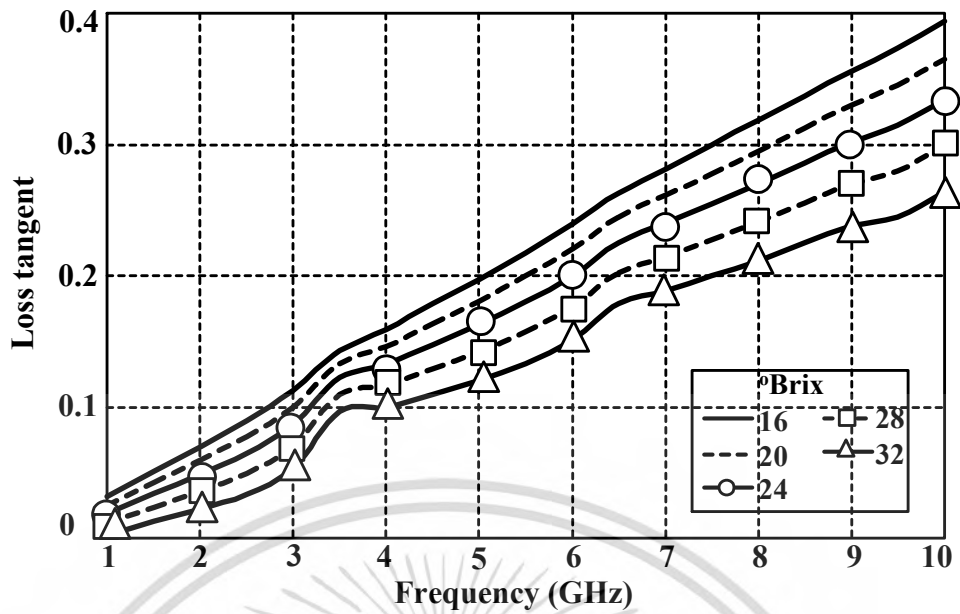


(ก)

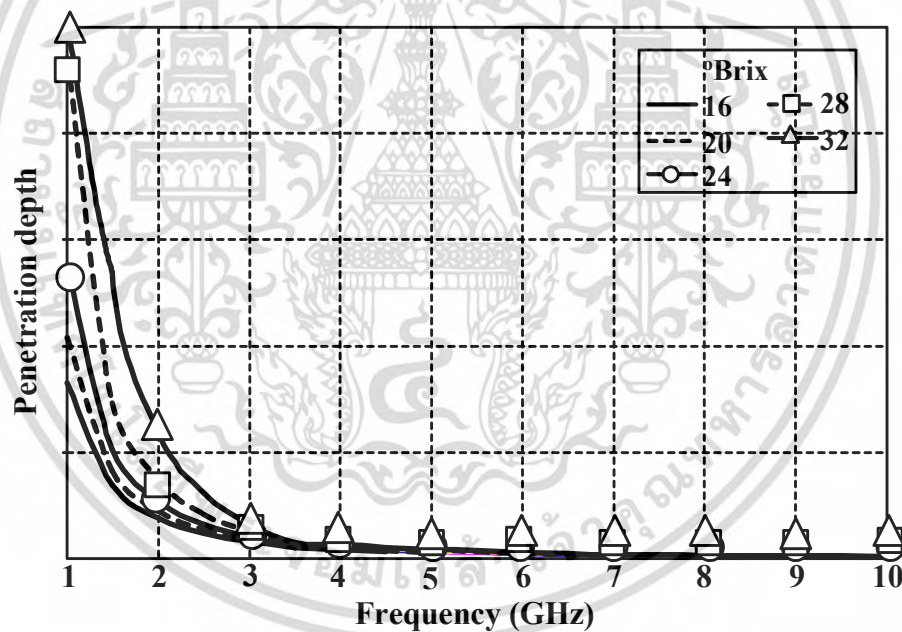


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.1 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาล (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ข) ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก (ค) ค่าแทนเจนตการสูญเสีย และ (ง) ค่าความลึก

คงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกของสายละลายน้ำตาล มีค่า 65.90 ถึง 84.10 และ 0.19 ถึง 25.96 ในช่วงความถี่ 1 ถึง 10 กิกะเฮิรตซ-เมื่อ TSS มีค่าตั้งแต่ 68 ถึง 32 องศาบริกซ์-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพหุคูณการสูญเสียของสารละลายน้ำตาลมีค่า 0.002 ถึง 0.39 ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการวัด และ ค่า TSS ส่วนค่าความถี่มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.0015 ถึง 2.27

จากผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้น 95% ๆ ดังรูปที่ 3.1 พบว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาลมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าพหุคูณการสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าแทนเจนตการสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความถี่นั้นมีความถี่ลดลงในลักษณะเอกซโพเนนเชียล โดยมีค่าความถี่แตกต่างกันที่ความถี่ต่ำ และมีความถี่แตกต่างกันมากที่ความถี่สูง

เมื่อพิจารณาค่า TSS พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาลเพิ่มขึ้นเมื่อ TSS มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ค่าพหุคูณการสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าพหุคูณการสูญเสียแทนเจนตมีค่าลดลง และค่าความถี่มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

ผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ TSS มีค่าเพิ่มขึ้นนั้น ได้ผลตรงข้ามกับผลที่นำเสนอใน [16]-[19] ในงานวิจัยของ Tulasidas และคณะ พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของงุ่นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำในผลงุ่น โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าพหุคูณการสูญเสียจะลดลงเมื่อปริมาณน้ำลดลง [16] งานวิจัยของ Liao พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะลดลงอย่างเป็นเชิงเส้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสเพิ่มขึ้น [17] งานวิจัยของ Guo พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำผึ้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณน้ำเป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้น และค่าพหุคูณการสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น [18] และในงานวิจัยของ Isa ซึ่งพบว่าคุณสมบัติของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำตาล ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำตาลมีค่าเพิ่มขึ้น [19] อย่างไรก็ตาม ค่าพหุคูณการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มของผลการทดลองเหมือนกับผลใน [16]-[19] คือ ค่าพหุคูณการสูญเสียจะมีค่าลดลงเมื่อ TSS มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำตาลมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้อิทธิพลจากการโพลาไรเซชันแบบไดโพลาร์ของน้ำมีค่าลดลง [20]

จากกราฟค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าพหุคูณการสูญเสียไดอิเล็กตริกและความถี่ของสารละลายน้ำตาล พบว่า มีลักษณะคล้ายกับกราฟคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำ ซึ่งได้จากการคำนวณโดยใช้สมการของ Debye นั่นคือ ช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ (1810 กิกะเฮิรตซ์) กราฟค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าลดลงตามความถี่และค่าพหุคูณการสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ ซึ่งแสดงผลของกลไกไดโพลาร์และการนำแบบไอออนิกของสารละลายน้ำตาล ซึ่งมีองค์ประกอบโดยส่วนใหญ่คือ น้ำ กลไกหลักสำคัญที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ คือ กลไกการสูญเสียไดโพลาร์-ซึ่งมีอิทธิพลต่อวัสดุมีขั้ว เช่น น้ำ จากกราฟดังกล่าวไม่สามารถสังเกตค่าความถี่ผ่อนคลาย (Relaxation Frequency) ได้ ซึ่งใน [20] ได้แสดงค่าความถี่ผ่อนคลายของน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่า 19.43 กิกะเฮิรตซ์ อย่างไรก็ตาม การทำนายพฤติกรรมไดอิเล็กตริกของวัสดุอาหารที่ความถี่ต่าง ๆ โดยใช้พฤติกรรมของน้ำเพียงอย่างเดียว นั้น อาจไม่เหมาะสมนัก เนื่องจากน้ำที่อยู่ในอาหารโดยส่วนใหญ่ไม่ได้มีสถานะเป็นน้ำบริสุทธิ์ [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 สรุป

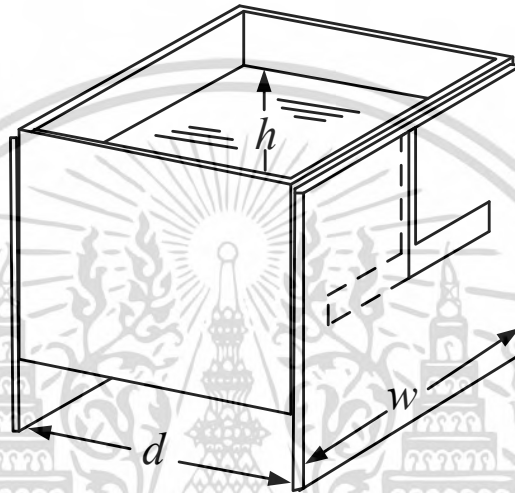
ในบทนี้ได้นำเสนอผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาล ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 10 กิกะเฮิร์ตซ์ ที่ค่า TSS ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 16 ถึง 32 องศาบริกซ์-ซึ่งคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าฟังก์ชันการสูญเสีย ค่าพหุคูณการสูญเสีย และค่าความถี่ โดยพบว่าการละลายน้ำตาลที่มีค่า TSS แตกต่างกันนั้น มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน ซึ่งคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาลที่แตกต่างกันนี้ จะทำให้การส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันไปด้วย จึงสามารถนำคุณสมบัติดังกล่าวมาใช้วัดความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลได้ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การจำลองแบบและผลการจำลองแบบการส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสารละลายน้ำตาล

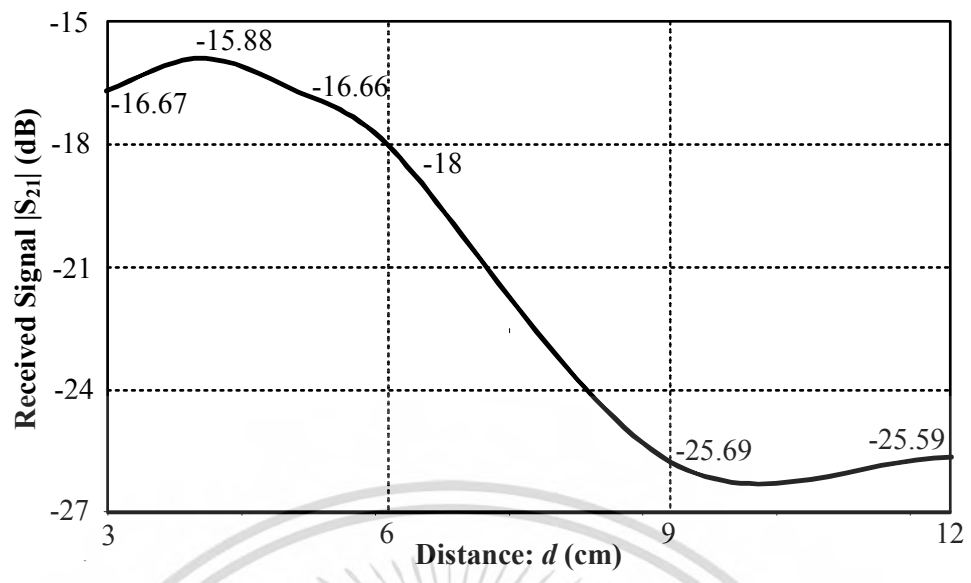
การจำลองแบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้สายอากาศไดโพลแบบแผ่นในการส่งและรับคลื่นไมโครเวฟที่ส่งผ่านสารละลายน้ำตาลหัตยวัดขนาดของสัญญาณที่รับได้ $(|S_{21}|)$ ตัวอย่างสารละลายน้ำตาลแต่ละชนิดบรรจุในกล่องพลาสติกสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 4.2ท โดยจะได้ศึกษาผลของค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้ (1)ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับ (d) (2)ความสูงของสารละลายน้ำตาล (h) (3)หมุมของสายอากาศส่ง (θ) (4)ความถี่ของสายอากาศ (f) และ (5)ค่าทSSของสารละลายน้ำตาลท



รูปที่ 4.2 โครงสร้างการจำลองแบบการส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสารละลายน้ำตาล

4.4.1 ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับ (d)

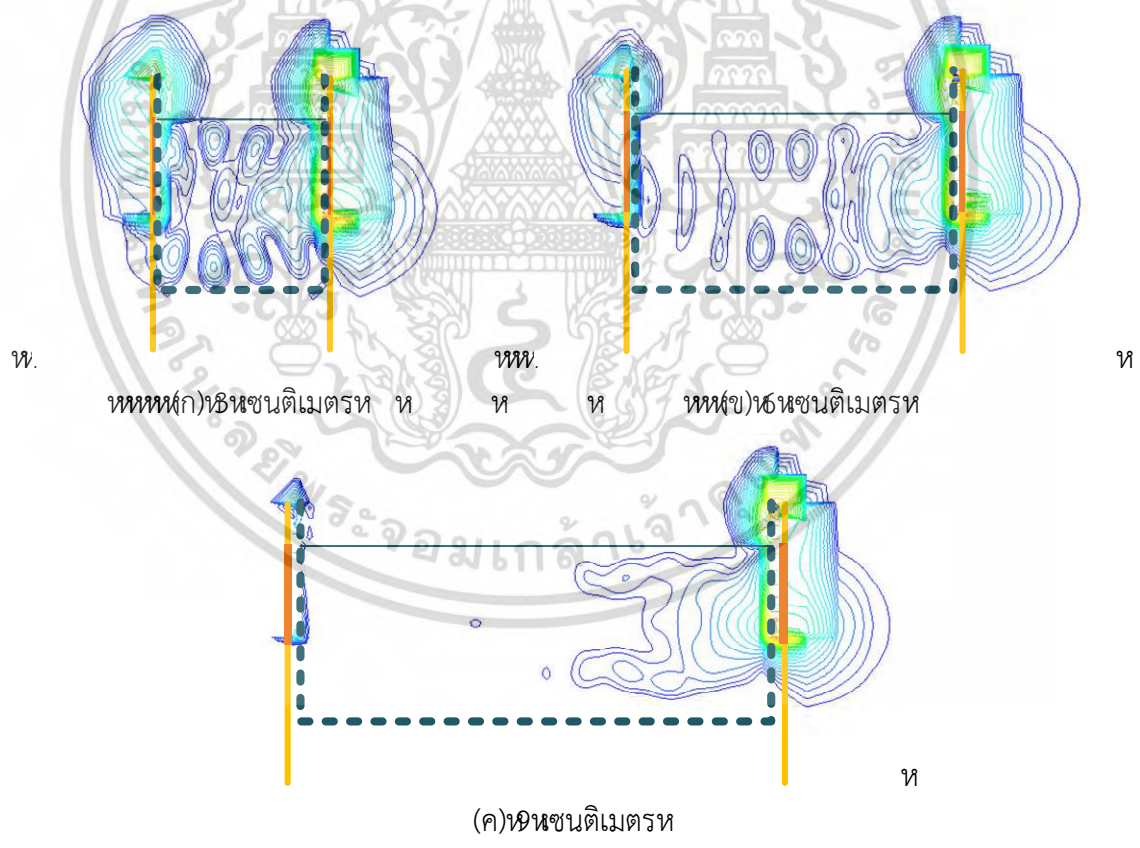
การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับทกำหนดให้ความถี่ (f) ทมีค่า 2.45ท กิกะเฮิรตซทความสูงของสารละลายน้ำตาล (h) ทมีค่า 8ท เซนติเมตรทความกว้างของภาชนะพลาสติก (w) ทมีค่า 7ท เซนติเมตรทซึ่งมีขนาดเท่ากับความกว้างของสายอากาศส่งและรับทมุมระหว่างสายอากาศส่งกับภาชนะพลาสติก (θ) ทมีค่า 0° ทค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ทมีค่า 80.15 และค่าแฟกเตอร์ 4 การสูญเสียไดอิเล็กตริก (ϵ_r'') ทมีค่า 0.22ท (TSSท 16 ทองศาบริกซ) โดยเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่าง (d) ทตั้งแต่ 3–12ทเซนติเมตร $(0.25\lambda - 1\lambda)$ ทซึ่งได้ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้ $(|S_{21}|)$ ดังรูปที่ 4.3ทและมีกราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.4ทและ 4.5ท



ท

รูปที่ 4.3 ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับ(d)ท

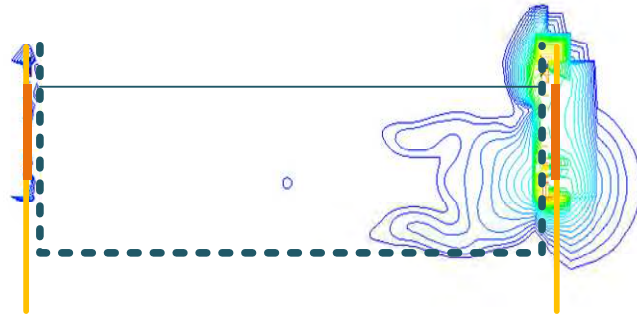
ท



ท.

(ค) ๑๘ เซนติเมตร ท

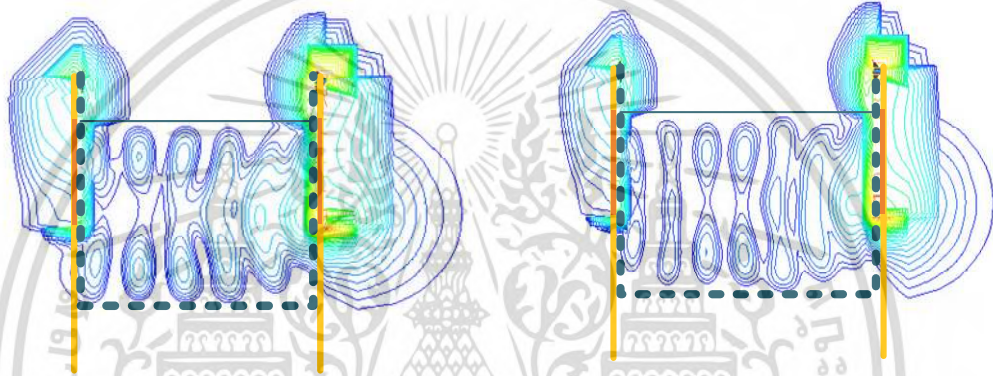
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ท

(ง)ท2หชนติเมตรท

รูปที่ 4.4กราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างค่าต่าง ๆ ท



ท

ททค)ท4หชนติเมตรท

ท

ท

ท

ททค)ท5หชนติเมตรท

รูปที่ 4.5กราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างค่าต่าง ๆ ท

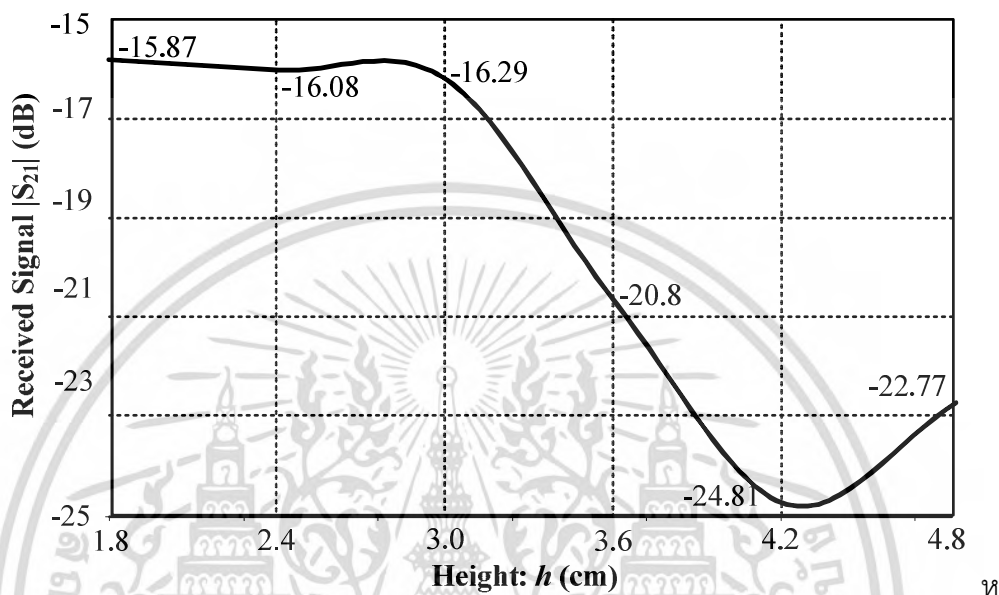
ท

จากขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้ (S_{21}) ทดั่งรูปที่ 4.3ท และกราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟทที่ระยะห่างค่าต่างท ทดั่งรูปที่ 4.4ท พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีค่าเพิ่มขึ้นขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้มีค่าลดลง โดยคลื่นไมโครเวฟเดินทางไปถึงสายอากาศรับได้น้อยมากที่ระยะห่าง1หชนติเมตรและท2หชนติเมตรและเมื่อพิจารณาขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้ที่มากกว่าท20หคBพบว่ามีความอยู่ในช่วงระยะห่างเท่ากับคหชนติเมตรหคยได้พิจารณากราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟทที่ระยะห่างค-5หชนติเมตรเพิ่มเติมทดั่งรูปที่ 4.5ท ซึ่งพบว่าที่ระยะห่างที่มีค่าน้อยขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้มีค่ามากทแต่อาจจะเกิดจากการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับทดั่งนั้นจึงควรพิจารณาระยะห่างที่มากที่สุดที่สามารถเป็นไปได้ซึ่งพบว่าระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับเท่ากับคหชนติเมตรมีความเหมาะสมท

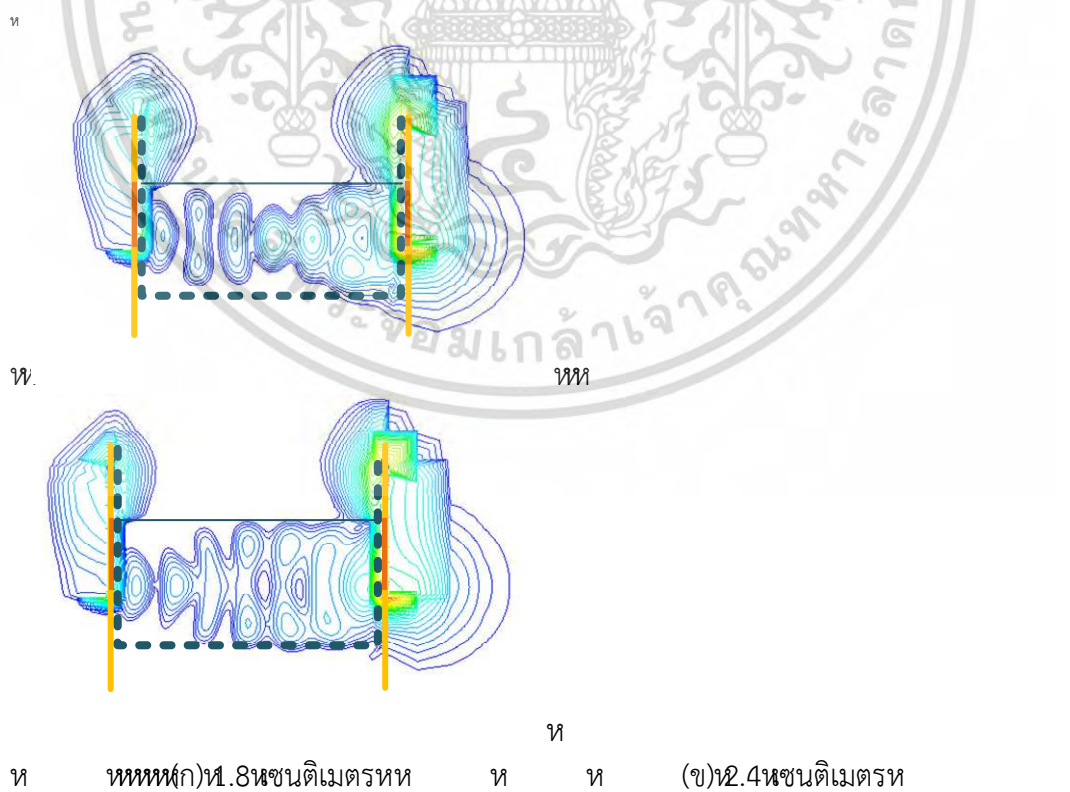
4.4.2 ความสูงของสารละลายน้ำตาล (h)

การศึกษาผลของความสูงของสารละลายน้ำตาลทกำหนดให้ความถี่ฟมีค่า2.45ทิกะเฮิรตซทระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับค)หมีค่าคหชนติเมตรทผลจากห้วข้อเอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไวสำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้ไปไซประโยชน์ทางการค้าไม่วากรณีใดๆ ทดั่งสิ้น อีกทงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

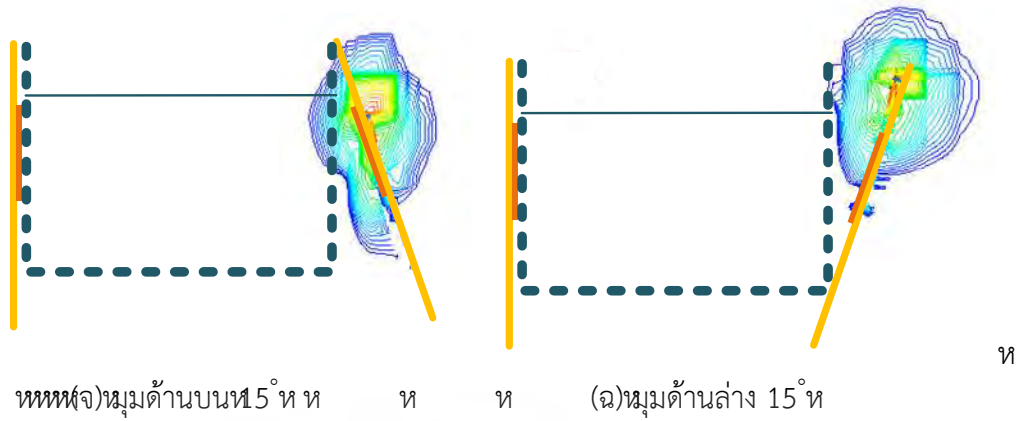
4.4.1) ความกว้างของภาชนะพลาสติก(พ)มีค่าพิหเซนติเมตรมุมระหว่างสายอากาศส่งกับภาชนะพลาสติก(θ)มีค่าพค่าคงที่ไดอิเล็กตริก(ε_r)มีค่า80.15และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก(ε_r')มีค่าพ.22พTSSพ16ของศาบริกชพโดยเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของสารละลายน้ำตาล(ห)ตั้งแต่ 1.8-4.8เซนติเมตร(0.15λ-0.4λ)ซึ่งได้ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้(|S₂₁|)ดังรูปที่4.6และมีกราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ้าที่ความสูงของสารละลายน้ำตาลค่าต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงของสารละลายน้ำตาล(ห)ห



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



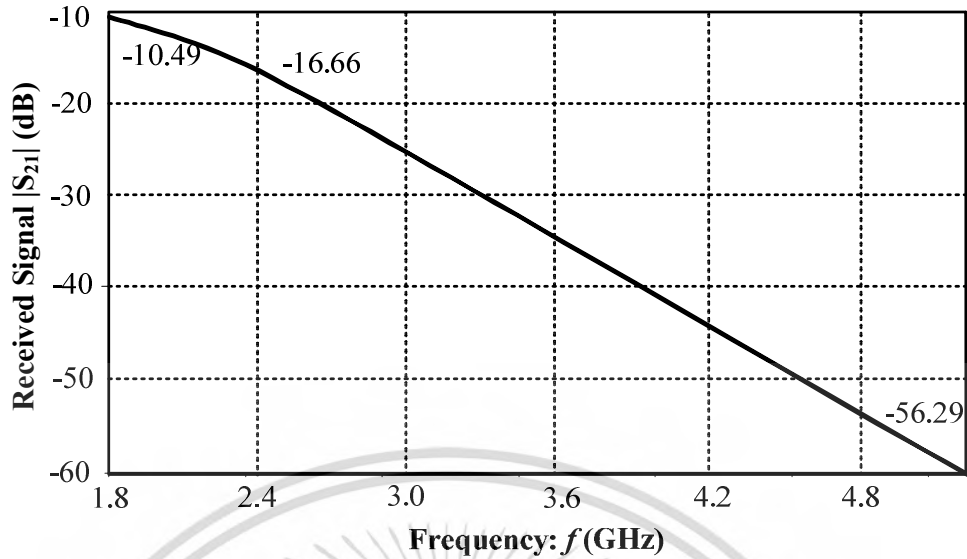
รูปที่ 4.9 กราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ้าที่มุมค่าต่าง ๆ ห

ห

จากขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้ (S_{21}) ห ดังรูปที่ 4.8 และกราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ้าที่มุมต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อสายอากาศทำมุม 10° และ 10° หับภาชนะพลาสติกหะให้ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้มีค่าสูงหแต่เมื่อพิจารณากราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ้าที่มุมค่าต่างหพบว่าคลื่นไมโครเวฟที่รับได้นั้นไม่ได้เกิดจากการส่งผ่านสารละลายน้ำตาลหแต่เป็นคลื่นที่เดินทางผ่านอากาศหคลื่นไมโครเวฟที่รับได้จึงอาจเกิดจากการเชื่อมต้อร่วมระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับผ่านอากาศหตั้งนั้นหมุมระหว่างสายอากาศส่งและภาชนะพลาสติกที่เหมาะสมหึงมีค่าเท่ากับ 10° ห

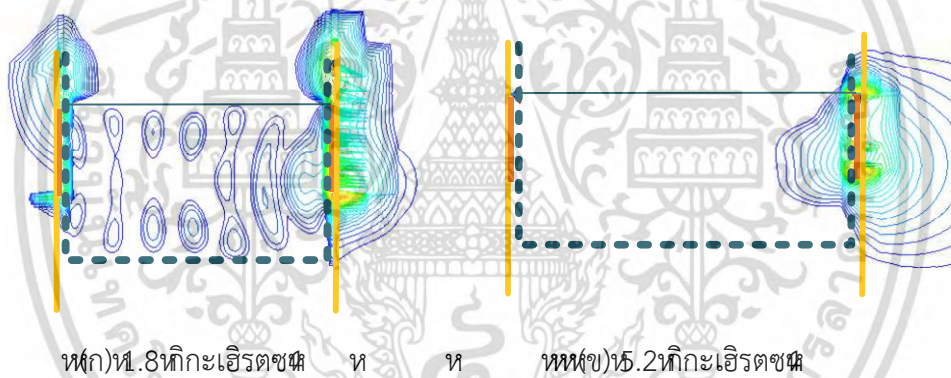
4.4.4 ความถี่ของสายอากาศ (f) ห

การศึกษาความถี่ของสายอากาศ (f) หกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับ ห มีค่า 1 ห เช่นติเมตร (ผลจากหข้อ 4.4.1) ห ความสูงของสารละลายน้ำตาล ห มีค่า 1 ห เช่นติเมตร (ผลจากหข้อ 4.4.2) ห ความกว้างของภาชนะพลาสติก ห มีค่า 1 ห เช่นติเมตร ห มุมระหว่างสายอากาศส่งกับภาชนะพลาสติก ห มีค่า 10° (ผลจากหข้อ 4.4.3) ห ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ห มีค่า 80.15 ห และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก (ϵ'') ห มีค่า 1.22 ห (TSS ห 16 ห งบศาบริกชด ห โดยเปลี่ยนแปลงความถี่ของสายอากาศใน 2 ห กรณีคือ ห 1) หกรณีที่มีความถี่ต่ำกว่า 2.45 ห กิกะเฮิร์ตซ ห หึงพิจารณาที่ความถี่ 1.8 ห กิกะเฮิร์ตซ ห และ ห 2) หกรณีที่มีความถี่สูงกว่า 2.45 ห กิกะเฮิร์ตซ ห หึงพิจารณาที่ความถี่ 5.2 ห กิกะเฮิร์ตซ ห หึงได้ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้ (S_{21}) ห ดังรูปที่ 4.10 ห และมีกราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างต่าง ๆ ห ดังรูปที่ 4.11 ห



รูปที่ 4.10 ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของสายอากาศ (ฟ)

ท



ท

รูปที่ 4.11 กราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ้าที่ความถี่ต่าง ๆ ท

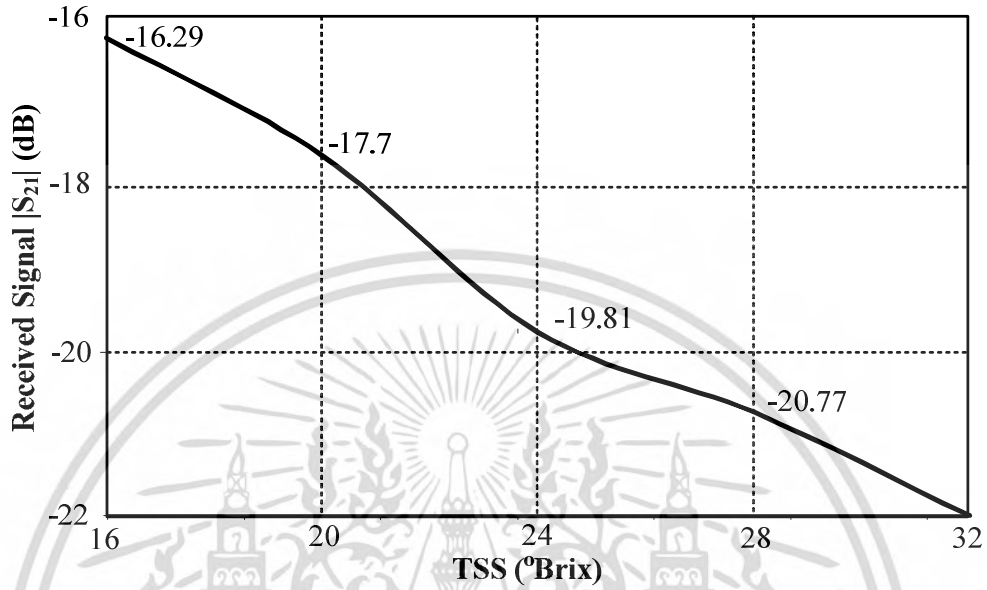
ท

จากขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้ ($|S_{21}|$) ดังรูปที่ 4.10 และกราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ้าที่ความถี่ต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้มีค่าน้อยลงห้ดยที่ความถี่ 1.8 ทิกะเฮิร์ตซห ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้มีค่ามากที่สุดห้แต่เมื่อพิจารณาความถี่ที่สามารถหาอุปกรณ์ได้ง่ายและระบบทดสอบมีขนาดไม่ใหญ่เกินไปนั้นพบว่าความถี่เท่ากับ 4.5 ทิกะเฮิร์ตซห มีความเหมาะสมเนื่องจากขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้มีค่าไม่แตกต่างจากที่ความถี่ 1.8 ทิกะเฮิร์ตซห ท

4.4.5 ค่า TSS ของสารละลายน้ำตาล

การศึกษาค่า TSS ของสารละลายน้ำตาลกำหนดให้หะยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับ (d) ท มีค่าท ห เชนติเมตรห ผลจากห้ข้อ 4.1) ความสูงของสารละลายน้ำตาล (h) หมีค่าท ห เชนติเมตรห ผลจากห้ข้อ 4.2) ความกว้างของภาชนะพลาสติก (w) หมีค่าท ห เชนติเมตรห มุมระหว่างสายอากาศส่งกับภาชนะพลาสติก (θ) หมีค่าห้ ผลจากห้ข้อ 4.3) ความถี่ของสายอากาศ (f) หมีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ั้งสิ้น ห้กห้ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.45ทกิกะเอีรตซผลจากหัวข้อ4.4.4)และเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิล็กตริกท ϵ'_r)และค่าแพกเตอร์4 การสูญเสียไดอิล็กตริกท ϵ''_r)ตามค่าทSSที่ได้จากการวัดในบทที่ซหังตารางที่4.1ซึ่งได้ขนาดของ คลื่นไมโครเวฟที่รับได้($|S_{21}|$)ดังรูปที่4.12และมีกราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ3ที่ระยะห่างต่างท ดังรูปที่ 4.13ท



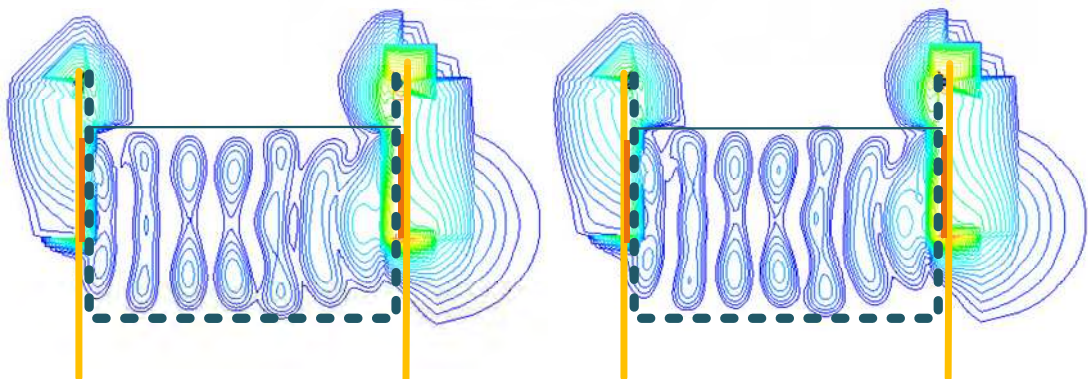
รูปที่ 4.12ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าทSSท

ท

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ไดอิล็กตริกท ϵ'_r)และค่าแพกเตอร์การสูญเสียไดอิล็กตริกท ϵ''_r)ตามค่าทSS ที่ใช้ในการจำลองแบบท

°Brixท	ϵ'_r ท	ϵ''_r ท
16ท	80.15ท	7.22ท
20ท	81.28ท	6.30ท
24ท	82.27ท	5.34ท
28ท	83.57ท	4.15ท
32ท	84.98ท	2.82ท

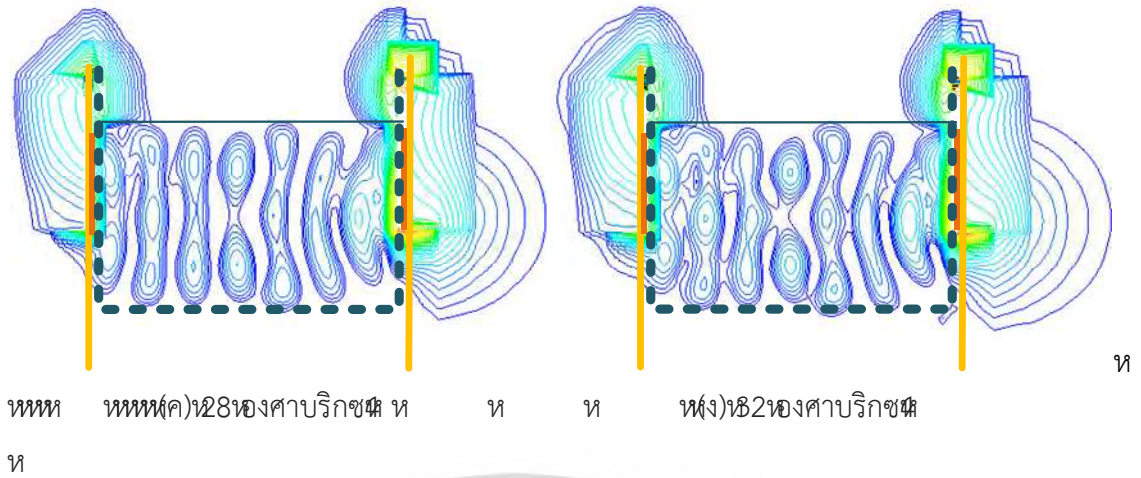
ท



ท

พหท)20ทองตาบริกซท ท ท ท พหท)24ทองตาบริกซท

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไวสำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เนาไปไซประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารททุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ทราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ้าที่ค่าทSSต่าง ๆ ท

ท

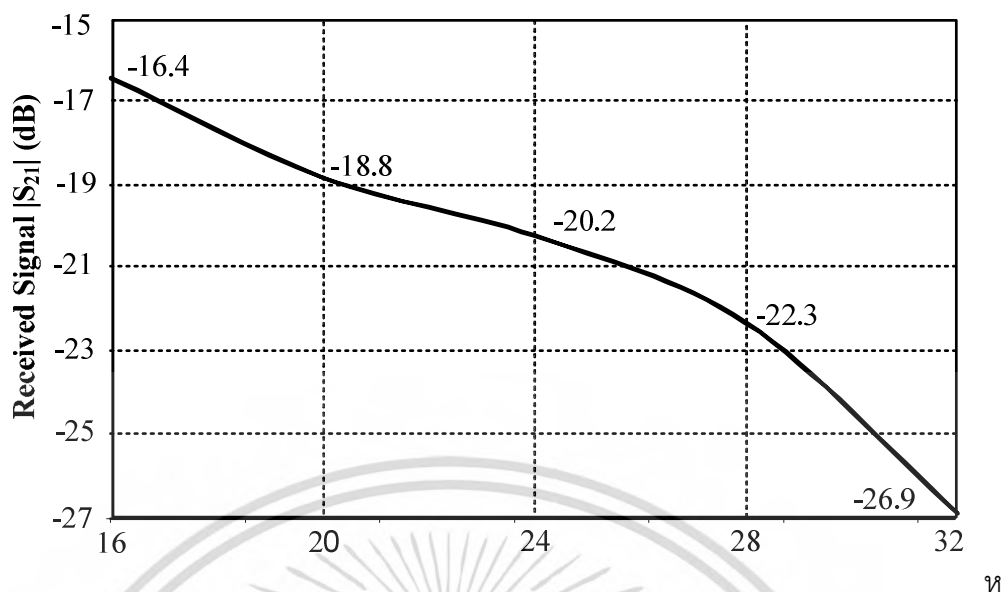
จากขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้ (S_{21}) ดังรูปที่ 4.12 และกราฟพื้นผิวของขนาดสนามไฟฟ้าที่ความถี่ค่าต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อทSSมีค่าเพิ่มขึ้นขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้มีค่าลดลง นั่นคือเมื่อปริมาณน้ำตาลในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้มีค่าลดลง โดยเมื่อทSS มีค่าตั้งแต่ 16-32 องศาบริกซ์ ขนาดของคลื่นไมโครเวฟมีค่าเท่ากับ 20.77 ถึง 16.29 วัตต์

ท

4.5 การวัดการส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสารละลายน้ำตาล

จากผลการจำลองแบบที่ได้ในหัวข้อ 4.4 เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการจำลองแบบ จะได้เปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายซึ่งมีวิธีการทดสอบดังนี้

สารละลายน้ำตาลที่ต้องการทดสอบจะถูกวางระหว่างสายอากาศส่งและรับ ซึ่งเป็นสายอากาศไดโพลแบบแบนราบที่มีการโพลาไรเซชันแบบเดียวกัน สายอากาศส่ง (สายอากาศ 1) ทำหน้าที่ส่งสัญญาณไมโครเวฟผ่านสารละลายน้ำตาลที่ต้องการทดสอบ และสายอากาศรับ (สายอากาศ 2) ทำหน้าที่รับคลื่นไมโครเวฟ โดยสายอากาศทั้งสองจะถูกต่อเข้ากับพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย E5071C และวัดขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้ (Received Signal (S_{21})) ที่ความถี่ 2.45 GHz กิกะเฮิรตซ์ สารละลายน้ำตาลมีค่าทSS ตั้งแต่ 16 ถึง 32 องศาบริกซ์ ตัวอย่างสารละลายน้ำตาลบรรจุในกล่องพลาสติกสีเหลืองมีความกว้าง 7 เซนติเมตร และความยาว 18 เซนติเมตร และมีความสูงของสารละลายน้ำตาล 8 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการจำลองแบบและคุณสมบัติของสารละลายน้ำตาลที่ทดสอบมีค่า 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.14 ผลการวัดขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าทSSหเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบท

จากผลการวัดในรูปที่ 4.14 พบว่าขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้มีค่าลดลงเมื่อค่าทSSหมีค่าเพิ่มขึ้นโดยเมื่อทSSหมีค่าตั้งแต่ 16-32 องศาบริกซขนาดของคลื่นไมโครเวฟมีค่าเท่ากับ 26.90 dB ถึง 16.40 dB ท

ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้เมื่อส่งผ่านสารละลายน้ำตาลมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลได้ท

4.6 สรุป

ในบทนี้ นำเสนอผลการจำลองแบบเพื่อศึกษาขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้เมื่อส่งผ่านสารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้นค่าต่าง ๆ โดยพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัญญาณไมโครเวฟที่รับได้นั้นประกอบด้วย 1) ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับ (d) 2) ความสูงของสารละลายน้ำตาล (h) 3) มุมของสายอากาศส่ง (θ) 4) ความถี่ของสายอากาศ (f) และ 5) ค่าทSSของสารละลายน้ำตาล จากผลการจำลองแบบได้ขนาดที่เหมาะสมของค่าต่างๆ คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับ (d) มีค่าทเซนติเมตร ความสูงของสารละลายน้ำตาล (h) มีค่าทเซนติเมตร ความกว้างของภาชนะพลาสติก (w) มีค่าทเซนติเมตร มุมระหว่างสายอากาศส่งกับภาชนะพลาสติก (θ) มีค่า 0° ความถี่ของสายอากาศ (f) มีค่า 2.45 ท กิกะเฮิรตซ และมีทSSห มีค่าตั้งแต่ 16-32 องศาบริกซ และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองแบบกับผลที่ได้จากการวัดโดยเครื่องวิเคราะห์หโดยตรงพบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีจึงสามารถใช้เทคนิคการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลได้ท

บทที่ 5

มอดูลระบบตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล ด้วยเทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ

5.1 บทนำ

ในบทที่ 4 ได้นำเสนอผลการวัดขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้จากการส่งผ่านสารละลายน้ำตาลด้วยเครื่องวิเคราะห์ครึ่งขั้ว ซึ่งมีขนาดใหญ่และเหมาะกับการใช้งานในห้องปฏิบัติการ ในการวิเคราะห์หาระบายน้ำตาลโดยทั่วไปนั้น ควรใช้อุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก พกพาสะดวก และสามารถทดสอบนอกสถานที่ได้ ในบทนี้ กล่าวถึง การสร้างระบบตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลด้วยเทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้มอดูลระบบทดสอบที่ได้สร้างขึ้น ซึ่งจำลองการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ครึ่งขั้วที่มีความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์โดยมอดูลประกอบด้วย ตัวกำเนิดสัญญาณคลื่นไมโครเวฟ วงจรตรวจจับสัญญาณ และ ระบบควบคุม เพื่อสร้างมอดูลการตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลที่สามารถพกพาใช้งานนอกสถานที่ได้

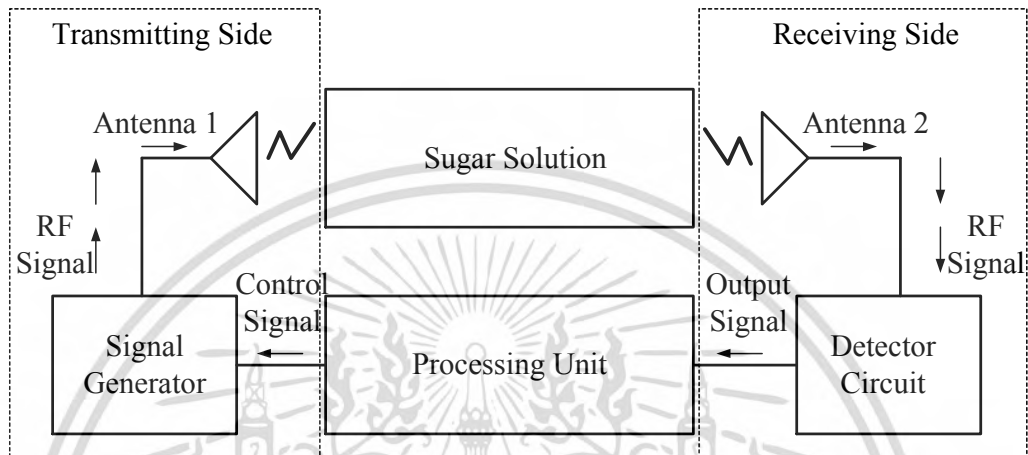
5.2 วิธีการทดสอบ

มอดูลระบบตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลด้วยเทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟที่ได้สร้างขึ้นนั้นประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้ ทางด้านส่ง สายอากาศไดโพลแบบแบนราบ (Planar dipole antenna) ซึ่งต่อกับตัวกำเนิดสัญญาณคลื่นไมโครเวฟ ทางด้านรับ ประกอบด้วย สายอากาศรับซึ่งเป็นสายอากาศไดโพลแบบแบนราบเช่นกันต่ออยู่กับวงจรตรวจจับสัญญาณ กระบวนการในการทดสอบทั้งหมดจะถูกควบคุมด้วยหน่วยควบคุม (Processing unit) ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยจะวัดขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้จากการส่งผ่านสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นค่าต่าง ๆ

ในการวัดนั้น สารละลายน้ำตาลบรรจุในกล่องพลาสติกสีเหลี่ยมที่มีความกว้าง 7 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร และมีความสูงของสารละลายน้ำตาล 3 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดเดียวกับที่ใช้ในบทที่ 4 ค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ของสารละลายน้ำตาลมีค่าตั้งแต่ 16R 32 องศาบริกซ์ซึ่งในการทดสอบ ได้ควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างสารละลายน้ำตาลให้มีค่า 25 องศาเซลเซียส ในทุกการทดสอบ

5.3 องค์ประกอบของมอดูระบบตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลด้วยเทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ

มอดูระบบตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลด้วยเทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟประกอบด้วย ส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญ 3 ส่วน ดังนี้ ตัวกำเนิดสัญญาณ วงจรตรวจจับสัญญาณ และ หน่วยประมวลผล โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละส่วนดังนี้



รูปที่ 5.1 มอดูระบบตรวจสอบ

5.3.1 ตัวกำเนิดสัญญาณ

ตัวกำเนิดสัญญาณของมอดูระบบทดสอบนี้ ใช้ EVAL-ADF4350EB Evaluation Board ของบริษัท แอนะล็อกดีไวซ์ทำเนิตสัญญาณความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์&ด้วยการทำงานของเฟสล็อกลูป (Phase locked loop: PLL) ตัวกำเนิดสัญญาณจะถูกควบคุมโดยระบบประมวลผลเพื่อกำเนิตสัญญาณที่มีความถี่ตามที่ต้องการ

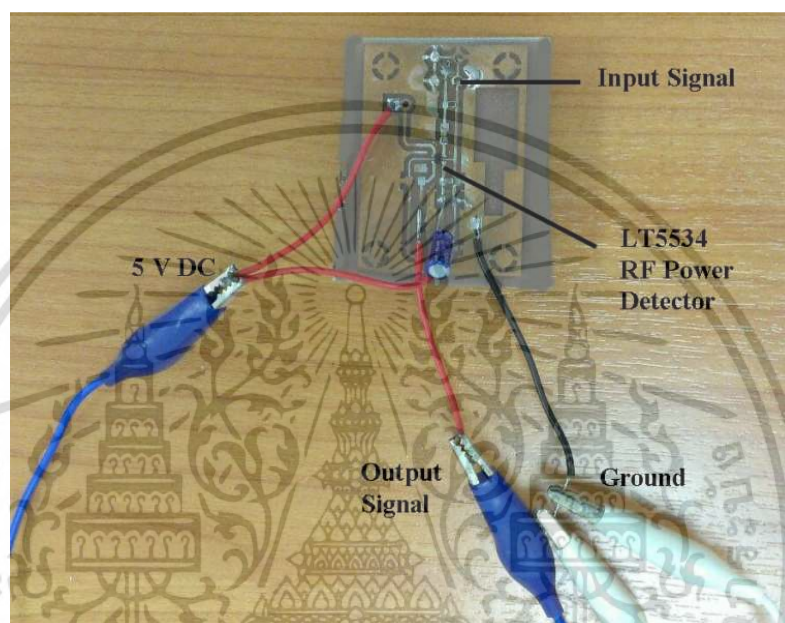


รูปที่ 5.2 ตัวกำเนิดสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 วงจรตรวจจับสัญญาณ

สัญญาณไมโครเวฟจากสายอากาศรับจะถูกแปลงจากค่ากำลังงานในหน่วย dBm เป็นแรงดันไฟกระแสตรง โดยใช้ ชิปตัวตรวจจับสัญญาณ LT5534 ของบริษัท ลินีเยอร์เทคโนโลยี โดยชิปดังกล่าวมีค่าความไว (Sensitivity) เท่ากับ -60 dBm ที่ความชวงความถี่ 50 เมกะเฮิร์ตซถึง 3 กิกะเฮิร์ตซ ซึ่งให้ผลการแปลงสัญญาณที่มีความแม่นยำและรวดเร็ว วงจรตรวจจับสัญญาณที่สร้างจากชิป LT5534 แสดงในรูปที่ 5.3

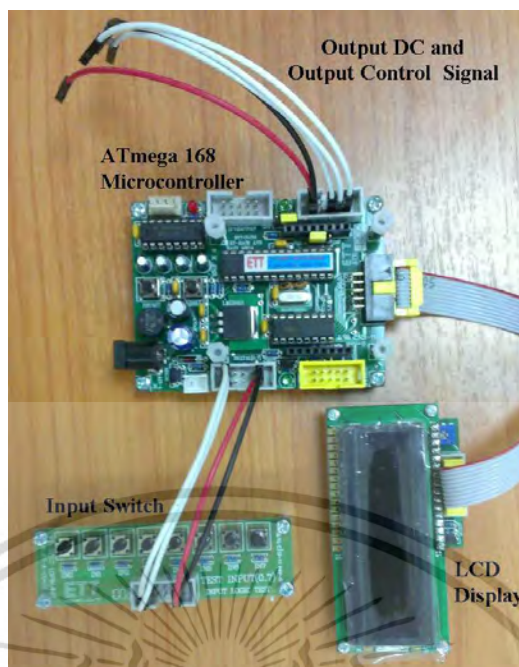


รูปที่ 5.3 วงจรตรวจจับสัญญาณ

5.3.3 หน่วยประมวลผล

หน่วยประมวลผลของมอดูล ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega 168 แบบ AVR หน่วยประมวลผลทั้งกล่าว จะใช้ควบคุมตัวกำเนิดสัญญาณที่ทางด้านส่งให้กำเนิดสัญญาณที่ความถี่ที่ต้องการ และรับสัญญาณที่ตรวจจับได้จากวงจรตรวจจับสัญญาณที่ทางด้านรับมาประมวลผล ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ($|S_{21}|$) ที่วัดได้นั้น จะแสดงบนหน้าจอแอลซีดี (Graphical liquid crystal display: LCD) ทางด้านรับ ดังแสดงในรูปที่ 5.4

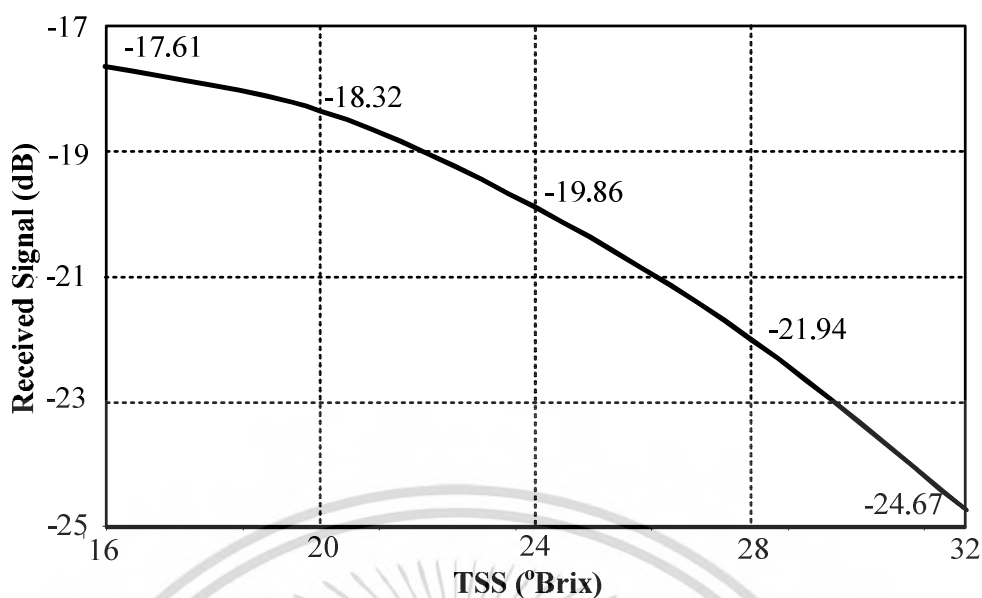
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 หน่วยประมวลผล และหน้าจอแสดงผล

5.4 ผลการทดสอบระบบตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลด้วยเทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟและการอภิปรายผล

รูปที่ 5.5 เป็นผลการทดสอบระบบตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลด้วยเทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ เมื่อมีค่า TSS ตั้งแต่ 16 ถึง 32 องศาบริกซ์ด้วยมอดูลระบบทดสอบที่ได้สร้างขึ้น โดยผลการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยของการวัดซ้ำจำนวน 3 ครั้ง จากผลการทดสอบในรูปที่ 5.5 พบว่า ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้จากการส่งผ่านสารละลายน้ำตาล มีค่าลดลงเมื่อค่า TSS ของสารละลายน้ำตาลมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองแบบและการวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย นั่นคือ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์มีค่าเพิ่มขึ้น จึงมีผลทำให้ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้จากการส่งผ่านสารละลายน้ำตาลมีค่าลดลง โดยขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้มีค่าอยู่ในช่วง R24.67 ถึง R17.61 dB



รูปที่ 5.5 ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า TSS

5.5 สรุป

ในบทนี้ นำเสนอโมดูลระบบตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลด้วยเทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ โดยวัดคลื่นไมโครเวฟที่ส่งผ่านสารละลายน้ำตาลด้วยสายอากาศส่งและสายอากาศรับ โมดูลประกอบด้วย ตัวกำเนิดสัญญาณที่ทางด้านส่ง และ วงจรตรวจจับสัญญาณที่ทางด้านรับ และมีหน่วยประมวลผลซึ่งใช้ควบคุมกระบวนการวัด ผลการทดสอบแสดงค่าขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้ที่แตกต่างกันสำหรับสารละลายน้ำตาลที่มีค่า TSS แตกต่างกัน โดยเมื่อค่า TSS มีค่าเพิ่มขึ้น ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้มีค่าลดลง ตามค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการวัดโดยใช้โมดูลนี้มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับผลที่ได้จากการวัดโดยเครื่องวิเคราะห์ & โคร่งข่าย จึงสามารถนำไปใช้งานนอกสถานที่ได้

บทที่ 6

บทสรุปและวิจารณ์

6.1 บทสรุปและวิจารณ์

จากความต้องการระบบทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น การตรวจสอบความสุกของผลไม้ โดยวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่มีอยู่ในผลไม้ตามช่วงเวลาต่าง ๆ โดยต้องการเครื่องมือที่ใช้งานง่ายและมีความซับซ้อนน้อย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้เสนอ การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งพบว่า ขนาดของสัญญาณไมโครเวฟที่ได้รับจากการส่งผ่านสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันนั้น มีความแตกต่างกัน จึงสามารถใช้เทคนิคการส่งผ่านนี้ ตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลได้ โดยก่อนนำเสนอเทคนิคการทดสอบดังกล่าว จำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาลที่ความถี่และค่า TSS ที่แตกต่างกัน จากนั้น จำลองแบบการส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสารละลายน้ำตาลด้วยโปรแกรมแมทแล็บไฟฟ้าเพื่อศึกษาปัจจัยและสภาพที่เหมาะสมในการทดสอบ และทดสอบการส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นค่าต่าง ๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย และในขั้นตอนสุดท้าย ได้สร้างมอดูลระบบตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลด้วยเทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งจำลองการทำงานของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดยมีรายละเอียดผลการทดสอบที่ได้ในแต่ละบทดังนี้

บทที่ 3 ได้ผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นค่าต่าง ๆ ด้วยเทคนิคโพรมบแบบแกนรวมปลายเปิด ซึ่งจากผลการทดสอบ พบว่า สารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน ซึ่งคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำตาลที่แตกต่างกันนี้ จะทำให้ขนาดคลื่นไมโครเวฟที่ได้รับจากการส่งผ่านสารละลายน้ำตาลมีความแตกต่างกันด้วย จึงสามารถนำมาใช้เป็นหลักการสำหรับการตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลได้ต่อไป

บทที่ 4 ได้จำลองแบบเทคนิคการส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสารละลายน้ำตาลโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บไฟฟ้า ซึ่งพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าระดับสัญญาณไมโครเวฟที่ได้รับนั้น ประกอบด้วย ระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและรับ ความสูงของสารละลายน้ำตาล มุมของสายอากาศส่ง ความถี่ของสายอากาศ และ ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล โดยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลมีค่าเพิ่มขึ้น ขนาดของสัญญาณไมโครเวฟที่ได้รับมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองแบบกับผลที่ได้จากการวัดโดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย พบว่า มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี จึงสรุปได้ว่า สามารถใช้เทคนิคการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลได้

บทที่ 5 ได้สร้างมอดูลระบบตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลด้วยเทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ เพื่อใช้ในการตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล ผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคาขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้แตกต่างกันสำหรับสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา

จากผลการทดสอบซึ่งพบว่า ขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่รับได้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามระดับความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล และสามารถใช้เทคนิคการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลได้ ดังนั้น จึงควรวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบตรวจสอบต่อไป เพื่อให้การใช้งานมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

ท

- [1] ท.ท Tongleam, ท.น.ท Jittiwangkul, ท.ป.ท Kumhom, ท. and ท.ค.ท Chamnongthai, ท “Non-destructive grading of mangosteen by using microwave moisture sensing,” *Inter. Symp. on Commun. and Infor. Tech.*, vol. 2, pp. 650-653, 2004. ท
- [2] ท. Z. ท. Abbas, ท. R. ท. Mokhtar, ท. K. ท. Khalid, ท. M. ท. Hashim, ท. and ท. S. A. ท. Aziz, ท “RDWG technique of determination of moisture content in oil palm fruits,” *The European Physical Journal Applied Physics*, vol. 40(2), pp. 207-210, 2007. ท
- [3] ท. A. ท. Ali, ท. Z. ท. Abbas, ท. B. ท. Hassan, ท. A. B. ท. Usuh, ท. and ท. R. B. ท. M. ท. Zahari, ท “Microwave antenna sensing technique for determination of moisture content in Hevea Latex from Hevea Brasiliensis tree,” *Australian Journal of Crop Science*, vol. 15(11), pp. 1326-1332, 2011. ท ท
- [4] ท. จิรัฏฐา? ท. เหมือนชู. ท. “การหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิคไมโครเวฟและการประยุกต์?” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิตก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552. ท*
- [5] ท. T. ท. Limpiti “Switchable Antennas and Their Application in Dielectric Properties Determination” *D.Eng. Thesis of King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang. 2013. ท*
- [6] S. ท. O. ท. Nelson, ท “Frequency- and temperature-dependent permittivities of fresh fruits and vegetables from 0.01 to 1.8 GHz,” *Transaction of the Asae*, vol. 46, no. 12, pp. 567-574, (March) April 2003. ท
- [7] W. ท. Guo, ท. S. ท. O. ท. Nelson, ท. S. ท. Trabelsi, ท. and ท. S. ท. Kays, ท “Dielectric properties of honeydew melons and correlation with quality,” *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, vol. 41, no. 12, pp. 48-58, 2007. ท
- [8] S. ท. O. ท. Nelson ท. and ท. S. ท. Trabelsi, ท “Dielectric spectroscopy measurements on fruit, meat, and grain,” *Transactions of the Asae*, vol. 51, no. 5, pp. 1829-1834, (September) October 2008. ท
- [9] T. ท. Sun, ท. K. ท. Huang, ท. H. ท. Xu, ท. and ท. Y. ท. Ying, ท “Research advances in nondestructive determination of internal quality in watermelon/melon: A review,” *Journal of Food Engineering*, vol. 100, no. 4, pp. 569-577, October 2010. ท
- [10] W. ท. Guo, ท. K. ท. Zhu, ท. S. ท. O. ท. Nelson, ท. R. ท. Yue, ท. H. ท. Liu, ท. and ท. Y. ท. Liu, ท “Maturity effects on dielectric properties of apples from 10 to 4500 MHz,” *LWT Food Science and Technology*, vol. 44, no. 1, pp. 224-230, January 2011. ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] R. Wijay, R. Jain, and K. S. Sharma, "Dielectric spectroscopy of grape juice at microwave frequencies," *International Agrophysics*, vol. 29, no. 12, pp. 239-246, April 2015.
- [12] Y. Jin, N. Yang, Q. Ma, F. Wu, K. Xu, and Q. Tong, "The salt and soluble solid content evaluation of pickled cucumbers based on inductive methodology," *Food and Bioprocess Technology*, vol. 18, no. 14, pp. 749-757, April 2015.
- [13] W. Guo, L. Fang, D. Liu, and Z. Wang, "Determination of soluble solids content and firmness of pears during ripening by using dielectric spectroscopy," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 117, pp. 226-233, September 2015.
- [14] W. Guo, L. Shang, X. Zhu, and S. O. Nelson, "Nondestructive detection of soluble solids content of apples from dielectric spectra with ANN and chemometric methods," *Food and Bioprocess Technology*, vol. 18, no. 15, pp. 1126-1138, May 2015.
- [15] M. A. Lewis, S. Trabelsi, and S. O. Nelson, "Measurement software to facilitate free-space permittivity measurements on agricultural products," *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 31, no. 4, pp. 545-552, July 2015.
- [16] T. N. Tulasidas, G. S. P. Raghavan, F. Van de Woort, and R. Girard, "Dielectric properties of grapes and sugar solution at 2.45 GHz," *IEEE Transactions on Microwave and Antennas Propagation*, vol. 43, no. 2, pp. 117-123, 1995.
- [17] K. Liao, G. S. P. Raghavan, P. Dai, and W. A. Waylaynb, "Dielectric properties of α -D-glucose aqueous solutions at 2450 MHz," *Food Research International*, vol. 36, pp. 485-490, 2003.
- [18] W. Guo, K. Zhu, F. Liu, and H. Zhuang, "Sugar and water contents of honey with dielectric property sensing," *Journal of Food Engineering*, vol. 107(2), pp. 275-281, 2009.
- [19] M. M. Msa, "Sugar content in watermelon juice based on dielectric properties at 10.45 GHz," *Proceeding of 2009 IEEE Student Conference on Research and Development*, pp. 529-532, UPM Serdang, Malaysia, November 16-18, 2009.
- [20] M. A. Rao, S. S. H. Rizvi, and A. K. Datta, *Engineering Properties of Foods*. New York: Taylor & Francis Group, 2005.
- [21] F. T. Ulaby, E. Michielssen, and U. Ravaioli, *Fundamental of Applied Electromagnetics*. New Jersey: Pearson Education, Inc, 2010.

- [22] Basics of measuring the dielectric properties of materials, Application note, Agilent Technologies.
- [23] A. F. Hippel, Dielectric materials and applications. The technology press of MIT and John Wiley & Sons, New York, 1954.
- [24] S. O. Nelson, "Fundamentals of dielectric properties measurements and agricultural applications," Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, vol. 14, pp. 8)113, 2010.
- [25] M. V. Venkatesh and G. V. P. Raghavan, "An overview of dielectric properties measuring techniques," Can. Biosyst. Eng., vol. 17, pp. 7.15)7.30, 2005.
- [26] W. H. Hayt and A. A. Buck, Engineering Electromagnetics. Singapore: McGraw Hill, 2006.
- [27] R. Ludwig and P. Bretchko, RF Circuit Design. New Jersey: Prentice Hall, 2000.
- [28] R. Kanahna, P. Keowsawat, S. Promwong, and C. Phongcharoenpanich, "Dielectric properties of Palmyrah Palm juice at microwave frequencies," 2014 Asia Pacific Microwave Conference, November 2014.

ท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Evaluation Board for Fractional-N/Integer-N PLL Frequency Synthesizer

FEATURES

Self-contained board including PLL, VCO, loop filter (20 kHz), 10 MHz TCXO reference, USB interface, and voltage regulators

Accompanying software allows control of synthesizer functions from a PC

Choice of power supply via USB or external feeding

Typical phase noise performance of -99 dBc/Hz @ 1 kHz offset from carrier (1 GHz output frequency)

GENERAL DESCRIPTION

The EVAL-ADF4350EB2Z is designed to evaluate the performance of the ADF4350 frequency synthesizer. A block diagram of the board is shown in Figure 1. It contains

the ADF4350 synthesizer, a USB connector and related interface, a 10 MHz TCXO reference source, SMA connectors for the RF outputs, and reference signal plus headers for various signals and voltages. There is also a loop filter (20 kHz) on board. A USB cable is included with the board to connect to a PC USB port.

The package also contains Windows® software (2000- and XP-compatible) to allow easy programming of the synthesizer.

EVALUATION KIT CONTENTS

Evaluation board software CD

USB cable

EVAL-ADF4350EB2Z

EVALUATION BOARD BLOCK DIAGRAM

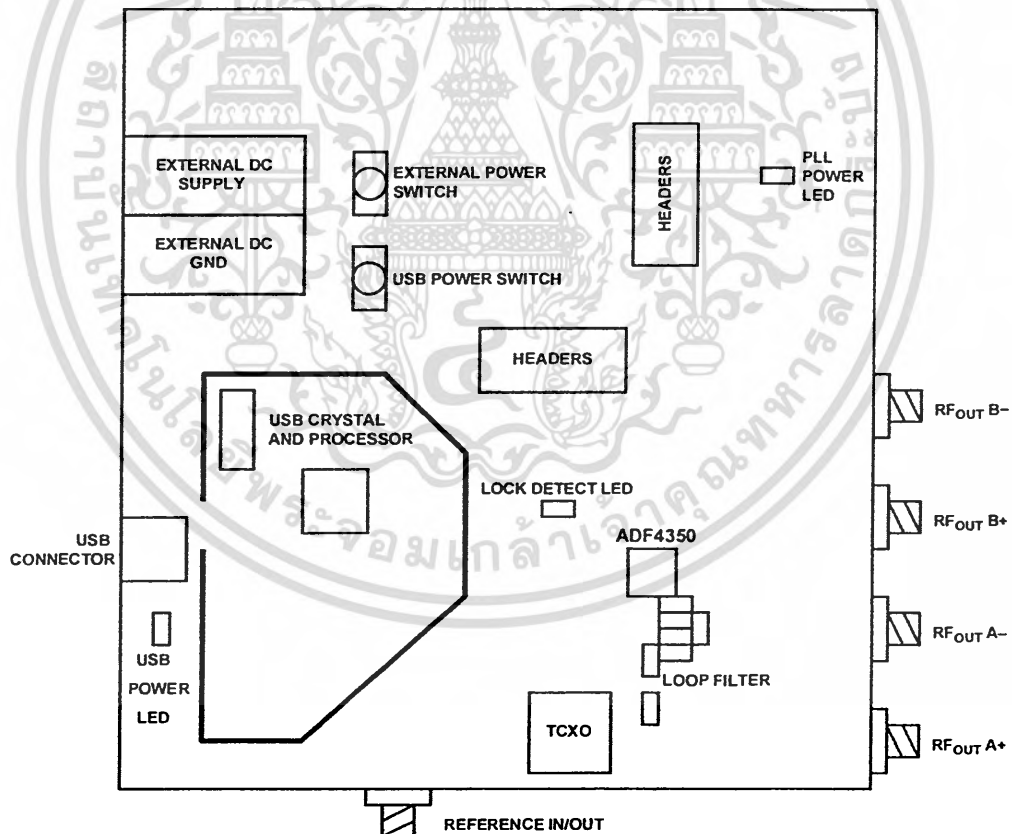


Figure 1.

EVALUATION BOARD HARDWARE

OVERVIEW

The EVAL-ADF4350EB2Z comes with a cable for connecting to the USB port of a PC. The silk screen for the evaluation board is shown in Figure 8. The board schematic is shown in Figure 5, Figure 6, and Figure 7.

POWER SUPPLIES

The EVAL-ADF4350EB2Z can be powered either from the USB port or via dc power connectors (4 mm banana connectors). When feeding via banana connectors, 3.75 V to 11 V is a suitable feeding voltage. The power supply circuitry allows the user to use one, two, or three separate LDOs to feed the ADF4350 (using fewer LDOs increases the risk of spur contaminated dc feeds). Consult the board schematic in Figure 5, Figure 6, and Figure 7 to determine a suitable jumper setting on Header J7.

An LED, D6, indicates when USB power is available, and another LED, D5, indicates when the ADF4350 is powered. Switch SW1 is used to power the ADF4350 from the USB port and Switch SW2 is used to power the part from the external dc connectors.

In case the USB processor or clock causes spurs on the RF output signal, the user may feed the evaluation board via the dc connectors and unplug the USB cable, thereby removing power from the USB interface circuitry. There is also a grounded frame surrounding the USB interface circuitry to allow mounting of a shielding box.

The J8 to J13 connectors can be populated if the user wishes to measure any spectral contamination on a specific dc voltage. Otherwise, the voltages are also present on either Header J6 or Header J7 for easy access and measurements.

RF OUTPUT

The EVAL-ADF4350EB2Z has four SMA output connectors (dual differential output). The device is quite sensitive to impedance unbalance. If only one port of a differential pair is used, terminate the other with a 50 Ω load.

LOOP FILTER

The loop filter schematic is included in the board schematic on Figure 5. The loop filter component placements are clarified in Figure 2.

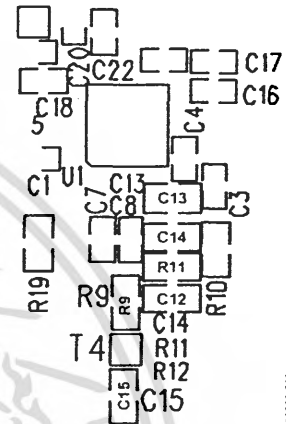


Figure 2: Loop Filter Placement

REFERENCE SOURCE

The 10 MHz TCXO from Fox Electronics provides the necessary reference signal. An external REFIN may be used if desired. In this case, disable the on-board TCXO by removing R1 and R2. R3 can be populated with 50 Ω to adjust impedance matching of the evaluation board to the external reference source.

EVALUATION SETUP

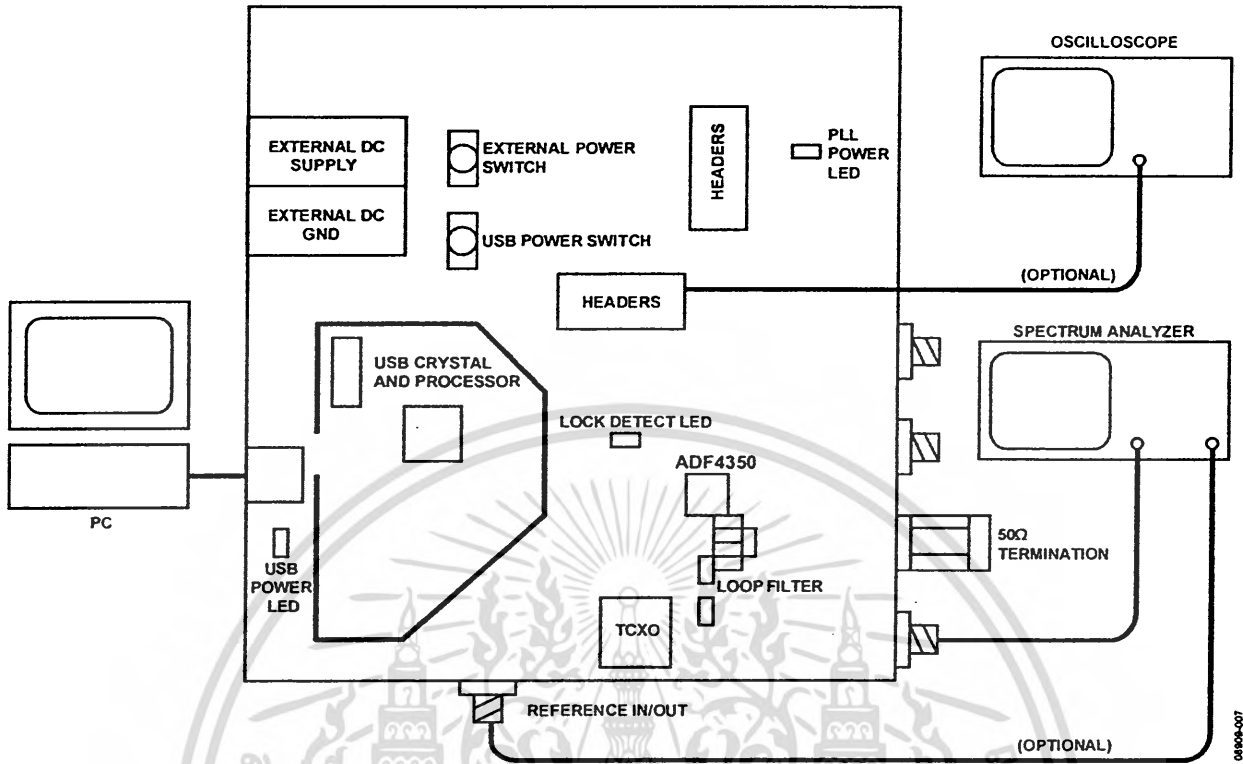


Figure 3. Evaluation Setup

50MHz to 3GHz RF Power Detector with 60dB Dynamic Range

FEATURES

- RF Frequency Range: 50MHz to 3GHz
- Linear Dynamic Range: 60dB
- Exceptional Accuracy over Temperature and Power Supply
- Fast Transient Response:
38ns Full-Scale Settling Time
- Single 2.7V to 5.25V Supply
- Low Supply Current: 7mA
- Shutdown Current: 0.1µA
- Tiny 6-Lead SC70 Package

APPLICATIONS

- RF RSSI and ACC
- RF Power Control
- CATV Power Detection
- Optical Receiver Gain Control

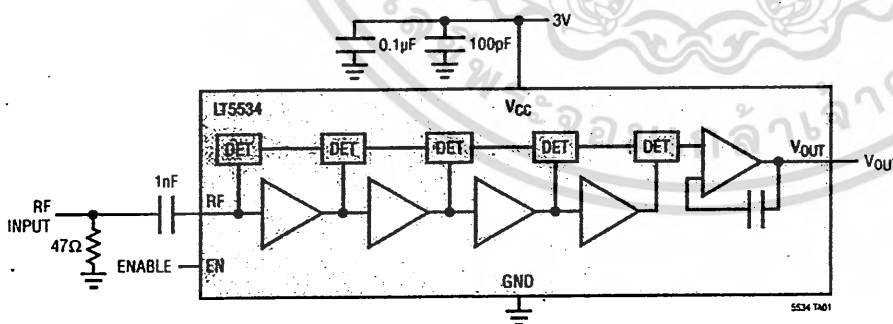
DESCRIPTION

The LT®5534 is a 50MHz to 3GHz monolithic RF power detector capable of measuring RF signals over a 60dB dynamic range. The RF signal in a decibel scale is precisely converted into DC voltage on a linear scale. The 60dB input dynamic range is achieved using cascaded RF detectors and RF limiters. Their outputs are summed to generate an accurate log-linear DC voltage proportional to the input RF signal in dB. The output is buffered with a low output impedance driver. The LT5534 delivers superior temperature stability (typical output variation within ±1dB over the full temperature range). The output responds in less than 40ns to a large RF input signal.

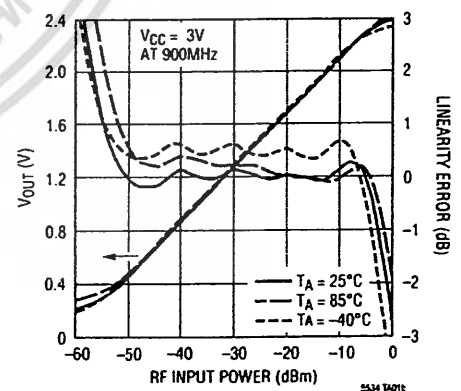
LT, LT, LTC, LTM, Linear Technology and the Linear logo are registered trademarks of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.

TYPICAL APPLICATION

50MHz to 3GHz RF Power Detector



Output Voltage vs RF Input Power



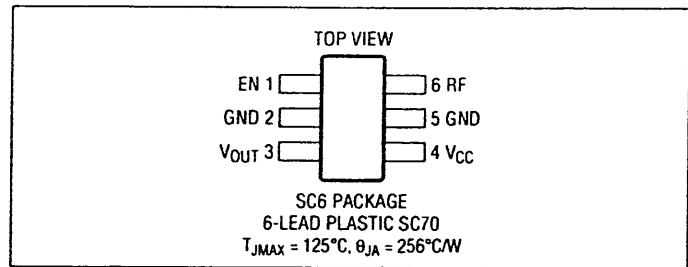
5534fc

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

(Note 1)

Power Supply Voltage	5.5V
Enable Voltage	0V, V _{CC}
RF Voltage (+10dBm Equivalent)	±1V
Operating Ambient Temperature Range ...	-40°C to 85°C
Storage Temperature Range	-65°C to 125°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	300°C

PIN CONFIGURATION



ORDER INFORMATION

LEAD FREE FINISH	TAPE AND REEL	PART MARKING*	PACKAGE DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE
LT5534ESC6#PBF	LT5534ESC6#TRPBF	LBGD	6-Lead Plastic SC70	-40°C to 85°C

Consult LTC Marketing for parts specified with wider operating temperature ranges.

Consult LTC Marketing for information on non-standard lead based finish parts.

For more information on lead free part marking, go to: <http://www.linear.com/leadfree/>

For more information on tape and reel specifications, go to: <http://www.linear.com/tapeandreeel/>

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

V_{CC} = 3V, EN = 3V, T_A = 25°C, source impedance = 50Ω, unless otherwise noted. Test circuit shown in Figure 1. (Note 2)

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
RF Input					
Frequency Range			50 to 3000		MHz
Input Impedance			2		kΩ
f_{RF} = 50MHz					
RF Input Power Range			-58 to +2		dBm
Dynamic Range (Note 3)	±3dB Linearity Error, T _A = -40°C to 85°C		60		dB
Output Slope			44		mV/dB
Output Variation vs Temperature	P _{IN} = -48dBm to -14dBm, T _A = -40°C to 85°C		0.007		dB/°C
f_{RF} = 900MHz					
RF Input Power Range			-60 to 0		dBm
Dynamic Range (Note 3)	±3dB Linearity Error, T _A = -40°C to 85°C		60		dB
Output Slope			41		mV/dB
Output Variation vs Temperature	P _{IN} = -48dBm to -14dBm, T _A = -40°C to 85°C		0.008		dB/°C
f_{RF} = 1900MHz					
RF Input Power Range			-63 to -2		dBm
Dynamic Range (Note 3)	±3dB Linearity Error, T _A = -40°C to 85°C		61		dB
Output Slope		31	36.6	43	mV/dB
Output Variation vs Temperature	P _{IN} = -48dBm to -14dBm, T _A = -40°C to 85°C		0.012		dB/°C
Output Intercept	50Ω External Termination, T _A = -40°C to 85°C	-70	-64	-58	dBm
f_{RF} = 2500MHz					
RF Input Power Range			-63 to -3		dBm
Dynamic Range (Note 3)	±3dB Linearity Error, T _A = -40°C to 85°C		60		dB

5534fc

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$V_{CC} = 3V$, $EN = 3V$, $T_A = 25^\circ C$, source impedance = 50Ω , unless otherwise noted. Test circuit shown in Figure 1. (Note 2)

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Output Slope			35		mV/dB
Output Variation vs Temperature	$P_{IN} = -48dBm$ to $-14dBm$, $T_A = -40^\circ C$ to $85^\circ C$		0.025		dB/ $^\circ C$
Output Interface					
Output DC Voltage	No RF Input Signal	0	142	380	mV
Output Impedance			32		Ω
Output Bandwidth			30		MHz
Full-Scale Setting Time	Input from No Signal to $-2dBm$, to 90%		38		ns
Sinking/Sourcing			10/200		mA/ μA

$V_{CC} = 3V$, $EN = 3V$, $T_A = 25^\circ C$, unless otherwise noted. Test circuit shown in Figure 1. (Note 2)

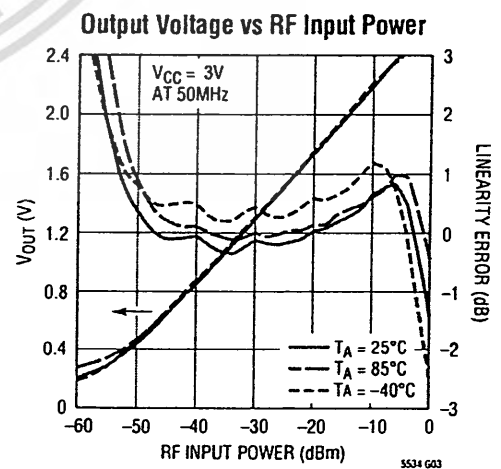
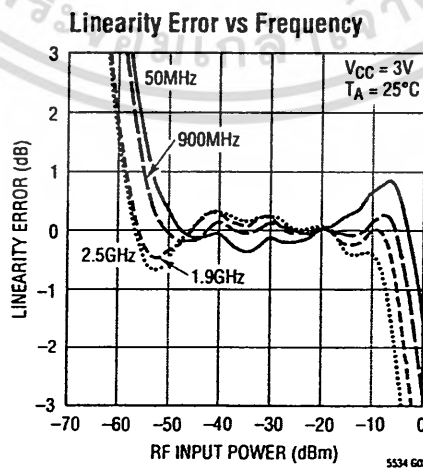
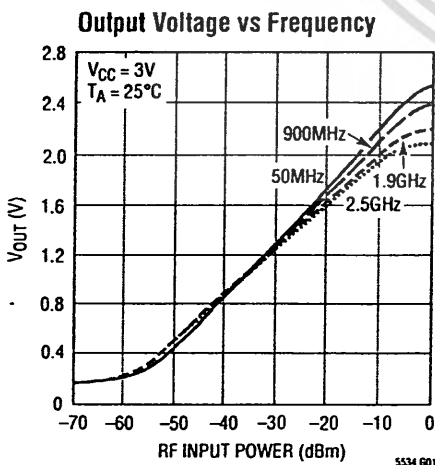
PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Power Up/Down					
Turn-On Time			200		ns
Turn-Off Time			800		ns
EN = High (On)		0.9			V
EN = Low (Off)				0.6	V
Power Supply					
Supply Voltage		2.7		5.25	V
Supply Current	EN = High	5	7	9	mA
Shutdown Current	EN = Low		0.1	10	μA

Note 1: Stresses beyond those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. Exposure to any Absolute Maximum Rating condition for extended periods may affect device reliability and lifetime.

Note 2: Specifications over the $-40^\circ C$ to $85^\circ C$ temperature range are assured by design, characterization and correlation with statistical process control.

Note 3: The linearity error is calculated by the difference between the incremental slope of the output and the average output slope from $-48dBm$ to $-14dBm$. The dynamic range is defined as the range over which the linearity error is within $\pm 3dB$.

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS (Test circuit shown in Figure 1)

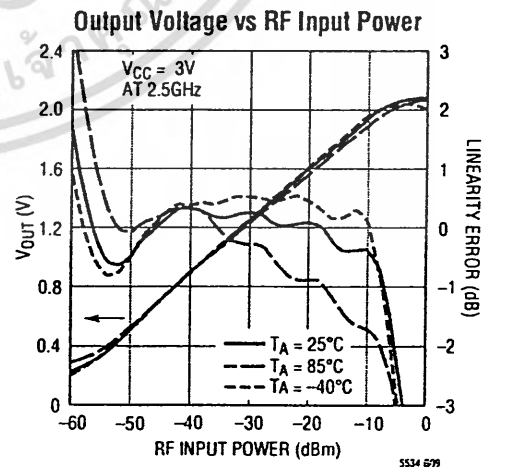
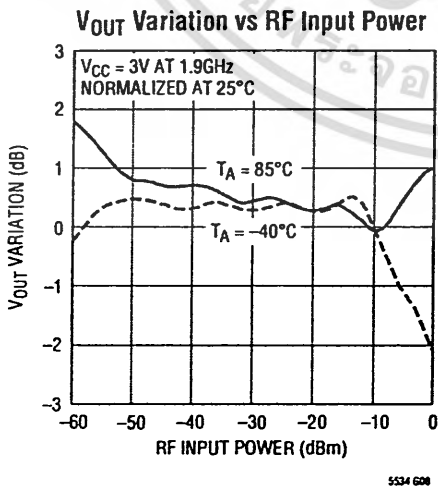
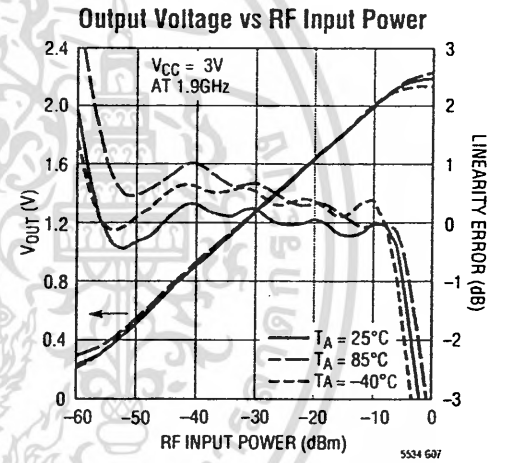
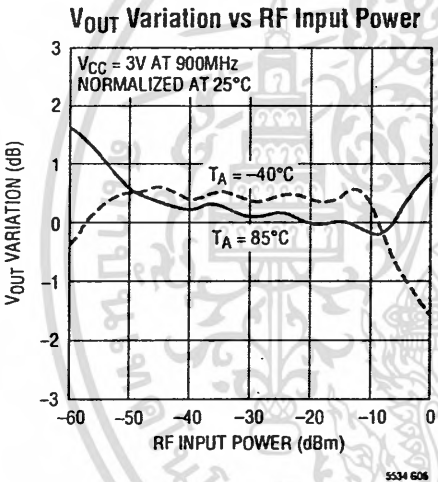
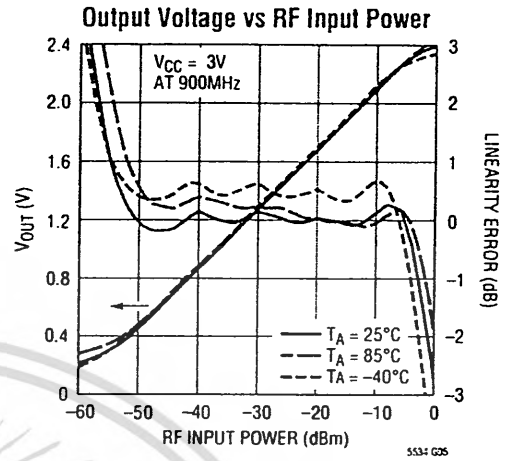
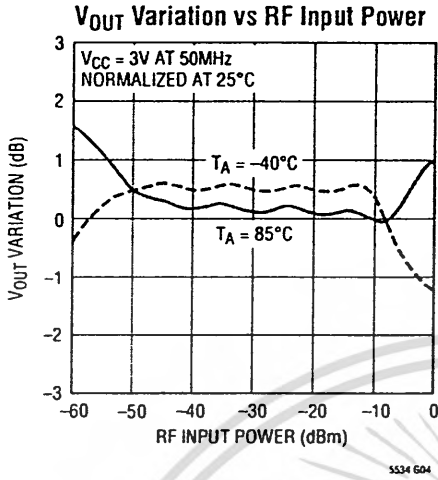


5534fc



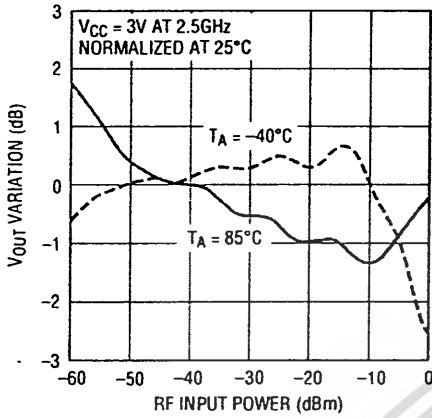
เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS (Test circuit shown in Figure 1)



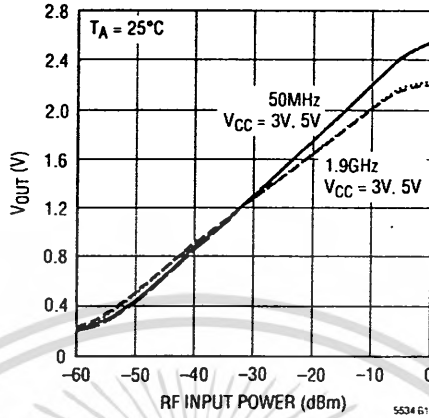
TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS (Test circuit shown in Figure 1)

V_{OUT} Variation vs RF Input Power



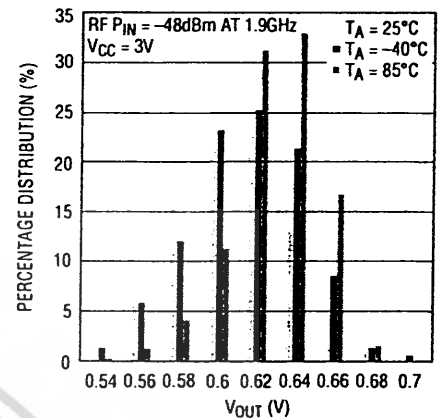
5534 G10

Output Voltage vs RF Input Power at V_{CC} = 3V and 5V



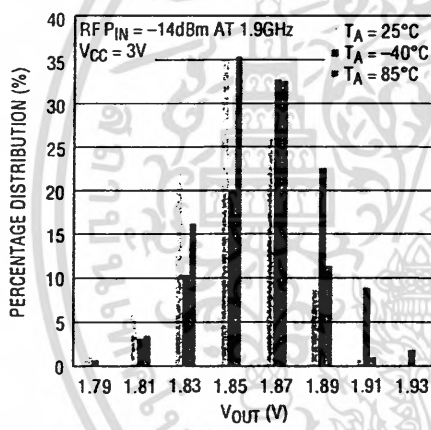
5534 G11

Output Voltage Distribution vs Temperature



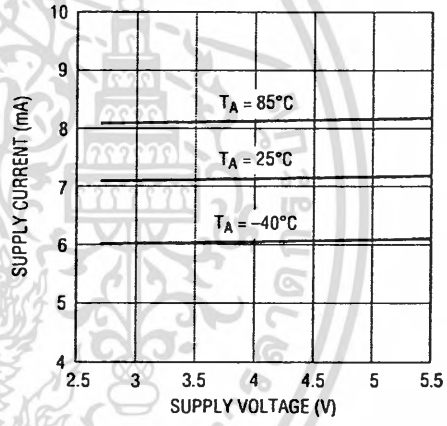
5534 G12

Output Voltage Distribution vs Temperature



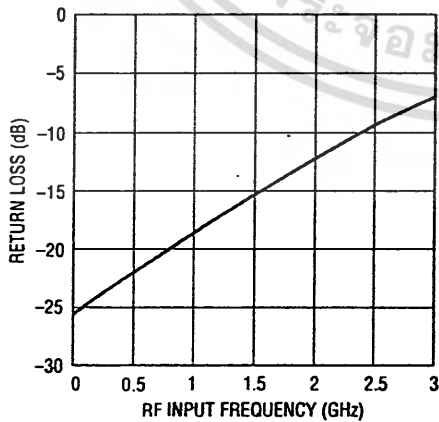
5534 G13

Supply Voltage vs Supply Current



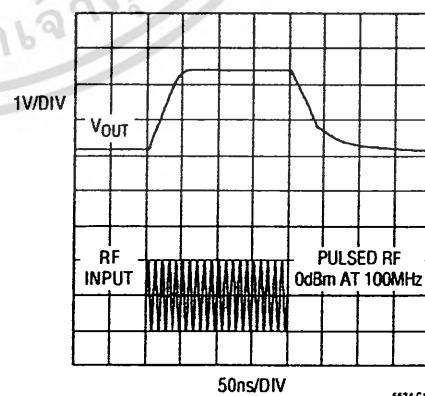
5530 G14

RF Input Return Loss vs Frequency



5534 G15

Output Transient Response



5534 G16

PIN FUNCTIONS

EN (Pin 1): Enable. When the input voltage is higher than 0.9V, the circuit is completely turned on. When the input voltage is less than 0.6V, the circuit is turned off.

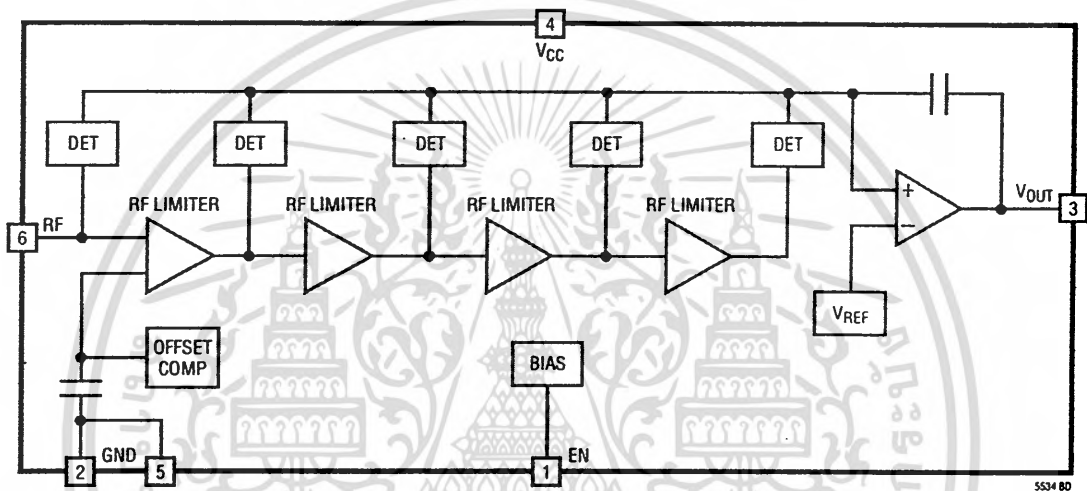
GND (Pins 2, 5): Ground.

V_{OUT} (Pin 3): RF Detector Output.

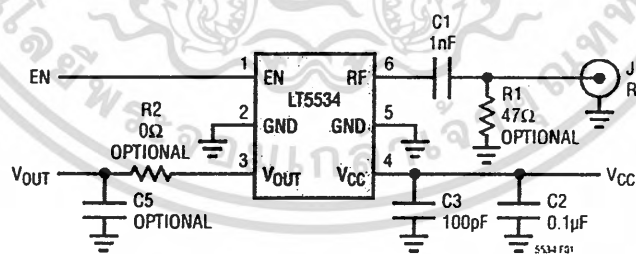
V_{CC} (Pin 4): Power Supply. This pin should be decoupled using 100pF and 0.1μF capacitors.

RF (Pin 6): RF Input. This pin is internally biased to V_{CC} - 0.18V. A coupling capacitor must be used to connect to the RF signal source.

BLOCK DIAGRAM



TEST CIRCUIT



REF DES	VALUE	SIZE	PART NUMBER
C1	1nF	0402	AVX 04025C102JAT2A
C2	0.1μF	0603	TAIYO YUDEN TMK107BJ104KA
C3	100pF	0603	AVX 06035C101KAT2A
C5		0603	OPTIONAL
R1	47Ω	0402	OPTIONAL
R2	0Ω	0603	OPTIONAL

Figure 1. Evaluation Circuit Schematic

TEST CIRCUIT

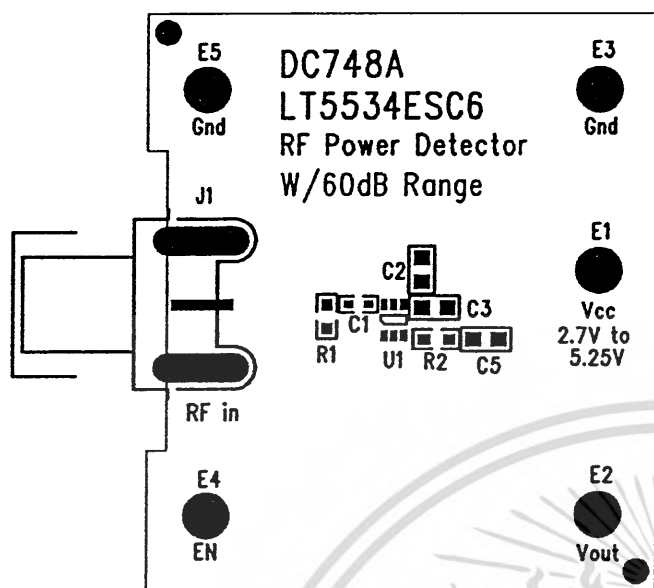


Figure 2. Component Side Silkscreen of Evaluation Board

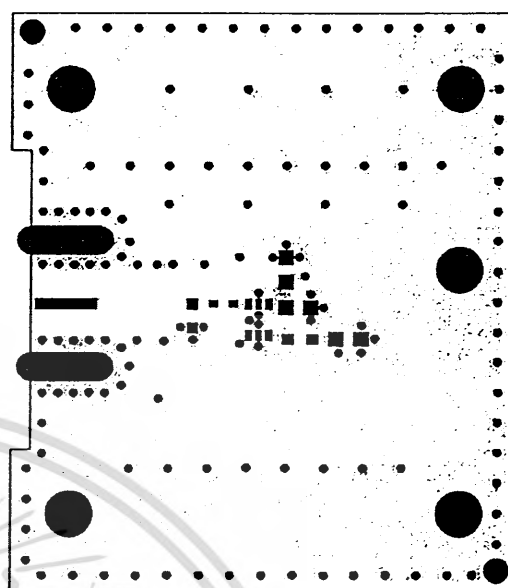


Figure 3. Component Side Layout of Evaluation Board

APPLICATIONS INFORMATION

The LT5534 is a logarithmic-based detector, capable of measuring an RF signal over the frequency range from 50MHz to 3GHz. The 60dB linear dynamic range is achieved with very stable output over the full temperature range from -40°C to 85°C . The absolute variation over temperature is typically within $\pm 1\text{dB}$ over a 47dB dynamic range at 1.9GHz.

RF Input Port

The RF port is internally biased at $V_{CC}-0.18\text{V}$. The pin should be DC blocked when connected to ground or other matching components. A 47Ω resistor (R1) connected to ground will provide better than 10dB input return loss up to 2.5GHz. An additional 2nH inductance in series with R1 will provide improved input matching up to 3GHz. The impedance vs frequency of the RF input is detailed in Table 1.

The approximate linear RF input power range of the LT5534 is from -62dBm to -2dBm with a 50Ω source impedance. However, this range can be adjusted either upward or

Table 1. RF Input Impedance

FREQUENCY (MHz)	INPUT IMPEDANCE (Ω)	S11	
		MAG	ANGLE (DEG)
50	1429-j429	0.938	-1.1
100	947-j710	0.934	-2.9
200	509-j609	0.922	-5.6
400	250-j440	0.908	-9.9
600	149-j344	0.900	-14.1
800	96.8-j278	0.896	-18.3
1000	67.6-j229	0.893	-22.7
1200	49.7-j193	0.889	-27.3
1400	38.4-j165	0.883	-32.3
1600	30.8-j143	0.879	-37.3
1800	25.4-j125	0.873	-42.6
2000	21.4-j109	0.866	-48.0
2200	18.5-j96.2	0.862	-53.6
2400	16.6-j85.0	0.848	-59.6
2600	15.2-j75.7	0.834	-65.6
2800	13.7-j67.5	0.826	-71.8
3000	12.1-j60.1	0.822	-78.2

5534fc



Features

- High performance, low power Atmel® AVR® 8-bit microcontroller
- Advanced RISC architecture
 - 131 powerful instructions – most single clock cycle execution
 - 32 × 8 general purpose working registers
 - Fully static operation
 - Up to 20 MIPS throughput at 20MHz
 - On-chip 2-cycle multiplier
- High endurance non-volatile memory segments
 - 4/8/16 Kbytes of in-system self-programmable flash program memory
 - 256/512/1K bytes EEPROM
 - 512/1K/1Kbytes internal SRAM
 - Write/erase cycles: 10,000 flash/100,000 EEPROM
 - Data retention: 20 years at 85°C/100 years at 25°C⁽¹⁾
 - Optional boot code section with independent lock bits
 - In-system programming by on-chip boot program
 - True read-while-write operation
 - Programming lock for software security
- QTouch® library support
 - Capacitive touch buttons, sliders and wheels
 - QTouch and QMatrix acquisition
 - Up to 64 sense channels
- Peripheral features
 - Two 8-bit timer/counters with separate prescaler and compare mode
 - One 16-bit timer/counter with separate prescaler, compare mode, and capture mode
 - Real time counter with separate oscillator
 - Six PWM channels
 - 8-channel 10-bit ADC in TQFP and QFN/MLF package
 - 6-channel 10-bit ADC in PDIP Package
 - Programmable serial USART
 - Master/slave SPI serial interface
 - Byte-oriented 2-wire serial interface (Philips I²C compatible)
 - Programmable watchdog timer with separate on-chip oscillator
 - On-chip analog comparator
 - Interrupt and wake-up on pin change
- Special microcontroller features
 - DebugWIRE on-chip debug system
 - Power-on reset and programmable brown-out detection
 - Internal calibrated oscillator
 - External and internal interrupt sources
 - Five sleep modes: Idle, ADC noise reduction, power-save, power-down, and standby
- I/O and packages
 - 23 programmable I/O lines
 - 28-pin PDIP, 32-lead TQFP, 28-pad QFN/MLF and 32-pad QFN/MLF
- Operating voltage:
 - 1.8V - 5.5V for Atmel ATmega48V/88V/168V
 - 2.7V - 5.5V for Atmel ATmega48/88/168
- Temperature range:
 - -40°C to 85°C
- Speed grade:
 - ATmega48V/88V/168V: 0 - 4MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 10MHz @ 2.7V - 5.5V
 - ATmega48/88/168: 0 - 10MHz @ 2.7V - 5.5V, 0 - 20MHz @ 4.5V - 5.5V
- Low power consumption
 - Active mode:
 - 250µA at 1MHz, 1.8V
 - 15µA at 32kHz, 1.8V (including oscillator)
 - Power-down mode:
 - 0.1µA at 1.8V

Note: 1. See "Data retention" on page 8 for details.



**8-bit Atmel
Microcontroller
with 4/8/16K
Bytes In-System
Programmable
Flash**

**ATmega48V
ATmega88V
ATmega168V**

Summary

Rev. 2545US-AVR-11/2015



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 Pin descriptions

1.1.1 VCC

Digital supply voltage.

1.1.2 GND

Ground.

1.1.3 Port B (PB7:0) XTAL1/XTAL2/TOSC1/TOSC2

Port B is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port B output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port B pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port B pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Depending on the clock selection fuse settings, PB6 can be used as input to the inverting Oscillator amplifier and input to the internal clock operating circuit.

Depending on the clock selection fuse settings, PB7 can be used as output from the inverting Oscillator amplifier.

If the Internal Calibrated RC Oscillator is used as chip clock source, PB7..6 is used as TOSC2..1 input for the Asynchronous Timer/Counter2 if the AS2 bit in ASSR is set.

The various special features of Port B are elaborated in "Alternate functions of port B" on page 83 and "System clock and clock options" on page 27.

1.1.4 Port C (PC5:0)

Port C is a 7-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The PC5..0 output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port C pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port C pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

1.1.5 PC6/RESET

If the RSTDISBL Fuse is programmed, PC6 is used as an I/O pin. Note that the electrical characteristics of PC6 differ from those of the other pins of Port C.

If the RSTDISBL Fuse is unprogrammed, PC6 is used as a Reset input. A low level on this pin for longer than the minimum pulse length will generate a Reset, even if the clock is not running. The minimum pulse length is given in Table 29-3 on page 314. Shorter pulses are not guaranteed to generate a Reset.

The various special features of Port C are elaborated in "Alternate functions of port C" on page 86.

1.1.6 Port D (PD7:0)

Port D is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port D output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port D pins that are externally pulled low will source current if the pull-up

resistors are activated. The Port D pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

The various special features of Port D are elaborated in "Alternate functions of port D" on page 89.

1.1.7 AV_{CC}

AV_{CC} is the supply voltage pin for the A/D Converter, PC3:0, and ADC7:6. It should be externally connected to V_{CC}, even if the ADC is not used. If the ADC is used, it should be connected to V_{CC} through a low-pass filter. Note that PC6..4 use digital supply voltage, V_{CC}.

1.1.8 AREF

AREF is the analog reference pin for the A/D Converter.

1.1.9 ADC7:6 (TQFP and QFN/MLF package only)

In the TQFP and QFN/MLF package, ADC7:6 serve as analog inputs to the A/D converter. These pins are powered from the analog supply and serve as 10-bit ADC channels.

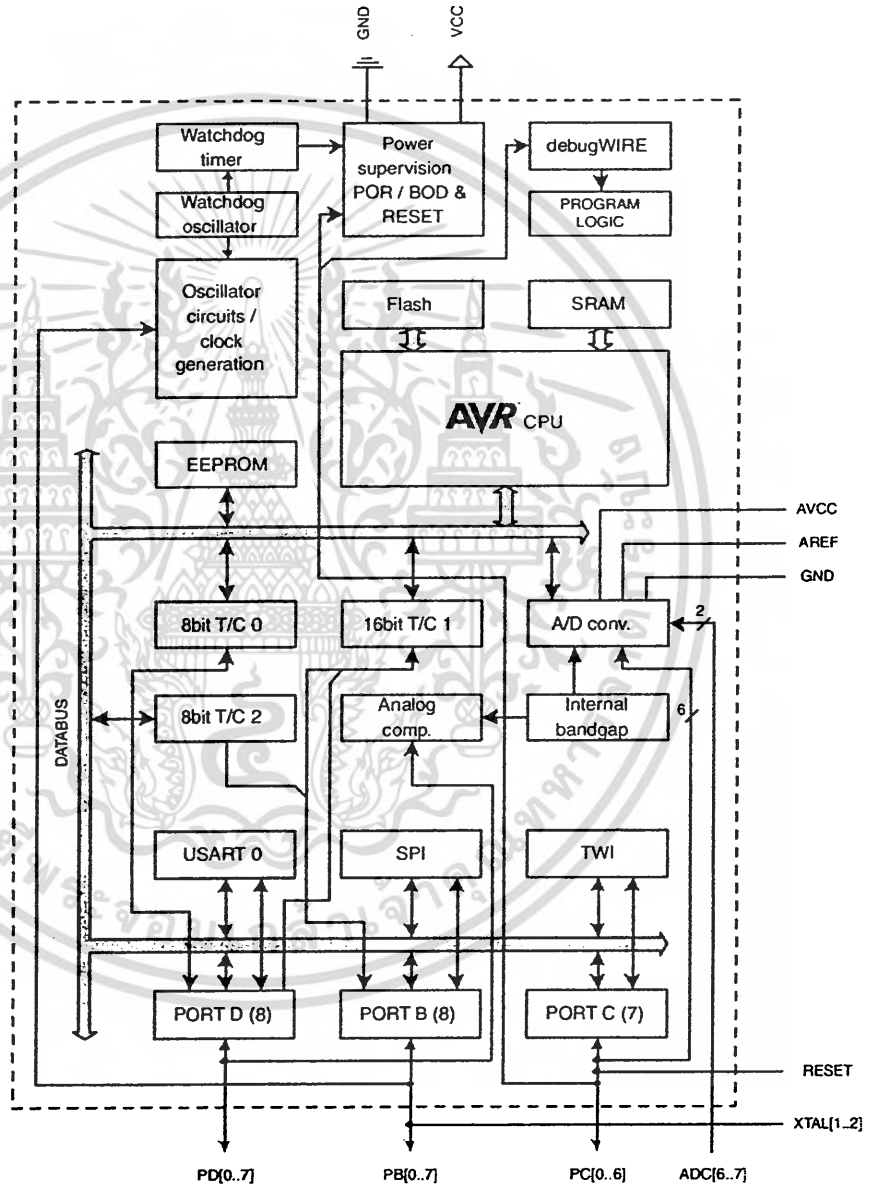


2. Overview

The Atmel ATmega48/88/168 is a low-power CMOS 8-bit microcontroller based on the AVR enhanced RISC architecture. By executing powerful instructions in a single clock cycle, the ATmega48/88/168 achieves throughputs approaching 1 MIPS per MHz allowing the system designer to optimize power consumption versus processing speed.

2.1 Block diagram

Figure 2-1. Block diagram.



The AVR core combines a rich instruction set with 32 general purpose working registers. All the 32 registers are directly connected to the Arithmetic Logic Unit (ALU), allowing two independent registers to be accessed in one single instruction executed in one clock cycle. The resulting



architecture is more code efficient while achieving throughputs up to ten times faster than conventional CISC microcontrollers.

The Atmel ATmega48/88/168 provides the following features: 4K/8K/16K bytes of In-System Programmable Flash with Read-While-Write capabilities, 256/512/512 bytes EEPROM, 512/1K/1K bytes SRAM, 23 general purpose I/O lines, 32 general purpose working registers, three flexible Timer/Counters with compare modes, internal and external interrupts, a serial programmable USART, a byte-oriented 2-wire Serial Interface, an SPI serial port, a 6-channel 10-bit ADC (8 channels in TQFP and QFN/MLF packages), a programmable Watchdog Timer with internal Oscillator, and five software selectable power saving modes. The Idle mode stops the CPU while allowing the SRAM, Timer/Counters, USART, 2-wire Serial Interface, SPI port, and interrupt system to continue functioning. The Power-down mode saves the register contents but freezes the Oscillator, disabling all other chip functions until the next interrupt or hardware reset. In Power-save mode, the asynchronous timer continues to run, allowing the user to maintain a timer base while the rest of the device is sleeping. The ADC Noise Reduction mode stops the CPU and all I/O modules except asynchronous timer and ADC, to minimize switching noise during ADC conversions. In Standby mode, the crystal/resonator Oscillator is running while the rest of the device is sleeping. This allows very fast start-up combined with low power consumption.

Atmel offers the QTouch Library for embedding capacitive touch buttons, sliders and wheels functionality into AVR microcontrollers. The patented charge-transfer signal acquisition offers robust sensing and includes fully debounced reporting of touch keys and includes Adjacent Key Suppression® (AKS®) technology for unambiguous detection of key events. The easy-to-use QTouch Suite toolchain allows you to explore, develop and debug your own touch applications.

The device is manufactured using the Atmel high density non-volatile memory technology. The On-chip ISP Flash allows the program memory to be reprogrammed In-System through an SPI serial interface, by a conventional non-volatile memory programmer, or by an On-chip Boot program running on the AVR core. The Boot program can use any interface to download the application program in the Application Flash memory. Software in the Boot Flash section will continue to run while the Application Flash section is updated, providing true Read-While-Write operation. By combining an 8-bit RISC CPU with In-System Self-Programmable Flash on a monolithic chip, the Atmel ATmega48/88/168 is a powerful microcontroller that provides a highly flexible and cost effective solution to many embedded control applications.

The ATmega48/88/168 AVR is supported with a full suite of program and system development tools including: C Compilers, Macro Assemblers, Program Debugger/Simulators, In-Circuit Emulators, and Evaluation kits.

2.2 Comparison between Atmel ATmega48, Atmel ATmega88, and Atmel ATmega168

The ATmega48, ATmega88 and ATmega168 differ only in memory sizes, boot loader support, and interrupt vector sizes. Table 2-1 summarizes the different memory and interrupt vector sizes for the three devices.

Table 2-1. Memory size summary.

Device	Flash	EEPROM	RAM	Interrupt vector size
ATmega48	4Kbytes	256Bytes	512Bytes	1 instruction word/vector
ATmega88	8Kbytes	512Bytes	1Kbytes	1 instruction word/vector
ATmega168	16Kbytes	512Bytes	1Kbytes	2 instruction words/vector

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายราเชน คณะนา
 วัน เดือน ปีเกิด 28 พฤษภาคม 2518 ที่เพชรบุรี
 ที่อยู่ 38/37 หมู่ 8 ถนนหาดเจ้าสำราญ ตำบลนาวิ่ง
 อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี 76000 โทร. 081-8589579
 ประวัติการศึกษา 2544 อดสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
 2550 ครุศาสตรอดสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

1. R. Kanahna, P. Keowsawat, J. Wiboonsirikul ,and S. Promwong, "Microwave and Chemical Properties of Ready-to-drink Palmyrah Plum Juice," in *Proc. of 2nd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, Chiang Mai, Thailand, Aug. 5-7, 2013, pp. 151-152.
2. R. Kanahna, P. Keowsawat, S. Promwong, and C.Phongcharoenpanich "Dielectric Properties of Palmyrah Palm Juice at Microwave Frequencies," in *Proc. of 2014 Asia-Pacific Microwave Conference*, Sendai, Japan, Nov. 4-7, 2014.
3. R. Kanahna, P. Keowsawat, S. Promwong, and C.Phongcharoenpanich "Identification of Pure and Impure Palmyrah Palm Juice by using Microwave Sensor System," *Advanced Science Letters*, vol.21, no.10, pp. 3088-3091.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้