เซนเซอร์วัดความชื้นที่ผิวจากการตรวจจับขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไดโพลที่วางขนานและตั้งฉากกัน

SURFACE MOISTURE CONTENT SENSOR DETECTING MUTUAL COUPLING MAGNITUDE BETWEEN PARALLEL AND PERPENDICULAR DIPOLE ANTENNAS

ฉัตรพล เหรียญทอง
CHATTAPON RIENTHONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-010-184

เซนเซอร์วัดความชื้นที่ผิวจากการตรวจจับขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไดโพลที่วางขนานและตั้งฉากกัน

SURFACE MOISTURE CONTENT SENSOR DETECTING MUTUAL COUPLING MAGNITUDE BETWEEN PARALLEL AND PERPENDICULAR DIPOLE ANTENNAS

ฉัตรพล เหรียญทอง

CHATTAPON RIENTHONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-xxx-xxx

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SURFACE MOISTURE CONTENT SENSOR DETECTING MUTUAL COUPLING MAGNITUDE BETWEEN PARALLEL AND PERPENDICULAR DIPOLE ANTENNAS

CHATTAPON RIENTHONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

KMITL-2016-EN-M-xxx-xxx

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เซนเซอร์วัดความชื้นที่ผิวจากการตรวจจับขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไดโพลที่วางขนานและตั้งฉากกัน

Thesis Title Surface Moisture Content Sensor Detecing Mutual Coupling Magnitude between Parallel and Perpendicular Dipole Antennas

นักศึกษา นายฉัตรพล เหรียญทอง

รหัสประจำตัว 56601425

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-010-184

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	
ผศ.ดร.สุทธิชัย	นพนาคีพงษ์	
ศ.ดร.ประยุทธ	อัครเอกฒาลิน	
รศ.ดร.ชูวงค์	พงศ์เจริญพาณิชย์	
ศ.ดร.โมไนย	ไกรฤกษ์	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 7 ตุลาคม พ.ศ. 2559 เวลา 09.00-11.00 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 7 ตุลาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เซนเซอร์วัดความชื้นที่ผิวจากการตรวจจับขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไดโพลที่วางขนานและตั้งฉากกัน
นักศึกษา	นาย ฉัตรพล เหรียญทอง
รหัสนักศึกษา	56601425
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศ. ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอเซนเซอร์วัดความชื้นที่ผิวจากการตรวจจับขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไดโพลที่วางขนานและตั้งฉากกัน ซึ่งเซนเซอร์จะสามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศตัวรับได้จากวงจรสวิตช์ ทำงานที่ความถี่ 245 MHz โดยวัดค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วมจากวัสดุที่เปลี่ยนไปตามความชื้น ในที่นี้คือดินที่มีความชื้นต่างๆซึ่งผลที่ได้สามารถนำมาสร้างกราฟเพื่อคาดคะเนค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจากผลต่างระหว่างการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศที่วางขนานและตั้งฉากกัน จากการทดลองแสดงให้เห็นผลที่มีความแม่นยำ และยังสามารถบอกความลึกได้ด้วยการทำงานที่ความถี่ 27 MHz โดยการตรวจจับขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไดโพลที่วางขนานกัน เมื่อเทียบกับการวัดค่าความชื้นจากอุปกรณ์แบบจุ่มลงในดินมีความสะดวกมากกว่า และมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเพียง 1.4% เมื่อตรวจจับขนาดของสัญญาณโดยอาศัยผลต่างระหว่างสายอากาศที่วางขนานและตั้งฉากกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Surface moisture content sensor detecting mutual coupling magnitude between parallel and perpendicular dipole antennas
Student	Mr. Chattapon Rienthong
Student ID.	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Prof. Dr. Monai Krairiksh

ABSTRACT

This research presents a surface moisture content sensor detecting mutual coupling magnitude between parallel and perpendicular dipole antennas. The sensor can change between parallel and perpendicular dipole antennas by using a switching circuit. The RF signal operated at 245 MHz by detecting mutual coupling magnitude when dielectric properties of lossy medium change. In this work a lossy medium is soil. The result can be used for creating a graph that can predict moisture content of soil by using the different mutual coupling of parallel and perpendicular dipoles. This sensor can detect source of water in the soil by detecting a mutual coupling magnitude between parallel dipole antennas operating at 27 MHz. This technique is more suitable in practice than the invasive sensor. The average error is 1.4% when using different value by detect a mutual coupling between parallel and perpendicular dipoles.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และเป็นผู้ช่วยเหลือให้คำแนะนำทางด้านการทดลองและการศึกษาหลักการการทำงาน และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกๆท่าน ตลอดช่วงระยะเวลาการศึกษาระดับปริญญามหาบัณฑิตที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

และขอขอบคุณรุ่นพี่และรุ่นน้องในห้องทดลองปฏิบัติการทุกคน โดยเฉพาะคุณชัยณรงค์ กิตติญาณปัญญา สำหรับความช่วยเหลือและคำแนะนำ รวมถึงการออกแบบและปรับการทดลองให้มีความถูกต้องและสะดวกต่อการทำงานและเก็บผลการทดลองมากขึ้น

ท้ายนี้ได้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่มอบความปรารถนาดีและการสนับสนุนตลอดระยะเวลาการศึกษาตลอดมา คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ฉัตรพล เหรียญทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... II
กิตติกรรมประกาศ..... III
สารบัญ..... IV
สารบัญตาราง..... VII
สารบัญรูป..... VIII

บทที่ 1 บทนำ..... 1
1.1 ที่มาของงานวิจัย..... 1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัย..... 4
1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์..... 4

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ..... 6
2.1 บทนำ..... 6
2.2 ดิน..... 6
2.2.1 อนินทรีย์สาร..... 6
2.2.2 อินทรียสาร..... 6
2.2.3 น้ำ..... 7
2.2.4 อากาศ..... 7
2.3 เนื้อดิน..... 7
2.4 น้ำในดิน..... 8
2.5 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่สัมพันธ์กับความชื้นของดิน..... 8
2.6 สนามระยะใกล้ของสายอากาศไดโพล..... 10
2.7 การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไดโพล..... 13
2.8 วิธีการคำนวณการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศที่วางขนานและตั้งฉากบนผิวของวัตถุ..... 15
2.9 สรุป..... 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ผลการคำนวณและการออกแบบ..... 20

3.1 บทนำ..... 20

3.2 การออกแบบโครงสร้างการทำงาน..... 20

3.3 ผลการคำนวณความชื้น..... 23

3.3.1 ผลการคำนวณความถี่ที่มีผลต่อความแรงของสัญญาณการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศตั้งฉากและขนาน..... 23

3.3.2 แนวคิดในการใช้งานเซนเซอร์ที่วัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วมบนผิวดิน..... 26

3.4 ผลการคำนวณความลึกของน้ำในดิน..... 30

3.5 สรุป..... 31

บทที่ 4 ผลการทดลอง..... 32

4.1 บทนำ..... 32

4.2 ผลการทดลองการวัดความชื้นของดินโดยการวัดขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศมีนเดอร์ไลน์ ไดโพลที่วางขนานและตั้งฉาก..... 33

4.3 ผลการทดลองการวัดความชื้นโดยการวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วมโดยการปรับสายอากาศรับแบบอัตโนมัติ..... 40

4.3.1 การทดสอบความเสถียรของเครื่องมือวัด..... 47

4.3.2 การนำเซนเซอร์ไปวางไว้บนผิวของดิน..... 47

4.3.3 ตรวจสอบค่าความผิดปกติที่เกิดขึ้นในหัวข้อ 4.3.2..... 48

4.3.4 การทดสอบวัดค่าของทราย..... 49

4.3.5 การทดสอบวัดค่าของทรายอีกครั้ง..... 51

4.3.6 ผลการทดลองเก็บค่าของทราย..... 52

4.3.7 ทดลองวัดค่าของดินร่วมและดินทราย..... 53

4.3.8 การทดลองวัดค่าดินทรายเพิ่ม..... 56

4.3.9 การทดลองเพื่อตรวจสอบสัญญาณรบกวน..... 57

4.3.10 การเก็บค่าความชื้นเพื่อนำเครื่องมือไปใช้วัดค่า..... 58

4.4 เครื่องเซนเซอร์ที่มีการติดตั้งลงในกล่องติดล้อและมีการควบคุมสายอากาศรับแบบอัตโนมัติ..... 65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5 สรุป..... 67

บทที่ 5 สรุป..... 68

5.1 บทนำ..... 68

5.2 สรุปผลการคำนวณและผลการทดลอง..... 68

5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาตัวเซนเซอร์..... 69

ภาคผนวก..... 70

เอกสารอ้างอิง..... 74

ประวัติผู้เขียน..... 76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	มิติของสายอากาศมีนเดอร์ไลน์ ไดโพลที่วางบนแผ่นอะคริลิค.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	กราฟค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดิน ก) ส่วนจริง ข) ส่วนจินตภาพ	9
2.2	สายอากาศไดโพลและจุดสังเกตเพื่อคำนวณหาสนามระยะใกล้	11
2.3	การกระจายของกระแสบนสายอากาศไดโพล	14
2.4	สายอากาศสองตัวที่วางตั้งฉากและขนานกัน	15
2.5	สายอากาศที่ถูกวางทาบบนผิวของวัสดุ	16
3.1	โครงสร้างสายอากาศที่วางตั้งฉากและขนานกัน	20
3.2	ผังภูมิของวงจรสวิตช์ที่ใช้ควบคุมสายอากาศรับและตัวตรวจจับกำลังงาน	21
3.3	ผังภูมิการทำงานของเซนเซอร์	22
3.4	ลักษณะการวางสายอากาศที่ทาบบนผิวของดิน	23
3.5	ความสัมพันธ์ระหว่างการเชื่อมต่อร่วมแบบขนานกับความชื้นของดินที่ความถี่ต่างๆ	23
3.6	ความสัมพันธ์ระหว่างการเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉากกับความชื้นของดินที่ความถี่ต่างๆ	24
3.7	คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดินอุดมสมบรูณ์ ณ ความถี่ 300 MHz	25
3.8	ผลการคำนวณการเชื่อมต่อร่วมที่ความถี่ 300 MHz ของสายอากาศไดโพลที่วางขนานและตั้งฉาก	26
3.9	การประมาณค่าแบบขนานโดยใช้สมการโพลิโนเมียล	26
3.10	การประมาณค่าแบบตั้งฉากโดยใช้สมการโพลิโนเมียล	27
3.11	กราฟแสดงการประมาณค่าแบบขนานระหว่างสมการโพลีโนเมียลและเอ็กโปเนนเชียล	28
3.12	กราฟแสดงการประมาณค่าแบบตั้งฉากระหว่างสมการโพลีโนเมียลและเอ็กโปเนนเชียล	28
3.13	ผลการเปรียบเทียบการใช้งานแบบขนานเพียงอย่างเดียวกับแบบผลต่าง	29
3.14	ผลการคำนวณหาความลึกของน้ำที่ความถี่ 27 MHz และ 245 MHz	30
4.1	การทดลองวัดค่าความชื้นโดยการวัดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศมีนเดอร์ไลน์ ไดโพล	33
4.2	ผลการวัดค่าความชื้นแบบตั้งฉาก	33
4.3	ผลการวัดค่าความชื้นแบบขนาน	34
4.4	เส้นสมการที่คาดคะเนค่าเฉลี่ยของการทดลองแบบตั้งฉาก	35
4.5	แสดงผลการวัดแบบตั้งฉากเพียงอย่างเดียว	35
4.6	เส้นสมการที่คาดคะเนค่าเฉลี่ยของการทดลองแบบขนาน	36
4.7	แสดงผลการวัดแบบขนานเพียงอย่างเดียว	37
4.8	เส้นสมการที่คาดคะเนค่าเฉลี่ยของการทดลองโดยใช้ผลต่าง	38
4.9	แสดงผลการวัดแบบผลต่างระหว่างขนานและตั้งฉาก	38
4.10	เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคาดคะเนความชื้นทั้งหมด	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.11	เซนเซอร์ติดล้อเพื่อสะดวกต่อการเก็บข้อมูล	40
4.12	เส้นสมการที่คาดคะเนค่าเฉลี่ยของการทดลองโดยใช้ผลต่าง	41
4.13	การทดลองวัดค่าความชื้นเพื่อทดสอบประสิทธิภาพเมื่อมีการควบคุมแบบอัตโนมัติ	42
4.14	ผลการทดสอบเมื่อนำเซนเซอร์ติดล้อและวัดค่าความชื้นเทียบกับเครื่องมือวัดดินแบบปัก	42
4.15	การทดลองเพื่อหาระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างตัวควบคุมและตัวส่งสัญญาณ	43
4.16	ผลการคำนวณเทียบกับผลการวัดฟองน้ำแบบขนาน	44
4.17	ผลการคำนวณเทียบกับผลการวัดฟองน้ำแบบตั้งฉาก	45
4.18	เครื่องเซนเซอร์ที่ใช้การเก็บผลการทดลองที่มีน้ำหนักเบาลง	45
4.19	ผังภูมิของตัวเซนเซอร์ในการทดลองที่ 2 ส่วนที่ 2	46
4.20	ผลที่ได้เมื่อมีการขยับสายที่รับค่าจากตัวตรวจจับกำลังสัญญาณ	47
4.21	ผลการทดลองเก็บค่าดินปุ๋ยที่มีค่าความชื้นเท่ากับ 0%	48
4.22	ผลการทดลองที่ 3 เก็บค่าดินปุ๋ยที่มีค่าความชื้นเท่ากับ 0%	49
4.23	การทดลองวัดทราย	50
4.24	เปรียบเทียบผลการวัดทรายกับดินปกติของการวัดแบบขนาน	50
4.25	เปรียบเทียบการวัดทรายกับดินปกติของการวัดแบบตั้งฉาก	51
4.26	การทดลองเพื่อวัดทรายซ้ำอีกครั้ง	51
4.27	ผลการทดลองวัดค่าของดินทรายซ้ำอีกครั้ง	52
4.28	การเปรียบเทียบผลการทดลองของระหว่างการวัดทรายและดินปกติแบบขนาน	52
4.29	การเปรียบเทียบผลการทดลองของระหว่างการวัดทรายและดินปกติแบบตั้งฉาก	53
4.30	ผลต่างของดินปกติและทราย	53
4.31	สภาพการใช้งาน (ก) บนหญ้า (ข) บนดิน	54
4.32	เปรียบเทียบผลการวัดค่าแบบขนาน	55
4.33	เปรียบเทียบผลการวัดค่าแบบตั้งฉาก	55
4.34	กราฟแผนภูมิแท่งแสดงค่าเฉลี่ยของสัญญาณของดินชนิดต่างๆทั้งแบบตั้งฉากและขนาน	56
4.35	ผลการทดลองของดินทราย	56
4.36	ทดสอบค่าที่เกิดจากสัญญาณรบกวน	57
4.37	การวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมที่ดินความชื้นต่างๆแบบขนาน	58
4.38	การวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมที่ดินความชื้นต่างๆแบบตั้งฉาก	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.39	ผลการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบขนาน.....	59
4.40	เส้นสมการที่คาดคะเนความชื้นจากค่าเฉลี่ยของการทดลองแบบขนาน.....	60
4.41	ผลการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉาก.....	60
4.42	เส้นสมการที่คาดคะเนความชื้นจากค่าเฉลี่ยของการทดลองแบบตั้งฉาก.....	61
4.43	การวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบขนานดินทราย.....	62
4.44	การวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉากดินทราย.....	62
4.45	ผลการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบขนานดินทราย.....	63
4.46	ผลการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉากดินทราย.....	63
4.47	เส้นสมการที่คาดคะเนความชื้นจากค่าเฉลี่ยของการทดลองแบบขนานดินทราย	64
4.48	เส้นสมการที่คาดคะเนความชื้นจากค่าเฉลี่ยของการทดลองแบบตั้งฉากดินทราย	64
4.49	ผลการทดลองเมื่อมีการวัดความลึกของน้ำที่อยู่ในดินที่ความถี่ 245 MHz.....	65
4.50	สายอากาศความถี่ 27 MHz ที่วางขนานกัน.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของงานวิจัย

ด้วยปัญหาภัยแล้งที่เกิดขึ้นในทุกๆปีของประเทศมีความรุนแรงมากขึ้น และหลายจังหวัดประสบปัญหาภัยแล้งอย่างหนัก ทำให้แหล่งน้ำที่เคยใช้ในการผลิตน้ำประปาเพื่อการอุปโภคบริโภคแห้งขอดหรือมีหลงเหลือไม่เพียงพอซึ่งไม่สามารถนำมาผลิตน้ำใช้ได้ แม้ว่าจะมีการช่วยเหลือในหลายๆด้านไม่ว่าจะเป็นการจัดตั้งกองอำนวยการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยแล้งประจำจังหวัด โดยนำรถน้ำจากเทศบาลมาให้บริการน้ำแต่ก็มีปริมาณที่ไม่เพียงพอทำให้ผู้ประสบปัญหาภัยแล้งก็ยังคงได้รับความเดือดร้อน อีกทั้งยังมีการดำเนินการขุดเจาะบ่อน้ำบาดาลเพื่อนำมาผลิตเป็นน้ำประปาในพื้นที่ที่ประสบปัญหาภัยแล้ง จำนวน 6,922 บ่อ เพื่อจะเพิ่มปริมาณน้ำที่สามารถกักเก็บได้ 200 ลูกบาศก์เมตรต่อปี [1] เพื่อลดปัญหาจากผลกระทบของภัยแล้งจึงมีความจำเป็นต้องมีมาตรการส่งเสริมการใช้น้ำอย่างเหมาะสม เพื่อที่จะสามารถมีน้ำใช้อย่างเพียงพอทั้งในด้านการเกษตรและด้านการอุปโภคบริโภครวมถึงภาคอุตสาหกรรมเมื่อประสบปัญหาภัยแล้ง จึงมีการส่งเสริมให้ใช้ทรัพยากรน้ำอย่างประหยัดและมีประสิทธิภาพ โดยลดการใช้น้ำ ประหยัดน้ำ การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจะเป็นการใช้น้ำโดยมีประสิทธิภาพสูงสุด แม้ว่าผลผลิตทางอุตสาหกรรมและการเกษตรทำรายได้สูงให้กับประเทศแต่เมื่อประสบปัญหาภัยแล้งและไม่สามารถบรรเทาลงได้จึงมีผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจ และการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งจะช่วยลดปัญหาการขาดแคลนน้ำลงได้ จึงมีความต้องการที่จะทราบค่าความชื้นของดินที่ใช้ในการเพาะปลูก เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้น้ำเพื่อการเกษตรในปริมาณที่พอเหมาะและยังคงส่งผลดีต่อภาคการเกษตรแม้ว่าจะมีการให้น้ำที่น้อยลง อีกทั้งยังนำเครื่องมือที่ช่วยหาน้ำในดินเพื่อช่วยในการขุดเจาะน้ำบาลดาล หรือหาแหล่งน้ำเพื่อช่วยในการผลิตน้ำประปาได้ โดยการทราบค่าความชื้นของดินสามารถทำได้หลายวิธี

เพื่อทราบค่าความชื้นของดินมีการทดสอบหลายแบบ เช่น การวิเคราะห์โดยการชั่งน้ำหนัก (Gravimetric Method) [2] ซึ่งจะเป็นการอบดิน โดยทั่วไปซึ่งจะใช้การชั่งน้ำหนักเป็นวิธีการมาตรฐาน โดยวิธีนี้จะต้องทำการเก็บตัวอย่างดินที่ต้องการจะวัดมาทำการชั่งน้ำหนักและอบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส และนำผลมาคำนวณหาค่าความชื้น ซึ่งการใช้วิธีการชั่งน้ำหนักนี้ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงชนิดของดินและความเป็นด่างอีกทั้งยังมีความง่ายต่อการคำนวณ แต่วิธีการชั่งน้ำหนักนี้ยังคงใช้เวลานานประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่ออบดินก่อนจะนำน้ำหนักของดินไปคำนวณหาค่าความชื้น และเป็นการวัดที่จำเป็นต้องเก็บตัวอย่างของดินมา จึงไม่เหมาะสมต่อการที่จะทำระบบที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถควบคุมแบบอัตโนมัติ โดยบทความใน [2] ได้รวบรวมวิธีการวัดหาค่าความชื้นของดินตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และพบว่าการวัดค่าความชื้นของดินด้วยการกระจายของนิวตรอน (Neutron moisture gauge) มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งจะค่าความชื้นของดินได้จากเครื่องวัดการกระจายของนิวตรอนที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกัมมันตภาพรังสีที่ถูกให้ความร้อน ทำให้นิวตรอนเร็ว (Fast neutron) จะเคลื่อนที่ไปกระทบนิวเคลียสของไฮโดรเจนอะตอมในดินและเกิดการสูญเสียพลังงานและนิวตรอนจะกลายเป็นนิวตรอนช้า (Slow neutron) เพราะดินประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนซึ่งเป็นส่วนประกอบของน้ำเมื่อนิวตรอนที่ส่งออกไปกระทบกับไฮโดรเจนของน้ำหรือความชื้นของดินจะทำให้ความเร็วของนิวตรอนที่สะท้อนมานั้นลดลง และด้วยจำนวนนิวตรอนนี้สามารถวัดและเทียบเป็นความชื้นดินได้ โดยวิธีการวัดแบบนี้มีความแม่นยำและใช้เวลาเพียง 1-2 นาที แต่การวัดค่าความชื้นของดินโดยใช้นิวตรอนนั้นมีราคาที่สูง อีกทั้งยังอันตรายจากการแผ่รังสี และต้องมีการคำนวณปรับค่าในแต่ละชนิดของดิน วิธีนี้เป็นการวัดแบบไม่ทำลาย และได้ข้อมูลของน้ำในดินและสามารถวัดค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้นได้โดยตรง

การวัดโดยใช้เท็นซิโอมิเตอร์ (Tensiometer) เป็นการวัดความตึงของวัสดุพื้นของน้ำในดินซึ่งแปรผันกับระดับความชื้นในดิน หรือเป็นการวัดค่าของพลังงานในก้อนดินและน้ำในดินโดยตรง ซึ่งจะใช้แรงดึงความชื้นในดินที่อยู่ในสภาวะสมดุลกับน้ำที่บรรจุอยู่ในเท็นซิโอมิเตอร์ และดูความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงของความชื้นในดินกับจำนวนความชื้น ณ จุดที่ตั้งเครื่องมือ มีข้อเสียคือ ใช้ระยะเวลาประมาณ 2-3 ช.ม. และค่าที่อ่านได้ยากต่อการแปลงหรืออ่านเป็นเปอร์เซ็นความชื้น และต้องการการซ่อมบำรุงที่สม่ำเสมอ ต้องใช้ในดินที่มีความชื้นค่อนข้างสูงเนื่องจากเมื่อใช้กับดินที่แห้งจะทำให้อากาศในดินซึมเข้าสู่ตัวเครื่องเท็นซิโอมิเตอร์จนทำให้อ่านค่าไม่ได้

การวัดโดยใช้โพรบเสียบเข้าไปในดินเพื่อวัดค่าคาปาซิแตนซ์ที่สัมพันธ์กับความชื้นดิน [3] เป็นวิธีที่ให้ความแม่นยำสูง โดยใช้การวัดค่าเวลาการเก็บประจุโดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลางนั้นๆ เช่นเดียวกับการใช้สายส่งแกนร่วมในการวัดความชื้นดิน [4] การใช้การวัดสะท้อนในโดเมนเวลา (Time domain reflectometry : TDR) เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยวัดสัญญาณพัลส์ที่ส่งออกไปยังดินแล้วพิจารณารูปคลื่นที่สะท้อนกลับมาที่มีความสัมพันธ์กับความชื้นของดิน ตัวอย่างเซนเซอร์ TDR ได้แก่ งานวิจัยใน [5] [6] ซึ่งเซนเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัย [3] ถึง [6] ยังคงมีความจำเป็นต้องทำการจุ่มลงไปในดิน หรือเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำมาบรรจุภายในตัวเซนเซอร์ ซึ่งทำให้มีความไม่สะดวกหากต้องการใช้วัดค่าความชื้นดินในบริเวณกว้าง

การใช้เรดาร์ [7] และการใช้เครื่องวัดพลังงานความถี่วิทยุ (Radiometer) [8] [9] ให้ผลการวัดความชื้นกับดินในพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่ได้สะดวกแต่ใช้ความถี่ในช่วง 4-8 GHz และมีระบบที่ซับซ้อนอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งยังมีราคาที่สูงและมีผลกระทบที่สูงต่อพื้นผิวที่วัดจึงทำให้ใช้งานได้ไม่สะดวก วิธีวัดแบบเรดาร์ทะลุลงไปในดิน (Ground penetrating radar : GPR) [10] เป็นการใช้การส่งและสะท้อนของคลื่นความถี่สูงในย่าน 1 MHz ถึง 1 GHz โดยทำการวัดเวลาการเดินทางของคลื่นสู่ดิน จากตัวส่งและตัวรับผ่านชั้นบนของดินเพื่อเทียบเคียงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกกับค่าความชื้นของดิน โดยมีข้อเสียคือผู้ใช้งานต้องมีความรู้ในการติดตั้งและจัดวางซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ได้มีคุณภาพที่สูง และการวัดแบบเรดาร์ทะลุลงไปในดินนั้นไม่สามารถวัดค่าความชื้นได้ดีเมื่อดินมีสภาพเป็นดินเค็มซึ่งจะทำให้สัญญาณลดต่ำลง อีกทั้งยังมีราคาที่สูงมาก

งานวิจัยใน [11] มีความน่าสนใจเนื่องจากเป็นการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลที่วางอยู่เหนือผิวของดิน และหาค่าความชื้นที่มีความสัมพันธ์กับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพล ซึ่งวิธีนี้เป็นการทำให้เราสามารถทราบค่าความชื้นของดินได้โดยไม่มีความจำเป็นต้องจุ่มตัวเซนเซอร์ลงไปในดิน อย่างไรก็ดีวิธีการวัดอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ต้องวัดทั้งขนาดและเฟสของสัญญาณทำให้มีต้นทุนในการวัดที่สูงค่อนข้างสูง และการวัดเพียงขนาดของสัญญาณอย่างเดียวมีต้นทุนที่ต่ำกว่ามาก ดังนั้นงานวิจัยใน [12] ใช้การวัดการสะท้อนของสัญญาณและวัดการเชื่อมต่อร่วมของสัญญาณ ในการวัดค่าความชื้นของข้าวเปลือก ซึ่งการวัดการสะท้อนต้องใช้ตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง (Directional coupler) โดยในงานวิจัยที่ [13] ได้มีการลดตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทางออกไป ซึ่งจะทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศภาครับทั้งสองตัว เป็นสายอากาศไดโพลที่วางขนานและตั้งฉากกันระหว่างสายอากาศภาครับและภาคส่ง ซึ่งนั่นทำให้มีการหาค่าความชื้นของข้าวเปลือกได้และยังคงมีต้นทุนที่ต่ำ อย่างไรก็ดีงานวิจัยใน [13] นั้นเป็นการจุ่มตัวเซนเซอร์ลงไปในกองข้าวเปลือกเพื่อวัดค่าความชื้น

เพื่อที่จะทำให้ตัวเซนเซอร์ไม่ต้องจุ่มลงไปในตัวกลางที่ต้องการจะวัด และไม่วัดเฟสแต่วัดเพียงขนาดเพียงอย่างเดียวเพื่อลดต้นทุนของการสร้างเซนเซอร์ลง ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการพัฒนาเซนเซอร์ที่วัดอิมพีแดนซ์ของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไดโพลที่วางขนานและตั้งฉากกัน โดยวางทาบไว้บนผิวของตัวกลางที่ต้องการจะวัด และพิจารณาให้บริเวณที่เซนเซอร์วางทาบไว้เป็นฉนวน ส่วนอีกครึ่งเป็นอากาศ การทำเช่นนี้จะทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องหาสูตรใหม่ในการคำนวณหาค่าการเชื่อมต่อร่วมบริเวณดังกล่าว โดยจะเปลี่ยนสัมประสิทธิ์ในการหาค่าการเชื่อมต่อร่วม ในบริเวณที่เป็นฉนวนทั้งหมดใน [13] ผลจากการวิจัยนี้จะทำให้มีเครื่องมือวัดความชื้นของดินที่สะดวกต่อการใช้งานในพื้นที่บริเวณกว้างได้ ในลักษณะเดียวกับงานวิจัย [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบตัวเซนเซอร์ที่สามารถบอกความชื้นดินได้ โดยการอาศัยขนาดของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศที่วางขนานและตั้งฉากกัน โดยศึกษาขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นของดินโดยอาศัยหลักการคำนวณในลักษณะเดียวกันกับงานวิจัย [13] ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงการใช้งานโดยนำตัวเซนเซอร์วางทาบไว้บนผิวดินเพื่อความสะดวกต่อการใช้งานในบริเวณกว้าง โดยจะเป็นการออกแบบตัวเซนเซอร์ให้มีขนาดที่ใช้งานได้สะดวก จึงทำให้ต้องมีการออกแบบสายอากาศในช่วงความถี่ที่ใช้งานได้แก่ 245 MHz โดยการใช้สายอากาศแบบมีนเดอร์ไลน์ (Meander line) และ 27 MHz จะใช้การหาค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศที่วางขนานกันและหากใช้สายอากาศไดโพล จะทำให้ตัวเซนเซอร์มีขนาดที่ใหญ่จึงได้ทำการปรับปรุงสายอากาศโดยใช้การขดเป็นเกลียวเพื่อทำการลดขนาดซึ่งจะทำการหาค่าความชื้นและความลึกของระดับน้ำที่มีในดินมีความสะดวกเนื่องจากขนาดของตัวเซนเซอร์ที่เล็กลง

1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้มีเนื้อหาทั้งหมด 5 บทดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัยและงานวิจัยที่นำมาเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยนี้ วัตถุประสงค์ของการทำงานวิจัย และรายละเอียดของเนื้อหาในวิทยานิพนธ์แต่ละบท

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่งานวิจัยนี้ได้นำมาใช้เพื่อสร้างเซนเซอร์ ได้แก่ ชนิดของดิน คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดิน การคำนวณสนามระยะใกล้ของสายอากาศ วิธีการคำนวณการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไดโพลที่ได้ถูกเปลี่ยนจากจุ่มลงไปในตัวกลางเป็นวางทาบบนดินทั้งแบบที่วางขนานและตั้งฉาก

บทที่ 3 กล่าวถึงผลจากการคำนวณ เมื่อนำตัวเซนเซอร์วัดที่ผิวของดิน เริ่มด้วยการคำนวณเพื่อหาความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการทำงาน และแนวโน้มของการเชื่อมต่อร่วมเมื่อนำตัวเซนเซอร์วางทาบลงบนผิวดินที่ความชื้นต่างๆ อีกทั้งการออกแบบขนาดของตัวเซนเซอร์ให้มีขนาดเหมาะสมกับการใช้งาน

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลอง ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การทดลองวัดค่าความชื้นดิน ซึ่งจะเป็นการสร้างเซนเซอร์ที่สามารถตรวจจับค่าความชื้นดิน โดยวัดเทียบกับเครื่องมือวัดค่าความชื้นและจะมีการสับสวิตช์เพื่อเลือกสายอากาศในภาครับที่วางตั้งฉากและขนานกับสายอากาศในภาคส่ง ซึ่งจะมีการทดสอบประสิทธิภาพของการวัด โดยสังเกตว่าสอดคล้องกับการคำนวณหรือไม่ และการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองต่อมาจะเกี่ยวข้องกับการปรับปรุงให้เซนเซอร์สามารถทำงานได้ง่ายขึ้นโดยใช้ระบบการควบคุมอัตโนมัติเข้ามาใช้งาน และยังมีการทดลองโดยให้เซนเซอร์ติดล้อเพื่อความสะดวกมากขึ้น และในส่วนสุดท้ายของการทดลองจะเป็นการสร้างเครื่องเซนเซอร์ที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน โดยจะเพิ่มตัวสายอากาศที่ทำงาน ณ ความถี่ 27 MHz เพื่อเพิ่มความสามารถในการวัดค่าความลึกของระดับน้ำในดินเข้าไปในตัวเซนเซอร์

บทที่ 5 จะกล่าวถึงการสรุปผลการคำนวณและการทดลองที่ได้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ และจะกล่าวถึงการพัฒนาตัวเซนเซอร์และวิธีการเก็บข้อมูล รวมถึงข้อเสนอแนะในการนำเซนเซอร์ไปใช้ในการทดลองและการใช้ในภาคสนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทำงานพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับเซนเซอร์ในวิทยานิพนธ์นี้ โดยในส่วนแรกจะกล่าวถึงดินซึ่งเป็นสิ่งที่งานวิจัยนี้ได้ให้ความสนใจ เนื่องจากมีความต้องการที่จะทราบค่าความชื้นจากเทคนิคการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศที่วางตั้งฉากและขนานกัน โดยจะกล่าวถึงองค์ประกอบหลักๆในดินและลักษณะของเนื้อดินและประเภทของน้ำในดิน ต่อมาจะกล่าวถึงสนามระยะใกล้ของสายอากาศ จากนั้นจะเป็นเรื่องของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่มีความเปลี่ยนแปลงเมื่อดินมีความชื้นเพิ่มขึ้น และอ้างอิงงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้า [13] ซึ่งเป็นเซนเซอร์แบบจุ่มลงไปในตัวกลางที่ต้องการวัดดังนั้นงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่ [13] โดยแสดงความสัมพันธ์เพื่อหาสัมประสิทธิ์ตัวคูณเพื่อเปลี่ยนแปลงการคำนวณให้เป็นการใช้งานแบบทาบที่ผิวของตัวกลางแทน

2.2 ดิน

ดินเกิดมาจากอนินทรีย์สารรวมกับอินทรีย์สารจับกลุ่มรวมตัวกันเกิดเป็นดิน เนื่องจากเกิดกระบวนการทั้งทางกายภาพ กระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวภาพ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าองค์ประกอบของดินที่สำคัญมีอยู่ทั้งหมด 4 อย่าง [15]

2.2.1 อนินทรีย์สาร

อนินทรีย์สารคือ แร่ธาตุในดินเกิดมาจากการผุสลายของแร่ที่ถูกทับถมอยู่ในดิน ซึ่งสามารถแบ่งแร่ออกเป็นสองกลุ่มใหญ่คือ ปฐมภูมิ เป็นแร่ที่เกิดขึ้นดั้งเดิม และทุติยภูมิ เป็นแร่ที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวของธาตุภายหลังหรือคือแร่ที่เกิดจากการสลายตัวของแร่ปฐมภูมิ ซึ่งอนินทรีย์สารจะเป็นส่วนที่ควบคุมลักษณะของดินและยังมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของดิน เช่น มีผลต่อสภาพความเป็นกรดเป็นด่าง และควบคุมการดูดยึดน้ำของดิน

2.2.2 อินทรีย์สาร

เป็นซากพืชซากสัตว์ที่เน่าเปื่อย ก็คืออินทรีย์สารเกิดจากสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่ซึ่งจะประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ฟอสฟอรัส และกำมะถัน ซึ่งทำให้อินทรีย์สารมีอยู่ในดินชั้นบนเท่านั้น และจะปริมาณของอินทรีย์สารจะค่อยๆลดลงไปในดินชั้นที่ลึก ซึ่งตัวอินทรีย์สารจะเป็นแหล่งอาหารให้กับพืชและเพิ่มความสามารถในการดูดยึดน้ำในดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 น้ำ

ดินส่วนใหญ่มีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ถึง 25% น้ำในดินจะอยู่ภายในช่องว่างของดินและตามอนุภาคของดินที่มีแรงยึดระหว่างน้ำและเนื้อดินไว้ด้วยกัน ดังนั้นดินที่มีอนุภาคของดินที่มีความละเอียดจะทำให้สามารถยึดน้ำได้ดีกว่าและมีช่องว่างทำให้มีน้ำในดินได้มากกว่าดินที่มีอนุภาคในดินที่หยาบเพราะมีช่องว่างน้อยกว่า เนื่องจากมีอนุภาคหยาบทำให้ความสามารถในการยึดน้ำน้อยกว่าดินที่มีความละเอียด ซึ่งน้ำในดินสามารถแบ่งได้ออกเป็น 4 ประเภท โดยอาศัยแบ่งจากปฏิกิริยาของน้ำและอนุภาคของดิน

น้ำที่เป็นองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งจะเป็นน้ำที่อยู่ในแร่ธาตุต่างๆในดิน ซึ่งมีแรงยึดเกาะที่ แข็งแรงมาก

น้ำเยื่ออนุภาคผิวดิน เป็นน้ำที่ผิวดินยึดเกาะไว้ภายนอก

น้ำซับ จะเป็นน้ำที่ถูกอนุภาคความละเอียดของดินยึดไว้ระหว่างช่องว่างของดิน

น้ำซึม หมายถึงน้ำที่อยู่ตามช่องว่างของดินแต่ไม่ได้ถูกอนุภาคของดินยึดไว้

2.2.4 อากาศ

อากาศในดินจะอยู่ตรงช่องว่างระหว่างเม็ดดินในส่วนที่ไม่มีน้ำ ซึ่งทำให้อากาศในดินแปรผันกับน้ำในดิน ซึ่งเมื่อลึกลงไปในดินจะทำให้อากาศในดินจะมีปริมาณที่ลดลง ซึ่งอากาศในดินที่มีแก๊สต่างๆจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยปัจจัยที่มีผลต่อความจุอากาศในดิน จะเป็นปริมาณน้ำในดิน เนื้อดิน อินทรีย์สารในดิน ซึ่งจะมีผลต่อการถ่ายเทอากาศในดินอีกด้วย

2.3 เนื้อดิน

สัดส่วนองค์ประกอบแร่ธาตุในดิน จะประกอบด้วยอนุภาคซึ่งมีอยู่ 3 ชนิด คือ อนุภาคทราย อนุภาคซิลท์ และอนุภาคดินเหนียว โดยอนุภาคทั้งสามชนิดนี้จะเป็นตัวกำหนดความหยาบหรือความละเอียดของดินนั้นๆ ซึ่งจะทำให้ดินทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ดินเนื้อละเอียด ดินเนื้อละเอียดปานกลาง ดินเนื้อหยาบ ซึ่งจะมีความเปลี่ยนแปลงลักษณะที่แตกต่างกันในแต่ละสภาพความชื้นของดิน ความหนาแน่นภายในเนื้อดินเป็นสัดส่วนระหว่างน้ำหนักระหว่างปริมาตรของดิน ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดช่องว่างภายในดินและเป็นสมบัติของความพรุนของดิน และเนื้อดินที่มีสีแตกต่างกันทำให้สามารถแบ่งชนิดของดินได้ไม่ยากนัก เป็นผลมาจากแร่ชนิดต่างๆในดินซึ่งจะมีองค์ประกอบต่างๆมากน้อยแตกต่างกันทำให้ดินมีสีเข้ม ซึ่งดินที่มีสีเข้มกว่ามักจะอยู่ชั้นล่าง ดังนั้นจึงมีตารางเทียบสีดินของมันเซลล์ (Munsell soil color chart)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 น้ำในดิน

จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ น้ำที่ผิวของดินเป็นองค์ประกอบที่เกิดจากวัฏจักรของน้ำที่มีฝนตกลงมาและมีการสะสมตัวของน้ำอยู่บนผิวของดิน ซึ่งในระยะแรกน้ำจะซึมลงสู่ดินจนกระทั่งแช่ขังขึ้นมาที่ผิวของดินทำให้เกิดแหล่งน้ำขนาดเล็กขึ้น ซึ่งน้ำก็จะไหลไปตามร่องหรือแผ่ซ่านออกไป และเมื่อประกอบกับความลาดชันหรือลักษณะของภูมิประเทศจะทำให้เกิดเป็นลำธาร หรือแหล่งน้ำ ความชื้นในดินเป็นน้ำที่เกาะอยู่กับอนุภาคของดินทำให้เกิดความชื้นตามเม็ดดิน ซึ่งความชื้นเหล่านี้เกิดจากการซึมลงไปในระยะแรกซึ่งจะระเหยไปตามเวลาความชื้นในดินขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ซึ่งดินทรายมีความจุน้ำที่ต่ำที่สุดและดินเหนียวจะมีความจุน้ำสูงสุด น้ำใต้ดินเป็นน้ำที่อยู่ระหว่างช่องว่างของดินและหินเป็นแหล่งน้ำที่มีอยู่ในผิวโลกซึ่งเกิดจากน้ำในบรรยากาศและน้ำผิวดินซึ่งปกติแล้วน้ำใต้ดินจะมีคุณภาพที่ดีเนื่องจากถูกกรองโดยชั้นหินในดินแล้ว แต่อาจมีแร่ธาตุจำนวนมากเจือปนโดยปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของน้ำใต้ดินคือ ช่วงเวลาที่มีฝนตก ความลาดชันของภูมิประเทศ ปริมาณต้นไม้ ความลาดเทของชั้นหิน

2.5 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่สัมพันธ์กับความชื้นของดิน

วัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric materials) เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติระหว่างตัวนำและฉนวนไฟฟ้า ซึ่งจะมีการสูญเสียในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น น้ำมัน ไม้ น้ำ และวัสดุที่มีความชื้น เป็นต้น ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของแต่ละวัตถุจะขึ้นอยู่กับค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative permittivity : $\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$) โดยค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์จะประกอบด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Dielectric constant : ε_r') เป็นค่าที่แสดงถึงพลังงานไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในวัตถุนั้นๆ ซึ่งคือส่วนจริงในค่าสภาพยอมเชิงซ้อนของวัตถุ และค่าแฟคเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss : ε_r'') เป็นค่าที่แสดงถึงความสูญเสียทางไฟฟ้า โดยขึ้นกับค่าสภาพความนำไฟฟ้าของวัตถุ (Conductivity : σ) ซึ่งคือส่วนจินตภาพมีค่า $\varepsilon_r'' = \frac{\sigma}{\omega}$ ค่าสภาพยอมจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความหนาแน่น และความชื้นหรือความบริสุทธ์ของวัตถุ และยังมีค่าแทนเจนการสูญเสีย (Loss tangent : $tan\delta$) โดยจะแสดงถึงลักษณะของการเกิดความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกที่ดูดกลืนพลังงานจากคลื่นในวัตถุนั้นๆ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกดังนี้ $tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$ สามารถหาค่าสภาพะยอมของสุญญากาศ (ε_0) ได้จาก $C_0\mu_0\varepsilon_0 = 1$ โดยค่าของ C_0 คือค่าความเร็วแสง, μ_0คือค่าความซาบซึม ค่าคงตัวการแพร่คลื่น (Propagation Constant) ในตัวกลางที่มีความสูญเสีย ซึ่งมีส่วนจริง (α) คือค่าคงที่การลดทอน และส่วนจินตภาพ (β) คือค่าคงที่เฟสสามารถเขียนได้ดังสมการที่ [16]

$$k = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = \sqrt{-\omega^2\mu\varepsilon + j\omega\mu\sigma} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ε และ μ มีค่าเป็นค่าสภาพยอมเชิงซ้อนและค่าความซาบซึมเชิงซ้อน โดยα และ β คือ

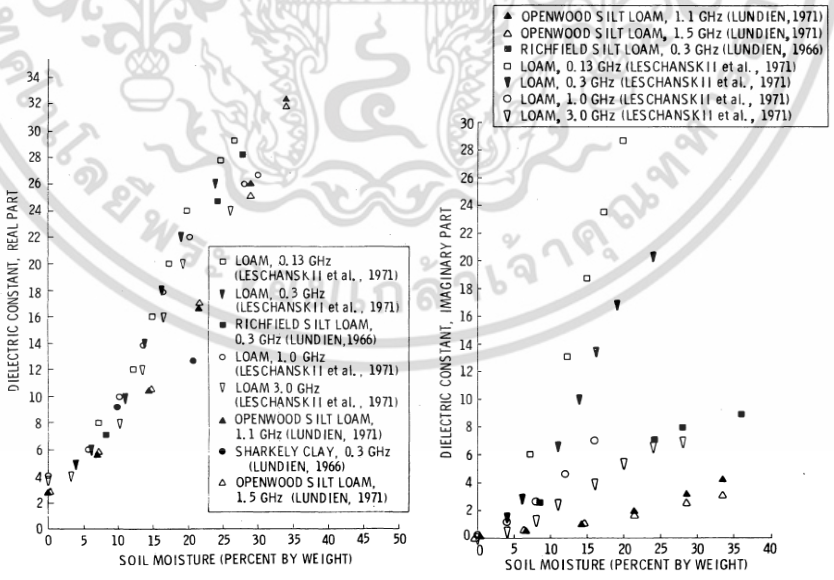
$$\alpha = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}\left[\frac{1}{2}\left(\sqrt{1+\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2}-1\right)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad \left(\frac{Np}{m}\right) \quad (2.2)$$

$$\beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}\left[\frac{1}{2}\left(\sqrt{1+\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2}+1\right)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad \left(\frac{Radian}{m}\right) \quad (2.3)$$

ในคลื่นจะมีค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่น (η) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2.4)

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma+j\omega\varepsilon}} \quad (2.4)$$

จากค่าเหล่านี้ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าความชื้นในวัตถุที่สนใจได้ โดยงานวิจัยชิ้นนี้ได้มุ่งเน้นความสนใจทางด้านการวัดความชื้นดินเพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนน้ำเมื่อเกิดภัยแล้ง โดยยังสามารถทำให้ผลผลิตทางการเกษตรไม่เสียหายและยังคงมีคุณภาพที่ดีดังเดิม จากการที่วัตถุแต่ละชนิดมีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน ดังนั้นจากองค์ประกอบที่สนใจในดินที่มีความชื้นจะเป็นค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำโดยมีค่าเท่ากับ 80 – j17 และค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดินที่แห้งมีค่าเท่ากับ 2.4 - j0.01 จากค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของทั้งสองวัสดุนี้ทำให้สามารถคาดคะเนได้ว่าค่าคุณสมบัติไดเล็กตริกของดินที่มีความชื้นควรจะมีค่าที่สูงกว่าค่าของดินที่แห้ง



ก) ข)

รูปที่ 2.1 กราฟค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดิน ก) ส่วนจริง ข) ส่วนจินตภาพ [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 แสดงค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยค่าส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสภาพยอมเชิงซ้อน (Complex permittivity) ในแกนตั้ง โดยเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินที่อุดมสมบูรณ์ในสถานที่ต่างๆในแกนนอน โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นนี้ได้มากจากวิธีการวิเคราะห์จากการชั่งน้ำหนักโดยการนำตัวอย่างดินมาอบเพื่อคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น เมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเพิ่มขึ้นค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ดังเช่นในรูป 2ก) แม้จะเป็นดินจากสถานที่ที่แตกต่างกันและความถี่ที่ใช้ก็มีความแตกต่างกันค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดิน ในส่วนจริงจะมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อเทียบกับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในส่วนจินตภาพแสดงในรูป 2ข) ซึ่งแสดงว่าชนิดของดินและความถี่ที่ใช้งานมีผลกระทบต่อส่วนจินตภาพมากกว่า สิ่งที่สำคัญที่นำมาพิจารณาเพื่อเลือกความถี่ที่เหมาะสมคือ ค่าความลึกผิว (Depth of penetration : δ) ซึ่งเป็นความลึกที่คลื่นสามารถเดินทางไปถึง ที่มีค่าแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับค่าความถี่โดยสามารถคำนวณหาค่าได้จากสมการที่ (2.5)

$$\delta = \left[\frac{\sqrt{2}}{\omega\sqrt{\mu\varepsilon}}\right]\left[\sqrt{1+\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2}-1\right]^{-\frac{1}{2}} \tag{2.5}$$

ในสมการที่ 2.5 จะสามารถคำนวณหาค่าความลึกของวัสดุที่คลื่นจะเดินทางไปถึงซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ หากความถี่สูงขึ้นค่าความลึกที่คลื่นสามารถเดินทางไปถึงได้จะมีค่าน้อยลง และเมื่อค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกมีค่าสูงความลึกที่คลื่นสามารถเดินทางไปถึงได้ก็จะมีค่าน้อยลงไปด้วย จากรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อดินมีค่าความชื้นสูงๆค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกจะมีค่าสูงตามไปด้วย ดังนั้นหากต้องการวัดค่าความลึกของดินที่ชื้นและต้องการระยะความลึกที่มากๆจึงมีความจำเป็นต้องใช้ความถี่ที่ต่ำ

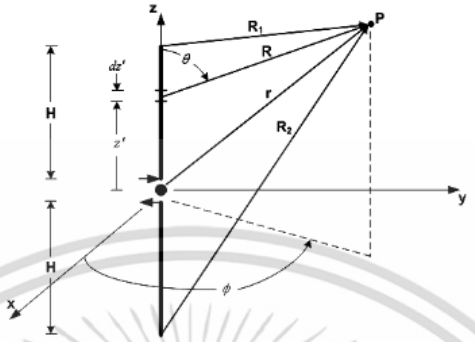
2.6 สนามระยะใกล้ของสายอากาศไดโพล

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ [18] โดยจะสนใจในสนามระยะใกล้ของสายอากาศไดโพลผอมที่มีจุดป้อนตรงกึ่งกลางและมีความยาวเท่ากับ L และให้สนามแม่เหล็ก ณ จุด P ซึ่งมีระยะห่างจากสายอากาศดังรูปที่ 2.2 เป็นจุดสังเกตุโดยสามารถคำนวนได้โดยกำหนดให้การแพร่กระจายของกระแสบนสายอากาศเป็นดังสมการที่ (2.6)

$$\bar{I}(z') = \begin{cases} \hat{a}_z I_m sin[k(H-z')], & 0 \le z' \le H \\ \hat{a}_z I_m \sin[k(H+z')], & -H \le z' \le 0 \end{cases} \tag{2.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อค่า I_mเป็นค่ากระแสสูงสุด (maximum current) และ k คือค่าคงที่เฟส (phase constant) และ H แสดงความยาวของสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวสายอากาศ และ L แสดงถึงความยาวรวมของสายอากาศไดโพล



รูปที่ 2.2 สายอากาศไดโพลและจุดสังเกตเพื่อคำนวณหาสนามระยะใกล้

จากรูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและจุดสังเกต P ได้แสดงดังสมการ

$$R = \sqrt{[(z-z')^2 + y^2]} \tag{2.7ก}$$

$$R_1 = \sqrt{[(z-H)^2 + y^2]} \tag{2.7ข}$$

$$R_2 = \sqrt{[(z+H)^2 + y^2]} \tag{2.7ค}$$

$$r = \sqrt{(x^2 + y^2)} \tag{2.7ง}$$

ค่าศักย์เวกเตอร์ ณ จุดสังเกต P แสดงดังสมการ

$$A_z = \frac{\mu I_m}{4\pi}\left(\int_0^H \frac{\sin[k(H-z')]\exp(-jkR)}{R}dz' + \int_{-H}^0 \frac{\sin[k(H+z')\exp(-jkR)]}{R}dz'\right)$$

$$= \frac{\mu I_m}{8\pi j}(\exp(jkH)\int_0^H \frac{\exp[-jk(R+z')]}{R}dz' - \exp(-jkH\int_0^H \frac{\exp[-jk(R-z')]}{R}dz' + \exp(jkH)\int_{-H}^0 \frac{\exp[-jk(R-z')]}{R}dz' - \exp(-jkH)\int_{-H}^0 \frac{\exp[-jk(R+z')]}{R}dz' \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในพิกัดระบบทรงกรวยสนามแม่เหล็ก ณ จุด P จะแสดงดังสมการ

$$\overline{H} = \hat{a}_{\emptyset} H_{\emptyset} \quad (2.9)$$

เมื่อ

$$H_{\emptyset} = -\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z}{\partial \rho} \quad (2.10)$$

และ μ เป็นค่าความซาบซึม

เมื่อให้เกิดการสมมาตรบนแกน x และจุด P นั้นแสดงบนระนาบ yz ซึ่งจะไม่มีการสูญเสีย ซึ่งในกรณีนี้แสดงสามารถดังสมการ

$$H_{\emptyset} = -H_x = -\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z}{\partial y} \quad (2.11)$$

และเมื่อนำสมการที่ (2.8) แทนลงในสมการที่ (2.11) จะได้สมการ

$$H_{\emptyset} = -\frac{I_m}{8\pi j}[\exp(jkH)\,Q_1 - \exp(-jkH)\,Q_2 + \exp(jkH)\,Q_3 - \exp(-jkH)\,Q_4] \quad (2.12)$$

เมื่อ

$$Q_1 = \frac{\partial}{\partial y}\int_0^H \frac{\exp[-jk(R+z')]}{R}\,dz' \quad (2.13ก)$$

$$Q_2 = \frac{\partial}{\partial y}\int_0^H \frac{\exp[-jk(R-z')]}{R}\,dz' \quad (2.13ข)$$

$$Q_3 = \frac{\partial}{\partial y}\int_{-H}^0 \frac{\exp[-jk(R-z')]}{R}\,dz' \quad (2.13ค)$$

$$Q_4 = \frac{\partial}{\partial y}\int_{-H}^0 \frac{\exp[-jk(R+z')]}{R}\,dz' \quad (2.13ง)$$

และเมื่อนำสมการที่ (2.13ก) (2.13ข) (2.13ค) และ (2.13ง) แทนลงในสมการที่ (2.12) จะได้

$$H_{\emptyset} = -\frac{I_m}{4\pi y j}[\exp(-jkR_1) + \exp(-jkR_2) - 2\cos(\mathrm{kH})\exp(-\mathrm{jkr})] \quad (2.14)$$

จากสมการของแมกส์เวล (Maxwell's Equations) สามารถแสดงสนามไฟฟ้าดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\overline{E} = \frac{1}{j\omega E} \nabla \times \overline{H} \tag{2.15}$$

และสมการสนามไฟฟ้าเมื่อสายอากาศไดโพลมีการแผ่พลังงาน

$$\overline{E} = \hat{a}_\rho E_\rho + \hat{a}_z E_z = -\hat{a}_\rho \frac{1}{j\omega\varepsilon} \frac{\partial H_\emptyset}{\partial z} + \hat{a}_z \frac{1}{j\omega\varepsilon} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho H_\emptyset) \tag{2.16}$$

เมื่อ

$$E_z = -j \frac{\eta I_m}{4\pi} \left(\frac{\exp(-jkR_1)}{R_1} + \frac{\exp(-jkR_2)}{R_2} - 2\cos(kH) \frac{\exp(-jkr)}{r} \right. \tag{2.17}$$

$$E_y = j \frac{\eta I_m}{4\pi y} \left(\frac{z-H}{R_1} \exp(-jkR_1) + \frac{z+H}{R_2} \exp(-jkR_2) - \frac{2zcos(kH)}{r} \exp(-jkr) \right) \tag{2.18}$$

และให้ η เป็นค่าอินทรินซิคอิมพีแดนซ์

2.7 การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไดโพล

จากหัวข้อที่ 2.6 เมื่อสายอากาศเป็นสายอากาศไดโพลที่แผ่พลังงานโดยที่ไม่มีตัวกลาง เมื่อ P นั้นถูกแทนที่ด้วยวัตถุหรือสายอากาศตัวอื่นๆ ซึ่งจะทำให้การแผ่กระจายของกระแสถูกเปลี่ยนรวมถึงรูปแบบการแผ่และค่าความต้านทานของสายอากาศจะถูกเปลี่ยน โดยค่าความอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศที่ถูกวางแทนจุดสังเกตุที่ได้ถูกพิสูจน์ในหัวข้อ 2.6 จะถูกคำนวณซึ่งขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศและค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการเชื่อมต่อร่วมระหว่างจุดป้อนและสายอากาศหรือวัตถุ ณ จุด P โดยจุดป้อนสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$Z_{1d} = \frac{V_1}{I_1} = Z_{11} + Z_{12}\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \tag{2.19ก}$$

$$Z_{2d} = \frac{V_2}{I_2} = Z_{22} + Z_{21}\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \tag{2.19ข}$$

เมื่อ Z_{1d} และ Z_{2d} เป็นค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ตามลำดับซึ่งจะนำมาใช้ในการคำนวณอิมพีแดนซ์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่าง I_1 และ I_2 ค่าอิมพีแดนซ์การเชื่อมต่อร่วมและค่าอิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะทำการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์การเชื่อมต่อร่วม Z_{21} จำเป็นต้องให้กำหนดให้สายอากาศหมายเลข 2 อยู่ในระยะสนามแม่เหล็กของสายอากาศตัวที่ 1 ซึ่งสายอากาศทั้งสองตัวนี้จำเป็นต้องอยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงกัน และให้ระยะห่างจาก dz' บนสายอากาศหมายเลข 2 จากจุดกึ่งกลางของจุดป้อนมีค่าเท่ากับ z' และสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบขนานกับ dz' เป็น E_{z21} และสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จุด dz' จะมีค่าเท่ากับ $E_{zi} = -E_{z21}$ เมื่อสนามมีค่ามากกว่าศูนย์สำหรับตัวนำสมบูรณ์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced electromotive force : EMF) ใน dz' จะมีค่าเท่ากับ $-E_{z21}dz'$ เมื่อจุดกึ่งกลางได้ถูกลัดวงจร (shorted circuit) และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเป็นผลของการไหลของกระแสที่ข้ามผ่านจุดกึ่งกลางดังรูปที่ 2.3

รูปที่ 2.3 การกระจายของกระแสบนสายอากาศไดโพล [19]

รูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นดังสมการ

$$\frac{-E_{z21}dz'}{dI_{sc}} = \frac{V}{I_2(z')}$$

หรือ

$$dI_{sc} = \frac{-E_{z21}dz'}{V} I_2(z') \tag{2.20}$$

กระแสลัดวงจรทั้งหมด (I_{sc}) มีผลทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อยู่ตลอดความยาวสายอากาศสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$I_{sc} = \frac{1}{V}\int -E_{z21}I_2(z')dz' \tag{2.21}$$

และเมื่อเปิดวงจรแรงดันไฟฟ้า (V_{21}) จะมีค่าเท่ากับกระแสที่ถูกลัดวงจรคูณกับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Z_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{21} = I_{sc}Z_2 = \frac{Z_2}{V}\int -E_{z21}I_2(z')dz' \qquad (2.22)$$

เมื่อ $Z_2 = \frac{V}{I_2(0)}$ จะได้

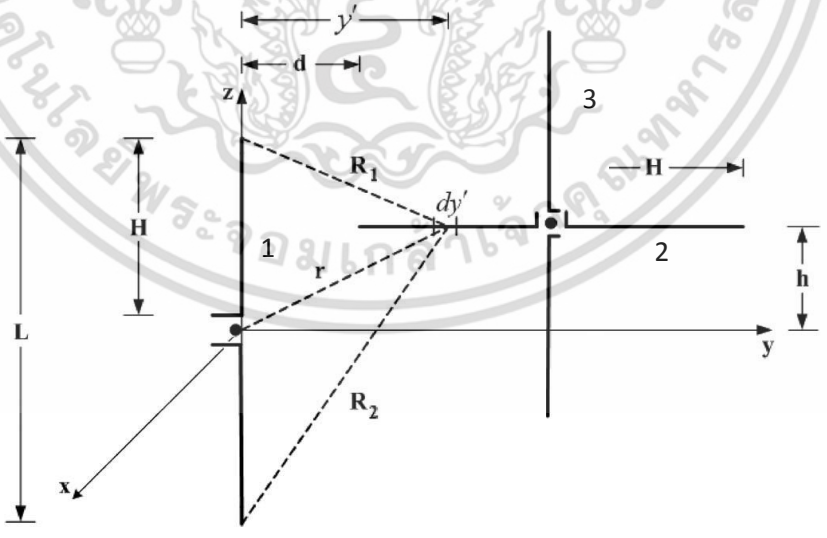
$$V_{21} = \frac{1}{I_2(0)}\int -E_{z21}I_2(z')dz' \qquad (2.23)$$

และเมื่อแทนความสัมพันธ์ระหว่าง $Z_{21} = \frac{V_2}{I_1}\Big]_{I_2=0}$ ลงในสมการที่ (2.23) จะได้

$$Z_{21} = \frac{1}{I_1(0)I_2(0)}\int -E_{z21}I_2(z')dz' \qquad (2.24)$$

จากสมการที่ 2.24 สามารถทราบค่าอิมพีแดนซ์ของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศหมายเลข 1 และ 2 ได้จากการอินติเกรทสนามไฟฟ้าและกระแสที่กระจายอยู่บนสายอากาศหมายเลข 2 เมื่อกระแส $I_1(0)$ และ $I_2(0)$ เป็นกระแส ณ จุดกึ่งกลางของสายอากาศหมายเลข 1 และ 2 ตามลำดับ

2.8 วิธีคำนวนการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศที่วางขนานและตั้งฉากบนผิวของวัตถุ



รูปที่ 2.4 สายอากาศสองตัวที่วางตั้งฉากและขนานกัน

รูปที่ 2.4 แสดงสายอากาศหมายเลข 1 เป็นสายอากาศส่งวางบนแนวแกน z ส่วนสายอากาศหมายเลข 2 คือสายอากาศรับที่วางตั้งฉากกับสายอากาศส่งโดยสายอากาศมีขนาดเท่ากัน และมีระยะ

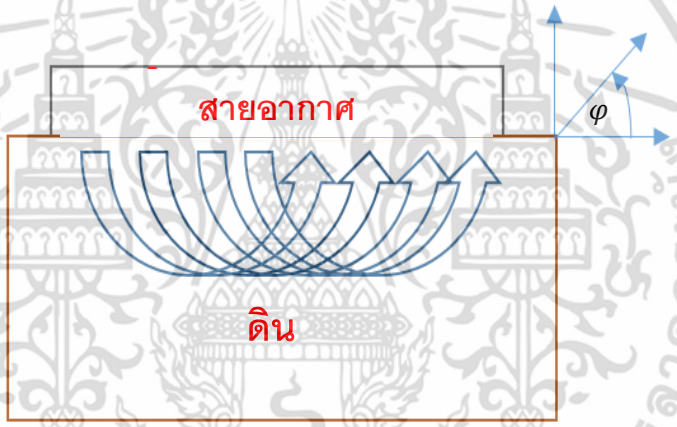
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างสายอากาศทั้งสองตัวห่างเท่ากันเท่ากับ d โดยสายอากาศรับวางสูงขึ้นจากแนวแกน y เป็นระยะ h

สมการแสดงอิมพีแดนซ์ของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ (Z_{21}) สองตัวที่วางตั้งฉากกัน [13] แสดงดังสมการที่ 2.25

$$Z_{21} = \frac{1}{I_1(0)I_2(0)} \left(\int_h^{d+2H} E_{21} I_2(y')dy'\right) \tag{2.25}$$

ε_dเป็นค่าสภาพยอมไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก $I_1(0)$ และ$I_2(0)$เป็นขนาดของกระแสที่กึ่งกลางสายอากาศหมายเลข 1 และหมายเลข 2 โดยมุมφเป็นมุมรอบแกน y ซึ่งงานวิจัยใน [13] เป็นการจุ่มลงในวัสดุมีค่าจาก 0 ถึง 2π



รูปที่ 2.5 สายอากาศที่ถูกวางทาบบนผิวของวัสดุ

เมื่อให้การกระจายของกระแสบนตัวสายอากาศเป็นดังสมการที่ 2.26

$$I_2(y') = \begin{cases} I_m \sin[k(y'-d)], & d < y' < H+d \\ I_m \sin[k(2H+d-y')], & H+d < y' < 2H+d \end{cases} \tag{2.26}$$

เมื่อ I_mเป็นค่ากระแสสูงสุดและ η เป็นค่าอิมพีแดนซ์อินทรินซิกที่ R_1, R_2และ r เป็นระยะทางระหว่างสายอากาศตัวส่งและจุดที่สังเกตุบนสายอากาศรับ

สมการสนามไฟฟ้าระยะใกล้ (E_{21}) ของสายอากาศไดโพลจะแสดงดังสมการ (2.27)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{21} = E_y = j\frac{\eta I_m}{4\pi y}\left(\frac{z-H}{R_1}\exp(-jkR_1) + \frac{z+H}{R_2}\exp(-jkR_2) - \frac{2z\cos(kH)}{r}\exp(-jkr)\right) \quad (2.27)$$

ในการอินทิเกรตของ E_{21}กับ$I_2(y')$สามารถแบ่งผลออกมาเป็น 12 เทอมดังแสดงในสมการที่ 2.28

$$Z_{21} = \sum_{i=1}^{12} A_i \quad (2.28)$$

ได้แสดง A_i ค่าต่างๆในภาคผนวก ก

จากสมการการเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉากของงานวิจัยใน [13] ซึ่งเป็นการวัดโดยการจุ่มเซนเซอร์ลงไปในตัวกลางที่มีความสูญเสีย จึงเป็นการอินทิเกรตมุม φ รอบแกน y แต่ในงานวิจัยชิ้นนี้เป็นการวัดที่ผิวของตัววัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จะสามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้

$$Z_{21} = \frac{1}{I_1(0)I_2(0)}\frac{\left((\int_0^{\pi}\varepsilon_0\varepsilon_d d\varphi + \int_{\pi}^{2\pi}\varepsilon_0 d\varphi)\int_d^{d+2H}E_{21}I_2(y')dy'\right)}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_d} \quad (2.29)$$

เมื่อ ε_dเป็นสภาพยอมสัมพัทธ์ของฉนวน

เมื่อวางเซนเซอร์ไว้ที่ผิวทำให้มุมรอบแกน y ครึ่งหนึ่งเป็นฉนวน ส่วนอีกครึ่งหนึ่งเป็นอากาศจึงสามารถแบ่งเทอมได้เป็นสองเทอมแสดงดังรูปที่ 2.5 ดังนั้นจึงทำให้ผลรวมของ Z_{21}เปลี่ยนไปดังสมการ

$$Z_{21} = \frac{(\varepsilon_d+1)\pi\varepsilon_0}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_d}\sum_{i=1}^{12} A_i \quad (2.30)$$

จากรูปที่ 2.4 แสดงสายอากาศหมายเลข 1 วางขนานกับสายอากาศอากาศหมายเลข 3 โดยมีสายอากาศหมายเลข 1 เป็นตัวส่งและหมายเลข 3 เป็นตัวรับ ในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 2.4 โดยสายอากาศหมายเลข 1 และ 3 มีความยาวของสายอากาศเป็น l_1 และ l_2 ตามลำดับ ซึ่งสายอากาศหมายเลข 3 มีความสูงจากแกน y ระยะ h และมีระยะห่างระหว่างสายอากาศสองตัวเป็นระยะ d ดังนั้นจากสมการหาอิมพีแดนซ์ของการเชื่อมต่อร่วมในกรณีของสายอากาศสองตัวที่วางแบบขนานกัน [20] แสดงดังสมการที่ (2.32) โดยสายอากาศจุ่มลงในตัวกลางที่มีการสูญเสียมุมรอบแกน Z มีค่าเท่ากับ 0 ถึง 2π

$$Z_{21} = \frac{-\eta}{2\pi}\left(\frac{V_{21}}{\sin(kl_1)\sin(kl_1)}\right)\frac{\left(\int_0^{2\pi}\varepsilon_d\varepsilon_0 d\emptyset\right)}{2\pi\varepsilon_d\varepsilon_0} \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ V_{21} เป็นค่าของแรงดันไฟฟ้าที่สายอากาศตัวที่ 3 เมื่อทำการเปิดวงจร ซึ่งจะแสดงดังสมการที่ (2.33)

$$V_{21} = \int_{h}^{L_2+h} E_{z1} I_2 dz + \int_{L_2+h}^{2L_2+h} E_{z1} I_2 dz \qquad (2.33)$$

จากสมการที่ (2.33) เมื่อ E_{z1}เป็นความเข้มไฟฟ้าของสายอากาศที่วาง ณ จุด z บนสายอากาศตัวที่สอง

$$I_2 = \begin{cases} I_m \sin k(z-h) & h < z < L_2 + h \\ I_m \sin k(2L_2 + h - z) & h + L_2 < z < 2L_2 + h \end{cases} \qquad (2.34)$$

เมื่อ I_m เป็นค่ากระแสสูงสุด จากสมการที่ 2.33 สำหรับค่าสนามไฟฟ้าระหว่างสายอากาศสองตัวที่วางขนานกันแสดงดังสมการที่ 2.35

$$E_{z1} = -i\left(\frac{e^{-ikr_1}}{r_1} + \frac{e^{-ikr_2}}{r_2} - 2\cos(kL_1)\frac{e^{-ikr_0}}{r_0}\right) \qquad (2.35)$$

เมื่อ

$$r_0 = \sqrt{d^2 + z^2} \qquad (2.36ก)$$

$$r_1 = \sqrt{d^2 + (l_1 - z)^2} \qquad (2.36ข)$$

$$r_2 = \sqrt{d^2 + (l_1 + z)^2} \qquad (2.36ค)$$

$$Z_{21} = R_{21} + jX_{21} \qquad (2.36ง)$$

แทนสมการที่ (2.36ก)-(2.36ง) ลงในสมการที่ (2.35) จะได้ค่าส่วนจริง (R_{21}) และส่วนจินตภาพ (X_{21}) ของอิมพีแดนซ์การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไดโพลผอมดังแสดงในภาคผนวก ข เมื่อนำสายอากาศไปใช้จุ่มในวัสดุจะต้องอินทิเกรตรอบแกน z ตั้งแต่ 0 ถึง 2π ดังสมการที่ (2.32) ในงานวิจัย [20] แต่เมื่อวัดอิมพีแดนซ์ของการเชื่อมต่อร่วมโดยวางบนผิวของวัสดุทำให้สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (2.37)

$$Z_{21} = \frac{-\eta}{2\pi}\left(\frac{V_{21}}{\sin(kl_1)\sin(kl_1)}\right)\frac{\left(\int_0^{\pi}\varepsilon_0\varepsilon_d d\phi + \int_{\pi}^{2\pi}\varepsilon_0 d\emptyset\right)}{2\pi\varepsilon_0(\varepsilon_d)}$$

$$= \frac{-\eta}{2\pi}\left(\frac{V_{21}}{\sin(kl_1)\sin(kl_1)}\right)\frac{(\varepsilon_d+1)\varepsilon_0\pi}{2\varepsilon_0\varepsilon_d\pi} \qquad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำเซนเซอร์วัดความชื้นดินจะวัดการเชื่อมต่อร่วม ซึ่งหาได้จาก s-parameter ดังนั้นจึงต้องแปลง Z_{21}ให้เป็น $|S_{21}|$ ซึ่งทำได้ตามสมการที่ (2.38)

$$|S_{21}| = \left|\left(\frac{2(Z_0 Z_{21})}{(Z_{11}+Z_0)^2-(Z_{21})^2}\right)\right| \qquad (2.38)$$

เมื่อ

Z_0 มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม

$Z_{11} = R_{11} + jX_{11}$ เป็นค่าอิมพีแดนซ์ประจำตัวของสายอากาศส่ง

2.9 สรุป

ในบทนี้หลังจากกล่าวถึงคุณสมบัติของดินได้แสดงถึงวิธีการคำนวณเมื่อนำสายอากาศไดโพลสองตัวมาวางขนานหรือตั้งฉากกันดังงานวิจัย [13] และ [20] ซึ่งจะเป็นการวางในตัวกลางที่มีการสูญเสีย ส่วนในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการปรับปรุงสมการที่ใช้ในการคำนวณของงานวิจัยทั้งสอง โดยนำมาวางทาบลงบนตัวกลางที่มีความสูญเสีย ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมการที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไดโพลที่วางขนานและตั้งฉากกัน แสดงดังรูปที่ 2.4 และผลที่ได้จากการคำนวณขนาดการเชื่อมต่อร่วมโดยใช้สมการที่ได้ดัดแปลงมาเมื่อวางทาบลงบนตัวกลางที่มีความสูญเสีย ในที่นี้คือดินซึ่งข้อมูลของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดินที่ความชื้นและความถี่ต่างๆที่นำมาใช้ในการคำนวณ ได้มาจากงานวิจัยที่ [17] ซึ่งจะกล่าวถึงผลการคำนวณในบทที่ 3 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

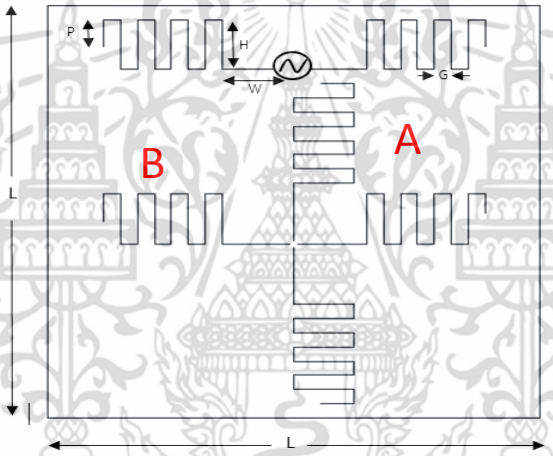
บทที่ 3

ผลการคำนวณและการออกแบบ

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการคำนวณหาค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไดโพลที่วางตั้งฉากและขนานกัน โดยการคำนวณจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเพื่อที่จะได้ผลลัพธ์ออกมาในทางคำนวณก่อนที่จะนำไปสร้างและทำการทดลอง และจะกล่าวถึงการออกแบบตัวเซนเซอร์เพื่อให้มีขนาดเล็กและเหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด

3.2 การออกแบบและโครงสร้างการทำงาน



รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศที่วางตั้งฉากและขนานกัน

ด้วยเหตุผลที่การเชื่อมต่อร่วมที่ความถี่สูงมีค่าต่ำมาก ทำให้ต้องการกำลังที่สูงพอ ในที่นี้จึงเลือกใช้ความถี่ 245 MHz แต่เนื่องจากสายอากาศไดโพลที่ความยาว 0.5λ จะทำให้เซนเซอร์ที่ใช้งานมีขนาดใหญ่มาก ดังนั้นจึงเลือกใช้สายอากาศมีนเดอร์ไลน์ ไดโพล [21] [22]

โดยมีขนาดลดลงเหลือ 0.2λ เท่านั้นทำให้สายอากาศมีขนาดที่สั้นลงทำให้เซนเซอร์มีขนาดเล็กลง รูปที่ 3.1 แสดงเซนเซอร์ที่มีการเชื่อมต่อร่วมแบบขนานและตั้งฉาก ที่ใช้สายอากาศมีนเดอร์ไลน์ ไดโพล มีความสูง (H) เท่ากับ 0.025λ และระยะ G เท่ากับ 0.0084λ

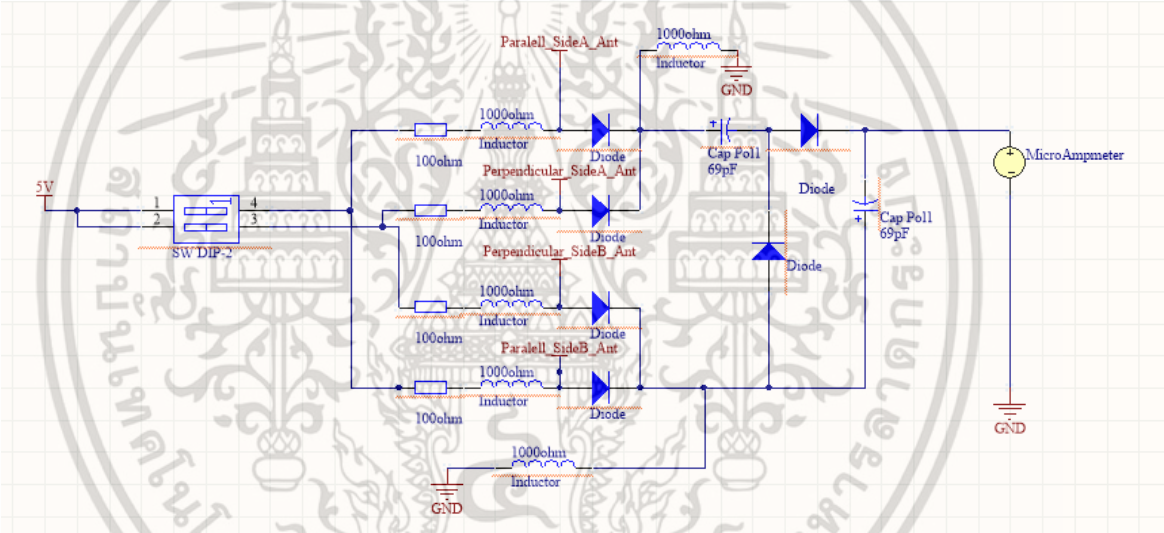
ในที่นี้เราตั้งสมมติฐานว่าสายอากาศมีนเดอร์ไลน์ ไดโพลทำงานเสมือนว่าเป็นสายอากาศไดโพล ซึ่งออกแบบให้สายอากาศ วางบนแผ่นอะคริลิค เนื่องจากลวดทองแดงไม่มีความแข็งแรง โดยมีมิติต่างๆดังแสดงในตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 มิติของสายอากาศมีนเดอร์ไลน์ ไดโพลที่วางบนแผ่นอะคริลิค

Parameters	Dimension (mm)
L	300
P	20
H	30
G	10
W	40

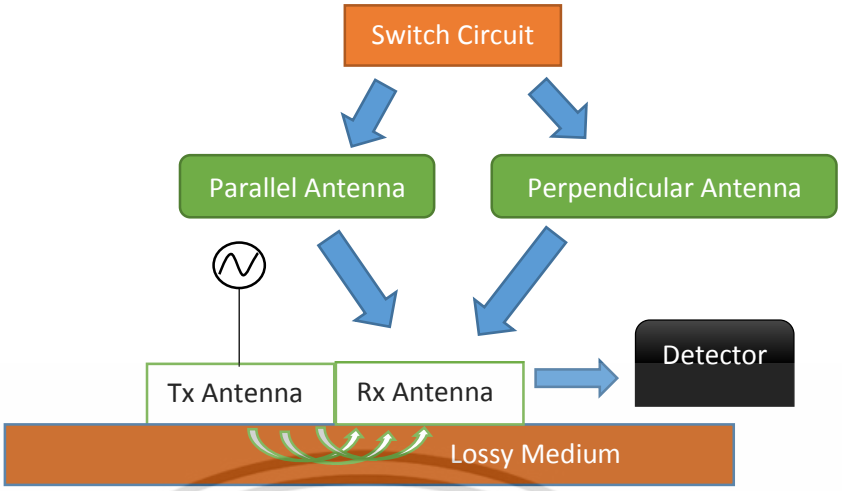
ในการเลือกว่าเป็นการเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉากหรือขนานกับสายอากาศตัวส่ง จะสร้างวงจรสวิตช์เพื่อควบคุมการทำงานของสายอากาศตัวรับ



รูปที่ 3.2 ผังภูมิของวงจรสวิตช์ที่ใช้ควบคุมสายอากาศรับและตัวตรวจจับกำลังงาน

วงจรสวิตช์จะควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อสับสวิตช์เลือกจะทำให้แรงดัน 5 โวลต์ ไหลผ่านไดโอดพินและทำให้ไดโอดพินทำงาน และทำให้สัญญานของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศรับกับส่งไหลผ่านไดโอดพินได้และเข้าสู่วงจรตรวจจับกำลังงาน (Detector) เพื่อวัดค่าของสัญญาณที่รับมาได้จากสายอากาศ โดยตัวเหนี่ยวนำจะทำหน้าที่กันไม่ให้สัญญาณที่รับมาไหลลงกราวน์ ในวงจรตรวจจับกำลังงานซึ่งไดโอดจะกรองสัญญาณทำให้สัญญาณเรียบ ก่อนที่จะใช้ไมโครแอมป์มิเตอร์วัดกระแสที่สัมพันธ์กับการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศรับที่ถูกสวิตช์อยู่ขณะนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



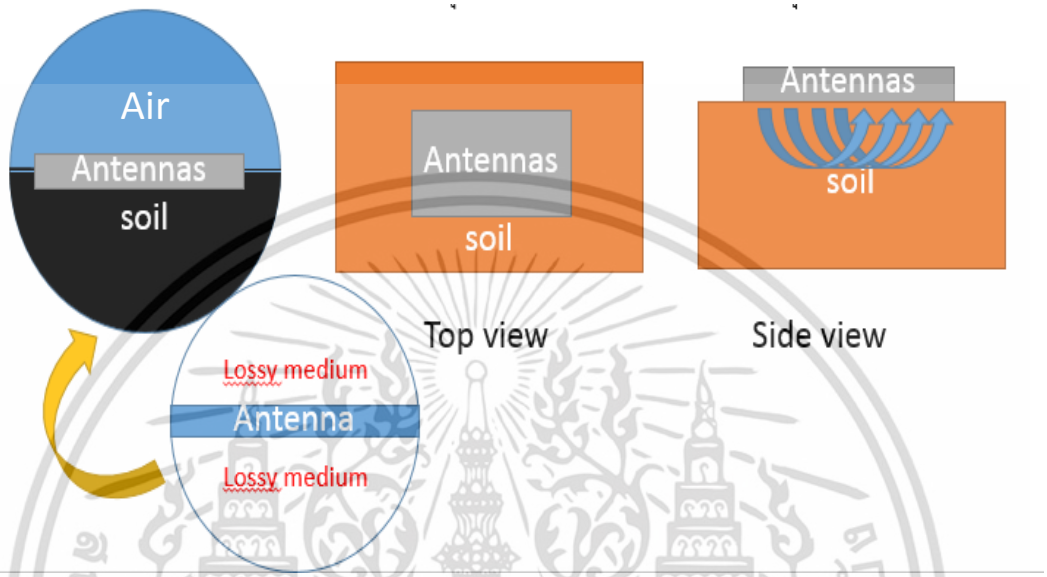
รูปที่ 3.3 ผังภูมิการทำงานของเซนเซอร์

จากผังภูมิในรูปที่ 3.3 เมื่อปล่อยคลื่นความถี่วิทยุในที่นี้ใช้เครื่องวิทยุที่ความถี่ 245 MHz ปล่อยสัญญาณ และวงจรสวิตช์ทำหน้าที่เลือกสายอากาศตัวรับที่วางขนานหรือตั้งฉาก เพื่อรับสัญญาณที่เกิดจากการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศสองตัวที่วางขนานหรือตั้งฉาก ก่อนที่จะวัดค่าสัญญาณจากวงจรตรวจจับสัญญาณ จากหลักการทำงานเมื่อวางสายอากาศไว้ที่ผิวของวัสดุจะทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณหรือมีการสะท้อนของสัญญาณที่มากขึ้น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ ซึ่งเมื่อค่าความชื้นเพิ่มมากขึ้นค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำมีค่าสูงกว่าดินที่แห้งอยู่มาก ดังนั้นจึงสามารถคาดเดาค่าความชื้นของดินที่มีการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบน้ำภายในช่องว่างของดิน ซึ่งจะทำให้ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่วัดได้จากดินที่มีความชื้นหรือมีน้ำภายในช่องว่างของดินเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถสรุปได้ว่าหากว่าค่าความชื้นของดินนั้นสูง ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกก็ควรจะสูงตามเนื่องจากช่องว่างภายในดินจะมีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่เป็นของน้ำอยู่ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

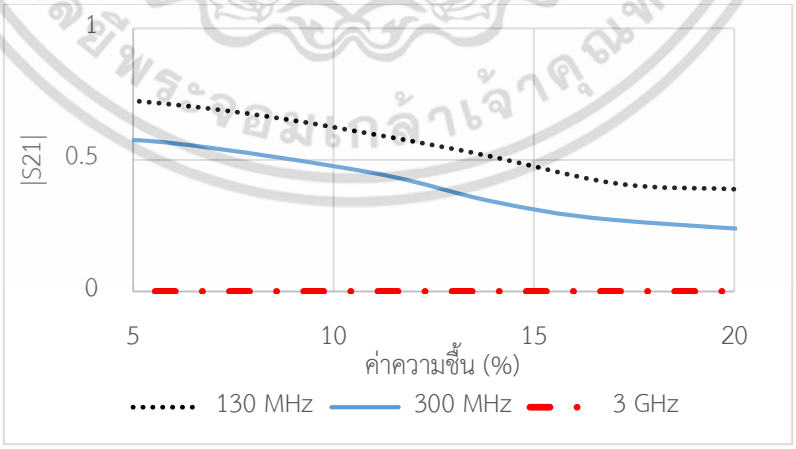
3.3 ผลการคำนวณความชื้น

ในการคำนวณผลนั้นเราจะอ้างอิงค่าไดอิเล็กตริกของดินชนิดต่างๆและความชื้นต่างๆที่ความถี่ต่างๆจากงานวิจัย [17] ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้ดัดแปลงจากงานวิจัย [13] [20] เพื่อให้มีความสะดวกต่อการวัดค่าความชื้นของดินโดยในการคำนวณ จะสมมติให้ค่าความชื้นของดินเท่ากันทั้งหมด



รูปที่ 3.4 ลักษณะการวางสายอากาศที่ทาบบนผิวของดิน

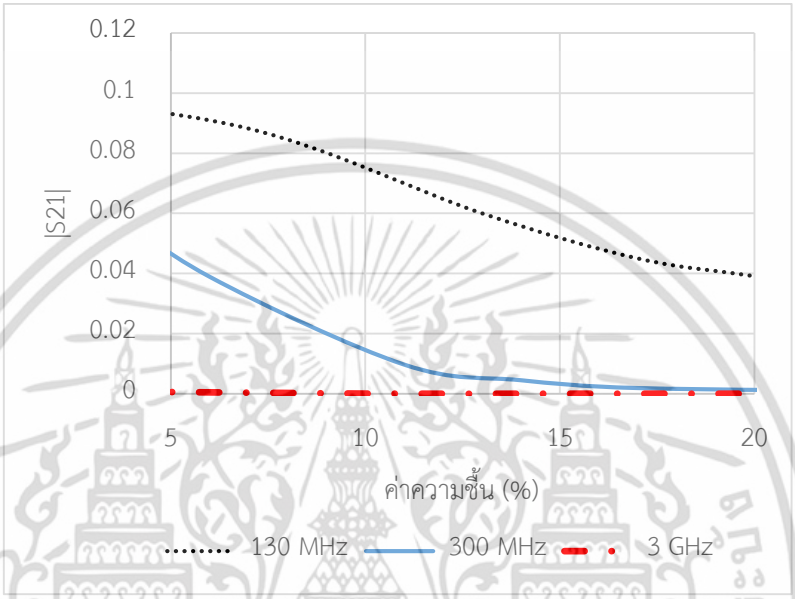
3.3.1 ผลการคำนวณความถี่ที่มีผลต่อความแรงของสัญญาณการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศตั้งฉากและขนาน



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเชื่อมต่อร่วมแบบขนานกับความชื้นของดินที่ความถี่ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 แสดงค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไดโพลแบบขนานที่ความถี่ 130 MHz 300 MHz และ 3 GHz ซึ่งค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่นำมาใช้ในการคำนวณนั้นได้มาจากรูปที่ 2.1 ในบทที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อความชื้นค่อยๆเพิ่มขึ้น ค่าของการเชื่อมต่อร่วมจะมีค่าลดลงและความถี่ที่สูงขึ้น มีผลต่อค่าการเชื่อมต่อร่วม และเมื่อทำการคำนวณผลการเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉาก ทำให้ทราบได้ว่าค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉากมีค่าน้อยกว่าแบบขนานแสดงดังรูปที่ 3.6



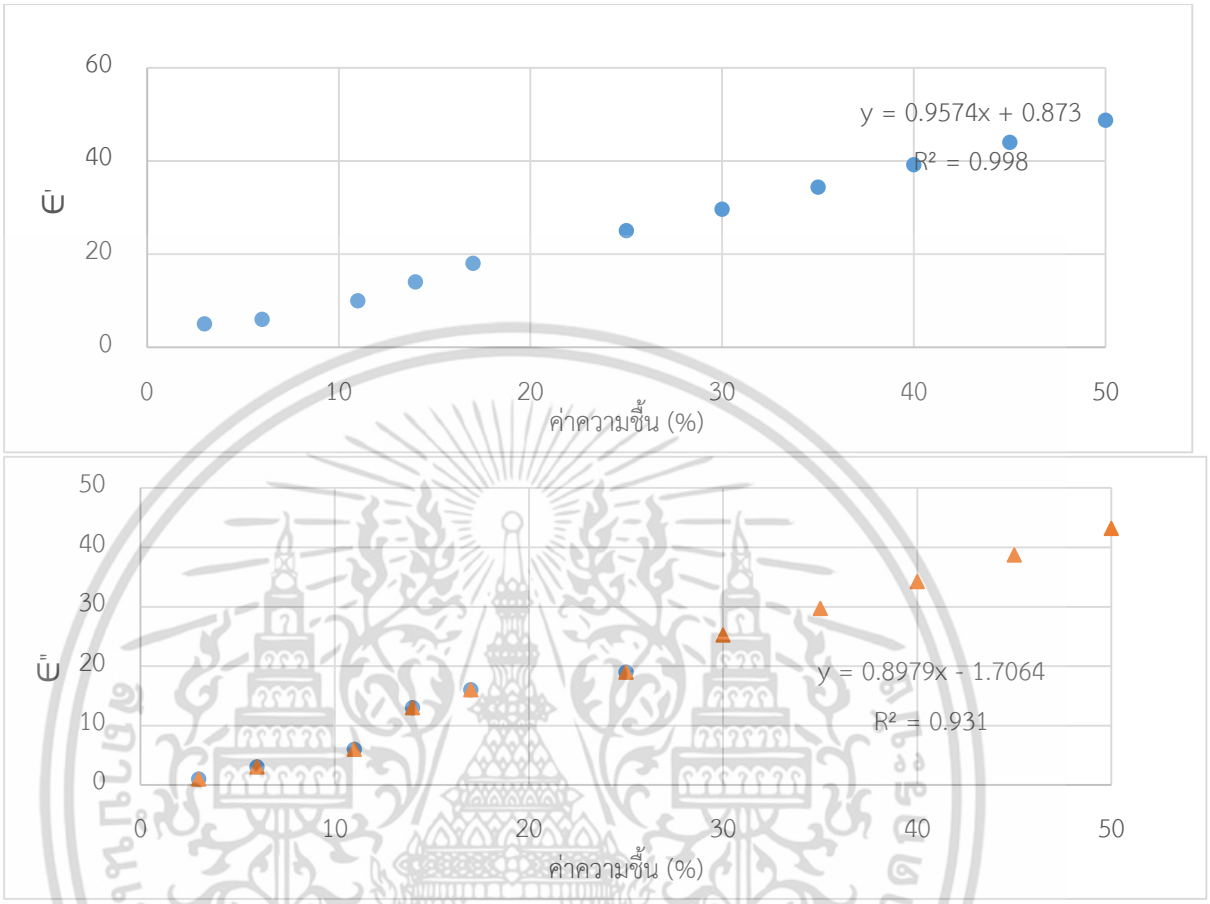
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉากกับความชื้นของดินที่ความถี่ต่างๆ

จากผลการคำนวณจะเห็นแนวโน้มการลดลงของค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไม่ว่าจะเป็นแบบตั้งฉากหรือขนาน จะลดลงตามความชื้นที่เพิ่มขึ้นและยิ่งความถี่ต่ำลงจะเห็นได้ว่าค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไดโพลจะมีค่าสูงขึ้น โดยค่าความถี่ที่สนใจคือ 300 MHz เนื่องจากความถี่ที่ต้องการเลือกใช้งานคือ 245 MHz เพราะสามารถหาตัวส่งสัญญาณได้ง่ายและมีค่าการเชื่อมต่อร่วมที่สูงซึ่งแสดงดังผลการคำนวณ

จากผลการคำนวณข้างต้นสามารถเห็นค่าความชื้นได้เพียง 5 ถึง 20% เท่านั้นจึงมีความต้องการทราบค่าความชื้นที่มากขึ้นว่ายังคงทำให้แนวโน้มที่ได้จากการค่าการเชื่อมต่อร่วมทั้งตั้งฉากและขนานมีค่าที่ลดน้อยลงไปอีกหรือไม่จึงมีความจำเป็นต้องทำการประมาณค่าไดอิเล็กตริกให้เพิ่มต่อไปจนถึง 50% โดยค่าที่ใช้จะเป็นสมการเส้นตรงของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ในส่วนของจำนวณจริงจะมีค่า 0.9574x + 0.873 และค่าไดอิเล็กตริกของส่วนจินตภาพจะมีค่าเท่ากับ 0.8979x – 1.7064 เพื่อที่จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

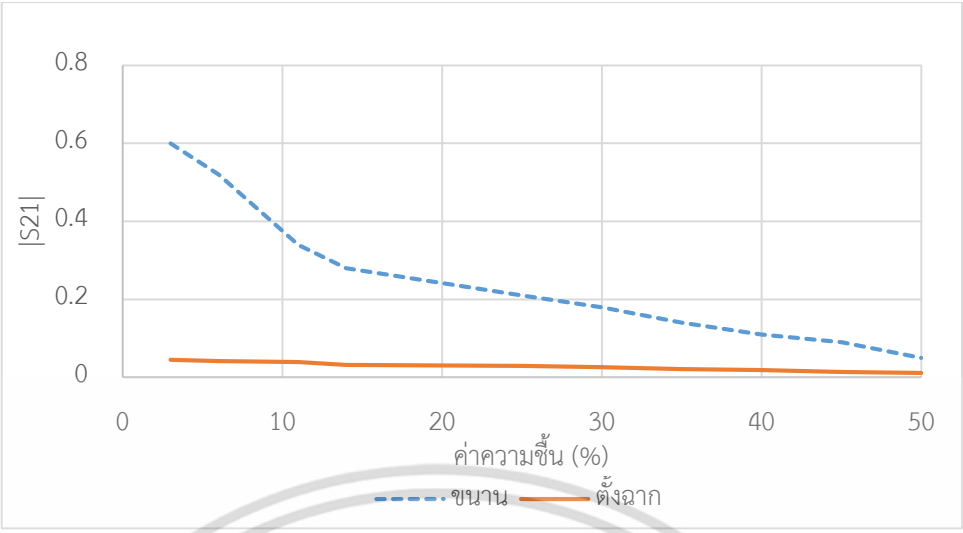
ได้นำมาทำการคำนวณและค่าไดอิเล็กตริกของดินที่สนใจ นำมาใช้ในการคำนวณที่เพิ่มขึ้นนั้นคือค่าของดินอุดมสมบูรณ์ ณ ความถี่ 300 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้สนใจ



รูปที่ 3.7 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดินอุดมสมบรูณ์ ณ ความถี่ 300 MHz

ผลการคำนวณค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไดโพลที่วางขนานและตั้งฉากกัน ณ ความถี่ 300 MHz แสดงให้เห็นว่าค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลแบบตั้งฉากนั้นมีค่าน้อยกว่าการเชื่อมต่อร่วมแบบขนานแสดงดังรูปที่ 3.8

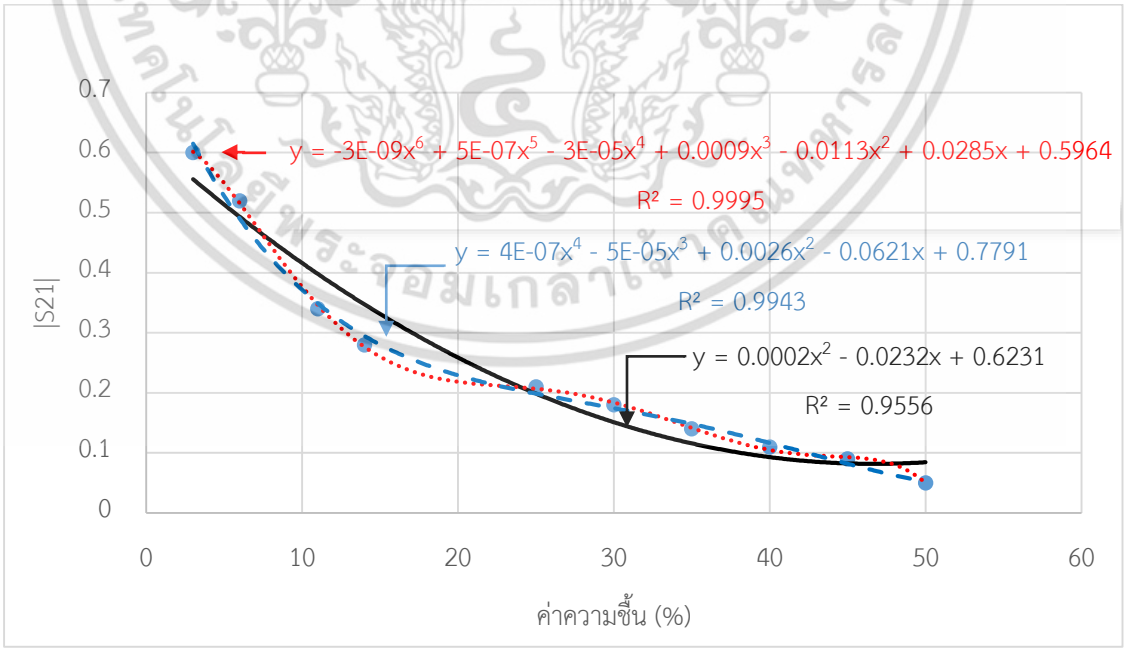
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ผลการคำนวณการเชื่อมต่อร่วมที่ความถี่ 300 MHz ของสายอากาศไดโพลที่วางขนานและตั้งฉาก

3.3.2 แนวคิดในการใช้งานตัวเซนเซอร์ที่ทำการวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วมบนผิวดิน

ในส่วนของแนวคิดการทำงานของตัวเซนเซอร์ เมื่อสามารถทราบค่าการเชื่อมต่อร่วมแล้วจะทำให้สามารถคาดคะเนค่าความชื้นของดินได้ และค่าความชื้นในบางจุดของดินชนิดนั้นๆจะใช้กราฟประมาณค่าเพิ่มเติมในจุดที่ไม่สามารถทราบค่าความชื้นได้ โดยจะเลือกสมการที่ประมาณค่าที่แม่นยำมากที่สุดเพื่อที่ผลลัพธ์ในการคาดคะเนค่าความชื้นจะออกมามีความถูกต้องมากขึ้นแสดงดังรูป 3.10

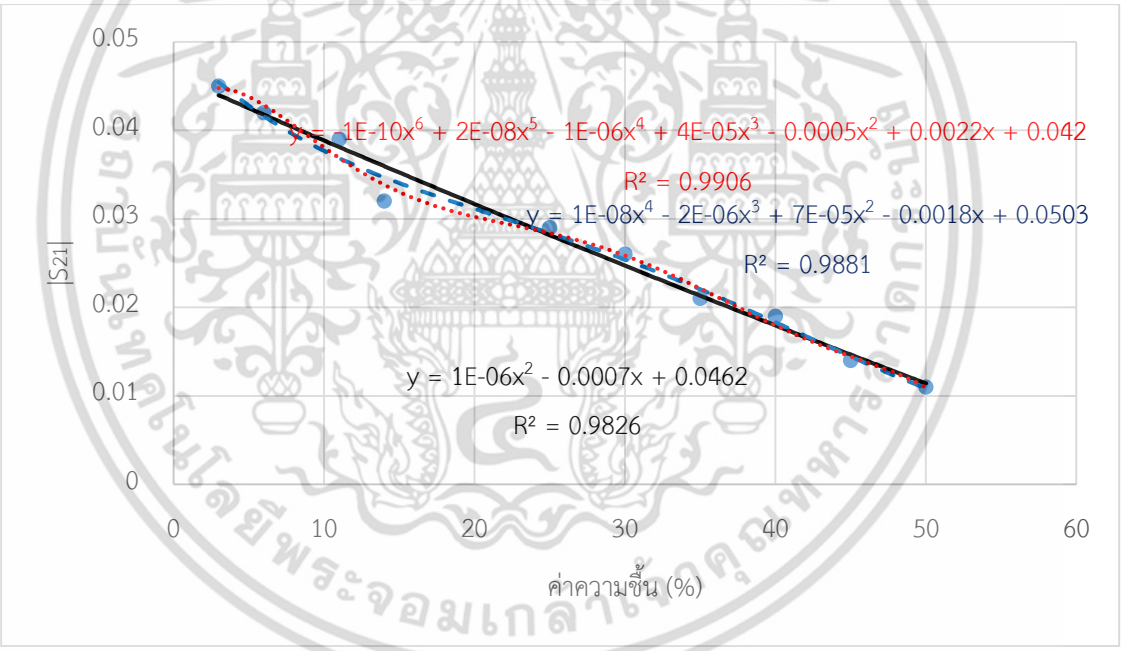


รูปที่ 3.9 การประมาณค่าแบบขนานโดยใช้สมการโพลิโนเมียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 3.9 เส้นจุดแสดงถึงสมการโพลิโนเมียลยกกำลัง 6 เส้นประแสดงถึงสมการโพลิโนเมียลยกกำลัง 4 และเส้นทึกแสดงสมการโพลิโนเมียลยกกำลัง 2

รูป 3.9 แสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อมีการประมาณค่าความชื้นเพื่อให้มีความแม่นยำมากขึ้น จึงได้ใช้สมการโพลิโนเมียลที่มีความแม่นยำสูงสุดซึ่งค่ากำลังของสมการโพลิโนเมียลยิ่งสูงค่าความแม่นยำจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่เนื่องจากลักษณะของเส้นการประมาณค่าของสมการโพลิโนเมียล ยังมีการแกว่ง ซึ่งเมื่อมีการอ่านค่าความชื้นในบางจุดที่อ่านได้จากขนาดของการเชื่อมต่อร่วม จะทำให้เกิดค่าความชื้นที่สามารถอ่านได้สองค่าทำให้ตัดสินใจได้ลำบาก และจากผลการคำนวณค่าต้นค่าความชื้นที่เพิ่มสูงขึ้นค่าการเชื่อมต่อร่วมจะมีค่าที่ลดลงแต่หากใช้การประมาณค่าแบบโพลิโนเมียลแล้ว จะเห็นได้ว่าบางช่วงของกราฟที่ประมาณค่าแบบโพลิโนเมียลมีค่าการเชื่อมต่อร่วมที่เพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้การประมาณค่าไม่มีความถูกต้องและแม่นยำเพียงพอ ในทำนองเดียวกันเมื่อสังเกตุเส้นการประมาณค่าของการเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉาก ก็ยังคงมีความผิดพลาดคล้ายๆกับแบบขนานแสดงดังรูปที่ 3.10



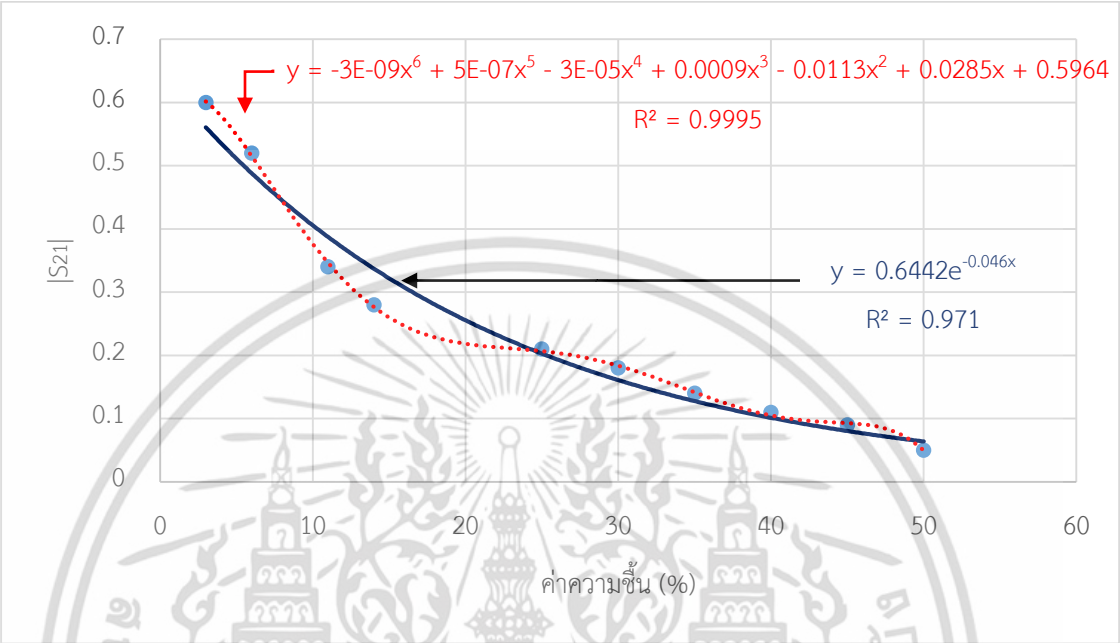
รูปที่ 3.10 การประมาณค่าแบบตั้งฉากโดยใช้สมการโพลิโนเมียล

ในรูปที่ 3.10 เส้นจุดแสดงถึงสมการโพลิโนเมียลยกกำลัง 6 เส้นประแสดงถึงสมการโพลิโนเมียลยกกำลัง 4 และเส้นทึบแสดงสมการโพลิโนเมียลยกกำลัง 2

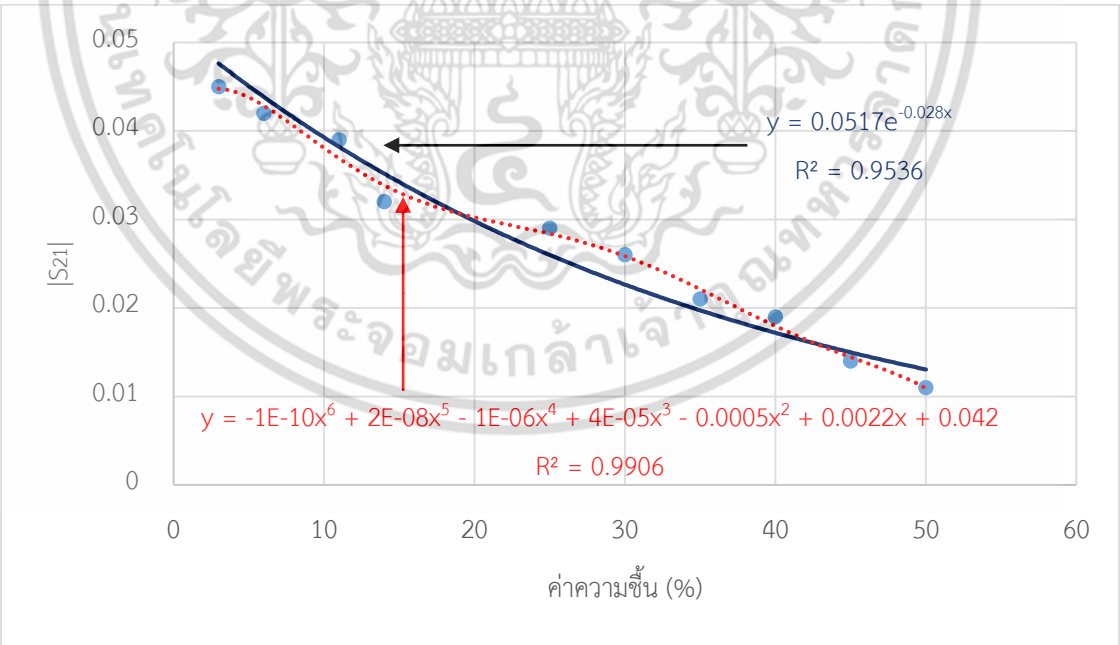
จากผลการประมาณค่าโดยใช้สมการแบบโพลิโนเมียล ทำให้มีความจำเป็นต้องเลือกใช้การประมาณค่า โดยใช้สมการเอ็กซ์โปเนนเชียลแม้จะมีความแม่นยำที่ลดลง แต่การอ่านค่าความชื้นในจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ไม่ได้ทำการคำนวณมีความผิดพลาดเพียงเล็กน้อย และยังมีค่าการเชื่อมต่อร่วมที่ลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณที่ผ่านมาแสดงดังรูปที่ 3.11 และ 3.12



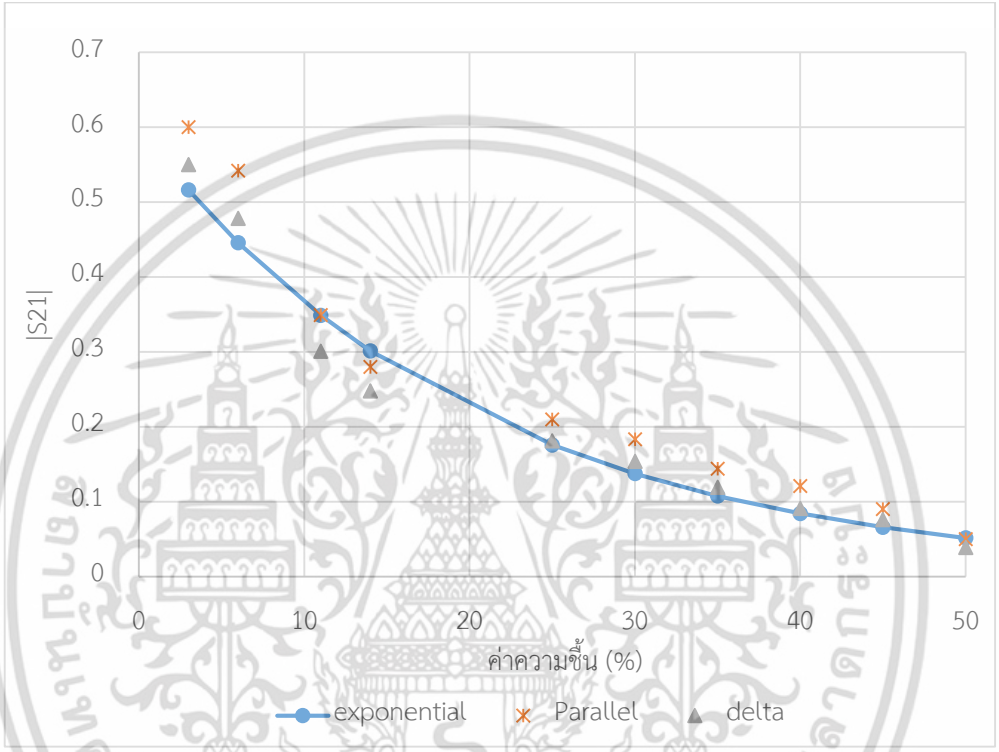
รูปที่ 3.11 กราฟแสดงการประมาณค่าแบบขนานระหว่างสมการโพลีโนเมียลและเอ็กซ์โปเนนเชียล



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงการประมาณค่าแบบตั้งฉากระหว่างสมการโพลีโนเมียลและเอ็กซ์โปเนนเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการคำนวณและนำมาประมาณค่าเพื่ออ่านค่าความชื้นการประมาณค่าแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลจึงมีความเหมาะสมมากกว่าแม้จะมีความแม่นยำน้อยกว่าก็ตาม ดังนั้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำมากขึ้นจึงมีการนำค่าขนานและตั้งฉากมาหาผลต่าง ซึ่งเมื่อนำค่าผลต่างมาใช้ในการหาค่าความชื้นแล้วทำให้การประมาณค่าโดยใช้สมการเอ็กซ์โปเนนเชียล



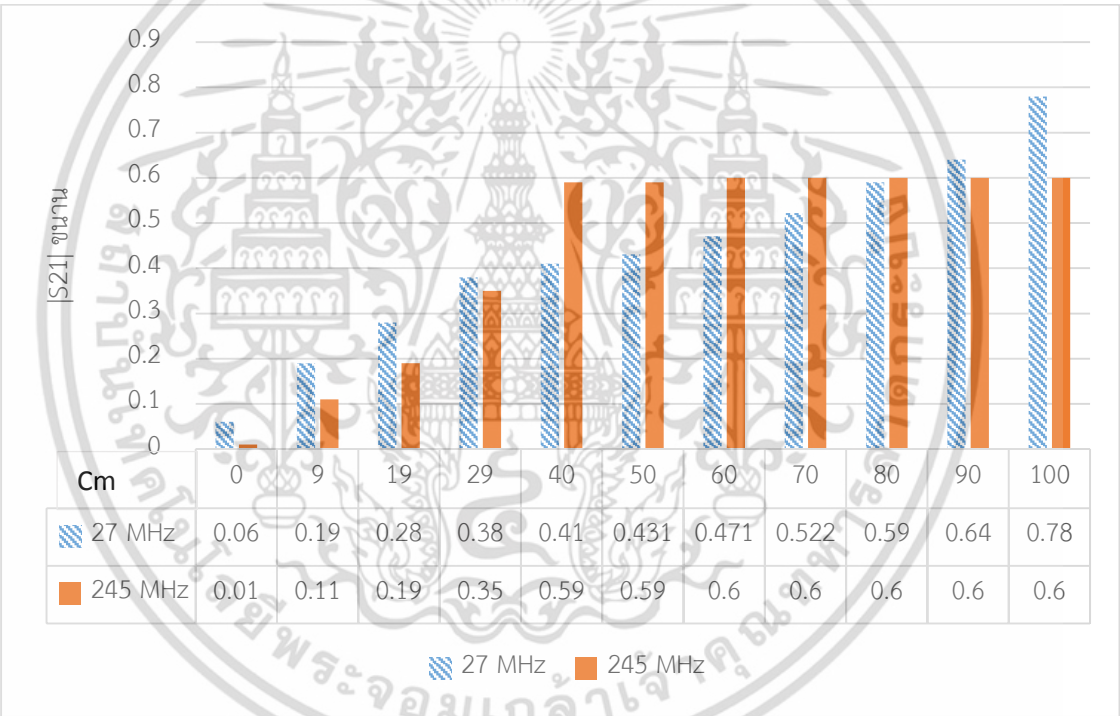
รูปที่ 3.13 ผลการเปรียบเทียบการใช้งานแบบขนานเพียงอย่างเดียวกับแบบผลต่าง

ผลการคำนวณรูปที่ 3.13 แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการคำนวณแบบขนานเพียงอย่างเดียวมีความแม่นยำแต่เมื่อนำการคำนวณของตั้งฉากมาหาผลต่าง แสดงให้เห็นว่าแบบผลต่างมีความแม่นยำที่เพิ่มขึ้น 6% เมื่อใช้การคำนวณแบบตั้งฉากมาหาผลต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ผลการคำนวณความลึกของน้ำในดิน

ผลการคำนวณความลึกจากสายอากาศความถี่ 245 MHz นั้นไม่สามารถที่จะหาน้ำที่ความลึกมากกว่า 40 เซนติเมตรได้ โดยวิธีการคำนวณจะแบ่งชั้นดินเพิ่มเข้าไปในส่วนของสายอากาศที่วางทาบบนผิว ซึ่งในที่นี้ได้เลือกให้ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดินด้านบนมีค่าความชื้น 0 % ซึ่งได้จากงานวิจัย [18] และชั้นดินถัดมาให้เป็นคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำ และเนื่องจากต้องการค่าความถี่ที่ต่ำลงเพื่อเพิ่มระยะความลึกที่คลื่นสามารถเดินทางไปถึงได้ จึงได้เลือกใช้ความถี่ 27 MHz ที่สามารถลงไปได้ลึกมากกว่าความถี่ 245 MHz เนื่องจากสามารถหาเครื่องส่งสัญญาณได้ง่าย และเมื่อทำการคำนวณโดยใช้คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดินอุดมสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.14



Cm	0	9	19	29	40	50	60	70	80	90	100
27 MHz	0.06	0.19	0.28	0.38	0.41	0.431	0.471	0.522	0.59	0.64	0.78
245 MHz	0.01	0.11	0.19	0.35	0.59	0.59	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

รูปที่ 3.14 ผลการคำนวณหาความลึกของน้ำที่ความถี่ 27 MHz และ 245 MHz

รูปที่ 3.14 แผนภูมิแท่งทางด้านซ้ายนั้นแสดงถึงค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศที่ความถี่ 27 MHz และแผนภูมิแท่งทางด้านขวาจะเป็นค่าการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศที่ความถี่ 245 MHz โดยรูปที่ 3.14 นี้ได้แสดงถึงการเชื่อมต่อร่วมเมื่อนำสายอากาศมาวางขนานกันเท่านั้น เนื่องด้วยความยาวของสายอากาศที่ความถี่ 27 MHz หากมีการวางแบบตั้งฉากจะทำให้พื้นที่ในการสร้างเซนเซอร์ใหญ่มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้จากกราฟว่าความถี่ 27 MHz สามารถวัดค่าความลึกสูงสุดได้ประมาณ 100 เซนติเมตรจากผลการคำนวณ ดังนั้นความถี่ที่เหมาะสมต่อการใช้งานในการหาความลึกของน้ำที่อยู่ในดินนั้นควรจะใช้ความถี่ที่ต่ำลงเพื่อทีจะสามารถวัดหาน้ำในดินได้อย่างเหมาะสม

3.5 สรุป

ผลการคำนวณในบทนี้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไดโพลที่วางขนานและตั้งฉากกันกับสายอากาศตัวส่ง ซึ่งแม้ว่าในการทดลองจะเป็นสายอากาศมีนเดอร์ไลน์ ไดโพลแต่เนื่องจากการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศที่วางตั้งฉากและขนานกัน ยังคงมีการส่งผ่านสัญญาณถึงกัน ในลักษณะของสนามระยะใกล้ของสายอากาศทำให้คาดคะเนได้ว่าแนวโน้มเมื่อทำการทดลองจะมีค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศทั้งขนานและตั้งฉากที่ลดลง เมื่อค่าความชื้นของดินเพิ่มขึ้น และทำให้สามารถคาดคะเนค่าความชื้นของดินได้ โดยจะอาศัยวิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง ในทำนองเดียวกับผลการคำนวณคือเมื่อเก็บค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศที่วางขนานและตั้งฉากกันได้แล้ว จะนำค่านั้นมาสร้างเส้นสมการเพื่อคาดคะเนหาค่าความชื้น พร้อมทั้งทดสอบค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นหากมีการวัดค่าความชื้นของดินที่ใช้ค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบขนานหรือตั้งฉากเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

ในบทนี้ได้ทำการทดลองซึ่งสามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนคือ

4.1.1 การทดลองวัดความชื้นดินโดยวัดขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศมีนเดอร์ไลน์ ไดโพลที่วางขนานและตั้งฉากกัน โดยใช้วงจรสวิตช์เพื่อปรับเลือกสายอากาศที่ตั้งฉากหรือขนานในภาครับและจะเป็นการวัดค่าความชื้นของดินเพียงอย่างเดียว

4.1.2 การทดลองวัดความชื้นดินโดยวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วม โดยใช้วงจรสวิตช์วิทยุเพื่อปรับเลือกสายอากาศตั้งฉากหรือขนานในภาครับแบบอัตโนมัติซึ่งจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ทั้งหมด และจะมีการวัดความชื้นและการทดสอบการวัดความลึกที่ความถี่ 245 MHz

4.1.3 การทดลองวัดความชื้นดินโดยวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วม โดยใช้วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ทั้งหมดซึ่งตัวสายอากาศจะถูกยกให้อยู่ห่างจากพื้นดินเพื่อที่จะทำการติดล้อและเพิ่มความสะดวกในการวัดมากยิ่งขึ้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงการเก็บข้อมูลความชื้นและการจัดการทดลองของระบบเพื่อวัดค่าความชื้นในกรณีต่างๆก่อนที่จะนำค่านั้นไปสรุปผลและนำกราฟที่ได้จากการเก็บผลการทดลองมาคาดคะเนความชื้น

4.2 ผลการทดลองการวัดความชื้นของดินโดยการวัดขนาดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศมีนเดอร์ไลน์ ไดโพลที่วางขนานและตั้งฉาก

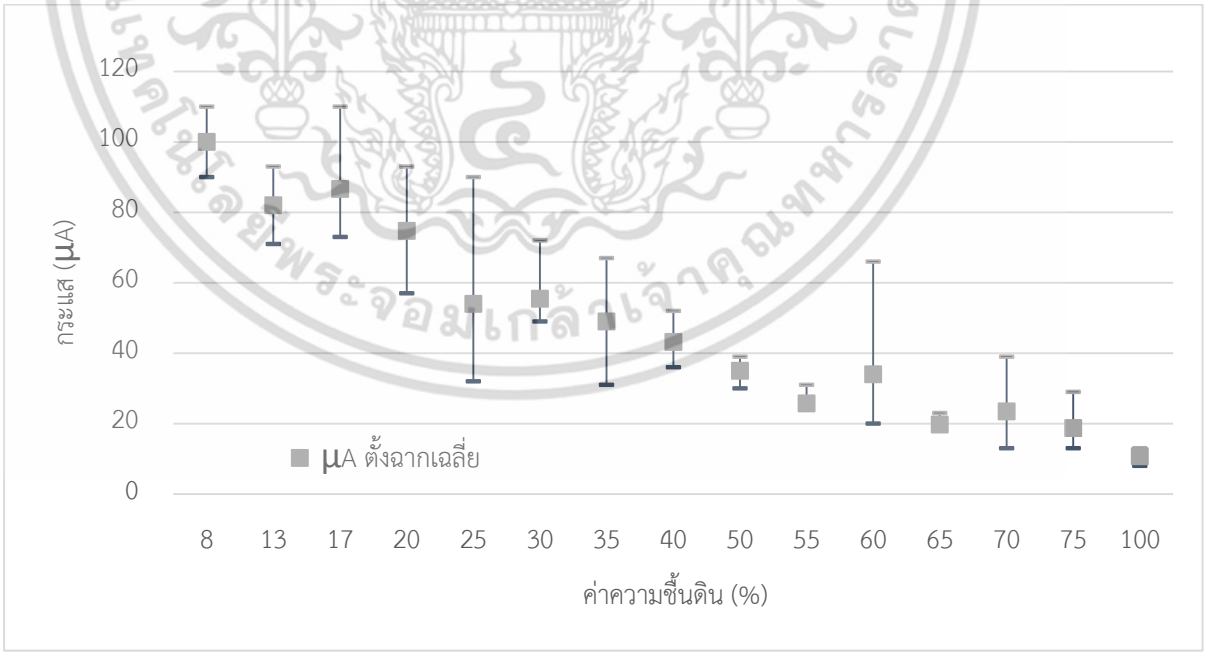
ในการทดลองวัดความชื้นจะเป็นการวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศที่วางตั้งฉากและขนานกัน ค่าที่เก็บมาได้ผ่านตัวตรวจจับนั้นจะมีหน่วยเป็นไมโครแอมป์ และจะวัดเทียบกับค่าความชื้นจากเครื่องมือวัดความชื้นดินแบบปัก (DM-5 Soil tester) ที่สามารถวัดความชื้นของดินด้วยการใช้แผ่นตัวนำ 2 ตัว โดยแผ่นตัวนำทั้งสองตัวถูกสร้างจากอัลลอย์และสังกะสี [23] ซึ่งใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าของไอออนไฮโดรเจนในดินเป็นตัวชี้วัด โดยการวัดจะทำได้โดยกดเพื่ออ่านค่าความชื้นซึ่งสามารถวัดระดับความชื้นได้ตั้งแต่ 0-100% และมีการจุ่มค้างไว้ตลอดการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยเครื่องมือจะเป็นตัวช่วยในการเทียบค่าความชื้นกับค่าที่อ่านได้จากตัวมิเตอร์ เพื่อบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าค่าที่อ่านได้นั้นตรงกับค่าความชื้นเท่าใดก่อนที่จะนำค่านั้นมาทำกราฟที่สามารถคาดคะเนค่าความชื้นของดินที่ตัวเซนเซอร์นี้ได้วางทาบอยู่

รูปที่ 4.1 การทดลองวัดค่าความชื้นโดยการวัดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศมีนเดอร์ไลน์ ไดโพล

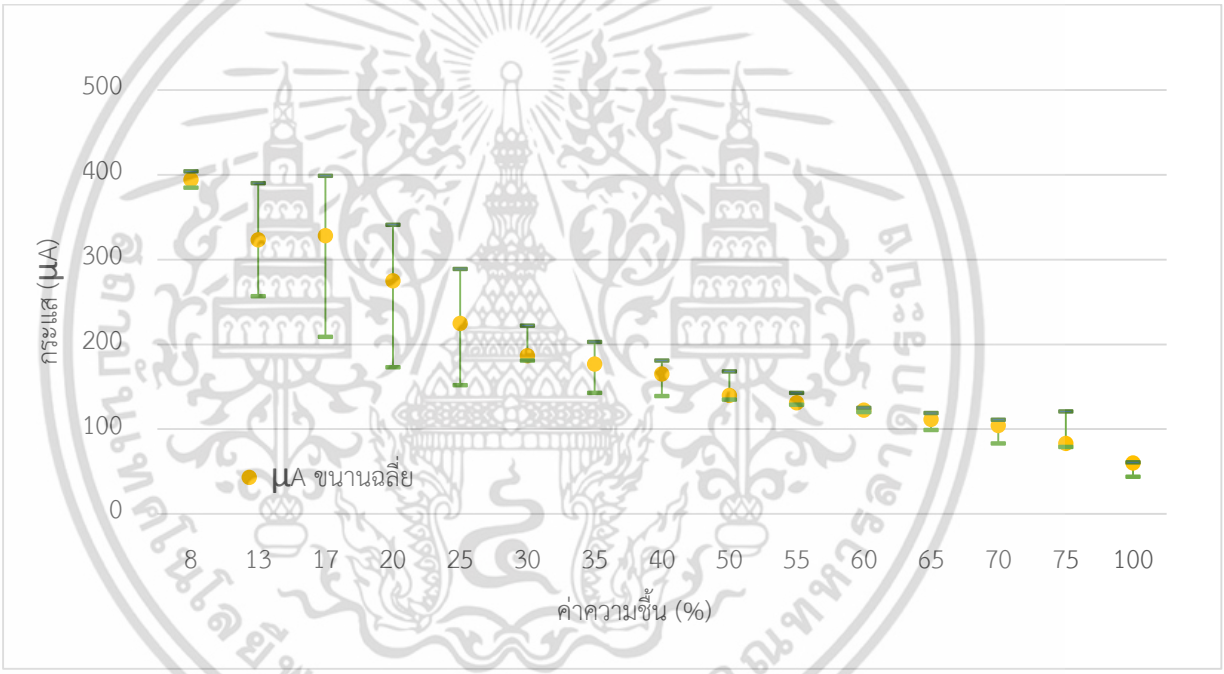
ได้ทำการวัดค่าทุกวันๆละสองครั้ง เพื่อที่จะได้ข้อมูลความชื้นที่มากที่สุดก่อนที่จะนำค่าเหล่านั้นมาเฉลี่ย และสร้างเป็นกราฟคาดคะเนค่าความชื้นโดยกราฟเฉลี่ยความชื้นที่วัดได้และเก็บในแต่ละวัน โดยทำการวัดทั้งหมด 45 ครั้ง โดยจะเก็บค่าความชื้นที่ได้และนำมาแบ่งเป็นกราฟค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศตัวส่งและตัวรับแบบตั้งฉากและกราฟการเชื่อมต่อร่วมแบบขนาน



รูปที่ 4.2 ผลการวัดค่าความชื้นแบบตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าผลจากการวัดสายอากาศที่วางตั้งฉากกันในรูปที่ 4.2 มีช่วงบางช่วงที่รับสัญญาณได้มาก ทั้งๆที่ความชื้นนั้นมีค่าสูงกว่าในจุดที่มีค่าความชื้นต่ำกว่า โดยสันนิษฐานได้ว่าอาจจะเป็นส่วนของการออกแบบที่ส่งสัญญาณไปยังสายอากาศตัวส่งนั้น มีการขยับเขยื้อนทำให้ค่าที่ได้นั้นมีการแกว่งไปมา ซึ่งหลังจากรวบสายอากาศของสายส่งสัญญาณให้แน่นแล้วนั้นผลปรากฏว่าค่าที่ได้มีการแกว่งที่น้อยลงแต่ยังคงมีการแกว่งบ้างซึ่งเมื่อมีการนำมาเฉลี่ยดังจุดสี่เหลี่ยมสีเทาในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ชัดเจนว่าค่าการเชื่อมต่อร่วมที่วัดมีการลดลงเมื่อค่าความชื้นเพิ่มขึ้น แม้ว่าจะมีการวัดซ้ำหลายครั้งแต่ค่าที่ได้ส่วนใหญ่ในช่วงความชื้นเดิมนั้นยังคงมีความใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยที่รับได้ โดยเฉพาะความชื้นที่สูงๆ



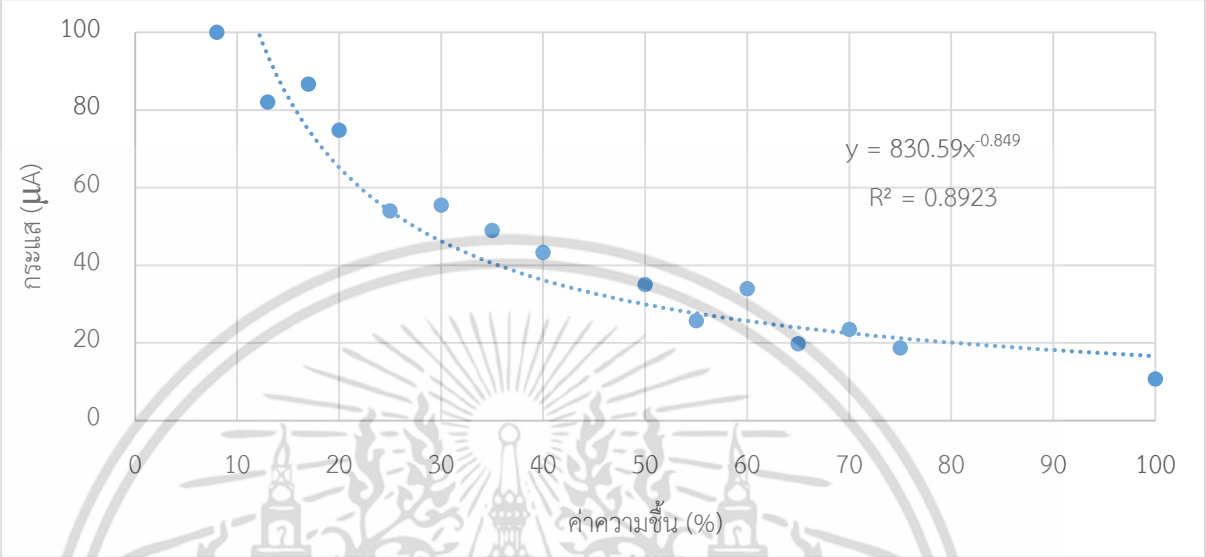
รูปที่ 4.3 ผลการวัดค่าความชื้นแบบขนาน

ผลการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบที่สายอากาศตัวส่งและตัวรับวางขนานกันนั้น จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าการอ่านค่าที่ได้จากการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศที่วางตั้งฉากกัน ซึ่งเป็นไปตามผลการคำนวณ ทำให้แม้ว่าจะมีการแกว่งของสัญญาณในบางช่วงความชื้นและปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งอาจเกิดจากความเรียบของพื้นผิวที่ทำการวัดทำให้ค่านั้นมีค่าที่สูงในบางช่วง และไม่เป็นไปตามผลการคำนวณ เช่นเดียวกันกับผลการทดลองวัดค่าความชื้นแบบตั้งฉาก

เมื่อนำค่ามาเฉลี่ยแล้วจะสามารถเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อค่าความชื้นนั้นเพิ่มสูงขึ้นค่าที่ได้จากการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศในทั้งสองกรณี มีการลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นไปตามผลการคำนวณ ทำให้สามารถนำกราฟที่ได้จากการทดลอง สร้างเป็นเส้นสมการเพื่อคาดคะเนค่าความชื้นโดยอาศัยจุด

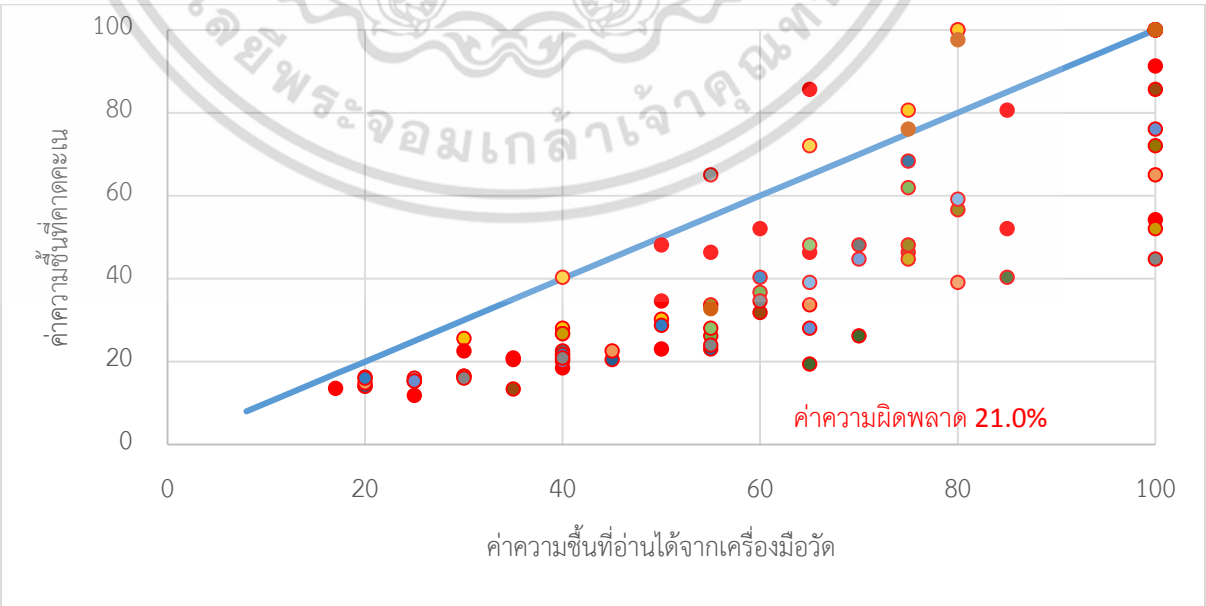
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ได้จากการเฉลี่ยของการวัดทั้งหมด 45 ครั้ง เพื่อทำการทดสอบความแม่นยำในการคาดคะเนและพิสูจน์แนวคิดการที่จะนำค่าผลต่างระหว่างค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบขนานและแบบตั้งฉากว่า มีความแม่นยำเพิ่มขึ้นหรือไม่



รูปที่ 4.4 เส้นสมการที่คาดคะเนค่าเฉลี่ยของการทดลองแบบตั้งฉาก

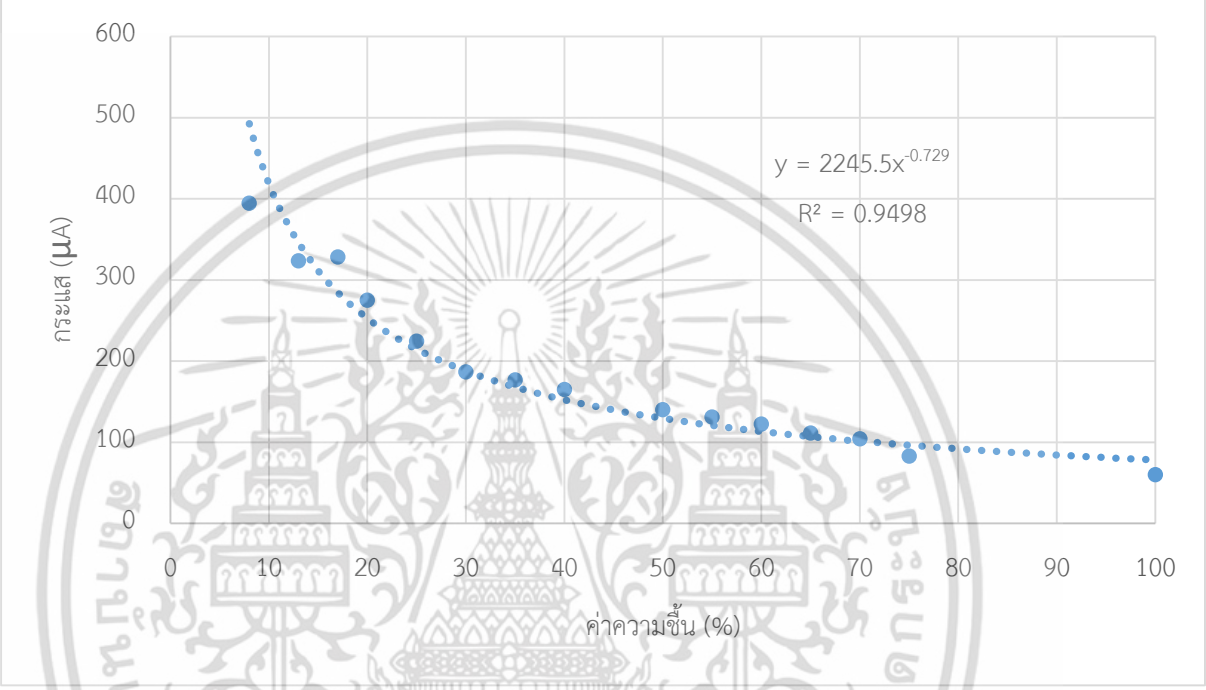
เส้นที่ใช้คาดคะเนของผลการทดลองการเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉากคือ $830.59\boldsymbol{x}^{-0.849}$ ซึ่งเมื่อได้เส้นสมการที่สามารถคาดคะเนความชื้นได้แล้วก็จะทำการวัดซ้ำเพื่อดูประสิทธิภาพความแม่นยำในการวัดแบบตั้งฉากเพียงอย่างเดียวแสดงดังรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการวัดแบบตั้งฉากเพียงอย่างเดียวจุดที่เกิดจากการวัดทั้งหมดนั้น อยู่ห่างจะเส้นอ้างอิงอยู่ในหลายๆจุด ซึ่งเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์มีค่าความผิดพลาดถึง 21%



รูปที่ 4.5 แสดงผลการวัดแบบตั้งฉากเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นหลังจากนำกราฟที่คาดคะเนค่าความชื้น ไปทำการทดสอบประสิทธิภาพการวัดการเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉากเพียงอย่างเดียว อาจมาจากค่าความคาดเคลื่อนระหว่างจุดที่วัดได้และความคาดเคลื่อนของการวัดซ้ำที่มาจากพื้นผิวของดินที่ไม่เรียบ และจากกราฟค่าเฉลี่ยที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดที่กว้างมากในบางช่วงความชื้น ซึ่งทำให้ยากต่อการที่จะวัดค่าให้แม่นยำเมื่อใช้เพียงการวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วมเพียงอย่างเดียว

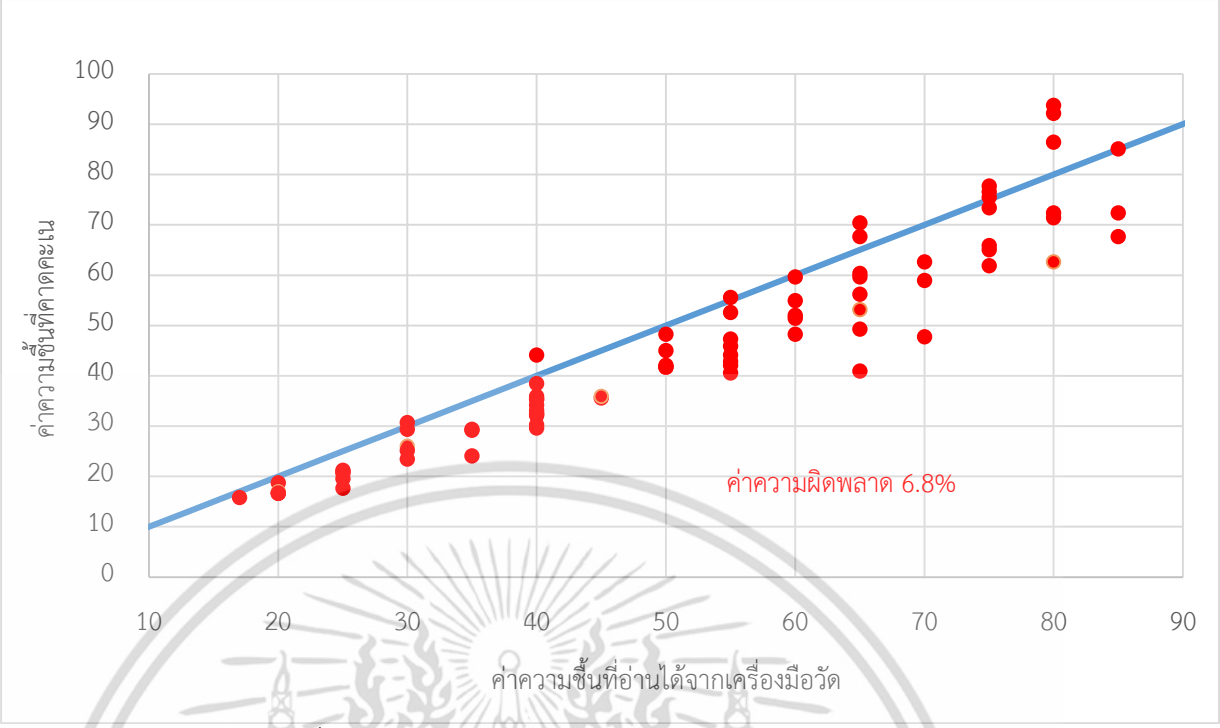


รูปที่ 4.6 เส้นสมการที่คาดคะเนค่าเฉลี่ยของการทดลองแบบขนาน

ในรูปที่ 4.6 สามารถทำเส้นสมการที่มีความใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่ที่ได้ โดยสมการที่ใช้คือ $2245.5\boldsymbol{x}^{-0.729}$ เป็นเส้นที่นำมาคาดคะเนค่าความชื้น ในทำนองเดียวกันกับการวัดแบบตั้งฉากก่อนที่จะนำไปพิสูจน์ค่าความแม่นยำ ที่ได้จากการคาดคะเนค่าความชื้น

เมื่อวัดซ้ำเพื่อหาประสิทธิภาพของการคาดคะเนความชื้นแบบขนานเพียงอย่างเดียว ซึ่งเมื่อทำการวัดค่าความชื้นจากเส้นคาดคะเนความชื้นเทียบกับเครื่องมือวัดความชื้นแบบปักลงไปในดิน จะเห็นได้ว่ายังคงมีความผิดพลาดในหลายๆช่วงความชื้น แม้ว่าเส้นที่คาดคะเนค่าความชื้นจะมีความใกล้เคียงกับจุดเฉลี่ยของค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบขนาน จะมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 6.8 % ซึ่งผลที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

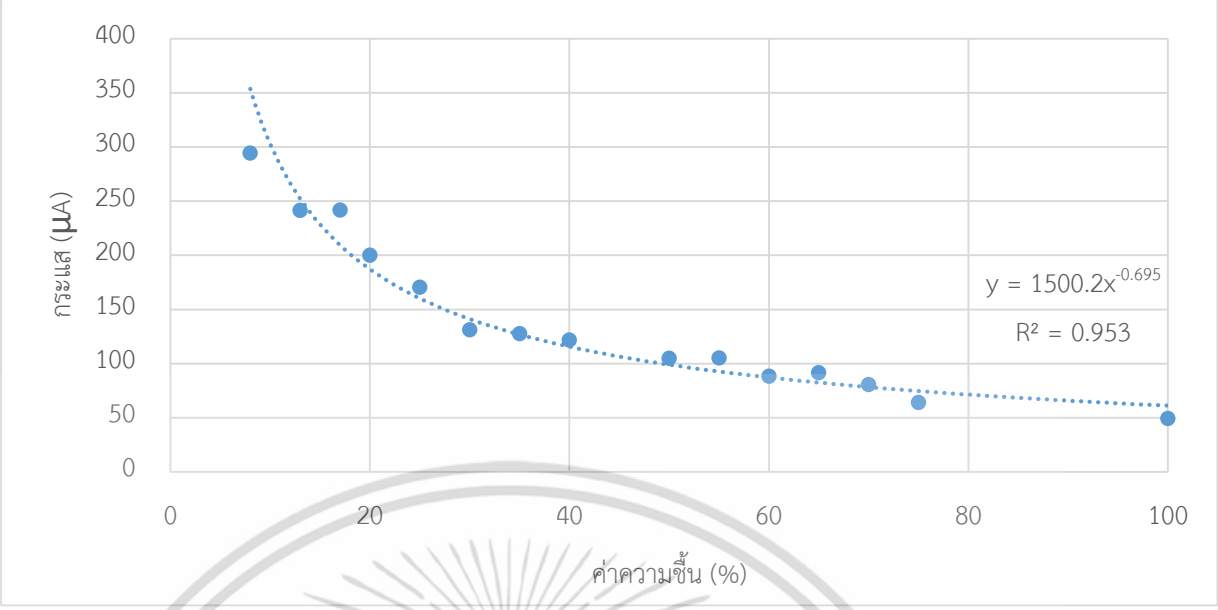


รูปที่ 4.7 แสดงผลการวัดแบบขนานเพียงอย่างเดียว

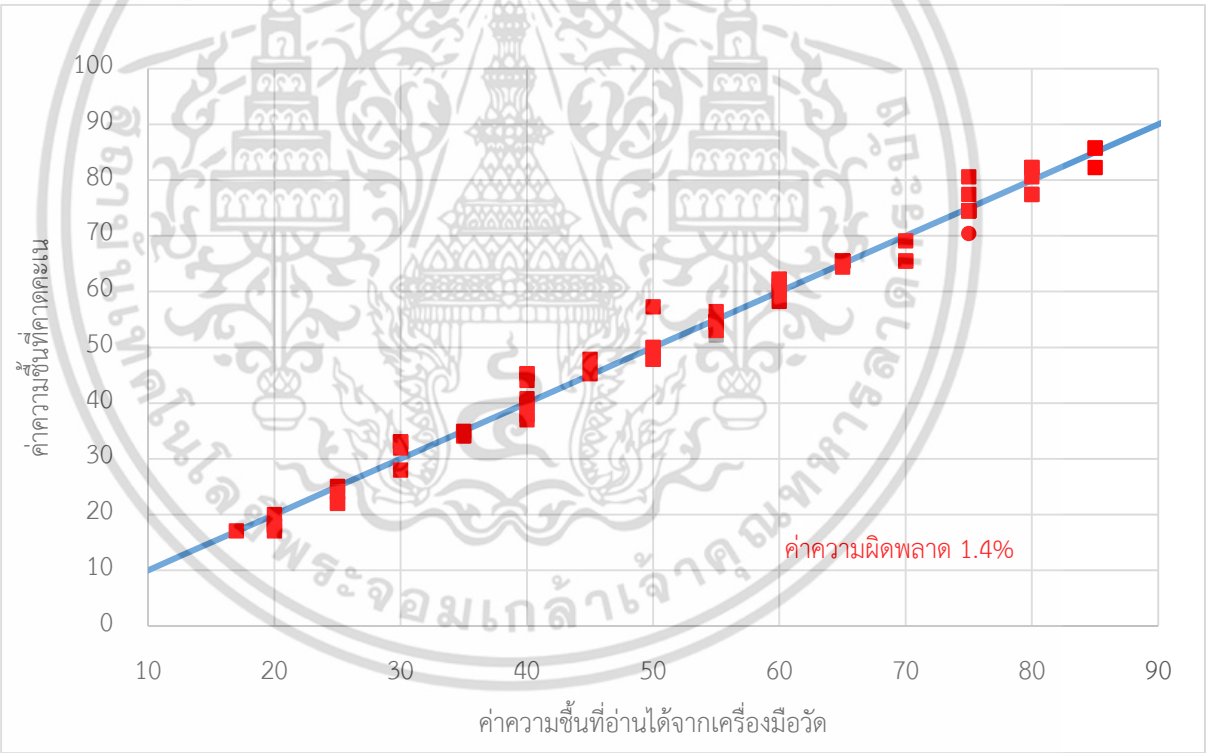
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดลอง การวัดแบบตั้งฉากในผลการคำนวณก็ยังคงมีค่าความผิดพลาดที่มากกว่า เมื่อเทียบกับการวัดแบบขนานเพียงอย่างเดียว แต่ผลการคำนวณแบบขนานก็ยังคงมีค่าความผิดพลาด เพราะฉะนั้นในการคำนวณ จึงมีการนำค่าการเชื่อมต่อรวมของการวัดค่าความชื้นของดินเมื่อสายอากาศตัวรับและตัวส่งวางตั้งฉากและวางขนานกันมาลบกันเพื่อหาผลต่าง เพื่อช่วยในการลดค่าความผิดพลาดซึ่งส่งผลให้ค่าความผิดพลาด

ในการคำนวณค่าความผิดพลาดลดลง 6% ดังนั้นจึงนำมาใช้กับการทดลองเพื่อทดสอบว่าผลต่างที่ได้นั้น จะมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับการคำนวณหรือไม่ โดยการนำค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉากมาทำการหาผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบขนาน ซึ่งผลที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยและจะนำไปสร้างเส้นสมการ เพื่อคาดคะเนค่าความชื้นจากจุดค่าเฉลี่ยของผลต่างการเชื่อมต่อร่วมของทั้งสองกรณี เส้นสมการที่นำมาคาดคะเนค่าความชื้นของผลต่างระหว่างการเชื่อมต่อร่วมของทั้งสองกรณี จะเห็นได้จากรูปที่ 4.8 ว่ามีความแม่นยำเพิ่มขึ้นมาจากแบบขนานเพียงอย่างเดียวเล็กน้อยและมีสมการคือ $1500.2x^{-0.695}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 เส้นสมการที่คาดคะเนค่าเฉลี่ยของการทดลองโดยใช้ผลต่าง

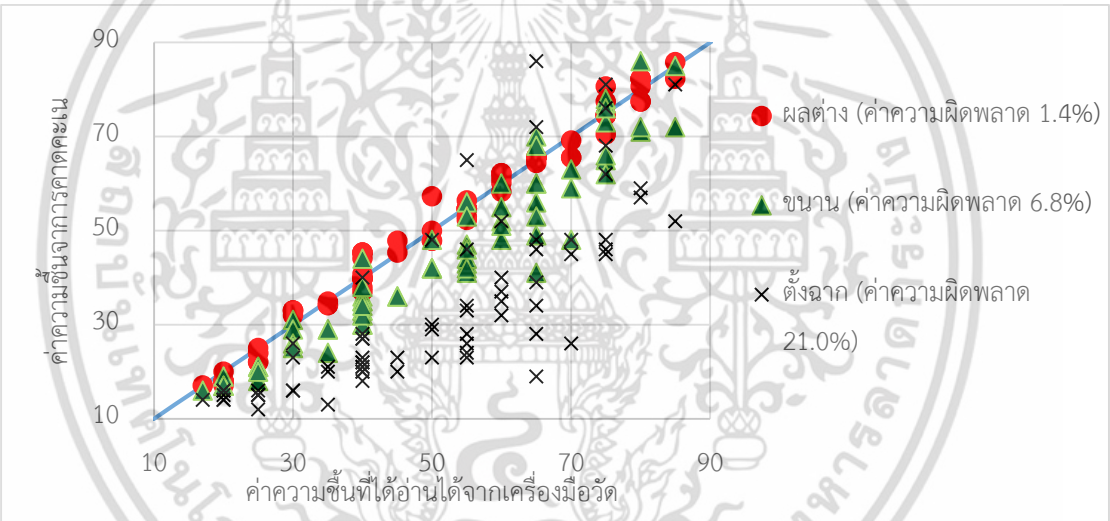


รูปที่ 4.9 แสดงผลการวัดแบบผลต่างระหว่างขนานและตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองเพื่อหาความแม่นยำของการวัดโดยใช้ผลต่างระหว่างการเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉากและผลต่างการเชื่อมต่อร่วมแบบขนานนั้นว่าให้ผลเป็นทำนองเดียวกับการคำนวณหรือไม่ ซึ่งผลแสดงดังรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองซ้ำโดยการเปรียบเทียบระหว่างกราฟที่ใช้คาดคะเน เมื่ออ่านค่าจากตัวเซนเซอร์กับค่าความชื้นที่อ่านได้จากเครื่องวัดความชื้นดินแบบปัก จะมีค่าความผิดพลาดเพียง 1.4% ซึ่งลดลงจากการวัดโดยใช้การเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉากหรือการวัดการเชื่อมต่อร่วมแบบขนานเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นไปตามการคำนวณ จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวเซนเซอร์นี้มีความเหมาะสมในการวัดค่าโดยใช้ผลต่างระหว่างตั้งฉากและขนาน เพราะมีความแม่นยำมากกว่า

รูปที่ 4.10 รวมผลการทดลองทั้งสามที่กล่าวมาซึ่งเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจน แต่ในการทดลองในหัวข้อ 4.2 นี้ยังมีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการขยับของสายสัญญาณ จึงทำให้ค่าที่ได้ออกมายังมีความแม่นยำไม่มากพอ และได้ทำการทดลองเพิ่มเติม โดยเพื่อความสะดวกในการวัดพื้นที่บริเวณกว้างจึงมีการนำมาติดล้อ เพื่อทำการวัดค่าที่ได้เพื่อความสะดวกในการวัดและเก็บค่า

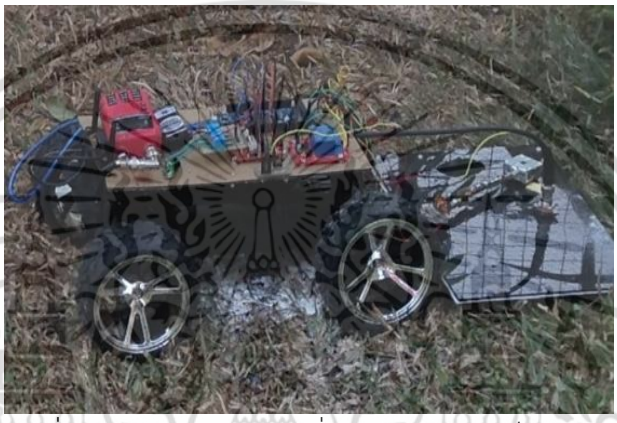


รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดที่ได้จากการคาดคะเนความชื้นทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลองการวัดความชื้นโดยการวัดขนาดของการเชื่อมต่อร่วมโดยการปรับสายอากาศรับแบบอัตโนมัติ

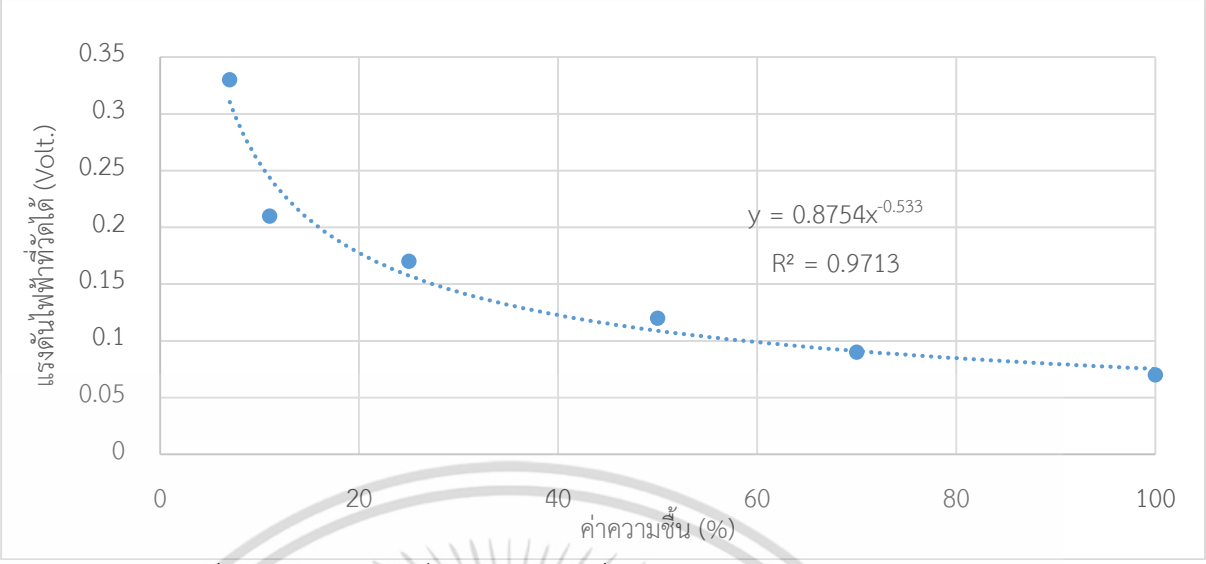
แนวคิดในการทำการทดลองที่สองคือ ต้องการให้สะดวกในการวัดในระยะไกลๆ โดยไม่จำเป็นต้องเดินตามจุดที่วัดและทำให้เครื่องเซนเซอร์มีความเสถียรมากขึ้น และมีการวัดที่ให้ผลที่แม่นยำมากขึ้น โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ามาควบคุมการสับสวิตช์ระหว่างการวัดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศที่วางขนานและตั้งฉากกับสายอากาศตัวส่ง โดยในส่วนของการทดลองนี้ ส่วนแรกได้มีแนวคิดที่จะทำการติดล้อเพื่อความสะดวกในการใช้งานแสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 เซนเซอร์ติดล้อเพื่อสะดวกต่อการเก็บข้อมูล

โดยการเก็บผลการทดลองยังคงมีการทำในแบบเดิมคือ มีการวัดเทียบกับเครื่องมือวัดค่าความชื้นแบบปัก จากนั้นทำการอ่านค่าจะตัวตรวจจับสัญญาณแบบกำลัง ที่แปลงสัญญาณวิทยุเป็นสัญญาณไฟตรง และค่าที่ได้จะถูกนำมาทำการพล็อตกราฟและสร้างเส้นคาดคะเนขึ้นก่อนที่จะทำการทดสอบวัดค่าความชื้นอีกครั้ง โดยจะเห็นแนวโน้มที่ได้นั้นเป็นในทำนองเดียวกันกับการวัดค่าในการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 จึงเลือกใช้ค่าจากกราฟผลต่างระหว่างการวัดแบบตั้งฉากและขนานเลย โดยค่าที่ได้จะทำการเก็บข้อมูลใส่ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ก่อนที่จะส่งข้อมูลผ่านวงจรส่งผ่านความข้อมูลที่ความถี่ 433 MHz ซึ่งข้อมูลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



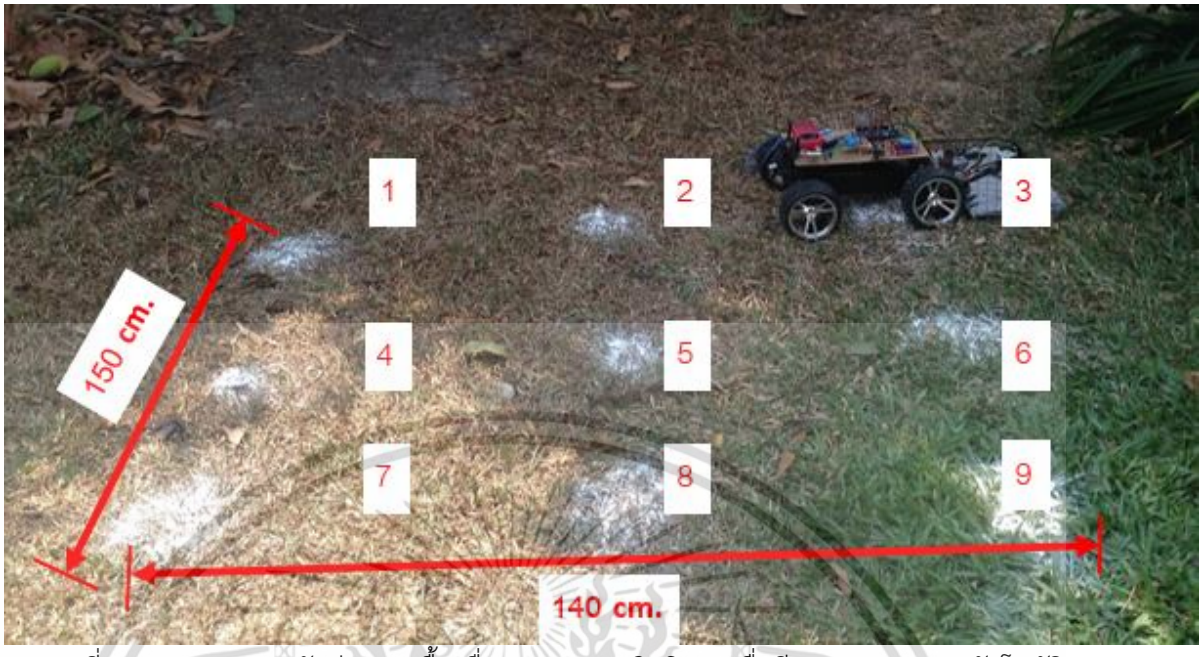
รูปที่ 4.12 เส้นสมการที่คาดคะเนค่าเฉลี่ยของการทดลองโดยใช้ผลต่าง

จากนั้นได้มีการออกแบบตำแหน่งในการวัดเป็นบริเวณที่กว้างขึ้นทั้งหมด 9 จุดเพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของการคาดคะเนค่าที่ได้รับ โดยรับค่าความชื้นมาและเปรียบเทียบกับเครื่องวัดค่าความชื้นดินแบบปักโดยพื้นที่ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.13 และทำการวัดค่า เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการวัดค่าความชื้นเทียบกับการวัดโดยใช้เครื่องวัดค่าความชื้นแบบปักลงไปในดิน ผลที่ได้นั้นไม่มีความแม่นยำพอที่จะนำตัวเซนเซอร์ไปใช้งาน

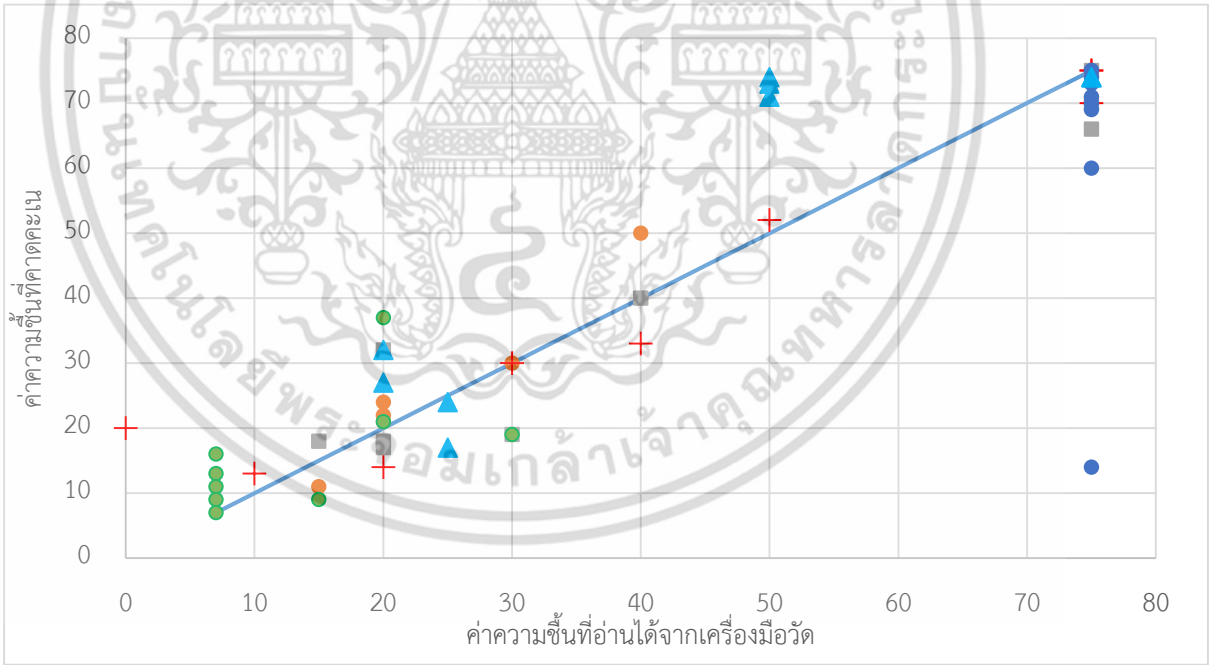
โดยมีการทดสอบจุดต่างๆ เพื่อหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นในส่วนของการรับส่งของข้อมูลผ่านวงจรส่งข้อมูลความถี่ 433 MHz และการวัดเมื่อรถมีการเคลื่อนที่ แต่ผลที่ได้คือความผิดพลาดของค่าที่เกิดจากการรับส่งนั้นเกิดขึ้น เมื่อวิทยุมีการส่งความถี่ผ่านสายส่งไปยังสายอากาศตัวส่ง ค่าสัญญาณที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งออกมานั้นจะมีความผิดพลาด

สรุปว่าเป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการรบกวนของสัญญาณที่ส่งผลต่อไมโครคอนโทรลเลอร์แม้จะมีการปิดด้วยกล่องเหล็กแต่ผลการวัดที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.14 อีกทั้งยังทำให้รถนั้นหนักและยากต่อการวัดในพื้นผิวที่ไม่เรียบ จึงได้มีการทดลองวัดค่าในส่วนของการทดลองวัดสัญญาณโดยใช้การวางทาบผิวดินแบบเดิม โดยให้เครื่องเซนเซอร์นั้นมีน้ำหนักเบาและมีความทนทานรวมถึงสายส่งสัญญาณและรับสัญญาณนั้นจะต้องถูกติดแน่นไม่มีการขยับ เพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้น โดยการทดลองนั้นจะต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างตัวไมโครคอนโทรลเลอร์และสายอากาศตัวส่งกับเครื่องส่ง เพื่อลดผลกระทบที่จะได้รับเมื่อทำการวัดค่าจึงได้มีการทดสอบระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างตัวควบคุมกับสายอากาศตัวส่งแสดงดังรูปที่ 4.15 ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการขยับสายที่รับสัญญาณจากตัวตรวจจับกำลังสัญญาณนั้นค่าที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องยึดติดแน่นเพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการขยับเมื่อนำไปทดสอบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 การทดลองวัดค่าความชื้นเพื่อทดสอบประสิทธิภาพเมื่อมีการควบคุมแบบอัตโนมัติ



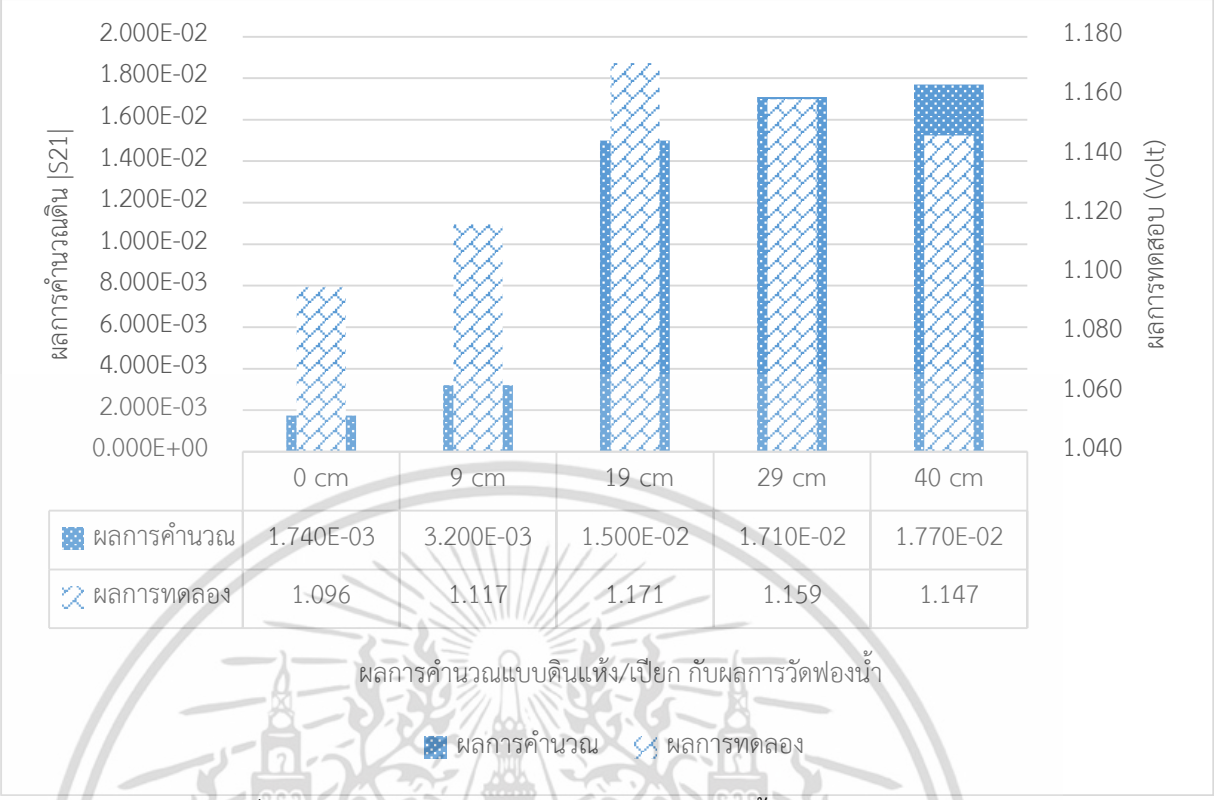
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบเมื่อนำเซนเซอร์ติดล้อและวัดค่าความชื้นเทียบกับเครื่องมือวัดดินแบบปัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.15 การทดลองเพื่อหาระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างตัวควบคุมและตัวส่งสัญญาณ

จากนั้นจึงมีการเก็บค่าเพื่อที่จะหาระยะความลึกของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศที่วางขนานและตั้งฉากกัน โดยใช้ฟองน้ำดังรูปที่ 4.15 โดยนำถุงที่บรรจุน้ำทำหน้าที่ปรับระยะที่ตัวเซนเซอร์ความถี่ 245 MHz จะสามารถตรวจจับเพื่อวัดหาค่าความแตกต่างระหว่างของสัญญาณ เมื่อมีการปรับระยะน้ำให้ใกล้กับตัวเซนเซอร์มากขึ้นและห่างออกไป เพื่อจำลองการวัดเมื่อมีน้ำที่อยู่ในดินที่ลึกลงไป โดยผลการทดลองเทียบกับผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 จะเป็นของขนานและตั้งฉากตามลำดับ

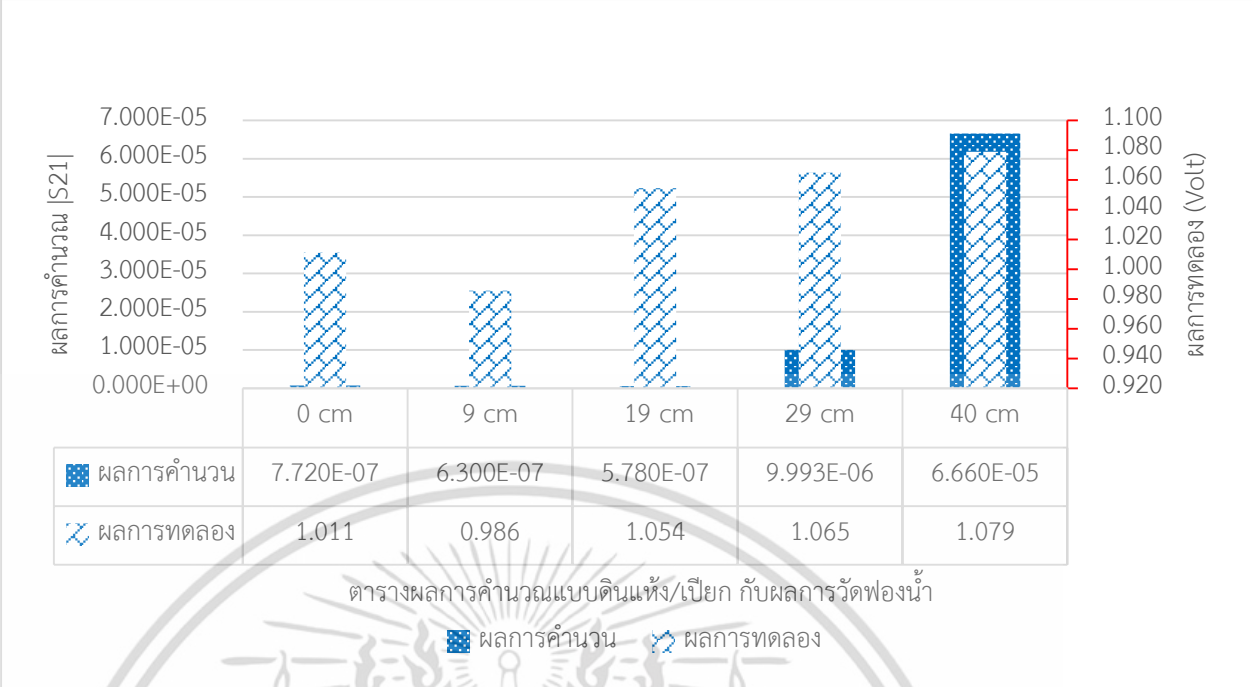
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ผลการคำนวณเทียบกับผลการวัดฟองน้ำแบบขนาน

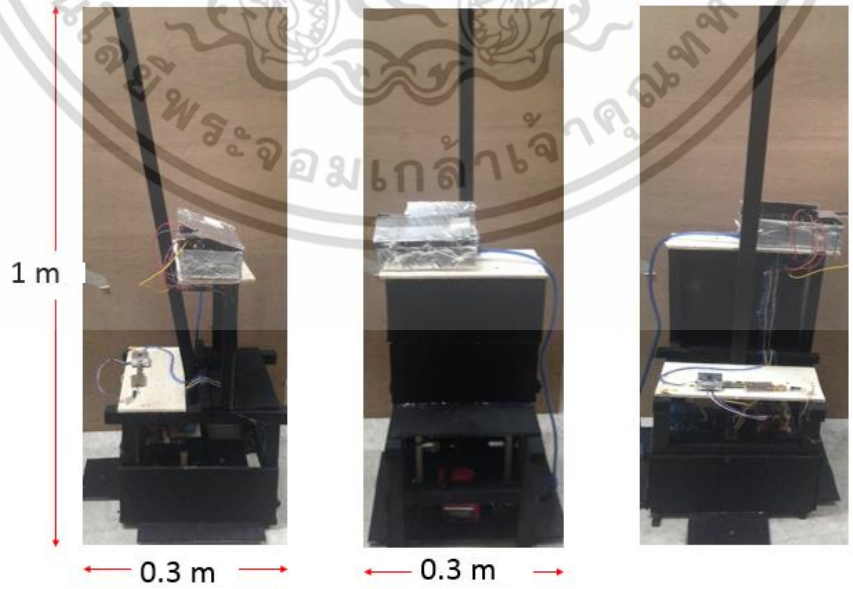
รูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าในกราฟแผนภูมิแท่งด้านหน้าซึ่งเป็นผลการทดลอง จะมีแนวโน้มรับค่าสัญญาณได้มากขึ้นจนกระทั่งค่าที่รับได้นั้นมากกว่า 29 เซนติเมตร จึงมีค่าที่ลดลงแต่ยังคงมีค่าสูงกว่าน้ำที่อยู่ลึกลงไปในระยะ 40 เซนติเมตร จากผลการทดลองนี้พบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของสัญญาณเป็นไปตามการคำนวณ เมื่อน้ำอยู่ลึกลงไปค่าที่ได้กลับลดลง โดยผลที่ความลึก 19 เซนติเมตร และ 29 เซนติเมตรที่ได้รับค่าสูงขึ้นนั้นเป็น เพราะการสะท้อนของสัญญาณกับถุงของน้ำที่สะท้อนไปยังสายอากาศตัวรับ โดยไม่มีการเชื่อมต่อร่วมที่ผ่านลงไปในน้ำ สังเกตได้จากเมื่อเลยจากระยะที่ 19 เซนติเมตรไปค่าสัญญาณที่ได้มีแนวโน้มลดต่ำลง ซึ่งแนวโน้มส่วนใหญ่จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะของน้ำอยู่ลึกลงไปและเมื่อถึงระยะ 40 เซนติเมตร ค่าที่ได้รับนั้นมีค่าเทียบเท่ากับตอนที่วัดค่าฟองน้ำเปล่าๆคือ 1.16 โวลต์ และจะเห็นแนวโน้มของรูปที่ 4.17 ว่าเป็นไปตามการคำนวณแม้ว่าที่ระยะ 9 เซนติเมตร จะสามารถรับค่าได้น้อยผิดจากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ผลการคำนวณเทียบกับผลการวัดฟองน้ำแบบตั้งฉาก

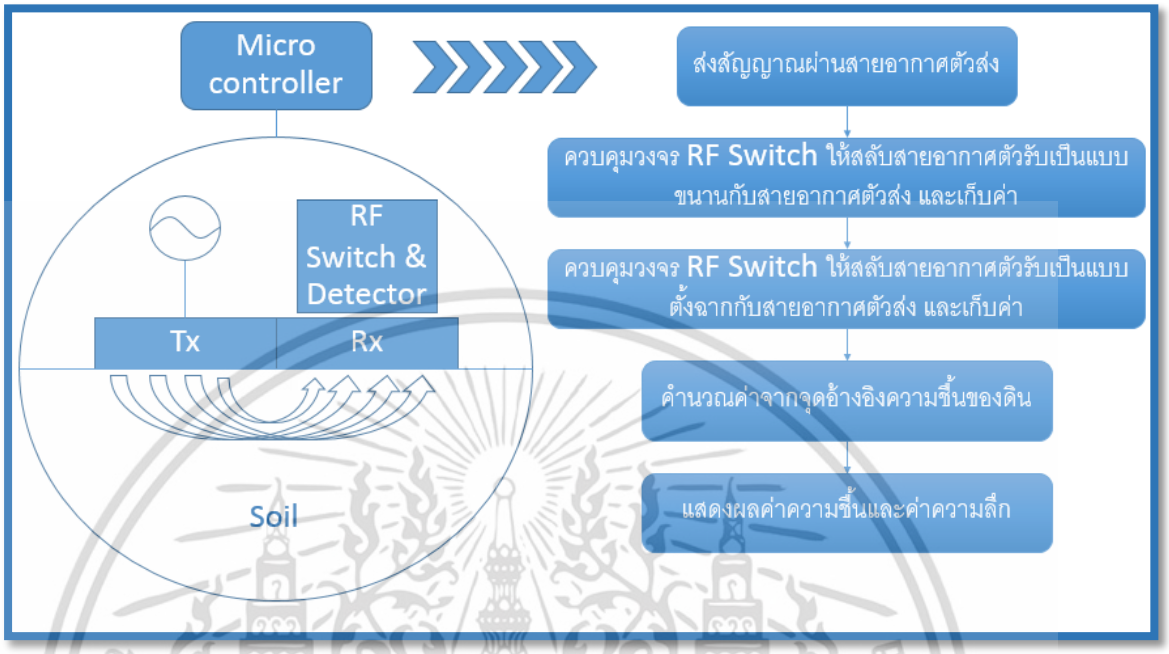
เมื่อสรุปผลการทดลองทั้งหมดจึงทำการสร้างเครื่องเซนเซอร์ที่มีน้ำหนักเบาลง และทำการจัดสายที่มีผลกระทบต่อการรับค่าของตัวควบคุมรวมถึงเว้นระยะห่างระหว่างตัวควบคุมและตัวส่งสัญญาณวิทยุ ทำให้ได้ตัวเครื่องเซนเซอร์ที่ทำจากไม้และมีน้ำหนักเบาลง เพื่อให้สะดวกต่อการวัดและใช้งานดังแสดงในรูปที่ 4.18 โดยการเก็บข้อมูลนั้นจะแบ่งดินออกเป็นสองชนิดหลักๆคือ ดินทรายและดินร่วนใช้เพาะปลูกทั่วๆไปโดยทำการทดลองเพื่อดูค่าว่าเครื่องมือวัดนั้นสามารถเชื่อถือได้ โดยทำการเปิดวัดทิ้งไว้แล้วเก็บข้อมูล



รูปที่ 4.18 เครื่องเซนเซอร์ที่ใช้การเก็บผลการทดลองที่มีน้ำหนักเบาลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะอธิบายหลักการทำงานของเครื่องเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดความชื้นดินแบบทาบบนผิวดิน ผ่านผังภูมิแสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ผังภูมิของตัวเซนเซอร์ในการทดลองที่ 2 ส่วนที่ 2

ในการทดลองที่ 2 วัดความชื้นดินโดยใช้การควบคุมแบบอัตโนมัติจะแบ่งออกเป็นทั้งหมด 11 ครั้งดังนี้

4.3.1 การทดลองครั้งที่ 1 เป็นการทดสอบความเสถียรของเครื่องมือวัด

4.3.2 การทดลองครั้งที่ 2 เป็นการนำตัวเซ็นเซอร์ไปวางไว้บนผิวของดิน

4.3.3 การทดลองครั้งที่ 3 ตรวจสอบค่าความผิดปกติที่เกิดขึ้น

4.3.4 การทดลองครั้งที่ 4 ทดสอบการวัดค่าของทราย

4.3.5 การทดลองครั้งที่ 5 ทำการทดสอบวัดค่าของทรายอีกครั้งหลังสรุปการทดลองครั้งที่ 4

4.3.6 การทดลองครั้งที่ 6 ผลการทดลองเก็บค่าของทรายเพิ่ม

4.3.7 การทดลองครั้งที่ 7 และการทดลองครั้งที่ 8 ทดลองวัดค่าของดินร่วนและดินทราย เพื่อดูความแตกต่าง

4.3.8 การทดลองครั้งที่ 9 เมื่อสรุปผลการทดลองที่ 7 และ 8 ทำการวัดค่าดินทรายเพิ่ม

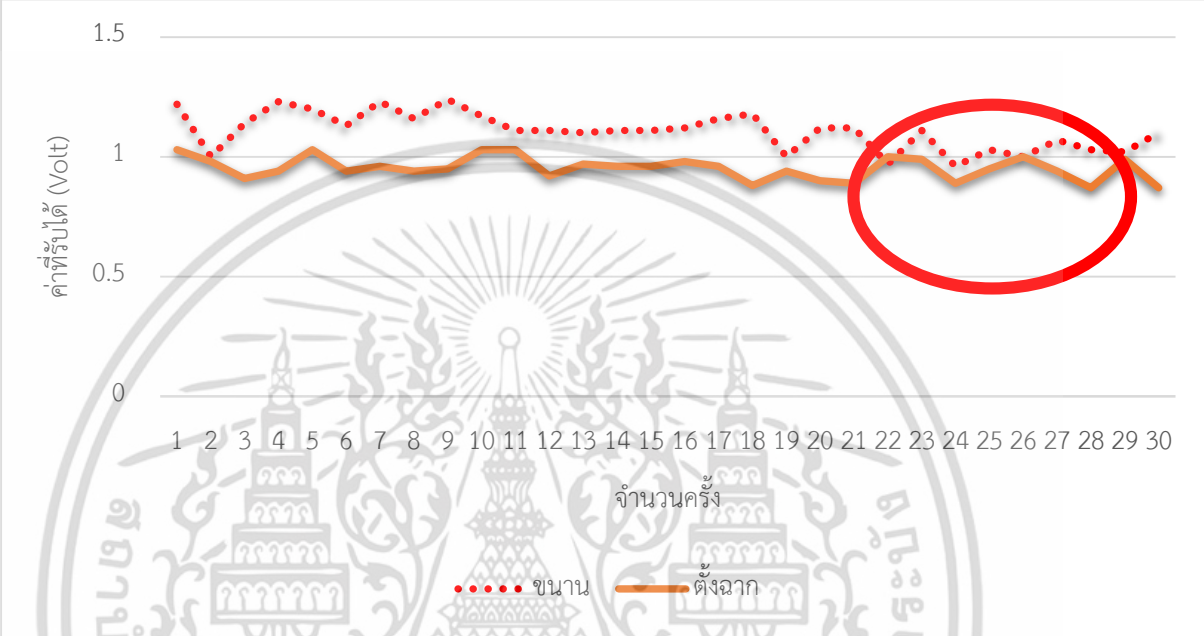
4.3.9 การทดลองครั้งที่ 10 ผลการทดลองเพื่อตรวจสอบสัญญาณรบกวน

4.3.10 การทดลองครั้งที่ 11 การเก็บค่าความชื้นเพื่อนำเครื่องมือไปใช้วัดค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การทดสอบความเสถียรของเครื่องมือวัด

ในการทดลองครั้งที่ 1 เป็นการทดสอบความเสถียรของเครื่องมือวัดเมื่อเปิดและทำการเก็บค่า จากนั้นทำการหาสายไฟหรืออุปกรณ์บางชิ้นที่เมื่อขยับแล้วส่งผลต่อการทำงานหรือทำให้ค่าสัญญาณที่อ่านได้ผิดพลาดนั้น เพื่อที่จะทำการแก้ไข จะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณที่รับได้มีความผิดพลาดเมื่อสายสัญญาณที่ออกจากตัวตรวจจับสัญญาณนั้นถูกขยับ

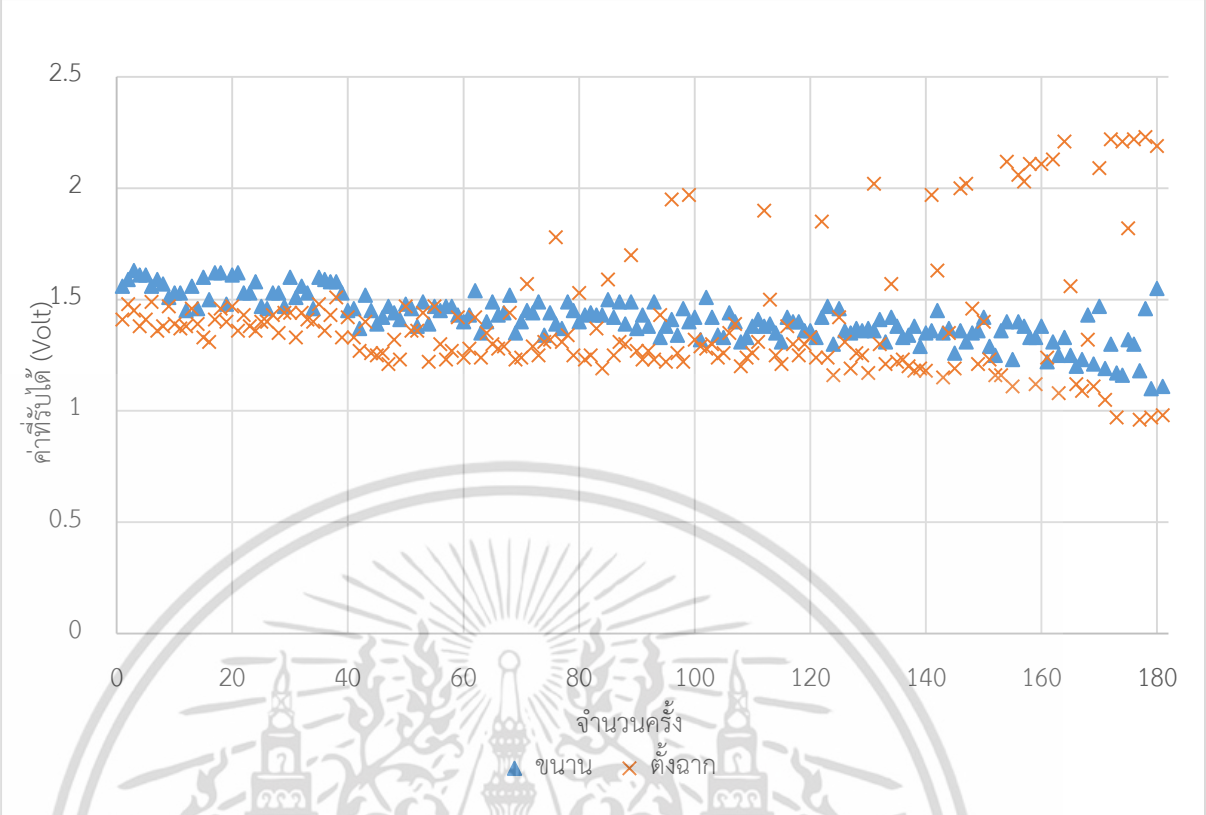


รูปที่ 4.20 ผลที่ได้เมื่อมีการขยับสายที่รับค่าจากตัวตรวจจับกำลังสัญญาณ

4.3.2 การนำตัวเซ็นเซอร์ไปวางไว้บนผิวของดิน

ในการทดลองนี้เป็นการนำตัวเซ็นเซอร์ไปวางไว้บนผิวของดิน ที่เตรียมไว้ในห้องทดลองซึ่งมีขนาด 0.62*0.54*0.48 ลูกบาศก์เมตร โดยดินที่วัดนั้นเป็นดินชนิดที่ใช้ในการเพาะปลูก (ปุ๋ย) โดยทำการวัดเก็บค่าที่ความชื้นของดินนั้นเท่ากับ 0% โดยใช้เครื่องมือวัดดิน DM-5 Soil tester เป็นตัวเทียบปักลงไปในถุงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



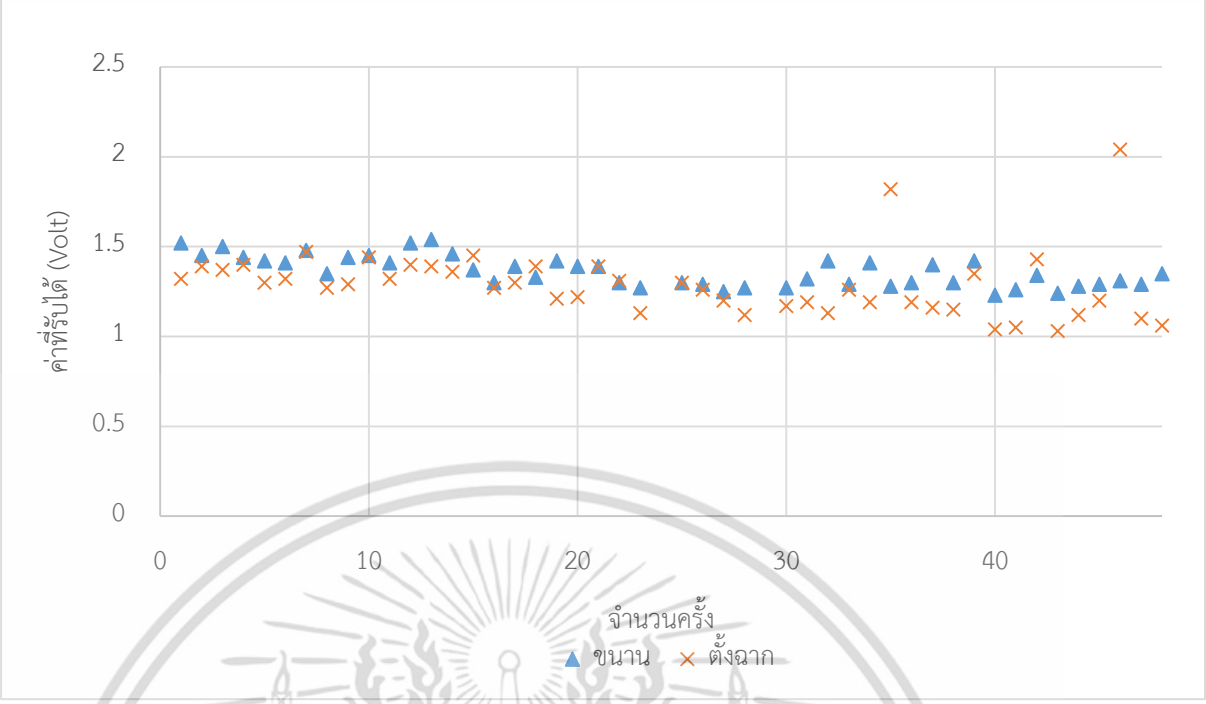
รูปที่ 4.21 ผลการทดลองเก็บค่าดินปุ๋ยที่มีค่าความชื้นเท่ากับ 0%

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.21 ซึ่งมีการวัดจำนวน 180 ครั้งจะเห็นได้ว่าค่าที่รับได้จากตั้งฉากจะมีค่าที่ต่ำกว่าแบบขนานเพียงเล็กน้อย เมื่อทำการวัดทำให้ผลว่าค่าของตั้งฉากในบางช่วงมีค่าที่ได้รับมาและผิดพลาดอยู่ในบางช่วง ประมาณ 30 ค่า โดยคิดเป็น 16% จากการวัดทั้งหมด 180 ครั้ง เพื่อหาสาเหตุของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจึงได้ทำการทดลองซ้ำเพื่อหาสาเหตุของการรับค่าที่ผิดพลาดของการวัดแบบตั้งฉาก

4.3.3 ตรวจสอบค่าความผิดปกติที่เกิดขึ้นในหัวข้อ 4.3.2

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.3.2 ที่เกิดการรับค่าที่สูงขึ้นผิดปกติในการรับแบบตั้งฉาก ทำให้จำเป็นต้องมีการทดลองซ้ำ เพื่อทดสอบหาค่าความผิดพลาดของการเก็บข้อมูล และผลการทดลองที่ 3 สรุปได้ว่าเมื่อมีการใช้งานนานๆทำให้แบตเตอรี่วิทยุหมดและวิทยุดับและติดเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



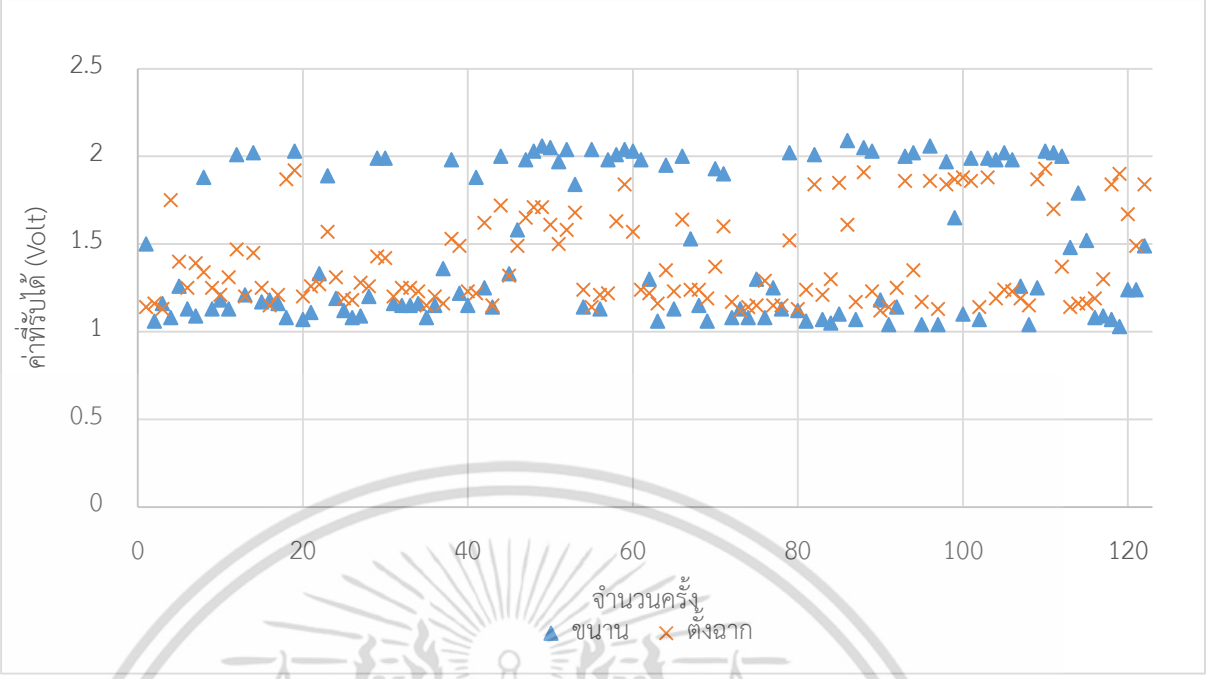
รูปที่ 4.22 ผลการทดลองที่ 3 เก็บค่าดินปุ๋ยที่มีค่าความชื้นเท่ากับ 0%

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.2 ทำให้สรุปได้ว่า ดินปกติ (ปุ๋ย) ที่ความชื้น 0% ค่าที่รับได้จะมีค่าอยู่ที่ 1.5 โวลต์และการวัดแบบขนานและตั้งฉาก มีค่าไม่ต่างกันมากทำให้ค่าที่ได้ สามารถนำมาช่วยกันคาดคะเนความชื้น เมื่อการวัดการเชื่อมต่อร่วมแบบขนานหรือตั้งฉากมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้

4.3.4 ทดสอบการวัดค่าของทราย

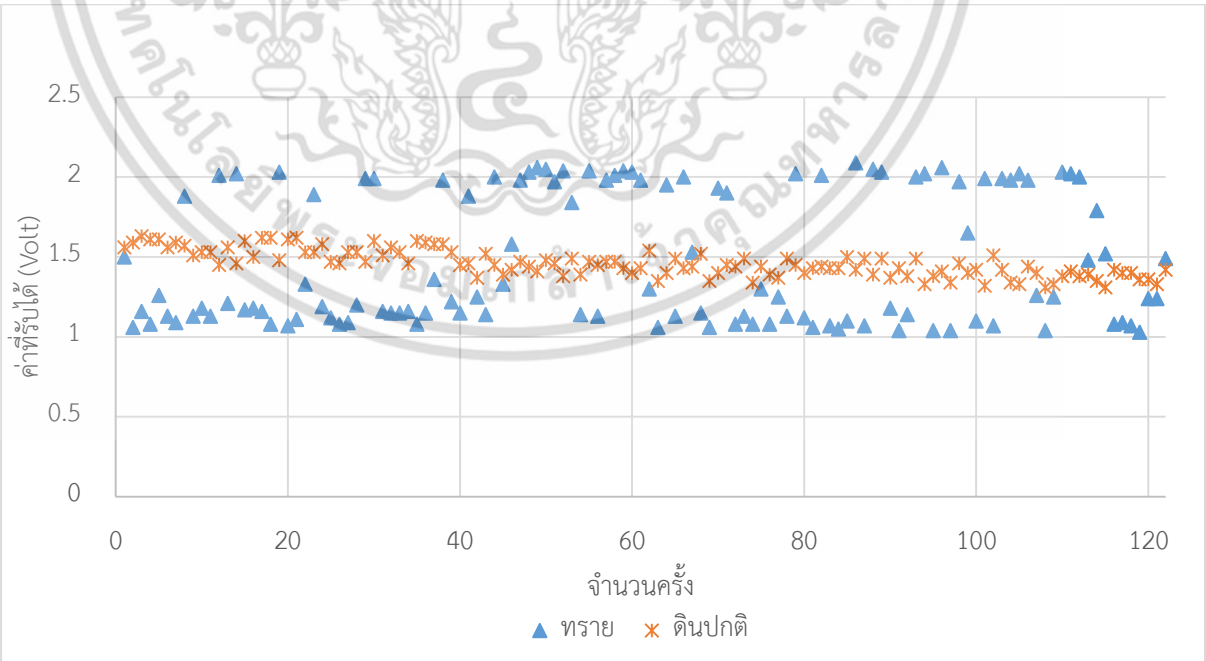
ด้วยเหตุที่ดินนั้นมี 3 ชนิด ทำให้ค่าความชื้นที่ดินชนิดต่างๆ ได้รับสัญญาณแรงเบาไม่เท่ากันจึงได้ทดสอบวัดทรายในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ โดยจากผลการทดลองจะสามารถเห็นได้ว่า ค่าที่รับได้ของทรายทั้งแบบขนานและตั้งฉากมีความผิดพลาดถึง 46% จากการวัดทั้งหมด 120 ครั้ง แสดงในรูปที่ 4.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



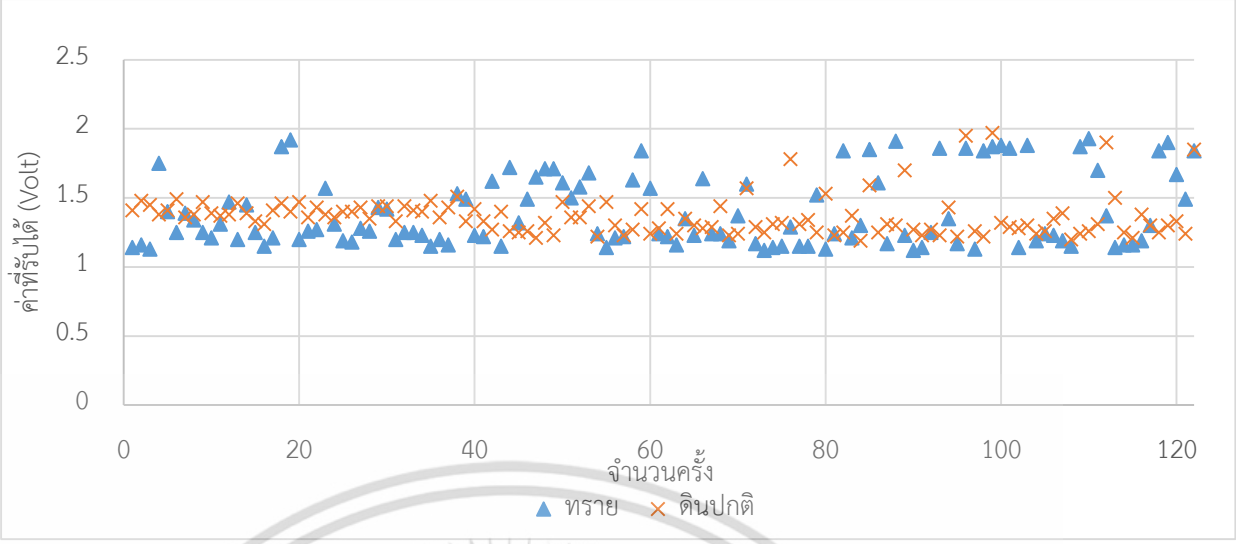
รูปที่ 4.23 การทดลองวัดทราย

เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับดินปกติแบบขนานแล้วสามารถเห็นได้ว่าค่าของทรายและดินปกติแตกต่างกันอย่างชัดเจน เพียงแต่ว่าไม่สามารถบอกได้ว่าค่าของสัญญาณที่ได้รับมานั้นมีค่ามากหรือน้อยกว่าดินปกติแสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25 การเปรียบเทียบระหว่างขนานและตั้งฉากระหว่างดินปกติและทรายตามลำดับ



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบผลการวัดทรายกับดินปกติของการวัดแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

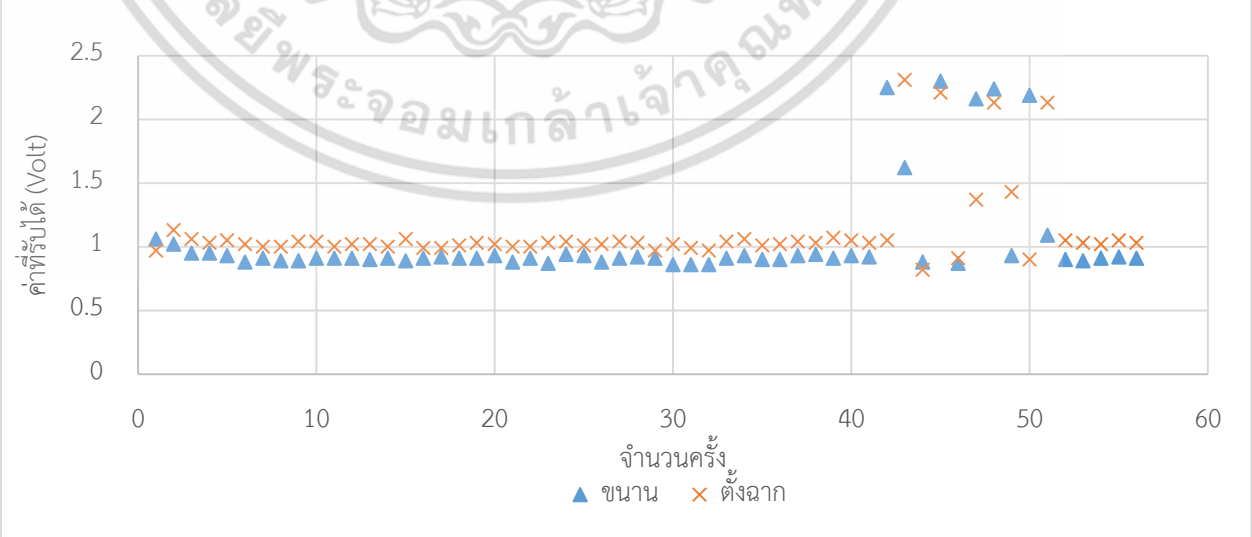


รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบการวัดทรายกับดินปกติของการวัดแบบตั้งฉาก

ในทำนองเดียวกันทำให้ค่าที่ได้รับมายังไม่เห็นแนวโน้มที่มากกว่าหรือน้อยกว่าอย่างชัดเจน ทำให้ต้องเก็บข้อมูลเพิ่มเพื่อหาค่าสัญญาณเมื่อนำเซนเซอร์ไปวางบนทราย

4.3.5 การทดสอบวัดค่าของทรายอีกครั้ง

เมื่อผลการทดลองในหัวข้อ 4.3.4 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการวัดถึง 46% จากการวัดทั้งหมด 120 ครั้ง ทำให้ไม่สามารถตัดสินใจได้ว่าค่าสัญญาณที่รับได้มาจากทรายมากกว่าหรือน้อยกว่าการวัดที่ดินปกติ โดยการทดลองในหัวข้อนี้จะเห็นว่าค่าที่ได้คือแบบตั้งฉากมีค่ามากกว่าแบบขนาน และมีค่าประมาณ 1 โวลต์ โดยมีค่าความผิดพลาด 5% จากการวัดทั้งหมด 57 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.26

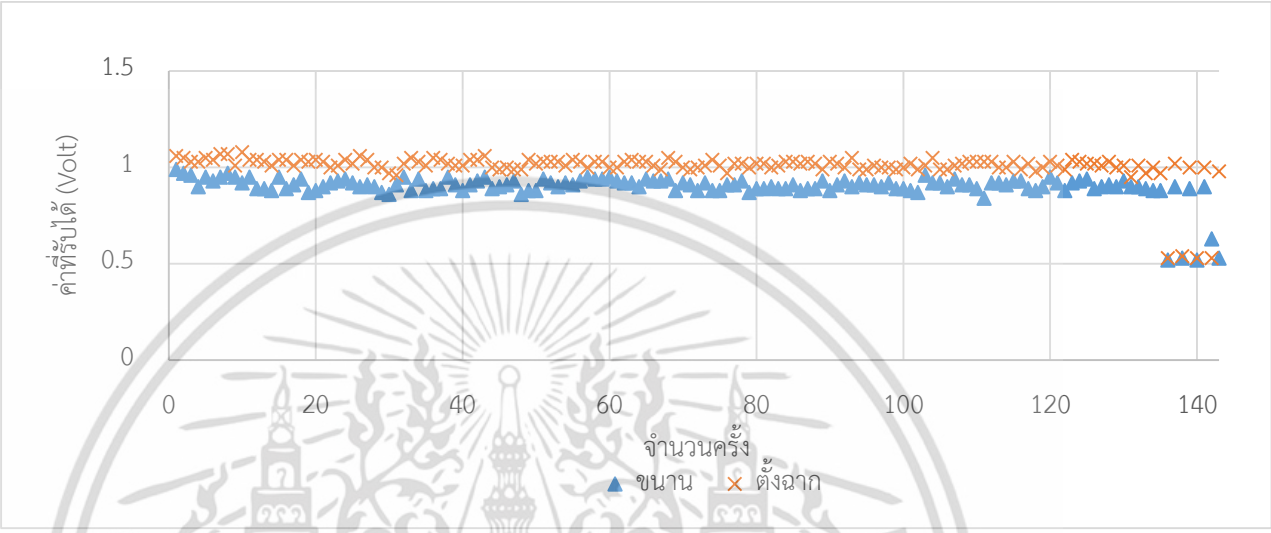


รูปที่ 4.26 การทดลองเพื่อวัดทรายซ้ำอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

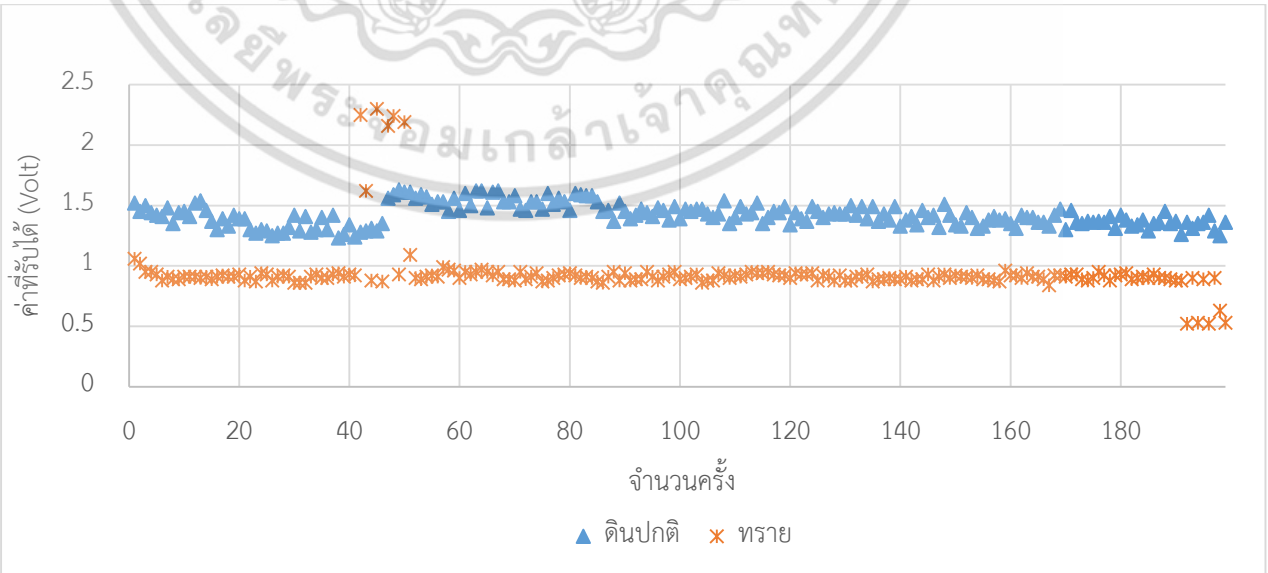
4.3.6 ผลการทดลองเก็บค่าของทราย

การทดลองในหัวข้อนี้เราจำเป็นต้องทดลองเพื่อวัดซ้ำว่าค่าทรายที่วัดได้และเกิดความไม่นิ่งยังคงเป็นดังการทดลองในหัวข้อ 4.3.4 อยู่หรือไม่ จึงได้เก็บข้อมูลเพิ่มเพื่อที่ค่าเฉลี่ยจะได้มีความแม่นยำมากขึ้นกว่าเดิม แสดงผลการวัดเพิ่มเติมของการทดลองหัวข้อ 4.3.6 ดังรูปที่ 4.26



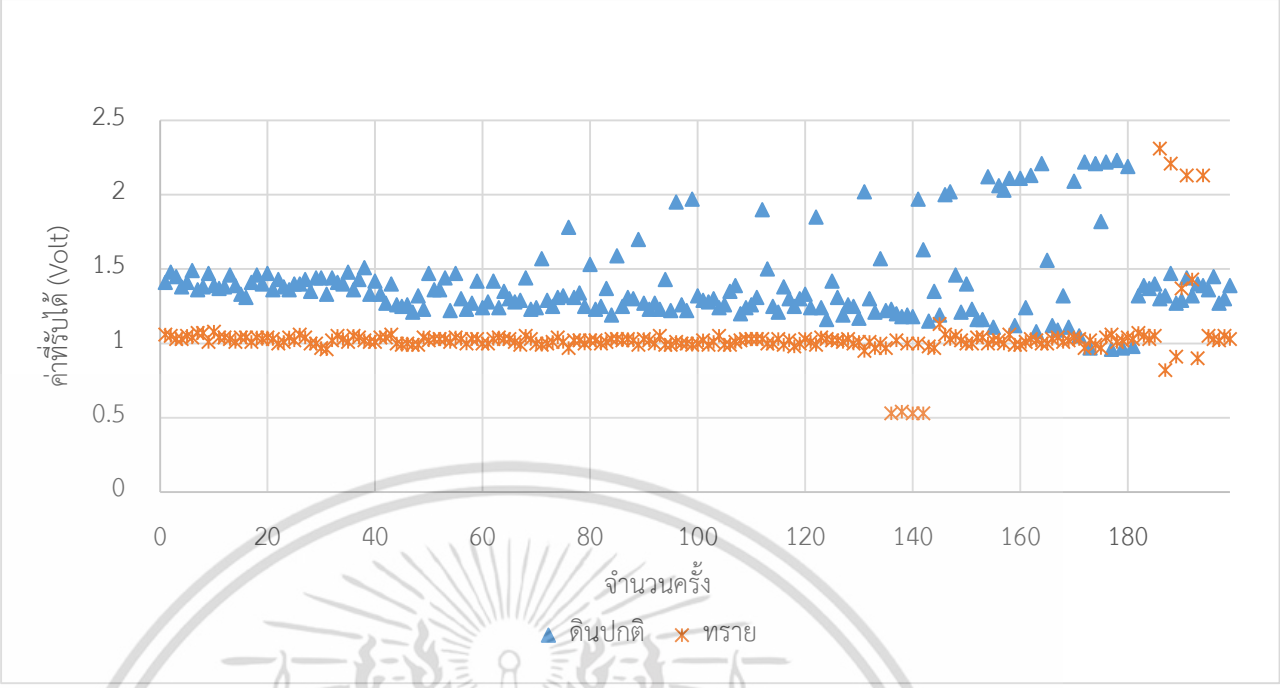
รูปที่ 4.27 ผลการทดลองวัดค่าของดินทรายซ้ำอีกครั้ง

จากนั้นได้เปรียบเทียบผลการทดลองของระหว่างการวัดทรายและดินปกติ เพื่อที่จะได้ทราบว่าค่าสัญญาณที่รับได้จากดินปกติและทราย มีความแตกต่างกันมากแสดงดังรูปที่ 4.28 และ 4.29 เป็นรูปการเปรียบเทียบการเชื่อมต่อร่วมของดินปกติและทราย ของการวัดการเชื่อมต่อร่วมแบบขนานและตั้งฉากตามลำดับ



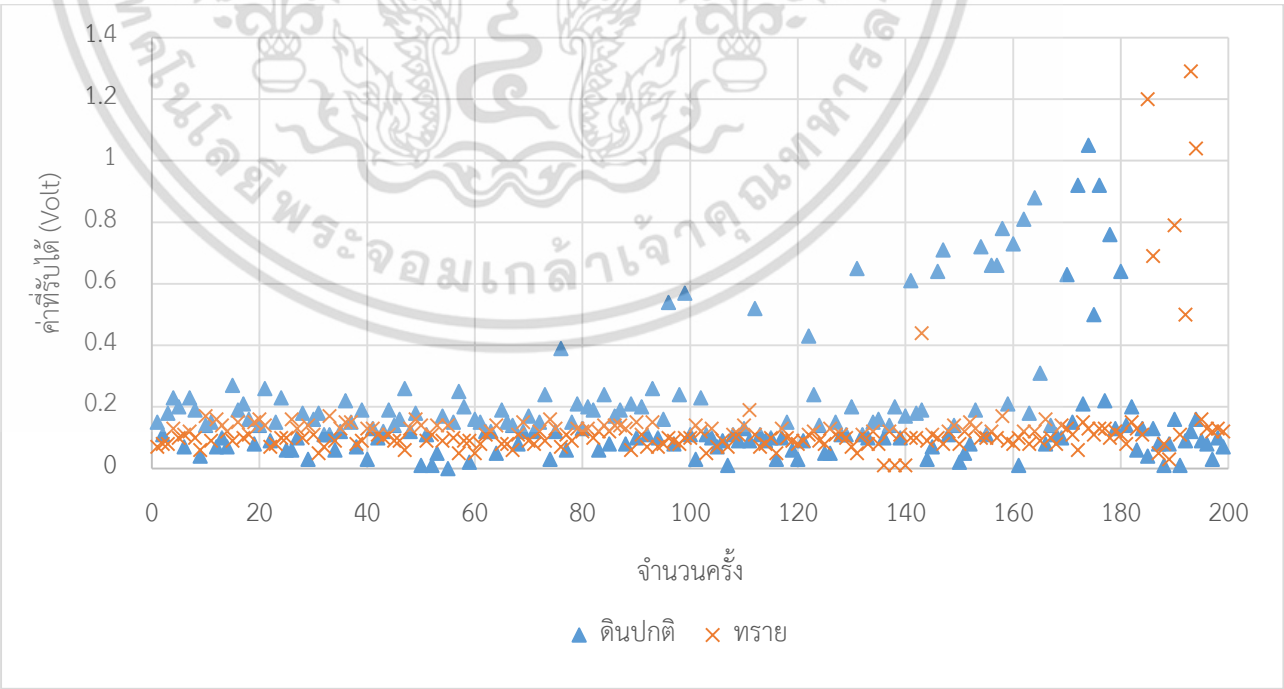
รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบผลการทดลองของระหว่างการวัดทรายและดินปกติแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบผลการทดลองของระหว่างการวัดทรายและดินปกติแบบตั้งฉาก

ผลการทดลองในส่วนที่ 4.3.6 นี้ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ทรายและดินปกตินั้นมีสัญญาณที่แตกต่างกันประมาน 0.5 โวลต์ โดยทรายนั้นมีค่าต่ำกว่าทั้งแบบขนานและตั้งฉาก แต่ค่าความแตกต่างระหว่างขนานและตั้งฉากของดินทั้งสองชนิดนั้นไม่สามารถบ่งบอกถึงความแตกต่างได้แสดงดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 ผลต่างของดินปกติและทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.7 ทดลองวัดค่าของดินร่วนและดินทราย

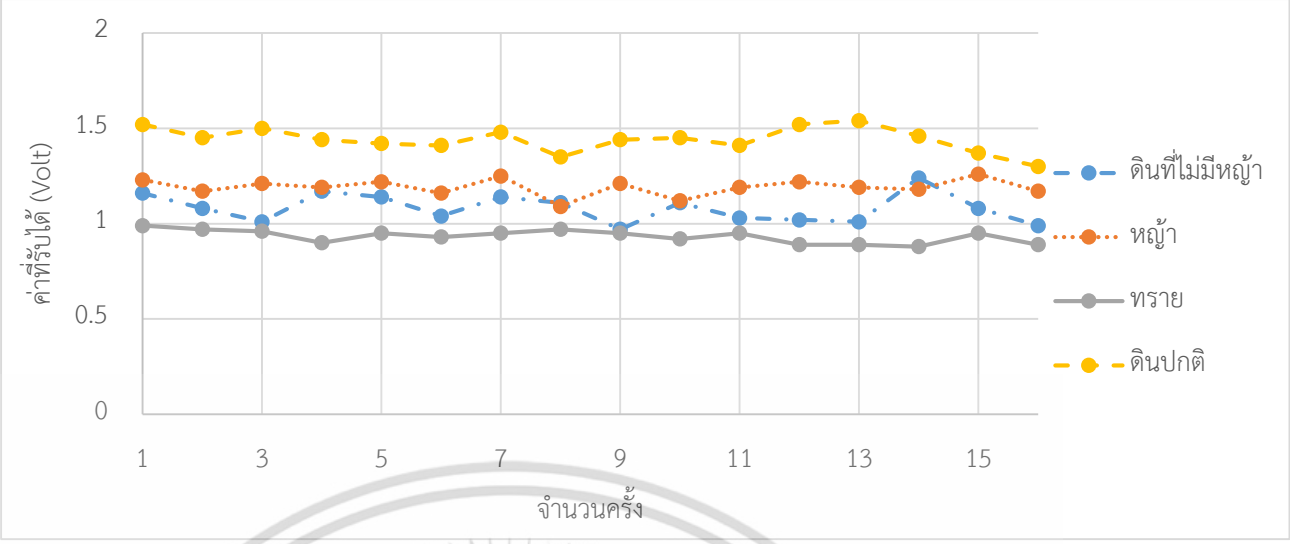
เนื่องจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.2 ถึง 4.3.6 ทำให้เห็นว่าค่าสัญญาณที่รับได้ของดินปกติและทรายมีความแตกต่างกัน จึงได้วัดดินทรายโดยคาดคะเนได้ว่าค่าที่ได้นั้นจะอยู่ระหว่างดินปกติและทรายโดยทำการวัดดินทรายบนสนามหญ้าที่มีหญ้าและไม่มีหญ้าดังรูป 4.31ก และ 4.31ข

(ก) (ข)

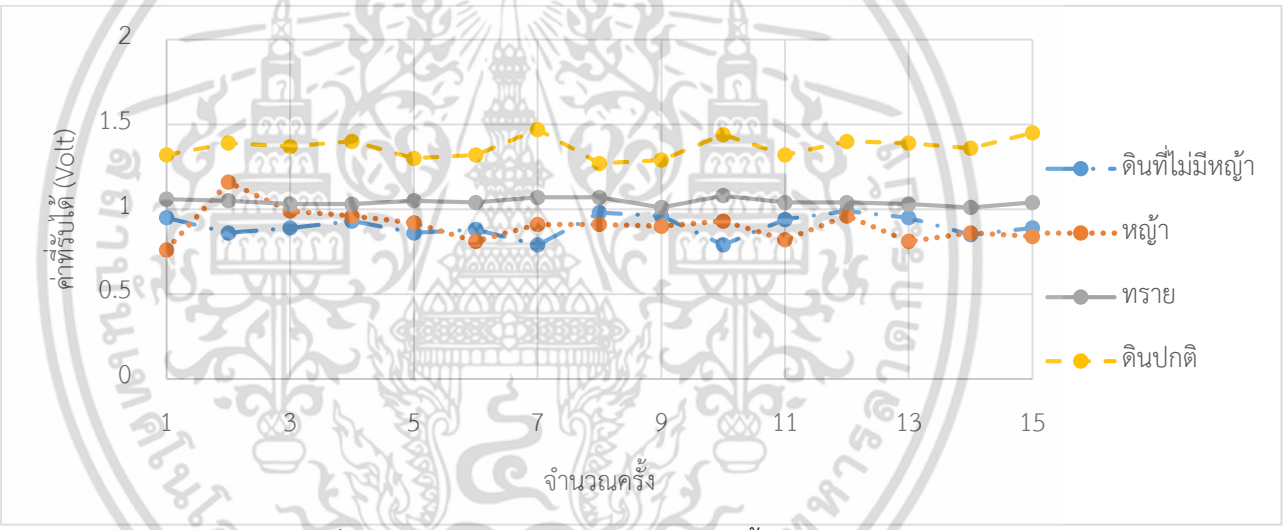
รูปที่ 4.31 สภาพการใช้งาน (ก) บนหญ้า (ข) บนดิน

โดยทำการวัดค่าของดินทรายทีมีหญ้าและไม่มีหญ้า โดยเก็บค่าทั้งแบบขนานและแบบตั้งฉากและนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองก่อนหน้าโดยแบบขนานแสดงดังรูปที่ 4.32 และในรูป 4.33 แบบตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



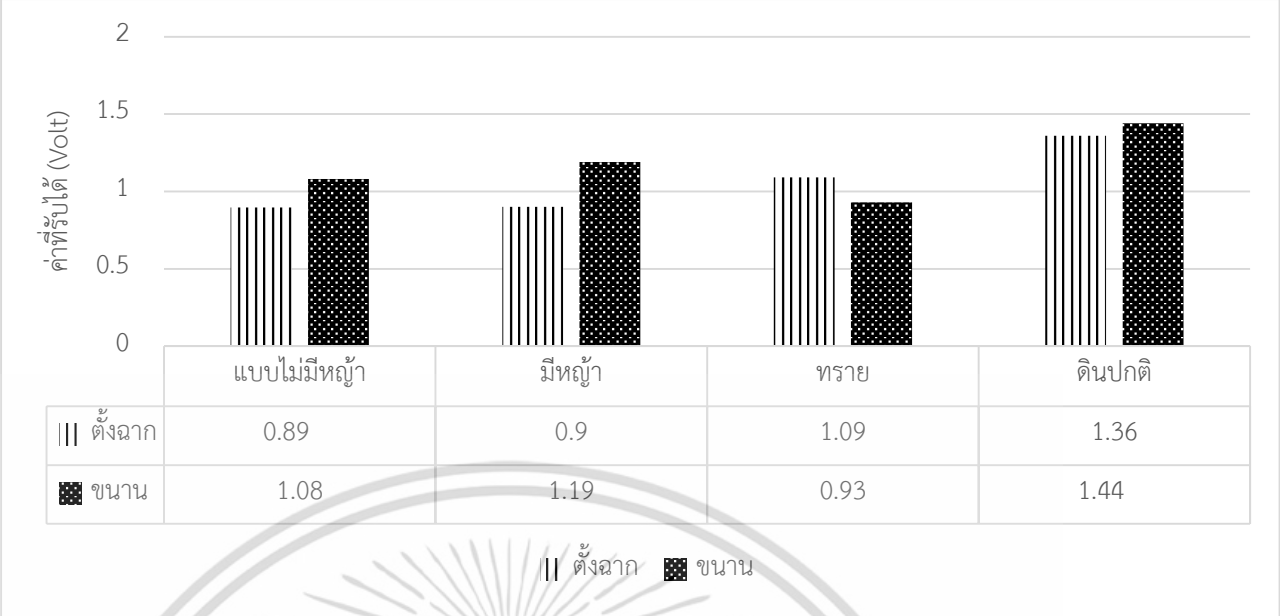
รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบผลการวัดค่าแบบขนาน



รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบผลการวัดค่าแบบตั้งฉาก

ผลการทดลองแบบขนานทำให้พบว่าค่าที่วัดได้ของดินทรายนั้น มีค่าอยู่ระหว่างดินปกติและทราย ทำให้ทราบว่าชนิดของดินส่งผลต่อการวัด และไม่ว่าจะเป็นการวัดบนดินทรายที่มีหญ้าหรือไม่มีนั้นไม่ได้มีค่าความแตกต่างกันมากและผลการทดลองแบบตั้งฉากมีค่าต่ำกว่าดินปกติและทราย โดยที่ดินทรายแบบมีหญ้าและไม่มีหญ้านั้นไม่มีความแตกต่างกันชัดเจน ดังนั้นจากการทดลองทำให้ทราบว่า หากต้องการวัดค่าความชื้นของดินปกติและดินทรายค่าสัญญาณที่จะรับได้มีค่าที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นหากใช้เพียงข้อมูลของการทดลองของดินชนิดใดชนิดหนึ่งเพื่อตัดสินใจว่า ค่าความชื้นของดินนั้นมีค่าเท่าไร ซึ่งจะทำให้ค่าความชื้นที่ตัดสินใจนั้นมีความผิดพลาด เพื่อลดค่าความผิดพลาดจึงมีความจำเป็นต้องเก็บข้อมูลทั้งสองแบบเพื่อใช้คาดคะเนความชื้น ซึ่งสามารถสรุปผลค่าเฉลี่ยแสดงดังรูปที่ 4.34

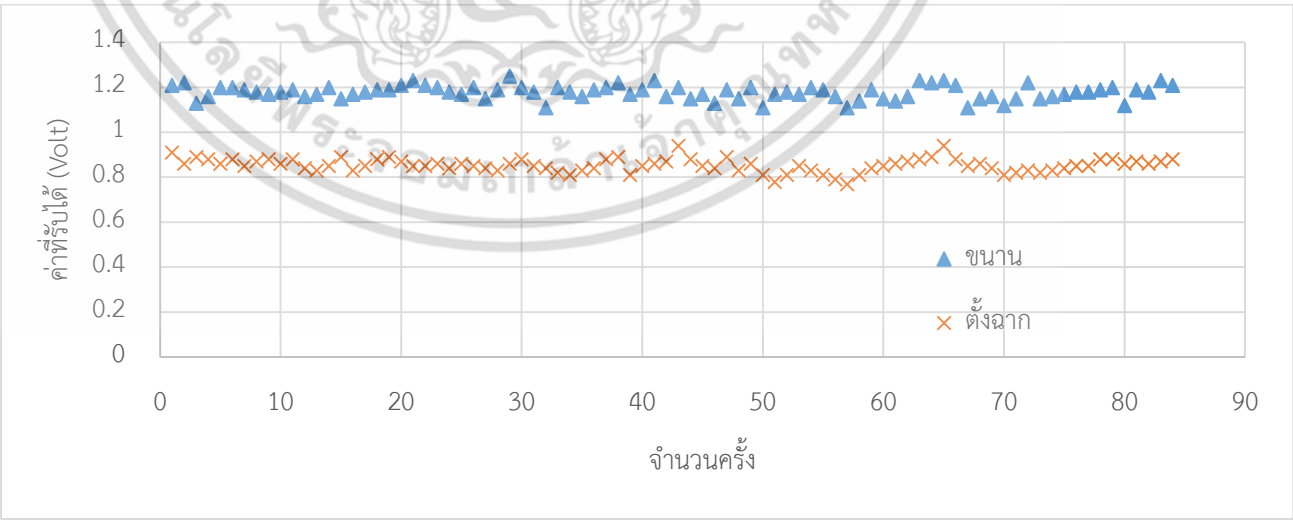
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 กราฟแผนภูมิแท่งแสดงค่าเฉลี่ยของสัญญาณของดินชนิดต่างๆทั้งแบบตั้งฉากและขนาน

4.3.8 วัดค่าดินทรายเพิ่ม

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.7 ทำให้ทราบว่าดินทราย มีค่าที่แตกต่างกับดินปกติ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าชนิดของดินปกติและดินทรายส่งผลต่อค่าของสัญญาณที่รับได้ แต่เมื่อทำการทดสอบระหว่างดินทีมีหญ้าและไม่มีหญ้านั้นปรากฏว่าดินที่มีหญ้าอยู่ด้านบนและไม่มีนั้นมีค่าความแตกต่างเพียงเล็กน้อยเท่านั้นจึงทำการเก็บผลการทดลองครั้งนี้ แสดงดังรูปที่ 4.35

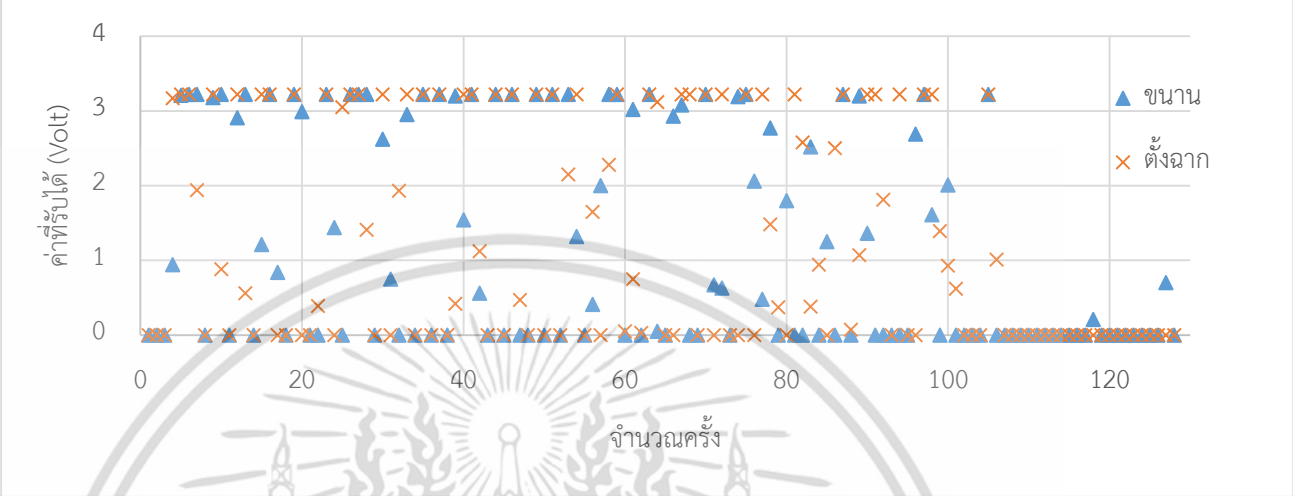


รูปที่ 4.35 ผลการทดลองของดินทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.9 การทดลองเพื่อตรวจสอบสัญญาณรบกวน

ทดลองเพื่อทดสอบค่าสัญญาณที่เกิดสัญญาณรบกวน จึงปิดเครื่องแต่ทำการจับสัญญาณจากเซนเซอร์และบันทึกค่าปกติ โดยค่าที่ได้ควรจะมีค่าเท่ากับ 0



รูปที่ 4.36 ทดสอบค่าที่เกิดจากสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 4.36 จะแสดงผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสัญญาณรบกวน มาจากวิทยุที่มีความถี่ 245 MHz ที่มีการใช้งานกันในช่วงที่มีการวัดค่าและเก็บค่าในช่วงที่มีการทดลองวัดทรายในบางช่วงทำให้มีค่าของสัญญาณที่เพิ่มขึ้นจนทำให้ไม่สามารถอ่านค่าที่ถูกต้องได้

เมื่อทำการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้งทำให้ทราบได้ว่า

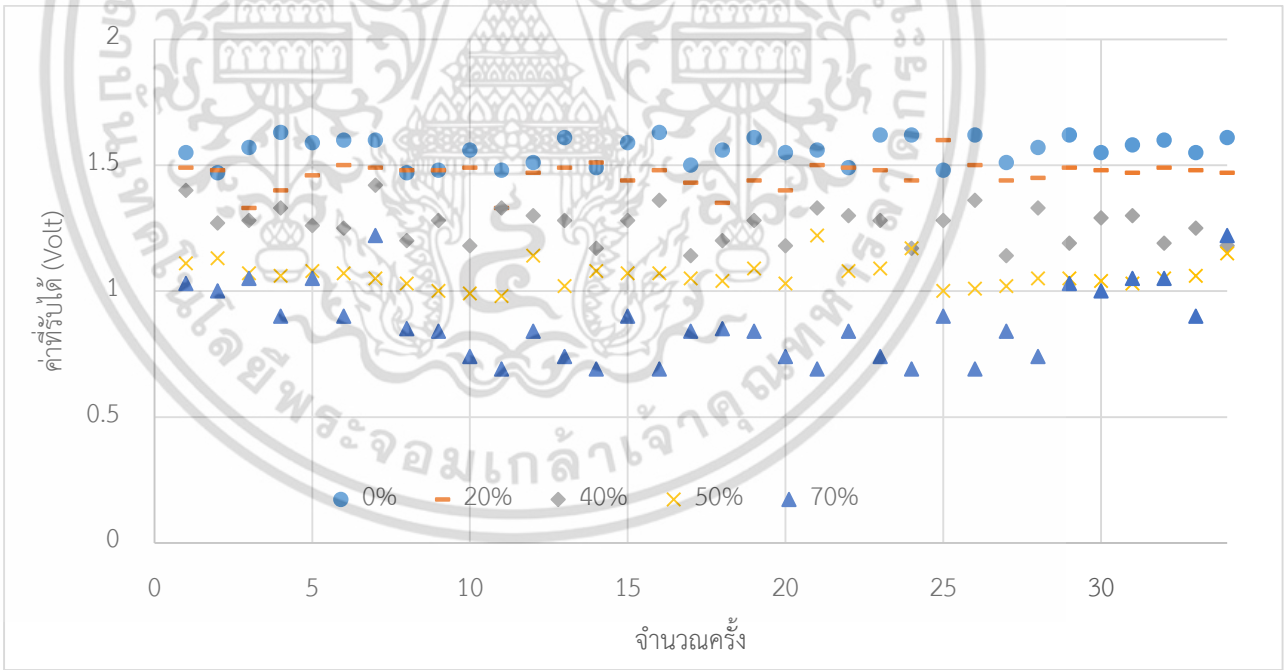
- ชนิดของดินมีผลต่อค่าสัญญาณทีรับได้แม้จะเป็นดินที่แห้งเหมือนกัน
  - ทำให้เมื่อวัดความชื้นเพื่อบอกจึงต้องวัดจากดินทั้ง 2 ชนิด
- สัญญาณที่ได้สูงบ้างนั้น เกิดจากการรบกวนของผู้ที่ใช้ความถี่ 245 MHz ณ ขณะนั้น
  - ทำให้เมื่อวัดค่าเฉลี่ยได้แล้วจำเป็นต้องตัดค่าของสัญญาณรบกวนออกเพื่อจะได้ค่าที่ถูกต้อง
  - ระบบในการวัดควรอ่านค่าความชื้นได้ทันทีและวัดหลายๆครั้งเพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.10 การเก็บค่าความชื้นเพื่อนำเครื่องมือไปใช้วัดค่า

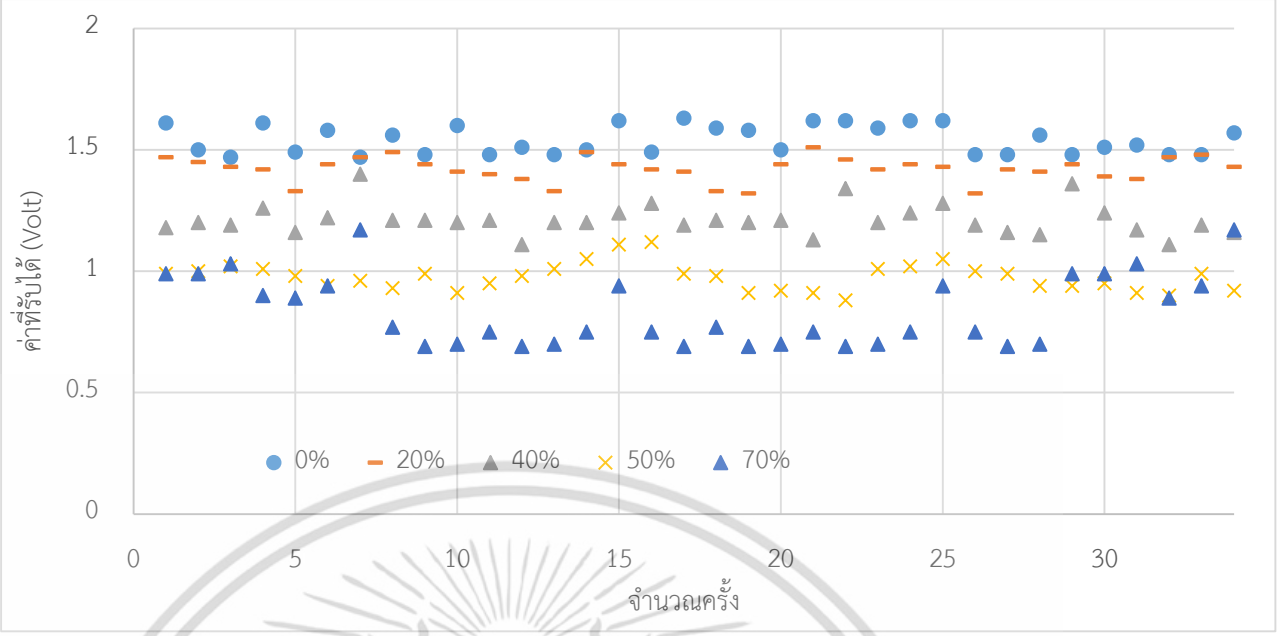
ในการทดลองวัดค่าความชื้นเพื่อนำมาทำสร้างสมการกราฟที่ใช้ในคาดคะเนค่าความชื้น โดยจะใช้การเก็บค่าผ่านเครื่องตรวจจับกำลังสัญญาณ ก่อนที่จะทำการอ่านค่าเปรียบเทียบกับเครื่องวัดความชื้นดินแบบจุ่มลงไปในดิน ด้วยวิธีการวัดค่าสัญญาณที่ตรวจจับได้กับเครื่องวัดค่าความชื้นซึ่งจะมีการเปลี่ยนค่าความชื้นในดิน และทำการเก็บค่าความชื้นหลายๆครั้งเพื่อให้สามารถตัดสินใจเลือกค่าสัญญาณการเชื่อมต่อร่วมที่ส่งผ่านลงในดินชื้น แยกกับค่าสัญญาณรบกวนที่ได้รับจากผู้ที่ใช้ความถีเดียวกันในบริเวณใกล้เคียง

- ทำการทดลองวัดดินปกติที่ความชื้นต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.37 เป็นการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบขนานและรูปที่ 4.38 ซึ่งเป็นการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉาก
  - 0% ณ วันที่ 30/5/59
  - 20% ณ วันที่ 30/5/59
  - 50% ณ วันที่ 31/5/59
  - 40% ณ วันที่ 30/5/59
  - 70% ณ วันที่ 30/5/59



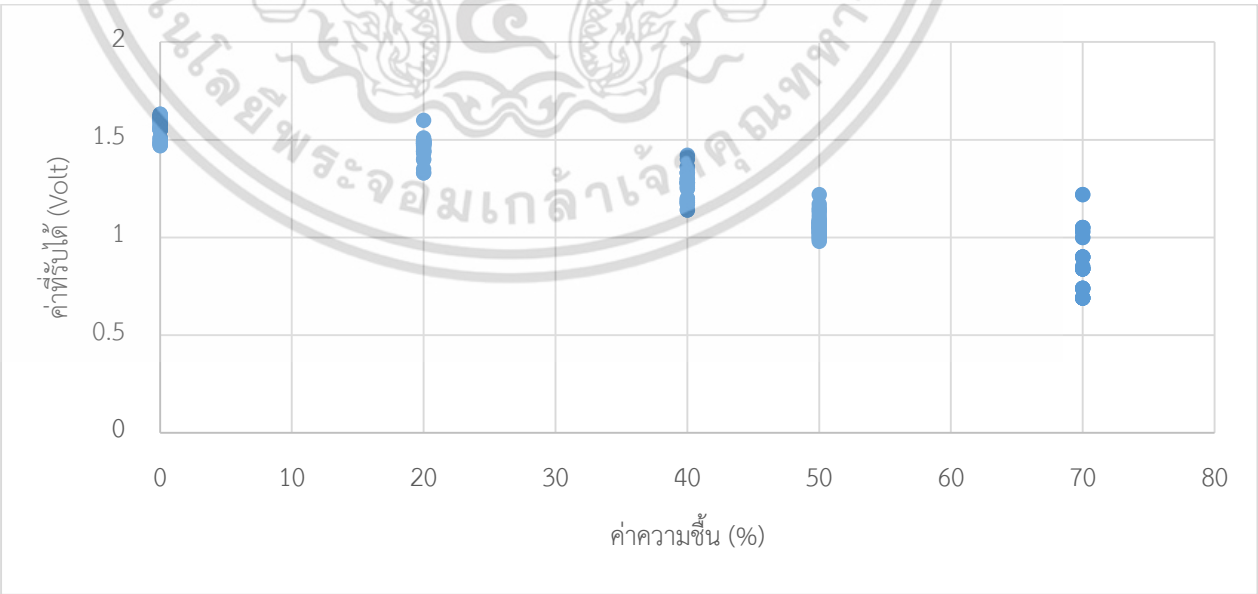
รูปที่ 4.37 การวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมที่ดินความชื้นต่างๆแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.38 การวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมที่ดินความชื้นต่างๆแบบตั้งฉาก

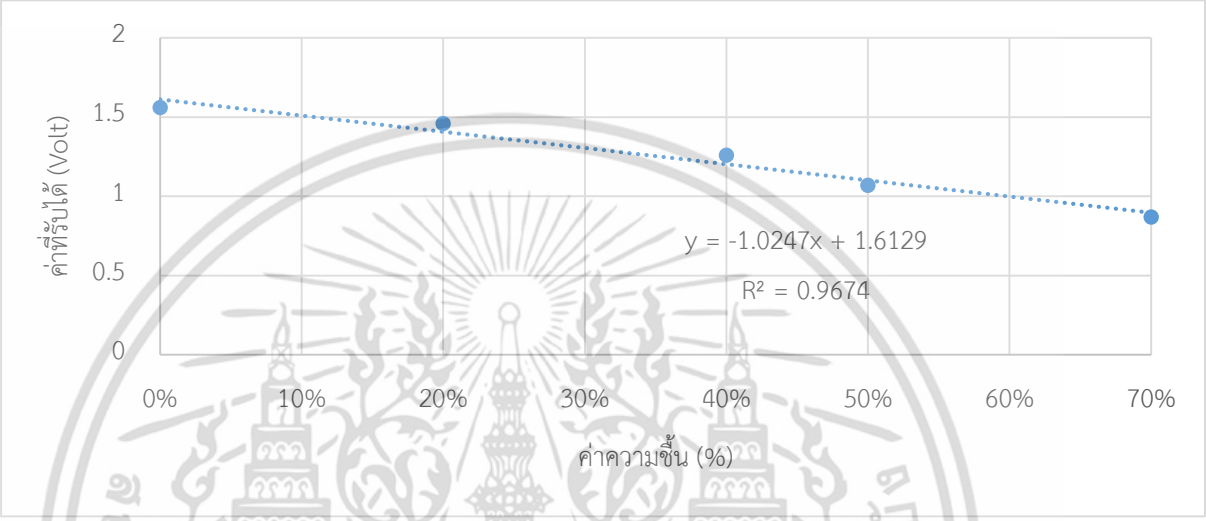
จากผลการทดลองวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมที่ค่าความชื้นดินต่างๆโดยมีการตัดค่าสัญญาณรบกวนออกไปก่อนที่จะนำค่าความชื้นที่วัดได้ นำมาเฉลี่ยเพื่อได้ค่าที่มีความถูกต้องก่อนที่จะสร้างเส้นสมการเพื่อนำมาใช้ในการคาดคะเนค่าความชื้นของดินเมื่อนำเครื่องเซนเซอร์นี้ไปทำการทดสอบในการวัดความชื้นดิน โดยรูปที่ 4.39 แสดงผลการวัดทั้งหมดที่ได้จากการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมที่ความชื้นดินต่างๆแบบขนาน ซึ่งรูปที่ 4.39 แสดงให้เห็นว่ามีการลดลงของสัญญาณที่รับได้จากตัวตรวจจับสัญญาณเมื่อค่าความชื้นเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.39 ผลการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบขนาน

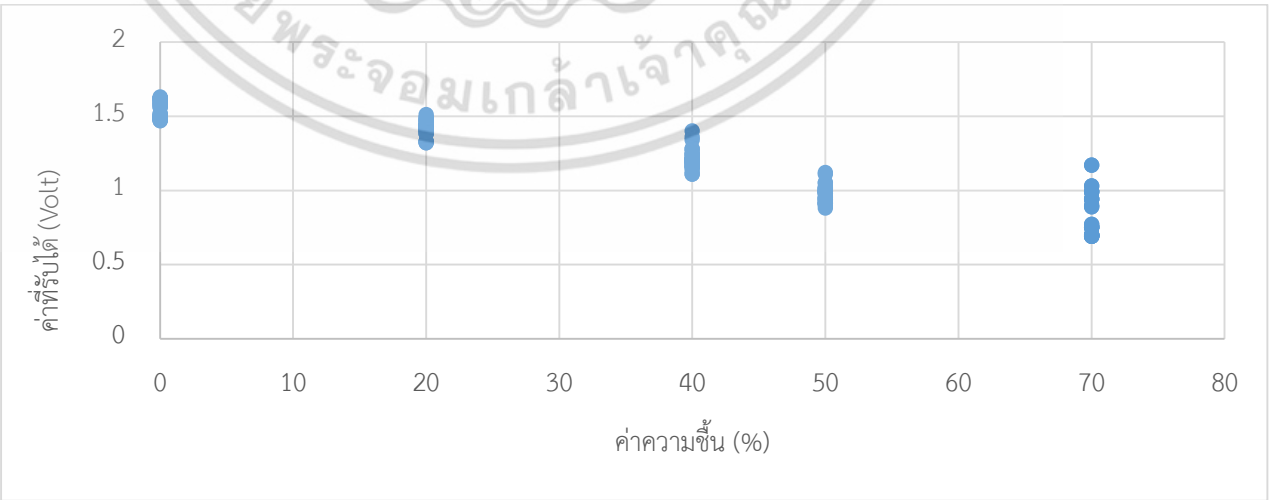
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการวัดความชื้นในแต่ละช่วงเมื่อตัดค่าสัญญาณรบกวนออกไปแล้วจะมีค่าที่เกาะกลุ่มกันในช่วงความชื้นที่ได้ทำการวัดไว้จากเครื่องวัดค่าความชื้นดินแบบจุ่ม จึงได้นำค่าไปทำการเฉลี่ยและเลือกเส้นสมการที่จะนำมาคาดคะเนค่าความชื้นเมื่อนำเครื่องเซนเซอร์ไปวางที่ดิน โดยเส้นกราฟและสมการแสดงดังรูปที่ 4.40



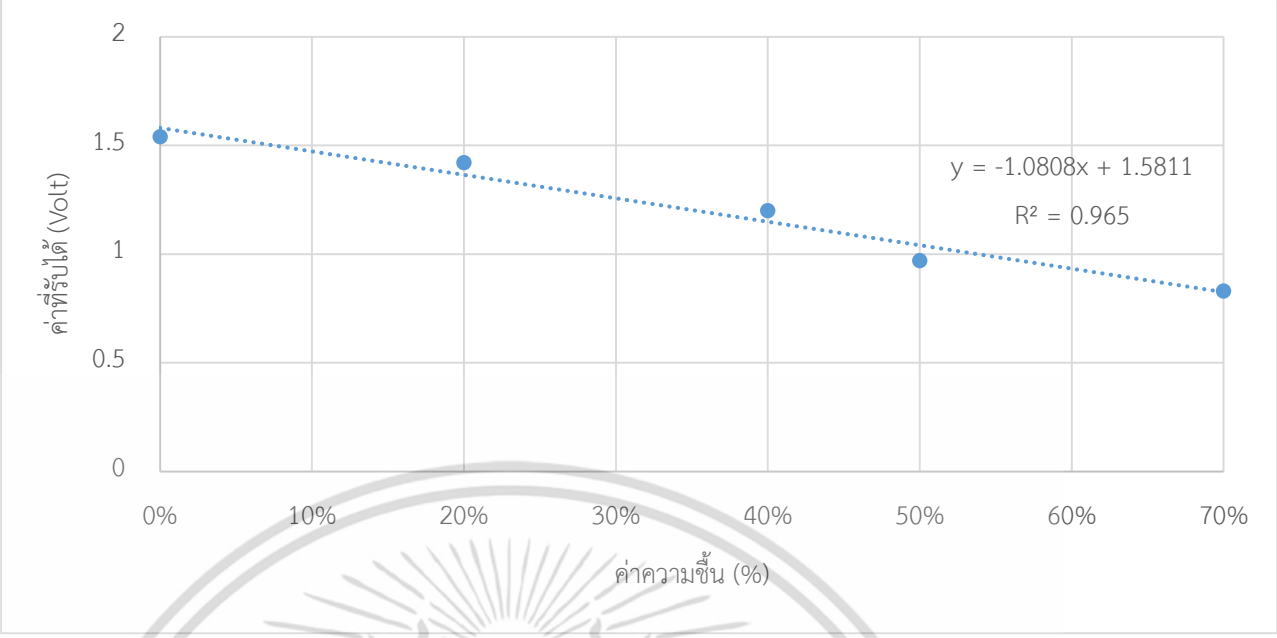
รูปที่ 4.40 เส้นสมการที่คาดคะเนความชื้นจากค่าเฉลี่ยของการทดลองแบบขนาน

และในทำนองเดียวกันการนำค่าของการวัดเทียบระหว่างสัญญาณที่รับได้จากตัวตรวจจับโดยเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดค่าความชื้นดินแบบปัก ในการวัดแบบตั้งฉากกันนั้นก็จะมีการแสดงดังรูปที่ 4.41 ก่อนที่จะนำค่าเหล่านั้นมาทำการเฉลี่ยและสร้างเส้นกราฟและสมการเพื่อคาดคะเนค่าเฉลี่ยของการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมเมื่อสายอากาศวางตั้งฉากกันแสดงดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.41 ผลการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

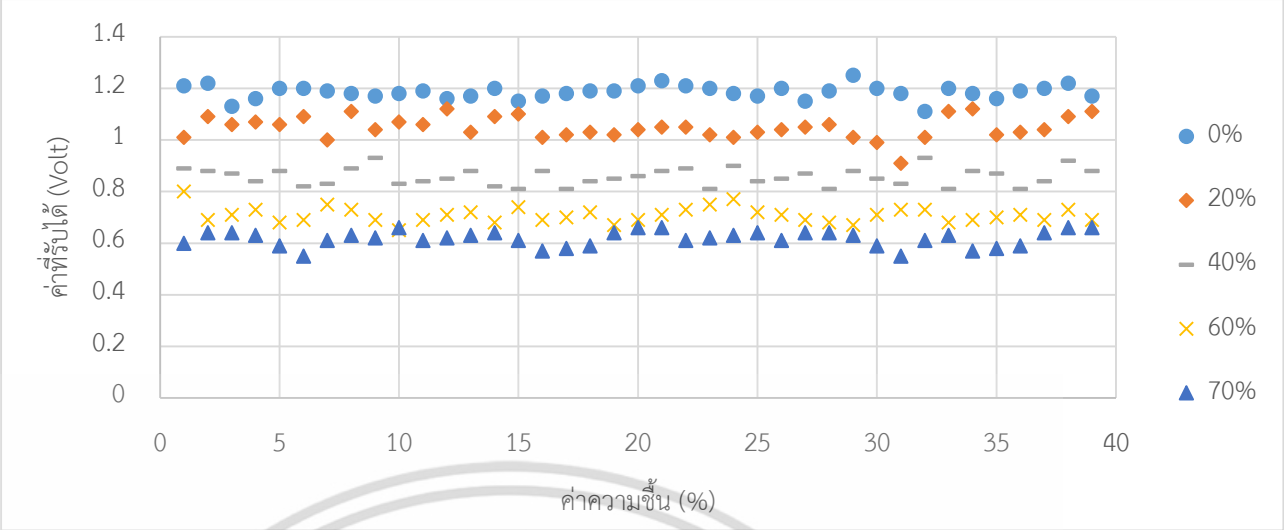


รูปที่ 4.42 เส้นสมการที่คาดคะเนความชื้นจากค่าเฉลี่ยของการทดลองแบบตั้งฉาก

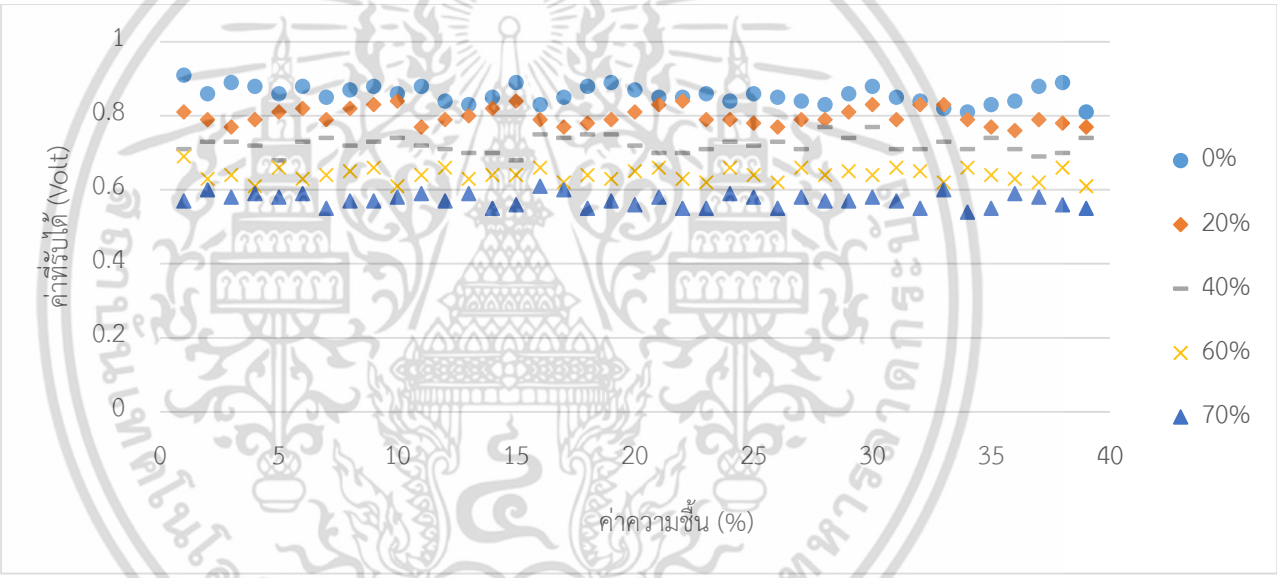
จากผลการทดลองวัดค่าความชื้นดินปกติทำให้ได้เส้นสมการที่สามารถนำมาคาดคะเนค่าความชื้นของดินจากค่าเฉลี่ยของการวัดค่าของการเชื่อมต่อร่วมโดยที่สายอากาศวางขนานและตั้งฉากกับสายอากาศตัวส่ง และเมื่อดูผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.7 เพื่อทำการทดสอบค่าความแตกต่างระหว่างดินและดินทราย

ทำให้ได้ข้อสรุปว่าค่าสัญญาณที่รับได้จากการวัดดินแต่ละชนิดให้ผลที่ต่างกัน ดังนั้นเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดให้มีความแม่นยำมากขึ้น จึงมีความจำเป็นต้องทำการเก็บค่าความชื้นของดินทราย โดยการทดลองจะมีการวัดเทียบกับค่าความชื้นที่อ่านได้จากเครื่องวัดความชื้นดินแบบปักและนำมาเทียบกับค่าที่อ่านได้จากตัวตรวจจับกำลังงานของสัญญาณที่ส่งผ่านลงไปในดินทรายที่มีค่าความชื้นต่างๆ ก่อนจะนำผลที่ได้มาตัดค่าสัญญาณรบกวนออกไปและทำการเฉลี่ยค่าสัญญาณที่ตรวจจับได้ ณ ความชื้นต่างๆ ก่อนที่จะนำมาสร้างเส้นสมการที่สามารถคาดคะเนค่าความชื้นดินทรายได้ โดยผลการทดลองดินทรายและค่าสัญญาณที่ตรวจจับได้โดยตัดค่าสัญญาณรบกวนออกไปนั้นแสดงดังรูปที่ 4.43 ซึ่งเป็นการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบขนานและในรูปที่ 4.44 จะเป็นการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมในแบบตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



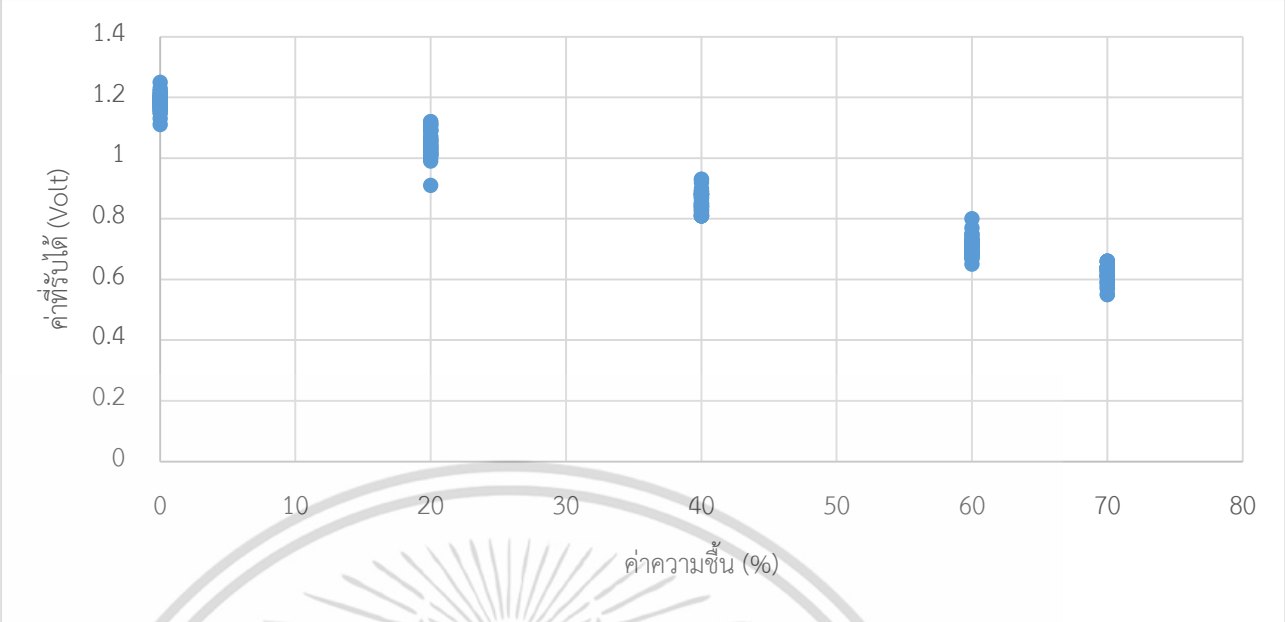
รูปที่ 4.43 การวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบขนานดินทราย



รูปที่ 4.44 การวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉากดินทราย

โดยผลจากการวัดค่าทั้งหมด 40 ครั้งในทั้งสองกรณีนั้นแสดงให้เห็นว่าแม้จะเป็นดินทรายค่าที่รับได้เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจะลดลง ทำให้สามารถแสดงค่าสัญญาณที่ลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.45 และ 4.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

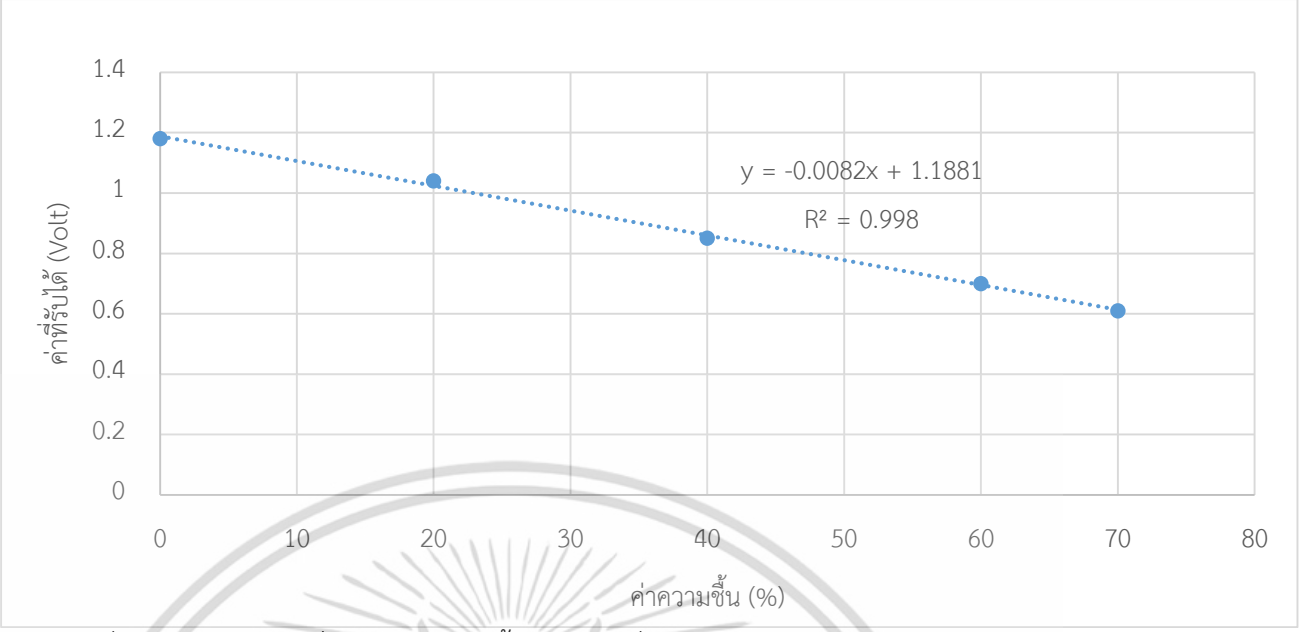


รูปที่ 4.45 ผลการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบขนานดินทราย

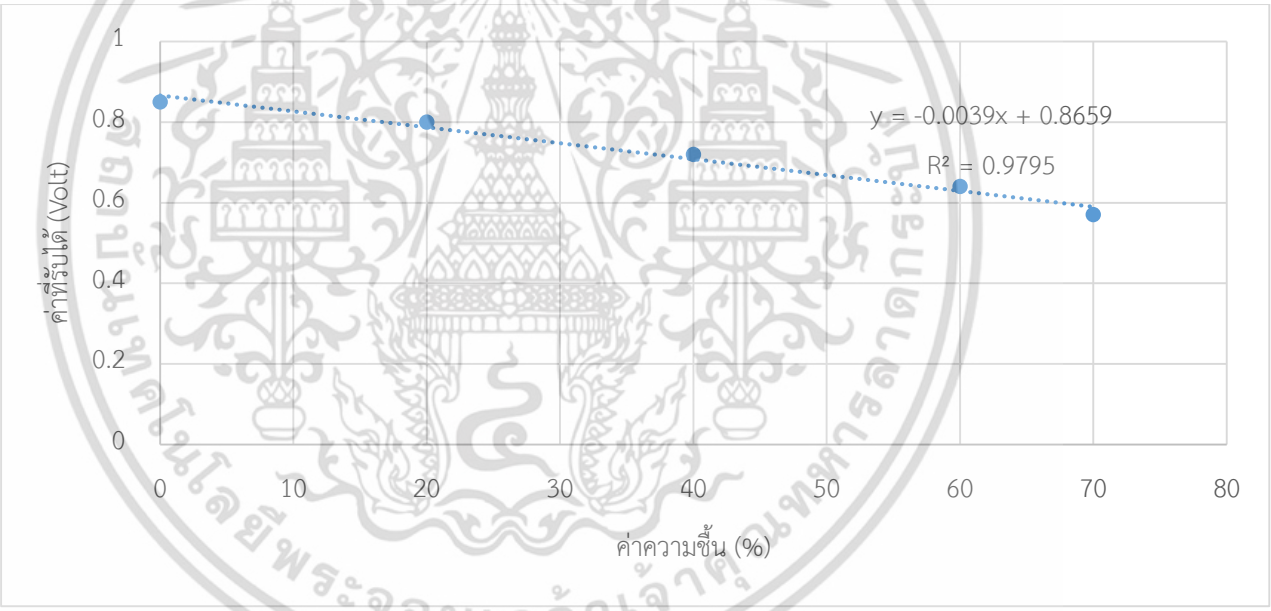
รูปที่ 4.46 ผลการวัดค่าการเชื่อมต่อร่วมแบบตั้งฉากดินทราย

ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้นจะสามารถนำมาหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่รับได้ในแต่ช่วงความชื้น ก่อนที่จะนำมาสร้างเส้นสมการที่สามารถคาดคะเนค่าความชื้นของดินได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



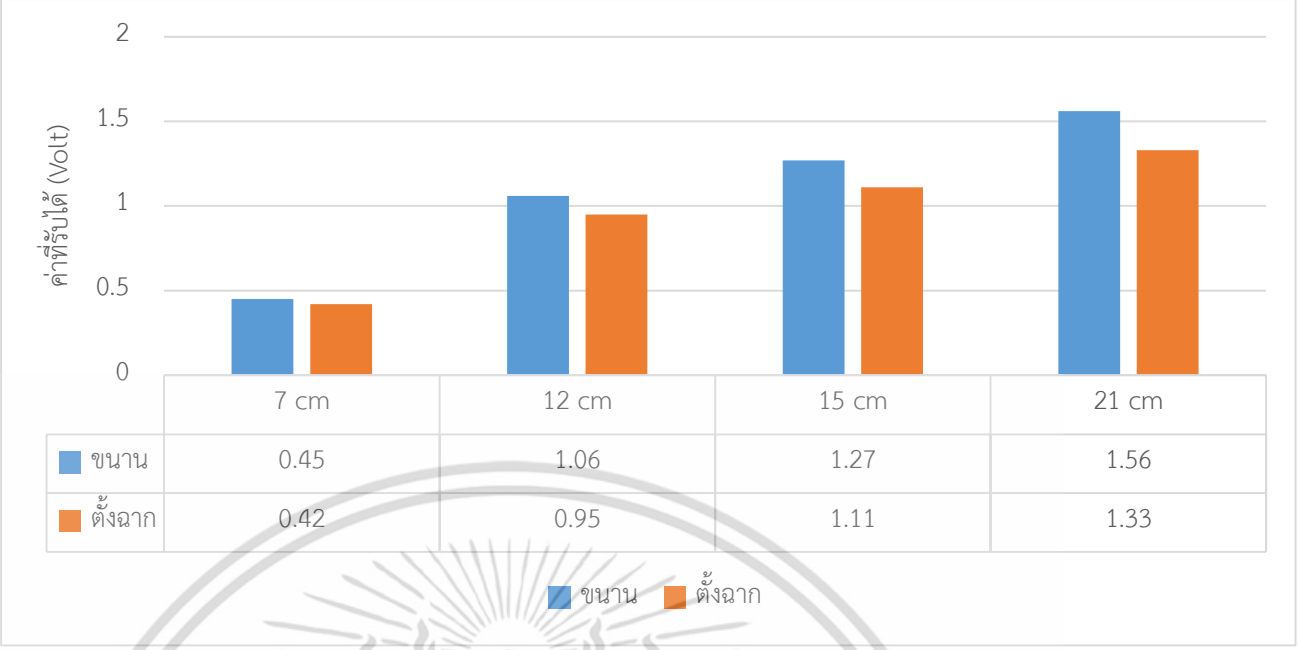
รูปที่ 4.47 เส้นสมการที่คาดคะเนความชื้นจากค่าเฉลี่ยของการทดลองแบบขนานดินทราย



รูปที่ 4.48 เส้นสมการที่คาดคะเนความชื้นจากค่าเฉลี่ยของการทดลองแบบตั้งฉากดินทราย

และสมการที่ได้จากการเก็บผลการทดลองทั้งหมดนี้จะถูกเขียนลงในโปรแกรมของตัวควบคุมก่อนที่จะนำไปใช้กับตัวเซนเซอร์ เพื่อที่จะแสดงค่าความชื้นที่ได้เมื่อระบบของตัวเซนเซอร์เริ่มทำงาน ซึ่งในการทดลองส่วนที่ 2 นี้ จะมีการวัดค่าความลึกของนำโดยมีการปรับระยะของน้ำและนำดินมาวางกลบขวดน้ำเพื่อที่จะตรวจสอบค่าที่ได้ เมื่อเทียบกับผลการคำนวณในบทที่ 3 โดยผลการทดลองวัดค่าความลึกของน้ำแสดงดังรูปที่ 4.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



	7 cm	12 cm	15 cm	21 cm
ขนาน	0.45	1.06	1.27	1.56
ตั้งฉาก	0.42	0.95	1.11	1.33

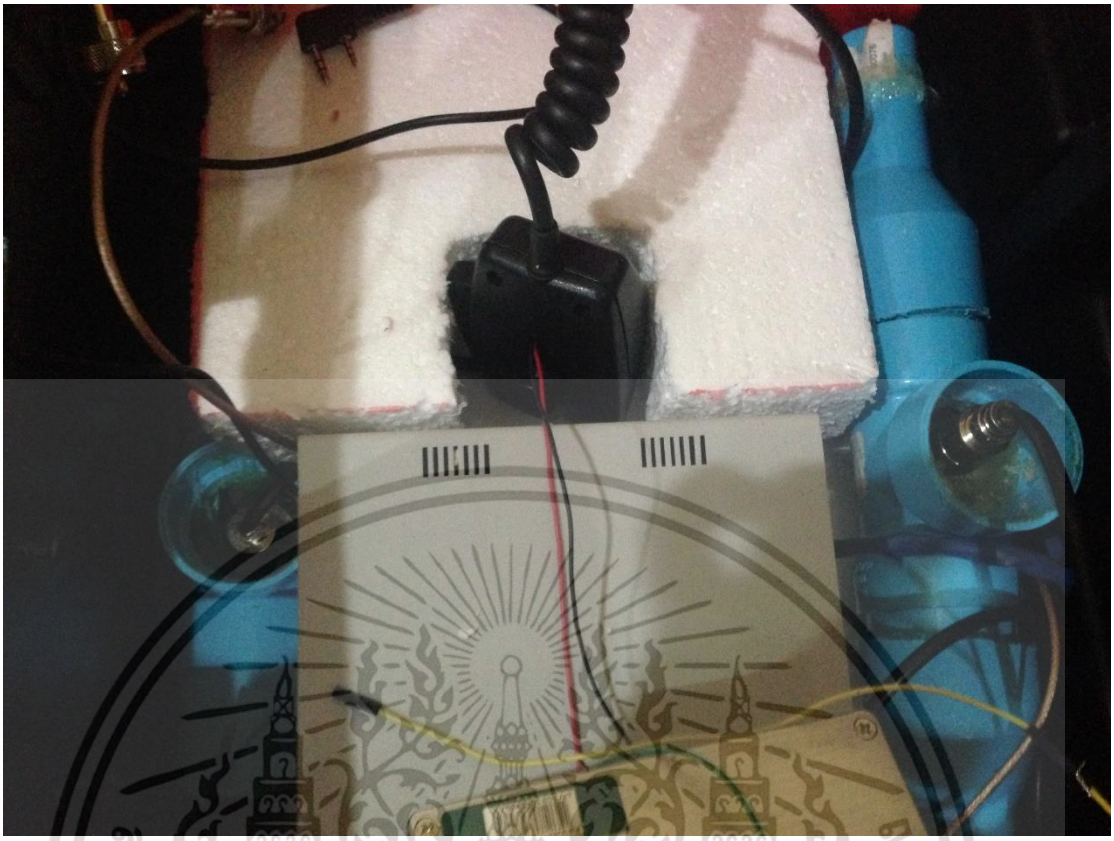
รูปที่ 4.49 ผลการทดลองเมื่อมีการวัดความลึกของน้ำที่อยู่ในดินที่ความถี่ 245 MHz

จากผลการทดลองสามารถเห็นได้ชัดว่าที่ความถี่ 245 MHz ณ ห้องทดลองสมมารถวัดความลึกของน้ำในดินมากสุด 21 cm ซึ่งมีค่าสัญญาณสูงสุดแรงเท่ากับดินปกติแล้ว

4.4 เครื่องเซนเซอร์ที่มีการติดตั้งลงในกล่องติดล้อและมีการควบคุมสายอากาศรับแบบอัตโนมัติ

จากผลการวัดทั้งหมดในหัวข้อที่ผ่านมาทำให้ได้ข้อสรุปที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเครื่องเซนเซอร์วัดความชื้นดินดังนี้ เพิ่มความสะดวกในการวัดหรือขนย้ายโดยจะมีการออกแบบให้บรรจุลงในกล่องและมีติดตั้งอุปกรณ์ให้คงที่ มีการติดล้อเพื่อความสะดวกในการวัดพื้นที่ที่มีบริเวณกว้างได้สะดวก ในการทดลองวัดค่าความลึกที่ความถี่ 245 MHz พบว่ามีสามารถตรวจพบน้ำได้ที่ความลึกเพียง 21 เซนติเมตร โดยเครื่องเซนเซอร์ที่ได้ทำในหัวข้อนี้ จะเลือกใช้ความถี่ในบท 3 ที่ได้แสดงผลคำนวณเปรียบเทียบความลึกที่ความถี่ 245 MHz และ 27 MHz ต่ำลงคือ 27 MHz เพื่อนำมาใช้ในการทดลองวัดความลึก ณ ดินแห้ง โดยระบบทั้งหมดยังคงถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งทำการควบการวัดและเก็บค่าสัญญาณแบบอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.50 สายอากาศความถี่ 27 MHz ที่วางขนานกัน

เครื่องเซนเซอร์ที่จะใช้ในการทดสอบวัดค่าความลึกของน้ำในดินซึ่งจะมีสายอากาศขดเป็นเกลียวบรรจุในท่อทำงานที่ความถี่ 27 MHz แสดงดังรูปที่ 4.50 วางขนานกันและจะมีสายอากาศมีนเดอร์ไลน์ ไดโพลที่ความที่ 245 MHz ที่มีสายอากาศด้านรับที่สามารถปรับเปลี่ยนเป็นแบบขนานหรือตั้งฉากกับสายอากาศในภาคส่งได้ เพื่อที่จะวัดค่าความชื้นดินและตรวจสอบความลึกของน้ำในดินในระดับที่ไม่ลึกมาก

โดยเครื่องเซนเซอร์นี้จะทำงานผ่านตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อส่งการทำงานระหว่างความถี่ 27 MHz และ 245 MHz ซึ่งจะสลับกันทำงานเพื่อวัดค่าความชื้นของดินและความลึกของน้ำในดินที่สามารถตรวจจับได้และจะแสดงค่าผ่านหน้าจอ LCD เพื่อบอกค่าความชื้นที่ทั้ง 2 ความถี่นั้นมีการอ่านได้และค่าความลึกของน้ำที่ความถี่ 27 MHz นั้นตรวจจับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 สรุป

ผลการทดลองทั้งหมดในบทนี้เป็นแนวทางในการสร้างและพัฒนาตัวเซนเซอร์ต่อไป โดยผลการทดลองจะเห็นว่าดินแต่ละชนิดมีผลทำให้ค่าสัญญาณที่ได้รับได้นั้นมีค่าที่มากน้อยแตกต่างกัน ดังนั้นหากต้องการความแม่นยำในการวัดค่าความชื้น จึงมีความจำเป็นต้องเก็บตัวอย่างการวัดข้อมูลของดินหลายๆชนิดก่อนที่จะนำมาสร้างกราฟเพื่อคาดคะเนค่าความชื้นของดินชนิดนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุป

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการคำนวณและทดลองทั้งหมดในวิทยานิพนธ์เล่มนี้และข้อเสนอแนะในการพัฒนาตัวเซนเซอร์วัดค่าความชื้นดินและความลึกของน้ำในดิน

5.2 สรุปผลการคำนวณและผลการทดลอง

ด้วยเหตุที่วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้จัดทำโดยอ้างอิงถึงสูตรการคำนวณของงานวิจัย [13] [20] ซึ่งจะเป็นการวัดโดยอาศัยการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศที่วางตั้งฉาก [13] และวางขนาน [20] กับสายอากาศในภาคส่ง ซึ่งจะมีการวางอยู่ในตัวกลางชนิดเดียวกัน โดยงานวิจัย [13] เป็นการวัดค่าความชื้นของข้าวเปลือก ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้มีการดัดแปลงสมการการคำนวณของงานวิจัยทั้งสองเพื่อที่จะนำมาใช้ในการวัดดินที่ผิวของดิน เพื่อหาค่าความชื้นของดินซึ่งจะสามารถวัดค่าความชื้นได้ง่ายกว่าหากมีการวัดที่ผิวโดยไม่จำเป็นต้องมีการปักหรือขุดลงไปในดินที่ต้องการจะวัดค่าความชื้น

ผลการคำนวณในบทที่ 3 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของค่าการเชื่อมต่อร่วมที่รับระหว่างสายอากาศในภาคส่งและภาครับเมื่อดินมีความชื้นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลการคำนวณจะมีค่าการเชื่อมต่อร่วมที่ลดลงเมื่อค่าความชื้นในดินมีค่าสูงขึ้น ซึ่งผลการคำนวณของการเชื่อมต่อร่วมเมื่อวางสายอากาศขนานหรือตั้งฉากกันมีค่าลดลงในทำนองเดียวกัน ทำให้สามารถคาดคะเนผลการทดลองได้ว่าค่าสัญญาณที่รับได้จากเครื่องตรวจจับกำลังงานของสัญญาณจะสามารถอ่านค่าได้น้อยลง เมื่อค่าความชื้นเพิ่มขึ้น และเมื่อมีการทดลอง ณ ความถี่ 245 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่เลือกใช้เนื่องจากว่าจะทำให้เซนเซอร์มีขนาดที่ไม่ใหญ่มาก อีกทั้งยังสามารถหาตัวส่งสัญญาณได้ง่ายจึงเหมาะสมต่อการทดลอง แม้ว่าจะมีการลดขนาดของตัวสายอากาศลง โดยการเปลี่ยนจากสายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศมีนเดอร์ไลน์ ไดโพล จากการทดลองให้ผลที่เป็นไปตามการคำนวณคือเมื่อสายอากาศตัวรับเป็นแบบขนานกับสายอากาศตัวส่งค่าการเชื่อมต่อร่วมที่ได้จะมีค่ามากกว่าเมื่อสายอากาศตัวรับตั้งฉากกับสายอากาศตัวส่ง และค่าการเชื่อมต่อร่วมยังมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าความชื้นดินสูงขึ้น แม้ว่าจะมีสัญญาณรบกวนจากผู้ใช้ความถี่เดียวกัน แต่เมื่อนำค่าที่ได้มาทำการเฉลี่ยก็จะแสดงให้เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้นดังแสดงในบทที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ค่าสัญญาณที่สัมพันธ์กับความชื้นของดิน ณ ขณะนั้นจะนำค่าเหล่านั้นมาเฉลี่ยก่อนที่จะสร้างเส้นสมการเพื่อใช้ในการคาดคะเนค่าความชื้นของดินได้ จากผลการทดลองยังคงมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างในบางช่วงความชื้น ซึ่งอาจเกิดจากสภาพความเรียบของผิวดิน ชนิดของดินหรือองค์ประกอบที่ส่งผลกระทบเช่น หิน หรือชั้นดินที่แตกต่างกัน เป็นต้น ทำให้มีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น

แม้จะมีค่าความผิดพลาดแต่ก็สามารถบอกและแสดงผลค่าความชื้นได้อย่างรวดเร็ว ทำให้มีแนวคิดในการเพิ่มความสามารถในการทำงานของเซนเซอร์ตัวนี้ โดยที่สามารถวัดระยะความลึกของน้ำในดินที่แห้งมากๆได้ จึงได้มีการทดลอง ณ ความถี่ 245 MHz ที่ดินปกติ ซึ่งผลที่ได้ทำให้ทราบว่าเมื่อดินมีค่าความชื้นอยู่บ้างและความถี่ที่ใช้ยังไม่ต่ำมากพอ ทำให้ระยะความลึกที่สามารถตรวจจับน้ำได้นั้นอยู่เพียงผิวๆของพื้นดินเท่านั้น จึงได้มีแนวคิดที่จะใช้ความถี่ที่ต่ำลงและมีกำลังส่งที่สูงขึ้น ก่อนที่จะนำมาสร้างเป็นเครื่องเซนเซอร์

5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาตัวเซนเซอร์

ในการสร้างตัวเซนเซอร์แสดงดังหัวข้อที่ 4.4 ยังคงจำเป็นต้องมีการทดสอบและทดลองวัดค่าความชื้นของดินที่หลากหลายชนิด เพื่อที่จะสร้างความแม่นยำในการใช้งานให้มากขึ้น อีกทั้งยังต้องมีการทดลองเพิ่มเติมที่ความถี่ 27 MHz เพื่อศึกษาแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นเมื่อนำไปวัดระยะความลึกของน้ำในดิน และควรเพิ่มการปรับเทียบกับอากาศ เพื่อที่จะทำให้มีความแม่นยำมากขึ้นในการวัดทุกๆครั้งที่มีการย้ายหรือเปลี่ยนสถานที่ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กรมทรัพยากรน้ำบาดาล “**ทบ.เจาะน้ำบาดาลภัยแล้ง**”, Jul 2016
เข้าถึงได้ที่ http://www.mnre.go.th/ewt_news.php?nid=10118&filename=index

[2] S. Lekshmi, D.N. Sigh, and M.S. Baghini, “**A critical review of soil moisture measurement**,” Measurement, Vol. 54, pp.92-105, 2014.

[3] C.M.K. Gardner, T.J. Dean, and J.D. Cooper, “**Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor**,” J. Agric. Eng. Res., Vol. 71 , pp.395-403, 1998.

[4] G.C. Topp, “**Electromagnetic determination of soil water content : Measurements in coaxial transmission line**,” Water Resources Research, Vol.16, No. 3, pp.574-582, June 1980.

[5] J.J. Casanova, S.R. Evett, and R.C. Schwartz, “**Design of access-tube TDR sensor for soil water content : Theory**,” IEEE Sensors Journal, Vol.12, No.6, pp. 1979-1986, June 2012.

[6] J.J. Casonova, S.R. Evett, and R.C. Schwartz, “**Design of access-tube TDR sensor for soil water content : Testing**,” IEEE Sensors Journal, Vol.12, No.6, pp. 2064-2070, June 2012.

[7] F.T. Ulaby, “**Radar measurement of soil moisture content**,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. Ap-22, No.2, pp.257-265, March 1974.

[8] R.W. Newton and J.W. Rouse, “**Microwave radiometer measurements of soil moisture content**,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-28, No.5, pp.680-686, September 1980.

[9] E.G. Njoku and D.Entelehabi, “**Passive microwave remote sensing of soil moisture**,” Journal of Hydrology, Vol. 184, pp.101-129, 1996.

[10] J.Minet, S. Lambot, E.C. Slob, and M. Vanclooster, “**Soil surface water content estimation by full-waveform GPR signal inversion in the presence of thin layers**,” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.48, No.3, pp.1138-1150, March 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] J.L. Nicole, “**The input impedance of horizontal antennas above an imperfect earth**,” Radio Science, Vol.15, pp.471-477, 1980.

[12] J. Mearnchu, T. Limpiti, D. Torrungrueng, P. Akkaraekthalin, and M. Krairiksh, “**A handheld moisture content sensor using coupled-dipole antennas**,” Latin Amer. Appl. Res., Vol.40, No.3, pp.199-206, 2010.

[13] T. Limpiti and M. Krairiksh, “**In situ moisture content monitoring sensor detecting mutual coupling magnitude between parallel and perpendicular dipole antennas**,” IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 61, No. 8, pp. 2230-2241, August 2012.

[14] A. E-C Tan, S. Richands, L. Sarrabezolles, I. Patt, and I. Woodhead, “**Proximal soil moisture sensing of dairy pasture**”, Proc. of IEEE AP-S/URSI 2015.

[15] พันธ์ทวี สหะรัตน์ , “**การจัดการดิน**,” วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีกำแพงเพชร, 2554

[16] โมไนย ไกรฤกษ์, **“วิศวกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า**,” บริษัท พิมพ์สวย จำกัด., พฤษภาคม 2544

[17] J. Cihlar and T. Ulaby, “**Dielectric properties of soils as a function of soil moisture content**,” CRES Technical Report, 177-47, November 1974

[18] T. Limpiti, “**Switchable Antennas and Their Application in Dielectric Properties Determination**,” Doctoral Thesis, Faculty of Engineering King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2013

[19] C. A. Balanis, ***Antenna Theory: Analysis and Design***. New York: Wiley, 1982.

[20] E. King, “**Mutual impedance of unequal length antennas in echelon**,” IRE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, pp.306-312, July 1957

[21] H. Nakano, H. Tagami, A. Yoshizawa, and J. Yamanchi, “**Shortening ratios of modified dipole antennas**,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-32, No.4, pp.385-386, April 1984.

[22] Y.S.H. Khraisat, K.A. Hmood, and A-M Anwar, “**The current distribution of symmetrical dual and triple leading full-wave dipole antennas**,” Modern Applied Science, Vol.5, No.6, pp.126-132, December 2011.

[23] Takemura Electric work, LTD “**Soil Tester DM-5 Brochure**,” Tokyo ,JAPAN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ค่าของ A_iในสมการที่ (2.28) และ (2.30)

$$A_1 = -(\frac{h-H}{d})[\exp(d\beta)\{\cos(d\alpha) - jsin(d\alpha)\}\{\{Ci(u_0) - Ci(u_1)\} + j\{Si(u_0) - Si(u_1)\}\}]$$

$$A_2 = -(\frac{h+H}{d})[\exp(d\beta)\{\cos(d\alpha) - jsin(d\alpha)\}\{\{Ci(u_3) - Ci(u_2)\} + j\{Si(u_3) - Si(u_2)\}\}]$$

$$A_3 = \frac{2h}{d}\frac{1}{2}[\cos(H\alpha)\{\exp(H\beta) + \exp(-H\beta)\} - jsin(H\alpha)\{\exp(H\beta) - \exp(-H\beta)\}][\exp(d\beta)\{\cos(d\alpha) - jsin(d\alpha)\}][\{Ci(u_5) - Ci(u_4)\} + j\{Si(u_5) - Si(u_4)\}]$$

$$A_4 = -(\frac{h-H}{d})[\exp(-d\beta)\{\cos(d\alpha) + jsin(d\alpha)\}\{\{Ci(v_0) - Ci(v_1)\} - j\{Si(v_0) - Si(v_1)\}\}]$$

$$A_5 = -(\frac{h+H}{d})[\exp(-d\beta)\{\cos(d\alpha) + jsin(d\alpha)\}\{\{Ci(v_3) - Ci(v_2)\} - j\{Si(v_3) - Si(v_2)\}\}]$$

$$A_6 = \frac{2h}{d}\frac{1}{2}[\cos(H\alpha)\{\exp(H\beta) + \exp(-H\beta)\} - jsin(H\alpha)\{\exp(H\beta) - \exp(-H\beta)\}][\exp(-d\beta)\{\cos(d\alpha) + jsin(d\alpha)\}][\{Ci(u_5) - Ci(u_4)\} - j\{Si(u_5) - Si(u_4)\}]$$

$$A_7 = (\frac{h-H}{d})[\{\exp(-2\mathrm{H}\beta)\exp(-d\beta)\}\{\cos(2H\alpha) + jsin(2H\alpha)\}\{\cos(d\alpha) + jsin(d\alpha)\}\{\{Ci(m_1) - Ci(v_0)\} - j\{Si(m_1) - Si(v_0)\}\}]$$

$$A_8 = (\frac{h+H}{d})[\{\exp(-2\mathrm{H}\beta)\exp(-d\beta)\}\{\cos(2H\alpha) + jsin(2H\alpha)\}\{\cos(d\alpha) + jsin(d\alpha)\}\{\{Ci(m_2) - Ci(v_3)\} - j\{Si(m_2) - Si(v_3)\}\}]$$

$$A_9 = \frac{2h}{d}\frac{1}{2}[\cos(H\alpha)\{\exp(H\beta) + \exp(-H\beta)\} - jsin(H\alpha)\{\exp(H\beta) - \exp(-H\beta)\}][\{\exp(-2H\beta)\exp(-d\beta)\}\{\cos(2H\alpha) + jsin(H\alpha)\}\{\cos(d\alpha) + jsin(d\alpha)\}][\{Ci(m_3) - Ci(v_5)\} - j\{Si(m_3) - Si(v_5)\}]$$

$$A_{10} = (\frac{h-H}{d})[\{\exp(2\mathrm{H}\beta)\exp(d\beta)\}\{\cos(2H\alpha) - jsin(2H\alpha)\}\{\cos(d\alpha) - jsin(d\alpha)\}\{\{Ci(m_4) - Ci(u_0)\} - j\{Si(m_4) - Si(u_0)\}\}]$$

$$A_{11} = (\frac{h+H}{d})[\{\exp(2\mathrm{H}\beta)\exp(d\beta)\}\{\cos(2H\alpha) - jsin(2H\alpha)\}\{\cos(d\alpha) - jsin(d\alpha)\}\{\{Ci(m_5) - Ci(u_3)\} - j\{Si(m_5) - Si(u_3)\}\}]$$

$$A_{12} = -\frac{2h}{d}\frac{1}{2}[\cos(H\alpha)\{\exp(H\beta) + \exp(-H\beta)\} - jsin(H\alpha)\{\exp(H\beta) - \exp(-H\beta)\}][\{\exp(-2H\beta)\exp(d\beta)\}\{\cos(2H\alpha) - jsin(H\alpha)\}\{\cos(d\alpha) - jsin(d\alpha)\}][\{Ci(m_6) - Ci(u_5)\} + j\{Si(m_6) - Si(u_5)\}]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$u_0 = k[(H+d) - \sqrt{(H-h)^2 + (H+d)^2}]$$

$$u_1 = k[d - \sqrt{(H-h)^2 + d^2}]$$

$$u_2 = k[d - \sqrt{(H+h)^2 + d^2}]$$

$$u_3 = k[(H+d) - \sqrt{(H+h)^2 + (H+d)^2}]$$

$$u_4 = k[d - \sqrt{h^2 + d^2}]$$

$$u_5 = k[(H+d) - \sqrt{h^2 + (H+d)^2}]$$

$$v_0 = k\left[\sqrt{(H-h)^2 + (H+d)^2} + (H+d)\right]$$

$$v_1 = k[\sqrt{(H-h)^2 + d^2} + d]$$

$$v_2 = k[\sqrt{(H+h)^2 + d^2} + d]$$

$$v_3 = k\left[\sqrt{(H+h)^2 + (H+d)^2} + (H+d)\right]$$

$$v_4 = k[\sqrt{h^2 + d^2} + d]$$

$$v_5 = k\left[\sqrt{h^2 + (H+d)^2} + (H+d)\right]$$

$$m_1 = k\left[\sqrt{(H-h)^2 + (2H+d)^2} + (2H+d)\right]$$

$$m_2 = k\left[\sqrt{(H+h)^2 + (2H+d)^2} + (2H+d)\right]$$

$$m_3 = k\left[\sqrt{h^2 + (2H+d)^2} + (2H+d)\right]$$

$$m_4 = k[(2H+d) - \sqrt{(H-h)^2 + (2H+d)^2}]$$

$$m_5 = k[(2H+d) - \sqrt{(H+h)^2 + (2H+d)^2}]$$

โดย $Ci(.)$และ$Si(.)$ คือ ค่า sine และ cosine อินทิเกรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ค่า R_{21}และX_{21}จากสมการที่ (2.36ง)

$$R_{21} = \{cos\beta(l_1 - h)\big(Ci(u_0) + Ci(v_0) - Ci(u_1) - Ci(v_1)\big) + sin\beta(l_1 - h)\big(-Si(u_o) + Si(v_0) + Si(u_1) - Si(v_1)\big) + cos\beta(l_1 + h)\big(Ci(u'_0) + Ci(v'_0) - Ci(u_2) - Ci(v_2)\big) + sin\beta(l_1 + h)\big(-Si(u'_o) + Si(v_{,0}) + Si(u_2) - Si(v_2)\big) + cos\beta(l_1 - 2l_2 - h)\big(-Ci(u_1) - Ci(v_1) + Ci(u_3) + Ci(v_3)\big) + sin\beta(l_1 - 2l_2 - h)\big(Si(u_1) - Si(v_1) - Si(u_3) + Si(v_3)\big) + cos\beta(l_1 + 2l_2 + h)\big(-Ci(u_2) - Ci(v_2) + Ci(u_4) + Ci(v_4)\big) + sin\beta(l_1 + 2l_2 + h)\big(Si(u_2) - Si(v_2) - Si(u_4) + Si(v_4)\big) + 2cos\beta l_1 cos\beta h\big(-Ci(w_1) - Ci(y_1) + Ci(w_2) + Ci(y_2)\big) + 2cos\beta l_1 cos\beta h\big(Si(w_1) - Si(y_1) - Si(w_2) + Si(y_2)\big) + 2cos\beta l_1 cos\beta(2l_2 + h)\big(Ci(w_2) + Ci(y_2) - Ci(w_3) - Ci(y_3)\big) + 2cos\beta l_1 cos\beta(2l_2 + h)(-Si(w_2) + Si(y_2) - Si(w_3) + Si(y_3))\}$$

$$X_{21} = \{cos\beta(l_1 - h)\big(-Si(u_0) - Si(v_0) + Si(u_1) + Si(v_1)\big) + sin\beta(l_1 - h)\big(-Ci(u_o) + Ci(v_0) + Ci(u_1) - Ci(v_1)\big) + cos\beta(l_1 + h)\big(-Si(u'_0) - Si(v'_0) + Si(u_2) + Si(v_2)\big) + sin\beta(l_1 + h)\big(-Ci(u'_o) + Ci(v_{,0}) + Ci(u_2) - Ci(v_2)\big) + cos\beta(l_1 - 2l_2 - h)\big(Si(u_1) + Si(v_1) - Si(u_3) - Si(v_3)\big) + sin\beta(l_1 - 2l_2 - h)\big(Ci(u_1) - Ci(v_1) - Ci(u_3) + Ci(v_3)\big) + cos\beta(l_1 + 2l_2 + h)\big(Si(u_2) + Si(v_2) - Si(u_4) - Si(v_4)\big) + sin\beta(l_1 + 2l_2 + h)\big(Ci(u_2) - Ci(v_2) - Ci(u_4) + Ci(v_4)\big) + 2cos\beta l_1 cos\beta h\big(Si(w_1) - Si(y_1) + Si(w_2) + Si(y_2)\big) + 2cos\beta l_1 cos\beta h\big(Ci(w_1) - Ci(y_1) - Ci(w_2) + Ci(y_2)\big) + 2cos\beta l_1 cos\beta(2l_2 + h)\big(-Si(w_2) - Si(y_2) + Si(w_3) + Si(y_3)\big) + 2cos\beta l_1 cos\beta(2l_2 + h)(-Ci(w_2) + Ci(y_2) + Ci(w_3) - Ci(y_3))\}$$

เมื่อ

$$u_0 = \beta\left(\sqrt{d^2 + (h - l_1)^2} + (h - l_1)\right)$$

$$v_0 = \beta\left(\sqrt{d^2 + (h - l_1)^2} - (h - l_1)\right)$$

$$u'_0 = \beta\left(\sqrt{d^2 + (h + l_1)^2} - (h + l_1)\right)$$

$$v'_0 = \beta\left(\sqrt{d^2 + (h + l_1)^2} + (h + l_1)\right)$$

$$u_1 = \beta\left(\sqrt{d^2 + (h - l_1 + l_2)^2} + (h - l_1 + l_2)\right)$$

$$v_1 = \beta\left(\sqrt{d^2 + (h - l_1 + l_2)^2} - (h - l_1 + l_2)\right)$$

$$u_2 = \beta\left(\sqrt{d^2 + (h + l_1 + l_2)^2} + (h + l_1 + l_2)\right)$$

$$v_2 = \beta\left(\sqrt{d^2 + (h + l_1 + l_2)^2} + (h + l_1 + l_2)\right)$$

$$u_3 = \beta\left(\sqrt{d^2 + (h - l_1 + l_2)^2} + (h - l_1 + 2l_2)\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_3 = \beta\left(\sqrt{d^2 + (h - l_1 + l_2)^2} - (h - l_1 + 2l_2)\right)$$

$$u_4 = \beta\left(\sqrt{d^2 + (h + l_1 + l_2)^2} - (h + l_1 + 2l_2)\right)$$

$$v_4 = \beta\left(\sqrt{d^2 + (h + l_1 + l_2)^2} + (h + l_1 + 2l_2)\right)$$

$$w_1 = \beta(\sqrt{d^2 + h^2} - h)$$

$$y_1 = \beta\left(\sqrt{d^2 + h^2} + h\right)$$

$$w_2 = \beta\left(\sqrt{d^2 + (h + l_2)^2} - (h + l_2)\right)$$

$$y_2 = \beta\left(\sqrt{d^2 + (h + l_2)^2} + (h + l_2)\right)$$

$$w_3 = \beta\left(\sqrt{d^2 + (h + 2l_2)^2} - (h + 2l_2)\right)$$

$$y_3 = \beta\left(\sqrt{d^2 + (h + 2l_2)^2} + (h + 2l_2)\right)$$

โดย $Ci(.)$และ$Si(.)$ คือ ค่า sine และ cosine อินทิเกรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย ฉัตรพล เหรียญทอง
วัน เดือน ปีเกิด	15 มกราคม 2534
ที่อยู่	1027/1 เขต สายไหม แขวง สายไหม จังหวัด กรุงเทพมหานคร 10220
	โทร 0-9910-96838
ประวัติการศึกษา	2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง
	มหาวิทยาลัยรังสิต

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

2016 **C. Rienthong**, C. Kittiyanpunya and M. Krairiksh. “Moisture content sensor detecting difference of mutual coupling magnitude between parallel and perpendicular dipole antannas,” Thailand-Japan Micro Wave (TJMW), 9-11 Jun,2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้