

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผลที่ได้จากการดำเนินการวิจัยตามวิธีการวิจัยที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 เพื่อออกแบบและสร้างระบบไมโครเวฟเซนเซอร์ตรวจสอบความชื้นดินผลการวิจัยที่ได้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตัวอย่างสำหรับการวิจัย

ดินตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ความชื้น คือ ดินอาคาตามะ (Akadama soil) มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี เป็นดินที่นิยมนำมาใช้ปลูกต้นไม้ในกระถาง ซึ่งการปลูกต้นไม้ในกระถางจำเป็นต้องรดน้ำควบคุมความชื้นให้เหมาะสมตลอดเวลา โดยเฉพาะต้นไม้ที่ราคาสูง เช่น บอนไซ ลักษณะของดินอาคาตามะมีรูปร่างและขนาดเท่าๆ กัน ดังภาพที่ 4.1



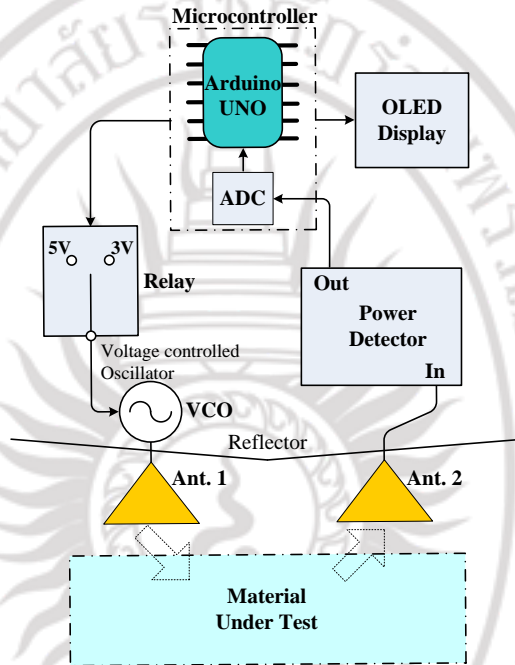
ภาพที่ 4.1 ลักษณะดินอะคาตามะสำหรับทดสอบ

ระดับความชื้นที่ใช้ในการวิจัยนี้จึงเลือกใช้ความชื้นอยู่ในช่วง 0% ถึง 35% ซึ่งเป็นช่วงความชื้นที่เหมาะสมกับการปลูกพืช

ผลการออกแบบโครงสร้างของระบบ

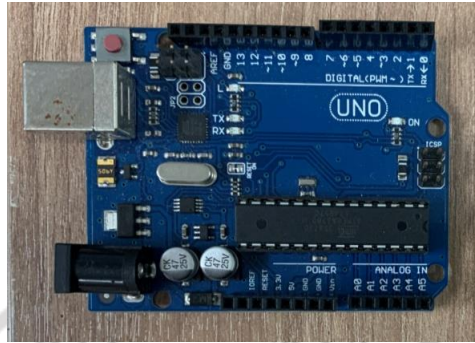
จากข้อมูลพื้นฐานสำหรับการวิจัย นำมาออกแบบโครงสร้างการทำงานของระบบไมโครเวฟเซนเซอร์ตรวจสอบความชื้นดิน โดยระบบประกอบด้วย สายอากาศทั้งหมด 2 ตัว แหล่งกำเนิดคลื่นความถี่สูง อุปกรณ์ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าหรือรีเลย์ อุปกรณ์ตรวจจับกำลังงาน (Power detector) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูยโน (Arduino UNO) และจอแสดงผลโอแอลอีดี (Organic Light Emitting Diodes: OLED) สายอากาศตัวที่ 1 ทำงานด้วยการส่งคลื่นความถี่ 2.4 GHz และ 2.45 GHz จากโมดูลสร้างคลื่นความถี่ (Voltage controlled oscillator: VCO) ส่งคลื่นไปยังดินตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัด โดยใช้แรงดันไฟสองระดับ คือ 3 โวลต์ และ 5 โวลต์ สลับจ่ายไปให้โมดูลสร้างคลื่นแต่ละค่าตามไฟเลี้ยง โดยใช้รีเลย์เป็นตัวควบคุม และสายอากาศตัวที่ 2 ใช้เพื่อรับคลื่นที่สะท้อนกลับจากดินตัวอย่าง จากนั้นคลื่นสะท้อนถูกรับด้วยสายอากาศรับที่วางอยู่ด้านข้างของ

สายอากาศส่ง คลื่นที่รับได้ถูกส่งต่อไปให้ยังไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงาน เพื่อแปลงคลื่นความถี่ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จากนั้นส่งไปยังโมดูล ADC ให้ทำการแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเป็นสัญญาณดิจิทัล และส่งต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อแสดงผลออกทางหน้าจอ OLED โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ทั้งหมดในวงจร และทำหน้าที่ประมวลผลเพื่อแสดงค่าความชื้นที่วัดได้ โครงสร้างของระบบแสดงดังในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 โครงสร้างของระบบตรวจวัดความชื้นดิน

จากการศึกษาข้อมูลอุปกรณ์และเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับงานวิจัย ได้เลือกอุปกรณ์สร้างคลื่นในย่านความถี่ 2.4 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ด้วยโมดูลสร้างสัญญาณความถี่ NMRf vco 2.4 GHz โมดูล AD8362 ทำการแปลงคลื่นความถี่ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้สำหรับเป็นส่วนควบคุมและประมวลผล เลือกใช้ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 ใช้ MCU รุ่น ATMEGA328P เนื่องจากมีฟังก์ชันการทำงานที่ครบถ้วนเพียงพอ และราคาไม่แพง ลักษณะของบอร์ดอาควัยโนที่เลือกใช้แสดงดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 บอร์ดอาดูยโน รุ่น Nano

ส่วนจอแสดงผล เลือกใช้เป็นจอโอแอลอีดี (OLED) เนื่องจากสามารถทำงานเข้ากับบอร์ดอาดูยโน ได้ง่าย ราคาไม่แพง และแสดงผลได้ชัดเจน ดังภาพที่ 4.4



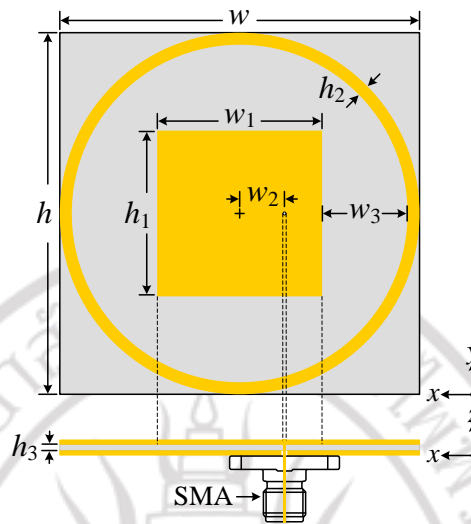
ภาพที่ 4.4 จอโอแอลอีดี

ผลการพัฒนาระบบควบคุมการตรวจสอบความชื้นดินต้นแบบ

ผลจากการพัฒนาระบบไมโครเวฟเซนเซอร์ตรวจสอบความชื้นดิน ตามแผนผังที่ได้ออกแบบ และพัฒนาระบบควบคุมการทำงานลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ดังนี้

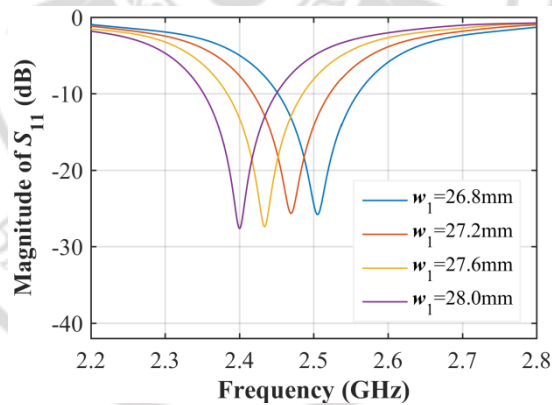
1. สายอากาศต้นแบบ

การส่งและรับคลื่นความถี่ในการตรวจสอบความชื้นดินจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนประยุกต์ใช้สายอากาศแพทช์ เนื่องจากโครงสร้างมีความซับซ้อนต่ำ ขนาดกะทัดรัด ติดตั้งเข้ากับระบบได้ง่าย ขนาดและระยะจุดป้อนสัญญาณของสายอากาศได้รับการคำนวณจากทฤษฎีและใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า CST Studio Suite 2019 เพื่อหาขนาดและจุดป้อนสัญญาณที่เหมาะสม แผ่นวงจรพิมพ์ 2 หน้า ชนิด FR4 ถูกใช้เพื่อพัฒนาสายอากาศ คุณสมบัติของแผ่นวงจรพิมพ์ถูกใช้เป็นข้อมูลในการจำลอง วัสดุฐานรอง (Substrate) ของแผ่นวงจรพิมพ์มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r') 4.1 มีความหนา 3.2 มิลลิเมตร โครงสร้างของสายอากาศมีรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 60x60 มิลลิเมตร และมีแผ่นสะท้อนคลื่นอยู่บนวัสดุฐานรองด้านเดียวกับตัวนำสัญญาณ ใช้การป้อนสัญญาณแบบโพรบโคแอกเซียลดังภาพที่ 4.5



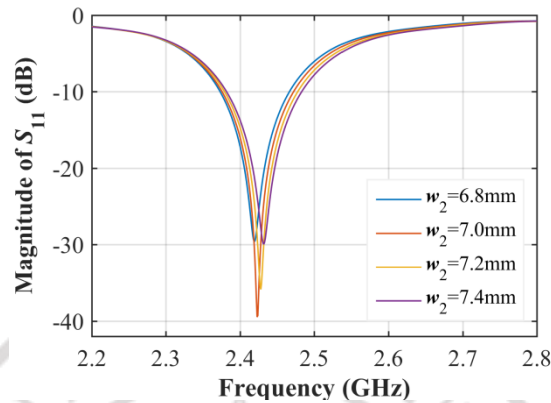
ภาพที่ 4.5 โครงสร้างของสายอากาศแพทช์

ขนาดของตัวนำ (w_1) ได้รับการปรับเพื่อหาความถี่ทำงานของสายอากาศ โดยปรับตั้งแต่ 26.8 ถึง 28 มิลลิเมตร และได้ขนาดที่เหมาะสม คือ 27.6 มิลลิเมตร ให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ต่ำสุด อยู่ที่ -27.4 เดซิเบล ดังแสดงในภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 การปรับขนาดของตัวนำสัญญาณ

เมื่อได้ขนาดตัวนำสัญญาณที่เหมาะสม จากนั้นจึงปรับระยะของจุดบ่อนสัญญาณ (w_2) ที่ห่างจากจุดศูนย์กลางของตัวนำตั้งแต่ 6.8 ถึง 7.4 มิลลิเมตร ให้ค่าพารามิเตอร์ S_{11} ต่ำสุดอยู่ที่ -25.79 ถึง -36.64 เดซิเบล ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.7



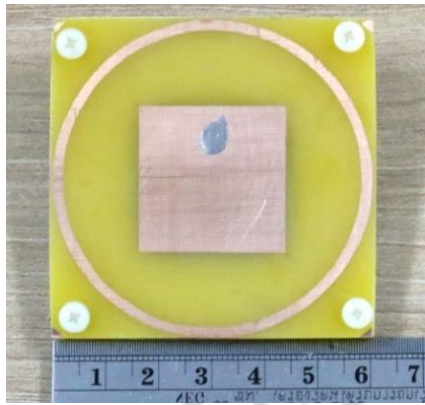
ภาพที่ 4.7 การปรับระยะจุดป้อนสัญญาณ

จากการปรับโครงสร้างของสายอากาศด้วยการจำลอง แสดงให้เห็นว่าขนาดที่เหมาะสมของตัวนำอยู่ที่ 27.6 มิลลิเมตร และระยะจุดป้อนสัญญาณอยู่ที่ 7.0 มิลลิเมตร ส่วนสะท้อนคลื่นรูปวงแหวนกว้าง 2 มิลลิเมตร มีรัศมีที่ 30 มิลลิเมตร และให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ความถี่ 2.4 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ อยู่ที่ -15.96 และ -14.99 เดซิเบล ขนาดที่เหมาะสมดังตารางที่ 4.1

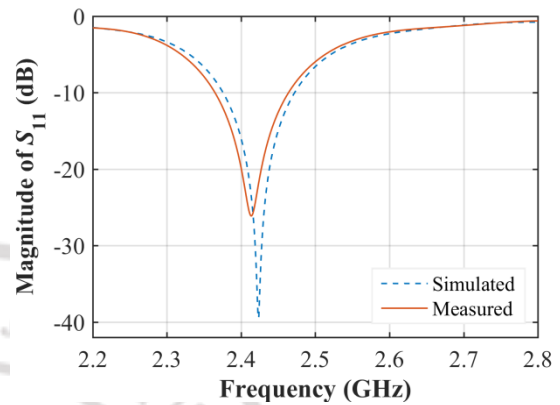
ตารางที่ 4.1 ขนาดของสายอากาศแพทช์

พารามิเตอร์	h, w	h_1, w_1	h_2	h_3	w_2	w_3
ขนาด (mm)	60.0	27.6	2.0	3.2	7.0	14.2

โครงสร้างจากการจำลองถูกใช้พัฒนาสายอากาศต้นแบบ โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ 2 หน้า ชนิด FR4 วัสดุฐานรองหนา 3.2 มิลลิเมตร แสดงดังในภาพที่ 4.8 (ก) สายอากาศได้รับการพัฒนาทั้งหมด 2 ตัว โครงสร้างแบบเดียวกันใช้สำหรับภาคส่งและภาครับ ทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Vector network analyzer) ของบริษัท Rohde & Schwarz รุ่น FPC15000 ที่ความถี่ 2.2 ถึง 2.8 กิกะเฮิรตซ์ สายอากาศมีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 เดซิเบล อยู่ในช่วงความถี่ 2.37 ถึง 2.46 กิกะเฮิรตซ์ ผลการทดสอบแสดงดังในภาพที่ 4.8 (ข)



(ก)



(ข)

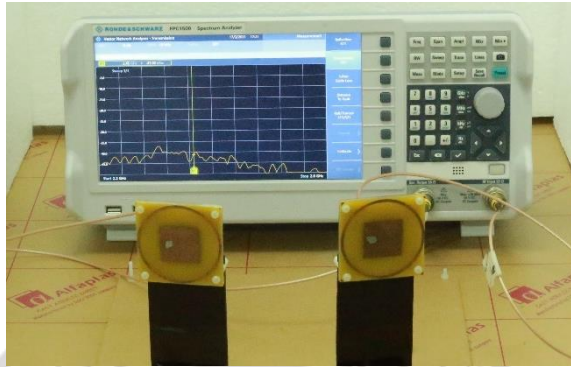
ภาพที่ 4.8 (ก) สายอากาศต้นแบบ (ข) ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบ

สายอากาศทำงานได้ดีในช่วงความถี่ใช้งาน สอดคล้องกับผลการจำลอง แต่อย่างไรก็ตาม สายอากาศที่สร้างขึ้นมีช่วงความถี่ทำงานกว้างและเลื่อนต่ำลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลการจำลอง เนื่องจากความหนาและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองที่ต่างจากการจำลองเล็กน้อย ค่าการสูญเสียย้อนกลับของความถี่ 2.4 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ อยู่ที่ -19.79 และ -12.59 เดซิเบล ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้และเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้เพื่อรับส่งกำลังงานความถี่สูง

2. ผลการวิเคราะห์ความชื้นดินด้วยสายอากาศแพทช์

การกระจายตัวของความชื้นจึงสม่ำเสมอ ระดับความชื้น (Gravimetric soil moisture content: MC) ในแต่ละระดับถูกวัดด้วยเครื่องมือมาตรฐาน (Grain moisture meter) รุ่น AR991 เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงเทียบกับผลการทดลอง การปรับความชื้นทำทั้งหมด 8 ระดับ ตั้งแต่ 0% 5% 10% ถึง 35% จากนั้นบรรจุในภาชนะพลาสติกขนาด 30x15x5 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.9 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความชื้น สายอากาศถูกใช้งานร่วมกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย สายอากาศตัวที่ 1 เข้ากับพอร์ตที่ 1 (Output port) และสายอากาศตัวที่ 2 เข้ากับพอร์ตที่ 2 (Input port) โดยใช้สายโคแอกเซียลชนิดสูญเสียต่ำ (Low loss coaxial cable) 50 โอห์ม สายอากาศวางห่างกันที่ระยะ 10 เซนติเมตร เพื่อลดการเชื่อมต่อ (Coupling) ของสัญญาณระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ดังแสดงในภาพที่ 4.9

สืบสิริของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี



ภาพที่ 4.9 การตรวจวัดความขึ้นดินโดยใช้สายอากาศแพทช์

ทดสอบความสามารถในการส่งออกและการตรวจจับกำลังงานการสะท้อนของสายอากาศที่เกิดจากการตรวจวัดดิน กำลังงานส่งออกจากพอร์ตที่ 1 คือ 0 เดซิเบลมิลลิวัตต์ และตรวจวัดกำลังงานการสะท้อนกลับจากดินที่พอร์ต 2 คือ ค่าพารามิเตอร์ S_{21} และสังเกตที่ความถี่ 2.4 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ที่ความขึ้นดิน 0% ให้ค่า S_{21} อยู่ที่ -36.81 และ -37.09 เดซิเบล เมื่อความขึ้นดินเป็น 5% กำลังงานที่สะท้อนกลับมาจากดินเพิ่มขึ้นอยู่ที่ -36.27 และ -36.33 เดซิเบล และที่ความขึ้นดิน 10% 15% ถึง 35% ให้กำลังงานการสะท้อนกลับเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขนาดของ $|S_{21}|$ จากการตรวจวัดที่แต่ละระดับความขึ้นดิน

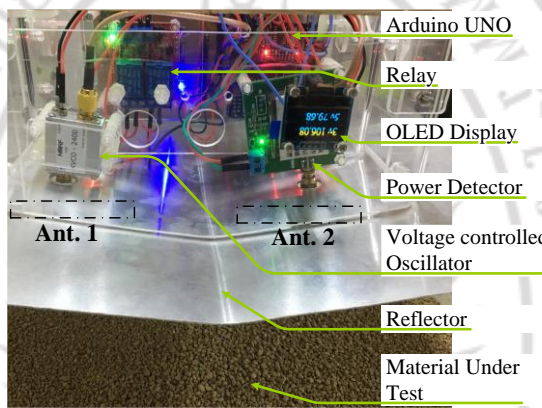
ความขึ้น (%)		0	5	10	15	20	25	30	35
S_{21} (dBm)	$f = 2.40$ GHz	-36.81	-36.27	-35.39	-35.17	-34.07	-33.56	-32.71	-32.06
	$f = 2.45$ GHz	-37.09	-36.33	-35.42	-35.24	-35.20	-33.59	-32.81	-32.13

ผลการตรวจวัดแสดงให้เห็นว่ากำลังงานการสะท้อนของทั้ง 2 ความถี่ ตอบสนองได้ชัดเจนต่อเปลี่ยนแปลงของความขึ้นดิน จึงมีความเป็นไปได้ในการตรวจวัดความขึ้นจากกำลังงานการสะท้อนของคลื่นความถี่

3. ระบบต้นแบบ

ระบบที่ได้รับการพัฒนาแบ่งออกเป็นภาคส่งและภาครับ ภาคส่งใช้อุปกรณ์รีเลย์ที่ถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโยโน ทำหน้าที่สวิทซ์การจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรกำเนิดความถี่สูง รุ่น NMRF 2400 เพื่อสร้างสัญญาณความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ หรือ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ จากนั้นคลื่นความถี่ถูกส่งออกด้วยสายอากาศแพทช์ตัวที่ 1 คลื่นความถี่แพร่กระจายไปยังดินตัวอย่างที่ได้รับการทดสอบ เกิดเป็นคลื่นสะท้อนกลับไปยังภาครับ ในส่วนของภาครับทำหน้าที่ตรวจวัดกำลังงานของคลื่นสะท้อนด้วยสายอากาศแพทช์ตัวที่ 2 และส่งต่อไปยังอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงานรุ่น

AD8362 ของบริษัท Analog devices ที่สามารถตรวจจับกำลังงานได้ตั้งแต่ -52 ถึง 8 เดซิเบลมิลลิวัตต์ ในช่วงความถี่ 0.05 ถึง 3.8 กิกะเฮิรตซ์ ที่ความต้านทาน 50 โอห์ม ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ 0.4 ถึง 3.6 โวลต์ เอาต์พุตจากอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงานได้รับการแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 10 บิต โดยวงจรแปลงฝั่งตัวอยู่ในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูยโน จากนั้นข้อมูลได้รับการแสดงผลบนหน้าจอโอแอลอีดีขนาด 0.96 นิ้ว จำนวน 2 ข้อมูล คือ ค่ากำลังงานการสะท้อนกลับของความถี่ 2.4 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ นอกจากนี้ระบบตรวจวัดได้ติดตั้งแผ่นสะท้อนเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนระหว่างส่วนประมวลผลและสายอากาศรับส่ง โครงสร้างของระบบแสดงดังในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 ระบบตรวจวัดความขึ้นดินต้นแบบ

ผลการพัฒนาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

1) เก็บข้อมูลอินพุตสำหรับการออกแบบ

การตรวจวัดดินทำทั้งหมด 10 ตัวอย่าง ที่ความชื้นร้อยละ 0 ถึง 35 ผลการตรวจวัดดินที่ความชื้นร้อยละ 0 ของความถี่ 2.40 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานที่ได้เฉลี่ยอยู่ที่ 0.927 และ 0.690 โวลต์ เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 5 กำลังงานที่ได้อยู่ที่ 0.976 และ 0.736 โวลต์ และเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ $10, 15$ ถึง 35 ค่าเฉลี่ยของกำลังงานที่รับได้อยู่ที่ 1.038 และ 0.765 โวลต์ 1.082 และ 0.862 โวลต์ และ 1.378 และ 1.011 โวลต์ การตรวจวัดในแต่ละระดับความชื้นทำทั้งหมด 10 ตัวอย่าง ข้อมูลการตรวจวัดที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ แสดงดังในตารางที่ 4.3 และที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ แสดงดังในตารางที่ 4.4

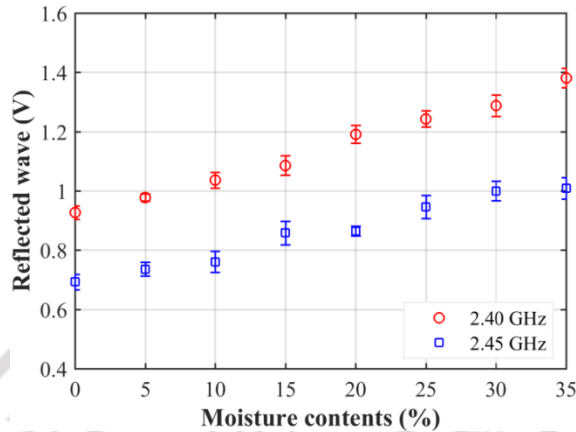
ตารางที่ 4.3 ขนาดของคลื่นสะท้อนจากการตรวจวัดความชื้นที่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ (โวลต์)

ตัวอย่าง	ระดับความชื้น							
	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%
1	0.911	0.978	1.021	1.111	1.176	1.241	1.277	1.367
2	0.928	0.968	1.059	1.055	1.197	1.238	1.316	1.416
3	0.943	0.983	1.024	1.081	1.204	1.253	1.269	1.378
4	0.928	0.97	1.028	1.112	1.164	1.223	1.288	1.369
5	0.927	0.988	1.055	1.046	1.202	1.247	1.301	1.407
6	0.922	0.988	1.035	1.096	1.196	1.276	1.271	1.38
7	0.934	0.972	1.012	1.112	1.159	1.221	1.282	1.362
8	0.903	0.992	1.065	1.063	1.201	1.235	1.323	1.412
9	0.948	0.974	1.037	1.089	1.22	1.265	1.251	1.369
10	0.929	0.968	1.027	1.093	1.194	1.232	1.297	1.351

ตารางที่ 4.4 ขนาดของคลื่นสะท้อนจากการตรวจวัดความชื้นที่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ (โวลต์)

ตัวอย่าง	ระดับความชื้น							
	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%
1	0.667	0.72	0.756	0.887	0.873	0.906	0.993	1.04
2	0.676	0.745	0.769	0.89	0.851	0.962	0.994	0.967
3	0.718	0.754	0.775	0.834	0.873	0.951	1.035	1.023
4	0.703	0.718	0.737	0.871	0.868	0.916	0.97	1.029
5	0.691	0.74	0.783	0.886	0.855	0.959	0.998	0.993
6	0.708	0.749	0.795	0.811	0.869	0.984	1.023	1.003
7	0.666	0.721	0.724	0.861	0.884	0.922	0.983	1.039
8	0.694	0.738	0.779	0.863	0.853	0.956	0.998	0.97
9	0.711	0.761	0.758	0.817	0.855	0.968	1.032	1.002
10	0.693	0.714	0.729	0.859	0.865	0.932	0.971	1.026

เมื่อนำมาเขียนกราฟเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานการสะท้อนและ ตามลำดับ
ดังแสดงในภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 กำลังงานของคลื่นสะท้อนต่อระดับความชื้น

จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความชื้นมีผลต่อกำลังงานของคลื่นการสะท้อน เนื่องจากเมื่อปริมาณน้ำในดินเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r') แปรผันเพิ่มขึ้นในลักษณะเดียวกัน (Bhat et al., 2007) ข้อมูลการวัดของทั้ง 2 ความถี่ ได้รับการเฉลี่ยเพื่อใช้ตัดสินใจการแบ่งระดับความชื้นที่ความชื้นร้อยละ 0 แรงดันเฉลี่ยอยู่ที่ 0.806 โวลต์ และเพิ่มขึ้นเป็น 0.868, 0.907, 0.974 ถึง 1.194 โวลต์ ที่ความชื้นร้อยละ 5, 10, 15 และ 35 ตามลำดับ เมื่อความชื้นสูงขึ้นระดับกำลังงานที่ตรวจวัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเดียวกันของทั้ง 2 ความถี่ และให้ค่า R^2 ที่ความถี่ 2.40 กิกะเฮิรตซ์ อยู่ที่ 0.993 และความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ อยู่ที่ 0.982 แสดงให้เห็นว่าระดับแรงดันของคลื่นสะท้อนสามารถแยกระดับความชื้นของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อมูลจากการวัดของทั้ง 2 ความถี่ ถูกนำมาคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) เพื่อหาประสิทธิภาพของระบบ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของดินที่ความชื้นต่ำ ร้อยละ 0 ให้ค่า SD อยู่ที่ 0.112 และ 0.128 และเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นค่า SD มีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย และค่า SD สูงสุดที่ความชื้นร้อยละ 35 ของทั้ง 2 ความถี่ จากนั้นพิจารณาค่าความผิดพลาดแบบเฉลี่ยรวมของทั้ง 2 ความถี่ สามารถสังเกตเห็นได้ว่าที่ระดับความชื้น 0 ให้ค่าความผิดพลาดอยู่ที่ร้อยละ 1.83 เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 5, 10 และ 35 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของทั้ง 2 ความถี่ อยู่ที่ร้อยละ 2.07, 2.35 และ 3.12 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการตรวจวัดความชื้น

ความชื้น(ร้อยละ)		0	5	10	15	20	25	30	35
SD	$f = 2.40$ GHz	0.112	0.135	0.172	0.169	0.171	0.148	0.175	0.244
	$f = 2.45$ GHz	0.128	0.176	0.172	0.187	0.159	0.193	0.229	0.278
ค่าความผิดพลาด (ร้อยละ)		1.83	2.07	2.35	2.74	2.71	2.69	3.18	3.12

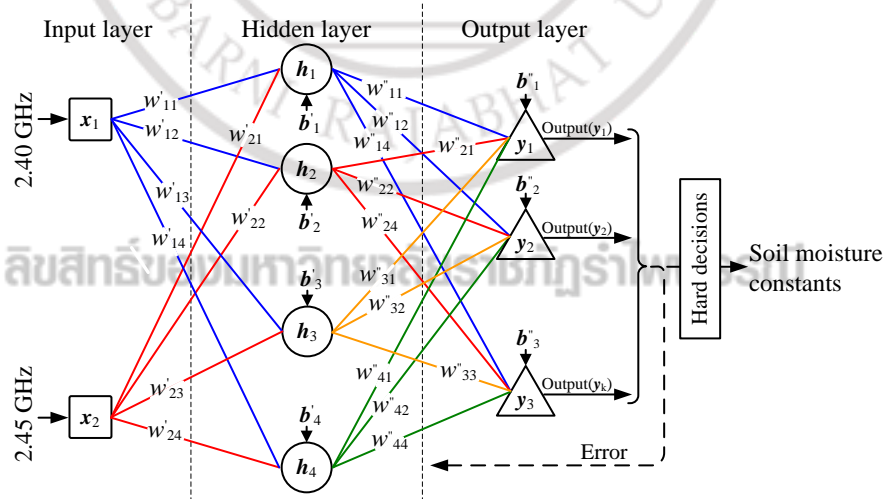
จากความไม่สม่ำเสมอของผิวดินและระยะห่างที่ต่างกันเล็กน้อยขณะตรวจวัด ส่งผลต่อข้อมูลการวัดค่อนข้างชัดเจนโดยเฉพาะที่ระดับความชื้นสูง ดังนั้นการควบคุมระยะห่างระหว่างระบบตรวจวัดความชื้นและดินจึงเป็นสิ่งที่ควรพิจารณาและได้รับการควบคุม

เมื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของระบบเซนเซอร์ที่พัฒนา และระบบเซนเซอร์ในงานวิจัยก่อนหน้าพบว่า ระบบเซนเซอร์ของ Salam, Vuran และ Irmak (2019 : 31-41) ให้ค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่า 8% ส่วนระบบที่นำเสนอให้ค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่า 3.18%

2) ออกแบบโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

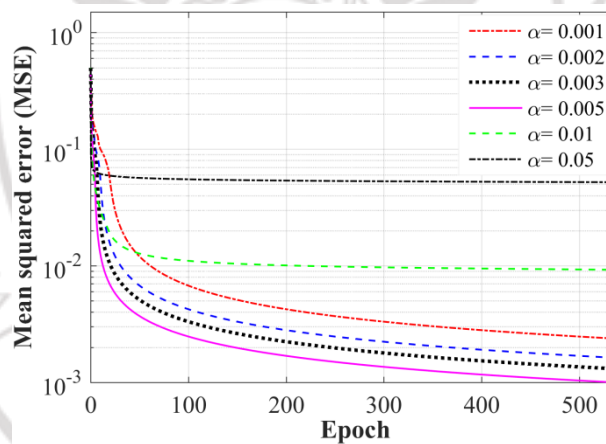
กำลังงานความถี่จากการตรวจวัดของทั้ง 2 ความถี่ คือ 2.4 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อใช้ในการฝึกสอนและวิเคราะห์ความสามารถในการตัดสินใจ การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมใช้ข้อมูลของกำลังงานการสะท้อนที่ 2 คลื่นความถี่ที่ได้จากการตรวจวัดความชื้นดินในช่วง 0 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์

การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือการฝึกสอนด้วยข้อมูล 15% 25% และ 50% เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการตัดสินใจของโครงข่ายประสาทเทียม ข้อมูลในการฝึกสอนแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 มีข้อมูลทั้งหมด 12 ข้อมูล กลุ่มที่ 2 มี 20 ข้อมูล และกลุ่มสุดท้ายมี 40 ข้อมูล การฝึกสอนใช้การจัดเรียงข้อมูลตามลำดับความชื้นและกำหนดให้อินพุตที่ 1 เป็นข้อมูลของความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และอินพุตที่ 2 คือ ข้อมูลของความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ดังนั้นโครงข่ายประสาทเทียมจึงมีโครงร่างที่ประกอบ 2 อินพุตโหนด และกำหนดให้ใช้โหนดซ่อนเร้นเป็น 2 เท่า คือ 4 โหนดซ่อนเร้น และใช้ 3 เอาต์พุตโหนด ที่เป็นตัวแทนของระดับความชื้นทั้งหมด 8 ระดับ อัตราการเรียนรู้ได้รับการปรับทั้งหมด 5 ระดับ เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการตัดสินใจและความเร็วในการเรียนรู้ โดยการปรับอัตราการเรียนรู้ทำตั้งแต่ 0.001 0.002 0.005 0.01 และ 0.02 ตามลำดับ โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแสดงดังในภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ออกแบบ

การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมใช้การเรียนรู้ทั้งหมด 5 ระดับ ในการแยกระดับความชันของดิน เริ่มด้วยการวิเคราะห์ความสามารถในการเรียนรู้ของ ANN จากการใช้อัตราการเรียนรู้ที่ต่างกันตั้งแต่ 0.001 0.002 0.003 0.005 0.01 และ 0.05 จำนวนข้อมูลที่นำมาใช้ทดสอบอัตราการเรียนรู้เบื้องต้น ใช้ที่ 50% อัตราการเรียนรู้ในแต่ละระดับถูกใช้ในการฝึกสอนเพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมสำหรับการตัดสินใจในการแบ่งระดับความชัน เงื่อนไขในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเริ่มจากการปรับอัตราการเรียนรู้แบบละเอียดที่ 0.001 การเรียนรู้สามารถทำได้ดีและค่าอัตราความผิดพลาดลดลงอย่างต่อเนื่องแต่เนื่องจากการเรียนรู้ได้รับการปรับอย่างละเอียดการเรียนรู้จึงทำได้ช้า จากนั้นปรับอัตราการเรียนรู้ให้กว้างขึ้นเป็น 0.002 การเรียนรู้ที่รอบการวนซ้ำ 500 Epoch ให้ค่าอัตราความผิดพลาดลดลงอยู่ที่ 6.8×10^{-3} แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการเรียนรู้กว้างส่งผลให้การปรับค่าถ่วงน้ำหนักทำได้เร็ว เมื่อใช้อัตราการเรียนรู้ที่ 0.003 การเรียนรู้ที่รอบการวนซ้ำ 500 Epoch ให้ค่าอัตราความผิดพลาดลดลงอยู่ที่ 5.1×10^{-3} และที่อัตราการเรียนรู้ 0.005 ให้ค่าความผิดพลาดต่ำสุดอยู่ที่ 3.7×10^{-3} เมื่อเพิ่มอัตราการเรียนรู้เป็น 0.01 การเรียนรู้ในช่วงแรกทำได้อย่างรวดเร็วและเมื่อมากกว่า 50 Epoch ความสามารถในการเรียนรู้ลดลง ต่อมาเมื่อปรับอัตราการเรียนรู้เป็น 0.05 การเรียนรู้ไม่สามารถทำได้ดังแสดงในภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 ผลการปรับอัตราการเรียนรู้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยโครงสร้างที่ใช้ 4 โหนดซ่อนเร้น เพื่อแยกระดับความชันของดิน และวิเคราะห์ความสามารถในการเรียนรู้ด้วยการใช้ 2 ข้อมูลอินพุตประกอบด้วย กำลังงานการสะท้อนของความถี่ 2.4 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ในการฝึกสอนเพื่อหาน้ำหนัก (Weight) ที่เหมาะสมที่ใช้สำหรับการตัดสินใจในการแบ่งระดับความชัน ข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ประกอบด้วย 15% 25% และ 50% การปรับอัตราการเรียนรู้ทำทั้งหมด 6 ระดับ ตั้งแต่ 0.001 0.002 0.003 ถึง 0.05 ตามลำดับ เงื่อนไขการฝึกสอน คือ เมื่ออัตราความผิดพลาดต่ำกว่า 10^{-3} ระบบจะหยุดการเรียนรู้ การฝึกสอนด้วยข้อมูล 15% ที่อัตราการเรียนรู้ 0.001 ให้ค่าความแม่นยำจากการตัดสินใจอยู่ที่ 48.52% และอัตราการเรียนรู้เพิ่มขึ้นเป็น 0.002 ถึง 0.005 ความแม่นยำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอยู่ที่ 52.84% ถึง 74.32% และเมื่อเพิ่มอัตราการเรียนรู้เป็น 0.01

ความแม่นยำลดลงอยู่ที่ 60.11% เนื่องจากความกว้างของอัตราการเรียนรู้ที่มากเกินไปส่งผลให้ความสามารถในการหาค่าตอบลดลงและสังเกตได้ชัดเจนที่อัตราการเรียนรู้ 0.05 ค่าความแม่นยำอยู่ที่ 29.32% ซึ่งไม่มีความสามารถในการเรียนรู้ จากนั้นเพิ่มข้อมูลการเรียนรู้เป็น 25% ที่อัตราการเรียนรู้ 0.001 ถึง 0.005 ให้อัตราความผิดพลาดอยู่ในช่วง 61.79% ถึง 82.68% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ส่งผลให้อัตราความผิดพลาดลดลง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปรับอัตราการเรียนรู้เพิ่มขึ้นเป็น 0.01 ถึง 0.05 ความสามารถในการตัดสินใจลดลงและค่าความผิดพลาดเพิ่มขึ้น ข้อมูลกลุ่มสุดท้ายที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม คือ 50% การเรียนรู้ทำได้ดีขึ้นสังเกตได้จากที่อัตราการเรียนรู้ 0.001 ให้ความแม่นยำที่ 74.02% และแม่นยำสูงสุดที่ 91.88% โดยใช้อัตราการเรียนรู้ 0.005 และเมื่อเพิ่มอัตราการเรียนรู้เป็น 0.01 ถึง 0.05 ความความแม่นยำลดลงอยู่ที่ 77.44 ถึง 52.92% เนื่องจากอัตราการเรียนรู้กว้างเกินไปที่เรียนรู้และตัดสินใจ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ความแม่นยำของโครงข่ายประสาทเทียมที่จำนวนโนดซ่อนเร้น 4 โนด

อัตราการเรียนรู้	ความแม่นยำ		
	ข้อมูล 15%	ข้อมูล 25%	ข้อมูล 50%
0.001	48.52%	61.79%	74.02%
0.002	52.84%	70.32%	76.69%
0.003	66.61%	76.71%	88.86%
0.005	74.32%	82.68%	91.88%
0.01	60.11%	70.61%	77.44%
0.05	29.32%	50.97%	52.92%

ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง

การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมจากการปรับจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนและอัตราการเรียนรู้ ส่งผลให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสมคือ 2 โนดอินพุต 4 โนดซ่อนเร้นและ 3 โนดเอาต์พุตที่เป็นตัวแทนของระดับความชื้นในดินแบบละเอียดทั้งหมด 8 ระดับ อัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.005 ใช้การฝึกสอนซ้ำ 520 Epochs จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือ 50% ของกลุ่มข้อมูล ค่าถ่วงน้ำหนักและโครงสร้างจากการฝึกสอนถูกโปรแกรมลงบนบอร์ดอาดูยโน (Arduino) รวมถึงการทำงานทั้งหมดของระบบเซนเซอร์ได้รับการควบคุมจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูยโน