

บทที่ 4 ผลการวิจัย

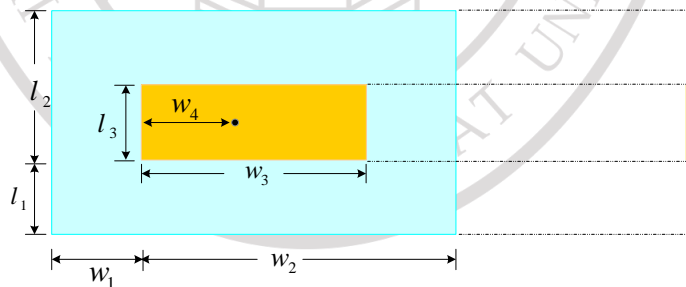
ผลจากการดำเนินการวิจัยตามลำดับขั้นตอนซึ่งระบุไว้ในบทที่ 3 ในส่วนของการออกแบบสร้าง และทดสอบสายอากาศ การสร้างกระถางปรับความชื้นอัจฉริยะต้นแบบ การทดสอบส่งผ่านความถี่ด้วยกระถางต้นแบบ และการสร้างระบบตัดสินใจเพื่อให้ได้กระถางปรับความชื้นที่สมบูรณ์ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังต่อไปนี้

สายอากาศไมโครสตริบ

สายอากาศถูกออกแบบให้พัฒนาด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ 2 หน้า ชนิด FR4 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกวัสดุฐานรอง 4.1 ความหนาของวัสดุฐานรอง 1.414 มิลลิเมตร ความหนาของตัวนำ 0.079 มิลลิเมตร ทำงานที่ความถี่ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ผลการออกแบบและพัฒนาสายอากาศดังนี้

1. ผลการจำลองการทำงาน

ขนาดจากการคำนวณถูกพัฒนาต่อด้วยโปรแกรมจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้า HOBBIES (Version 10.0) เพื่อปรับขนาดอย่างละเอียด ผลการจำลองสมรรถนะของสายอากาศ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ($|S_{11}|$) สายอากาศ ต่ำกว่า -20 เดซิเบล ที่ความถี่ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ องค์ประกอบของสายอากาศได้แก่ ตัวนำ (PEC) วัสดุฐานรอง (Substrate) และระนาบกราวด์ ผลจากการจำลองได้โครงสร้างของสายอากาศแสดงดังภาพที่ 4.1 และขนาดโครงสร้างของสายอากาศ คือ ขนาดของตัวนำ และขนาดระนาบกราวด์ แสดงดังตารางที่ 4.1



ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

ภาพที่ 4.1 องค์ประกอบของสายอากาศ

ตารางที่ 4.1 ขนาดโครงสร้างของสายอากาศ

ด้าน	w_1	w_2	w_3	w_4	l_1	l_2	l_3
ขนาด (cm)	1.6	4.6	3.0	1.2	1.4	2.4	1.0

จากการจำลองพบว่าสายอากาศมีขนาดกว้างและยาว 6.2 x 2.8 เซนติเมตร ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ($|S_{11}|$) สายอากาศ -23 เดซิเบล ที่ความถี่ 2.5 กิกะเฮิรตซ์

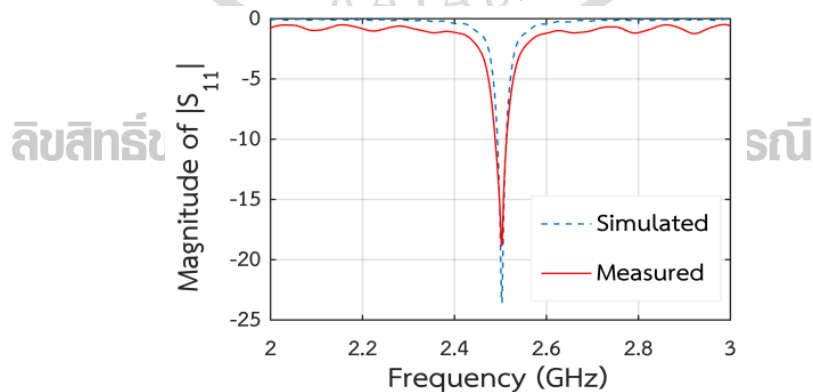
2. ผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบ

ขนาดของสายอากาศที่เหมาะสมจากการจำลอง นำมาพัฒนาเป็นสายอากาศต้นแบบ บนแผ่นวงจรพิมพ์ 2 หน้า ชนิด FR4 สำหรับใช้เป็นภาคส่งและภาครับจำนวน 2 ตัว จากนั้น นำสายอากาศมาทำการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศที่พัฒนาด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Vector network analyzer: VNA) รุ่น KEYSIGHT E5063A ENA เพื่อศึกษาคุณสมบัติของสายอากาศและค่าการสูญเสียย้อนกลับหรือค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ที่ความถี่ใช้งาน 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ลักษณะทดสอบแสดงดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 การทดสอบสายอากาศไมโครสตริปต้นแบบ

จากการทดสอบจึงได้ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ อยู่ที่ -16.6 เดซิเบล เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลอง (Simulation) กับผลการวัดจริงค่าที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าสายอากาศต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้และสอดคล้องกับผลการจำลองดังแสดงในภาพที่ 4.3

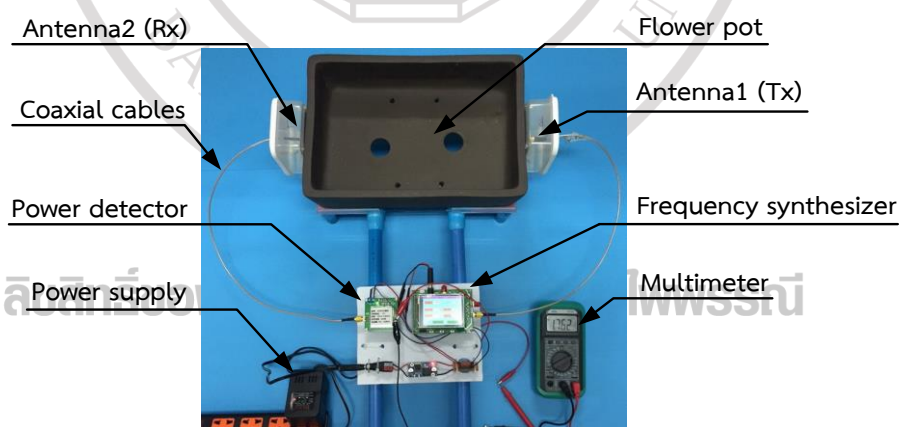


ภาพที่ 4.3 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ($|S_{11}|$) ของผลการจำลองกับผลการวัดจริง

สายอากาศที่พัฒนาขึ้นมีค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 เดซิเบล ซึ่งเป็นค่าการสะท้อนกลับของคลื่นความถี่สูงในระดับที่ยอมรับได้ โครงสร้างสายอากาศไม่ซับซ้อนสร้างง่าย รูปทรงกะทัดรัดสามารถติดตั้งและใช้งานได้สะดวก ซึ่งจากคุณสมบัติดังกล่าว สายอากาศไมโครสตริปจึงได้รับการนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับแหล่งกำเนิดความถี่สูงและอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงาน เพื่อตรวจสอบความชื้นวัสดุปลูกภายในกระถางบอนไซ

กระถางปรับความชื้นต้นแบบ

ระบบตรวจวัดความชื้นภายในกระถางปรับความชื้นอัจฉริยะสำหรับบอนไซ ใช้เทคนิคการส่งผ่านแบบอวกาศว่างที่ประกอบด้วยภาคส่งและภาครับ ซึ่งภาคส่งได้ประยุกต์ใช้อุปกรณ์แหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูง (Wideband synthesizer) ของบริษัท Analog Devices รุ่น ADF4350 ที่สามารถสร้างความถี่ได้ตั้งแต่ 0.35 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 4.4 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานที่สังเคราะห์สร้างได้ตั้งแต่ -5 เดซิเบลมิลลิวัตต์ ถึง +5 เดซิเบลมิลลิวัตต์ ความถี่ได้รับการสังเคราะห์และส่งต่อไปยังสายอากาศส่ง (Antenna 1: Tx) สายอากาศส่งได้รับการพัฒนาให้ทำงานที่ความถี่ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ อยู่ที่ -16.6 เดซิเบล ภาครับประกอบด้วยสายอากาศรับ (Antenna 2: Rx) ซึ่งมีคุณสมบัติแบบเดียวกับสายอากาศส่ง มีหน้าที่รับกำลังงานคลื่นความถี่ของภาคส่งที่เดินทางผ่านกระถางบอนไซ และส่งต่อกำลังงานที่ได้ให้กับอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงาน (Power detector) ของบริษัท Analog Devices รุ่น AD8362 ซึ่งอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงานมีคุณสมบัติสามารถตรวจจับกำลังงานได้ตั้งแต่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ถึง 3.8 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานต่ำสุดที่สามารถตรวจจับได้คือ -52 เดซิเบลมิลลิวัตต์ สูงสุด +8 เดซิเบลมิลลิวัตต์ เอาท์พุทที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงานคือไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันตั้งแต่ 0.3 โวลต์ ถึง 3.6 โวลต์ กระถางปรับความชื้นต้นแบบซึ่งยังไม่รวมระบบตัดสวิตช์และวาล์วไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 กระถางปรับความชื้นต้นแบบ

กระถางต้นแบบที่สร้างขึ้นถูกทดสอบส่งผ่านคลื่นความถี่ 2.5 กิกะเฮิร์ตซ์ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าและระดับความชื้นของวัสดุปลูกในกระถางบอนไซ สำหรับนำไปใช้ตั้งค่าในระบบตัดสินใจ

ผลการทดสอบส่งผ่านคลื่นด้วยกระถางปรับความชื้นต้นแบบ

การทดสอบเริ่มด้วยการเตรียมหินพัมมิส ซึ่งเป็นวัสดุปลูกสำหรับทดสอบ การทดสอบส่งผ่านคลื่นความถี่ 2.5 กิกะเฮิร์ตซ์ การหาค่าระดับความชื้นของวัสดุปลูก และการวิเคราะห์ผล ดังนี้

1. การเตรียมวัสดุปลูก

วัสดุปลูกตัวอย่างสำหรับทดสอบ ที่ผ่านการแช่น้ำมาแล้ว 48 ชั่วโมง ถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตัวอย่าง บรรจุลงในกระถางบอนไซ ก และกระถางบอนไซ ข ที่มีขนาดเท่ากันคือ กว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร และสูง 8 เซนติเมตร โดยบรรจุให้ปริมาณพอดีกับกระถางดังแสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 การบรรจุวัสดุปลูกในกระถางเพื่อวัดความชื้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2. ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งผ่าน

ระบบตรวจสอบความชื้นใช้คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.5 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นความถี่อิสระ (ISM bands) ส่งผ่านหินพัมมิสในกระถาง ก ด้วยกำลังส่งที่ 0 เดซิเบลมิลลิวัตต์ เพื่อให้ประหยัดพลังงานแต่ยังคงตรวจสอบความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ อุปกรณ์ตรวจจับกำลังงานให้เอาท์พุทเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นแปรผันกับกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตรวจจับได้ ทำให้ลดความซับซ้อนในการแบ่งระดับความชื้น การแสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ใช้เครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ที่ความละเอียดของทศนิยม 3 ตำแหน่ง ซึ่งเพียงพอต่อการแบ่งระดับความชื้นของวัสดุปลูกในกระถางบอนไซ หินพัมมิสตัวอย่างวัดด้วยการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและตรวจวัดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ได้ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านหินพัมมิสในแต่ละระดับความชื้นแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่วัดได้ในแต่ละความชื้น

การคายความชื้น (ชั่วโมง)	0	2	4	6	8	10	14	20	28
แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	1.405	1.475	1.724	1.901	1.951	2.013	2.052	2.054	2.054

3. เปอร์เซ็นต์ความชื้น

หินพัมมิสในกระถาง ข ซึ่งถูกวางไว้ในห้องทดสอบคู่กับกระถาง ก ที่ได้จากการตวงถูกนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล แบ่งเป็นการชั่งวัสดุปลูกพร้อมถ้วยตวงและชั่งเฉพาถ้วยตวง (m_a) เครื่องชั่งที่ใช้มีความละเอียดทศนิยมถึง 3 ตำแหน่ง จึงทำให้ความละเอียดเพียงพอต่อการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น การชั่งน้ำหนักวัสดุปลูกตัวอย่าง ในแต่ละระดับความชื้นได้ใช้เครื่องชั่งรุ่น ARB120 Digital balance ที่มีการแสดงผลเป็นดิจิทัล สามารถชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 2 กิโลกรัม ความแม่นยำอยู่ที่ $\pm 3\%$ และให้ความละเอียดอยู่ที่ทศนิยมตำแหน่งที่ 3 รวมถึงได้มีการป้องกันเครื่องชั่งจากลมหรือสิ่งรบกวนต่างๆ ที่อาจก่อให้เกิดความผิดพลาดในการชั่งน้ำหนัก ดังภาพที่ 4.6



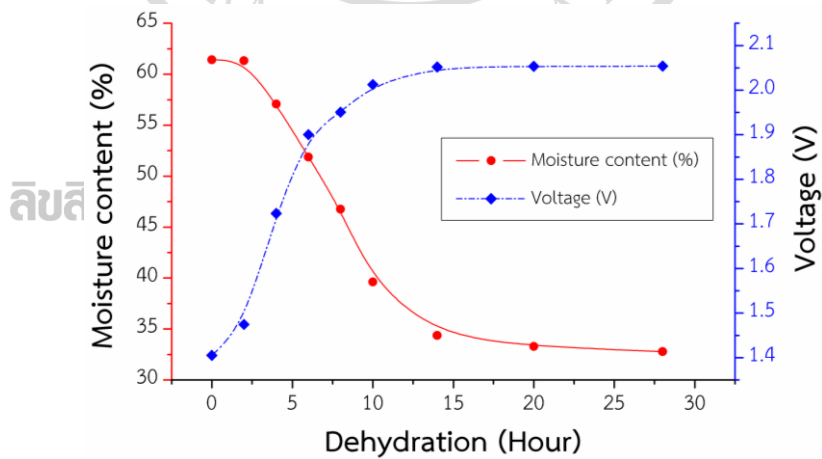
ภาพที่ 4.6 การหาค่าความชื้นด้วยวิธีการวัดแบบชั่งน้ำหนัก

วัสดุปลูกถูกตวงใส่ถ้วยและชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล แบ่งออกเป็น การชั่งวัสดุปลูกพร้อมถ้วยตวง และชั่งเฉพาถ้วยตวง (m_a) วัสดุปลูกทั้ง 9 ตัวอย่าง ถูกชั่งในครั้งที่ 1 (m_b) และทำการอบแห้งวัสดุปลูกทั้งหมด เพื่อให้มีความชื้นเหลือน้อยที่สุด จากนั้นชั่งน้ำหนักวัสดุปลูกแห้ง (m_c) ทั้ง 9 ตัวอย่าง แบ่งเป็นน้ำหนักของวัสดุปลูกที่มีความชื้นปะปนอยู่ที่ 80.2 ถึง 90.2 กรัม น้ำหนักวัสดุปลูกแห้งอยู่ที่ 56.2 ถึง 73.53 กรัม และน้ำหนักถ้วยตวงอยู่ที่ 16.35 ถึง 22.73 กรัม ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาคำนวณเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยสมการที่ (3.2) น้ำหนักของวัสดุปลูกที่มีความชื้นปะปน น้ำหนักวัสดุปลูกแห้ง น้ำหนักถ้วยตวงและเปอร์เซ็นต์ความชื้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 น้ำหนักและระดับความชื้นหินพัมมิสตัวอย่าง

คายความชื้น (ชั่วโมง)	น้ำหนัก (กรัม)			ค่าความชื้น (%)
	วัสดุปลูกขึ้น (m_b)	วัสดุปลูกแห้ง (m_c)	ถ้วย (m_a)	
0	80.20	56.20	17.13	61.43
2	84.52	58.73	16.68	61.33
4	87.52	61.76	16.63	57.08
6	84.43	61.35	16.86	51.88
8	86.17	63.94	16.39	46.75
10	80.67	62.42	16.35	39.61
14	86.94	69.09	17.15	34.37
20	84.47	67.57	16.80	33.29
28	90.20	73.53	22.73	32.82

เมื่อเวลาการคายความชื้นเพิ่มขึ้นเป็น 2 ชั่วโมง แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เพิ่มเล็กน้อยที่ 1.475 โวลต์ แปรผันกับความชื้นลดลงที่ 61.33% เมื่อเวลาการคายความชื้นอยู่ที่ 4 ชั่วโมง แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เพิ่มเป็น 1.724 โวลต์ ค่าความชื้นลดลงเหลือ 57.08% และที่เวลาเพิ่มขึ้นเป็น 6 8 และ 10 ชั่วโมง แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องคือ 1.901 1.951 และ 2.013 โวลต์ สอดคล้องกับค่าความชื้นที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดคือ 51.88% 46.75% 39.61% ตามลำดับ เมื่อเวลาการคายความชื้นเพิ่มขึ้นเป็น 14 ชั่วโมง แรงดันไฟฟ้าวัดได้ 2.052 โวลต์ ค่าความชื้น 34.37% ที่เวลา 20 ชั่วโมง ค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มเล็กน้อยคือ 2.054 โวลต์ ความชื้นลดลงอยู่ที่ 33.29% และที่เวลาสูงสุดคือ 28 ชั่วโมง ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้อยู่ที่ 2.054 โวลต์ ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง แต่ระดับความชื้นเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอยู่ที่ 32.82% ข้อมูลการเปรียบเทียบแสดงดังในภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าต่อความชื้นหินพัมมิส

ต่อมาได้จำลองการเปลี่ยนขนาดของวัสดุปลูกเพื่อทดสอบผลของกำลังงานส่งผ่านโดยการบรรจุลงในกระถางในปริมาณเท่ากัน กำลังงานที่ตรวจสอบได้ของวัสดุปลูกที่มีขนาดเล็กส่งกำลังงานการส่งผ่านมีค่าต่ำกว่ากรณีที่มีวัสดุปลูกขนาดใหญ่ เนื่องจากเมื่อวัสดุปลูกขนาดเล็กความหนาแน่นของก้อนหินพืชมิสใน กระถางสูงกว่ากรณีที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้ความชื้นในกระถางมีค่ามาก ส่งผลให้การลดทอนเพิ่มขึ้น แต่แนวโน้มหรือทิศทางการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานต่อระดับความชื้นสอดคล้องกับผลการทดลองในภาพที่ 4.7

การสร้างระบบตัดสินใจ

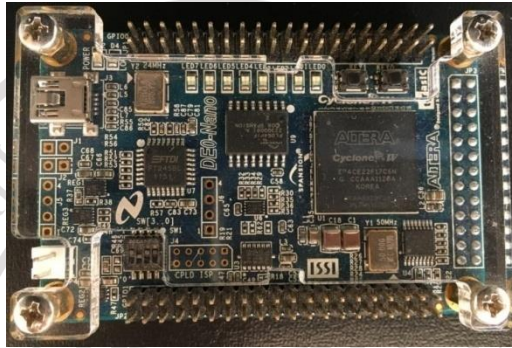
ระบบตรวจวัดความชื้นใช้การเปรียบเทียบกำลังงานการส่งผ่านของคลื่น เทียบกับความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการคายน้ำของหินพืชมิส เมื่อความชื้นลดลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

การพัฒนาาระบบตัดสินใจลงบนอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้เริ่มด้วยการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยข้อมูลความชื้นในวัสดุปลูกเทียบกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้จากระบบการส่งผ่านในขั้นตอนการหาความชื้น จากข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์หา อัตราการเรียนรู้ จำนวนโนดซ่อนเร้น ค่าถ่วงน้ำหนัก และเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของระบบ การฝึกสอนเริ่มจากการใช้จำนวนโนดซ่อนเร้น 2 โหนด และใช้อัตราการเรียนรู้ในช่วง 0.0001 0.0002 และ 0.0005 ตามลำดับ ใช้การวนซ้ำทั้งหมด 10^8 ครั้ง เพื่อปรับน้ำหนักให้เหมาะสมมากที่สุด จากนั้นทำการปรับจำนวนโนดซ่อนเร้นเพิ่มมากขึ้นเป็น 3 โหนด ใช้อัตราการเรียนรู้ 3 ระดับ เช่นเดียวกับในครั้งก่อนหน้า และการวนซ้ำ 10^8 ครั้ง ต่อมาเพิ่มจำนวนโนดซ่อนเร้นเป็น 4 โหนด เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการแก้ไขปัญหาที่ซับซ้อนของข้อมูลความชื้น ใช้อัตราการเรียนรู้ 3 ระดับ เช่นเดียวกับครั้งแรก และใช้การวนซ้ำ 10^8 ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

	Hidden Node	Learning	Iteration	Error	Accuracy
(ก)	2	0.0001	10^8	4.62^{-5}	88.63
		0.0002	10^8	5.29^{-5}	90.31
		0.0005	10^8	5.50^{-5}	92.32
(ข)	3	0.0001	10^8	2.55^{-05}	88.39
		0.0002	10^8	3.22^{-05}	90.07
		0.0005	10^8	4.31^{-05}	92.32
(ค)	4	0.0001	10^8	2.34^{-04}	77.16
		0.0002	10^8	2.99^{-05}	90.44
		0.0005	10^8	3.99^{-05}	92.70

จากผลการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมพบว่า จำนวนโนดซ่อนเร้นที่ 2 โนด และอัตราการเรียนรู้ 0.005 ให้ผลที่แม่นยำสูงที่ 92.32% และประหยัดทรัพยากรมากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมนี้ไปพัฒนาลงบนอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (FPGA) รุ่น EP4CE22F17C6N ของบริษัท Terasic ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 4.8

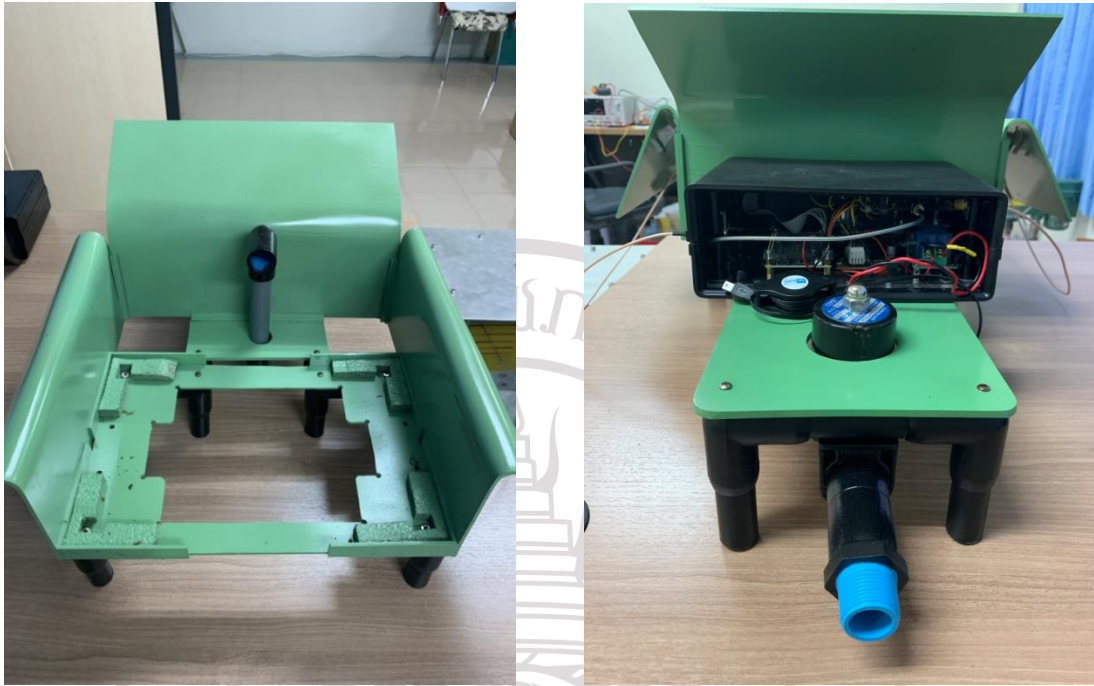


ภาพที่ 4.8 อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ รุ่น EP4CE22F17C6N

อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้นอกจากทำหน้าที่เป็นระบบตัดสินใจแล้วยังทำหน้าที่ควบคุมการสร้างคลื่นความถี่ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ของอุปกรณ์กำเนิดความถี่

กระถางปรับความชื้นอัจฉริยะสำหรับบอนไซที่สมบูรณ์

ระบบตัดสินใจ วาล์วไฟฟ้าและระบบน้ำ ถูกประกอบเข้ากับกระถางปรับความชื้นต้นแบบที่สร้างขึ้นในขั้นแรก ทำการบรรจุอุปกรณ์ลงกล่องเอนกประสงค์ ติดตั้งอะคลีริกเพื่อป้องกันน้ำให้กับสายอากาศ เป็นกระถางปรับความชื้นอัจฉริยะสำหรับบอนไซที่สมบูรณ์ดังภาพที่ 4.9 – 4.10



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.9 กระจกปรับความชื้นอัจฉริยะสำหรับบอนไซที่สมบูรณ์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.10 (ก) จุดติดตั้งสายอากาศ (ข) อุปกรณ์ถูกบรรจุลงกล่องอเนกประสงค์

ตัวกระจกสร้างด้วยอะคริลิกถูกพันด้วยสีเขียว ฐานรองกระจกสร้างมาจากท่อ PVC พันด้วยสีดำ ด้านหลังของกระจกเป็นท่อ PVC ขนาดครึ่งนิ้ว สำหรับต่อเข้ากับระบบน้ำภายนอก กระจกปรับความชื้นอัจฉริยะสำหรับบอนไซถูกนำไปทดสอบการทำงานเบื้องต้น พบว่าสามารถควบคุมความชื้นภายในกระจกบอนไซได้อยู่ในระดับที่ต้องการตลอดทั้งวัน