

การตรวจวัดค่าสภาพยอมไฟฟ้าของน้ำเชื่อมในย่านความถี่กว้างเพื่อจำลอง  
การตรวจสอบปริมาณน้ำตาลด้วยโครงข่ายประสาทเทียม  
Permittivity Measurement of Syrup in Wideband Frequency for  
Simulation of Sugar Content Determination by Artificial Neural Network

พรพิมล ฉายแสง ประพันธ์ ลีกุล ปรมินทร์ วงษ์เจริญ และ กฤติยาภรณ์ คุณสุข \*

Pornpimon Chaisaeng, Prapan Leekul, Poramintra Wongcharoen, and Kritiyaporn Kunsook \*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University

\*Email: kritiyaporn.k@rbru.ac.th

Received: October 12, 2020; Revised: October 29, 2020; Accepted: November 01, 2020

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตรวจวัดค่าสภาพยอมไฟฟ้าและปริมาณน้ำตาลของน้ำเชื่อมในย่านความถี่กว้าง ค่าสภาพยอมไฟฟ้าของน้ำเชื่อมได้รับการวัดด้วยโพรบไดอิเล็กตริกพร้อมด้วยการประมวลผลจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ ค่าสภาพยอมไฟฟ้าของน้ำเชื่อมถูกพัฒนาเป็นโมเดลน้ำเชื่อมในระบบการจำลองเพื่อตรวจสอบปริมาณน้ำตาลด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่กว้าง และประยุกต์ใช้การตัดสินใจจากโครงข่ายประสาทเทียมในการแบ่งระดับปริมาณน้ำตาล การจำลองเพื่อตรวจสอบปริมาณน้ำตาลใช้สายอากาศแพทช์ที่ได้รับการพัฒนาให้ทำงานได้ดีในช่วงความถี่กว้างตั้งแต่ 5 ถึง 7 กิกะเฮิรตซ์ และติดตั้งแผ่นสะท้อนคลื่นด้านหลังของสายอากาศขนาด 15x15 ตารางเซนติเมตร เพื่อเพิ่มอัตราขยายและควบคุมลำคลื่นของสายอากาศให้ออกด้านหน้า สายอากาศถูกติดตั้งห่างจากโมเดลน้ำเชื่อม 10 เซนติเมตร โมเดลน้ำเชื่อมได้รับการปรับระดับปริมาณน้ำตาลตั้งแต่ 0%Brix ถึง 20%Brix ด้วยการเปลี่ยนค่าคงที่ไดอิเล็กตริกตั้งแต่ 65 ถึง 69 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $|S_{11}|$ ) ของน้ำเชื่อมในการจำลองถูกนำมาใช้เป็นอินพุตและปริมาณน้ำตาล 8 ระดับ ถูกใช้เป็นเป้าหมายในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อวิเคราะห์ระดับปริมาณน้ำตาล อัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.1 และใช้ข้อมูลในการฝึกสอนเพียง 30% ทำให้โครงข่ายมีความซับซ้อนต่ำ รวมถึงยังให้ความแม่นยำในการแบ่งระดับปริมาณน้ำตาลได้ถึง 92.2% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถของโครงข่ายประสาทเทียมที่ตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบที่นำเสนอจึงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบเซนเซอร์

**คำสำคัญ:** ค่าสภาพยอมไฟฟ้า, สายอากาศแพทช์, น้ำเชื่อม, ปริมาณน้ำตาล, โครงข่ายประสาทเทียม

### Abstract

This paper presents the measurement of permittivity and sugar content of syrup in wideband frequency. The permittivity of syrup was measured by a dielectric probe. Data were processed by vector network analyzer. The permittivity of syrup was developed into model syrup models in simulation system to determine sugar content by a wideband electromagnetic wave. An artificial neural network was used to

classify the sugar content level. The determining sugar content simulation used patch antenna which developed to operate in the frequency range from 5 GHz to 7 GHz. An antenna reflector size is  $15 \times 15 \text{ cm}^2$  installed behind antenna to increase gain and control beam of the antenna to the front. The antenna was installed far from syrup model with 10 cm. Syrup models represent sugar content level from 0% Brix to 20% Brix by varying dielectric constant from 65 to 69. The reflection coefficients ( $|S_{11}|$ ) of syrup from simulation were input dataset. Eight levels of sugar content were target to train Artificial Neural Networks (ANNs) for sugar content level analysis. The optimum learning rate is 0.1 and uses only 30% of data that make low complexity ANNs structure, providing an accuracy of 92.2%. The result shows ability of ANNs for efficient decision, thus the proposed system is suitable for the sensor application.

**Keywords:** Permittivity, Patch antenna, Syrup, Sugar content, Artificial neural network

## 1. บทนำ

โรคเบาหวาน (Diabetes) เป็นโรคที่มีผู้ป่วยทั่วโลกสูงถึง 463 ล้านคน และมีผู้ที่ต้องเสียชีวิตจากโรคเบาหวานจำนวน 4.2 ล้านคน ในปี 2019 สำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน การควบคุมปริมาณน้ำตาลเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อลดอาการแทรกซ้อน [1] ดังนั้นผู้ป่วยโรคเบาหวานจึงควรเลือกรับประทานอาหารและเครื่องดื่มที่มีปริมาณน้ำตาลน้อย ทำให้การทราบถึงปริมาณน้ำตาลในอาหารเป็นสิ่งสำคัญ

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในอาหารด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี (Chromatography) เป็นการวัดทางเคมีที่มีความแม่นยำสูง [2–4] แต่วิธีการนี้เป็นการวัดแบบทำลายต้องเตรียมตัวอย่าง มีหลายขั้นตอน ใช้เวลานาน และต้องทำในห้องปฏิบัติการ ทำให้ไม่เหมาะสำหรับภาคการผลิตอาหารสำหรับการผลิตเครื่องดื่ม จึงใช้ปริมาตรแฟรกโตมิเตอร์ (Brix refractometer) หรือเครื่องวัดความหวานแบบส่องซึ่งมีขนาดเล็ก ราคาถูก ขั้นตอนการวิเคราะห์น้อยกว่า และแสดงผลได้ทันที [5] รีแฟรกโตมิเตอร์ทั่วไปอ่านค่าปริมาณน้ำตาลด้วยตาข้างเดียวบนสเกลในหน่วยบริกซ์ (Brix) ส่วนรีแฟรกโตมิเตอร์แบบดิจิทัลสามารถแสดงผลในรูปแบบตัวเลข ทั้งนี้รีแฟรกโตมิเตอร์ยังคงเป็นการวัดแบบสัมผัสและทำลายตัวอย่าง รวมถึงอุณหภูมิมีผลต่อการวัด ดังนั้นจึงได้มีการวิจัยเพื่อพัฒนาวิธีการวัดปริมาณน้ำตาลในอาหารและเครื่องดื่มแบบไม่ทำลาย ใช้งานง่าย และมีความแม่นยำ เทคนิคที่มีนักวิจัยนำเสนอไว้ก่อนหน้า ได้แก่ เทคนิคเอ็นไออาร์ (NIR spectroscopy) ถูกนำมาใช้วัด

ปริมาณน้ำตาลในโยเกิร์ต [6] หรือวัดปริมาณน้ำตาลในนมจากพืช [7] เทคนิคเอ็นไออาร์มีสมรรถนะสูงเนื่องจากใช้สเปกตรัมแสงช่วงกว้างในการวัด ทำให้ข้อมูลที่ได้รับความหลากหลาย ช่วยให้วิเคราะห์ได้แม่นยำ และแสดงผลตามเวลาจริงในระหว่างกระบวนการผลิต แต่เอ็นไออาร์ยังมีข้อจำกัด คือ ทำงานได้ผลดีในห้องปฏิบัติการ แสงสว่างจากภายนอกมีผลต่อการวัด ราคาสูงหากใช้ในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก และระบบมีความซับซ้อนเนื่องจากต้องวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมาก เทคนิคต่อมาเป็นการวัดปริมาณน้ำตาลด้วยเซนเซอร์ค่าความจุประจุในสารละลายน้ำตาล ทำงานได้ดีที่ ความถี่ 120 ถึง 300 กิโลเฮิร์ตซ์ สร้างจากแผ่นวงจรมินิ (PCB) วิธีการใช้งานต้องนำเซนเซอร์จุ่มลงไป ในสารละลายที่ต้องการวัด [8] จึงไม่เหมาะกับการวัดปริมาณน้ำตาลในอาหาร

เทคนิคการวัดปริมาณน้ำตาลด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นอีกเทคนิคหนึ่ง ซึ่งใช้พื้นฐานคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ต่างกัน ปริมาณน้ำตาลที่แต่ละระดับ ส่งผลให้การแพร่กระจายของคลื่นไมโครเวฟมีคุณลักษณะเปลี่ยนแปลง เทคนิคนี้ถูกนำมาศึกษาแพร่หลาย เนื่องจากความซับซ้อนต่ำ ราคาไม่สูง เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงนอกห้องปฏิบัติการ โดยนักวิจัยได้ใช้สัมประสิทธิ์การสะท้อนเพื่อวัดปริมาณน้ำตาลในสารละลาย ด้วยสายอากาศไมโครสตริปที่ความถี่ 2.5 ถึง 18 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำตาลในสารละลายเพิ่มขึ้น [9] การวัดปริมาณน้ำตาลของส้ม

มาเลเซียจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $|S_{11}|$  ที่ได้จากเซนเซอร์ โมโนโพลและรีเฟล็กโตมิเตอร์ (Reflectometer) ซึ่งความถี่ 2.2 กิกะเฮิรตซ์ ให้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $|S_{11}|$  กับปริมาณ น้ำตาลของส้มที่ดีที่สุด [10] การคัดแยกรสชาติและความหวานของส้มเขียวหวานด้วยการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก และพัฒนาเซนเซอร์เพื่อตรวจสอบปริมาณน้ำตาลจาก สายอากาศไมโครสตริปแพทช์จำนวน 4 ตัว ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ด้วยเทคนิคการวัดขนาดของสัญญาณถ่ายโอน (Coupling signal) และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโครงข่าย ประสาทเทียม [11] และการตรวจสอบเนื้อส้ม ฟาม ของส้มเขียวหวาน ด้วยคลื่นความถี่ไมโครเวฟ [12] ข้อมูล สัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการวัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ต้องนำไปผ่านกระบวนการตัดสินใจ เพื่อแสดงระดับปริมาณ น้ำตาล โดยโครงข่ายประสาทเทียมเป็นเครื่องมือหนึ่งที่ถูก นำมาใช้ตัดสินใจวิเคราะห์ระดับปริมาณน้ำตาลในงาน ก่อนหน้า โดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไป ข้างหน้า (Feed forward artificial neural network) สร้าง รูปแบบการปรับเทียบค่า (Calibration curve) ที่ได้จากรีเฟ ล็กโตมิเตอร์ของคลื่นมิลลิเมตร เพื่อใช้วัดปริมาณปริมาณ น้ำตาลของแอปเปิลแบบไม่ทำลาย [13] การใช้โครงข่าย ประสาทเทียมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลการลดทอนของคลื่น ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ จากสายอากาศไมโคร สตริปรูปลี่เหลี่ยม เพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลของแตงโม [14] นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเพื่อลดความซับซ้อน โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับระบบ การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในระบบเซนเซอร์ไมโครเวฟ [15] จากงานวิจัยก่อนหน้าแสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์ สะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายใน การตรวจสอบปริมาณน้ำตาล รวมถึงโครงข่ายประสาทเทียม ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดสินใจของระบบ เป็นต้น

ดังนั้น ในงานนี้จึงนำเสนอการวัดค่าสภาพยอมไฟฟ้า (Permittivity) ของน้ำเชื่อม นำค่าสภาพยอมไฟฟ้าจาก การวัดมาใช้ในการจำลองระบบร่วมกับสายอากาศแพทช์ เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการตรวจสอบปริมาณน้ำตาล ในน้ำเชื่อมด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จำลองการทำงานในช่วง ความถี่กว้างตั้งแต่ 5 ถึง 7 กิกะเฮิรตซ์ จากนั้นประยุกต์ใช้ โครงข่ายประสาทเทียมในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การ

สะท้อน ( $|S_{11}|$ ) เทียบกับน้ำเชื่อม เพื่อแบ่งระดับปริมาณ น้ำตาล โดยหัวข้อที่สองนำเสนอหลักการพื้นฐานของค่า สภาพยอมไฟฟ้าที่มีผลต่อการเดินทางคลื่นความถี่ใน ตัวกลางต่างชนิด การวัดค่าสภาพยอมไฟฟ้าของน้ำเชื่อมใน แต่ละระดับปริมาณน้ำตาล หัวข้อที่สามนำเสนอการพัฒนา สายอากาศแพทช์ในช่วงความถี่กว้าง สำหรับการประยุกต์ใช้ ในการจำลองการตรวจสอบปริมาณน้ำตาลในน้ำเชื่อม หัวข้อ ที่สี่นำเสนอการจำลองระบบตรวจสอบปริมาณน้ำตาล ในน้ำเชื่อมจากการเปลี่ยนระดับปริมาณน้ำตาลด้วยค่า สภาพยอมไฟฟ้า หัวข้อที่ห้าเป็นการฝึกสอนและทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมจากค่า  $|S_{11}|$  เพื่อวิเคราะห์ ความสามารถในการแบ่งระดับปริมาณน้ำตาลในน้ำเชื่อม และหัวข้อสุดท้ายเป็นการสรุปผล

## 2. ค่าสภาพยอมไฟฟ้าของน้ำเชื่อม

ค่าสภาพยอมไฟฟ้าของตัวกลาง เป็นคุณสมบัติทาง ไฟฟ้าของวัสดุที่ส่งผลต่อการแพร่กระจาย การสะท้อน และ การลดทอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางผ่าน ค่าสภาพ ยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์  $\epsilon_r$  มีค่าเป็นเชิงซ้อนดังสมการที่ (1)

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (1)$$

$\epsilon_r'$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกทำหน้าที่ในการกักเก็บพลังงาน สนามไฟฟ้าของวัสดุ

$\epsilon_r''$  คือ ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกทำหน้าที่ในการ ดูดกลืนและลดทอนกำลังงาน

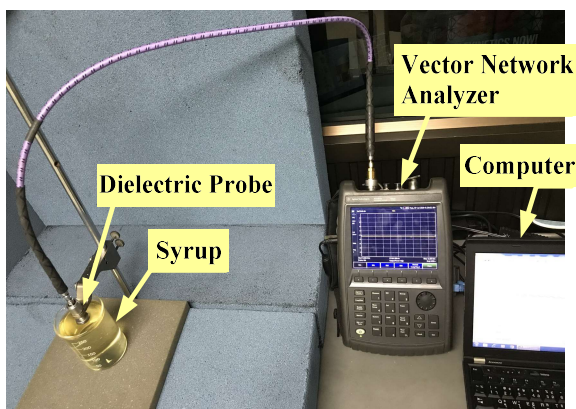
โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $\Gamma$  ของคลื่นแปรผันตามค่าคงที่ ไดอิเล็กตริกตามสมการที่ (2) [16]

$$\Gamma = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

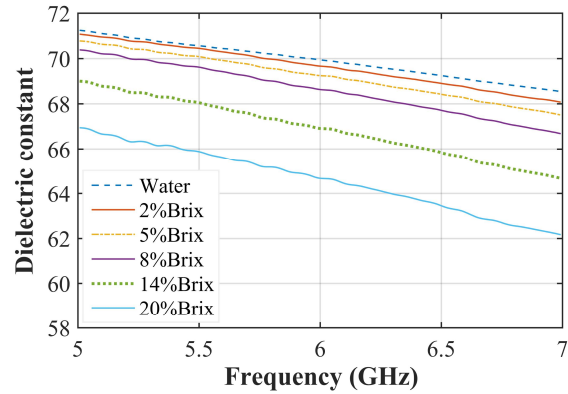
ในกรณีที่วัสดุมีคุณสมบัติต่างกัน หรืออุณหภูมิต่างกัน การกักเก็บพลังงานหรือการดูดกลืนคลื่นของวัสดุอยู่ในระดับ ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งส่งผลต่อค่าสภาพยอมไฟฟ้า และดังเช่น งานก่อนหน้าที่ได้นำนมดี และนมเสียมาทดสอบค่า สภาพยอมไฟฟ้าในช่วงความถี่ 0.5-3 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งค่าคงที่

ไดอิเล็กทริกของนมมีค่ามากกว่านมเสีย [17] หรือค่าสภาพยอมไฟฟ้าของน้ำผึ้งที่มีปริมาณน้ำตาลแต่ละระดับในช่วงความถี่ 10 ถึง 4500 เมกะเฮิร์ตซ์ มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งทำให้สามารถตรวจสอบความหวานของน้ำผึ้งได้จากค่าสภาพยอมไฟฟ้า [18] การเลือกใช้ช่วงความถี่สำหรับวัดค่าสภาพยอมไฟฟ้าที่เหมาะสม ช่วยให้การคัดแยกวัสดุจากค่าสภาพยอมไฟฟ้า มีความแม่นยำมากขึ้น ดังนั้น บทความนี้จึงใช้ค่าสภาพยอมไฟฟ้า เป็นพื้นฐานในการตรวจสอบปริมาณน้ำตาลในน้ำเชื่อม

น้ำเชื่อมตัวอย่างถูกซื้อมาจากตลาดในท้องถิ่นและได้รับการจัดเตรียมด้วยการแบ่งตามระดับปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 8 ตัวอย่าง น้ำเชื่อมได้รับการผสมกับน้ำเปล่าตามอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้มีปริมาณน้ำตาลอยู่ในระดับ 0%Brix 2%Brix 5%Brix ถึง 20%Brix ตามลำดับ จากนั้นจึงวัดค่าสภาพยอมไฟฟ้าของน้ำเชื่อมด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละระดับปริมาณน้ำตาล การวัดทำในช่วงความถี่ตั้งแต่ 5 ถึง 7 กิกะเฮิร์ตซ์ ด้วยโพรบไดอิเล็กทริก รุ่น 85070 B [19] ของบริษัท Agilent Technologies และข้อมูลจากการวัดถูกคำนวณด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ (Vector network analyzer) รุ่น Field fox N9916A [20] ข้อมูลการวัดได้รับการแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1

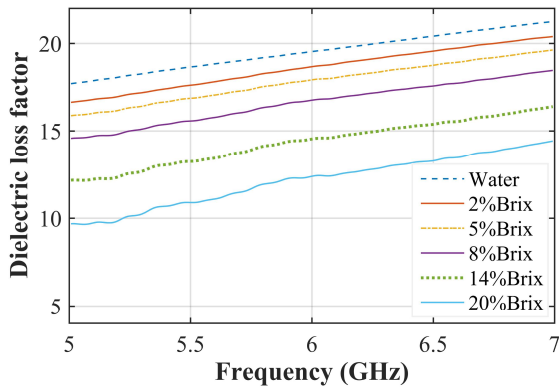


รูปที่ 1 การวัดค่าสภาพยอมไฟฟ้าของน้ำเชื่อม



รูปที่ 2 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำเชื่อม

โดยก่อนการวัดเครื่องมือได้รับการปรับเทียบ (Calibration) ในช่วงความถี่กว้าง 5 ถึง 7 กิกะเฮิร์ตซ์ การปรับเทียบทำทั้งหมด 3 ขั้นตอน คือ 1) การวัดอากาศ (Open circuit) 2) การวัดแบบลัดวงจร (Short circuit) 3) การวัดน้ำหนักอุณหภูมิห้อง (Load) จากนั้นจึงทำการวัดค่าสภาพยอมไฟฟ้าของน้ำเชื่อม 8 ตัวอย่าง ที่มีปริมาณน้ำตาลแต่ละระดับ ข้อมูลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon'$ ) ของน้ำเชื่อมที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ตซ์ ที่ระดับปริมาณน้ำตาล 0%Brix 2%Brix ถึง 20%Brix ค่า  $\epsilon'$  ได้อยู่ที่ 71.24 71.07 และ 66.95 และเมื่อวัดที่ความถี่สูงขึ้น 6 กิกะเฮิร์ตซ์ ค่า  $\epsilon'$  ลดลงอยู่ที่ 69.94 69.66 และ 64.67 และที่ความถี่ 7 กิกะเฮิร์ตซ์ ค่า  $\epsilon'$  ลดลงต่ำสุดอยู่ที่ 68.54 68.07 และ 62.16 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริก ( $\epsilon''$ ) ที่ได้จากการวัดน้ำเชื่อมที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ตซ์ ที่ระดับปริมาณน้ำตาลตั้งแต่ 0%Brix 2%Brix ถึง 20%Brix ค่า  $\epsilon''$  ที่ได้อยู่ที่ 17.7 16.63 และ 9.68 และเมื่อความถี่สูงขึ้นที่ 6 กิกะเฮิร์ตซ์ ค่า  $\epsilon''$  เพิ่มขึ้นอยู่ที่ 19.53 18.67 และ 12.38 และที่ความถี่ 7 กิกะเฮิร์ตซ์ ค่า  $\epsilon''$  เพิ่มขึ้นสูงสุดอยู่ที่ 21.25 20.39 และ 14.42 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำเชื่อม

ตารางที่ 1 ค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกต่อระดับปริมาณน้ำตาล

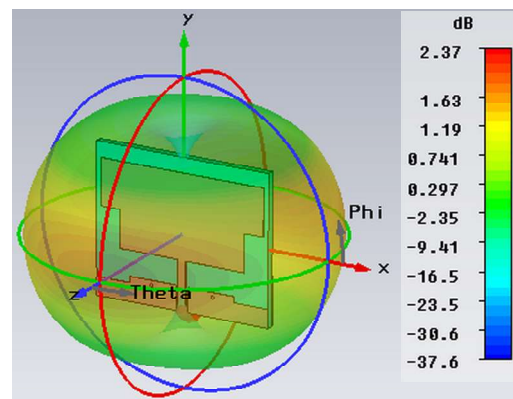
5 GHz	6 GHz	7 GHz	Sugar content
0.2644	0.2985	0.3328	0 %Brix
0.2468	0.2838	0.3184	2 %Brix
0.2342	0.2714	0.3061	5 %Brix
0.2135	0.2528	0.2877	8 %Brix
0.1968	0.2358	0.2736	11 %Brix
0.1787	0.221	0.2588	14 %Brix
0.1614	0.206	0.2462	17 %Brix
0.1449	0.192	0.2331	20 %Brix

สังเกตได้ว่าค่าสภาพยอมไฟฟ้า ( $\epsilon$ ) ของน้ำเชื่อมที่ปริมาณน้ำตาลแต่ละระดับแปรผันโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของความถี่ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้  $\epsilon'$  ลดลง แต่ในทางกลับกันค่า  $\epsilon''$  มีค่าเพิ่มขึ้น และสำหรับค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก ( $\epsilon''/\epsilon'$ :  $\tan \delta$ ) ที่ปริมาณน้ำตาลแต่ละระดับมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความถี่สูงขึ้น และสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อความถี่คงที่และปริมาณน้ำตาลมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกมีค่าลดลงตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 จากการตรวจวัดค่าสภาพยอมไฟฟ้าของน้ำเชื่อมด้วยโพรบไดอิเล็กตริก สามารถสังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณน้ำตาลในน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้น การกักเก็บพลังงานมีค่าลดลง ค่าการสูญเสียและการดูดซับคลื่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวแสดงให้เห็นถึง

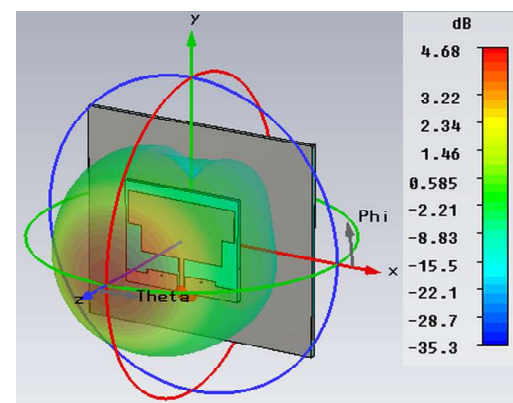
ความเป็นไปได้ในการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบปริมาณน้ำตาลในน้ำเชื่อม

### 3. การจำลองสมรรถนะสายอากาศแพทช์

การจำลองระบบเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการแบ่งระดับปริมาณน้ำตาลในน้ำเชื่อม เริ่มด้วยการพัฒนาสายอากาศแพทช์บนแผ่นวงจรพิมพ์ โดยใช้โปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (CST STUDIO SUITE) โครงสร้างของสายอากาศที่ได้รับการจำลองใช้ส่วนของการแพร่กระจายคลื่นทางด้านหน้า ใช้ระนาบกราวด์ทั้งหมด 2 ส่วน คือ ด้านหน้าและด้านหลัง การป้อนสัญญาณใช้แบบสตริปไลน์เพื่อช่วยให้การปรับความกว้างของช่วงความถี่ทำงานทำได้สะดวก โครงสร้างของสายอากาศได้รับการพัฒนาที่สอดคล้องกับงานก่อนหน้า [21-22] โดยได้รับการปรับปรุงจากการจำลองให้ทำงานได้ดีในช่วงความถี่ 5 ถึง 7 กิกะเฮิร์ตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) และได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมให้เหมาะสมสำหรับระบบตรวจสอบปริมาณน้ำตาลในน้ำเชื่อม



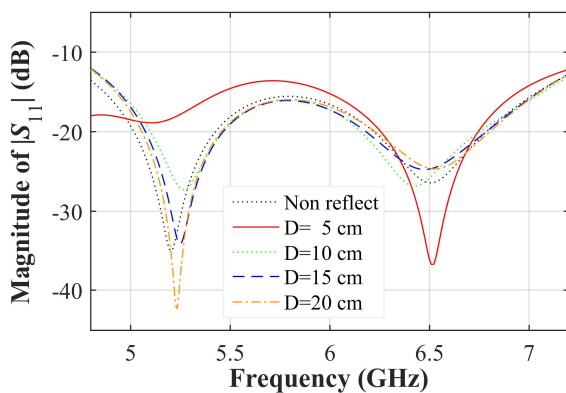
(ก)



(ข)

รูปที่ 4 โครงสร้างสายอากาศและแผ่นสะท้อนคลื่น

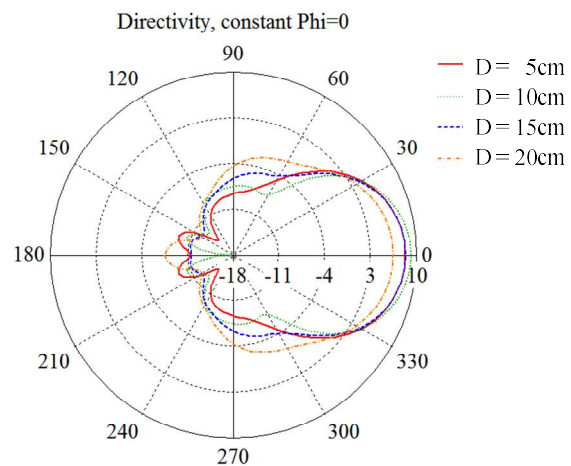
สายอากาศได้รับการเพิ่มสมรรถนะด้วยการติดตั้งแผ่นสะท้อนคลื่นไว้ด้านหลังเพื่อเพิ่มอัตราขยาย (Gain) และควบคุมทิศทางของลำคลื่นให้พุ่งออกทางด้านหน้าดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) ระยะห่างระหว่างสายอากาศและแผ่นสะท้อนคลื่นได้รับการปรับ เพื่อหาระยะที่เหมาะสมที่ส่งผลให้อัตราขยายมีค่าเพิ่มขึ้น สามารถควบคุมทิศทางของลำคลื่นให้พุ่งออกด้านหน้า และให้การสูญเสียย้อนกลับ ( $|S_{11}|$ ) ตลอดช่วงความถี่ใช้งานต่ำกว่า -10 เดซิเบล การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสายอากาศเริ่มการจำลองโดยใช้แผ่นสะท้อนคลื่น ค่าพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  ที่ได้ตลอดช่วงความถี่ 5 ถึง 7 กิกะเฮิรตซ์ ให้ค่าต่ำสุดอยู่ที่ -34.95 และสูงสุดที่ -15.55 เดซิเบล แสดงในรูปที่ 5 จากนั้นโครงสร้างสายอากาศได้รับการพัฒนาเพิ่มด้วยการใช้ติดตั้งแผ่นสะท้อนคลื่นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ตำแหน่งด้านหลังสายอากาศ แผ่นสะท้อนคลื่นได้รับการปรับทั้งหมด 5 ขนาด ตั้งแต่ 10x10 12.5x12.5 ถึง 20x20 ตารางเซนติเมตร จึงได้ขนาดที่เหมาะสมคือ 15x15 ตารางเซนติเมตร ระยะห่าง (D) ของสายอากาศและแผ่นสะท้อนคลื่นได้รับการปรับที่ 4 ระยะ



รูปที่ 5 พารามิเตอร์  $|S_{11}|$  ต่อระยะห่างระหว่างสายอากาศและแผ่นสะท้อนคลื่น

เริ่มตั้งแต่ 5 10 ถึง 20 เซนติเมตร ส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  ที่ได้อยู่ที่ -13.6 ถึง -36.8 เดซิเบล -16.0 ถึง -27.3 เดซิเบล และ -16.0 ถึง -42.3 เดซิเบล ดังแสดงในรูปที่ 5 จากการปรับระยะห่างของแผ่นสะท้อนคลื่น 4 ระยะ ส่งผลต่ออัตราขยายและทิศทางของลำคลื่นหลักของสายอากาศ ที่ระยะห่าง 5 10 15 และ 20 เซนติเมตร ให้อัตราขยายที่ 3.27 4.68 3.12 และ 2.58 เดซิเบล ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้อง

กับงานวิจัยก่อนหน้า [23-25] ดังแสดงในรูปที่ 6 จากการปรับขนาดและระยะห่างของแผ่นสะท้อนคลื่นจึงได้โครงสร้างที่เหมาะสม ประกอบด้วยสายอากาศแพทช์ขนาด 3x2 ตารางเซนติเมตร ขนาดของแผ่นสะท้อน 15x15 ตารางเซนติเมตร ระยะห่างระหว่างสายอากาศและแผ่นสะท้อนอยู่ที่ 10 เซนติเมตร ซึ่งเห็นได้ว่าโครงสร้างของสายอากาศมีความซับซ้อนต่ำ มีอัตราขยายเพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีที่ไม่ใช้แผ่นสะท้อนคลื่นอยู่ที่ 2.31 เดซิเบล ลำคลื่นพุ่งออกด้านหน้าซึ่งเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบตรวจสอบปริมาณน้ำตา

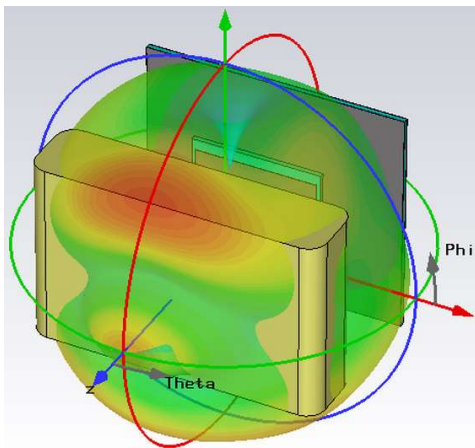


รูปที่ 6 อัตราขยายต่อระยะห่างของแผ่นสะท้อนที่ 6 GHz

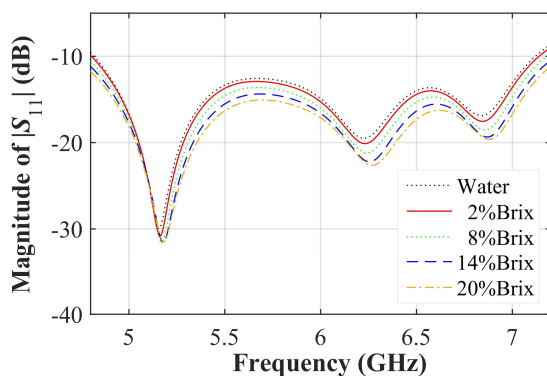
#### 4. การจำลองระบบตรวจสอบปริมาณน้ำตา

โครงสร้างของสายอากาศที่ได้รับการพัฒนาถูกนำมาใช้ในระบบตรวจสอบปริมาณน้ำตาในน้ำเชื่อม โครงสร้างของการจำลองประกอบด้วย แผ่นสะท้อนคลื่นที่ติดตั้งอยู่ด้านหลังของสายอากาศที่ระยะ 10 เซนติเมตร และโมเดลน้ำเชื่อมอยู่ด้านหน้าของสายอากาศที่ระยะ 10 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 7 การจำลองระบบเพื่อวิเคราะห์ความสามารถของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการแยกระดับปริมาณน้ำตา ใช้การส่งออกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่กว้างตั้งแต่ 5 ถึง 7 กิกะเฮิรตซ์ ไปยังโมเดลน้ำเชื่อมที่ปริมาณน้ำตาแต่ละระดับ จากนั้นจึงรับพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  กลับมาวิเคราะห์ความแตกต่างที่เกิดขึ้น การทำงานทั้งหมดได้รับการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การจำลองระบบเพื่อวิเคราะห์ระดับปริมาณน้ำตาใน

น้ำเชื่อมจากพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  โมเดลน้ำเชื่อมได้รับการปรับค่าสภาพยอมไฟฟ้าตามระดับปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการวัดจริงด้วยรีแฟลกโตมิเตอร์ทั้งหมด 8 ระดับ ซึ่งเป็นปริมาณน้ำตาลตั้งแต่ 0%Brix 2%Brix ถึง 20%Brix เริ่มจากการจำลองที่ 0%Brix (น้ำเปล่า) ในช่วงความถี่ 5 ถึง 7 กิกะเฮิร์ตซ์ ค่าพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  ที่ได้อยู่ในช่วง -12.76 ถึง -30.17 เดซิเบล และที่ ปริมาณน้ำตาล 2%Brix ค่าพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  อยู่ที่ -13.01 ถึง -30.92 เดซิเบล และที่ 8%Brix 14%Brix และ 20%Brix ให้ค่าพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  อยู่ที่ -13.71 ถึง -31.66 เดซิเบล-14.27 ถึง -31.52 เดซิเบล และ -14.86 ถึง -31.31 เดซิเบล ตามลำดับ ดังรูปที่ 8 ค่าพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  ที่ได้จากการจำลองที่ปริมาณน้ำตาลแต่ละระดับ แสดงให้เห็นถึงลักษณะสำคัญที่แตกต่างกันและมีความเป็นไปได้



รูปที่ 7 การจำลองเพื่อตรวจสอบปริมาณน้ำตาลในน้ำเชื่อม ที่ความถี่ 6 GHz

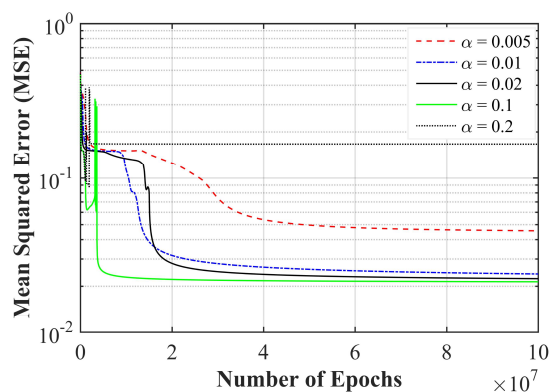


รูปที่ 8 ค่าพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  ต่อระดับปริมาณน้ำตาล ในน้ำเชื่อม

ในการแยกระดับปริมาณน้ำตาลด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ข้อมูลดังกล่าวจึงได้รับการนำไปใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อทดสอบความสามารถในการตรวจสอบปริมาณน้ำตาลในน้ำเชื่อม

## 5. การฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม

ค่าพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  จากการจำลองถูกนำมาใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อหาอัตราการเรียนรู้และโครงสร้างที่เหมาะสม โครงข่ายประสาทเทียมถูกออกแบบให้มี 3 ชั้น ประกอบด้วย ชั้นอินพุต ชั้นซ่อนเร้น และชั้นเอาต์พุต อัตราการเรียนรู้ที่ใช้ที่ฝึกสอนเริ่มจาก 0.001 0.005 0.01 ถึง 0.2 และใช้อินพุตเป็นค่าพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  ในช่วงความถี่ กว้างที่แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ข้อมูลความถี่ ประกอบด้วยข้อมูล 20% 25% 30% และ 40% จากจำนวนข้อมูลความถี่ ทั้งหมด 126 ความถี่ ที่ได้จากการซีกค่าตัวอย่างความถี่ โดยเริ่มจากความถี่ 5 5.016 5.032 ถึง 7 กิกะเฮิร์ตซ์ การซีกค่าตัวอย่างห่างกันจุดละ 16 เมกะเฮิร์ตซ์ และจำนวนโนดซ่อนเร้นถูกออกแบบใช้เป็น 2 เท่า ของจำนวนโนดอินพุต ใช้เงื่อนไขการวนซ้ำไม่น้อยกว่า  $10^8$  รอบ หรือมีค่าความผิดพลาด (MSE) ต่ำกว่า  $10^{-2}$  การวิเคราะห์สมรรถนะของโครงข่ายประสาทเทียมเริ่มจากการใช้ข้อมูลในการฝึกสอน 30% ใช้อัตราการเรียนรู้ ( $\alpha$ ) ทั้งหมด 5 ระดับ เริ่มต้นที่ 0.005 การเรียนรู้เพื่อปรับค่าตัวแปรถูกทำอย่างละเอียด การฝึกสอนจึงทำได้ช้าแต่สามารถลดความผิดพลาดได้อย่างต่อเนื่อง จากนั้นขยายอัตราการเรียนรู้เป็น 0.01 การเรียนรู้ทำได้ดีและมีความรวดเร็วเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราการเรียนรู้ไปเป็น 0.02 การเรียนรู้อย่างคงทำได้อย่างต่อเนื่อง และเรียนรู้ได้เร็วที่สุดคือ อัตราการเรียนรู้ 0.1 และที่อัตราการเรียนรู้ 0.2 การหาคำตอบไม่สามารถทำได้ ระดับความสามารถในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมแสดงดังในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ค่าความผิดพลาดต่อการฝึกสอนซ้ำ  
ของโครงข่ายประสาทเทียม

จากการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการเรียนรู้ด้วยการปรับอัตราการเรียนรู้ แสดงให้เห็นว่าโครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถในการแก้ปัญหาหรือแบ่งระดับปริมาณน้ำตาลในน้ำเชื่อมได้จากพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  ดังนั้นโครงข่ายประสาทเทียมจึงถูกนำไปใช้ในการฝึกสอนเพื่อหาจำนวนอินพุตและอัตราการเรียนรู้ ที่เหมาะสม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระบบเซนเซอร์ ข้อมูลอินพุตทั้ง 4 กลุ่มคือ 20% 25% 30% และ 40% จำนวนโนดซ่อนเริ่มใช้เป็น 2 เท้าของจำนวนอินพุต และใช้ 3 โหนดเอาต์พุต ที่ถูกกำหนดให้เป็นตัวแทนของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 8 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 ค่าอัตราการเรียนรู้ในการทดสอบมีทั้งหมด 7 ขนาด ตั้งแต่ 0.001 0.005 0.01 0.02 0.1 0.2 และ 0.3 ตามลำดับ ในการฝึกสอน อัตราการเรียนรู้ถูกปรับเพื่อหาค่าที่ทำให้ระบบเรียนรู้ได้รวดเร็วและตัดสินใจแม่นยำ ใช้เงื่อนไขควบคุมการวนซ้ำ (Epochs) ถูกทำไม่เกิน  $10^8$  รอบ หรือที่ค่าความผิดพลาดต่ำกว่า  $10^{-2}$  การฝึกสอนเริ่มจากข้อมูล 20% ที่อัตราการเรียนรู้ 0.001 ให้ค่าความผิดพลาด (MSE) ที่ 0.130 มีความแม่นยำ 59.0% การวนซ้ำ  $10^8$  รอบที่การเรียนรู้ 0.005 0.01 และ 0.02

ตารางที่ 2 เอาต์พุตโนดที่เป็นตัวแทนของระดับปริมาณน้ำตาล

Output node			Sugar content
$O_1$	$O_2$	$O_3$	
0	0	0	0 %Brix
0	0	1	2 %Brix
0	1	0	5 %Brix
0	1	1	8 %Brix
1	0	0	11 %Brix
1	0	1	14 %Brix
1	1	0	17 %Brix
1	1	1	20 %Brix

ให้ความแม่นยำเฉลี่ยอยู่ที่ 50% เนื่องจากข้อมูลในการสอนมีเพียง 20% การเรียนรู้จึงทำได้ยาก เมื่ออัตราการเรียนรู้เพิ่มเป็น 0.1 0.2 0.3 ให้ความแม่นยำเฉลี่ยที่ 75% เนื่องจากอัตราการเรียนรู้กว้างส่งผลให้การเรียนรู้ทำได้เร็ว แต่มีความแม่นยำต่ำเนื่องจากข้อมูลในการฝึกสอนไม่เพียงพอ จากนั้นจึงปรับข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนเป็น 25% ที่อัตราการเรียนรู้ 0.001 การเรียนรู้ทำได้ดีขึ้นส่งผลให้ความแม่นยำเพิ่มขึ้นเป็น 67.8% ค่าความผิดพลาดลดลงมาที่ 0.107 เมื่ออัตราการเรียนรู้เพิ่มเป็น 0.005 0.01 0.02 และ 0.1 ให้ค่าความผิดพลาดลดลงต่ำกว่า 0.076 และต่ำสุดที่ 0.045 จึงส่งผลให้ความแม่นยำเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 76.3% ถึง 84.5% การใช้ข้อมูล 25% ในการฝึกสอนการเรียนรู้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราการเรียนรู้กว้างขึ้นเป็น 0.2 และ 0.3 ค่าความผิดพลาดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแม่นยำลดลง ต่อมาใช้ข้อมูลการฝึกสอน 30% ด้วยข้อมูลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ที่อัตราการเรียนรู้ 0.001 ให้ค่าความผิดพลาดต่ำอยู่ที่ 0.083 และที่อัตราการเรียนรู้ 0.005 0.01 และ 0.02 ให้ความแม่นยำเพิ่มขึ้นที่ 74.7% ถึง 84.1% และที่อัตราการเรียนรู้ 0.1 การเรียนรู้ทำได้รวดเร็วจากข้อมูล 30% ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดต่ำอยู่ที่ 0.023 และมีความแม่นยำสูงขึ้นอยู่ที่ 92.2% เมื่อขยายอัตราการเรียนรู้ให้กว้างขึ้นที่ 0.2 และ 0.3 การเรียนรู้ทำได้ยากขึ้นและให้ความแม่นยำลดลง และสุดท้ายคือการฝึกสอนด้วยข้อมูล 40% ที่อัตราการเรียนรู้ 0.001 ให้ความแม่นยำ 66.2% ที่อัตราการเรียนรู้ 0.005 ให้ความแม่นยำเพิ่มเป็น 83.1% เมื่อขยายอัตราการเรียนรู้เพิ่มเป็น 0.01 0.02 และ 0.1 ค่าความแม่นยำทั้งหมดเพิ่มขึ้นสูง



ตารางที่ 3 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

Learning rate ( $\alpha$ )	20% of data		25% of data		30% of data		40% of data	
	MSE	Accuracy	MSE	Accuracy	MSE	Accuracy	MSE	Accuracy
0.001	0.130	59.0%	0.107	67.8%	0.083	73.5%	0.115	66.2%
0.005	0.117	50.3%	0.074	83.0%	0.065	75.2%	0.046	83.1%
0.01	0.181	50.5%	0.076	76.3%	0.067	84.1%	0.023	91.7%
0.02	0.169	48.5%	0.061	83.8%	0.073	74.7%	0.021	91.6%
0.1	0.095	74.0%	0.045	84.5%	0.023	92.2%	0.020	92.3%
0.2	0.094	74.6%	0.293	25.1%	0.146	49.7%	0.167	50.1%
0.3	0.094	75.1%	0.209	32.6%	0.293	23.9%	0.187	43.5%

อยู่ในช่วง 91.6% ถึง 92.3% เนื่องจากข้อมูลที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการฝึกสอนอย่างชัดเจนและให้ค่าความผิดพลาดต่ำสุดที่ 0.02 และที่อัตราการเรียนรู้ 0.2 และ 0.3 ความแม่นยำจึงลดลงอยู่ที่ 43.5% ถึง 50.1% เนื่องมาจากอัตราการเรียนรู้กว้างมากเกินไปจึงทำให้โครงข่ายประสาทเทียมหยุดการเรียนรู้ ดังแสดงในตารางที่ 3 โครงข่ายประสาทเทียมได้รับการปรับค่าอัตราการเรียนรู้ และจำนวนข้อมูลอินพุต เพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสม และทำให้ระบบมีการตัดสินใจที่แม่นยำ โครงสร้างที่เหมาะสมคือ ใช้ข้อมูลอินพุต 30% โหนดซ่อนเร้นมีจำนวน 2 เท้าของอินพุต และมีโนดเอาต์พุต 3 โหนด ที่ได้รับการจับคู่เข้ากับระดับปริมาณน้ำตาลในน้ำเชื่อม 8 ระดับ อัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสมของระบบคือ 0.1 ใช้การฝึกสอนซ้ำที่  $10^8$  รอบ เมื่อพิจารณาที่ความแม่นยำที่เกิน 90% ที่การฝึกสอนด้วยข้อมูล 30% จึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน เนื่องจากระบบมีความซับซ้อนต่ำ แต่การตัดสินใจยังคงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 6. สรุปผล

การวิเคราะห์ความสามารถในการตรวจสอบปริมาณน้ำตาลในน้ำเชื่อมด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่กว้างตั้งแต่ 5 ถึง 7 กิกะเฮิร์ตซ์ ใช้การตรวจวัดค่าสภาพยอมไฟฟ้าของน้ำเชื่อมด้วยโพรบไดอิเล็กตริกเทียบกับปริมาณน้ำตาลที่วัดด้วยปริมาตรแฟร็กมิเตอร์ ค่าสภาพยอมไฟฟ้าของน้ำเชื่อมถูกนำมาพัฒนาเป็นโมเดลน้ำเชื่อมร่วมกับสายอากาศแพทช์ในระบบตรวจสอบปริมาณ

น้ำตาล สายอากาศได้รับการพัฒนาให้ทำงานที่ความถี่กว้างและมีช่วงความถี่ทำงาน 5 ถึง 7 กิกะเฮิร์ตซ์ แผ่นสะท้อนคลื่นถูกวางอยู่ด้านหลังของสายอากาศทำให้อัตราขยายเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 4.68 เดซิเบล โมเดลน้ำเชื่อมอยู่ห่างจากสายอากาศทางด้านหน้าทีระยะ 10 เซนติเมตร ระดับปริมาณน้ำตาลในการจำลองถูกเปลี่ยนจากค่าสภาพยอมไฟฟ้าทั้งหมด 8 ระดับ พารามิเตอร์  $|S_{11}|$  ที่ได้จากการจำลองในช่วงความถี่กว้างถูกนำมาชั่งค่าตัวอย่างทั้งหมด 126 ข้อมูลความถี่ ที่ปริมาณน้ำตาลแต่ละระดับ และแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ประกอบด้วย ข้อมูลความถี่ 20% 25% 30% และ 40% ตามลำดับ ข้อมูลในแต่ละกลุ่มถูกนำมาใช้ฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม และพบว่าที่ใช้ข้อมูล 30% ที่อัตราการเรียนรู้ 0.1 ให้โครงสร้างที่มีความซับซ้อนต่ำและให้ความแม่นยำสูงที่ 92.2% ซึ่งเหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาระบบตรวจสอบปริมาณน้ำตาลในน้ำเชื่อม ทั้งนี้ในการพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานจริง ระบบการตรวจสอบปริมาณน้ำตาลด้วยค่าสภาพยอมไฟฟ้า ต้องควบคุมอุณหภูมิขณะวัดที่ 25 องศาเซลเซียส ป้องกันการเปลี่ยนแปลงทางคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำเชื่อม เพื่อให้การตรวจสอบปริมาณน้ำตาลทำงานได้อย่างแม่นยำและถูกต้อง

## 7. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ประจำปี 2562

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] The International Diabetes Federation (2020). *Diabetes facts & figures*. <https://www.idf.org/aboutdiabetes/what-is-diabetes/facts-figures.html>.
- [2] H. Kelebek, S. Selli, A. Canbas, and T. Cabaroglu, "HPLC determination of organic acids, sugars, phenolic compositions and antioxidant capacity of orange juice and orange wine made from a Turkish cv. Kozan," *Microchemical Journal*, vol. 91, pp.187–192, 2009.
- [3] S. Damayanti, B. Permana, and C. C. Weng, "Determination of sugar content in fruit juices using high performance liquid chromatography," *Acta Pharmaceutica Indonesia*, vol. 37, no. 4, pp.139-145, 2012.
- [4] R. W. Walker, and M. I. Goran, "Laboratory determined sugar content and composition of commercial infant formulas, baby foods and common grocery items targeted to children," *Nutrients*, vol.7, no.7, pp.5850–5867, July 2015.
- [5] W. B. David, "Concentration scales for sugar solutions," *Journal of Chemical Education*, vol.83, no.10, October 2006.
- [6] Y. He, D. Wu, S. Feng, and X. Li, "Fast measurement of sugar content of yogurt using Vis/NIR-spectroscopy," *International Journal of Food Properties*, vol.10, pp. 1–7, 2007.
- [7] G. Marrubini, A. Papetti, and E. Genorini, and A. Ulrici, "Determination of the sugar content in commercial plant milks by near infrared spectroscopy and luff-schoorl total glucose titration," *Food Anal. Methods*, vol.10, pp.1556–1567, 2017.
- [8] N. Angkawisittpan and T. Manasri, "Determination of sugar content in sugar solutions using interdigital capacitor sensor," *Measurement Science Review*, vol.12, no.1, pp.8-13, 2012.
- [9] M. T. Islam, MD. N. Rahman, M. S. J. Singh, and MD. Samsuzzaman, "Detection of salt and sugar contents in water on the basis of dielectric properties using microstrip antenna-based sensor," *IEEE Access*, vol.6, 2018.
- [10] R. Rosman, M. N. Dimon, and Y. K. Yeow, "Correlation between reflection coefficient, dielectric properties and brix level of Malaysian oranges at microwave frequencies," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol.10, no.3, pp.853 – 858, June 2018.
- [11] P. Leekul, S. Chivapreecha and M. Krairiksh, "Microwave sensor for tangerine classification based on coupled-patch antennas," *International Journal of Electronics*, vol.103, no.8, 2016.
- [12] P. Leekul, S. Chivapreecha, and M. Krairiksh, "Microwave sensor for defected fruit classification," *IEEE International Conference on Antenna Measurement & Applications (CAMA)*, 30 Nov - 2 Dec, Chiangmai, Thailand, 2015.
- [13] M. Oda, A. Mase, and K. Uchino, "Non-destructive measurement of sugar content in apples using millimeter wave reflectometry and artificial neural networks for calibration," *Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference*, Melbourne, Victoria, Australia, 5 - 8 December 2011.

- [14] O.O. Adedayo, M. M. Isa, and K. Budayawan. "Artificial neural network model for microwave propagation in water melon," *2012 IEEE International Conference on Circuits and Systems (ICCAS)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 3-4 Oct. 2012.
- [15] P. Leekul, P. Soontornwong, and S. Chivapreecha, "Low complexity artificial neural network unit for sugar content detection in microwave sensor system," *Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference, APSIPA*, Phnom Penh, Cambodia, 2014.
- [16] D. M. Pozar, *Microwave engineering* (4th ed.), John Wiley & Sons, 2012.
- [17] P. Leekul, "Application of artificial neural network for milk quality classification with dielectric properties," *Journal of Industrial Technology: Thepsatri ITECH*, vol.12, no.2, pp.131-139 (in Thai).
- [18] W. Guo, X. Zhu, Y. Liu, and H. Zhuang, "Sugar and water contents of honey with dielectric property sensing." *Journal of Food Engineering*, vol.97, pp.275–281, 2010.
- [19] Agilent Technologies, *85070E Dielectric Probe Kit*. Printed ver., USA, 2013.
- [20] Keysight, *Fieldfox handheld analyzers technical overview*, USA, 2015.
- [21] P. Leekul and T. Limpiti, "Development of C-band monopole antenna with artificial neural networks cooperation for latex contamination detecting application," *The Journal of Industrial Technology: Suan Sunandha Rajabhat University*, vol.7, no.2, pp. 24-33, July - December 2019 (in Thai)
- [22] S. Lakrit, H., Ammor, J. Terhzaz, M. Chaibi, and M. Sánchez, "A new compact circular patch antenna for UWB communication," *Journal of Communications Software and Systems*, vol.11, no.4, pp.210-214, 2015.
- [23] A. Al-Zoubi, F. Yang, and A. Kishk, "A broadband center-fed circular patch-ring antenna with a monopole like radiation pattern," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 3, pp.789-792, March 2009.
- [24] T. V. Hoang, T. T. Le, Q. Y. Li, and H. C. Park, "Quad-band circularly polarized antenna for 2.4/5.3/5.8-GHz WLAN and 3.5-GHz WiMAX Applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp.1032-1035, 2016.
- [25] E. M. F. Fernandes, M. W. B. Silva, L. S. Briggs, A. L. P. S. Campos, H. X. Araújo, I. R. S. Casella, C. E. Capovilla, V. P. R. M. Souza, L J. Matos, "2.4–5.8 GHz dual-band patch antenna with FSS reflector for radiation parameters enhancement," *International Journal of Electronics and Communications*, vol. 108, pp.235–241, 2019,