ISSN 3027-6357 (Print)
ISSN 3027-6365 (Online)

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี Homepage : *http://li01.tci-thaijo.org/index.php/tstj*
ปีที่ 32 ฉบับที่ 4 (กรกฎาคม-สิงหาคม 2567) หน้า [68-83]

การประยุกต์ใช้สี่คลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟเพื่อคัดแยกระดับความหวานของสารละลายน้ำเชื่อมโดยไม่สัมผัส

Application of Four Microwave Frequencies for Non-Contact Classification of the Sweetness Level of Syrup Solution

พรพิมล ฉายแสง, ประพัน ลี้กุล*
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จันทบุรี 22000
Pornpimon Chaisaeng, Prapan Leekul*
Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthabari 2200
Received 26 January 2024; Received in revised 29 March 2024; Accepted 20 May 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบตรวจวัดระดับความหวานในสารละลายน้ำเชื่อมด้วยอัตราส่วนกำลังงานของ 4 คลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟ ระบบตรวจวัดติดตั้งสายอากาศอยู่ด้านเดียวกันซึ่งแบ่งออกเป็นภาคส่งและภาครับ ภาคส่งทำหน้าที่ส่งออกสัญญาณความถี่ตั้งแต่ 2.1, 2.3, 2.5 และ 2.7 กิกะเฮิรตซ์ ไปยังน้ำเชื่อมตัวอย่างและเกิดเป็นกำลังงานการสะท้อนกลับ ในส่วนของภาครับทำหน้าที่ตรวจจับกำลังงานสะท้อนและเปรียบเทียบกับกำลังงานของความถี่ท้องถิ่นที่ 2.0 กิกะเฮิรตซ์ เพื่อหาอัตราส่วนที่แตกต่างกันของ 4 คู่ความถี่ เอาต์พุตที่ได้รับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัล ข้อมูลได้รับการประมวลผลด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีกระบวนการตัดสินใจจากโครงข่ายประสาทเทียม การตรวจวัดความหวานของน้ำเชื่อมทำทั้งหมด 10 ตัวอย่าง ตั้งแต่ 3 ถึง 30 %Brix ค่า V_{MAG1} V_{MAG2} V_{MAG3} และ V_{MAG4} ในแต่ละคู่ความถี่จากการตรวจวัดน้ำเชื่อมให้ระดับแรงดันอยู่ในช่วง 0.965 ถึง 0.979 โวลต์ 1.029 ถึง 1.055 โวลต์ 1.268 ถึง 1.306 โวลต์ และ 1.444 ถึง 1.523 โวลต์ ตามลำดับ ข้อมูลการตรวจวัดตอบสนองต่อระดับความหวานที่เพิ่มขึ้น และให้ค่าความไวของ V_{MAG} สูงสุดอยู่ที่ 14 มิลลิโวลต์ต่อ 3%Brix การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยข้อมูล 1 คู่ความถี่ 2 คู่ความถี่ และ 3 คู่ความถี่ ให้ความแม่นยำในการตัดสินใจเพิ่มขึ้นอย่างเป็นลำดับและที่ 4 คู่ความถี่ ให้ความแม่นยำสูงสุด โครงสร้างที่เหมาะสมอยู่ที่ 4 อินพุตโนด 8 โนดซ่อนเร้น และใช้ 4 โนดเอาต์พุต ที่เป็นตัวแทนของระดับความหวานน้ำเชื่อม 10 ระดับ อัตราการเรียนรู้ในการฝึกสอนอยู่ที่ 0.2 โครงสร้างที่เหมาะสมส่งผลให้หน่วยความจำของค่าถ่วงน้ำหนักถูกใช้อย่างคุ้มค่าและสามารถแยกระดับความหวานได้แม่นยำอยู่ที่ 92.4% แสดงให้เห็นว่าระบบตรวจวัดแบบ 4 คลื่นความถี่ในย่านไมโครเวฟทำงานได้อย่างประสิทธิภาพ

***ผู้รับผิดชอบบทความ:** prapan.l@rbru.ac.th **doi:** 10.14456/tstj.2024.30

Science32-N4.indd 68 24/8/2567 BE 11:26

คำสำคัญ: ระดับความหวาน; คลื่นสะท้อนย่านความถี่ไมโครเวฟ; คุณสมบัติไดอิเล็กตริก; ระบบตรวจวัดแบบไม่สัมผัส

Abstract

This article presents a system for determination the sweetness level in syrup solution using the ratio of four microwave signal powers. The measurement system comprises two antennas installed on the same side, one for transmitting and the other for receiving. The transmission part generates signal frequencies of 2.1, 2.3, 2.5, and 2.7 GHz, then transmits them to the syrup, creating a reflected signal. The receiving part receives the reflected signal and compares it with a local frequency of 2.0 GHz to calculate the difference in power ratios of the four frequency pairs. The obtained output is DC voltage, which is then converted to digital signal for processing in a microcontroller equipped with an artificial neural network decision processor. The sweetness of the syrup was tested with 10 samples ranging from 3 to 30 %Brix. Values of V_{MAG1} V_{MAG2} V_{MAG1}, and V_{MAG4} from each frequency pair ratio ranged from 0.965 to 0.979 V, 1.029 to 1.055 V, 1.268 to 1.306 V, and 1.444 to 1.523 V, respectively. The measurement data responded to increasing sweetness levels, with the V_{MAG} showing the highest sensitivity at 14 mV/3%Brix. Training the ANN with one, two, and three frequency pairs provided a sequential increase in decision accuracy, with training on four frequency pairs achieving the highest accuracy. The optimum structure consisted of 4 input nodes, 8 hidden nodes, and 4 output nodes, representing 10 sweetness levels at a learning rate of 0.2. The suitable artificial neural network structure resulted in the efficient use of memory and was able to classify sweetness level accurately at 92.4%. This demonstrates that the measurement system with four microwave signals worked efficiently.

Keywords: Sweetness level; Reflected microwave frequency; Dielectric properties; Non-contact detection system

Science32-N4.indd 69 24/8/2567 BE 11:26

1. บทนำ

ปัจจุบันคุณภาพของอาหารถูกให้ความสำคัญเพิ่มมากขึ้น การตรวจสอบปริมาณน้ำตาลเป็นวิธีการตรวจสอบคุณภาพอาหารที่สำคัญวิธีหนึ่ง โดยเฉพาะอาหารที่เป็นน้ำหรือของเหลว การตรวจวัดปริมาณน้ำตาลถูกนำมาใช้ตั้งแต่การตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบ เช่น การตรวจสอบน้ำตาลในองุ่น [1] และน้ำส้ม [2] สำหรับผลิตไวน์ ตรวจสอบปริมาณน้ำตาลในผักและผลไม้ [3] ตรวจสอบปริมาณน้ำตาลในน้ำผึ้ง [4] หรือการตรวจสอบปริมาณน้ำตาลเพื่อควบคุมคุณภาพระหว่างกระบวนการผลิต เช่น การตรวจสอบปริมาณน้ำตาลในเครื่องดื่ม [3] การตรวจสอบปริมาณน้ำตาลในน้ำส้มสายชูหมัก [5], [6] การตรวจสอบปริมาณน้ำตาลในระหว่างกระบวนการหมักเพื่อผลิตเบียร์คราฟต์ (Craft beer) [7] การตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น ตรวจสอบปริมาณน้ำตาลของน้ำองุ่น ซึ่งมีผลต่อรสชาติและความชอบของผู้บริโภค [8] และการตรวจสอบการปนเปื้อน เช่น ตรวจสอบการปนเปื้อนของน้ำผึ้ง [9] เห็นได้ว่าการตรวจสอบปริมาณน้ำตาลเป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการผลิตอาหารโดยเฉพาะอาหารประเภทน้ำหรือของเหลว

วิธีการตรวจวัดปริมาณน้ำตาลแบบดั้งเดิมใช้วิธีการทางเคมีซึ่งต้องสัมผัสตัวอย่าง ราคาสูง และใช้เวลานานเนื่องจากต้องเตรียมตัวอย่างก่อนวัด [1] จึงไม่สามารถแสดงผลได้ทันที ทำให้ไม่สามารถตรวจสอบแบบตามเวลาจริง (Real-time) ระหว่างกระบวนการผลิตได้ นักวิจัยจึงให้ความสนใจและเสนอเทคนิควัดปริมาณน้ำตาลที่รวดเร็วและไม่สัมผัส ได้แก่ เทคนิคการวัดปริมาณน้ำตาลด้วยอินฟราเรดสเปกโตสโครปี (Infrared spectroscopy) อาศัยหลักการดูดกลืนคลื่นในช่วงอินฟราเรดที่แตกต่างกันของสารที่มีระดับความหวานแตกต่างกัน [4], [10] วิธีการนี้สามารถวิเคราะห์ได้แม่นยำ แสดงผลได้ทันที ราคาต่ำกว่าเครื่องมือวัดทางเคมี สามารถประยุกต์ใช้ตรวจสอบในระหว่างกระบวนการผลิตได้ [8] แต่การนำไปประยุกต์ใช้งานจริงยังมีข้อจำกัดเนื่องจากต้องวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมาก รวมถึงแสงสว่างจากภายนอกมีผลต่อการวัด ทำให้ผลการวิจัยที่นำเสนอเป็นผลทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ เทคนิคการวัดปริมาณน้ำตาลด้วยไมโครเวฟเป็นอีกเทคนิคที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถวัดได้แบบไม่สัมผัสและแสดงผลได้ทันที [11] แต่ราคาของอุปกรณ์ต่ำกว่าอินฟราเรดสเปกโตสโครปี และไม่มีผลกระทบจากการรบกวนของแสงภายนอก การวัดด้วยไมโครเวฟมีพื้นฐานจากคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายที่แตกต่างกันที่ปริมาณน้ำตาลแต่ละระดับ [12] ส่งผลต่อการสะท้อนและหักเหของไมโครเวฟ การใช้ไมโครเวฟเพื่อตรวจสอบปริมาณน้ำตาล ได้แก่ การวัดปริมาณน้ำตาลจากการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนต์ของเรโซเนเตอร์ [13] และการวัดปริมาณน้ำตาลจากค่าความไวของสายอากาศอาร์เอฟไอดี [14] โครงสร้างของอาร์เอฟไอดีและเรโซเนเตอร์ออกแบบสร้างง่าย และราคาถูก แต่ยังคงต้องใช้เครื่องมือวัดที่ราคาสูง จึงไม่เหมาะกับการประยุกต์ใช้งานจริง อีกรูปแบบหนึ่งของการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟ คือ การใช้สายอากาศตรวจวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของไมโครเวฟ [15] และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยใช้สายอากาศวางด้านบนสารที่ต้องการวัด [16]-[18] ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายที่ปริมาณน้ำตาลแต่ละระดับ วิธีการนี้มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน รวมถึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ด้วยวงจรที่มีต้นทุนต่ำ แต่เทคนิคการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ถูกนำเสนอไว้ยังคงเป็นผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และระบบการตัดสินใจยังมีความแม่นยำต่ำ เทคนิคการใช้เซนเซอร์ย่านความถี่เอ็กซ์เพื่อตรวจวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Soluble solid content: SSC) ของสารละลายน้ำตาลแบบไม่สัมผัส โดยใช้วงจรเปรียบเทียบอัตราขยายและค่าความต่างเฟสของคลื่นความถี่ 2 คู่ ซึ่งส่งผ่านสารละลายตัวอย่างต้องการวัด ได้แก่ 10.2 กิกะเฮิรตซ์ จับคู่กับ 10.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 10.2 กิกะเฮิรตซ์ จับคู่กับ 10.6 กิกะเฮิรตซ์ [19] เทคนิคนี้ให้ผลการวัดที่แม่นยำ อย่างไรก็ตามระบบที่นำเสนอยังคงมีความ

Science32-N4.indd 70 24/8/2567 BE 11:26

ซับซ้อน เนื่องจากใช้วงเปรียบเทียบอัตราขยายและค่าความต่างเฟสถึง 3 วงจร ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคนิคดังกล่าวโดยลดความซับซ้อนลงจึงเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจ

บทความนี้จึงเสนอการตรวจวัดระดับความหวานในสารละลายน้ำเชื่อมด้วยหลักการสะท้อนของไมโครเวฟและประมวลผลด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network: ANNs) ซึ่งเป็นรูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในระบบตรวจวัดด้วยไมโครเวฟอย่างแพร่หลาย [20] เนื่องจากเหมาะกับการวิเคราะห์ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น [21] มีหลายอินพุต และมีความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตที่ซับซ้อน [22] การตรวจวัดระดับความหวานใช้การเปรียบเทียบอัตราส่วนของกำลังงานคลื่นสะท้อนกลับจากสารละลายน้ำเชื่อมที่ 4 คู่ความถี่ โดยใช้วงจรเปรียบเทียบอัตราขยายและค่าความต่างเฟส 1 วงจร ส่วนที่ 2 นำเสนอทฤษฎีความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนของไมโครเวฟและค่าสภาพยอมไฟฟ้าของวัสดุ ส่วนที่ 3 นำเสนอการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายน้ำเชื่อมที่แต่ละระดับความหวานด้วยโพรบโคแอกเชียลในช่วงความถี่ 1.5 ถึง 3 กิกะเฮิรตซ์ และการคำนวณเพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการใช้แรงดันเอาต์พุตของอุปกรณ์เปรียบเทียบอัตราส่วนกำลังงาน AD8302 (V_{MAG}) จากคลื่นสะท้อนที่ความถี่ 2.1, 2.3, 2.5 และ 2.7 กิกะเฮิรตซ์ เพื่อแบ่งระดับความหวาน และนำเสนอโครงสร้างของระบบการวัด ส่วนที่ 4 นำเสนอระบบการวัดต้นแบบที่ถูกพัฒนาและนำไปวัดอัตราส่วนของกำลังงานสะท้อนที่ความถี่ 2.1, 2.3, 2.5 และ 2.7 กิกะเฮิรตซ์ ที่แต่ละระดับความหวาน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับนำไปพัฒนาลงบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และในส่วนที่ 5 ส่วนสุดท้ายเป็นการสรุปผล

2. คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ

วัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เรียกว่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถนำมาใช้จำแนกความแตกต่างของวัสดุได้ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นค่าที่แปรผันตามความถี่ อุณหภูมิ การจัดเรียงตัวของขั้วประจุส่วนผสม ความดัน และโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกประกอบด้วยค่าสภาพยอมไฟฟ้า และความซึมซาบแม่เหล็ก ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความแตกต่างของวัสดุแต่ละชนิด ที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ในวัสดุที่ไม่ใช่ตัวนำหรือสารแม่เหล็กค่าความซึมซาบแม่เหล็กมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถพิจารณาเฉพาะค่าสภาพยอมไฟฟ้าซึ่งต่างกันในวัสดุแต่ละชนิด ค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน ε^* มีค่าดังสมการที่ (1) [23]

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{1}$$

ส่วนจริง คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) เป็นปริมาณที่แสดงถึงความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานสนามไฟฟ้า และส่วนจินตภาพ คือ ตัวประกอบสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) เป็นปริมาณที่แสดงถึงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงพลังงานสนามไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกในรูปแบบฟังก์ชันของความถี่เป็นสมการของเดอบาย (Debye equation) ดังสมการที่ (2)-(3) ตามลำดับ

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1+\omega^2\tau^2} \tag{2}$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1+\omega^2\tau^2} \tag{3}$$

โดย ε_∞ คือ ขอบเขตของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูง ε_s คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิต τ คือ เวลาผ่อนคลาย (Relax time) และ ω คือ ความถี่เชิงมุม [24] เนื่องจากค่าสภาพยอมไฟฟ้าของวัสดุเป็นปริมาณที่มีค่าน้อยมาก จึงนิยมใช้ในรูปแบบของค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ ε_r ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนเมื่อเทียบกับค่าสภาพยอมไฟฟ้าของสุญญากาศ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุส่งผลต่อการสะท้อนของไมโครเวฟ โดยเมื่อไมโครเวฟแพร่จากตัวกลางอากาศตกกระทบตั้งฉากรอยต่อระหว่าง

Science32-N4.indd 71 24/8/2567 BE 11:26

ตัวกลางที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของคลื่นตกกระทบ E_0 และคลื่นสะท้อน E_r สัมพันธ์กับคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวกลางที่ 2 ดังสมการที่ (4) [25]

$$E_r = E_0\left(\frac{1-\sqrt{\varepsilon_r'}}{1+\sqrt{\varepsilon_r'}}\right) \quad (4)$$

โดยเทอมในวงเล็บของสมการที่ (4) คือ ขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนในกรณีที่คลื่นตกกระทบรอยต่อของตัวกลางแบบตั้งฉาก สำหรับกรณีที่คลื่นตกกระทบทำมุม θ กับเส้นตั้งฉากที่รอยต่อตัวกลางสัมประสิทธิ์การสะท้อนลดลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงขนาดของคลื่นสะท้อนต่อคุณสมบัติไดอิเล็กตริกยังคงเป็นไปในทิศทางเดียวกับการตกกระทบแบบตั้งฉาก สารละลายที่มีระดับความหวาน (Soluble solid content: SSC) แต่ละระดับมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกแตกต่างกัน [26] ดังนั้นขนาดของคลื่นสะท้อนจึงสามารถนำมาบ่งชี้ระดับความหวานของสารละลายที่เกิดจากการสะท้อนของไมโครเวฟ

3.อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 การตรวจวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำเชื่อม

คลื่นเมื่อเดินทางผ่านวัสดุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกต่างกัน วัสดุแต่ละชนิดส่งผลต่อกำลังงานการส่งผ่านและกำลังงานการสะท้อน ดังนั้นการตรวจวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำเชื่อม เพื่อวิเคราะห์ความต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกจึงเป็นสิ่งสำคัญ น้ำเชื่อมตัวอย่างจากตลาดท้องถิ่นที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์แบบถุงถูกใช้เป็นตัวอย่างในการทดสอบ น้ำเชื่อมและน้ำสะอาดได้รับการผสมตามอัตราส่วนและได้รับการควบคุมให้มีปริมาตร 500 มิลลิลิตร ระดับความหวานได้รับการตรวจวัดด้วยบริกซ์รีแฟลกโตมิเตอร์ (Brix Refractometer) รุ่น YO-G339K การปรับทำทั้งหมด 7 ระดับ ในช่วง 3, 8 ถึง 25 %Brix ตามลำดับ การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำเชื่อมประยุกต์ใช้โคแอกเชียลโพรบไดอิเล็กตริกแบบสมส่วน (Open-ended dielectric coaxial-line slim probe) ของบริษัท Keysight รุ่น N1501A ข้อมูลการวัดได้รับการประมวลผลด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Vector network analyzer) รุ่น Fieldfox N9915A ของบริษัท Agilent technology การเชื่อมต่อของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายกับคอมพิวเตอร์ใช้ผ่านสายแลนและควบคุมการสื่อสารข้อมูลด้วยโปรแกรม Keysight Connection Export 2020 (KCE) ข้อมูลการวัดได้รับการประมวลผลด้วยโปรแกรม Keysight Materials Measurement Suit 2018 (KMMS) ตั้งค่าเริ่มต้นด้วยการกำหนดชนิดโพรบไดอิเล็กตริก ช่วงความถี่ใช้งาน จากนั้นปรับเทียบ (Calibration) 3 ขั้นตอน 1) การวัดแบบเปิดวงจรด้วยอากาศ 2) การวัดแบบลัดวงจรด้วยบล็อคลัดวงจร (Short block) และ 3) การวัดโหลดด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Figure 1)

น้ำเชื่อมตัวอย่างที่ได้รับการบรรจุอยู่ในบีกเกอร์มาตรฐานขนาด 500 มิลลิลิตร และมีทั้งหมด7 ตัวอย่างที่ความหวาน ตั้งแต่ 3, 8 และ 25 %Brix ตามลำดับ โพรบแบบสลิมที่ใช้ในการตรวจวัดต้องจุ่มลึกลงในน้ำเชื่อมไม่น้อยกว่า 5 มิลลิเมตร ตรวจวัดในช่วงความถี่กว้างตั้งแต่ 1.5 ถึง 3 กิกะเฮิรตซ์ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกจากการตรวจวัดประกอบด้วย ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ε_r') และค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก (ε_r'') ค่า ε_r' ของน้ำเชื่อมที่ 3 %Brix อยู่ในช่วง 73.69 ถึง 75.39 และที่ระดับความหวาน 8 13 ถึง 25 %Brix ให้ค่า ε_r' ลดลงอยู่ในช่วง 72.01 ถึง 73.91, 69.93 ถึง 73.13, และ 61.83 ถึง 67.08, ตามลำดับ ซึ่งสามารถสังเกตได้ คือ เมื่อความถี่สูงขึ้นส่งผลให้ ε_r' มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง (Figure 2a) ต่อมา คือ ค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก ε_r'' ของน้ำเชื่อมที่ความหวาน 3 %Brix มีค่าอยู่ในช่วง 6.29 ถึง 11.79 และเมื่อความหวานเพิ่มขึ้นเป็น 8 13 ถึง 25 %Brix ให้ค่า ε_r'' อยู่ในช่วง 7.21 ถึง 12.77, 8.45 ถึง 14.25 และ 11.2 ถึง 16.63 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นส่งผลให้ค่า ε_r'' มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Figure 2b)

Science32-N4.indd 72 24/8/2567 BE 11:26

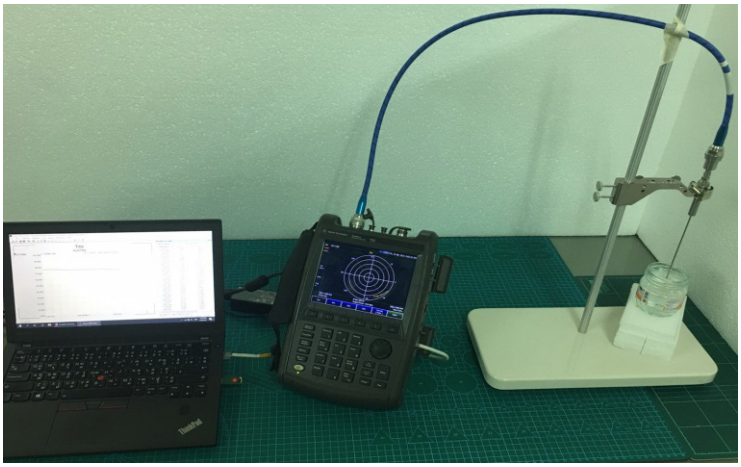
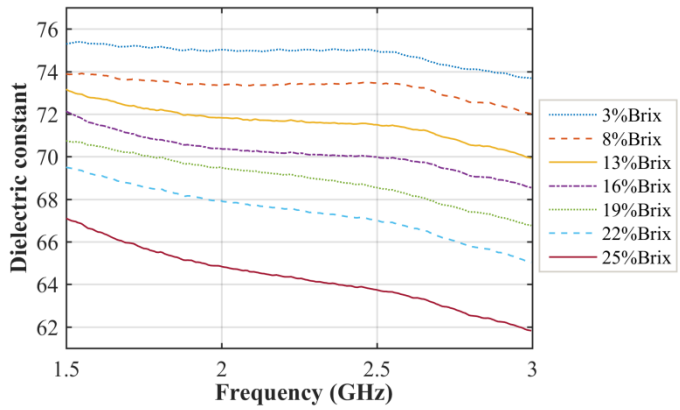
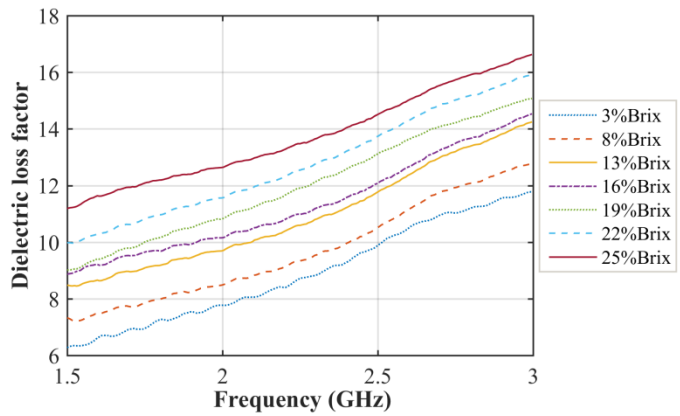


Figure 1 Dielectric property measurement of syrup setup



(a)



(b)

Figure 2 (a) Dielectric constant and (b) dielectric loss factor of syrup solution

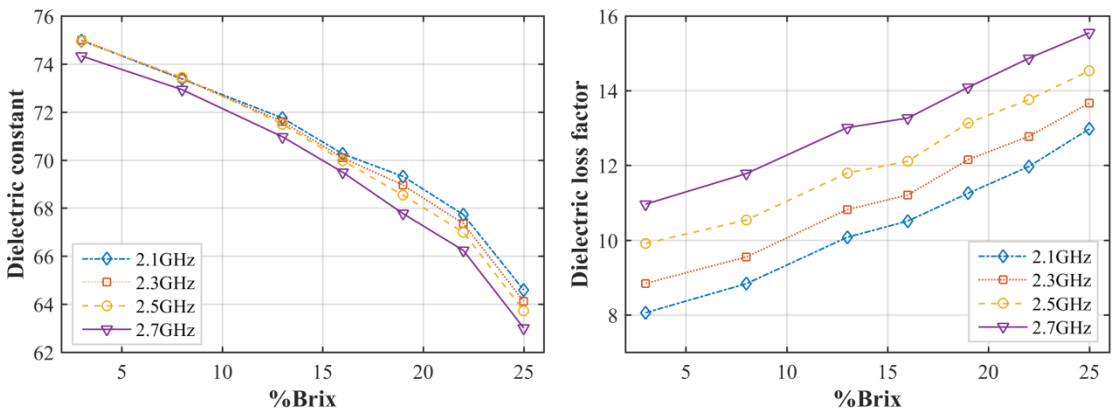
Science32-N4.indd 73 24/8/2567 BE 11:26

แสดงให้เห็นว่าความหวานมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ ε_r' และ ε_r'' เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 2.1, 2.3, 2.5 และ 2.7 กิกะเฮิรตซ์ ความหวานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า ε_r' ลดลง ในทางกลับกันค่า ε_r'' มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในช่วงความหวานตั้งแต่ 3 ถึง 16 %Brix ของความถี่ 2.1 2.3 และ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ค่า ε_r' เปลี่ยนแปลงลดลงในลักษณะเช่นเดียวกันอยู่ในช่วง 74.97 ถึง 70.25, 75 ถึง 70.09 และ 74.95 ถึง 69.97 ตามลำดับ เมื่อความหวานเพิ่มขึ้นที่ 19 ถึง 25 %Brix ค่า ε_r' ลดลงคล้ายกันอยู่ในช่วง 69.32 ถึง 64.59, 68.96 ถึง 64.13 และ 68.54 ถึง 63.73 ตามลำดับ ที่ความถี่ 2.7 กิกะเฮิรตซ์ ให้ค่า ε_r' ต่ำกว่าความถี่ก่อนหน้าและลดลงเมื่อความหวานเพิ่มขึ้น (Figure 3a) สำหรับค่า ε_r'' ที่ความถี่ 2.1 ถึง 2.7 กิกะเฮิรตซ์ ที่ระดับความหวาน 3 %Brix ให้ค่า ε_r'' อยู่ในช่วง 8.06 ถึง 10.96 เมื่อความหวานเพิ่มขึ้นเป็น 8%Brix ค่า ε_r'' อยู่ในช่วง 8.84 ถึง 11.78 สังเกตได้ว่าค่า ε_r'' ในแต่ละความถี่มีระดับต่างกัน และตอบสนองต่อความหวานด้วยการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในลักษณะเชิงเส้น สำหรับที่ความหวานสูงสุด 25 %Brix ค่า ε_r'' อยู่ที่ 12.98 ถึง 15.55 (Figure 3b)

ค่า ε_r' ของน้ำเชื่อมจากการตรวจวัดในแต่ละความถี่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการแยกระดับความหวานจากการใช้ค่าอัตราส่วนอัตราขยาย (V_{MAG}) ซึ่งค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังงานของคลื่นสะท้อนต่อกำลังงานของคลื่นความถี่ท้องถิ่นภายในระบบ เพื่อแบ่งระดับความหวาน วิเคราะห์ระดับของ V_{MAG} ในช่วงคลื่นความถี่ 2.1, 2.3, 2.5 และ 2.7 กิกะเฮิรตซ์ คำนวณได้จากสมการของเปรียบเทียบอัตราขยายและค่าความต่างเฟส AD8302 (Gain and phase detector) ดังสมการที่ (5) [27]

$$V_{MAG} = 0.03 \times [20\log(V_{INA} / V_{INB})] + 0.9 \quad (5)$$

โดย V_{INA} และ V_{INB} คือ แรงดันที่พอร์ตอินพุต A และ B ของ AD8302 ตามลำดับ เงื่อนไขการคำนวณกำหนดให้ V_{INA} คือ ขนาดของคลื่นความถี่ท้องถิ่น V_{LO} และ V_{INB} คือ ขนาดของคลื่นสะท้อน E_r ตามสมการที่ (4) ซึ่งสะท้อนจากสารละลายน้ำเชื่อม และมีค่าสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ดังนั้นอินพุตทั้ง 2 มีค่าดังสมการที่ (6)



(a) (b)

Figure 3 (a) Dielectric constant and (b) dielectric loss factor of syrup solution at 2.1 to 2.7 GHz

Science32-N4.indd 74 24/8/2567 BE 11:26

$$V_{INA} = V_{LO} \text{ และ } V_{INB} = E_r = E_0 \frac{1-\sqrt{\varepsilon_r'}}{1+\sqrt{\varepsilon_r'}} \quad (6)$$

เมื่อแทนค่าอินพุตจากสมการที่ (6) ลงในสมการที่ (5) เพื่อคำนวณค่า V_{MAG} จึงได้ดังสมการที่ (7)

$$V_{MAG} = 0.03 \times \left[20\log\left(\frac{V_{LO}}{E_0} \cdot \frac{1+\sqrt{\varepsilon_r'}}{1-\sqrt{\varepsilon_r'}} \right) \right] + 0.9 \quad (7)$$

ค่า V_{MAG} ซึ่งได้รับการเปรียบเทียบกับระดับความหวานเพื่อวิเคราะห์ความแตกต่าง สังเกตที่ 3 %Brix ความถี่ 2.1, 2.3, 2.5 และ 2.7 กิกะเฮิรตซ์ ให้ค่าระดับ V_{MAG} อยู่ที่ 0.988, 1.036 ถึง 1.120 และที่ระดับ 8 %Brix ให้ค่าระดับ V_{MAG} อยู่ที่ 0.989, 1.037 ถึง 1.120 เมื่อความหวานเพิ่มขึ้นเป็น 13, 16 ถึง 22 %Brix ระดับของ V_{MAG} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในลักษณะคล้ายกัน และที่ระดับความหวานสุดท้าย 25 %Brix ให้ค่าระดับ V_{MAG} อยู่ที่ 0.993, 1.041 ถึง 1.125 ดังแสดงใน Table 1 ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างค่าอัตราส่วนอัตราขยาย (V_{MAG}) ต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในน้ำเชื่อมในแต่ละระดับความหวาน แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ค่า V_{MAG} ในช่วงความถี่ไมโครเวฟในการแยกระดับความหวานของน้ำเชื่อม นอกจากนี้เพื่อให้การแยกระดับความหวานทำได้ชัดเจนการประยุกต์ใช้หลายคลื่นความถี่ในการตรวจสอบความหวานของน้ำเชื่อมจึงเป็นเรื่องที่ได้รับความสนใจ

3.2 ระบบที่นำเสนอ

ระบบตรวจวัดใช้การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนอัตราขยาย (V_{MAG}) จากกำลังงานสะท้อนที่ได้จากวัสดุทดสอบด้วย 4 คลื่นความถี่เทียบกับความถี่ท้องถิ่นระบบตรวจวัดความหวานแบ่งออกเป็นภาคส่งและภาครับที่ได้รับการควบคุมจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino Nano) อุปกรณ์ในส่วนของภาคส่งประกอบด้วย อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Complex programmable logic device: CPLD) แหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูง (Frequency synthesizer) วงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ (Low noise amplifier: LNA) และสายอากาศส่งยากิแพทช์ (Yagi patch antenna) อุปกรณ์ของภาครับแบ่งออกเป็น สายอากาศรับยากิแพทช์ แหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูง (Local frequency) อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ วงจรเปรียบเทียบอัตราขยายและค่าความต่างเฟส วงจรแปลงอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล 16 บิต บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และหน้าจอแสดงผลโอ

Table 1 Calculated V_{MAG}

%Brix	2.1 GHz		2.3 GHz		2.5 GHz		2.7 GHz	
	ε_r'	V_{MAG1}	ε_r'	V_{MAG2}	ε_r'	V_{MAG3}	ε_r'	V_{MAG4}
3	74.97	0.988	75.00	1.036	74.95	1.079	74.33	1.120
8	73.38	0.989	73.39	1.037	73.45	1.080	72.93	1.120
13	71.75	0.990	71.60	1.037	71.49	1.081	70.97	1.121
16	70.25	0.990	70.09	1.038	69.97	1.081	69.49	1.122
19	69.32	0.991	68.96	1.038	68.54	1.082	67.77	1.123
22	67.73	0.992	67.36	1.039	67.00	1.083	66.24	1.123
25	64.59	0.993	64.13	1.041	63.73	1.085	63.01	1.125

Science32-N4.indd 75 24/8/2567 BE 11:26

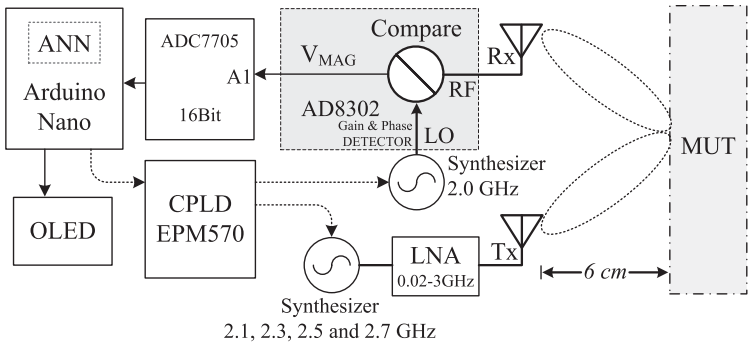


Figure 4 Schematic of sweetness level determination system

แอลอีดี (OLED) ตามลำดับ (Figure 4)

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่กระตุ้นการทำงานของอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ให้ควบคุมแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูงให้สร้างกำลังงานความถี่ของภาคส่งและภาครับพร้อมกัน เพื่อให้การเปรียบเทียบอัตราขยายได้อย่างแม่นยำ อุปกรณ์สร้างกำลังงานความถี่ของภาคส่งผลิตกำลังงานความถี่ 2.1, 2.3, 2.5 และ 2.7 กิกะเฮิรตซ์ พร้อมกับภาครับที่ผลิตกำลังงานความถี่ 2.0 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานความถี่ของภาคส่งได้รับการเพิ่มอัตราขยายและส่งออกไปยังสายอากาศยากิแพทช์ของภาคส่ง กำลังงานความถี่แพร่กระจายไปตกกระทบทำมุม θ_i กับน้ำเชื่อมตัวอย่าง เพื่อให้เกิดคลื่นสะท้อนส่งไปยังสายอากาศรับซึ่งวางอยู่ด้านข้างได้มากกว่าการตกกระทบแบบตั้งฉาก สายอากาศรับยากิแพทช์ของภาครับทำหน้าที่ตรวจจับกำลังงานการสะท้อนและนำมาเปรียบเทียบกับความถี่ท้องถิ่นของภาครับ เพื่อหาอัตราส่วนอัตราขยาย ประกอบด้วย 4 คู่ความถี่ คือ 2.0 กับ 2.1 กิกะเฮิรตซ์ (V_{MAG1}) 2.0 กับ 2.3 กิกะเฮิรตซ์ (V_{MAG2}) 2.0 กับ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ (V_{MAG3}) และ 2.0 กับ 2.7 กิกะเฮิรตซ์ (V_{MAG4}) ตามลำดับ ค่าอัตราขยายที่ได้รับอยู่ในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาดิจิทัลและได้รับการประมวลผลด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีโครงข่ายประสาทเทียมฝังอยู่ภายในเพื่อใช้ในการตัดสินใจ สุดท้ายแสดงผลด้วยหน้าจอโอแอลอีดี

4. ผลการวิจัย

4.1 การพัฒนาระบบตรวจวัดน้ำเชื่อม

ระบบที่นำเสนอได้รับการพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดระดับความหวานของน้ำเชื่อม ฮาร์ดแวร์ของระบบประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์อาดุยโนรุ่น Nano V 3.0 รุ่น ATMEGA328P ใช้สัญญาณควบคุมด้วยแรงดัน 3 โวลต์ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จึงใช้โมดูลแปลงสัญญาณไฟฟ้าจาก 5 เป็น 3 โวลต์ รุ่น ET-MINI LOGIC LEVEL SHIFTER เป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อเพื่อควบคุมอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ 2 บอร์ด ให้ทำงานพร้อมกัน บอร์ด CPLD EPM570T100C5 มีลอจิกภายใน 570 เอลิเมนต์ (Element) ข้อมูลที่ใช้ในการควบคุมแหล่งกำเนิดความถี่ประกอบด้วย CLK DATA LE และ CE ข้อมูลทั้งหมด 4 ชุดถูกส่งไปยังแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูงที่ปรับความถี่ได้รุ่น ADF4351 ของบริษัท Analog Devices สร้างความถี่ได้ในช่วง 0.035 ถึง 4.4 กิกะเฮิรตซ์ ให้กำลังงาน -4 ถึง +5 เดซิเบลมิลลิวัตต์ (dBm) บอร์ด ADF4351 (A, B) ได้รับการนำมาใช้ทั้งหมด 2 บอร์ด และได้รับการควบคุมให้ผลิตความถี่พร้อมกัน บอร์ด A ถูกติดตั้งอยู่ในส่วนของภาคส่งทำหน้าที่สร้างความถี่ 2.1, 2.3, 2.5 และ 2.7 กิกะเฮิรตซ์ ที่กำลังงาน 0 เดซิเบลมิลลิวัตต์ กำลังงานความถี่ถูกส่งเข้าด้านขาอินพุตของวงจรขยายที่มีสัญญาณรบกวนต่ำรุ่น TQP3M9028 ขยายสัญญาณได้ในช่วง 0.002 ถึง 3 กิกะ

Science32-N4.indd 76 24/8/2567 BE 11:26

เฮิรตซ์ ให้กำลังงานเอาต์พุตสูงสุดอยู่ในช่วง 13 ถึง 15 เดซิเบลมิลลิวัตต์ กำลังงานถูกส่งต่อไปยังสายอากาศส่งยากิแพทช์ที่สามารถทำงานได้ดีและให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 2.0 ถึง 4.0 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานถูกส่งออกไปยังน้ำเชื่อมซึ่งบรรจุในภาชนะบรรจุตัวอย่างสำหรับทดสอบ โดยระดับของน้ำเชื่อมสูงกว่าความสูงของสายอากาศ และวางอยู่ด้านหน้า เกิดเป็นคลื่นสะท้อนกลับมายังสายอากาศรับยากิแพทช์ ดังนั้นน้ำเชื่อมทดสอบจึงไม่สัมผัสกับสายอากาศ คุณลักษณะของสายอากาศส่งและรับเป็นแบบเดียวกัน กำลังงานที่ได้รับการตรวจจับด้วยสายอากาศรับถูกส่งเข้าวงจรเปรียบเทียบอัตราขยายและค่าความต่างเฟสของบริษัท Analog devices รุ่น AD8302 ทำงานได้ในช่วง 0 ถึง 2.7 กิกะเฮิรตซ์ ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0 ถึง 1.6 โวลต์ อัตราส่วนอัตราขยายในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล 16 บิต ด้วยอุปกรณ์ของบริษัท Analog devices รุ่น AD7705 ที่สามารถรับอินพุตได้ในช่วง 0 ถึง 5 โวลต์ เอาต์พุตถูกส่งต่อเข้าบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino Nano V 3.0 รุ่น ATMEGA328P และได้รับการประมวลผลด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ระดับความหวาน (%Brix) จากการตัดสินใจได้รับการแสดงบนหน้าจอโอแอลอีดีขนาด 0.96 นิ้ว โครงสร้างระบบ (Figure 5)

ระบบเซนเซอร์ที่พัฒนาได้รับการนำไปทดสอบในการตรวจวัดความหวานของน้ำเชื่อม 10 ระดับ ตั้งแต่ 3%Brix ถึง 30%Brix ซึ่งเป็นระดับความหวานที่กว้างกว่าการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบ เนื่องจากการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นการทดสอบเบื้องต้นเพื่อแสดงถึงความเป็นไปได้ในการแยกความหวานแต่ละระดับจากคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ค่า V_{MAG1} V_{MAG2} V_{MAG3} และ V_{MAG4} ที่ได้จากการวัดของระบบต้นแบบ ถูกนำมาวิเคราะห์เทียบกับความหวานของน้ำเชื่อมในแต่ละ %Brix ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด ถูกใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการตัดสินใจในการแบ่งระดับความหวานของน้ำเชื่อม

4.2 ผลการวัด

ระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นถูกนำมาทดสอบ การตรวจวัดน้ำเชื่อม 10 ตัวอย่าง ซึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะบรรจุน้ำเชื่อมและวางไว้ด้านหน้าสายอากาศ กำหนดให้ความสูงของน้ำผึ้งและระยะห่างระหว่างภาชนะบรรจุน้ำเชื่อมกับสายอากาศคงที่สำหรับการวัดทุกตัวอย่าง โดยระบบทำการวัดน้ำเชื่อมในช่วงความถี่ 2.1, 2.3, 2.5 และ 2.7 กิกะเฮิรตซ์ ตัวอย่างละ 10 ครั้ง การวัดแต่ละครั้งใช้เวลาในการวัดน้อยกว่า 3 วินาที สังเกตที่ระดับความหวาน

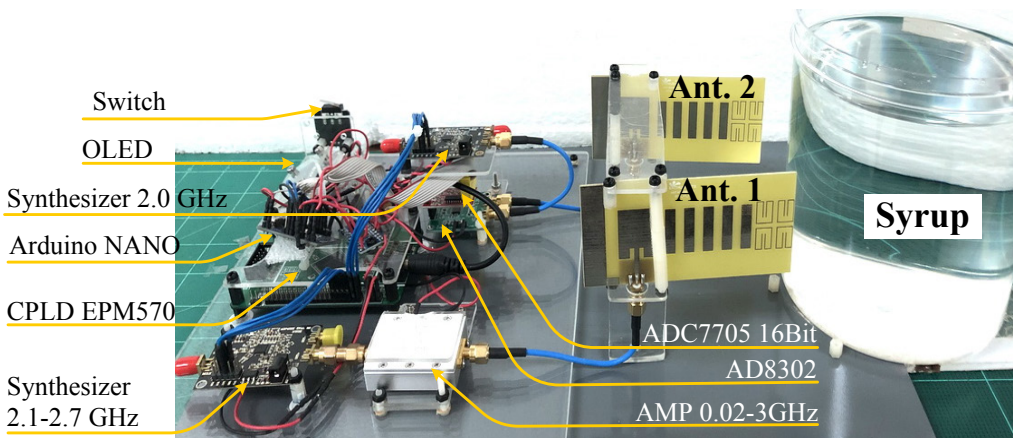


Figure 5 Fabricated sweetness level determination system prototype

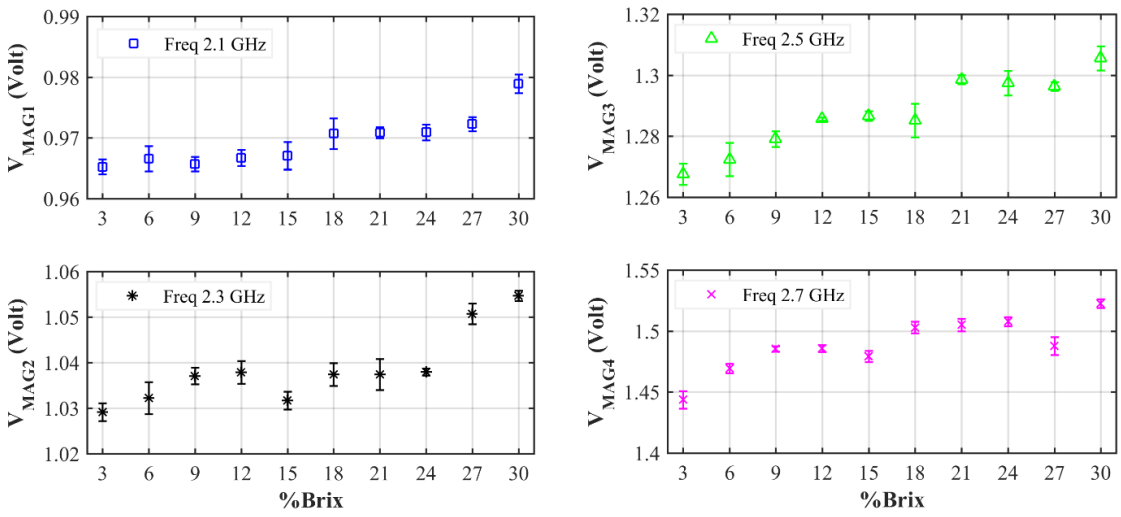
Science32-N4.indd 77 24/8/2567 BE 11:26

3 %Brix อัตราส่วนอัตราขยายระหว่างความถี่ 2.0 และ 2.1 กิกะเฮิรตซ์ อยู่ที่ 0.965 โวลต์ เมื่อความหวานเพิ่มขึ้นเป็น 6 %Brix ระดับแรงดันอยู่ที่ 0.967 โวลต์ เมื่อระดับความหวานเพิ่มขึ้นเป็น 9 12 15 ถึง 30 %Brix ระดับแรงดันของอัตราขยายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.966 ถึง 0.979 โวลต์ และระดับแรงดันของอัตราขยายระหว่างความถี่ 2.0 และ 2.3 กิกะเฮิรตซ์ ที่ได้จากการตรวจวัดน้ำเชื่อมที่ 3 %Brix แรงดันที่ได้รับอยู่ที่ 1.029 โวลต์ และเมื่อ %Brix เพิ่มขึ้นเป็น 6 9 ถึง 30 %Brix ให้ระดับแรงดันอยู่ในช่วง 1.032 1.037 ถึง 1.055 โวลต์ และที่อัตราขยายระหว่างความถี่ 2.0 และ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ให้แรงดันของอัตราขยายที่ระดับความหวาน 3 %Brix ถึง 30 %Brix อยู่ในช่วง 1.268 ถึง 1.306 โวลต์ อัตราขยายสุดท้าย คือ ระหว่างความถี่ 2.0 และ 2.7 กิกะเฮิรตซ์ ที่ระดับความหวาน 3 %Brix ถึง 30 %Brix ให้แรงดันอยู่ในช่วง 1.444 ถึง 1.523 โวลต์ ดังแสดงใน Figure 6

ความหวานมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนอัตราขยาย สังเกตได้ว่าเมื่อระดับความหวานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงดันของค่า V_{MAG} เพิ่มขึ้นในลักษณะเดียวกันในแต่ละคู่ความถี่ ประกอบด้วย 2.0 ต่อ 2.1 กิกะเฮิรตซ์ 2.0 ต่อ 2.3 กิกะเฮิรตซ์ 2.0 ต่อ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ และ 2.0 ต่อ 2.7 กิกะเฮิรตซ์ จากการตอบสนองของค่า V_{MAG} ต่อการเปลี่ยนระดับความหวาน แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการทำงานของระบบในการตรวจสอบความหวานจากค่า V_{MAG} ของ 4 คู่ความถี่

4.3 โครงข่ายประสาทเทียม

เพื่อเพิ่มความสามารถของระบบในการตัดสินใจ โครงข่ายประสาทเทียมจึงได้รับการประยุกต์ใช้ ข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม คือ อัตราขยายของ 4 คู่ความถี่ ระดับแรงดัน V_{MAG} จากการวัด 10 ครั้ง ที่แต่ละระดับความหวานได้รับการเฉลี่ย และนำมาใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแสดงดัง Table 2



(a) (b)

Figure 6 Relationship of ratio gain and sweetness level (a) V_{MAG1} and V_{MAG2} (b) V_{MAG3} and V_{MAG4}

Science32-N4.indd 78 24/8/2567 BE 11:26

Table 2 Data for artificial neural network training

Ratio gain (V)	SSC(%Brix)									
	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
V_{MAG1}	0.965	0.967	0.966	0.967	0.967	0.971	0.971	0.971	0.972	0.979
V_{MAG2}	1.029	1.032	1.037	1.038	1.032	1.037	1.037	1.038	1.051	1.055
V_{MAG3}	1.268	1.272	1.279	1.286	1.287	1.285	1.299	1.297	1.296	1.306
V_{MAG4}	1.444	1.469	1.485	1.486	1.479	1.503	1.505	1.508	1.488	1.523

คู่ความถี่ที่มีค่าความถี่ต่างกันมาก ให้ค่าความแตกต่างของแรงดันที่แต่ละระดับความหวานมากกว่าคู่ความถี่ที่ค่าความถี่ต่างกันน้อย ดังนั้นข้อมูลระดับแรงดัน V_{MAG4} ที่เป็นคู่ความถี่ 2.0 และ 2.7 กิกะเฮิรตซ์ จึงให้ค่าความไว (Sensitivity) เฉลี่ยสูงที่สุดอยู่ที่ 14 มิลลิโวลต์ต่อ 3%Brix อย่างไรก็ตามระดับแรงดัน V_{MAG} ทั้ง 4 ค่า มีแนวโน้มการตอบสนองต่อความหวานได้ดี การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมใช้อินพุตทั้งหมด 4 ข้อมูล ประกอบด้วย V_{MAG1} V_{MAG2} V_{MAG3} และ V_{MAG4} ตามลำดับ เพื่อให้การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยโนดซ่อนเร้นได้รับการปรับตั้งแต่ 6, 8 และ 10 โนด ใช้เอาต์พุตทั้งหมด 4 โนด เพื่อเป็นตัวแทนของระดับความหวาน ทั้งหมด 10 ระดับ โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแสดงดังใน Figure 7

การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมได้ปรับอัตราการเรียนรู้ได้รับการปรับทั้งหมด 6 ระดับ ตั้งแต่ 0.005, 0.01 ถึง 0.3 และปรับจำนวนโนดซ่อนเร้นตั้งแต่ 6 ถึง 10 โนด เพื่อให้ได้ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ที่เหมาะสม หยุดฝึกสอนเมื่อค่าอัตราความผิดพลาด (MES) น้อยกว่า 10^{-3} หรือจำนวนรอบการวนซ้ำ (Epoch) มากกว่า 600 รอบ ใช้จำนวนอินพุต 4 โนด ประกอบด้วย V_{MAG1} V_{MAG2} V_{MAG3} และ V_{MAG4} จำนวนโนดซ่อนเร้น 6 โนด และเอาต์พุต 4 โนด อัตราการเรียนรู้เริ่มต้นที่ 0.005 การเรียนรู้ทำได้ไม่ดีเนื่องจากโนดซ่อนเร้นที่ใช้ในการเรียนรู้ไม่เพียงพอ รวมถึงอัตราการเรียนรู้มีความละเอียดเกินความจำเป็นจึงทำให้การปรับค่าถ่วงน้ำหนักทำได้ช้าส่งผลให้ความแม่นยำอยู่ที่ 73.3% เมื่ออัตราการเรียนรู้เพิ่มขึ้นเป็น 0.01 การเรียนรู้สามารถทำได้เร็วขึ้นส่งผลให้ความแม่นยำเพิ่มขึ้นเป็น 76.5% และเมื่ออัตราการเรียนรู้ตั้งแต่ 0.05, 0.1 ถึง 0.2 ความแม่นยำเพิ่มขึ้นต่อเนื่องตั้งแต่ 78.1% 80.5% ถึง 82.2% ตามลำดับ และที่อัตราการเรียนรู้ 0.3 ความแม่นยำลดลงอยู่ที่ 74.6% เนื่องจากอัตราการเรียนรู้กว้างเกินไปส่งผลให้ความสามารถในการเรียนรู้ลดลง ต่อมาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมใช้โนดซ่อนเร้น 8 โนด ที่อัตราการเรียนรู้ตั้งแต่ 0.005, 0.01 ถึง 0.2 ให้ความแม่นยำเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ 70.4% 76.8% ถึง 92.4% ตามลำดับ และความแม่นยำลดลงอยู่ที่ 86.6% ที่อัตราการเรียนรู้ 0.3 เนื่องจากอัตราการเรียนรู้กว้างเกินการเรียนรู้แต่ยังคงได้รับการชดเชยจากโนดซ่อนเร้นที่เพิ่มขึ้น โครงสร้างสุดท้าย คือ การใช้ 10 โนดซ่อนเร้น ที่อัตราการเรียนรู้ 0.005 ให้ความแม่นยำต่ำสุดอยู่ที่ 68.6% เนื่องจากการเรียนรู้แบบละเอียดและจำนวนโนดซ่อนเร้นที่เกินความจำเป็นการเรียนรู้จึงทำได้ยาก เมื่ออัตราการเรียนรู้เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.01, 0.05 ถึง 0.2 ให้เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำอยู่ในช่วง 74.9% 79.7% ถึง 89.4% และที่อัตราการเรียนรู้ 0.3 ความสามารถในการเรียนรู้ลดลงเล็กน้อยอยู่ที่ 87.8% ดังแสดงใน Table 3

Science32-N4.indd 79 24/8/2567 BE 11:26

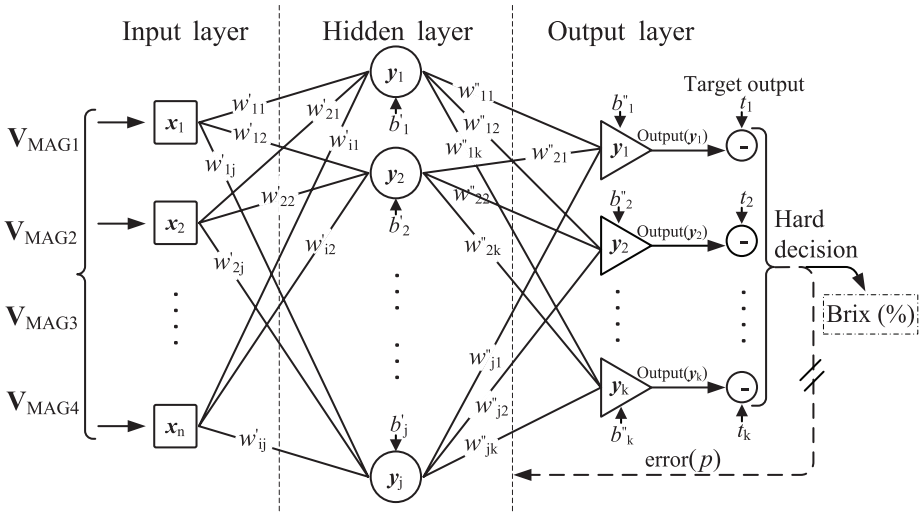


Figure 7 Structure of artificial neural network

Table 3 Artificial neural network training and testing

Input nodes	Epoch	Hidden nodes	Learning rates					
			0.005	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3
V_{MAG1}, V_{MAG2}, V_{MAG3}, V_{MAG4}	600	6	73.3%	76.5%	78.1%	80.5%	82.2%	74.6%
		8	70.4%	76.8%	81.1%	88.2%	92.4%	86.6%
		10	68.6%	74.9%	79.7%	86.3%	89.4%	87.8%

การฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมด้วยโครงสร้างที่ใช้ 6 โนดซ่อนเร้น การเรียนรู้และตัดสินใจสามารถแก้ปัญหาที่ซับซ้อนได้ดีที่สุดเพียง 82.2% และที่ให้เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำเพิ่มขึ้นต่อมา คือ 92.4% ที่ 8 โนดซ่อนเร้น เมื่อใช้ 10 โนดซ่อนเร้นในการฝึกสอน ให้เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำลดลงอยู่ที่ 89.4% เนื่องจากการฝึกสอนได้รับการควบคุมที่ 600 รอบการวนซ้ำ ส่งผลให้การปรับค่าถ่วงน้ำหนักช้า ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง ดังนั้นโครงสร้างที่เหมาะสมจึงอยู่ที่การใช้ 4 อินพุต ที่ประกอบด้วย V_{MAG1} V_{MAG2} V_{MAG3} และ V_{MAG4} และใช้ 8 โนดซ่อนเร้น รวมถึง 4 เอาต์พุตโนด ที่เป็นตัวแทนของระดับความหวานทั้งหมด 10 ระดับ การเรียนรู้ทำได้อย่างมีประสิทธิภาพและให้ความแม่นยำในการทดสอบสูงสุดอยู่ที่ 92.4% ซึ่งเหมาะสำหรับการนำโครงสร้างและค่าถ่วงน้ำหนักไปประยุกต์ใช้ในการตัดสินใจ

5. สรุป

การคัดแยกระดับความหวานของสารละลายน้ำเชื่อมโดยไม่สัมผัสในช่วงความหวาน 3-30%Brix โดยประยุกต์ใช้สี่คลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟ ได้แก่ 2.1, 2.3, 2.5 และ 2.7 กิกะเฮิรตซ์ การวิเคราะห์คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำเชื่อมเริ่มตั้งแต่ 3 8 ถึง 25%Brix ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกอยู่ในช่วง 75.39 ถึง 61.83 และตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลงในช่วง 16.63 ถึง

Science32-N4.indd 80 24/8/2567 BE 11:26

6.29 การตรวจวัดความหวานของน้ำเชื่อมด้วยอัตราส่วนอัตราขยายของ 4 คู่ความถี่ ประยุกต์ใช้ 2 แหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูง เพื่อสร้างความถี่ท้องถิ่น 2.0 กิกะเฮิรตซ์ และสร้างความถี่ส่งออก 2.1, 2.3, 2.5 และ 2.7 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานความถี่ถูกส่งไปยังน้ำเชื่อมตัวอย่างและเกิดเป็นกำลังงานสะท้อนกลับ กำลังงานที่ได้รับถูกเปรียบเทียบอัตราขยายกับกำลังงานของความถี่ท้องถิ่นและให้เอาต์พุตเป็นอัตราส่วนอัตราขยาย ความหวานมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนอัตราขยาย สังเกตได้ว่าเมื่อระดับความหวานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงดันของค่า V_{MAG} เพิ่มขึ้นในลักษณะเดียวกันในแต่ละคู่ความถี่ ประกอบด้วย 2.0 ต่อ 2.1 กิกะเฮิรตซ์ 2.0 ต่อ 2.3 กิกะเฮิรตซ์ 2.0 ต่อ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ และ 2.0 ต่อ 2.7 กิกะเฮิรตซ์ จากการตอบสนองของค่า V_{MAG} ต่อการเปลี่ยนระดับความหวาน แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการทำงานของระบบในการตรวจสอบความหวานจากค่า V_{MAG} ของ 4 คู่ความถี่ ข้อมูลถูกนำมาใช้ในการตัดสินใจเพื่อแบ่งระดับความหวานของน้ำเชื่อม การตรวจสอบความหวานของน้ำเชื่อมทำทั้งหมด 10 ตัวอย่าง มีความหวานตั้งแต่ 3 ถึง 30%Brix ให้ค่า V_{MAG1} V_{MAG2} V_{MAG3} และ V_{MAG4} อยู่ในช่วง 0.965 ถึง 1.523 โวลต์ อัตราส่วนอัตราขยายถูกใช้เป็นข้อมูลอินพุตในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม อัตราการเรียนรู้ที่อยู่ที่ 0.2 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยข้อมูล 1 คู่ความถี่ 2 คู่ความถี่ และ 3 คู่ความถี่ ให้ความแม่นยำในการตัดสินใจเพิ่มขึ้นอย่างเป็นลำดับและที่ 4 คู่ความถี่ ให้ความแม่นยำสูงสุด ดังนั้นโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการตัดสินใจในการแบ่งระดับความหวาน คือ 4 อินพุตโนด 8 โนดซ่อนเร้น และเอาต์พุต 4 โนด ที่เป็นตัวแทนของความหวาน 10 ระดับ ที่ให้ความแม่นยำสูงสุด 92.4% ระบบการตัดสินใจได้รับการโปรแกรมลงบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานให้ระบบตรวจวัดทำงานอย่างเข้าจังหวะ การตรวจวัดสามารถทำได้ตามเวลาจริง จึงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

6. References

[1] Fernandes, A. M., Franco, C., Mendes-Ferreira, A., Mendes-Faia, A., Costa, P. L. and Melo-Pinto, P., 2015, Brix, pH and anthocyanin content determination in whole Port wine grape berries by hyperspectral imaging and neural networks, Computers and Electronics in Agriculture, 115: 88-96.

[2] Kelebek, H., Selli, S., Canbas, A. and Cabaroglu, T., 2009, 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, 91: 187-192.

[3] Awad, T.S., Moharram, H.A., Shaltout, O. E., Asker, D. and Youssef, M. M., 2012, Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review, Food Research International, 48: 410-427.

[4] Anjos, O., Campos, M. G., Ruiz, P. C. and Antunes, P., 2015, Application of FTIR-ATR spectroscopy to the quantification of sugar in honey, Food Chemistry, 169: 218-223.

[5] Cocchi, M., Durante, C., Grandi, M., Lambertini, P., Manzini, D. and Marchetti, A., 2006, Simultaneous determination of sugars and organic acids in aged vinegars and chemometric data analysis, Talanta, 69: 1166-1175.

[6] Cavdaroglu, C. and Ozen, B., 2021, Prediction of vinegar processing

Science32-N4.indd 81 24/8/2567 BE 11:26

parameters with chemometric modelling of spectroscopic data, Microchemical Journal, 171: 106886

[7] Giovenzana, V., Beghi, R. and Guidetti, R., 2014, Rapid evaluation of craft beer quality during fermentation process by vis/NIR spectroscopy, Journal of Food Engineering, 142: 80-86.

[8] Wu, D., He, Y., Nie, P., Cao, F. and Bao, Y., 2010, Hybrid variable selection in visible and near-infrared spectral analysis for non-invasive quality determination of grape juice, Analytica Chimica Acta, 659 (1–2): 229-237.

[9] Bertelli, D., Lolli, M., Papotti, G., Bortolotti, L., Serra, G., and Plessi, M., 2010, Detection of honey adulteration by sugar syrups using one-dimensional and two-dimensional high-resolution nuclear magnetic resonance. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 58(15): 8495-8501.

[10] Bao, Y., Liu, F., Kong, W., Sun, D., He, Y. and Qiu, Z., 2014, Measurement of soluble solid contents and pH of white vinegars using VIS/NIR spectroscopy and least squares support vector machine, Food Bioprocess Technology, 7: 54-61.

[11] Belay, A. and Assefa, G., 2018, Concentration, wavelength and temperature dependent refractive index of sugar solutions and methods of determination contents of sugar in soft drink beverages using laser lights, Journal of Lasers, Optics & Photonics, 5(2): 1-5.

[12] Skierucha, W., Wilczek, A. and Szyplowska, A., 2012, Dielectric spectroscopy in agrophysics, International Agrophysics, Vol. 26(2): 187-197.

[13] Ennasar, M. A., Mrabet, O. E., Mohamed, K. and Essaaidi, M., 2019, Design and characterization of a broadband flexible polyimide RFID tag sensor for NaCl and sugar detection, Progress In Electromagnetics Research C, 94: 273-283.

[14] Thomason, S. J. and Bialkowski, K. S., 2019, Dielectric spectroscopy based determination of sugar content in Solution, IEEE Sensor Letter, 3(5): 1-4.

[15] Islam, M. T., Rahman, M. N., Singh, M. S. J. and Samsuzzaman, M., 2018, Detection of salt and sugar contents in water on the basis of dielectric properties using microstrip antenna-based sensor, IEEE Access, 6: 4118-4126.

[16] Jain, S., 2022, Early detection of salt and sugar by microstrip moisture sensor based on direct transmission method, Wireless Personal Communications, 122: 593–601.

[17] Hosseini, N. and Baghelani, M., 2021, Selective real-time non-contact multi-variable water-alcohol-sugar concentration analysis during fermentation process using microwave split-ring resonator based sensor, Sensors and Actuators A, 325: 112695.

[18] Cheng, E. M., areq, M., Shahriman, A. B., Afendi, R. M., Lee, Y. S., Khor, S. F., Tan,

Science32-N4.indd 82 24/8/2567 BE 11:26

W. H., Fazli, M. N. N., Abdullah, A. Z. and Jusoh, M. A., 2014, Development of microstrip patch antenna sensing system for salinity and sugar detection in water, International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, 14(5): 31-36.

[19] Chaisaeng, P., Limpiti, T., and Leekul, P., 2023, Intelligent sensor system with transmission coefficient in X band frequency for determining sugar content, Progress In Electromagnetics Research C, 135: 157-172.

[20] Keowsawat, P., Kanahna, R., Phongcharoen-panich, C., and Akkaraekthalin, P., 2016, Correlation between transmission coefficient and permittivity properties of sugar solution, Proceedings of the 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Chiang Mai, 1-4.

[21] Leekul, P., Chivapreecha, S. and Krairiksh, M., 2016, Microwave sensor for tangerine classification based on coupled-patch antennas, International Journal of Electronics, 103(8): 1287-1300.

[22] Zhao, C., Wu, G. and Li, Y., 2019, Measurement of water content of oil-water two-phase flows using dual frequency microwave method in combination with deep neural network, Measurement, 131: 92-99.

[23] Ikyumbur, T. J., Onimisi, M. Y., Abdu, S. G., Hemba, E. C. and Kirji, Z. J., 2017 Optimization in the computation of dielectric constant of methanol using Debye relaxation method, British Journal of Applied Science & Technology, 19(1): 1-10.

[24] Sheng, J., Chen, H., Li, B. and Chang, L., 2013, Temperature dependence of the dielectric constant of acrylicdielectric elastomer, Applied Physics A, 110: 511-515.

[25] Pozar, D. M., 2012, Microwave engineering, 4th Ed., John Wiley & Sons: USA, 29 p.

[26] Chaisaeng, P., Leekul, P., Wongcharoen, P. and Kunsook, K., 2020, Permittivity measurement of syrup in wideband frequency for simulation of sugar content determination by artificial neural network, Journal of Industrial Technolog (I-Tech), 15(2): 132-142. (in Thai)

[27] Analog Devices, LF–2.7 GHz RF/IF Gain and Phase Detector AD8302, 1-23, 2018.

Science32-N4.indd 83 24/8/2567 BE 11:26