

■ Research Article



ระบบตรวจวัดความหวานแตงโมแบบไม่ทำลายด้วยการสะท้อนของคลื่นความถี่ไมโครเวฟ

Non-Destructive Watermelon Sweetness Measurement System using Microwave-Reflected Wave

กฤติยาภรณ์ คุณสุข, พรพิมล จายแสง*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี, จันทบุรี, 22000

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของแตงโมเทียบกับระดับความหวาน และพัฒนาระบบเซนเซอร์ตรวจวัดความหวานของแตงโมแบบไม่ทำลายด้วยคลื่นสะท้อนความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ วิเคราะห์ความต่างของกำลังงานการสะท้อนของคลื่นที่ตอบสนองต่อความหวานแตงโม ด้วยการตรวจวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของแตงโมในช่วงความถี่ 1 ถึง 6 กิกะเฮิรตซ์ เพื่อศึกษาแนวโน้มและระบบตรวจวัดที่ได้รับการพัฒนา ประกอบด้วย สายอากาศต้นแบบทำงานร่วมกับแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูง กำลังงานถูกส่งออกไปยังผลแตงโมตัวอย่าง กำลังงานการสะท้อนกลับจากผลแตงโมได้รับการตรวจจับด้วยสายอากาศต้นแบบและส่งเข้าคัปเปิลเลอร์แบบมีทิศทาง แปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงด้วยอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงาน จากนั้นถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 16 บิต ข้อมูลได้รับการประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และแสดงระดับความหวานบนหน้าจอแอลอีดี ผลการทดสอบตรวจวัดแตงโม 20 ผล ระดับความหวานของแตงโมทั้งหมดอยู่ในช่วง 12.5 ถึง 15.5 % Brix และกำลังงานการสะท้อนกลับจากผลแตงโมอยู่ในช่วง 0.988 ถึง 1.244 โวลต์ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตอบสนองต่อระดับความหวานของแตงโมถูกใช้เป็นค่าอ้างอิงในการแบ่งระดับแต่ละช่วงความหวานของแตงโม จากนั้นระบบต้นแบบได้รับการทดสอบตรวจวัดความหวานของแตงโมทั้งหมด 30 ผล ด้วยระบบเซนเซอร์ที่ใช้การตัดสินใจจากระดับอ้างอิง ข้อมูลได้รับการประมวลผลจากนั้นแสดงระดับความหวานและให้ความแม่นยำร้อยละ 90.91 แสดงให้เห็นว่าการตรวจวัดความหวานของแตงโมทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: คุณสมบัติไดอิเล็กตริก, ความหวานแตงโม, ระบบการวัดแบบไม่ทำลาย

Received:

10 March 2026

Revised:

28 May 2026

Accepted:

10 June 2026

Published:

29 June 2026

*Corresponding

Author:

pornpimon.c@rbru.ac.th

Copyright:

© Rajamangala
University of
Technology Lanna.
All right reserved

ISSN

Print: 2586-8500

Electronic: 2586-8632

Abstract

This article presents an analysis of the dielectric properties of watermelons relative to their sweetness levels, and the development of a non-destructive watermelon sweetness sensor system using a 2.4 GHz reflected wave. The difference in wave reflection power responding to watermelon sweetness was analyzed by measuring the dielectric properties of watermelons in the frequency range of 1 to 6 GHz to study the trends. The developed measurement system consists of a prototype antenna working in conjunction with a high-frequency signal generator. Power is transmitted to the sample watermelons, and the reflected power from the watermelons is detected by the prototype antenna and sent to a directional coupler. It is then converted into a DC signal using a power detector. Subsequently, the signal is converted into a 16-bit digital signal, processed by a microcontroller, and the sweetness level is displayed on an LED screen. The test results from measuring 20 watermelons showed that the sweetness levels of all watermelons were in the range of 12.5 to 15.5 % Brix, and the reflected power from the watermelons ranged from 0.988 to 1.244 V. The DC voltage responding to the watermelon sweetness levels was used as a reference value to classify each sweetness range. Afterwards, the prototype system was tested on a total of 30 watermelons using the sensor system based on reference-level decision-making. The data was processed and the sweetness levels were displayed, yielding an accuracy of 90.91%. This demonstrates that the watermelon sweetness measurement can be performed effectively.

Keywords: Dielectric properties, Watermelon sweetness, Non-destructive measurement system

1. บทนำ

แตงโมเป็นผลไม้เมืองร้อนที่อยู่ในวงศ์ Cucurbitaceae และเป็นผลไม้อีกชนิดหนึ่งที่ปลูกมากในจังหวัดจันทบุรี เกษตรกรนิยมปลูกแตงโมในช่วงพักจากการทำนา เนื่องจากเป็นที่พืชใช้น้ำน้อย การปลูกแตงโมช่วงหน้าแล้งจึงได้ผลผลิตดี (จรัส บรรยงคเสนา, 26 ก.พ. 2561), (Frederick et al., 2022) แตงโมที่ปลูกในพื้นที่จังหวัดจันทบุรีมี 2 สายพันธุ์หลัก ได้แก่ พันธุ์กินนรีเนื้อแดง และพันธุ์ตอปีโด (MGR Online, 15 ม.ค. 2556) ตลาดค้าส่งผลไม้ขนาดใหญ่ในจันทบุรี เกิดปัญหาขาดแคลนแตงโม เกษตรกรประสบปัญหาต้นทุนสูง จากค่าแรง ค่าปุ๋ย และยาฆ่าแมลง (ไทยรัฐ, 9 มีนาคม 2566) ดังนั้น การรับรองคุณภาพแตงโมจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะทำให้ขายได้ในราคาที่สูงขึ้น สอดคล้องกับต้นทุนการผลิต โดยรสชาติของแตงโม หรือความหวานเป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินคุณภาพภายในของแตงโมสด หากผู้ขายสามารถรับรองรสชาติของแตงโมที่แน่นอนได้ ส่งผลให้สามารถขายได้ราคาเพิ่มสูงขึ้น การตรวจสอบความหวานของแตงโมในกระบวนการซื้อขายโดยทั่วไปใช้ประสบการณ์และความเชี่ยวชาญเป็นหลัก ส่วนการตรวจวัดด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ซึ่งเป็นวิธีการที่มีความแม่นยำและเชื่อถือได้ คือการตรวจวัดด้วยวิธีการทางเคมี ต้องใช้เครื่องมือเฉพาะ และใช้เวลานาน รวมถึงเป็นการวัดแบบทำลาย (Chawgien & Kiattisin, 2021) จึงไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานจริง

นักวิจัยจึงได้ศึกษาวิธีการตรวจสอบความหวานของแตงโมแบบไม่ทำลาย เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับแตงโม ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อวิเคราะห์ระดับความหวานของแตงโมจากภาพถ่าย (ณัฐวดี หงษ์บุญมี และณัฐพงศ์ จันดีวงศ์, 2563), (Fitria et al., 2023) แม้ว่าจะมีระบบที่มีความแม่นยำ แต่ต้องได้รับการควบคุมสภาพแวดล้อม เนื่องจากแสงหรือฉากหลังของภาพถ่ายมีผลต่อการประมวลผล อีกเทคนิคหนึ่ง คือ การใช้อินฟราเรดย่านใกล้ (NIR) วิธีการนี้มีความแม่นยำสูง (Jie et al., 2014) แต่ยังคงมีข้อจำกัดด้านการควบคุมสภาพแวดล้อม ขณะวัดเช่นเดียวกัน เนื่องจากแสงจากสภาพแวดล้อมภายนอกอาจส่งผลต่อการวัด รวมถึงอุปกรณ์มีราคาสูง เห็นได้ว่า 2 วิธีข้างต้นแม้จะเป็นการวัดแบบไม่ทำลายและแสดงผลได้ทันที แต่เป็นวิธีที่ต้องควบคุมสภาพแวดล้อม เทคนิคการตรวจสอบวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมต่ำ โดยมีงานที่นำเสนอการใช้สายอากาศส่งและรับคลื่นความถี่ผ่านผลแตงโม และนำมาสร้างเป็นภาพ (Microwave image) เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติภายในของแตงโม (Choffin et al., 2024) วิธีการนี้มีความซับซ้อนและต้องใช้สายอากาศจำนวนมาก อย่างไรก็ตามการวัดวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ซับซ้อนต่ำถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุหรือตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่าน เนื่องจากความแตกต่างของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลางที่ส่งผลกระทบต่อขนาดของกำลังงานของคลื่นส่งผ่าน (Leekul et al., 2021) ดังนั้นการนำเทคนิคการตรวจวัดด้วยคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้กับการตรวจวัดความหวานแตงโมจึงมีความเป็นไปได้ เพื่อใช้เป็นเครื่องมือสำหรับรับรองคุณภาพของแตงโมโดยไม่ทำลาย ต้นทุนต่ำ และความซับซ้อนต่ำ

ในงานนี้จึงได้ทำการศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของแตงโมเทียบกับระดับความหวาน (Soluble Solid Content: SSC) ตรวจวัดกำลังงานการสะท้อนของแตงโมในแต่ละระดับความหวานด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายและสายอากาศที่ได้ออกแบบ จากนั้นวิเคราะห์ระดับความหวานของแตงโมด้วยกำลังงานการสะท้อนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ วิธีการนี้เป็นตรวจสอบความหวานของแตงโมแบบไม่ทำลาย โดยอาศัยหลักการสะท้อนของคลื่นย่านความถี่ไมโครเวฟที่แตกต่างกันตาม

คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของตัวกลางที่คลื่นเดินทางตกกระทบ ซึ่งเป็นวิธีการวัดที่ไม่ต้องสัมผัสและทำลายตัวอย่าง ราคาไม่สูง และไม่ซับซ้อน ดังนั้นແຕ່ງโมที่หวานและไม่หวานซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างกันจึงสามารถตรวจสอบได้จากระดับกำลังงานคลื่นสะท้อน ส่วนที่ 3 เป็นทฤษฎีคุณสมบัติไดอิเล็กทริกที่มีผลต่อการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นพื้นฐานของงานวิจัย ส่วนที่ 4 แสดงผลการตรวจวัดคุณสมบัติไดอิเล็กทริก การพัฒนาสายอากาศ และการทดสอบคลื่นส่งสะท้อน ส่วนที่ 5 เป็นผลการทดสอบตรวจวัดระดับความหวาน ส่วนที่ 6 เป็นการอภิปรายผลการวิจัย และส่วนที่ 7 เป็นการสรุปผล

2. วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดความหวานແຕ່ງโมด้วยคลื่นไมโครเวฟ

3. แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

คุณสมบัติไดอิเล็กทริกเป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ มีค่าขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุ โดยคุณสมบัติไดอิเล็กทริก แบ่งย่อยออกเป็น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant: ϵ_r') และตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss factor: ϵ_r'') ค่าทั้ง 2 นี้ สามารถเขียนในรูปของค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน ϵ_r ดังสมการที่ (1) เป็นค่าสภาพยอมไฟฟ้าของวัสดุที่ถูกนำมาเทียบกับค่าสภาพยอมไฟฟ้าของอากาศ

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

คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของตัวกลางส่งผลต่อการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อคลื่นตกกระทบรอยต่อของตัวกลาง กำลังงานของคลื่นบางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ โดยปริมาณกำลังงานของคลื่นสะท้อน นิยามไว้ด้วยสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient : Γ) เมื่อคลื่นเดินทางจากตัวกลางที่ 1 คือ อากาศ ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์เป็น η_0 ไปยังตกกระทบกับตัวกลางที่สองที่มีค่าอิมพีแดนซ์เป็น η สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น Γ แสดงดังสมการที่ (2) (Pozar, 2012)

$$\Gamma = \frac{\eta - \eta_0}{\eta + \eta_0} \quad (2)$$

โดยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกลางมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของตัวกลาง ดังสมการที่ (3)

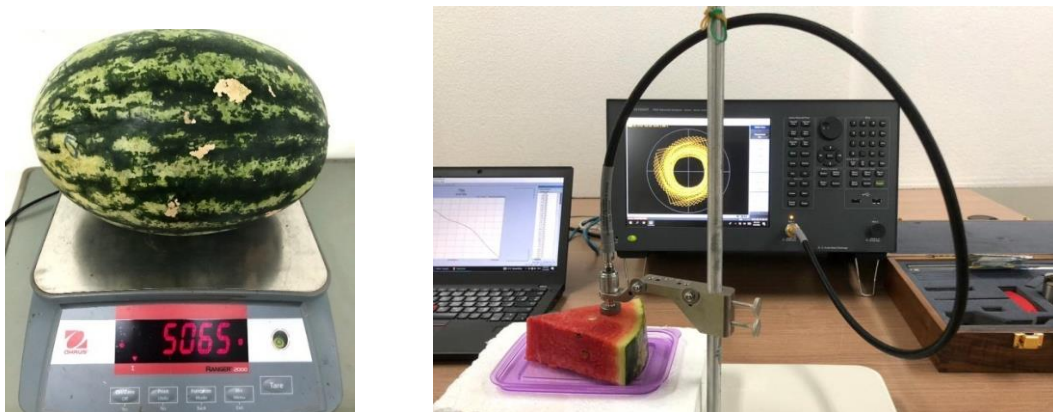
$$\eta = \sqrt{\mu / \epsilon} \quad (5)$$

เมื่อ μ คือค่าความซึมซาบแม่เหล็ก ทั้งนี้ในวัสดุที่ไม่ใช่ตัวนำ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก แຕ່ງโมที่มีระดับความหวานต่างกัน เนื่องจากปริมาณน้ำตาลในเนื้อແຕ່ງโม ดังนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของແຕ່ງโมที่แต่ละระดับความหวานจึงมีค่าต่างกัน ส่งผลให้กำลังงานคลื่นสะท้อนจากແຕ່ງโมมีค่าไม่เท่ากัน จึงสามารถนำมาใช้ตรวจสอบความหวานของແຕ່ງโม

4. วิธีดำเนินการวิจัย

1. คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเนื้อแตงโม

การทดสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของแตงโมเพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเทียบกับความหวาน ซึ่งเป็นพื้นฐานของการทดสอบการตรวจวัดต่อไป แตงโมตัวอย่างสำหรับทดสอบจัดเตรียมทั้งหมด 4 ลูก นำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง OHAUS รุ่น RANGER 2000 ดังรูปที่ 1 (ก) มีน้ำหนักอยู่ในช่วง 5.07 ถึง 5.93 กิโลกรัม แตงโมตัวอย่างได้รับการทำสัญลักษณ์กำกับและระบุหมายเลขเพื่อตรวจวัดตามลำดับ โดยผ่าตามแนวขวาง หน้า 6 เซนติเมตร แบ่งแผ่นแตงโมที่ตัดแล้วออกเป็น 6 ชิ้น ชิ้นละเท่า ๆ กัน 60 องศา เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Vector network analyzer) รุ่น E5063A ใช้งานร่วมกับโปรแกรมโคแอกเซียล Agilent 85070E สำหรับวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่บริเวณเนื้อของแตงโมแต่ละชิ้น ใช้ความถี่ 0.3 ถึง 6 กิกะเฮิรตซ์ ในการวัด ณ อุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 1 (ข)



รูปที่ 1 (ก) น้ำหนักและ (ข) การตรวจวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกการวัดค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อแตงโม

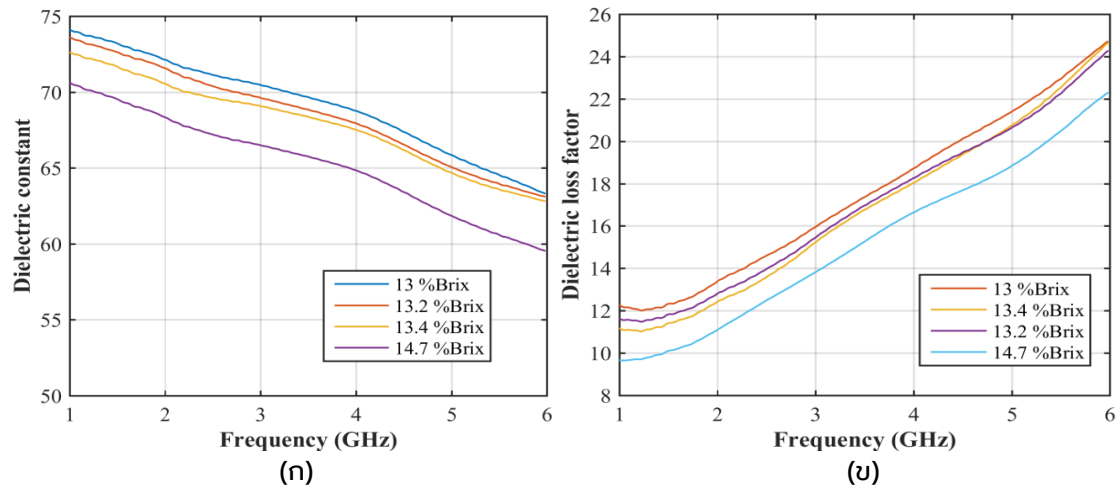
ก่อนการตรวจวัดเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายได้รับการปรับเทียบประกอบด้วย อากาศ น้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง และบล็อกลัดวงจร (Shorting block) เพื่อความเสถียรในการตรวจวัด จากนั้นวัดค่าความหวาน (%Brix) ของเนื้อแตงโมด้วยเครื่องวัดความหวานบริกซ์รีแฟลกโตมิเตอร์ชนิดพกพา (Portable refractometer) ก่อนนำไปทดสอบ แตงโมนำมาทดสอบจำนวน 4 ลูก มีค่าความหวานเฉลี่ยของแต่ละลูกอยู่ระหว่าง 13 ถึง 14.7 % Brix ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของแตงโมแต่ละลูก

รายการ	แตงโมตัวอย่าง			
	ลูกที่ 1	ลูกที่ 2	ลูกที่ 3	ลูกที่ 4
น้ำหนัก (kg)	5.929	5.065	5.844	5.348
ความหวานเฉลี่ย (%Brix)	14.7	13.4	13.2	13

ค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อแตงโมสามารถบ่งบอกถึงระดับความหวานได้ เนื่องจากน้ำตาลในเนื้อแตงโมมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเนื้อแตงโม

จะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำตาลในเนื้อແຕງโม แຕງโมที่มีค่าความหวาน 13 % Brix มีค่า ϵ_r' สูงกว่าແຕງโมที่มีความหวาน 14.7 % Brix ผลจากการวัดนำมาแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและย่านความถี่ ดังรูปที่ 2 (ก) และตัว ประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกในรูปที่ 2 (ข) การมีปฏิสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของ น้ำและน้ำตาลในແຕງโม กล่าวคือ น้ำเป็นองค์ประกอบหลักในແຕງโม มีโมเลกุลที่มีขั้ว (Polar molecules) และมีค่า ϵ_r' สูงมาก (ประมาณ 80 ที่อุณหภูมิห้อง) ปริมาณน้ำ ที่มากขึ้นจะเพิ่มค่า ϵ_r' ของແຕງโม เนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีขั้วไฟฟ้าและสามารถ จัดเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าได้ดี แต่น้ำตาลมีค่า ϵ_r' ต่ำกว่าน้ำมาก การเพิ่มขึ้นของ ปริมาณน้ำตาลทำให้ค่า ϵ_r' โดยรวมของແຕງโมลดลง



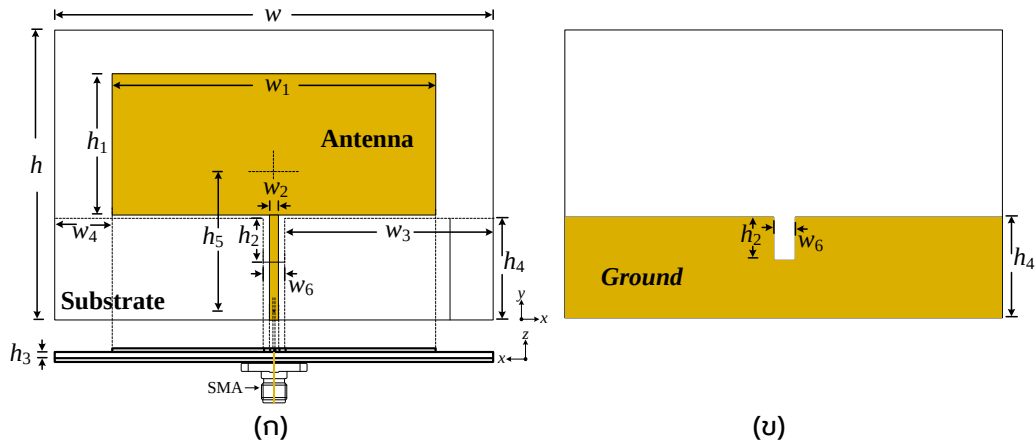
รูปที่ 2 (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ข) ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกของเนื้อແຕງโม

โดยที่ระดับความหวาน 14.7, 13.4, 13.2 และ 13 % Brix เมื่อพิจารณาในย่านความถี่ 1 ถึง 6 GHz ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่วัดได้คือ 70.59, 72.60, 73.61 และ 74.08 ตามลำดับ นั่นคือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2 (ข) แຕງโมที่มีความหวาน 13 % Brix จะมีปริมาณน้ำมากกว่า และมีปริมาณน้ำตาล น้อยกว่าແຕງโมที่มีความหวาน 14.7 % Brix ทำให้มีค่าตัวประกอบการสูญเสีย ไดอิเล็กตริกสูงกว่า เนื่องจากน้ำมีค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกสูงและมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนมากกว่า แต่ที่ความหวานใกล้เคียงกัน ระหว่าง 13.2 และ 13.4 % Brix แนวโน้มของค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก อาจจะกลับกันกับที่กล่าวมาข้างต้น เนื่องมาจากค่าที่ได้มีการซ้อนทับกันไปมา บางช่วง ความถี่ที่ได้ค่ามากและน้อยสลับกัน อาจกล่าวได้ว่า เป็นผลมาจากปัจจัยบางอย่างเช่น ปัจจัยจากสารละลายอื่น ๆ เช่น วิตามิน แร่ธาตุ กรดอินทรีย์ และเซลล์เนื้อเยื่อที่มีอยู่ ในผลແຕງโม จากผลการตรวจวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกแสดงให้เห็นถึงความ เป็นไปได้ในการตรวจวัดความหวานจากความแตกต่างของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ซึ่งส่งผลต่อการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2. การพัฒนาสายอากาศแพทช์ไมโนโพล

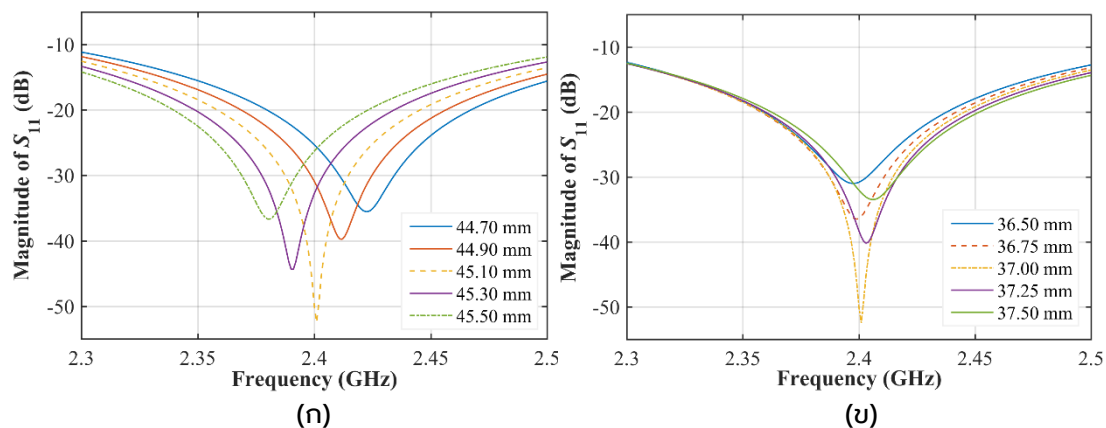
การตรวจวัดด้วยคลื่นสะท้อนจำเป็นต้องใช้สายอากาศในการรับและส่งคลื่น สายอากาศจึงได้รับการพัฒนาสำหรับการรับส่งคลื่นความถี่ โดยใช้สายอากาศแพทช์ ไมโนโพลเนื่องจากโครงสร้างมีความซับซ้อนต่ำ น้ำหนักเบา กะทัดรัด และติดตั้งเข้า กับระบบได้ง่าย ขนาดและระยะจุดป้อนสัญญาณของสายอากาศเบื้องต้นได้รับการ คำนวณจากทฤษฎี เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการจำลองด้วยโปรแกรมจำลอง

คำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า CST Studio Suite 2019 ในการปรับโครงสร้างให้เหมาะสม คุณสมบัติของสายอากาศในการจำลองมีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าและพัฒนามบนแผ่นวงจรพิมพ์ 2 หน้า ชนิด FR4 วัสดุฐานรอง (Substrate) มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 4.4หนา 1.414 มิลลิเมตร ใช้การป้อนสัญญาณแบบโพรมโคแอกเซียล โครงสร้างสายอากาศแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างของสายอากาศแพทช์ไมโครเวฟ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

ขนาดของตัวนำ (w_1) ได้รับการปรับเพื่อหาความถี่ทำงานของสายอากาศ โดยปรับตั้งแต่ 44.70 ถึง 45.50 มิลลิเมตร และได้ขนาดที่เหมาะสม คือ 45.10 มิลลิเมตร ให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ต่ำสุดอยู่ที่ -52.49 เดซิเบล ดังรูปที่ 4 (ก) เมื่อได้ขนาดตัวนำสัญญาณที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการปรับระยะของจุดป้อนสัญญาณ (h_5) ที่ห่างจาก จุดศูนย์กลางของตัวนำไปตามแนวแกน y ตั้งแต่ 36.50 ถึง 37.50 มิลลิเมตร ให้ค่าพารามิเตอร์ S_{11} ต่ำสุดอยู่ที่ -30.99 -36.49 -52.49 -40.19 และ -33.48 เดซิเบล ตามลำดับ ตัดสินใจเลือกระยะที่เหมาะสมคือ 37.00 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4 (ข)



รูปที่ 4 ผลการปรับ (ก) ขนาด และ (ข) ระยะจุดป้อนสัญญาณของสายอากาศ

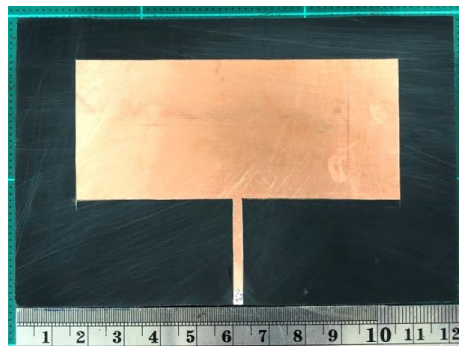
จากการปรับโครงสร้างของสายอากาศด้วยการจำลอง แสดงให้เห็นว่าขนาดที่เหมาะสมของตัวนำอยู่ที่ 45.10 มิลลิเมตร และระยะจุดป้อนสัญญาณอยู่ที่ 37.00

มิลลิเมตร สายอากาศที่ออกแบบมีขนาดของสายอากาศ 120x80 มิลลิเมตร โดยขนาดในส่วนต่างๆ ของสายอากาศแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ขนาดของสายอากาศ

พารามิเตอร์	w	H	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	w_1	w_2	w_3	w_4	w_6
ขนาด (มม.)	122	80	39	12	1.414	28	37	45.10	2.5	59.8	15.75	6

โครงสร้างที่เหมาะสมของสายอากาศจากการจำลองถูกนำมาใช้ในการพัฒนาสายอากาศต้นแบบ เพื่อทำหน้าที่แพร่กระจายกำลังงานความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ไปยังผลแตงโมและตรวจจับกำลังงานการสะท้อนกลับ สายอากาศได้รับการพัฒนามบนแผ่นวงจรพิมพ์ 2 หน้า ชนิด FR4 ใช้การป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 5



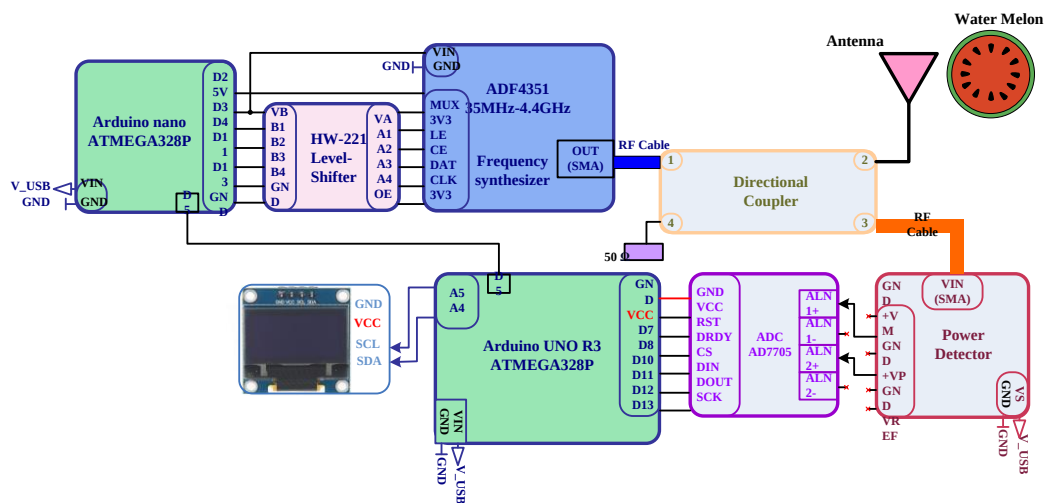
รูปที่ 5 สายอากาศแพทช์ไมโครสตริปต้นแบบ

สายอากาศที่พัฒนาได้รับการทดสอบช่วงความถี่ทำงานด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ของบริษัท Keysight รุ่น E5063A ทดสอบการตรวจวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} ในช่วงความถี่ 2 ถึง 3 กิกะเฮิรตซ์ พบว่าค่าความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ สายอากาศให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับอยู่ที่ -25.5 เดซิเบล ขนาดและโครงสร้างมีความซับซ้อนต่ำ ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบตรวจวัดระดับความหวานของผลแตงโม

3. ระบบตรวจวัดที่นำเสนอ

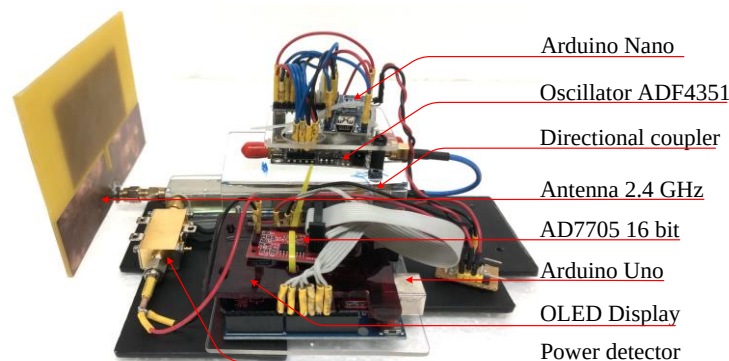
ระบบตรวจวัดระดับความหวานของผลแตงโมที่ได้รับการนำเสนอประกอบด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ A (Arduino UNO R3) ทำหน้าที่ควบคุมระบบประมวลผลข้อมูล สื่อสาร และส่งสัญญาณควบคุมไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ B (Arduino Nano V 3.0) เพื่อให้ทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมไปยังแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูงรุ่น ADF4351 ของบริษัท Analog Devices ที่สามารถปรับความถี่ได้ในช่วง 0.035 ถึง 4.4 กิกะเฮิรตซ์ และระดับกำลังงาน -4 ถึง +5 เดซิเบล มิลลิวัตต์ ให้สร้างสัญญาณความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ โมดูลใช้สัญญาณควบคุมที่ระดับแรงดัน 3.3 โวลต์ จึงใช้โมดูลแปลงระดับสัญญาณไฟฟ้าจาก 5 ลงมาที่ 3.3 โวลต์ เป็นตัวกลางในการสื่อสาร เพื่อควบคุมให้โมดูลสร้างกำลังงานส่งออก +4 เดซิเบล มิลลิวัตต์ ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานความถี่ถูกป้อนให้กับอุปกรณ์เชื่อมต่อร่วมแบบมีทิศทาง (Directional coupler) ของบริษัท Mini circuit รุ่น

ZHDC-10-63-S+ สัญญาณคัปปลิงที่ -10 dB ทำงานในช่วงความถี่ 0.05 ถึง 6 กิกะเฮิรตซ์ ทำหน้าที่รับกำลังงานความถี่และส่งออกไปยังสายอากาศแพทช์ไมโนโพล กำลังงานแพร่กระจายไปยังผลແຕ່ງโม เกิดเป็นคลื่นสะท้อนย้อนกลับมายังสายอากาศและย้อนกลับเข้าอุปกรณ์เชื่อมต่อร่วมแบบมีทิศทาง ให้เอาต์พุตที่พอร์ตเชื่อมต่อร่วม 3 (Couple) โดยพอร์ตแยกโดดเดี่ยว 4 (Isolation) ได้รับการต่อเทอร์มินเนต 50 โอห์ม เอาต์พุตจากพอร์ตเชื่อมต่อร่วมถูกส่งเข้าอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงาน เพื่อเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงานแบบเชิงเส้นของบริษัท Mini circuit รุ่น ZX47-60LN-S+ ทำงานในช่วงความถี่ 0.01 ถึง 8 กิกะเฮิรตซ์ รับอินพุตในช่วง -60 ถึง +5 เดซิเบลมิลลิวัตต์ และให้เอาต์พุตในช่วง 2.1 ถึง 0.5 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยวงจรแปลงสัญญาณของบริษัท Analog devices รุ่น AD7705 รองรับอินพุตได้ 0 ถึง 5 โวลต์ ให้เอาต์พุตขนาด 16 บิต ข้อมูลจากการตรวจวัดได้รับการจัดเก็บเข้าหน่วยความจำและประมวลผล แผนผังการทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนผังระบบตรวจวัดความหวานແຕ່ງโมที่นำเสนอ

สายอากาศรับส่งกำลังงานคลื่นความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ที่พัฒนาขึ้น ถูกนำมาใช้งานกับระบบตรวจวัดความหวานของແຕ່ງโมแบบไม่ทำลายด้วยการกำลังงานคลื่นสะท้อนย่านความถี่ไมโครเวฟ ระบบตรวจวัดต้นแบบแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ระบบตรวจสอบความหวานของແຕ່ງโมต้นแบบ

5. ผลการวิจัย

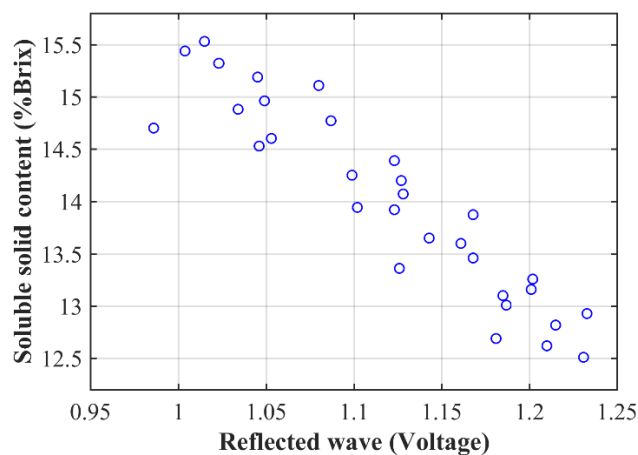
1. ผลการทดสอบการตรวจวัดระดับความหวานของแตงโม

แตงโมจำนวน 20 ตัวอย่าง ซึ่งมีระดับความสุกพร้อมรับประทาน ที่ใช้ในการทดสอบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 18.2 ถึง 22.1 เซนติเมตร และและความสูงที่ 20.8 ถึง 23.1 เซนติเมตร น้ำหนักอยู่ในช่วง 5.5 ถึง 5.8 กิโลกรัม มีค่าระดับความหวานอยู่ในช่วง 12.5 ถึง 15.5 % Brix แตงโมตัวอย่างที่ได้รับการจัดเตรียมโดยแบ่งออกเป็นส่วนที่ใช้ในการตรวจวัดและเก็บเป็นค่าอ้างอิง การตรวจวัดใช้ฐานแท่นทดสอบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 60 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่นวางผลแตงโม 36 เซนติเมตร ลักษณะการจัดวางผลแตงโมที่ตำแหน่งศูนย์กลางของแท่นทดสอบ แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ระดับความหวานที่มีผลต่อกำลังงานการสะท้อน

เมื่อให้แหล่งจ่ายพลังงานกับระบบ อุปกรณ์กำเนิดความถี่จะเริ่มทำงานสร้างสัญญาณความถี่ ใช้เวลาประมาณ 5 นาที เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีความเสถียรตลอดการตรวจวัด จากนั้นจึงวัดกำลังงานการสะท้อน ผลการตรวจวัดระดับความหวานของแตงโมเทียบกับระดับความหวานในช่วง 12.5% Brix ถึง 15.5 % Brix ให้ค่ากำลังงานการสะท้อนกลับอยู่ในช่วง 0.988 ถึง 1.244 โวลต์ ระดับความหวานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระดับกำลังงานการสะท้อนลดลง ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ระดับความหวานที่มีผลต่อกำลังงานการสะท้อน

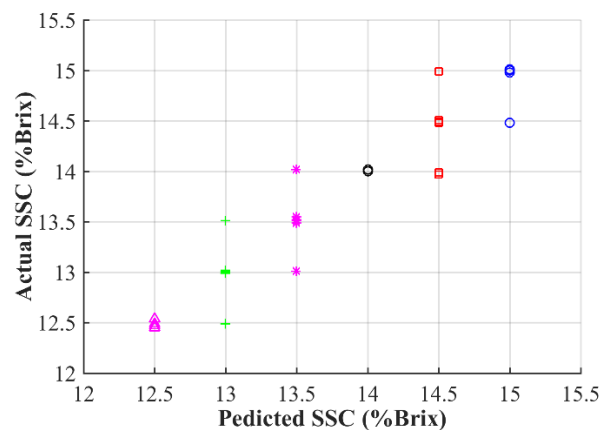
ระดับแรงดันของคลื่นสะท้อน V_R ที่ได้รับจากการตรวจวัดແຕ່ງໂມທີ່มีระดับความหวานต่างกัน ถูกนำมาใช้ในการกำหนดค่าอ้างอิง ซึ่งค่าอ้างอิงนี้ถูกนำไปใช้ในส่วนประมวลผลของระบบในໄມໂຄຣຄອນໂຕຣລເອຣ໌ A เพื่อนำระบบไปทดสอบความแม่นยำในการตัดสินใจ โดยที่ระดับแรงดันการสะท้อนน้อยกว่า 1.23 โวลต์ จัดว่าเป็นແຕ່ງໂມหวาน แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่ากำลังงานการสะท้อนกลับอ้างอิงต่อระดับความหวาน

ความหวาน (%Brix)	12.5	13	13.5	14	14.5	15
แรงดัน (V)	$1.2 \leq V_R$	$1.15 \leq V_R < 1.2$	$1.1 \leq V_R < 1.15$	$1.05 \leq V_R < 1.1$	$1 \leq V_R < 1.05$	$V_R < 1$

2. ผลการคัดแยกระดับความหวานของແຕ່ງໂມ

การตรวจวัดความหวานແຕ່ງໂມด้วยระบบตรวจวัดความหวานต้นแบบที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ แบบໄມ່ກຳລາຍ โดยใช้ค่าระดับอ้างอิงในการตัดสินใจผลการตรวจวัดແຕ່ງໂມทั้งหมด 20 ลูก ขนาดของແຕ່ງໂມเฉลี่ยอยู่ที่ 29.5x22.1 เซนติเมตร และน้ำหนักเฉลี่ย 5.59 กิโลกรัม ผลการตรวจวัดและตัดสินใจด้วยระบบเซนเซอร์ໄມໂຄຣເວຟ ให้ค่า R^2 ที่ 0.98 และมีสมการการตัดสินใจเป็น $y = 0.98 * x + 0.38$ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 เปรียบเทียบผลการตรวจวัดระบบตรวจวัดต้นแบบ

6. การอภิปรายผล

ແຕ່ງໂມที่มีความหวานเพิ่มขึ้น มีปริมาณน้ำในเนื้อແຕ່ງໂມลดลง ส่งผลให้กำลังงานของคลื่นสะท้อนมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของແຕ່ງໂມที่มีค่าลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า (Nelson et al., 2007) ผลการทดสอบประสิทธิภาพทำงานของระบบตรวจวัดความหวานของແຕ່ງໂມแสดงให้เห็นว่าระบบตรวจวัดระดับความหวานของແຕ່ງໂມด้วยคลื่นสะท้อนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์สามารถแสดงผลการตรวจวัดได้ทันที โดยใช้เวลาไม่เกิน 5 วินาทีต่อการวัด 1 ผล และมีความแม่นยำสูงร้อยละ 90.91 ทำให้เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อคัดแยกคุณภาพของແຕ່ງໂມ

7. บทสรุป

การออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดความหวานของแตงโมแบบไม่ทำลายด้วยคลื่นสะท้อนย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ เริ่มด้วยการศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของแตงโมที่ระดับความหวาน 13% Brix ถึง 14.7% Brix ในช่วงความถี่ 1 ถึง 6 กิกะเฮิรตซ์ พบว่าแตงโมมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงเมื่อความหวานเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงเมื่อความถี่ที่ใช้ตรวจวัดเพิ่มขึ้น สำหรับที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ คุณสมบัติไดอิเล็กทริกมีค่าแตกต่างกันชัดเจนที่แต่ละระดับความหวาน ดังนั้นจึงทำการออกแบบและพัฒนาสายอากาศแพทช์โมโนโพลเพื่อใช้ในการส่งและรับคลื่นสะท้อนร่วมกับระบบต้นแบบ ซึ่งประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการสร้างสัญญาณความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ให้ส่งผ่านสายอากาศและตกกระทบกับผลแตงโมตัวอย่างที่ทำการตรวจวัด คลื่นสะท้อนถูกรับโดยสายอากาศ จากนั้นแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อประมวลผลและตัดสินใจที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงผลการวัดบนหน้าจอแอลอีดี ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบตรวจวัดพบว่าให้ความแม่นยำที่ร้อยละ 90.91 และค่า R^2 ที่ 0.98 แสดงให้เห็นว่าระบบที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้ตรวจสอบความหวานของแตงโมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

8. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณการวิจัยจากกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ประจำปี 2567.เลขที่ 2243/2567

9. เอกสารอ้างอิง

- ณัฐวดี หงษ์บุญมี และ ณัฐพงษ์ จันดีะวงศ์. (2563). การประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อวัดระดับความหวานของแตงโมผ่านสมาร์ตโฟน. *วารสารสารสนเทศศาสตร์และเทคโนโลยี*, 10(1), 59-69.
- ไทยรัฐ. (9 มีนาคม 2566). ตลาดค้าส่งผลไม้จันทบุรีซบเซา แตงโม สับปะรด ขาดตลาดไม่มีขายต้องสั่งล่วงหน้า. www.thairath.co.th.
- จรัส บรรยงคเสนา. (26 กุมภาพันธ์ 2561). จ.จันทบุรี เกษตรกรปลูกแตงโม เมล่อน และแคนตาลูป พืชใช้น้ำน้อยแก้ปัญหาภัยแล้ง ได้ผลเกินคาดผลผลิตดี ราคางาม พร้อมเปิดเป็นสวนท่องเที่ยวในชุมชน. สำนักงานประชาสัมพันธ์จังหวัดจันทบุรี. www.thainews.prd.go.th.
- MGR Online. (15 มกราคม 2556). สภาพอากาศที่ร้อนจัด ส่งผลให้แตงโมริมทางขายดี. www.mgronline.com.
- Chawgien, K., & Kiattisin, S. (2021). Machine learning techniques for classifying the sweetness of watermelon using acoustic signal and image processing. *Computers and Electronics in Agriculture*, 181, Article 105938.
- Fitria, M., Hafez Al-Assad, M., Candra, Y., Roza, S. & Dawood, R. (2023). Preliminary results of a deep learning model for classifying watermelon sweetness through field-spot detection. *Proceedings of International Conference on Business and Technological Advancement in Industrial Revolution 4.0 (ICoBTA-IR4.0)*, 43-57.
- Jie, D., Xie, L., Rao, X., & Ying, Y. (2014). Using visible and near infrared diffuse transmittance technique to predict soluble solids

- content of watermelon in an on-line detection system. *Postharvest Biology and Technology*, 90, 1-6.
- Leekul, P., Wongsiritorn, P., & Chaisaeng, P. (2021). Development of humidity monitoring system in greenhouse with electromagnetic X band and artificial neural networks. *Progress in Electromagnetics Research M*, 100, 93–103.
- Nelson, O. S., Trabelsi, S., & Kays, J. S. (2007). Dielectric spectroscopy of melons for quality sensing. *Transactions of the ASABE*, 51(6), 2209-2214.
- Pozar, D. M. (2012). *Microwave Engineering* (4th ed.). John Wiley & Sons.