

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของมังกุดและตรวจจับเนื้อแก้วด้วยระบบ เซนเซอร์ย่านความถี่เอ็็กซ์

ปรมินทร์ วงษ์เจริญ¹, กฤติยาภรณ์ คุณสุข², ประพนธ์ ลีกุล³, พรพิมล ฉายแสง^{4*}

^{1,2,3,4}คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

Email: pornpimon.c@rbru.ac.th

Received: Sep 29, 2023

Revised: Nov 8, 2023

Accepted: Nov 9, 2023

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตรวจวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมังกุดเนื้อแก้วและมังกุดเนื้อปกติในช่วงความถี่ 10 ถึง 11 กิโลเฮิร์ตซ์ ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาใช้ในการจำลองมังกุดในระบบตรวจวัดแบบเทคนิคอวกาศว่าง ระบบตรวจวัดประกอบด้วยสายอากาศรับส่งกำลังงานความถี่ แหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูงแบบเรโซเนเตอร์ไดโอดอิเล็กทรอนิกส์ วงจรผสมสัญญาณ มอดูเลเตอร์สำหรับหมุนผลมังกุดในขณะตรวจวัด อุปกรณ์ตรวจจับกำลังงาน วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ หลักการของระบบเซนเซอร์ คือ กำลังงานความถี่ถูกส่งออกไปยังผลมังกุดและรับกำลังงานคลื่นสะท้อนที่เกิดจากผลมังกุดที่มุม 0 ถึง 360 องศา ในแนวระนาบ จากนั้นกำลังงานคลื่นสะท้อนที่ได้รับถูกผสมกับกำลังงานของความถี่ท้องถิ่นและได้เป็นกำลังงานของความถี่กลาง เพื่อใช้เป็นระดับอ้างอิงในการตรวจหาเนื้อแก้วภายในผลมังกุด ผลการวัดค่าคงที่ไดโอดอิเล็กทรอนิกส์และค่าตัวประกอบการสูญเสียไดโอดอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 10.525 กิโลเฮิร์ตซ์ ของมังกุดเนื้อแก้วมีค่าเท่ากับ 45.08 และ 28.32 และขณะที่มังกุดเนื้อปกติมีค่าเท่ากับ 40.43 และ 25.89 ตามลำดับ ทดสอบระบบด้วยการตรวจวัดมังกุด 54 ตัวอย่าง ข้อมูลจากการตรวจวัดได้รับการนอร์มัลไลซ์เพื่อลดผลกระทบจากรูปทรงของมังกุด จากนั้นใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการตัดสินใจในการคัดแยก ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของมังกุดเนื้อแก้วและมังกุดเนื้อปกติเฉลี่ยอยู่ที่ 0.11 และ 0.03 ตามลำดับ ระดับอ้างอิงที่ใช้ในการคัดแยกมังกุดอยู่ที่ 0.085 และจากการทดสอบระบบสามารถคัดแยกมังกุดได้แม่นยำร้อยละ 84.4 แสดงให้เห็นว่าระบบเซนเซอร์มีประสิทธิภาพและเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งาน

คำสำคัญ : คุณสมบัติไดโอดอิเล็กทรอนิกส์, มังกุดเนื้อแก้ว, คลื่นสะท้อน, ระบบเซนเซอร์ไมโครเวฟ

Analysis of Electrical Properties of mangosteen pulp and detection of its Quality using X-frequency sensor system

**Poramintra Wongcharoen¹, Kritiyaporn Kunsook², Prapan Leekul³,
Pornpimon Chaisaeng^{4*}**

^{1,2,3,4}Faculty of Industrial Technology, RambhaiBarni Rajabhat University

Email : pornpimon.c@rbru.ac.th

Received: Sep 29, 2023

Revised: Nov 8, 2023

Accepted: Nov 9, 2023

Abstract

This paper introduces the electrical properties measurement of translucent and normal flesh mangosteens in the frequency range 10-11 GHz. The measured data were then used to model the mangosteen for free-space technique measurement simulation. The proposed system comprises a transmitting and a receiving antenna, a high-frequency dielectric resonator oscillator, a frequency mixer, a stepping motor to rotate the mangosteen during measurement, a power detector, an analog-to-digital converter, and a microcontroller. The concept of this system is to transmit signal to mangosteen and receive the reflected signal from mangosteen at varied angle 0 to 360 degrees around it in azimuth plane. The reflected signal is then mixed with a local oscillator to produce intermediate frequency for being the reference level to detect translucent flesh within mangosteen. The measured dielectric constant and dielectric loss factor at the frequency of 10.525 GHz of the translucent flesh were 45.08 and 28.32, respectively, while they were 40.43 and 25.89, respectively for the ordinary flesh. The prototype system was validated by measuring 54 mangosteen samples. The measured data were then normalized to reduce the effect of mangosteen shape. The calculated standard deviation was used for decision-making in classification process which the average standard deviations of translucent and normal flesh were 0.11 and 0.03, respectively. The threshold level for mangosteen classification was 0.085. The classification accuracy achieved 84.4%. Thus, the sensor system is efficient and suitable for the application.

Keywords : Dielectric properties, Translucent flesh disorder of mangosteen, Reflected wave, Sensor system

บทนำ

มังคุดเป็นผลไม้เศรษฐกิจอันดับ 3 ของการส่งออกผลไม้สดมาโดยตลอด มีมูลค่าการส่งออกที่ขยายตัวกว่าร้อยละ 21.8 เมื่อเปรียบเทียบกับในช่วง 7 เดือนแรกของปี 2564 กับ 2563 [1] ทั้งนี้มังคุดเนื้อแก้วเป็นหนึ่งในปัญหาคุณภาพการส่งออกมังคุดที่สำคัญ [2]-[3] ซึ่งเป็นมังคุดที่มีความผิดปกติทางด้านสรีรวิทยา เนื้อมังคุดมีลักษณะใส กรอบ คล้ายฉ่ำน้ำอยู่ด้านใน รสชาติจืด มังคุดเนื้อแก้วถือเป็นมังคุดเสียสำหรับการส่งออก การคัดแยกมังคุดเนื้อแก้วไม่สามารถมองได้จากผิวเปลือกภายนอก ดังนั้นจึงเป็นปัญหาของผู้ส่งออก [4] วิธีการคัดแยกมังคุดเนื้อแก้วที่ใช้อยู่สำหรับเกษตรกรในปัจจุบันยังมีข้อจำกัดในการคัดแยก ซึ่งมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ วิธีสังเกตจากลักษณะผลภายนอก เช่น สีผลไม่สม่ำเสมอ ผลบวมบูนขึ้นเป็นบางจุด กลีบเลี้ยงยกขึ้น รอบปากปลิงมีจุดสีน้ำตาล การสังเกตทำได้เฉพาะผลที่เก็บเกี่ยวใหม่ ทั้งนี้ผู้คัดแยกต้องมีประสบการณ์และความชำนาญสูง อีกวิธีหนึ่ง คือ การหาค่าความถ่วงจำเพาะโดยวิธีการลอย-จมในน้ำหรือน้ำเกลือความเข้มข้นร้อยละ 4 ผลที่จมส่วนใหญ่จะเป็นเนื้อแก้ว ผลที่ลอยส่วนใหญ่เป็นเนื้อปกติ [5] ผลมังคุดเนื้อปกติมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 1.012 [6] กระบวนการส่งออกมังคุดไปต่างประเทศ ส่วนใหญ่มีการคัดคุณภาพตามมาตรฐานโดยใช้วิธีความถ่วงจำเพาะซึ่งกำหนดให้ลักษณะเนื้อแก้วในผลมีได้ไม่เกิน 5, 10, 20 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนผลหรือน้ำหนักสำหรับมังคุดชั้นพิเศษ ชั้นหนึ่ง และชั้นสองตามลำดับ [7] การคัดแยกด้วยความถ่วงจำเพาะเป็นวิธีการวัดดั้งเดิมที่ใช้งาน [8] ซึ่งความแม่นยำในการวัดโดยวิธีนี้จะลดลงถ้ามีฝนตกชุกช่วงเก็บเกี่ยว รวมถึงเป็นระบบที่ใหญ่และซับซ้อนไม่เหมาะกับผู้ประกอบการรายย่อย ดังนั้นการตรวจสอบมังคุดเนื้อแก้วที่มีความแม่นยำ ใช้งานง่ายจึงเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจ

เทคนิคการตรวจสอบเพื่อคัดแยกมังคุดเนื้อแก้วถูกนำเสนอไว้หลากหลาย ได้แก่ การใช้

เครื่องมือวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงไฟฟ้า (Electrical impedance spectroscopy) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ทางไฟฟ้าของวัสดุเพื่อตรวจสอบมังคุดเนื้อแก้วก่อนกระบวนการแช่แข็งเพื่อส่งออก [9] แม้ว่าวิธีการนี้มีราคาถูก แต่ยังเป็นการวัดแบบทำลาย จึงไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในกระบวนการรับซื้อทั่วไป เทคนิคการตรวจสอบมังคุดเนื้อแก้วโดยใช้เรโซเนเตอร์รูปเกลียว วิเคราะห์พารามิเตอร์ S_{21} จากเรโซเนเตอร์โดยนำมังคุดมาวางด้านหน้า มังคุดที่มีเนื้อแก้วให้ค่า S_{21} สูงกว่ามังคุดที่มีแต่เนื้อปกติ [10] ระบบเหมาะกับการนำไปใช้งานภาคสนาม รวมถึงราคาถูก แต่ลักษณะการวางมังคุดตัวอย่างต้องใช้มือจับและหมุน ทำให้ค่าที่วัดได้อาจมีผลกระทบจากมือที่จับ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน เทคนิคการใช้คลื่นความถี่ไมโครเวฟเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจเพื่อคัดแยกมังคุดเนื้อแก้วในหลายลักษณะ ได้แก่ การวิเคราะห์พื้นที่ตัดขวางเรดาร์ (Radar cross section) และความถี่ธรรมชาติของมังคุดเนื้อปกติและมังคุดเนื้อแก้ว พบว่ามังคุดเนื้อแก้วและมังคุดเนื้อปกติตอบสนองต่อความถี่แตกต่างกัน [11] การทดสอบหลักการความถี่ดอปเปลอร์โดยวัดด้วยผลมังคุดขณะหมุนจากมังคุดเนื้อแก้วและมังคุดเนื้อปกติ พบว่าขนาดของความถี่ดอปเปลอร์ที่ได้จากมังคุดเนื้อแก้วมีค่าสูงกว่ามังคุดเนื้อปกติ [12] หรือการวิเคราะห์การกระจัดกระจายคลื่น (Scattered Wave) ซึ่งสะท้อนกับผลมังคุดที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ เพื่อคัดแยกมังคุดเนื้อแก้วและเนื้อปกติ [13] อย่างไรก็ตามการวัดด้วยคลื่นไมโครเวฟทั้ง 3 เทคนิค เป็นการทดสอบความเป็นไปได้ของการคัดแยกในห้องปฏิบัติการ จึงยังไม่มีกรอบออกเป็นระบบเพื่อนำไปใช้งานจริง แต่แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้คลื่นสะท้อนจากผลมังคุดเพื่อคัดแยกมังคุดเนื้อแก้ว

บทความนี้นำเสนอระบบคัดแยกมังคุดเนื้อแก้วที่ทำงานย่านความถี่เอ็กซ์ ใช้งานง่ายไม่ซับซ้อน และราคาประหยัด การวัดโดยไม่ทำลาย แสดงผลตามเวลาจริง โดยอาศัยคุณสมบัติไดอิเล็ก

ตริกที่ต่างกันของเนื้องม้คุดระหว่างเนื้อแก้วและเนื้อปกติ ส่วนที่ 2 ทฤษฎีของความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นและคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลาง ส่วนที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย การตรวจวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของม้คุด การจำลองการตรวจวัดคลื่นสะท้อนกลับจากผลม้คุด และระบบที่นำเสนอ ส่วนที่ 4 ผลการทดสอบระบบตรวจวัดม้คุดเนื้อแก้วต้นแบบ และส่วนที่ 5 สรุปและวิจารณ์

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อตรวจวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของม้คุดเนื้อแก้วและม้คุดเนื้อปกติในช่วงความถี่ 10-11 กิกะเฮิรตซ์
2. เพื่อสร้างระบบเซนเซอร์ตรวจจับม้คุดเนื้อแก้ว

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

คุณสมบัติการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟเมื่อคลื่นแพร่กระจายไปตกกระทบกับรอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด อธิบายได้ด้วยสัมประสิทธิ์การสะท้อน Γ ดังสมการที่ (1)

$$|E_r| = \Gamma |E_0| \dots \dots \dots (1)$$

โดย E_r คือ คลื่นสะท้อน และ E_0 คือ คลื่นตกกระทบ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแปรผันกับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลาง ซึ่งประกอบด้วยค่าสภาพยอมไฟฟ้า ϵ และ μ คือค่าความซึมซาบแม่เหล็ก ตัวกลางที่เป็นวัสดุไดอิเล็กตริก มีค่า μ ใกล้เคียงกัน กรณีที่คลื่นเดินทางจากตัวกลางที่ 1 คือ อากาศ ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์เป็น η_0 ตกกระทบไปยังตัวกลางที่สองที่มีค่าอิมพีแดนซ์เป็น η สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าดังสมการที่ (2) [14]

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

อิมพีแดนซ์ของตัวกลางมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกดังสมการที่ (3)

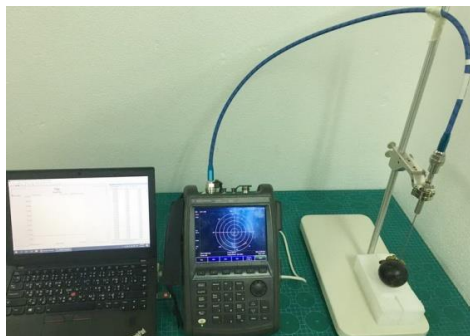
$$\eta = \sqrt{\mu / \epsilon} \dots \dots \dots (3)$$

เมื่อคลื่นเดินทางไปตกกระทบกับตัวกลางที่ 2 ขนาดของคลื่นสะท้อนจึงขึ้นอยู่กับค่าสภาพยอมไฟฟ้าของตัวกลางที่ 2 ทั้งนี้ค่าสภาพยอมไฟฟ้าเป็นจำนวนเชิงซ้อน มีส่วนจริง คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และส่วนจินตภาพ คือ ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) สำหรับม้คุดเนื้อแก้วและม้คุดเนื้อปกติ มีคุณสมบัติของเนื้อต่างกัน [15] และสภาพยอมไฟฟ้าไม่เท่ากัน จึงสามารถจำแนกม้คุดเนื้อแก้วได้จากขนาดของคลื่นสะท้อนกลับ

ระเบียบวิธีวิจัย

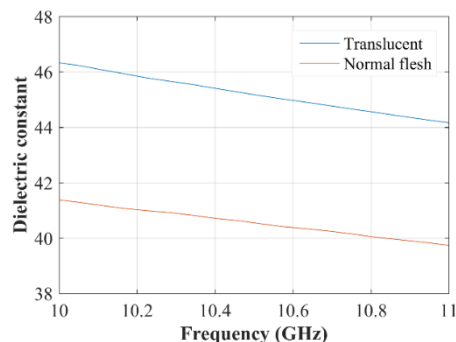
1. ตรวจวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของม้คุด

การตรวจวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของม้คุดทำในช่วงความถี่ 10 ถึง 11 กิกะเฮิรตซ์ ม้คุดตัวอย่างจากสวนผลไม้ถูกจัดเตรียมทั้งหมด 56 ลูก ประกอบด้วยม้คุดเนื้อแก้วและเนื้อปกติ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5.2 ถึง 5.6 เซนติเมตร ม้คุดตัวอย่างได้รับการทำสัญลักษณ์กำกับและระบุหมายเลขเพื่อตรวจวัดตามลำดับ การตรวจวัดแบ่งออกเป็นการวัดเนื้องม้คุดและวัดเปลือก โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายรุ่น N9916A ทำงานร่วมกับโพรบไดอิเล็กตริกชนิดสลิม (Slim form) ข้อมูลการตรวจวัดได้รับการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 1

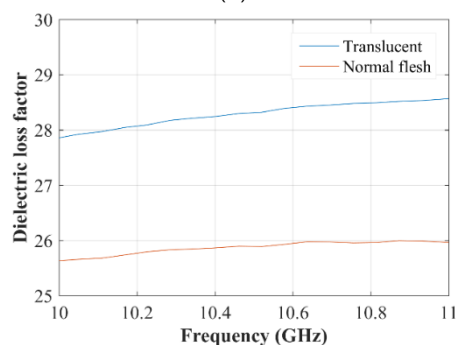


รูปที่ 1 การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเนื้อสัตว์

เพื่อให้การตรวจวัดมีประสิทธิภาพ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายถูกปรับเทียบ 3 ขั้นตอน คือ การวัดเทียบอากาศ (Open circuit) การวัดแบบลัดวงจร (Short circuit) ด้วยบล็อกลัดวงจร และการวัดโหลดด้วยน้ำเปล่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ส่วนแรกของมังคุดที่ตรวจวัด คือ เปลือกมังคุด การเตรียมตัวอย่างทำโดยใช้ของมีดคว้านเปลือกให้มีขนาดเท่ากับหัวสลิมโพรบไดอิเล็กตริก โดยมีความลึกไม่น้อยกว่าประมาณ 3 มิลลิเมตร ตัวอย่างได้รับการคว้านทั้งหมด 4 ตำแหน่งตามส่วนที่ระบุของมังคุด 1 ผล หลังจากนั้นทำการตรวจวัดเนื้อในตำแหน่งเดียวกันและทำในลักษณะเดียวกัน คือ การคว้านลงในเนื้อมังคุด และมีความลึกเท่ากับการคว้านเปลือก ข้อมูลคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเปลือกมังคุดถูกนำมาใช้สำหรับการจำลอง คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเนื้อมังคุดแบ่งออกเป็นเนื้อปกติและเนื้อแหว่ที่ความถี่ 10 ถึง 11 กิกะเฮิรตซ์ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของมังคุดเนื้อแหว่มีค่าสูงกว่าเนื้อปกติ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเนื้อแหว่อยู่ในช่วง 46.30-44.13 และเนื้อปกติอยู่ในช่วง 41.34-39.70 โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2 (ก) ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกของเนื้อมังคุดแหว่มีค่าสูงกว่าเนื้อมังคุดดีเช่นเดียวกัน ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกของมังคุดเนื้อแหว่อยู่ในช่วง 27.82-28.62 และมังคุดเนื้อปกติอยู่ในช่วง 25.64-26.02 แต่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น ดังรูปที่ 2.1 (ข)



(ก)



(ข)

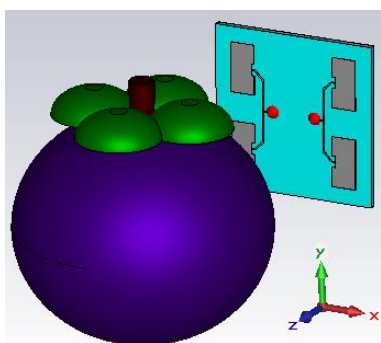
รูปที่ 2 (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ข) ค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกของเนื้อมังคุด

เมื่อพิจารณาความถี่ 10.525 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นความถี่สำหรับการพัฒนาระบบ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเนื้อมังคุดแหว่อยู่ 45.08 เนื้อมังคุดปกติอยู่ที่ 40.43 ส่วนตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกของเนื้อมังคุดแหว่และมังคุดเนื้อปกติอยู่ที่ 28.37 และ 25.89 ตามลำดับ ความแตกต่างของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการตรวจสอบมังคุดเนื้อแหว่ การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของมังคุดเนื้อแหว่และมังคุดเนื้อปกติใช้การตรวจวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการแยกมังคุดเนื้อแหว่ออกจากมังคุดเนื้อปกติด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2. จำลองการตรวจวัดมังคุด

คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของมังคุดที่ได้จากการตรวจวัดที่ความถี่ 10.525 กิกะเฮิรตซ์ และถูกใช้

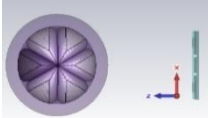
ในการพัฒนาโมเดลมั่งคุดสำหรับการวิเคราะห์ความสามารถในการคัดแยกมั่งคุดเนื้อแก้วด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การจำลองประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (CST Microwave studio 2019) ระบบตรวจวัดประยุกต์ใช้สายอากาศแพทช์แบบอาร์เรย์ แบ่งออกเป็นภาคส่งและภาครับอยู่บนวัสดุฐานรองและระนาบกราวด์เดียวกัน ให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -20 dB ที่ความถี่ 10.525 กิโลเฮิร์ตซ์ สายอากาศรับและสายอากาศส่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 5 เซนติเมตร มีระยะห่างระหว่างสายอากาศรับส่ง 2 เซนติเมตร จุดกึ่งกลางระหว่างสายอากาศรับส่ง ห่างจากผลมั่งคุดจำลอง 10 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3



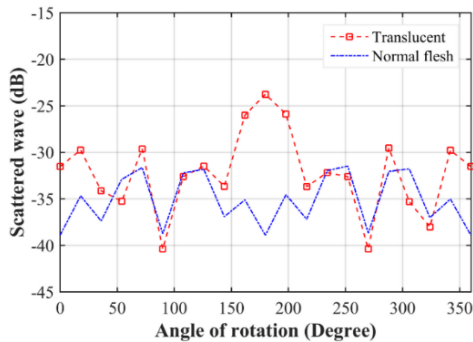
รูปที่ 3 จำลองการตรวจวัดมั่งคุดด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

โมเดลมั่งคุดเนื้อแก้วและมั่งคุดเนื้อปกติได้รับการปรับค่าคงที่ได้โอห์มมิกและค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกอย่างสอดคล้องกับผลการวัดด้วยโพรบไดอิเล็กตริก โมเดลของมั่งคุดเนื้อแก้วแบ่งออกเป็น 6 กليب และ 1 ก립เป็นเนื้อแก้วและเนื้อปกติ 5 ก립 ขั้นตอนการตรวจวัด คือ เมื่อโมเดลมั่งคุดหมุน 1 ครั้ง ทำการตรวจวัด 1 ครั้ง การหมุนปรับครั้งละ 18 องศา และหมุนทั้งหมด 20 ครั้ง เริ่มตั้งแต่มุม 0 ถึง 360 องศา โดยใช้จุดสังเกตจากด้านล่างของมั่งคุดโมเดล การหมุนทำในลักษณะหมุนตามเข็มนาฬิกาหรือจากซ้ายไปขวาและมีสายอากาศรับส่งอยู่ด้านข้าง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตำแหน่งเนื้อแก้ว 0 ถึง 360 องศา

องศา	ตำแหน่งเนื้อแก้ว 1 ก립
0°	
18°	
180°	
342°	

การจำลองเพื่อวิเคราะห์ความต่างของกำลังงานสะท้อน ($|S_{21}|$) ที่มีผลมาจากเนื้อแก้วด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคอวกาศว่างและวิเคราะห์กำลังงานที่ได้รับ เมื่อสังเกตที่ 0 องศา กรณีผลมั่งคุดที่มีเนื้อแก้วภายใน 1 ก립 และมั่งคุดเนื้อปกติทั้งหมดให้ค่ากำลังงานการสะท้อนกลับของ $|S_{21}|$ อยู่ที่ -31.54 เดซิเบล และ -38.92 เดซิเบล และที่ 18 องศา ค่าพารามิเตอร์ $|S_{21}|$ อยู่ที่ -29.76 เดซิเบล และ -34.69 เดซิเบล และที่ 36 ถึง 162 องศา ค่าพารามิเตอร์ $|S_{21}|$ อยู่ในช่วง -34.14 ถึง -26.03 เดซิเบล และ -37.39 ถึง -35.12 เดซิเบล และที่มุม 180 องศา สังเกตได้ว่ามั่งคุดที่มีเนื้อแก้วภายในให้ค่า $|S_{21}|$ อยู่ที่ 23.77 เดซิเบล และ มั่งคุดปกติอยู่ที่ 38.92 เดซิเบล และที่มุม 198 ถึง 360 องศา ค่าพารามิเตอร์ $|S_{21}|$ อยู่ในช่วง อยู่ในช่วง -25.9 ถึง -31.54 เดซิเบล และ -34.57 ถึง -38.92 เดซิเบล ตามลำดับ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 กำลังงานการสะท้อนจากการจำลองการตรวจวัดมังคุดเนื้อแก้ว

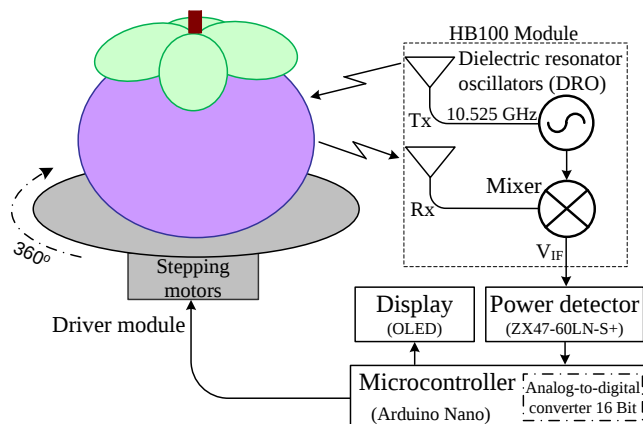
การจำลองการคัดแยกมังคุดเนื้อปกติและมังคุดเนื้อแก้วที่ความถี่ 10.525 GHz โดยมีมังคุดเนื้อแก้วอยู่ที่มุม 180 องศา ซึ่งโมเดลมังคุดเนื้อปกติให้ค่ากำลังงานการสะท้อนสูงสุดอยู่ที่ -32 เดซิเบล ที่มุม 72 องศา และสำหรับโมเดลมังคุดเนื้อแก้วให้ค่ากำลังงานสะท้อนกลับสูงสุดอยู่ที่ -24 เดซิเบล ที่มุม 180 องศา แสดงให้เห็นว่าเนื้อแก้วภายในผลมังคุดมีผลต่อกำลังงานสะท้อนที่แตกต่างจากมังคุดปกติ จากความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าการ

ตรวจสอบมังคุดเนื้อแก้ว ดังนั้นการพัฒนาระบบต้นแบบจึงได้รับความสนใจ

3. ระบบเซนเซอร์ที่นำเสนอ

3.1 โครงสร้างระบบ

การจำลองการตรวจสอบมังคุดด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการคัดแยกมังคุดเนื้อแก้ว ดังนั้นระบบการตรวจวัดจึงได้รับการพัฒนา โดยระบบประกอบด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูง (Oscillator) แบบไดอิเล็กทริกเรโซเนเตอร์ สายอากาศรับและสายอากาศส่ง (Tx and Rx Antenna) ทำหน้าที่รับส่งคลื่นความถี่ วงจรผสมสัญญาณ (Mixer) ทำหน้าที่ผสมสัญญาณความถี่เป็นคลื่นความถี่กลาง (Intermediate frequency: IF) อุปกรณ์ตรวจจับกำลังงาน วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 16 บิต บอร์ดอาดุยโนสำหรับการประมวลผลและตัดสินใจ จอแสดงผล (Display) วงจรขับและมอเตอร์สเต็ปเปอร์ที่ควบคุมการหมุนของผลมังคุดดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนผังการทำงานของระบบเซนเซอร์ตรวจวัดมังคุดเนื้อแก้ว

การทำงานของระบบที่ได้รับการนำเสนอคือ แหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูงทำหน้าที่สร้างกำลังงานความถี่เพื่อส่งออกไปยังวงจรผสม

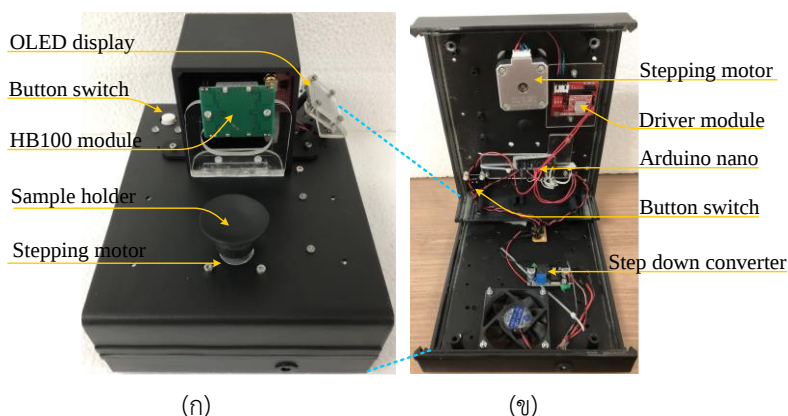
สัญญาณและส่งออกผ่านสายอากาศส่งไปยังวัสดุทดสอบและเกิดเป็นคลื่นสะท้อนกลับมายังสายอากาศรับ กำลังงานที่ได้รับถูกผสมสัญญาณ

และเปลี่ยนเป็นคลื่นความถี่กลาง เปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและเป็นสัญญาณดิจิทัล ข้อมูลถูกเก็บเข้าสู่หน่วยความจำ จากนั้นเปลี่ยนตำแหน่งการวัดบนผลมั่งคุดโดยใช้มอเตอร์สเต็ปเปอร์ ข้อมูลทั้งหมดได้รับการวิเคราะห์และแสดงผล

3.2 ระบบเซนเซอร์ต้นแบบ

ระบบตรวจวัดได้รับการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการคัดแยกมั่งคุดเนื้อแก้วจากการเปรียบเทียบระหว่างความถี่ท้องถิ่น (Local frequency) กับกำลังงานสะท้อนรอบผลมั่งคุดที่มุม 0 ถึง 360 องศา ระบบต้นแบบประยุกต์ใช้บอร์ดอาดุยโนนาโน 3.0 ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบ ภายในโมดูล HB100 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดความถี่ 10.525 กิโลเฮิร์ตซ์ สายอากาศรับและสายอากาศส่งอยู่บนระนาบกราวด์เดียวกัน และวงจรผสมสัญญาณโดยโมดูล HB100 ถูกติดตั้งด้านข้างฐานวางผลมั่งคุดดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) การทำงานของระบบคือ กำลังงานความถี่ถูกส่งออกจากภาคส่งไปยังมั่งคุดตัวอย่างและเกิดเป็นกำลังงานสะท้อนกลับมายังภาครับ กำลังงานที่ได้รับถูกผสม

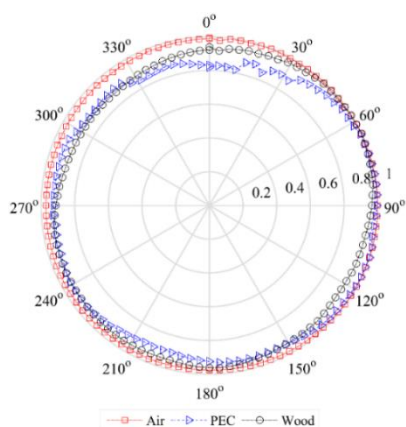
สัญญาณและให้เอาต์พุตเป็นกำลังงานของคลื่นความถี่กลาง V_{IF} กำลังงานความถี่ถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยอุปกรณ์ตรวจจับ กำลังงานแบบเชิงเส้น Mini Circuits ZX47-60LN-S+ ที่รับอินพุตในช่วง -60 ถึง 0 เดซิเบล มิลลิวัตต์ และให้เอาต์พุตในช่วง 1.6 ถึง 0.3 โวลต์ จากนั้นแรงดันไฟฟ้าถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ขนาด 16 บิต รุ่น AD7705 รองรับอินพุตได้ 0 ถึง 5 โวลต์ ข้อมูลการตรวจวัดในแต่ละครั้งถูกจัดเก็บเข้าหน่วยความจำ จากนั้นผลมั่งคุดได้รับการหมุน 3.6 องศา ด้วยมอเตอร์สเต็ปเปอร์ และตรวจวัดลักษณะเดียวกับก่อนหน้า โดยหมุนทั้งหมด 100 ครั้ง โครงสร้างภายในของระบบแสดงดังในรูปที่ 6 (ข) ข้อมูลจากการตรวจวัดได้รับการวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) และผลการตัดสินใจถูกแสดงบนหน้าจอโอแอลอีดี (OLED) ขนาด 0.96 นิ้ว ระบบเซนเซอร์ที่พัฒนาได้รับการทดสอบเพื่อตรวจหาเนื้อแก้วของมั่งคุดทั้งหมด 54 ลูก และใช้ค่าระดับ SD ในการแยกความแตกต่างระหว่างมั่งคุดเนื้อแก้วและเนื้อปกติ



รูปที่ 6 ระบบตรวจสอบมั่งคุดเนื้อแก้วต้นแบบ (ก) ภายนอก (ข) ภายใน

ผลการวิจัย

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยการตรวจวัดวัสดุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกแตกต่างกัน คือ อากาศ ไม้ทรงกลมและตัวนำทรงกลม ไม้ทรงกลมให้ค่าแรงดันอยู่ระหว่าง 77 ถึง 88 มิลลิโวลต์ และแรงดันของตัวนำทรงกลมอยู่ระหว่าง 69 ถึง 83 มิลลิโวลต์ กำลังงานสะท้อนตอบสนองตามคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงและระดับแรงดันที่ได้รับเปลี่ยนตามอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงานแบบเป็นเชิงเส้น ซึ่งให้แรงดันไฟฟ้าต่ำเมื่อกำลังงานของ V_{IF} สูงและให้แรงดันสูงเมื่อกำลังงานของ V_{IF} ต่ำ ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกันตามลักษณะของวัสดุ การวิเคราะห์กำลังงานการสะท้อนโดยตรงอาจส่งผลต่อความแม่นยำของระบบ ข้อมูลจึงได้รับการนอร์มัลไลซ์เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากขนาด การนอร์มัลไลซ์ทำได้โดยนำระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดหารระดับแรงดันจากการตรวจวัดเพื่อให้อัตราส่วนของระดับแรงดันเข้าใกล้ 1 ในทุก ๆ องศาการวัดดังรูปที่ 7



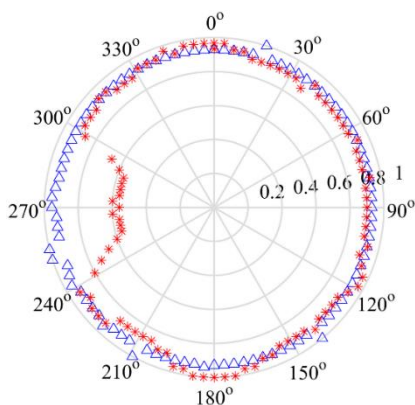
รูปที่ 7 การนอร์มัลไลซ์ระดับแรงดันจากการตรวจวัดอากาศ ตัวนำและไม้ทรงกลม

การทำงานของระบบแสดงให้เห็นการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ขนาดที่ส่งผลต่อกำลังงานสะท้อนที่ต่างกัน ส่งผลให้การตัดสินใจจากแรงดันเพียงอย่างเดียวอาจส่งผลต่อความแม่นยำ เพื่อลด

ผลกระทบที่เกิดจากรูปทรงของมังคุดด้วยการนอร์มัลไลซ์ระดับแรงดันไฟฟ้าก่อนการตัดสินใจจึงเป็นสิ่งที่ได้รับการพิจารณา กรณีที่เป็นมังคุดเนื้อปกติ การนอร์มัลไลซ์ส่งผลให้อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าเข้าใกล้ 1 ในทุก ๆ องศาการตรวจวัด ส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าจากการตรวจวัดมังคุดเนื้อปกติและเนื้อแ้วมีค่าต่างกัน สำหรับมังคุดที่มีเนื้อแ้วภายใน ในตำแหน่งของเนื้อแ้วให้อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ ระบบถูกนำมาใช้ในการตรวจวัดมังคุดเนื้อแ้วและมังคุดเนื้อปกติ ขนาดโดยเฉลี่ยของมังคุดมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 5.2 ถึง 5.8 เซนติเมตร การวางผลมังคุดจริงเพื่อทดสอบมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 8 (ก)



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 (ก) ตำแหน่งการวางผลมังคุดและ (ข) ผลการตรวจวัด

ข้อมูลการตรวจวัดมั่งคุดเนื้อแก้วและเนื้อปกติแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของกำลังงานการสะท้อนในรูปแบบของระดับแรงดันไฟฟ้า ข้อมูลได้รับการนอร์มัลไลซ์เพื่อลดอิทธิพลของขนาดและความผันผวนของข้อมูล และในขั้นตอนการตัดสินใจในการคัดแยกมั่งคุดเนื้อปกติและเนื้อแก้วใช้การวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) ตามสมการที่ (4)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}} \dots\dots\dots(4)$$

โดย σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน x_i คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าของการตรวจวัดแต่ละจุด ค่า μ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการตรวจวัดทั้งหมด N คือ จำนวนข้อมูลการตรวจวัดทั้งหมด ค่า SD ของมั่งคุดเนื้อปกติอยู่ในช่วง 0.023 ถึง 0.037 และเนื้อแก้วอยู่ในช่วง 0.092 ถึง 0.131 ความแตกต่างที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถประยุกต์ใช้การตัดสินใจจากค่า SD ในการคัดแยกมั่งคุดเนื้อแก้ว ค่าระดับอ้างอิงของ SD ถูกนำไปใช้ในกระบวนการตัดสินใจคัดแยกมั่งคุดและได้รับการบันทึกลงในโปรแกรมการประมวลผลของบอร์ดอาดุยโน ผลการตัดสินใจแสดงผลการวัดบนหน้าจอโอแอลอีดี จากนั้นตรวจวัดมั่งคุดตัวอย่างชุดที่ 2 ผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถตรวจวัดและวิเคราะห์ค่า SD และตัดสินใจจากค่าระดับอ้างอิงโดยให้ความแม่นยำที่ร้อยละ 84.4 แสดงความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

สรุปและอภิปรายผล

การพัฒนาแบบตรวจวัดเนื้อแก้วของมั่งคุดประยุกต์ใช้อัตราส่วนของอัตราขยายที่ความถี่ 10.525 กิโลเฮิร์ตซ์ วิเคราะห์กำลังงานของคลื่นความถี่กลางจากกำลังงานสะท้อนที่ได้จากการวัดรอบผลมั่งคุด นอร์มัลไลซ์ข้อมูลจากการตรวจวัด

เพื่อลดอิทธิพลจากรูปทรง คัดแยกมั่งคุดเนื้อแก้วด้วยระดับอ้างอิงของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน มั่งคุดเนื้อปกติและเนื้อแก้วได้รับการตรวจวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในช่วงความถี่ 10 ถึง 11 กิโลเฮิร์ตซ์ ทั้งหมดจำนวน 56 ผล โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของมั่งคุดเนื้อแก้วเฉลี่ยอยู่ที่ 45.08 เนื้อปกติอยู่ที่ 40.43 และตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกอยู่ที่ 28.32 และ 25.89 ตามลำดับ ระบบประกอบด้วยไดอิเล็กตริกเรโซเนเตอร์ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณความถี่สูง สายอากาศรับส่งทำงานในช่วงความถี่ 10.525 กิโลเฮิร์ตซ์ วงจรผสมสัญญาณความถี่สูงมอเตอร์สเต็ปเปอร์ทำหน้าที่หมุนผลมั่งคุดในขณะที่ตรวจวัดตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา อุปกรณ์ตรวจจับกำลังงาน วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และบอร์ดอาดุยโนทำหน้าที่ควบคุมระบบและประมวลผล มั่งคุดได้รับการตรวจวัดทั้งหมด 54 ลูก ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของมั่งคุดเนื้อแก้วและมั่งคุดเนื้อปกติเฉลี่ยอยู่ที่ 0.11 และ 0.03 ตามลำดับ ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงในการตัดสินใจ เมื่อทดสอบระบบ การตรวจวัดสามารถคัดแยกมั่งคุดเนื้อแก้วได้ร้อยละ 84.4 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถคัดแยกมั่งคุดได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน

ระบบเซนเซอร์ตรวจวัดเนื้อแก้วของมั่งคุดที่พัฒนาสามารถตรวจวัดโดยไม่ทำลายผลมั่งคุดระบบถูกสร้างและบรรจุภายในกล่องทำให้ขนาดกะทัดรัดเหมาะสำหรับใช้งานภาคสนาม ต้นทุนอุปกรณ์ต่ำ ซึ่งวิธีการตรวจสอบมั่งคุดในงาน [11]-[13] ที่เสนอไว้ก่อนหน้านี้ เป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และใช้เครื่องมือราคาสูงในห้องปฏิบัติการ การวัดรอบผลมั่งคุดใช้การหมุนแบบอัตโนมัติลดผลกระทบจากมือซึ่งต่างจากงานก่อนหน้านี้ [10] รวมถึงไม่มีผลกระทบจากแสงภายนอก ส่วนประมวลผลใช้การวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งความซับซ้อนต่ำ ส่งผลให้การตัดสินใจทำได้ง่ายมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยจาก
กองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
ประจำปี 2565 เลขที่ 2223/2565

References

- [1] Econ digest, (2021, 25 Aug.). Export value of Thai mangosteens in 2021 is expected to grow 14.6-18.8%, Kasikorn Research Center [Online]. Available: <http://www.kasikornresearch.com/en/analysis/k-social-media/Pages/mangosteen-FB-03-09-21.aspx>.
- [2] W. M. Aizat, F. H. Ahmad-Hashim, and S. N. S. Jaafar, “ Valorization of mangosteen, the queen of Fruits, and new advances in postharvest and in food and engineering applications: a review, *Journal of Advanced Research*, vol. 20, pp. 61–70, 2019
- [3] V. Suwanseree, S. Phansiri, C. Nontaswatsri, and C. Yapwattanaphun, *Mutation breeding to increase genetic diversity in mangosteen*,” Proceedings of International Symposium on Tropical Fruits, Ho Chi Minh, Vietnam, 24-26 September 2019, pp. 48-61.
- [4] A. Terdwongworakul, (2015, 21 Oct.). Translucent of mangosteen [Online] Kasetsart University Research and Development Institute, Available: <https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=21690>.
- [5] Rueso district agriculture office, “The gumboge and translucent disorder mangosteen,” *Agriculture News*, vol. 013, pp. 1-4, 2013.
- [6] Y. Theapparatt, S. Khongthong, P. Rodjan, K. Lertwittayanon, and D. Farongsamg, “Physicochemical properties and in vitro antioxidant activities of pyroligneous acid prepared from brushwood biomass waste of mangosteen, durian, rambutan, and langsat,” *Journal of Forestry Research*, vol. 30, no. 3 pp.1139–1148, 2019.
- [7] P. Chaisrichonlathan, “ Research and development on automatic quality grading machine of mangosteen using ultrasonic specific gravity sensor – based control system,” Research report, Department of Agriculture, Bangkok, 2016.
- [8] D. D. Matra, T. Kozaki, K. Ishii, R. Poerwanto, and E. Inoue, “ Comparative transcriptome analysis of translucent flesh disorder in mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) fruits in response to different water regimes,” *PLOS ONE*, vol. 14, no. 7, pp. 1-20, 2019.
- [9] J. C. Caicedo-Eraso, F. O. Diaz-Arango, and A. Osorio-Alturo, “ Electrical impedance spectroscopy applied to quality control in the food industry,” *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, vol.21, no. 1, pp.1-20, 2020.
- [10] C. M. O. Muvianto, M.G.R. Afrizal, S. Ariessaputra, K. Yuniarto, S. M. A. Sasongko, B. Darmawan, and S. Ch, “ Mangosteen flesh condition detector based on microwave non-destructive technique using spiral resonator sensor’s,” *Jurnal Rekayasa Elektrika*, vol.18, no.1, pp.28-34, 2022.

- [11] P Leekul, and M Krairiksh, “*Measured natural frequencies of mangosteens,*” 2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), pp.334-335, 2018.
- [12] P Leekul, and M Krairiksh, “*A sensor for fruit classification using doppler radar,*” 2018 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), pp.1-2, 2018.
- [13] H. N. Dao, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh, “*Approximated backscattered wave models of a Lossy concentric dielectric sphere for fruit characterization,*” Electronics 2022, 11, 1521.
- [14] D. M. Pozar, “*Microwave engineering,*” 4th ed. John Wiley & Sons. USA, 2012.
- [15] C. Wongs-Aree and S. Noichinda, “*Glycolysis fermentative by-products and secondary metabolites involved in plant adaptation under Hypoxia during pre- and postharvest,*” *Hypoxia and Anoxia*. Intech Open, pp. Dec. 12, 2018. doi: 10.5772/intechopen.80226.