

**การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความหวานของสารละลาย
และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านด้วยคลื่นไมโครเวฟ**
**Study of Correlation between Sugar Content of Solution
and Transmission Coefficient with Microwave**

พรพิมล ฉายแสง

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี Email : pornpimon.c@rbru.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟผ่านสารละลายเพื่อใช้เป็นแนวทางในแบ่งระดับความหวานของสารละลาย ระบบเซนเซอร์ใช้สายอากาศไมโครสตริปทั้งสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ที่ถูกออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ขั้นตอนการวัดใช้คลื่นไมโครเวฟส่งผ่านสารละลายตัวอย่างที่สร้างมาจากน้ำเชื่อมเข้มข้นเจือจางด้วยน้ำบริสุทธิ์ ผ่านการวัดค่าความหวานด้วยเครื่องวัดความหวาน เพื่อให้ได้ระดับความหวานตั้งแต่ 0, 5, 10, 15, 20, 25, และ 30 %brix จำนวนทั้งหมด 7 ตัวอย่าง สายอากาศส่งและรับติดตั้งอยู่ด้านข้างทั้ง 2 ด้าน ของภาชนะบรรจุ อุปกรณ์ส่งเคราะห์ความถี่สร้างสัญญาณความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ส่งผ่านสายอากาศส่งเพื่อให้คลื่นเดินทางผ่านสารละลายไปยังสายอากาศรับเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ผลการทดสอบสารละลายตัวอย่างพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบสารละลายตัวอย่าง ที่มีระดับความหวานตั้งแต่ 0 -30 %brix มีค่าอยู่ในช่วง 2.420 - 2.549 โวลต์ แต่ระดับความหวานมีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยแตกต่างกันชัดเจน อยู่ที่ 0.02 โวลต์ และจากข้อมูลที่วัดได้ทั้งหมด 10 ค่า มีค่าใกล้เคียงกันทำให้มีค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำมาก เพียงพอสำหรับการคัดแยกกระตบความหวานของสารละลาย ระบบที่นำเสนอมีความเหมาะสมสำหรับการตรวจสอบปริมาณความหวาน

คำสำคัญ : ปริมาณความหวาน, ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน, คลื่นไมโครเวฟ

Abstract

This paper presents a study of a microwave transmission coefficient transmitted to soluble solid contents in order to investigate a level of sugar contents of the soluble solid contents. The proposed microwave sensor uses microstrip antennas to be transmitting and receiving antennas. The antennas are designed at the operating frequency of 2.45 GHz. The testing process is accomplished by a microwave transmission to a sample solution of the syrup, which is diluted by water. The sugar content levels are measured by a brix refractometer classified by 7-sample levels of sugar contents with 0, 5, 10, 15, 20, 25 and 30 %brix. The transmitting and receiving antennas are located at the both sides of the container. The synthesizer uses to generate the frequency of 2.45 GHz in order to feed the transmitting antenna. The 2.45 GHz EM wave is transmitted from the transmitting antenna to the receiving antenna via the sample solution in order to a measured coupling signal. The measured coupling signal between transmitting and receiving antenna is converted to DC voltage. From the measured results of the sample solution, it is found the average voltage with 2.420-2.549 volt can be clearly classified the sugar constant into 0-30 %brix by 0.02 volt of voltage difference in each level. With the low standard deviation of the results accomplished by 10 times of sample measurements, it is enough to separate the levels of soluble solid contents. The proposed system is appropriated for detecting sugar content.

Keywords : Soluble solid content, Standard deviation, Transmission coefficient, Microwave

บทนำ

ความหวานมีอยู่ในพืชผลทางการเกษตร น้ำตาลสด และน้ำส้มสายชู ดังนั้นการตรวจสอบความหวานจึงได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในหมู่นักวิจัย โดยเฉพาะผลไม้ เช่น อ้อย ส้มเขียวหวาน แตงโม และแอปเปิล เป็นต้น วิธีการตรวจสอบความหวานมีอยู่หลากหลายเทคนิค เช่น การตรวจสอบความหวานของน้ำส้มสายชูด้วยเทคนิค Near-infrared spectroscopy (NIR) ที่ตรวจสอบโดยใช้คลื่นที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 350 นาโนเมตร ถึง 1050 นาโนเมตร และใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อวิเคราะห์และแบ่งระดับความหวาน ซึ่งให้ความแม่นยำในการวัดสูง (Liu, Wang, & He, 2008) แต่เนื่องจากอุปกรณ์หรือเครื่องวัด NIR ยังคงมีราคาสูง จึงไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้งานจริง การตรวจสอบความหวานยังได้รับความสนใจนำไปใช้กับน้ำแตงโมโดยวัดที่ความถี่ 0.2 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 20 กิกะเฮิรตซ์ ข้อมูลที่ได้จากการวัดคือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ถูกนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณความหวาน (Isa, Noraishah, Shamsudin & Marhaban, 2009) ซึ่งการตรวจวัดดังกล่าวถูกทดลองภายในห้องปฏิบัติการ และมีความซับซ้อนในการขั้นตอนการวัด ต่อมาได้มีการวัดความหวานของผลแตงโมและผลแอปเปิลด้วยโพรบไดอิเล็กตริก เพื่อวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลแตงโมและผลแอปเปิลในช่วงความถี่ 10 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 1.8 กิกะเฮิรตซ์ (Nelson, Guo & Trabasi, 2008) ซึ่ง

การวัดในวิธีดังกล่าวใช้การวัดในช่วงความถี่กว้างและใช้เครื่องมือที่มีราคาสูง จึงไม่เหมาะสำหรับการสร้างเพื่อใช้งานจริง ปริมาณความหวานขององุ่นก็ได้รับความสนใจในการตรวจสอบความหวานเช่นกัน โดยใช้การตรวจสอบด้วยโพรบไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีการเปรียบเทียบปริมาณความหวานขององุ่นในแต่ละอุณหภูมิและความชื้นที่เปลี่ยนแปลง (Tulasidas & Raghavan, 1995) และการตรวจสอบความหวานและความแน่นของเนื้อแอปเปิลฟูจิ ได้รับการทดสอบด้วยโพรบไดอิเล็กตริกและวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายในช่วงความถี่ 10 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 4,500 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งให้ความแม่นยำในการวัด $R^2 = 0.67$ (Guo, Zhu & Nelson, 2011) การวัดในลักษณะนี้มีความซับซ้อนและให้ความแม่นยำในการตรวจสอบความหวานไม่ชัดเจน

ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ต้องการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการตรวจสอบความหวานด้วยเทคนิคการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟ โดยศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความหวานของสารละลายตัวอย่างกับความสามารถในการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟของสารละลายที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ระบบเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นประกอบด้วยสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ชนิดสายอากาศไมโครสตริปซึ่งออกแบบให้วางอยู่ตรงข้ามกัน กึ่งกลางด้วยภาชนะบรรจุสารละลายตัวอย่างสำหรับวัดวิเคราะห์ค่ากำลังงานไฟฟ้าที่รับได้จาก

สายอากาศรับผ่านวงจรตรวจจับกำลังงานไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้า เพื่อศึกษาถึงแนวโน้มการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบคัดแยกระดับความหวานสารละลายด้วยการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการส่งผ่านคลื่นย่านความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ของสารละลายที่มีระดับความหวานแตกต่างกัน

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาถึงความสามารถในการส่งผ่านคลื่นย่านความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ของสารละลายที่มีระดับความหวานแตกต่างกัน มีขั้นตอนดังนี้

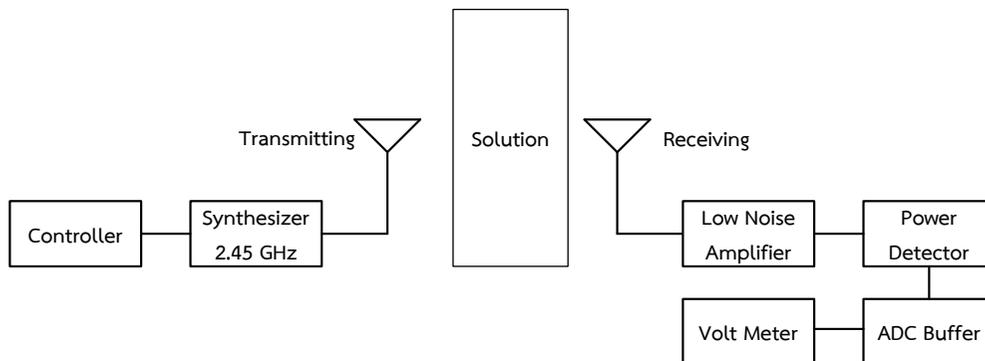
1. ออกแบบสายอากาศ ในการวิจัยนี้เลือกใช้สายอากาศไมโครสตริปรูพวงกลม เนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่สร้างง่าย มีขนาดกะทัดรัดสะดวกต่อการนำไปประยุกต์ใช้ สายอากาศถูกออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ (f_r) 2.45 กิกะเฮิรตซ์ สร้างด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ 2 หน้าชนิด FR4 ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) 4.1 หนา (h) 1.414 มิลลิเมตร รัศมีของส่วนแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Patch) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) – (2) (Balanis, 2005)

$$r = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi\epsilon_r F} \left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (1)$$

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

เมื่อ a คือ รัศมีของส่วนแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จากนั้นนำขนาดของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณมาสร้างเป็นแบบจำลองสายอากาศเพื่อทดสอบสมรรถนะของสายอากาศ ($|S_{11}|$) ให้ได้ขนาดของสายอากาศที่สามารถทำงานได้ดีในช่วงความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ นำขนาดที่ได้จากการจำลองมาใช้สร้างเป็นสายอากาศต้นแบบเพื่อใช้ในระบบเซนเซอร์ต่อไป

2. สร้างระบบเซนเซอร์ ระบบเซนเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีแผนผังการทำงานของระบบแสดงดังภาพที่ 1 โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างระการวัดประกอบด้วย อุปกรณ์สังเคราะห์ความถี่ (Synthesizer) รุ่น nRF2401A (Nordic, 2006) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ด้วยกำลังส่ง 5 เดซิเบลมิลลิวัตต์ (dBm) ถูกควบคุมการทำงานด้วยอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้รุ่น MAXII EPM570 CPLD (Altera, 2009) เชื่อมต่ออยู่กับสายอากาศส่ง สายอากาศรับจะติดตั้งอยู่ตรงข้ามกับสายอากาศส่งกึ่งกลางด้วย



ภาพที่ 1 แผนผังการทำงานของระบบเซนเซอร์

สารละลายตัวอย่างที่นำมาทดสอบ สายอากาศรับเชื่อมต่อกับวงจรขยาย สัญญาณรบกวนต่ำ (Low noise amplifier) รุ่น Max2641 (Maximintegrated, 2015) วงจรตรวจจับกำลังงานไฟฟ้า (Power detector) รุ่น MAX4003 (Maximintegrated, 2006) ทำหน้าที่รับสัญญาณจากสายอากาศรับแล้ว แปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง และ บัพเฟอร์ขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงรุ่น MAX4475 (Maximintegrated, 2012) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงและ ลดสัญญาณรบกวนก่อนที่จะวัดค่าที่ได้ด้วย เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า (Volt meter) ต่อไป

3. เตรียมสารละลายตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ สารละลายตัวอย่างที่ใช้เป็น สารละลายที่มีระดับความหวานแตกต่างกัน สร้างมาจากน้ำเชื่อมเข้มข้นเจือจางด้วยน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งผ่านการวัดค่าความหวานด้วย เครื่องวัดความหวาน (Brix refractometer) เพื่อให้ได้ระดับความหวานตั้งแต่ 0, 5, 10, 15, 20, 25, และ 30 %brix จำนวน ทั้งหมด 7 ตัวอย่าง

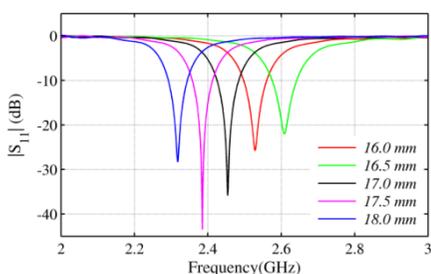
4. การทดสอบความสามารถในการ ส่งผ่านคลื่นโดยนำสารละลายตัวอย่างที่มีความหวานทั้ง 7 ระดับมาทดสอบด้วยระบบ เซนเซอร์ที่สร้างขึ้นเพื่อศึกษาระดับกำลัง งานของสัญญาณไฟฟ้าที่รับได้ของ สายอากาศรับด้วยการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้า จากเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า สารละลาย แต่ละตัวอย่างจะถูกวัดทั้งหมด 10 ครั้ง นำค่า ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากนั้นวิเคราะห์ผลที่ได้

5. การทดสอบความสามารถการทน ต่อสัญญาณรบกวน โดยทำการศึกษาถึง ค่าแรงดันไฟฟ้าที่รับได้จากสายอากาศรับ เช่นเดียวกับข้อที่ 4 แต่ทำการทดสอบใน สภาวะที่ไม่มีกำบังสัญญาณรบกวน ไต ๆ จากภายนอก วิเคราะห์ผลที่ได้ เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากข้อ 4

ผลการวิจัย

จากการคำนวณขนาดสายอากาศ ไมโครสตริปนำค่าที่ได้มาใช้เป็นค่าเบื้องต้น ในการสร้างสายอากาศจำลองด้วย

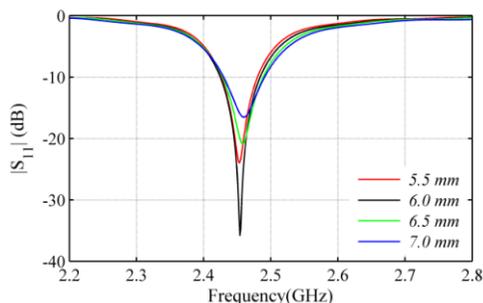
โปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทดสอบสมรรถนะของสายอากาศด้วยการปรับรัศมีของส่วนแพร่กระจายคลื่น เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดกับค่า $|S_{11}|$ จำลองปรับขนาดรัศมีของส่วนแพร่กระจายคลื่น ตั้งแต่ 16 – 18 มิลลิเมตร พบว่ารัศมีที่เล็กลงสายอากาศไมโครสตริปจะทำงานที่ความถี่สูงขึ้น ผลการจำลองปรับรัศมีของส่วนแพร่กระจายคลื่นแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศเมื่อปรับรัศมีของส่วนแพร่กระจายคลื่น

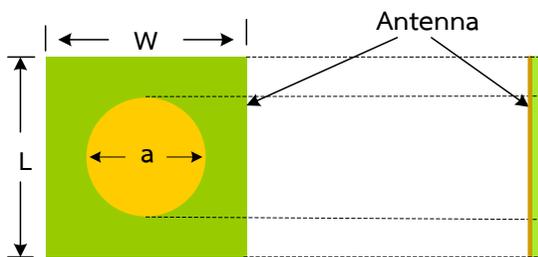
ดังนั้นในงานวิจัยนี้เลือกใช้รัศมีของสายอากาศที่ 17 มิลลิเมตร เนื่องจากสายอากาศสามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ได้ดีที่สุด คือ มีค่า $|S_{11}|$ น้อยกว่า -10 เดซิเบล ขั้นตอนต่อมาคือการจำลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของตำแหน่งจุดป้อนสัญญาณต่อค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศ โดยสายอากาศที่ออกแบบนี้ใช้การป้อนสัญญาณแบบโพรบ (Probe feed) จำลองปรับตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณห่างจากจุดศูนย์กลางของส่วนแพร่กระจายคลื่นตามแนวรัศมีเป็นระยะ 5.5 ถึง 7.0 มิลลิเมตร พบว่าที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ระยะ 6.0 มิลลิเมตรนั้น

สายอากาศมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำสุด ผลที่ได้จากการปรับจุดป้อนสัญญาณแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศเมื่อปรับตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระยะจุดป้อนสัญญาณที่ 6.0 มิลลิเมตร ลักษณะของสายอากาศจำลองแสดงดังภาพที่ 4 และขนาดของสายอากาศจำลองที่สามารถทำงานได้ดีที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ แสดงดังตารางที่ 1



ภาพที่ 4 สายอากาศจำลอง

ตารางที่ 1 ขนาดของสายอากาศไมโครสตริป

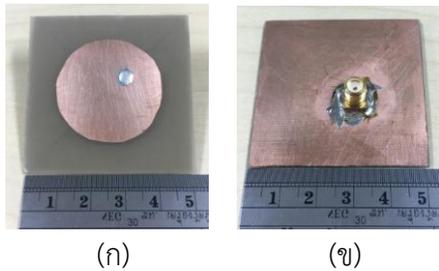
ขนาด (เซนติเมตร)	W	L	a
	5	5	3.4

จากนั้นนำขนาดของสายอากาศที่ได้จากการจำลองมาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ

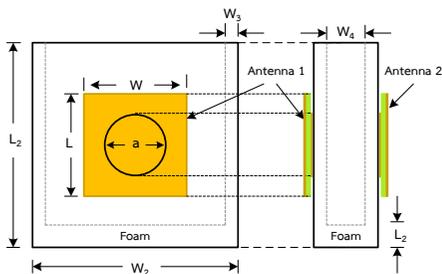
จำนวน 2 ตัว เพื่อใช้เป็นสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ลักษณะของสายอากาศต้นแบบแสดงดังภาพที่ 5

ตารางที่ 2 ขนาดของภาชนะโฟม

ขนาด (เซนติเมตร)	W_2	W_3	W_4	L_2	L_3
	20	1.5	4	20	2



ภาพที่ 5 สายอากาศต้นแบบ
(ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง



ภาพที่ 6 ระบบเซนเซอร์ที่นำเสนอ

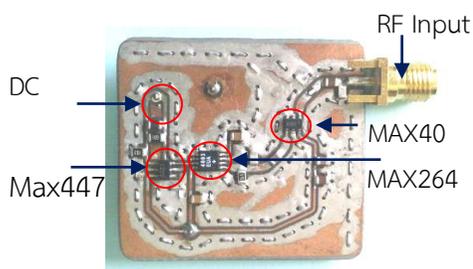
ระบบเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นทำงานโดยสารละลายตัวอย่างที่นำมาทดสอบจะถูกบรรจุอยู่ตรงกลางระหว่างสายอากาศส่งและรับ โดยใช้โฟมที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด $20 \times 4 \times 20$ เซนติเมตร ขอบของโฟมหนา 1.5 เซนติเมตร สำหรับใส่สารละลายตัวอย่าง การเลือกใช้โฟมเนื่องจากโฟมมีค่าคงที่

ไดอิเล็กตริก 1.3 เข้าใกล้ค่าคงที่ ไดอิเล็กตริกของอากาศ จึงลดผลกระทบที่เกิดจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกได้ สายอากาศไมโครสตริปถูกติดตั้งไว้ที่ด้านข้างของโฟม 2 ด้าน โดยหันหน้าเข้าหากัน การออกแบบลักษณะของการติดตั้งสายอากาศไมโครสตริปรับและส่งกับโฟมในระบบเซนเซอร์แสดงดังภาพที่ 6 ขนาดของโฟมแสดงดังตารางที่ 2 จากนั้นนำไปสร้างเป็นระบบเซนเซอร์ต้นแบบต่อไปภาพที่ 6 ขนาดของโฟมแสดงดังตารางที่ 2

ระบบเซนเซอร์ต้นแบบที่สร้างขึ้นในส่วนของภาคส่งประกอบด้วยอุปกรณ์กำเนิดความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ซึ่งถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ชนิด CPLD ดังภาพที่ 7 และวงจรในส่วนของภาครับประกอบด้วยวงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ วงจรตรวจจับกำลังงานไฟฟ้า วงจรบัฟเฟอร์ ซึ่งถูกสร้างเป็นวงจรรวมเดียวกันเพื่อลดขนาดของระบบ แสดงดังภาพที่ 8 นำวงจรภาครับและส่งมาติดตั้งกับโฟมเพื่อใช้ทดสอบการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟต่อไป



ภาพที่ 7 อุปกรณ์สังเคราะห์ความถี่



ภาพที่ 8 วงจรในส่วนของภาครับของระบบ

หลังจากสร้างระบบเซนเซอร์เรียบร้อยแล้ว นำสารละลายตัวอย่างที่มีความหวาน 7 ระดับ มาทดสอบที่ตัวอย่างโดยทดสอบตัวอย่างที่จะทดสอบลงในโพลี จากนั้นอุปกรณ์สังเคราะห์ความถี่สร้างสัญญาณความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ส่งผ่านสายอากาศส่งเพื่อให้คลื่นเดินทางผ่านสารละลายไปยังสายอากาศรับ สัญญาณที่รับได้จากสายอากาศรับถูกส่งผ่านวงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ วงจรตรวจจับกำลังงานไฟฟ้า วงจรบัฟเฟอร์และอ่านค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ได้ด้วยเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า ขณะทำทดสอบระบบเซนเซอร์จะถูกป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกเพื่อให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำสูงสุด ผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบสารละลายตัวอย่างที่มีค่าระดับความหวานตั้งแต่ 0 -30 %brix มีค่าอยู่ในช่วง 2.420 - 2.549 โวลต์ โดยแต่ละระดับความหวานมีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยแตกต่างกันชัดเจน โดยมีค่าความแตกต่างกันเฉลี่ยอยู่ที่ 0.02 โวลต์ ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่อ่านได้จากเครื่องวัดกำลังงานไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากระบบเมื่อมีการป้องกันสัญญาณรบกวน

ระดับความหวาน (%brix)	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	2.549	0.00701
5	2.530	0.00673
10	2.509	0.00692
15	2.490	0.00704
20	2.467	0.00909
25	2.439	0.00636
30	2.420	0.00607

จากข้อมูลที่วัดได้ทั้งหมด 10 ค่า มีค่าใกล้เคียงกันทำให้มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำมาก จากผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อแบ่งระดับความหวานโดยใช้สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟ ขั้นตอนต่อมาทดสอบความสามารถในการต้านทานสัญญาณรบกวนของระบบเซนเซอร์ โดยทำการทดสอบเช่นเดียวกับขั้นตอนก่อนหน้า แต่ไม่มีการใช้อุปกรณ์ป้องกันสัญญาณรบกวนใด ๆ ซึ่งพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่วัดได้ในสภาวะนี้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าในสภาวะที่มีการป้องกันสัญญาณรบกวน และค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยยังคงมีความแตกต่างกันอยู่ชัดเจนในแต่ละระดับความหวาน แต่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่วัดได้ทั้ง 10 ค่า มีค่าสูงขึ้นแสดงถึงแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่วัดได้มีค่า

แตกต่างกันเพิ่มมากขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 กำลังงานไฟฟ้าที่วัดได้จากระบบเมื่อไม่มีการป้องกันสัญญาณรบกวน

ระดับความหวาน (%brix)	แรงดันไฟฟ้า(โวลต์)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	2.547	0.0120
5	2.529	0.0116
10	2.517	0.0146
15	2.489	0.0174
20	2.465	0.0131
25	2.437	0.0120
30	2.422	0.0124

สรุปและอภิปรายผล

ความสัมพันธ์ของปริมาณความหวานของสารละลายกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟ โดยอาศัยหลักการของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเปลี่ยน การทดลองนี้ใช้สารละลายตัวอย่างที่สร้างมาจากน้ำเชื่อมเข้มข้นผสมน้ำเพื่อเจือจางให้ได้ระดับความหวานที่ต้องการทดสอบ และวัดด้วยเครื่องวัดความหวาน เพื่อแบ่งระดับความหวานของสารละลายตัวอย่าง โดยกลุ่มสารละลายตัวอย่างที่ต้องการคือ 0 5 10 15 20 25 และ 30%brix เมื่อความหวานเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อค่าสภาพยอมไฟฟ้า ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการวัดความหวานของผลแอปเปิล (Guo, et al, 2011) จากนั้น

จึงทดสอบความสามารถในการตรวจสอบความหวานด้วยคลื่นไมโครเวฟจากระบบการวัดที่สร้างขึ้น เช่น เซอร์ตรวจสอบความหวานที่สร้างขึ้นประกอบด้วยสายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ส่งและรับคลื่นไมโครเวฟ สายอากาศถูกออกแบบให้แมทช์กับน้ำเปล่าเพื่อให้สามารถแบ่งระดับความหวานได้ชัดเจน และทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งขั้นตอนการออกแบบเริ่มต้นจากการคำนวณขนาดอย่างหยาบ จากนั้นจึงทำการจำลองการทำงานอย่างละเอียดด้วยโปรแกรมจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อหาขนาดของสายอากาศที่เหมาะสม แล้วจึงนำขนาดที่ได้มาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบเพื่อใช้เป็นสายอากาศส่งและสายอากาศรับของระบบเซนเซอร์สายอากาศติดตั้งอยู่ด้านข้างคนละฝั่งของภาชนะโพนสำหรับบรรจุสารละลายตัวอย่าง สัญญาณความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ถูกสร้างขึ้นที่ภาคส่งแล้วส่งออกด้วยสายอากาศส่งเดินทางผ่านสารละลายตัวอย่างไปยังสายอากาศรับ สัญญาณจากสายอากาศรับถูกส่งผ่านวงจรขยายสัญญาณก่อนถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อบันทึกค่าต่อไป จากผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากสารละลายตัวอย่างที่มีความหวานทั้ง 7 ระดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อระดับความหวานเพิ่มมากขึ้นค่าสภาพยอมไฟฟ้าจะลดลงในทิศทางเดียวกับการวัดความหวานของผลแตงโม (Nelson, et al, 2007) เมื่อความหวานเพิ่มมากขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าที่

วัดได้มีค่าลดลงเนื่องจากสายอากาศที่ ออกแบบทำงานได้ดีกับน้ำเปล่าหรือความ หวานเท่ากับ 0 ดังนั้นเมื่อความหวานเพิ่ม มากขึ้น จึงส่งผลให้ความสามารถในการ ส่งผ่านทำได้ต่ำลง จากความแตกต่างที่ เกิดขึ้นจากการวัดของระบบเซนเซอร์ของ แรงดันไฟฟ้า ในแต่ละระดับที่ความหวานมี ค่าแตกต่างกัน สามารถแยกออกจากกันได้ อย่างชัดเจน ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.02 โวลต์ แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้หลักการส่งผ่าน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับแบ่งระดับความ หวานของสารละลายมีความเป็นไปได้ ชัดเจน นอกจากนี้ระบบเซนเซอร์ยังถูก ทดสอบกับสภาพแวดล้อมในการใช้งานจริง หรือในสถานะที่มีสัญญาณรบกวน จากการ ทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบเซนเซอร์ที่ สร้างขึ้นทนต่อสัญญาณรบกวนและสามารถ ทำงานได้ดี

เอกสารอ้างอิง

Altera. (2009). **MAX II device handbook**. MAXII EPM570 CPLD. Retrieved [10 July 2016] from www.altera.com.

Balanis, C. A. (2005). *Antenna theory*. (3rd ed). Arizona: John Welly & sons.

Guo, W., Zhu, X. & Nelson, S. O. (2013). Permittivities of watermelon pulp and juice and correlation with quality indicators. **International**

Journal of Food Properties, vol. 16, pp. 475–484.

- Guo,W., Zhu, X., Nelson, S. O., Yue, R., Liu, H. & Yi L. (2011). Maturity effects on dielectric properties of apples from 10 to 4500 MHz. **Food science and technology journal**, Vol.44, pp. 224-230.
- Isa, M. M., Ibrahim, N., Shamsudin, R. & Marhaban, M. H. (2009). Sugar content in watermelon juice based on dielectric properties at 10.45 GHz. **Proceeding of 2009 IEEE Student Conference on Research and Development**, UPM Serdang, Malaysia, Nov 16-18, 2009.
- Liu, F., Wang, L. & He, Y. (2008). Measurement of sugar content of white vinegars using VIS/NEAR - INFRARED spectroscopy and back propagation neural networks. **Proceedings of the Seventh International Conference on Machine Learning and Cybernetics**, Kunming, 12-15 July 2008.
- Maximintegrated. (2006) **MAX4003 evaluation kit**. Datasheet. Retrieved [10 July 2016] from www.maxim-ic.com.

Maximintegrated. (2012) **MAX4475 wide-band, low-noise. low-distortion operational amplifiers.** Datasheet. Retrieved [10 July 2016] from www.maxim-ic.com

Maximintegrated. (2015) **Max2641 300 MHz to 2500 MHz SiGe ultra-low-noise amplifier.** Datasheet. Retrieved [10 July 2016] from www.maxim-ic.com

Nelson, S. O., Guo, W. & Trabelsi, S. (2008). Investigation of dielectric sensing for fruit quality determination. **IEEE Sensors Applications Symposium**, Atlanta, GA, 12-14 February 2008.

Nelson, S. O., Guo, W., Trabelsi, S. & Kays, S. J. (2007). Sensing quality of watermelons through dielectric permittivity. **IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium**, Honolulu, June 9-15, 2007.

Nordic Semiconductor. (2006) **Single chip 2.4 GHz transceiver nRF2401A.** Datasheet. Retrieved [10 July 2016] from www.nordicsemi.com.

Tulasidas, T.N., & Raghavan, G. S. V. (1995). Dielectric properties of grapes and sugar solutions at 2.45 GHz. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**, vol. 30, No. 2, pp. 118-123.