



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาอุปกรณ์ทดสอบคุณภาพน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มแบบพกพา
Handheld Quality Tester for Ready-to-drink
Palmyrah Palm Juice

ปาณิสรา แก้วสวัสดิ์
จินตนา วิบูลย์ศิริกุล
ราเชน คณະนา

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
กันยายน 2561

ชื่อเรื่อง

การพัฒนาอุปกรณ์ทดสอบคุณภาพน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่ม

แบบพกพา

ปีที่ทำวิจัย

พ.ศ. 2559

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ นำเสนอ การตรวจสอบคุณภาพของน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ โดยศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ คือ น้ำตาลโตนดสดแท้ น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว และ น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย ที่ความถี่ 1 ถึง 4 กิกะเฮิรตซ์ และค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ตั้งแต่ 18 ถึง 32 องศาบริกซ์ โดยใช้วิธีโพรบแบบแกนร่วมปลายเปิด ซึ่งพบว่า น้ำตาลโตนดสดแต่ละชนิดมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย และ ค่าความลึกที่แตกต่างกัน โดยน้ำตาลโตนดสดแท้ จะมีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกต่ำที่สุด จากนั้น ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดแต่ละชนิดโดยใช้วิธีอากาศว่าง ซึ่งเป็นการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟที่สามารถเดินทางผ่านตัวกลางซึ่งคือน้ำตาลแต่ละชนิดได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย จาก ผลการทดสอบ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน โดยน้ำตาลโตนดสดแท้มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ได้ก่อนหน้านี้ จึงสามารถใช้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านตรวจสอบคุณภาพของน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มได้ นอกจากนี้ ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและความถี่ ซึ่งพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีความสัมพันธ์กับค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก และค่าการสูญเสียแทนเจนต์เป็นอย่างมาก สำหรับผลของความถี่นั้น พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีความสัมพันธ์ระดับมากกับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 2-2.5 กิกะเฮิรตซ์ จึงได้เลือกความถี่สำหรับการออกแบบและสร้างมอดูลระบบทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ และได้ทดสอบการทำงานของมอดูล ดังกล่าว โดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ซึ่งพบว่า ผลที่ได้มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

Title	Handheld Quality Tester for Ready-to-drink Palmyrah Palm Juice
Year	2016

ABSTRACT

This research proposed the quality evaluation of ready to drink Palmyra Palm Juice using microwave transmission coefficient. The pure Palmyra palm juice, the juice added with coconut sugar, and the juice added with granulated sugar were studied at the frequency from 1 to 4 GHz with the total soluble solid of 18 to 32 °Brix using the open-ended coaxial probe method. The results showed that the different juice provided the different dielectric constant, dielectric loss factor, loss tangent, and penetration depth. The pure juice had the lowest dielectric property results. The transmission coefficient that measured by the free space method was also determined. It measured the transmission signal sending through the juice by using the network analyzer. The results revealed that the different juice also provided the different transmission coefficient corresponded to the prior dielectric property results. It implied that the transmission coefficient can be used to evaluate the pure and impure Palmyra palm juice. In addition, the relationship between the transmission coefficients, the dielectric property, and frequency was studied. It found that the transmission coefficient had a high relationship to the dielectric loss factor and loss tangent. For the frequency, the transmission coefficients had high relationship to the dielectric property at 2-2.5 GHz. Then, the frequency of 2.45 GHz was selected to design and construct the testing module of transmission coefficient. The results from the module were compared with the results from the network analyzer and found that they were in the same trend.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
สารบัญ.....	ค
สารบัญตาราง.....	ง
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 น้ำตาลโตนดสด.....	3
2.2.1 ลักษณะทางสรีรวิทยาและนิเวศวิทยาของตาลโตนด.....	3
2.2.2 การเก็บเกี่ยวน้ำตาลโตนดสด.....	4
2.2.3 องค์ประกอบของน้ำตาลโตนดสด.....	6
2.2.4 การผลิตน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่ม.....	7
2.3 การวัดคุณลักษณะของวัสดุด้วยวิธีการทางไมโครเวฟ.....	7
2.3.1 พารามิเตอร์ S.....	7
2.3.2 การใช้ค่าการส่งผ่านและค่าการสะท้อนกลับในการหา คุณสมบัติทางไมโครเวฟ.....	8
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.4.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ค่าการสะท้อนกลับและค่าการส่งผ่าน.....	8
2.4.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้คลื่นไมโครเวฟศึกษาความเข้มข้นของน้ำตาล.....	9
2.4.3 งานวิจัย เรื่อง ระบบทดสอบคุณภาพน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่ม ด้วยวิธีการทางไมโครเวฟ.....	10
2.5 กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	12
บทที่ 3 การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสด.....	13
3.1 บทนำ.....	13
3.2 วิธีการวัด.....	13
3.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	13
3.3.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก.....	13
3.3.2 ค่าความลึก.....	14
3.3.3 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์.....	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสด.....	15
3.4.1 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดแท้.....	15
3.4.2 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว.....	17
3.4.3 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย.....	19
3.4.4 อภิปรายผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ.....	21
3.5 สรุป.....	25
บทที่ 4 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสด.....	22
4.1 บทนำ.....	22
4.2 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน.....	22
4.3 วิธีการทดสอบ.....	23
4.4 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน.....	23
4.4.1 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดแท้.....	24
4.4.2 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว..	24
4.4.3 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย.....	25
4.4.4 อภิปรายผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ.....	25
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน.....	26
4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของน้ำตาลโตนดสดแท้.....	26
4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว.....	26
4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย.....	27
4.4.4 อภิปรายผลความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าสัมประสิทธิ์ การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ.....	28
4.4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์การสูญเสียและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ.....	28
4.5 สรุป.....	29
บทที่ 5 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดด้วยมอดูลระบบทดสอบ.....	30
5.1 บทนำ.....	30
5.2 วิธีการทดสอบ.....	30
5.3 มอดูลระบบการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสด...30	
5.4 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการอภิปรายผล.....	31
5.5 สรุป.....	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์.....	34
6.1 บทสรุปและวิจารณ์.....	34
6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา.....	35
เอกสารอ้างอิง.....	36
ภาคผนวก.....	38
ภาคผนวก ก	39

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

3.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุชนิดต่าง ๆ	14
4.1 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของน้ำตาลโตนดสดแท้.....	26
4.2 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว.....	27
4.3 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย.....	27
4.4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์การสูญเสียและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ ที่ความถี่แตกต่างกัน.....	28

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ระบบโครงข่าย 2 พอร์ตที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance) Z_0	7
2.2 ระบบการวัดคุณสมบัติทางไมโครเวฟของวัสดุด้วยสายอากาศ 1 คู่.....	8
2.3 กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	8
3.1 คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของน้ำตาลโตนดสดแท้ (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ข) ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริก (ค) ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย และ (ง) ค่าความลึก.....	16
3.2 คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ข) ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริก (ค) ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย และ (ง) ค่าความลึก.....	18
3.3 คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ข) ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริก (ค) ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย และ (ง) ค่าความลึก.....	20
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดแท้.....	24
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว.....	24
4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย.....	25
5.1 มอดูลระบบการทดสอบ.....	31
5.6 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน.....	31

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่ม เป็นเครื่องดื่มน้ำผลไม้ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในกลุ่มผู้บริโภค เนื่องจากมีรสชาติหวาน มัน อร่อย และให้ความรู้สึกดับกระหายได้เป็นอย่างดี รวมทั้งปัจจุบัน พฤติกรรมของผู้บริโภคหันมานิยมดื่มเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพมากขึ้นทำให้มีการผลิตน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มออกจำหน่ายทั้งโดยวิธีการแบบดั้งเดิมและวิธีสมัยใหม่ เช่น การพาสเจอร์ไรซ์ เพื่อจำหน่ายทั้งในประเทศและต่างประเทศเป็นจำนวนมาก

น้ำตาลโตนด เป็นน้ำหวานที่ได้จากช่อดอกของต้นตาลโตนด (*Borassus flabellifer* Linn.) ซึ่งเป็นพืชตระกูลปาล์มที่สามารถขึ้นได้ในเขตร้อน พบโดยทั่วไปในประเทศอินเดีย ไทย พม่า ศรีลังกา และ กัมพูชา (กี๊ ทธิบุญ, 2527) ต้นตาลโตนดสามารถพบได้ในหลายพื้นที่ในประเทศไทย โดยพบต้นตาลโตนดขึ้นหนาแน่นในแถบภาคใต้ของประเศนับตั้งแต่จังหวัดเพชรบุรีถึงจังหวัดสงขลา โดยจังหวัดที่มีต้นตาลโตนดมากที่สุด คือ จังหวัดเพชรบุรี ซึ่งมีต้นตาลโตนดประมาณ 2 ล้านต้น (สำนักงานเกษตรจังหวัดเพชรบุรี , 2551) โดยพบมากในอำเภอเมือง และอำเภอบ้านลาด น้ำตาลโตนดของจังหวัดเพชรบุรี เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีชื่อเสียงมาก เนื่องจากมีความหวานหอมน่ารับประทานมากกว่าน้ำตาลจากจังหวัดอื่น นักท่องเที่ยวทั้งชาวไทยและชาวต่างประเทศเมื่อเดินทางมาจังหวัดเพชรบุรีจะต้องซื้อผลิตภัณฑ์น้ำตาลโตนด โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำตาลสดเมืองเพชร

ปัจจุบันเนื่องจากน้ำตาลโตนดมีผู้นิยมบริโภคเป็นจำนวนมากและผลิตได้เพียงบางฤดูกาลเท่านั้น ซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภค ผู้ผลิตน้ำตาลโตนดสดบางรายจึงได้ปลอมปนส่วนผสมที่ให้ความหวานอื่น ๆ ผสมรวมกับน้ำตาลโตนดในขั้นตอนการผลิต เช่น น้ำตาลทราย น้ำตาลมะพร้าว ซึ่งเป็นการยากสำหรับผู้บริโภคในการตรวจสอบคุณภาพของสินค้าดังกล่าว

น้ำตาลโตนดมีคุณสมบัติทางเคมี คือ มีค่าความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส อยู่ระหว่าง 1.058-1.077 ปริมาณของแข็งทั้งหมดอยู่ระหว่าง 15.2-19.7 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ปริมาณน้ำตาลซูโครสอยู่ระหว่าง 12.3-17.4 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ปริมาณเถ้าอยู่ระหว่าง 0.11-0.41 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร และปริมาณโปรตีนอยู่ระหว่าง 0.23-0.32 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร (Child, 1974) นอกจากนี้ เรณู แจ่มฟ้า (2545) ได้รายงานองค์ประกอบของน้ำตาลโตนดไว้ดังนี้ คือ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้เท่ากับ 16 องศาบริกซ์ พีเอช 5.5 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 16.8 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับร้อยละ 1.8 และปริมาณน้ำตาลซูโครสเท่ากับร้อยละ 15.0

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำตาลโตนดสด สามารถใช้แยกความแตกต่างของน้ำตาลโตนดสดแท้จากน้ำตาลโตนดสดที่มีน้ำตาลทราย หรือน้ำตาลมะพร้าวได้ โดยคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำตาลโตนดสดขึ้นกับชนิดของน้ำตาลและปริมาณของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบ (ปาณิสรา และคณะ, 2555) โดยน้ำตาลโตนดสดแท้จะมีสีเหลืองและสว่างน้อยกว่าน้ำตาลโตนดสดที่มีน้ำตาลชนิดอื่นผสม นอกจากนี้ น้ำตาลโตนดสดแท้มีปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์ต่ำกว่าน้ำตาลโตนดสดที่มีน้ำตาลทรายและน้ำตาลมะพร้าวผสม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบคุณสมบัติทางไมโครเวฟของน้ำตาลโตนดสด ซึ่งพบว่า ค่าการส่งผ่านของสัญญาณไมโครเวฟที่ส่งผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำตาลโตนดสดแท้มีค่าสูงที่สุด รองลงมา คือ น้ำตาลโตนดผสมน้ำตาลมะพร้าว และ

น้ำตาลโตนดผสมน้ำตาลทราย ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปผลจากงานวิจัยดังกล่าวได้ว่า ปริมาณน้ำตาลและชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของน้ำตาลโตนดสด สามารถใช้เป็นคุณสมบัติในการตรวจสอบคุณภาพของน้ำตาลโตนดสดด้วยวิธีการทางไมโครเวฟ อย่างไรก็ตาม เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางไมโครเวฟของน้ำตาลโตนดสดนั้น เป็นเครื่องกำเนิดและวัดสัญญาณไมโครเวฟซึ่งมีขนาดใหญ่ จึงไม่สะดวกในการนำไปทดสอบวัดคุณภาพน้ำตาลนอกห้องปฏิบัติการ

สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากงานวิจัยของปานิศา และคณะ ดังกล่าวข้างต้น เพื่อสร้างเครื่องทดสอบน้ำตาลโตนดสดที่มีขนาดเล็กสำหรับพกพาและใช้ทดสอบนอกห้องปฏิบัติการได้ โดยใช้หลักการวัดค่าการส่งผ่านระหว่างสายอากาศ 1 คู่ และใช้วงจรความถี่สูงขนาดเล็กแทนเครื่องกำเนิดและวัดสัญญาณไมโครเวฟขนาดใหญ่ โดยทำการทดสอบคุณสมบัติของเครื่องวัดดังกล่าวและเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับผลการทดลองที่ใช้เครื่องกำเนิดและวัดสัญญาณไมโครเวฟที่มีความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อสร้างอุปกรณ์ขนาดพกพาสำหรับทดสอบคุณภาพน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้หลักการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟระหว่างสายอากาศ 1 คู่

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. อุปกรณ์ทดสอบคุณภาพน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มด้วยคลื่นไมโครเวฟขนาดพกพา ช่วงความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์
2. สายอากาศทดสอบเป็นสายอากาศไดโพล 1 คู่ที่มีการโพลาไรซ์เป็นชนิดเดียวกัน
3. น้ำตาลโตนดสดที่ใช้ในการทดสอบมีปริมาตรเท่ากับทุกครั้ง และมีระยะเวลาการรับน้ำตาลจากต้นจนถึงระยะเวลาทดสอบเท่ากันทุกตัวอย่าง
4. น้ำตาลโตนดสดที่ใช้ในการทดสอบมาจากผู้ผลิตน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มในจังหวัดเพชรบุรี
5. น้ำตาลโตนดสดที่ทำการทดสอบ คือ น้ำตาลโตนดสดแท้ (น้ำตาลโตนดสด 100% ไม่มีการผสมสารให้ความหวาน) น้ำตาลโตนดสดที่มีการผสมสารให้ความหวาน (ปริมาณของสารให้ความหวานที่ผสมแตกต่างกัน)
6. สารให้ความหวานที่ผสมในน้ำตาลโตนดสดในการทดสอบ คือ น้ำตาลทราย และน้ำตาลมะพร้าว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้อุปกรณ์ทดสอบคุณภาพของน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มที่ใช้งานได้ง่ายและขนาดเล็ก
2. ได้องค์ความรู้เพื่อนำไปสู่การผลิตเครื่องทดสอบคุณภาพน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มในเชิงพาณิชย์ต่อไป

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาอุปกรณ์ทดสอบคุณภาพน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มแบบพกพา มีดังนี้

- (1) น้ำตาลโตนดสด
- (2) การวัดคุณลักษณะของวัสดุด้วยวิธีการทางไมโครเวฟ
- (3) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- (4) กรอบความคิดที่ใช้ในการวิจัย

2.2 น้ำตาลโตนดสด

น้ำตาลโตนดสดเป็นน้ำหวานที่ได้จากต้นตาลโตนดที่มีชื่อสามัญเป็นภาษาอังกฤษว่า Palmy Palm เป็นพืชในตระกูลปาล์มมีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Borassus flabellifer* Linn. สามารถขึ้นได้ในเขตร้อน พบโดยทั่วไปในประเทศอินเดีย ไทย พม่า ศรีลังกาและกัมพูชา สำหรับประเทศไทย ต้นตาลโตนดขึ้นหนาแน่นในแถบภาคใต้ของประเทศ นับตั้งแต่จังหวัดเพชรบุรีถึงจังหวัดสงขลา นอกจากนี้ยังพบในจังหวัดอื่น ๆ เช่น พืชโลก บุรีรัมย์ สิงห์บุรี ชัยนาท สุพรรณบุรี นครปฐม นครศรีธรรมราช และสงขลา เป็นต้น โดยจังหวัดเพชรบุรี เป็นจังหวัดที่มีจำนวนต้นตาลโตนดมากที่สุดประมาณ 2 ล้านต้น (สำนักงานเกษตรจังหวัดเพชรบุรี, 2551)

2.2.1 ลักษณะทางสรีรวิทยาและนิเวศวิทยาของตาลโตนด

ตาลโตนด เป็นไม้วงศ์ปาล์มเช่นเดียวกับมะพร้าว แต่ตาลโตนด มีความแข็งแรงทนทานและอายุยืนยาวกว่ามะพร้าวมาก โดยมีอายุยืนยาวประมาณ 80-100 ปี โตเต็มที่สูงประมาณ 2,700 เซนติเมตร (90 ฟุต) หรือมากกว่า มีเส้นรอบวงโคนต้นอยู่ระหว่าง 60-120 เซนติเมตร (2-4 ฟุต) และมีใบเป็นรูปพัด (Fan Leaf) ขนาดใหญ่แข็งแรงและหนา โดยจะให้ผลผลิตหลังจากปลูกแล้วประมาณ 10-15 ปี ตาลโตนดขึ้นได้บนดินทุกชนิดทนทั้งความแห้งแล้ง และน้ำท่วม มีรากลึกมาก โดยรากของตาลโตนดไม่แผ่ออกด้านข้าง จึงสามารถปลูกร่วมกับพืชอื่นได้ดี ตาลโตนดที่ขึ้นอยู่ในบริเวณนาข้าวจึงไม่ทำให้ผลผลิตของข้าวลดลง นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันลมพายุ เป็นที่อยู่อาศัยของนกและค้างคาวซึ่งช่วยควบคุมแมลง และให้ปุ๋ยแก่ข้าวนาอีกด้วย ตาลโตนดที่ขึ้นอยู่โดยทั่วไปมีลักษณะและส่วนประกอบดังนี้ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2544)

(ก) ราก รากเป็นรากเสี้ยนกลมยาว เป็นกระจุกคล้ายมะพร้าว แต่หยั่งลึกลงไปในดินได้ลึกมาก ไม่แผ่ไปตามผิวดินเหมือนรากมะพร้าว จึงยึดกับดินได้ดี โอกาสที่จะโค่นล้มหรือถอนรากเป็นไปได้น้อย จึงใช้ปลูกเพื่อเป็นหลักในการแบ่งเขตของคันทนา หรือเพื่อส่งเสริมความแข็งแรงให้กับดินในบริเวณที่ทำการท่อน้ำเข้านา

(ข) ลำต้น ตาลโตนดเป็นพืชลำต้นเดี่ยวที่มีลักษณะสูงชะลูด ความสูงโดยทั่วไปประมาณ 18-20 เซนติเมตร โตเต็มที่สูงประมาณ 25-27 เมตร (บางต้นอาจสูงถึง 30 เมตร) ลำต้นตรงหรือโค้งเล็กน้อย โคนต้นอวบใหญ่วัดโดยรอบได้ประมาณ 1 เมตร เมื่อมีความสูงประมาณ 4 เมตร

ลำต้นจะเริ่มเรียวยาว วัดโดยรอบได้ประมาณ 40 เซนติเมตร ระยะความสูง 10 เมตร วัดจากพื้นดิน ลำต้นจะเริ่มขยายออกใหม่ วัดโดยรอบได้ประมาณ 50 เซนติเมตร และคงขนาดนี้ไปจนถึงยอด เปลือก ลำต้นขรุขระ และมีสีซีดๆ เป็นวงซ้อน ๆ กัน เป็นเส้นแข็ง เหนียว ไม่หักง่าย ส่วนเนื้อไม้ภายนอก แข็งแรง และค่อย ๆ อ่อนเข้าไปอยู่ภายในลำต้น

(ค) ใบ มีลักษณะเป็นรูปพัด (Fan Leaf หรือ Palmate) ขนาดใหญ่แข็งแรงและหนา โดยแต่ละใบจะมีใบย่อยเรียกว่า Segment ซึ่งจะแตกออกจากจุด ๆ เดียวกันที่ปลายก้านใบ ยอดตาลแต่ละต้นประกอบด้วยใบตาลประมาณ 25-40 ใบ (แล้วแต่อายุตาล) ใบสีเขียวเข้มเป็นรูปพัด ถ้าตาลต้นใดไม่ได้ใช้ประโยชน์ ใบแก่จะมีสีน้ำตาลอ่อนห้อยแนบลำต้น ความกว้างของใบวัดได้ประมาณ 50-70 เซนติเมตร ใบแต่ละใบอายุไม่เกิน 3 ปี ตาลโตต้นหนึ่ง ๆ สามารถให้ใบตาลได้ 12-15 ใบต่อปี ส่วนที่เป็นก้านใบหรือทางตาลยาวประมาณ 1-2 เมตร ทางตาลนี้จะหนาโค้งตามความยาว รอบของทางตาลทั้งสองข้างมีหนามแหลมสั้น ขนาดไม่สม่ำเสมอ

(ง) ดอก ออกดอกเป็นช่อ โดยดอกตัวผู้และตัวเมียจะอยู่แยกกัน ช่อดอกของต้นผู้เรียก “จวงตาล” แตกแขนงออกเป็น 2-4 จวงต่อช่อ ยาวจวงละประมาณ 30-40 เซนติเมตร ในแต่ละจวงมีดอกเล็ก ๆ ต้นตัวผู้ต้นหนึ่งจะมีช่อดอก 3-9 ช่อ ส่วนช่อดอกของต้นตัวเมีย เรียก “ปลีตาล” ต้นตัวเมียจะออกช่อหลังต้นตัวผู้เล็กน้อยมีประมาณ 10 ช่อ ขนาดใหญ่และชุ่มน้ำหวานมากกว่า ในแต่ละช่อจะมีดอกน้อยกว่าดอกตัวผู้ โดยทั้งต้นตัวผู้และต้นตัวเมียจะทยอยออกช่อเรื่อย ๆ สามารถเก็บร่อนน้ำตาลได้ตลอดปี

(จ) ผล จะออกกับต้นตัวเมียเท่านั้น ระยะเวลาตั้งแต่ออกดอกจนถึงเก็บผลอ่อนใช้เวลาประมาณ 75-80 วัน โดยผลจะออกเวียนรอบต้นตามก้านใบ โดยในแต่ละก้านใบจะออกหนึ่งปลี โดยแต่ละปลีจะให้ช่อดอกประมาณสามช่อ ในหนึ่งช่อดอกให้ผลหนึ่งทะลาย โดยในแต่ละทะลายมี 10-20 ผล ผลอ่อนมีสีเขียว ผลแก่จัดมีสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำเป็นมัน เนื้อภายในเป็นเส้นใยละเอียด เมื่อสุกเต็มที่จะประกอบด้วยแป้งและน้ำตาล มีสีเหลืองแก่และมีกลิ่นหอม นิยมนำไปใช้ทำขนมตาล และใช้แต่งสีขนมต่าง ๆ โดยทั่วไปในแต่ละผลจะประกอบด้วยเมล็ดตาลสามเมล็ดอยู่ภายในผล เมล็ดมีลักษณะแบน ๆ ยาวประมาณ 4 นิ้ว และหนาประมาณ 1.5 นิ้ว ส่วนประกอบต่าง ๆ ของผล แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ เอ็กโซคาร์ป (exocarp) เป็นเปลือกชั้นนอก มีผิวเรียบเป็นมัน มีโซคาร์ป (mesocarp) เป็นส่วนเส้นใยละเอียด และเอนโดคาร์ป (endocarp) เป็นเปลือกหรือกะลาแข็งหุ้มเมล็ด

2.2.2 การเก็บเกี่ยวน้ำตาลโตนดสด

การเก็บเกี่ยวน้ำตาลโตนดโดยทั่วไปมีหลักการคล้ายคลึงกัน คือ การทำให้ส่วนของช่อดอกหรือยอดอ่อนช้ำ ต้นตาลโตนดจะส่งน้ำตาลโตนดตามท่อน้ำตาลเพื่อรักษาอาการบอบช้ำนั้น เมื่อปาดส่วนของช่อดอกหรือเจาะที่ ส่วนยอดก็จะมีน้ำหวานไหลออกมา ตาลโตนดเมื่ออายุประมาณ 12-15 ปี จะเริ่มให้น้ำตาลโตนดและสามารถเก็บเกี่ยวน้ำตาลสดได้นานถึง 80 ปี การเก็บเกี่ยวจะทำได้ตลอดทั้งปี โดยจะเก็บวันละ 2 ครั้ง ในช่วงเช้าและช่วงบ่าย โดยใช้ภาชนะรูปทรงกระบอก เช่น กระบอกไม้ไผ่ ขนาดความจุ 1-3.5 ลิตร แขนงรองรับน้ำตาลที่ไหลออกจากงวงตาล โดยใช้ไม้พยอม (*Shorea floribunda* Kurz.) หรือไม้เคี่ยม (*Cotylelobium lanceolatum* Craib.) ตัดเป็นชิ้นใส่ลงในกระบอกประมาณ 3-5 กรัม ก่อนแขวนรองรับน้ำตาลโตนดที่งวงตาลเพื่อชะลอการเสื่อมเสียของน้ำตาลโตนดระหว่างเก็บเกี่ยว (Ohler, 1984)

น้ำตาลสดจะได้จากช่อดอกส่วนที่เรียกว่า “วงตาล” และ “ปลีตาล” ซึ่งให้น้ำหวานได้ทั้งสองชนิด โดยมีวิธีการในการเก็บเกี่ยวที่คล้ายกัน แตกต่างกันบ้างเฉพาะไม้ที่ใช้ขนาดวงตาลและปลี ซึ่งของต้นตัวผู้จะใช้ไม้ขนาดที่แบนกว่าของต้นตัวเมีย โดยไม้ที่ใช้ขนาดเรียกว่า “ไม้คาบตาล” (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2544)

(1) วิธีเก็บน้ำตาลสดจากต้นตาลตัวผู้

ขนาดของต้นตาลที่เหมาะสมในการเก็บน้ำหวาน คือ หลังจากที่ยอดวงตาลประมาณ 50 เซนติเมตร ดอกบานพอประมาณ ให้รวบวงตาลเข้าหากัน ใช้ไม้คาบตาลบีบวงตาลเบา ๆ วันละครั้ง ทำติดต่อกันประมาณ 3-4 วัน หักปลายวงตาลประมาณ 1 นิ้ว ใส่กระบอกแช่น้ำทิ้งไว้ประมาณ 3 คืน วันรุ่งขึ้นหน้าในกระบอกออกทิ้งไว้ 1 คืน ทดลองปาดตาลโดยทำในตอนเช้า ถ้ามีน้ำไหลซึมออกมาไม่หยุดถือว่าใช้ได้ โดยใช้กระบอกน้ำตาลสดซึ่งทำจากกระบอกไม้ไผ่ ใส่ไม้พยอมหรือไม้เคี่ยม ที่ตัดเป็นชิ้น ๆ ขนาด 3-5 กรัม แขนงรองรับน้ำตาลที่ไหลซึมออกจากวงตาลนั้น แต่ถ้าปาดแล้วรอยแผลไม่มีน้ำไหลก็ใช้ไม่ได้ โดยไม้เคี่ยมหรือไม้พยอมจะช่วยป้องกันและยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในน้ำตาลบูด (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2544; เรณู แจ่มฟ้า, 2545; สุภารัตน์ เตียไพบูลย์, 2547)

(2) วิธีเก็บน้ำตาลจากต้นตาลตัวเมีย

ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเก็บน้ำหวาน คือ หลังจากช่อดอกบานเป็นจั่นแล้ว ขนาดเท่าลูกมะยมหรือใหญ่กว่า ให้นวดตาลระหว่างจั่นโดยใช้ไม้คาบตาลนวดติดต่อกันประมาณ 3 วัน หักปลายจั่นทิ้งประมาณ 1 นิ้ว ทดลองปาดจั่นดู ถ้ามีน้ำไหลออกมาไม่หยุดแสดงว่าใช้ได้ หลังจากนั้น นำกระบอกไม้ไผ่ที่มีการเติมไม้เคี่ยมหรือไม้พยอมประมาณ 3-5 กรัม แขนงรองรับน้ำตาลสดที่ซึมออกมา แต่ถ้าปาดแล้วไม่มีน้ำออกมา ให้นำจั่นแช่น้ำในกระบอกทิ้งไว้ 1 คืน วันรุ่งขึ้นหน้าในกระบอกทิ้ง ทดลองปาดหน้าตาลใหม่ ถ้าไม่มี น้ำไหลออกมาก็เปลี่ยนต้นใหม่ โดยทั่วไปเกษตรกรไม่นิยมเก็บน้ำหวานจากต้นตัวเมีย ส่วนใหญ่จะปล่อยให้ออกจั่นติดผลเพื่อเก็บผลตาลเป็นทะลายมากกว่า (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2544)

ช่วงเวลาในการเก็บน้ำตาลโดนดอยู่ระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ถึงปลายเดือนพฤษภาคม โดยจะเก็บได้วันละ 2 ครั้ง คือ ในช่วงเช้ามืดและช่วงบ่าย หลังจากนั้น เกษตรกรจะหยุดเนื่องจากเป็นช่วงหน้าฝนที่มีฝนตกชุก และเป็นช่วงที่ต้นตาลให้ผลผลิตน้อยลง โดยเฉลี่ยต้นตาลตัวเมียจะให้น้ำตาลสดวันละ 4-5 ลิตรต่อต้น ส่วนต้นตาลตัวผู้จะให้น้ำตาลสดวันละ 3 ลิตรต่อต้น (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2544) น้ำตาลโดนดที่เก็บในตอนเช้าจะมีคุณภาพดีกว่า น้ำตาลโดนดที่เก็บในตอนเย็น เพราะอากาศในตอนกลางคืนเย็นกว่ากลางวัน ทำให้อัตราการเสื่อมคุณภาพของน้ำตาลโดนดในตอนกลางคืนเป็นไปได้ช้า นอกจากนี้ พบว่า การเก็บน้ำตาลโดนดในตอนเช้าให้ปริมาณมากและมีความหวานสูงกว่าการเก็บน้ำตาลโดนดในช่วงบ่ายอีกด้วย (กีรย์ หริบูลย์, 2527)

(3) ผลผลิตของน้ำตาลโดนดสด

การเก็บน้ำตาลโดนดสามารถทำได้ตลอดปี โดยปกติ จะเริ่มประมาณปลายเดือนธันวาคมของทุกปี เนื่องจากปริมาณฝนเริ่มลดน้อยลงและวงตาลหรือช่อดอกของต้นตาลโดนดจะเจริญเติบโตเต็มที่ในช่วงนี้ ส่วนระยะเวลาการเก็บเกี่ยวจะสิ้นสุดปลายฤดูแล้งประมาณเดือนเมษายนหรือพฤษภาคม ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละปี หลังจากนั้นจะมีช่อดอกให้ปาดเพื่อรองรับน้ำตาลสดได้น้อยลง (เรณู แจ่มฟ้า, 2545)

Child (1974) รายงานว่าปริมาณน้ำตาลโตนดที่รองรับได้ขึ้นอยู่กับอายุ ต้นตาลโตนด ฤดูกาล และสภาพดินฟ้าอากาศ ในประเทศศรีลังกา ผลผลิตรวมของ น้ำตาลสดในช่วงการรองรับน้ำตาลสด 8 เดือน จากเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุด เฉลี่ยประมาณ 13.16-65.80 ลิตรต่อวงหรือ 225.60 ลิตรต่อต้น แต่อย่างไรก็ตามต้นตาลโตนดที่ดีควรให้ผลผลิตประมาณ 500-600 ลิตรต่อปี หรือประมาณ 1350-1600 มิลลิลิตรต่อวัน

Ohler (1984) กล่าวว่า ถ้ามีการรองรับน้ำตาลโตนดวันละ 1 ครั้ง จะได้ผลผลิต เฉลี่ยประมาณ 0.6-1.2 ลิตรต่อต้นต่อวัน แต่ถ้ารองรับน้ำตาลโตนดวันละ 2 ครั้ง ผลผลิตจะอยู่ในช่วง 0.6-3.0 ลิตรต่อต้นต่อวัน สำหรับผลผลิตรวมของน้ำตาลโตนดเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดเฉลี่ย ประมาณ 16-18 ลิตรต่อวง หรือประมาณ 270 ลิตรต่อต้น

2.2.3 องค์ประกอบของน้ำตาลโตนดสด

Child (1974) รายงานว่า น้ำตาลโตนดมีคุณสมบัติทางเคมี คือ ความถ่วงจำเพาะที่ อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส อยู่ระหว่าง 1.058-1.077 ปริมาณของแข็งทั้งหมดอยู่ระหว่าง 15.2-19.7 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ปริมาณน้ำตาลซูโครสอยู่ระหว่าง 12.3-17.4 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ปริมาณ แล็กโตสอยู่ระหว่าง 0.11-0.41 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร และปริมาณโปรตีนอยู่ระหว่าง 0.23-0.32 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร (Child, 1974) นอกจากนี้ เรณู แจ่มฟ้า (2545) ได้รายงานองค์ประกอบของน้ำตาลโตนดไว้ดังนี้ คือ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้เท่ากับ 16 องศาบริกซ์ พีเอช 5.5 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เท่ากับร้อยละ 16.8 ปริมาณน้ำตาลรีดิคซ์เท่ากับร้อยละ 1.8 และปริมาณน้ำตาลซูโครสเท่ากับร้อยละ 15.0 ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของกรมส่งเสริมการเกษตร (2544) ซึ่งกล่าวว่า น้ำตาลโตนดสดจะ ประกอบด้วยปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ร้อยละ 11.54 น้ำตาลซูโครสร้อยละ 13-17 น้ำตาลกลูโคสร้อย ละ 0.78 โปรตีนร้อยละ 0.02-0.03 ค่าพีเอชประมาณ 4.69 ปริมาณกรดทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 0.098 และค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเท่ากับ 13.93 องศาบริกซ์ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์คุณภาพ น้ำตาลโตนดสดจากงานวิจัยหลายงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่า ระยะเวลาระหว่างรองรับน้ำตาลโตนดที่ ต้น จะส่งผลถึงคุณภาพน้ำตาลโตนดสด โดยเมื่อใช้ระยะเวลารองรับจนถึงระยะเวลาก่อนถึงการ วิเคราะห์หาค่าพีเอชของน้ำตาลโตนดสดเริ่มลดลง และสอดคล้องกับปริมาณกรดทั้งหมดที่ เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากจุลินทรีย์พวกแลกตินแบคทีเรียที่มีปริมาณมากขึ้น และใช้น้ำตาลเป็นอาหารผลิต กรดแลกติกเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง (เรณู แจ่มฟ้า, 2545; สุภารัตน์ เตียไพบูลย์, 2547)

ปาณิสรา และคณะ (2555) ได้รายงานคุณสมบัติของน้ำตาลโตนดสดเมื่อปริมาณ ของแข็งที่ละลายได้มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 16 ถึง 32 องศาบริกซ์ พบว่า น้ำตาลโตนดมีค่าความสว่าง อยู่ในช่วง 43.18-56.78 น้ำตาลโตนดที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ไม่เกิน 20 องศาบริกซ์มีค่าสีแดง และสีเหลืองต่ำกว่าน้ำตาลโตนดที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ค่าสูง ค่าพีเอชหรือค่าความเป็นกรด - ด่างของน้ำตาลโตนดมีค่าอยู่ในช่วง 5.43-5.45 โดยน้ำตาลโตนดที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้มาก หรือมีค่าความหวานสูง จะมีค่าความเป็นกรดต่ำกว่าน้ำตาลโตนดที่มีค่าความหวานต่ำ ค่าความหนืด ของน้ำตาลโตนดที่ค่าความหวานแตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.41-0.68 เซนติพอยท์ (cp) โดยค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำตาลโตนดมีค่าความหวานเพิ่มขึ้น น้ำตาลโตนดมี ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดอยู่ในช่วง 167.63-173.57 mg/mL ปริมาณน้ำตาลรีดิคซ์ 11.04-13.38 mg/mL และปริมาณน้ำตาลนอนรีดิคซ์ 154.24-162.53 mg/mL โดยปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและ

ปริมาณน้ำตาลนอนรีตีวซ์มีค่าลดลง ในขณะที่ปริมาณน้ำตาลรีตีวซ์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความหวานมีค่าเพิ่มขึ้น

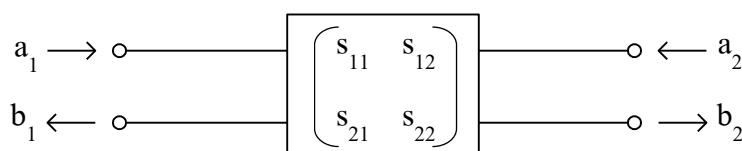
2.2.4 การผลิตน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่ม

การผลิตน้ำตาลโตนดพร้อมดื่ม ผลิตได้โดยนำน้ำตาลโตนดสดที่ได้จากต้นตาลกรองด้วยผ้าขาวบางแล้วเทลงในกระทะ ให้ความร้อนนาน 10-15 นาที จนน้ำตาลเริ่มเดือด แล้วหยุดให้ความร้อนปล่อยให้เย็น บรรจุในขวดปิดฝาและเก็บโดยการแช่เย็นเพื่อรอจำหน่าย ปัญหาที่พบจากการผลิตน้ำตาลโตนดพร้อมดื่มวิธีนี้ คือ ระยะเวลาการเก็บรักษาสั้น สามารถเก็บรักษาได้เพียง 3 วันเท่านั้น (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2544) โดยปกติแล้ว ในการผลิตน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มนั้นจะไม่ใส่สารให้ความหวานอื่น ๆ เช่น น้ำตาลทราย หรือน้ำตาลมะพร้าว ลงในน้ำตาลโตนดระหว่างผลิต แต่เนื่องจากปัจจุบันนี้ น้ำตาลโตนดสดเป็นที่นิยมของผู้บริโภคเป็นจำนวนมาก ทำให้มีผู้ผลิตน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มบางรายได้ใส่น้ำตาลทรายในการผลิตเพื่อจำหน่ายด้วย ทำให้คุณภาพของน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มลดลง เนื่องจากไม่ใช่น้ำตาลโตนดสดแท้

2.3 การวัดคุณลักษณะของวัสดุด้วยวิธีการทางไมโครเวฟ

2.3.1 พารามิเตอร์ S

พารามิเตอร์ S คือ เมตริกซ์การกระจายมีค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อน มีความหมายถึงอัตราส่วนระหว่างแรงดันออกต่อแรงดันเข้าโดยสัญลักษณ์ ij นั้น j คือพอร์ตที่ได้รับการกระตุ้น (อินพุตพอร์ต) และ i คือ เอาต์พุตพอร์ต ดังนั้น S_{11} จึงหมายถึงอัตราส่วนของสัญญาณที่สะท้อนจากพอร์ตที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ตามแนวเส้นทะแยงมุมของเมตริกซ์ S เป็นค่าของสัมประสิทธิ์การสะท้อนในขณะที่ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่เหลือเป็นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ดังตัวอย่างเมตริกซ์ของพารามิเตอร์ S ในกรณีของโครงข่ายแบบ 2 พอร์ต ดังนี้



ภาพที่ 2.1 ระบบโครงข่าย 2 พอร์ตที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance) Z_0

จากรูปค่าพารามิเตอร์ S ต่าง ๆ จะมีค่าดังนี้

$$S_{11} = b_1 / a_1$$

$$S_{12} = b_1 / a_2$$

$$S_{21} = b_2 / a_1$$

$$S_{22} = b_2 / a_2$$

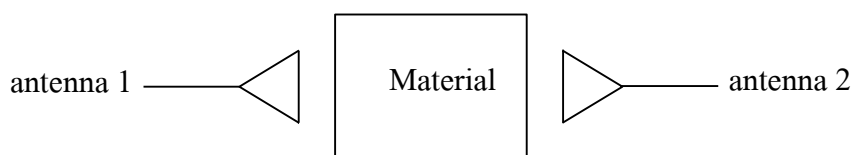
เมื่อต้องการวัดค่า S_{11} ต้องใส่สัญญาณให้พอร์ตที่ 1 และวัดสัญญาณที่สะท้อนกลับที่พอร์ตที่ 1 ในกรณีนี้จะไม่ป้อนสัญญาณให้พอร์ตที่ 2 หรือ $a_2 = 0$ และเมื่อต้องการวัดค่า S_{21} ต้องใส่สัญญาณที่พอร์ตที่ 1 และวัดผลลัพธ์ที่พอร์ตที่ 2 และลักษณะเช่นเดียวกัน สำหรับการวัดค่า S_{12} และ S_{22}

ขนาดของพารามิเตอร์ S จะแสดงในรูปขนาดเชิงเส้น (linear) หรือ เดซิเบล (dB) ดังนี้

$$S_{ij}(\text{dB}) = 20 * \log(S_{ij}(\text{magnitude}))$$

2.3.2 การใช้ค่าการส่งผ่านและค่าการสะท้อนกลับในการหาคุณสมบัติทางไมโครเวฟของวัสดุ

ระบบการวัดค่าการส่งผ่านและค่าการสะท้อนกลับเพื่อหาคุณสมบัติทางไมโครเวฟของวัสดุต่าง ๆ จะใช้หลักการวัดทั้งค่าการส่งผ่านและค่าการสะท้อนกลับร่วมกัน โดยวัดค่าการส่งผ่านระหว่างสายอากาศที่ 1 และสายอากาศที่ 2 ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ระบบการวัดคุณสมบัติทางไมโครเวฟของวัสดุด้วยสายอากาศ 1 คู่

ระบบการวัดนี้ จะใช้สายอากาศ 1 คู่ ชนิดเดียวกันมีโพลาไรซ์แบบเดียวกัน เพื่อวัดค่าการส่งผ่านและค่าการสะท้อนกลับระหว่างสายอากาศทั้งสอง โดยวัสดุที่ต้องการทดสอบนั้น จะอยู่ระหว่างสายอากาศทั้งสอง เมื่อสายอากาศที่ 1 ส่งสัญญาณผ่านวัสดุไปยังสายอากาศที่ 2 นั้น จะทำให้สามารถวัดขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศที่ 1 $|S_{11}|$ ได้ และค่าการส่งผ่านระหว่างสายอากาศที่ 1 และสายอากาศที่ 2 $|S_{21}|$ ได้ ค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ จะเป็นค่าที่ใช้ระบุคุณสมบัติทางไมโครเวฟของวัสดุที่อยู่ระหว่างสายอากาศทั้งสองนั้นได้

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ค่าการสะท้อนกลับและค่าการส่งผ่าน

มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

Al-Mattarneh และ คณะ (2002) ได้ใช้เทคนิคการวัดแบบไม่ทำลายด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave nondestructive testing: MNDT) ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน และคุณสมบัติไดอิเล็กตริก คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r') และ แฟคเตอร์การสูญเสีย (ϵ_r'') เพื่อตรวจสอบการกระจายของเส้นใยและความเข้มข้นของเส้นใยในคอนกรีต โดยทำการวัดความถี่ในช่วง 8-12.5 กิกะเฮิร์ตซ์ และพบว่า วิธีการดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการพิจารณาร้อยละของส่วนผสมเส้นใยที่มีอยู่ในคอนกรีตได้

Kharkovsky และคณะ (2002) ได้ใช้คุณสมบัติของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และการส่งผ่านในการศึกษาปริมาณน้ำในซีเมนต์ ซึ่งพบว่า ค่าทั้งสองดังกล่าวมีความสัมพันธ์กันจึงสามารถใช้หลักการดังกล่าวในการพิจารณาคุณสมบัติของซีเมนต์ได้

Tongleam และคณะ (2004) ได้ใช้เทคนิคไมโครเวฟในการแยกมังกูตที่มีเนื้อฝั อกจากมังกูตที่มีเนื้อดี โดยได้หาระดับอ้างอิงซึ่งเป็นค่าขนาดของคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนกลับจากมังกูต และพบว่าให้ผลถูกต้องถึง 79%

Abbas และคณะ (2007) ได้นำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่าน มาใช้ศึกษาความชื้นในผลปาล์มน้ำมัน โดยใช้ท่อนำคลื่นไดอิเล็กทริกสี่เหลี่ยม (Rectangular dielectric waveguide: RDWG) ในช่วงความถี่ 8-15 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งพบความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีระหว่างผลการทำนายและผลการวัด จึงสามารถสรุปได้ว่า วิธีการดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการหาความชื้นในผลปาล์มน้ำมันได้

You และคณะ (2010) ได้ใช้สายอากาศแบบแผ่นสี่เหลี่ยมเป็นเซนเซอร์ในการวัดความชื้นในทราย โดยใช้การวัดค่าการสะท้อนกลับและพบว่าเฟสของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน จะเป็นพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับค่าความชื้นในทราย ซึ่งวิธีการวัดที่นำเสนอดังกล่าวจะช่วยลดการทดสอบทางเคมี เพื่อตรวจสอบความชื้นในทรายที่เวลาและตำแหน่งต่าง ๆ

Ali และคณะ (2011) ได้ใช้สายอากาศไมโครเวฟเป็นเซนเซอร์ในการตรวจสอบปริมาณความชื้นในน้ำยางพารา โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความชื้น ในช่วงความถี่ 2.2 ถึง 2.7 กิกะเฮิรตซ์ และพบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น

2.4.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้คลื่นไมโครเวฟศึกษาความเข้มข้นของน้ำตาล

มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

Tulasidas และคณะ (1995) ศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของอุณหภูมิและปริมาณสารละลายน้ำตาลในอุณหภูมิที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้เทคนิค open-ended coaxial transmission line พบว่า ค่าไดอิเล็กทริกของอุณหภูมิจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความชื้นและอุณหภูมิ โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าแฟคเตอร์การสูญเสียจะลดลงเมื่อความชื้นลดลงรวมถึงได้ศึกษาค่าไดอิเล็กทริกของสารละลายในน้ำตาลที่มีความเข้มข้นค่าต่างๆ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป

Liao (2003) ศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของสารละลาย α -กลูโคส ที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิรตซ์ โดยใช้เทคนิค cavity perturbation โดยวัดสารละลายที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 10 ถึง 60 % ที่อุณหภูมิ 0-70 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงอย่างเป็นเชิงเส้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นแบบ quadratic เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ผลการวิจัยที่ได้เป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารที่ความถี่ไมโครเวฟ

เด่นชัย (2550) ได้นำหลักการของการสะท้อนกลับและการส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในการวัดความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล โดยศึกษาด้วยการจำลองแบบ และพบว่า ด้วยวิธีการนี้สามารถคำนวณค่าไดอิเล็กทริกได้ถูกต้องตรงกับค่าไดอิเล็กทริกของสารละลายน้ำตาลที่ทราบค่าอยู่แล้ว

Guo และคณะ (2009) ได้วัดค่าคงที่ไดโอเล็กทริกของน้ำผึ้งตามสัดส่วนของน้ำตาลและน้ำที่เป็นส่วนผสมโดยใช้หลักการวัดโดยใช้โพรบแบบ open-ended coaxial-line พบว่าค่าคงที่ไดโอเล็กทริกของน้ำผึ้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณน้ำเป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้น และค่าการสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเช่นกัน

Isa และคณะ (2009) ได้ศึกษาปริมาณน้ำตาลในแตงโมโดยใช้หลักการวัดค่าคงที่ไดโอเล็กทริก ซึ่งพบว่า คุณสมบัติของค่าคงที่ไดโอเล็กทริกมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำตาล ค่าคงที่ไดโอเล็กทริกจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำตาลมีค่าเพิ่มขึ้น

2.4.3 งานวิจัย เรื่อง ระบบทดสอบคุณภาพน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มด้วยวิธีการทางไมโครเวฟ (ปาณิศา แก้วสวัสดิ์ และคณะ, 2555)

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำตาลโตนดสด พบว่าน้ำตาลสดที่ไม่มีการเติมน้ำตาลชนิดอื่น จะมีค่าความสว่างต่ำกว่าน้ำตาลสดที่มีการเติมน้ำตาลชนิดอื่น ส่วนน้ำตาลสดที่มีการเติมน้ำตาลทรายจะมีค่าความสว่างสูงสุด น้ำตาลสดที่มีค่าความหวานไม่เกิน 20 °Brix และน้ำตาลสดที่มีน้ำตาลทรายเป็นส่วนผสมยังมีค่าความเป็นสีเหลืองต่ำกว่าน้ำตาลสดที่มีค่าความหวานสูงกว่า 20 °Brix และน้ำตาลสดที่มีน้ำตาลมะพร้าวเป็นส่วนผสม น้ำตาลสดแท้ที่มีค่าความหวานต่ำ และน้ำตาลสดที่มีการเติมน้ำตาลทรายหรือน้ำตาลมะพร้าวจะมีค่าความวามเป็นกรดใกล้เคียงกันมากและสูงกว่าน้ำตาลสดแท้ที่มีค่าความหวานสูง ซึ่งมีค่าความเป็นกรดต่ำกว่า ค่าความหนืดของน้ำตาลสดแท้และน้ำตาลสดที่มีน้ำตาลทรายหรือน้ำตาลมะพร้าวเป็นส่วนผสม ที่ค่าความหวานแตกต่างกัน มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อค่าความหวานเพิ่มขึ้น น้ำตาลสดที่มีน้ำตาลทรายเป็นส่วนผสม ให้ค่าปริมาณน้ำตาลทั้งหมดสูงกว่าน้ำตาลสดแท้ และน้ำตาลสดที่มีน้ำตาลมะพร้าวในปริมาณน้อยเป็นส่วนผสม โดยน้ำตาลสดแท้ที่มีค่าความหวาน สูงกว่า 20 °Brix และน้ำตาลสดที่มีน้ำตาลมะพร้าวเป็นส่วนผสมจะมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่าน้ำตาลสดที่มีน้ำตาลทรายถึง 2-3 เท่า น้ำตาลสดที่มีน้ำตาลทรายเป็นส่วนผสมและน้ำตาลสดที่มีน้ำตาลมะพร้าวเป็นส่วนผสมที่มีค่าความหวานต่าง ๆ จะมีปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์สูงกว่าน้ำตาลสดแท้

2. ค่าการสะท้อนกลับของน้ำตาลโตนดสด น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทรายและน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว ที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (ค่าความหวาน) ค่าเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างกัน เมื่อปริมาณของแข็งที่ละลายได้มีค่าเพิ่ม ขึ้น ค่าการสะท้อนกลับมีค่าลดลงเล็กน้อย ค่าการส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสด น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย และ น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว ที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ค่าเดียวกันมีความแตกต่างกัน โดยค่าการส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดมีค่ามากที่สุด ในขณะที่ค่าการส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดผสมน้ำตาลทรายมีค่าน้อยที่สุด และค่าการส่งผ่านระหว่างน้ำตาลโตนดสดแท้และน้ำตาลโตนดสดผสมน้ำตาลมะพร้าวมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

ผลการทดลองของค่าการส่งผ่านสอดคล้องกับผลของค่าน้ำตาลรีดิวซ์ นอนรีดิวซ์ และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด โดยน้ำตาลรีดิวซ์เป็นน้ำตาลชนิดมีขั้ว เช่น น้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรุคโตสที่มีมากในผลไม้ธรรมชาติ จึงทำให้น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทรายมีค่าน้ำตาลรีดิวซ์ต่ำที่สุด รองลงมาคือ น้ำตาลสดผสมน้ำตาลมะพร้าว และ น้ำตาลโตนดสดแท้มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงที่สุด ซึ่งปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จะเป็นสัดส่วนกับน้ำตาลนอนรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด สำหรับน้ำตาลนอนรีดิวซ์นั้น เป็นน้ำตาลชนิดไม่มีขั้ว เช่น น้ำตาลซูโครส ซึ่งเป็นน้ำตาลสังเคราะห์ไม่ใช้น้ำตาลจาก

ธรรมชาติ ดังนั้น น้ำตาลโตนดสดที่มีส่วนผสมของน้ำตาลทรายจึงมีปริมาณน้ำตาลอนรีดิวิซ์สูงที่สุด รองลงมาคือ น้ำตาลโตนดที่มีส่วนผสมน้ำตาลมะพร้าว และน้ำตาลโตนดสดแท้ที่มีปริมาณน้ำตาลอนรีดิวิซ์ต่ำที่สุด หากใช้หลักการความเป็นขั้วของน้ำตาลในการพิจารณาผลของการส่งผ่านของคลื่นวิทยุนี้ สามารถกล่าวได้ว่าน้ำตาลโตนดที่มีปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์ (มีขั้ว) มาก จะสามารถนำคลื่นวิทยุได้ดีกว่า น้ำตาลโตนดที่มีปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์น้อย นั่นคือ น้ำตาลโตนดสดแท้จะมีค่าการส่งผ่านสูงกว่า น้ำตาลโตนดสดที่มีส่วนผสมน้ำตาลมะพร้าว และ น้ำตาลโตนดสดที่มีส่วนผสมน้ำตาลทราย แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อค่าความหวานมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์ของน้ำตาลโตนดสดแท้ และน้ำตาลโตนดที่มีส่วนผสมน้ำตาลมะพร้าวมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้ค่าการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟของน้ำตาลทั้งสองชนิดไม่แตกต่างกันมากนัก ทำให้การแยกชนิดของน้ำตาลทำได้ยากขึ้นที่ค่าความหวานเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม หากนำคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีพิจารณาร่วมด้วยแล้ว ก็พบว่า น้ำตาลมะพร้าวจะมีความสว่างมากกว่าน้ำตาลโตนดสดแท้และมีความเป็นสีเหลืองมากกว่า รวมทั้งรสชาติและกลิ่นจะมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้ยังพบว่า ในการทำน้ำตาลโตนดสดโดยส่วนใหญ่แล้ว จะมีการผสมน้ำตาลทรายมากกว่าน้ำตาลมะพร้าว โดยน้ำตาลมะพร้าวมักมีการขายเป็นน้ำตาลสด แต่ระบุว่าเป็นน้ำตาลที่ทำมาจากต้นตาลโตนดไม่ใช่น้ำตาลจากต้นมะพร้าว

ดังนั้น ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ จึงเป็นไปตาม สมมติฐานที่ว่า ปริมาณน้ำตาลในน้ำตาลโตนดสดที่มีส่วนผสมของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ แตกต่างกัน ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์และน้ำตาลอนรีดิวิซ์แตกต่างกันนั้น สามารถ ใช้เป็นคุณสมบัติในการตรวจสอบคุณภาพของน้ำตาลโตนดสดด้วยวิธีการทางไมโครเวฟได้

ซึ่งได้เผยแพร่ผลงานวิจัยดังกล่าว ในการประชุมระดับชาติและนานาชาติ ดังนี้

1. ปาณิสรา แก้วสวัสดิ์ จินตนา วิบูลย์ศิริกุล และ ราเชน คณนะนา , “ระบบทดสอบคุณภาพน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มด้วยวิธีการทางไมโครเวฟ ,” บทความเสนอต่อที่ประชุม CHE-USDC Congress IV, ชลบุรี, ประเทศไทย, 14–16 กันยายน 2554, หน้า 68.

2. P. Keowsawat, R. Kanahna, J. Wiboonsirikul, and P. Keowsawat, “Transmission and Reflection Coefficients of Pure and Impure Palmyrah Palm Juice,” in *Proc. of International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST 2012)*, Bangkok, Thailand, Nov. 21–24, 2012, pp.518-521.

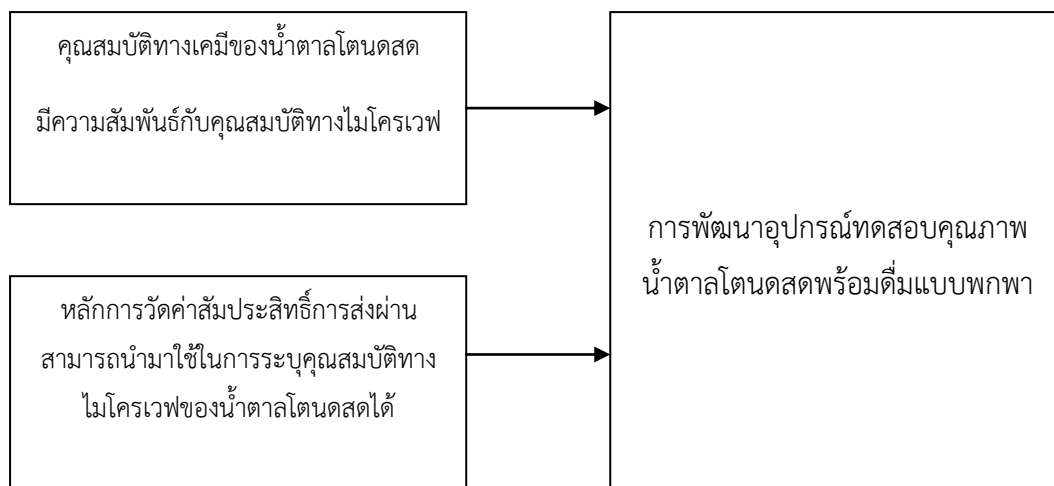
3. ปาณิสรา แก้วสวัสดิ์ จินตนา วิบูลย์ศิริกุล และ ราเชน คณนะนา , “ระบบทดสอบคุณภาพน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มด้วยวิธีการทางไมโครเวฟ ,” บทความเสนอต่อที่ประชุม HERP Congress I, พิษณุโลก, ประเทศไทย, 21–23 มกราคม 2556.

4. J. Wiboonsirikul, A. Keawsawang, P. Keowsawat, and R. Kanahna, “Changes in Physical and Chemical Properties of Palmyrah Palm Juices Added with Different Types of Sugar,” in *Proc. of the Burapha University International Conference 2013*, Pattaya, Thailand, July 4-5, 2013, pp. 776-786.

5. R. Kanahna, P. Keowsawat, J. Wiboonsirikul, and S. Promwong, “Microwave and Chemical Properties of Ready-to-drink Palmyrah Palm Juice,” in *Proc. of 2nd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, Chiang Mai, Thailand, Aug. 5-7, 2013, pp. 151-152.

2.5 กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากทฤษฎี หลักการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปเป็นกรอบแนวคิดในการวิจัยได้ดังนี้



ภาพที่ 2.3 กรอบแนวคิดในการวิจัย

บทที่ 3

การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสด

3.1 บทนำ

ในบทนี้ นำเสนอการศึกษา ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r') ค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย (ϵ_r'') ค่าความลึก (δ) และค่าแทนเจนต์การสูญเสีย ($\tan \delta$) ของน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มน้ำตาลโตนดสดแท้และน้ำตาลโตนดสดที่มีการผสมสาร ให้ความหวาน ที่ค่าของแข็งที่ละลายได้ ทั้งหมดแตกต่างกัน ตั้งแต่ 18-32 องศาบริกซ์ ที่ความถี่ ตั้งแต่ 1 ถึง 4 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งค่าของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้นี้ ครอบคลุมค่าความหวานของน้ำตาลโตนดสดที่มีจำหน่ายในตลาดในปัจจุบัน

3.2 วิธีการวัด

คุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มน้ำตาลโตนดสด สามารถวัดได้โดยใช้โพรบวัดไดอิเล็กตริก รุ่น 85070E ของบริษัท Agilent Technologies ซึ่งสามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ 20 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 10 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยต่อโพรบเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบพกพา N9923A FieldFox ของบริษัท Agilent Technologies ข้อมูลที่ได้จากการวัดจะเก็บลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายด้วยสายแลน เมื่อใช้โปรแกรม 85070E ของโพรบวัดไดอิเล็กตริกจะสามารถแสดงผลที่ได้จากการวัดได้ การทดสอบตัวอย่างทั้งหมดได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยตัวอย่างน้ำตาลโตนดสดอยู่ในกึ่งพลาสติกที่มีความสูง 7 เซนติเมตร และมีขนาดความกว้างและความยาว 3 เซนติเมตร โดยศึกษาความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 4 กิกะเฮิร์ตซ์ และค่า TSS ที่แตกต่างกัน 5 ค่า ตั้งแต่ 18-32 องศาบริกซ์

3.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.3.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r') และค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย ไดอิเล็กตริก (ϵ_r'') เป็นค่าที่ใช้ระบุคุณสมบัติของวัสดุในการพิจารณาการเชื่อมต่อและการกระจายของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า คุณสมบัติของไดอิเล็กตริกมักแสดงอยู่ในพจน์ของค่าเชิงซ้อนของ ϵ_r

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (3.1)$$

ϵ_r' เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ที่อธิบายพลังงานของคลื่นที่สะสมในวัสดุ และ ϵ_r'' เป็นค่าแฟกเตอร์การสูญเสียที่อธิบายการกระจายพลังงานของคลื่นในวัสดุ ϵ_r' เป็นค่าที่เปรียบเทียบกับค่าสภาพยอม (permittivity) ของสุญญากาศ ซึ่งมีค่า $\epsilon' = \epsilon/8.85 \times 10^{-12}$ โดยปกติแล้ววัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	ϵ'_r
อากาศ	1.006
น้ำแข็ง	4.2
กระดาษ	3
ยาง	2.5-3
ซิลิกอน	11.8
ดิน	2.8
เทฟลอน	2.1
น้ำ	80 (ที่อุณหภูมิ 20° C)

จากตารางที่ 1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ของน้ำมีค่าสูงกว่าค่าคงที่ ไดอิเล็กตริก ของอากาศ กระดาษ และวัสดุอื่น ๆ จึงอาจกล่าวได้ว่า เมื่อทำการส่งคลื่นวิทยุผ่านน้ำ (ตัวกลางที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูง) จะมีการลดทอนคลื่นวิทยุเกิดขึ้นมาก และทำให้ค่าการส่งผ่านของคลื่นวิทยุผ่านตัวกลางดังกล่าวมีค่าน้อยลงด้วย หรือ วัสดุที่มีค่าคงที่ ไดอิเล็กตริก สูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟน้อย

3.3.2 ค่าความลึก

ค่าความลึก (δ) แสดงความสามารถของคลื่นที่ทะลุเข้าไปในวัสดุ ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยใช้สมการที่ (3.2)

$$\delta = \frac{c}{2\sqrt{2}\pi f \left[\epsilon'_r \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r} \right)^2} - 1 \right\} \right]^{1/2}} \text{ meters} \quad (3.2)$$

เมื่อ c เป็นค่าความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และ f คือ ค่าความถี่ ค่าความลึกสามารถใช้ในการหาความหนาที่เหมาะสมของน้ำตาลโตนดสดสำหรับการทดลองต่อไป

3.3.3 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์

ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (3.3)

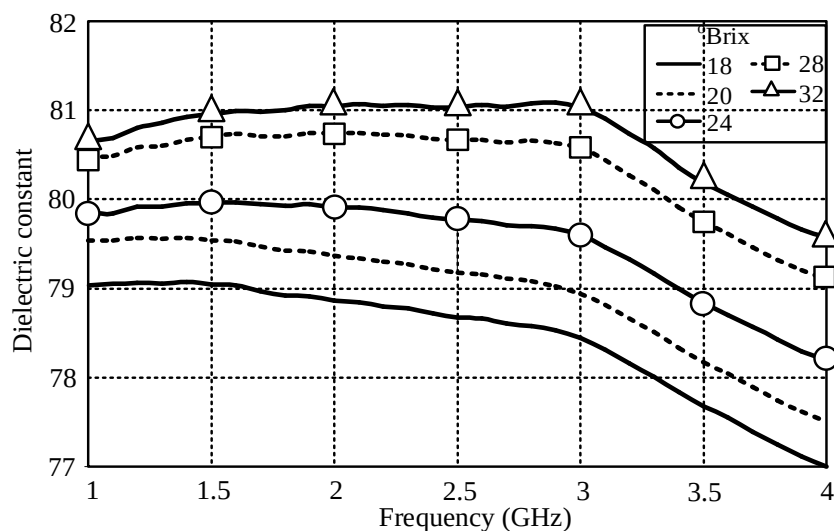
$$\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (3.3)$$

ค่าการสูญเสียแทนเจนต์แสดงอัตราส่วนระหว่างค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

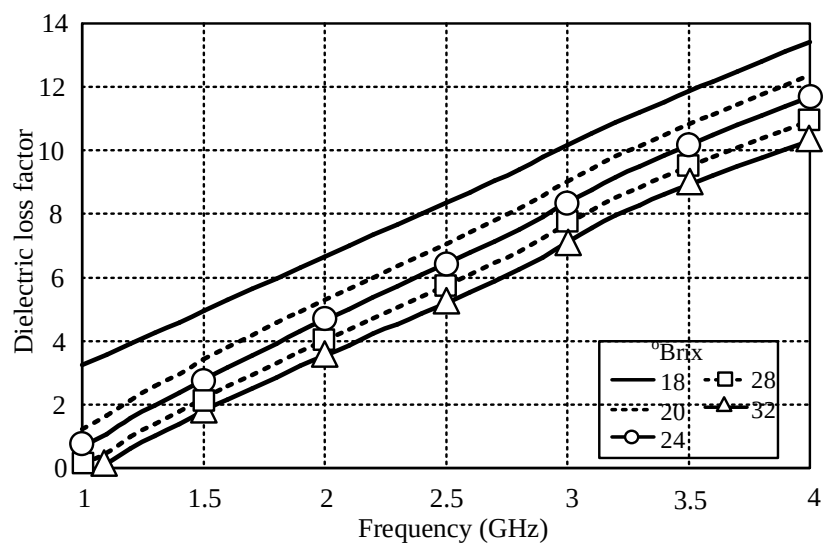
3.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสด

ภาพที่ 3.1 -3.3 แสดงผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ คือ น้ำตาลโตนดแท้ น้ำตาลโตนดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว และ น้ำตาลโตนดที่ผสมน้ำตาลทราย ตามลำดับ

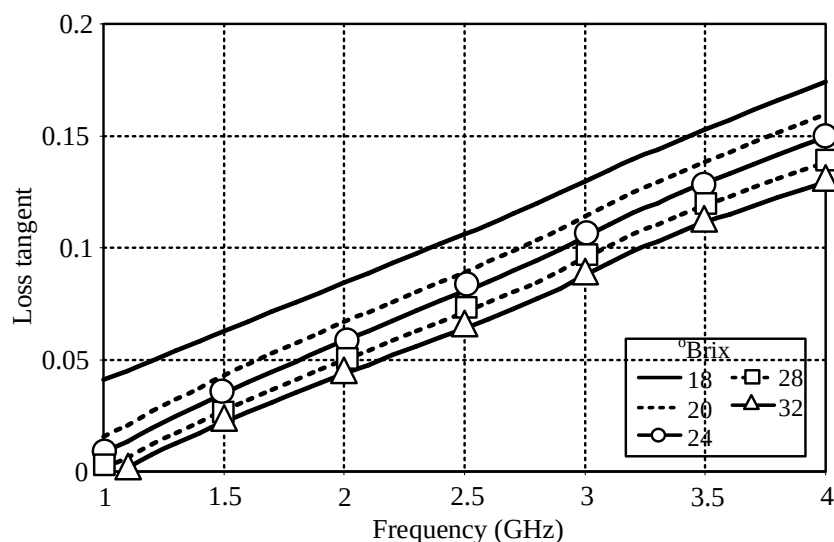
3.4.1 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดแท้



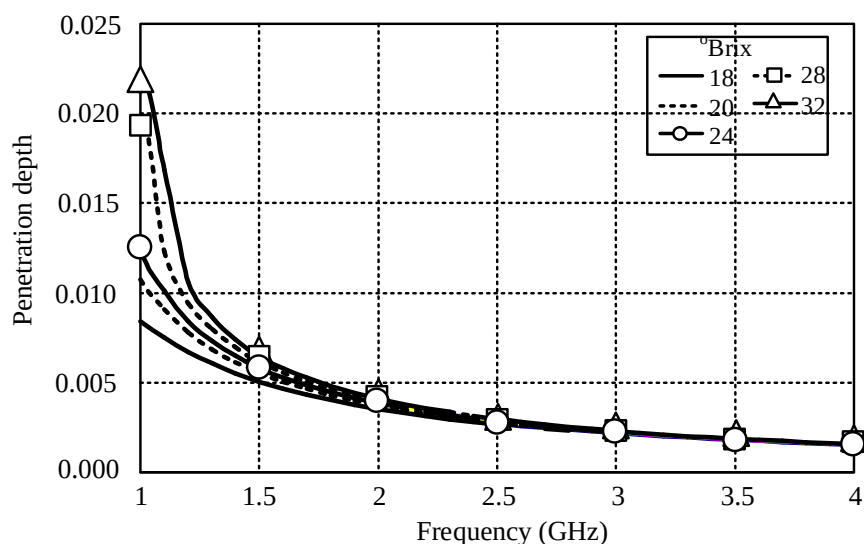
(ก)



(ข)



(ค)



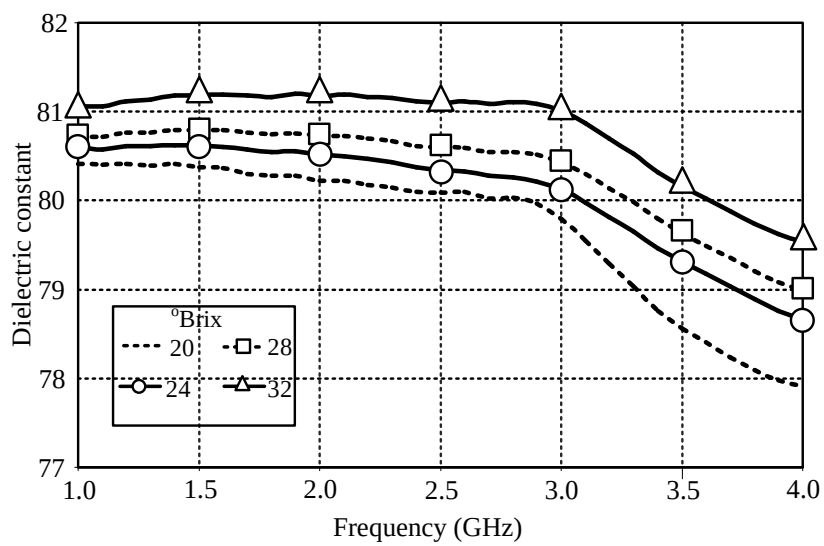
(ง)

ภาพที่ 3.1 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดแท้ (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ข) ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก (ค) ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย และ (ง) ค่าความลึก

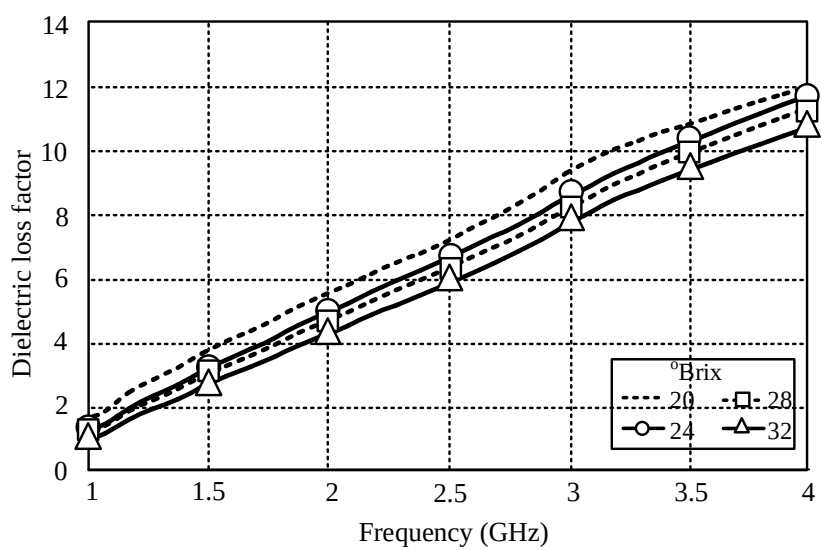
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก ของน้ำตาลโตนดสดแท้ มีค่า 77.00 ถึง 81.08 และ 0.11 ถึง 13.41 ในช่วงความถี่ 1 ถึง 4 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อ TSS มีค่าตั้งแต่ 18-32 องศาบริกซ์ ค่า TSS ที่เท่ากับ 18 องศาบริกซ์ คือ ค่า TSS ของน้ำตาลโตนดสดแท้ที่มีการต้มเพียงครั้งเดียวหลังจากการเก็บจากต้นตาล ซึ่งเป็นน้ำตาลโตนดสดแท้ที่เหมาะสมกับการดื่มและดีต่อสุขภาพ โดยปกติแล้ว น้ำตาลโตนดสดแท้จะมีค่า TSS ที่สูงกว่า 18 องศาบริกซ์ เนื่องจากมีการต้มหลายครั้ง เช่น การนำน้ำตาลที่เหลือจากการขายมาต้มซ้ำ เพื่อสามารถนำไปขายได้อีกครั้งในวันต่อไป

ค่าแทนเจนต์การสูญเสียของน้ำตาลโตนดสดแท้มีค่า 0.002 ถึง 0.17 ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการวัด และ ค่า TSS ส่วนค่าความลึกมีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.002 ถึง 0.022

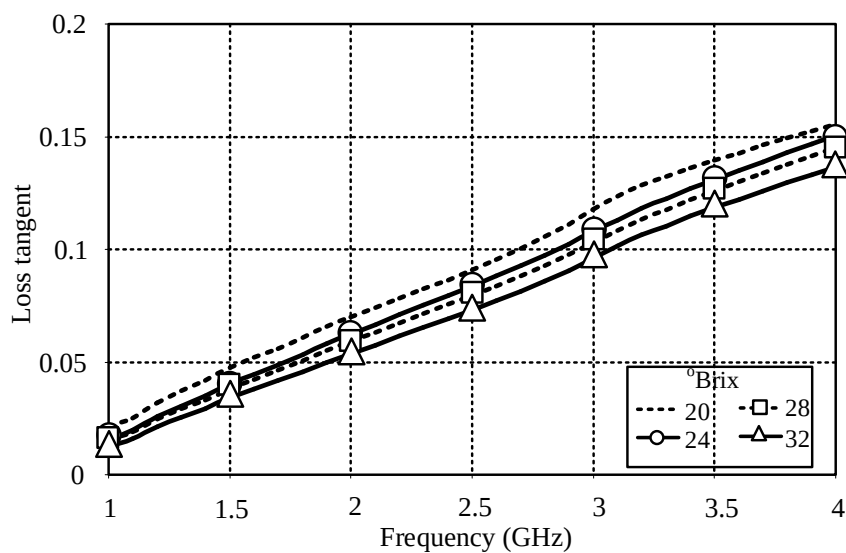
3.4.2 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว



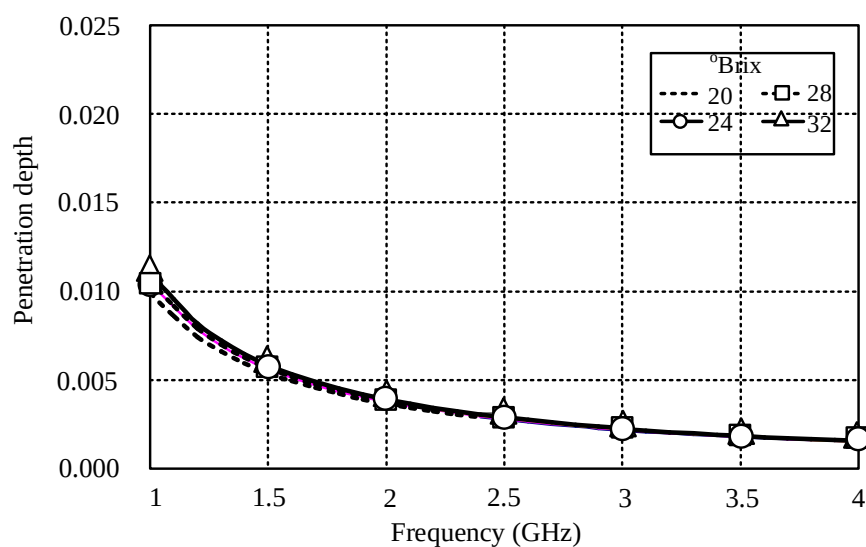
(ก)



(ข)



(ค)



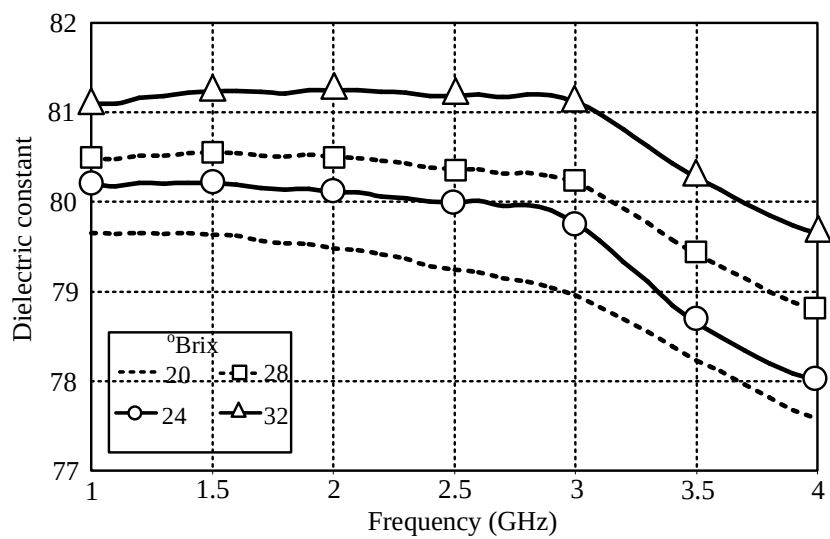
(ง)

ภาพที่ 3.2 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ข) ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก (ค) ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย และ (ง) ค่าความลึก

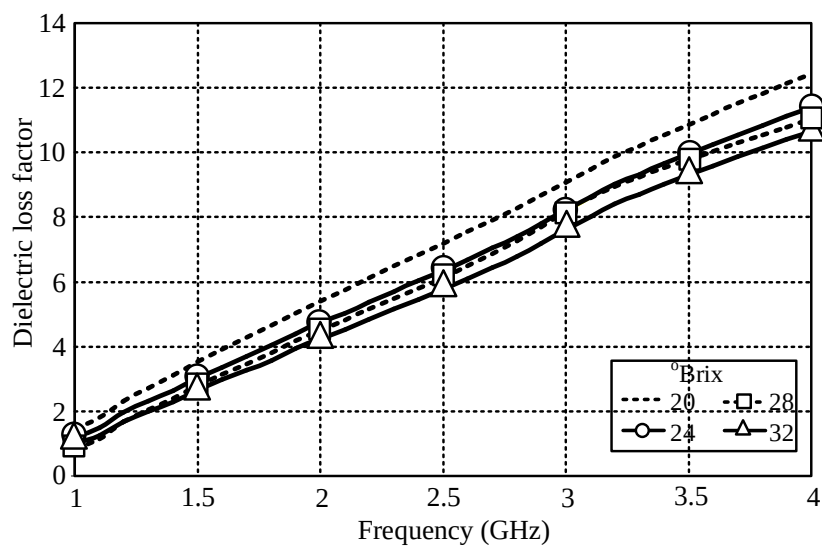
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว มีค่าอยู่ในช่วง 77.91 ถึง 81.20 และ 0.08 ถึง 12.13 ในช่วงความถี่ 1 ถึง 4 กิกะเฮิรตซ์ สังเกตว่า TSS ในกรณีของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าวและน้ำตาลทรายมีค่าเริ่มต้นที่ 20 องศาบริกซ์ เนื่องจากค่า TSS สำหรับน้ำตาลทั้งสองมีค่ามากกว่า 18 องศาบริกซ์ โดยค่าความหวานจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากการเติมน้ำตาลทั้งสองชนิดลงในน้ำตาลโตนดสด

ค่าแทนเจนต์การสูญเสียของน้ำตาลโตนดสด ที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว มีค่า 0.001 ถึง 0.16 ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการวัด และ ค่า TSS ส่วนค่าความลึกมีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.002 ถึง 0.031

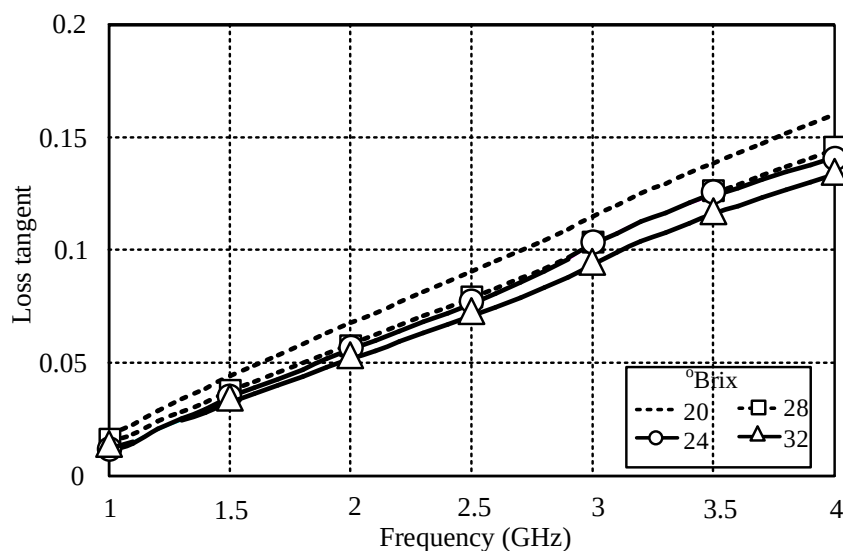
3.4.3 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย



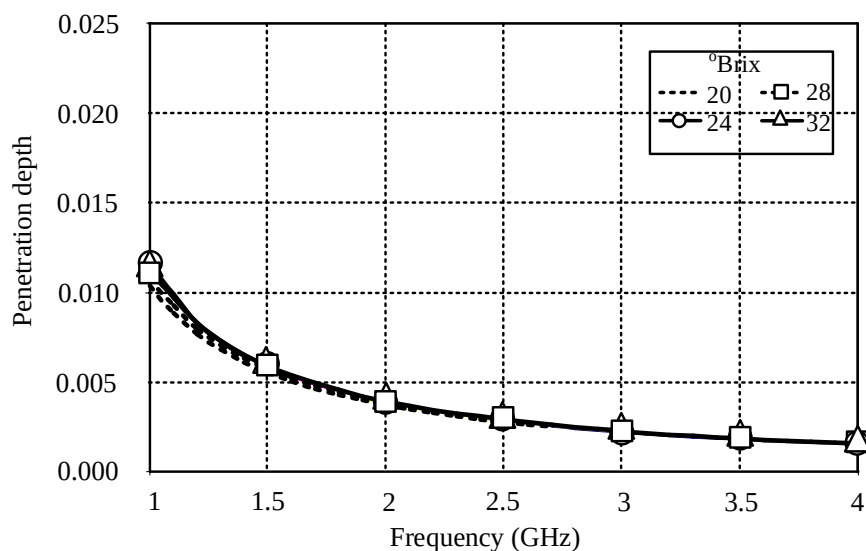
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 3.3 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโดนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ข) ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก (ค) ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย และ (ง) ค่าความลึก

สำหรับน้ำตาลโดนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่าอยู่ในช่วง 77.58 ถึง 81.25 และ 0.21 ถึง 12.44 ในช่วงความถี่ 1 ถึง 4 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ

ค่าแทนเจนต์การสูญเสียของน้ำตาลโดนดสด ที่ผสมน้ำตาลทรายมีค่า 0.003 ถึง 0.16 ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการวัด และ ค่า TSS ส่วนค่าความลึกมีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.002 ถึง 0.021

3.4.4 อภิปรายผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ

จากผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ ดัง ภาพที่ 3.1-3.3 พบว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดชนิดต่าง ๆ มีค่าลดลง ในขณะที่ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียแทนเจนต์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความลึกล้วนมีค่าลดลงในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียล

เมื่อพิจารณาค่า TSS พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดชนิดต่าง ๆ เพิ่มขึ้น เมื่อ TSS มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียแทนเจนต์มีค่าลดลง และ ความลึกล้วนมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

จากผลการทดสอบ พบว่า คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน นั่นคือ น้ำตาลโตนดสดแท้มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียที่ต่ำที่สุดในขณะที่น้ำตาลโตนดสดที่มีส่วนผสมของน้ำตาลทรายมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกสูงที่สุด เนื่องมาจากน้ำตาลซูโครสซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำตาลโตนดสดแท้มีความสามารถในการจับโมเลกุลของน้ำได้ดีกว่าน้ำตาลทรายซึ่งเป็นน้ำตาลที่มีโครงสร้างโมเลกุลซับซ้อน (Rao และคณะ, 2005) ดังนั้น จึงสามารถใช้คุณสมบัติไดอิเล็กตริกแยกแยะน้ำตาลแต่ละชนิดได้ และเมื่อพิจารณาที่ค่า TSS เดียวกัน พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันเล็กน้อย แต่ มีความแตกต่างระหว่างน้ำตาลโตนดสดที่ผสมสารให้ความหวาน ชนิดอื่น ๆ กับน้ำตาลโตนดสดแท้ (น้ำตาลโตนดสดแท้ที่มีค่า TSS เท่ากับ 18 องศาบริกซ์) ซึ่งน้ำตาลโตนดสดแท้ดังกล่าว มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียตั้งแต่ 77.00 ถึง 79.07 และ 1.60 ถึง 13.41 ในช่วงความถี่ 1 ถึง 4 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ ซึ่งค่าอ้างอิงนี้สามารถใช้แยกแยะระหว่างน้ำตาลโตนดสดแท้ และ น้ำตาลโตนดสดที่มีส่วนผสมของสารให้ความหวานได้

สำหรับค่าการสูญเสียแทนเจนต์และค่าความลึกล้วน พบว่า ค่าการสูญเสียแทนเจนต์มีค่าลดลงเมื่อ TSS มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความลึกล้วนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ TSS มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ และค่าความลึกล้วนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ของน้ำตาลโตนดสดแท้มีค่าน้อยที่สุด ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถผ่านน้ำตาลโตนดสดแท้ น้ำตาลโตนดสดผสมน้ำตาลมะพร้าว และ น้ำตาลโตนดสดผสมน้ำตาลทราย ได้ดีตามลำดับ

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดแท้ น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว และ น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 4 กิกะเฮิรตซ์ ที่ค่า TSS ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 18 ถึง 32 องศาบริกซ์ ซึ่งคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย และ ค่าความลึกล้วน โดยพบว่า น้ำตาลโตนดสดแท้และน้ำตาลโตนดสดที่มีการผสมสาร ให้ความหวาน มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน ซึ่งคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดแต่ละชนิดที่แตกต่างกันนี้ จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟที่ส่งผ่านน้ำตาลโตนดสดแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันด้วย จึงสามารถนำมาใช้เป็นคุณสมบัติสำหรับแยกแยะน้ำตาลโตนดสดแต่ละชนิดได้ต่อไป

บทที่ 4

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสด

4.1 บทนำ

ในบทที่ 3 ได้นำเสนอผลการวัดค่าไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ โดยใช้โพรบแบบร่วมแบบปลายเปิด นอกจากวิธีการวัดค่าไดอิเล็กตริกที่กล่าวถึงในบทที่ 3 แล้ว ยังมีวิธีวัดคุณสมบัติของวัสดุชนิดต่าง ๆ อีกวิธีหนึ่ง คือ วิธี การวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้สายอากาศส่งทำหน้าที่ ส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านวัสดุที่ต้องการทดสอบและใช้ สายอากาศชนิดเดียวกันที่ทางด้านรับ รับสัญญาณไมโครเวฟที่ส่งผ่านวัสดุ ซึ่งโดยปกติแล้ว วัสดุที่มีค่าไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกันนั้น จะมีค่า สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของสัญญาณที่แตกต่างกันด้วย ในบทนี้ นำเสนอผลการวัดค่า สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดด้วยวิธีอากาศว่าง โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย จากนั้น พิจารณาความสัมพันธ์ของ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ได้ในบทนี้กับผลการวัด คุณสมบัติไดอิเล็กตริก ในบทที่ 3 โดยวัดระดับความสัมพันธ์ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่าย (Simple linear regression analysis) (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2552) เพื่อพิจารณา ระดับความสัมพันธ์ก่อน สร้างมอดูลทดสอบ คุณสมบัติของน้ำตาลโตนดสดต่อไป

4.2 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน จะ ใช้สายอากาศส่ง คลื่นไมโครเวฟผ่านวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีความหนา วิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่มีการสัมผัส (Non-contacting) และสามารถประยุกต์ใช้กับ วัสดุที่จะทดสอบที่อุณหภูมิสูง วิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน นอกจากจะใช้สายอากาศส่งและ รับคลื่นไมโครเวฟแล้ว จะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายประกอบการทดสอบด้วย

ในการวัด ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ตัวอย่างวัสดุจะถูวางร ระหว่างสายอากาศส่งและ สายอากาศรับและวัดค่าการลดทอนและเฟสที่เลื่อนไปของสัญญาณ ซึ่งผลที่ได้จะถูกใช้ในการคำนวณ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ สมมติฐานที่ใช้สำหรับการวัดวิธีนี้ คือ คลื่นระนาบจะตกกระทบแบบ ตั้งฉากบนพื้นผิวเรียบของวัสดุเนื้อเดีย ยวกันและสมมติให้ตัวอย่างวัสดุแบบแบนราบ มีขนาดอนันต์ ซึ่ง ทำให้ไม่พิจารณาผลกระทบเนื่องจากการเลี้ยวเบน (Diffraction) ที่ขอบของวัสดุตัวอย่าง ข้อควรระวัง สำหรับการวัดโดยวิธีนี้ คือ อุปกรณ์จับยึดตัวอย่างจะต้องมีความมั่นคง วัสดุตัวอย่างควรอยู่กึ่งกลาง ระหว่างสายอากาศส่งและรับ และ วัสดุตัวอย่างควรมีลักษณะแบนราบและพื้นผิวเรียบ

คลื่นระนาบที่เดินทางในวัสดุตัวอย่างที่มีความหนา (d) จะมีปฏิกิริยากับวัสดุตัวอย่าง โดย องค์ประกอบของสภาพยอมทั้ง ϵ' และ ϵ'' สามารถหาค่าได้จากค่าการลดทอนที่วัดได้ (A) และเฟส ที่เลื่อนไป (ϕ) ของคลื่นที่เดินทางเข้าไปในตัวกลางไดอิเล็กตริกนั้น เมื่อ $\epsilon'' \ll \epsilon'$ (Nelson, 2010)

$$\epsilon' = \left(\frac{\beta}{\beta_0} \right)^2 \quad (4.1)$$

และ

$$\varepsilon'' = \left(\frac{2\alpha\beta}{\beta_0} \right) \quad (4.2)$$

เมื่อ $\alpha = A/d$ คือ ค่าคงที่การลดทอน $\beta = (\phi/d) + \beta_0$ คือ ค่าคงที่เฟส และ $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0$ คือ ค่าคงที่เฟสในอากาศว่าง การรบกวนเนื่องจากคลื่นสะท้อนสามารถไม่พิจารณาได้ ถ้าใช้ความหนาของตัวกลาง สำหรับคลื่นที่เดินทางใน เส้นทางเดียวที่ทะลุผ่านตัวกลาง ที่ทำให้เกิดการลดทอนอย่างน้อย 10 dB

สำหรับการวัดโดยวิธีนี้จะใช้สายอากาศแบบปากแตร หรือ เลนส์ เพื่อให้เกิดคลื่นระนาบ โดยวัสดุไดอิเล็กทริกจะถูกวางระหว่างสายอากาศทั้งสองนี้ สำหรับการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย จะวัดค่า $|S_{21}|$ และคำนวณหาการลดทอนและเฟสที่เลื่อนไปได้จาก

$$A = 20 \log |S_{21}| \quad (4.3)$$

และ

$$\phi = \text{Arg}(S_{21}) - 2n\pi \quad (4.4)$$

เมื่อ n เป็นจำนวนเต็มที่เหมาะสม (Nelson, 2010)

4.3 วิธีการทดสอบ

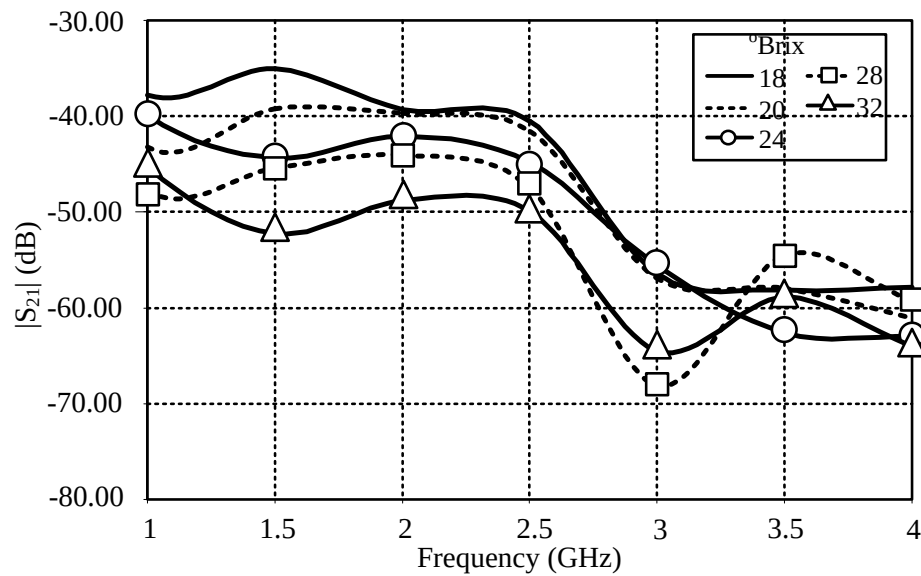
การวัดค่าสัมประสิทธิ์ การส่งผ่าน มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย วัสดุที่ต้องการทดสอบ ซึ่งจะถูกรวบรวมระหว่างสายอากาศส่งและรับที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเดียวกัน สายอากาศส่ง ทำหน้าที่ส่งสัญญาณไมโครเวฟผ่านวัสดุที่ต้องการทดสอบ และ สายอากาศรับ ทำหน้าที่รับสัญญาณไมโครเวฟ

ในงานวิจัยฉบับนี้ ใช้สายอากาศแบบแบนด์กว้างในการทดสอบ โดยสายอากาศจะต่อเข้ากับพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย E5071C และวัดขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission Coefficient $|S_{21}|$) ในช่วงความถี่ 1 ถึง 4 กิกะเฮิรตซ์ และวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ น้ำตาลโตนดสดทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำตาลโตนดสดแท้ น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว และ น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย ซึ่งมีค่า TSS ตั้งแต่ 18 ถึง 32 องศาบริกซ์ ตัวอย่างน้ำตาลแต่ละชนิดบรรจุในกล่องพลาสติกสีเหลี่ยมจัตุรัสมีความกว้างและความยาวขนาด 7 เซนติเมตร และมีความสูง 4.5 เซนติเมตร ปริมาณตัวอย่างน้ำตาลที่ใช้ในแต่ละการทดสอบมีค่า 200 มิลลิลิตร และ อุณหภูมิของตัวอย่างน้ำตาลมีค่า 25 องศาเซลเซียส

4.4 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

ภาพที่ 4.1–4.3 แสดงผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ คือ น้ำตาลโตนดสดแท้ น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว และ น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย ตามลำดับ

4.4.1 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดแท้

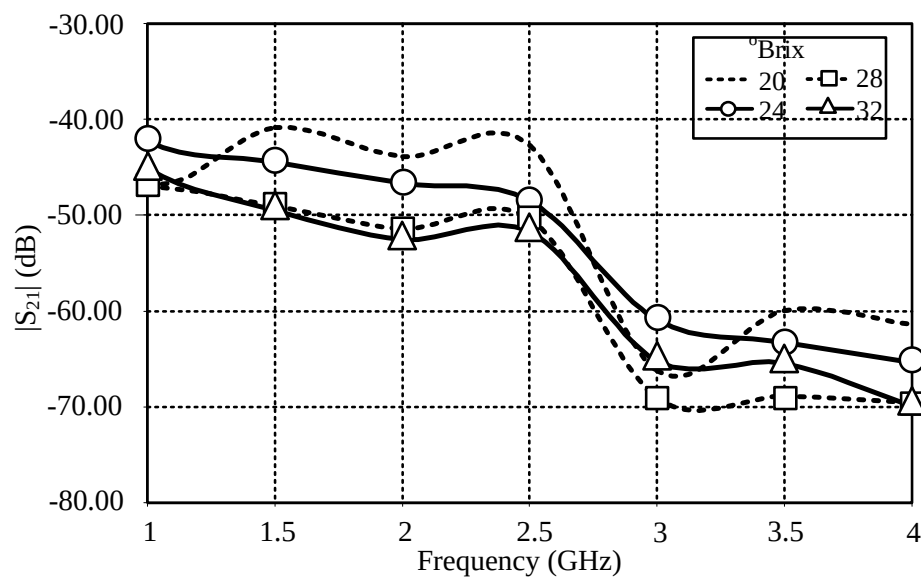


ภาพที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดแท้

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดแท้มีค่า ตั้งแต่ -68.1 ถึง -24.46 dB ในช่วงความถี่ 1 ถึง 4 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อ TSS มีค่าตั้งแต่ 18-32 องศาบริกซ์

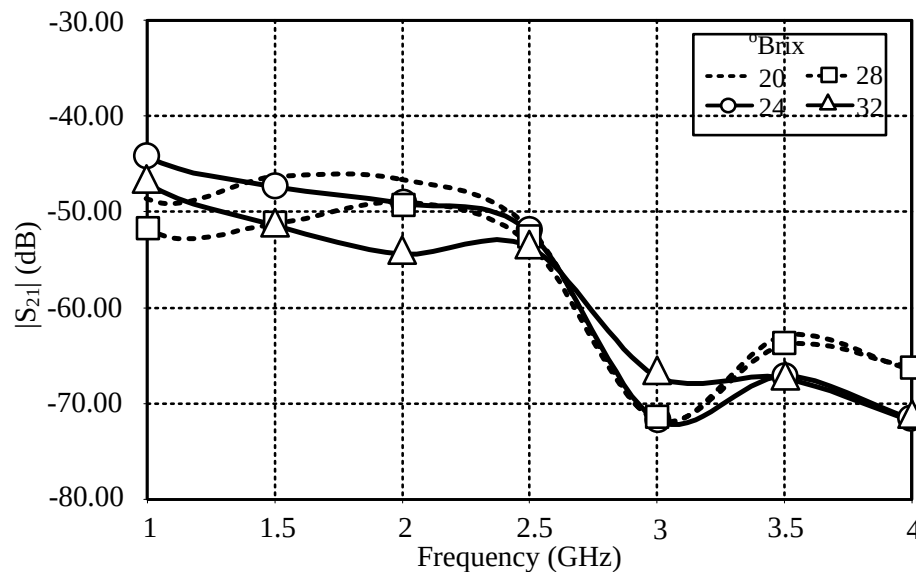
4.4.2 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ น้ำตาลโตนดสด ที่ผสม น้ำตาลมะพร้าว

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าวมีค่า ตั้งแต่ -69.79 ถึง -31.05 dB ในช่วงความถี่ 1 ถึง 4 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อ TSS มีค่าตั้งแต่ 20-32 องศาบริกซ์



ภาพที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว

4.3.3 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ น้ำตาลโตนดสด ที่ผสม น้ำตาลทราย



ภาพที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทรายมีค่า ตั้งแต่ -71.86 ถึง -34.96 dB ในช่วงความถี่ 1 ถึง 4 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อ TSS มีค่าตั้งแต่ 20-32 องศาบริกซ์

4.4.4 อภิปรายผลการ ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของน้ำตาลโตนดสด ชนิดต่าง ๆ

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ มีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงเมื่อค่า TSS มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดที่เพิ่มขึ้นเมื่อค่า TSS เพิ่มขึ้น

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับความถี่ ชนิดของน้ำตาลโตนดสด และ ค่า TSS น้ำตาลโตนดสดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่สูงที่สุด ในขณะที่ น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทรายมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ต่ำที่สุดในช่วงความถี่ 1 ถึง 4 กิกะเฮิรตซ์ และ TSS มีค่าตั้งแต่ 18-32 องศาบริกซ์ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดแท้และน้ำตาลโตนดสดที่ผสมสารให้ความหวานชนิดต่าง ๆ มีค่าแตกต่างกันและสามารถใช้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านนี้เป็นพารามิเตอร์ในการแยกแยะน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ได้

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

4.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดแท้

ตารางที่ 4.1 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดแท้

°Brix	R^2			
	ϵ'_r	ϵ''_r	$\tan \delta$	frequency
16	0.74	0.83	0.83	0.83
20	0.77	0.73	0.74	0.75
24	0.80	0.87	0.87	0.87
28	0.19*	0.46*	0.45*	0.45*
32	0.25*	0.74	0.74	0.73
average	0.55	0.73	0.73	0.73

หมายเหตุ * หมายถึงค่าความสัมพันธ์ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับ 5%

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย และ ความถี่ กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดแท้ ซึ่งพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นอย่างดี โดยมีค่าเฉลี่ยของ R^2 สูงกว่า 0.5 สำหรับทุกพารามิเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความสัมพันธ์กับค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก มีค่า R^2 เฉลี่ยสูงที่สุด เท่ากับ 0.73 ซึ่งเท่ากับค่า R^2 ของค่าแทนเจนต์การสูญเสีย เนื่องจากทั้งสองพารามิเตอร์เป็นอัตราส่วนต่อกัน

4.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย และ ความถี่ กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว ซึ่งพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นอย่างดี โดยมีค่าเฉลี่ยของ R^2 สูงกว่า 0.5 สำหรับทุกพารามิเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความสัมพันธ์กับค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก มีค่า R^2 เฉลี่ย

สูงที่สุด เท่ากับ 0.82 ซึ่งเท่ากับค่า R^2 ของค่าแทนเจนต์การสูญเสีย เนื่องจากทั้งสองพารามิเตอร์นี้เป็นอัตราส่วนต่อกัน

ตารางที่ 4.2 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาล
โตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว

°Brix	R^2			
	ϵ_r'	ϵ_r''	$\tan \delta$	Frequency
20	0.55*	0.61	0.61	0.60
24	0.79	0.92	0.92	0.92
28	0.63	0.83	0.83	0.82
32	0.62	0.93	0.93	0.92
average	0.65	0.82	0.82	0.82

หมายเหตุ * หมายถึงค่าความสัมพันธ์ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับ 5%

**4.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ
น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย**

ตารางที่ 4.3 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาล
โตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย

°Brix	R^2			
	ϵ_r'	ϵ_r''	$\tan \delta$	Frequency
20	0.56*	0.67	0.67	0.68
24	0.61	0.86	0.87	0.85
28	0.41*	0.64	0.63	0.62
32	0.59	0.93	0.93	0.92
average	0.54	0.78	0.78	0.77

หมายเหตุ * หมายถึงค่าความสัมพันธ์ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับ 5%

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย และ ความถี่ กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย ซึ่งพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นอย่างดี โดยมีค่าเฉลี่ยของ R^2 สูงกว่า 0.5 สำหรับทุกพารามิเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความสัมพันธ์กับค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก มีค่า R^2 เฉลี่ยสูงที่สุด เท่ากับ 0.78 ซึ่งเท่ากับค่า R^2 ของค่าแทนเจนต์การสูญเสีย เนื่องจากทั้งสองพารามิเตอร์นี้เป็นอัตราส่วนต่อกัน

4.5.4 อภิปรายผลความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ

จากค่า R^2 ของน้ำตาลโตนดสดทั้งสามชนิด แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสด ชนิดต่าง ๆ มีความสัมพันธ์เป็นอย่างมากกับคุณสมบัติไดอิเล็กตริก โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก ดังนั้น จึงสามารถใช้วิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในการแยกแยะน้ำตาลแต่ละชนิดได้

4.5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า R^2 ระหว่างค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ ซึ่งพบว่า มีค่า R^2 สูงถึง 0.9 ในช่วงความถี่ 1.5-2.5 กิกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้น ในการออกแบบมอดูลทดสอบจึงควรเลือกใช้ความถี่ที่ค่าดังกล่าว เพื่อให้ผลของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ทดสอบได้มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดมากที่สุด

ตารางที่ 4.4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ ที่ความถี่แตกต่างกัน

Frequency	R^2
	ε_r''
1	0.07*
1.5	0.9
2	0.91
2.5	0.91
3	0.01*
3.5	0.54
4	0.79

หมายเหตุ * หมายถึงค่าความสัมพันธ์ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับ 5%

4.6 สรุป

ในบทนี้ นำเสนอผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ คือ น้ำตาลโตนดสดแท้ น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว และ น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย ในช่วงความถี่ 1 ถึง 4 กิกะเฮิร์ตซ์ และ TSS มีค่าตั้งแต่ 18-32 องศาบริกซ์ จากผลการทดสอบพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ มีความแตกต่างกัน และสามารถใช้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านนี้เป็นคุณสมบัติแยกแยะระหว่างน้ำตาลโตนดสดแท้และน้ำตาลโตนดสดที่มีการผสมสารให้ความหวานชนิดอื่น ๆ ได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเมื่อเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ น้ำตาลโตนดสดแท้ น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว และ น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย ตามลำดับ ซึ่งจากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง คุณสมบัติไดอิเล็กตริก และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ได้ในบทนี้ ควรเลือกสร้างמודูลระบบทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในช่วงความถี่ 2-2.5 กิกะเฮิร์ตซ์ เนื่องจากมีค่า R^2 ที่สูงที่สุด และ เมื่อพิจารณาถึงความถี่ที่มี อุปกรณ์จำหน่ายจำนวนมากแล้ว จึงเลือกออกแบบמודูลระบบทดสอบเพื่อใช้งานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์

บทที่ 5

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดด้วย มอดูลระบบทดสอบ

5.1 บทนำ

ในบทนี้ จะได้นำเสนอผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดด้วยมอดูลระบบทดสอบที่ได้สร้างขึ้น ซึ่งทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทดสอบที่มีขนาดเล็ก พกพาได้ง่าย และสามารถใช้ทดสอบนอกสถานที่ได้

5.2 วิธีการทดสอบ

ในการทดสอบ น้ำตาลโตนดสด ทั้ง น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว และ น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย บรรจุ ในกล่องพลาสติกสีเหลืองจัตุรัสที่มีความกว้างและยาว 7 เซนติเมตร และมีความสูง 4.5 เซนติเมตร ปริมาณของน้ำตาลโตนดสดที่ใช้แต่ละชนิดจะมีค่าเท่ากัน คือ 200 มิลลิลิตร ค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ของน้ำตาลโตนดสดแต่ละชนิดมีค่าตั้งแต่ 18-32 องศาบริกซ์ ซึ่งในการทดสอบ ได้ควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำตาลโตนดสดให้มีค่า 25 องศาเซลเซียส ในทุกการทดสอบ

5.3 มอดูลระบบการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสด

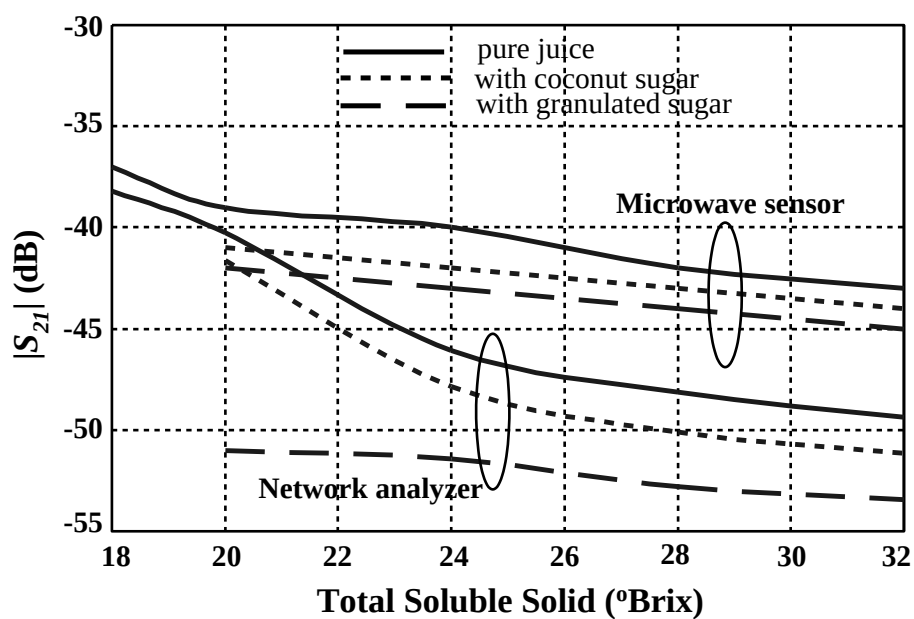
มอดูลระบบทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสด ประกอบด้วย ส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ ตัวกำเนิดสัญญาณ วงจรตรวจจับสัญญาณ และ หน่วยประมวลผล ตัวกำเนิดสัญญาณของมอดูลระบบทดสอบนี้ กำเนิดสัญญาณความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ด้วยการทำงานของเฟสล็อกลูป (Phase locked loop: PLL) สัญญาณไมโครเวฟจากสายอากาศรับจะถูกแปลงจากค่ากำลังงานในหน่วย dBm เป็น แรงดันไฟกระแสตรง โดยใช้ ชิปตัวตรวจจับสัญญาณ หน่วยประมวลผลของมอดูลระบบทดสอบ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega 168 แบบ AVR เพื่อควบคุมตัวกำเนิดสัญญาณที่ทางด้านส่งให้กำเนิดสัญญาณที่ความถี่ที่ต้องการ และรับสัญญาณที่ตรวจจับได้จากวงจรตรวจจับสัญญาณที่ทางด้านรับมาประมวลผล



ภาพที่ 5.1 มอดูลระบบการทดสอบ

5.4 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการอภิปรายผล

ภาพที่ 5.2 เป็นผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ เมื่อมีค่า TSS ตั้งแต่ 18 ถึง 32 องศาบริกซ์ โดยผลการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยของการวัดซ้ำจำนวน 3 ครั้ง จากผลการทดสอบในภาพที่ 5.2 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีค่าลดลงเมื่อค่า TSS ของน้ำตาลโตนดสดมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 5.2 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

จากผลการทดสอบในบทที่ 3 เมื่อปริมาณน้ำตาลในน้ำตาลโตนดสดมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า คงที่ ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีค่าลดลง

น้ำตาลโตนดสดแท้มีค่าการส่งผ่านที่สูงที่สุด โดยมีค่าตั้งแต่ -37 ถึง -43 dB ที่ TSS มีค่า ตั้งแต่ 18 ถึง 32 องศาบริกซ์ น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทรายมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ต่ำที่สุด โดยค่าตั้งแต่ -42 ถึง -45 dB ที่ TSS มีค่าตั้งแต่ 20 ถึง 32 องศาบริกซ์ ซึ่งจากผลดังกล่าว สามารถ กล่าวได้ว่า เนื่องจาก น้ำตาลโตนดสดแท้มีค่าคงที่ และค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย ไดอิเล็กทริกที่ต่ำที่สุด ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่มากที่สุด

จากผลการทดสอบในภาพที่ 5.2 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านขึ้นอยู่กับค่า TSS และ ชนิดของน้ำตาลที่ใส่ลงในน้ำตาลโตนด จึงทำให้ ค่า สัมประสิทธิ์ การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดแท้ และ น้ำตาลโตนดสดที่มีการผสมน้ำตาลชนิดอื่นมีความแตกต่างกัน ดังนั้น จึงสามารถใช้ค่า สัมประสิทธิ์การส่งผ่านเป็นพารามิเตอร์ในการ แยกแยะระหว่างน้ำตาล โตนดสดแท้และน้ำตาล โตนด สดที่มีการผสมน้ำตาลชนิดอื่นได้

นอกจากผลของค่า สัมประสิทธิ์ การส่งผ่านที่วัดได้จากมอดูลระบบทดสอบแล้ว ในภาพที่ 5.2 ยังได้เปรียบเทียบ ผลการวัดที่ได้จากมอดูลระบบทดสอบ และผลการวัดจาก เครื่องวิเคราะห์ โครงข่าย ซึ่งพบว่า มีแนวโน้มของผลการทดสอบที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยค่าสัมประสิทธิ์การ ส่งผ่านที่ได้จากการวัดด้วยมอดูลระบบทดสอบมีค่าสูงกว่าค่าการส่งผ่านที่วัดได้ จากเครื่องวิเคราะห์ โครงข่าย เนื่องจากกำลังงานของตัวกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในมอดูลระบบทดสอบมีค่าสูงกว่า กำลังงาน ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย จากผลดังกล่าว แสดงให้ เห็นว่า สามารถใช้มอดูลระบบทดสอบวัดค่า สัมประสิทธิ์ การส่งผ่านของสัญญาณไมโครเวฟแทนเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายได้ ซึ่งจะทำให้สะดวก และสามารถพกพาสำหรับการทดสอบนอกสถานที่ได้

ค่าสัมประสิทธิ์ การส่งผ่าน ในภาพที่ 5.2 สามารถใช้แยกแยะน้ำตาลโตนดสดแท้ และ น้ำตาลโตนดสดที่มีการผสมน้ำตาลชนิดอื่นได้ โดยหากวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านได้สูงกว่า -40 dB สามารถพิจารณาได้ว่าเป็นน้ำตาลโตนดสดแท้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสด แท้จะมีค่าสูงกว่า -40 dB ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดที่มีการผสมน้ำตาล ชนิดอื่นจะมีค่าต่ำกว่า -40 dB ที่ทุกค่าของ TSS แต่หากวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านได้ต่ำกว่า -40 dB (ช่วง -41 ถึง -43 dB) นั้น ควรพิจารณาค่า TSS ประกอบด้วย เนื่องจาก ค่า สัมประสิทธิ์การ ส่งผ่านของทั้งน้ำตาลโตนดสดแท้และน้ำตาลโตนดสดที่มีการผสมน้ำตาลชนิดอื่นมีค่าใกล้เคียงกัน เช่น เมื่อวัดค่าการส่งผ่านได้ -43 dB และพิจารณาค่า TSS ประกอบ หากค่า TSS มีค่า 26 องศาบริกซ์ ผล การวัดที่ได้เป็นผลของน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว แต่หากค่า TSS มีค่า 32 องศาบริกซ์ ผล การวัดที่ได้เป็นผลของน้ำตาลโตนดสดแท้ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม หากวัดค่า สัมประสิทธิ์การส่งผ่านได้ต่ำ กว่า -43 dB แล้ว อาจกล่าวได้ว่า น้ำตาลโตนดสดนั้นเป็นน้ำตาลโตนดสดที่มีการผสมน้ำตาลชนิดอื่น ได้เสมอ โดยสามารถใช้ค่า สัมประสิทธิ์การส่งผ่านในภาพที่ 5.2 เป็นค่าอ้างอิงผลการทดสอบน้ำตาล โตนดสดที่ไม่ทราบชนิดต่าง ๆ ได้ นอกจากการพิจารณาโดยใช้ค่า TSS ยังสามารถใช้คุณสมบัติทาง

กายภาพ เช่น สี และ กลิ่น ประกอบได้ด้วย ปกติน้ำตาลโตนดสดที่ขายในท้องตลาดนั้น มักเป็นน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทรายมากกว่าน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว ในบางครั้งอาจพบผู้ขายที่นำน้ำตาลมะพร้าวมาขายโดยอ้างว่าเป็นน้ำตาลโตนดสดแท้

5.5 สรุป

ในบทนี้ นำเสนอ การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ เพื่อใช้ในการระบุน้ำตาลโตนดสดแท้และน้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลชนิดอื่น โดยวัดสัญญาณไมโครเวฟที่ส่งผ่านน้ำตาลแต่ละชนิดด้วยสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ผลการทดสอบแสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ต่างกันสำหรับน้ำตาลโตนดสดแต่ละชนิด และ น้ำตาลโตนดสดที่มีค่า TSS แตกต่างกัน เมื่อเรียงลำดับค่าการส่งผ่านจากค่ามากไปค่าน้อย พบว่า น้ำตาลโตนดสดแท้มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่สูงที่สุด รองลงไป คือ น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลมะพร้าว และ น้ำตาลโตนดสดที่ผสมน้ำตาลทราย ตามลำดับ และเมื่อนำผลการวัดที่ได้เปรียบเทียบกับผลการวัดจากเครื่องวิเคราะห์หีโครข่าย พบว่า มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

บทที่ 6

บทสรุปและวิจารณ์

6.1 บทสรุปและวิจารณ์

จากความต้องการระบบทดสอบคุณภาพของน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่ม ซึ่งในปัจจุบันมีการปลอมปนสารให้ความหวานชนิดอื่น เช่น น้ำตาลมะพร้าว และ น้ำตาลทราย เพื่อเพิ่มปริมาณและความหวาน ใน งานวิจัย ฉบับนี้ จึงได้เสนอมอดูลทดสอบคุณภาพของน้ำตาลโตนดสดโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งสามารถแยกแยะระหว่างน้ำตาลโตนดสดแท้ และ น้ำตาลโตนดสดที่มีการผสมสารให้ความหวานลงไปได้ โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการหรือการชิม เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การส่ง ผ่านของน้ำตาลโตนดสดแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน โดยได้ศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ ที่ความถี่และค่า TSS ที่แตกต่างกัน จากนั้น ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย เพื่อยืนยันความสามารถในการแยกแยะชนิดของน้ำตาลโตนดสด และในขั้นตอนสุดท้าย ได้ทดสอบคุณสมบัติของน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มด้วย มอดูลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ โดยมีรายละเอียดในแต่ละบทดังนี้

บทที่ 3 ได้ผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดแต่ละชนิด ซึ่งจากผลการทดสอบ พบว่า น้ำตาลโตนดสดแท้และน้ำตาลโตนดสดที่มีการผสมสาร ให้ความหวานมีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน ซึ่งคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำตาลโตนดสดแต่ละชนิดที่แตกต่างกันนี้ จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟที่ส่งผ่านน้ำตาลโตนดสดแต่ละชนิด มีความแตกต่างกันด้วย จึงสามารถนำมาใช้เป็นหลักการสำหรับแยกแยะน้ำตาลโตนดสดแต่ละชนิด

บทที่ 4 ได้ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ซึ่งพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของน้ำตาลโตนดสดชนิดต่าง ๆ มีความแตกต่างกัน และ สามารถใช้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านนี้เป็นคุณสมบัติแยกแยะระหว่างน้ำตาลโตนดสดแท้และน้ำตาลโตนดสดที่มีการผสมสารให้ความหวานชนิดอื่น ๆ ได้ ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของน้ำตาลโตนดสดและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ได้ในบทนี้ จะนำไปใช้ในการสร้างมอดูลระบบทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านต่อไป

บทที่ 5 ได้สร้างมอดูลระบบทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นไมโครเวฟ เพื่อใช้ในการระบุน้ำตาลโตนดสดแท้และน้ำตาลโตนดสดที่ผสมสารให้ความหวานชนิดอื่น ผลการทดสอบ แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่แตกต่างกันสำหรับน้ำตาลโตนดสดแต่ละ ชนิด เมื่อนำผลการวัดที่ได้เปรียบเทียบกับผลการวัดจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย พบว่า มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี เป็นการยืนยันความแม่นยำในการทำงานของมอดูลระบบทดสอบดังกล่าว

6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา

โดยปกตินั้น น้ำตาลโตนดสดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด จะบรรจุอยู่ในขวดแก้วใส ดังนั้น การทดสอบคุณภาพจึงควรพิจารณาในขณะที่บรรจุในขวดดังกล่าว ด้วยเงื่อนไขนี้ จึงควรพัฒนามอดูลทดสอบให้สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ได้ในหลายตัวกลาง ซึ่งในที่นี้ คือ แก้ว และ น้ำตาลโตนดสด ตามลำดับ นอกจากนี้ ควรพัฒนาสายอากาศส่งและรับให้มีลักษณะบางและสามารถโค้งงอรอบขวดได้ เพื่อให้ผลการวัดมีความแม่นยำและถูกต้อง

บรรณานุกรม

- กี๋ ตรีบุยล์ . 2527. ประเภทและกลไกการทำงานของระบบการผลิตทางการเกษตรของ
สหกรณ์ในปัจจุบัน . โครงการวิจัยระบบการผลิตทางการเกษตร
คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
กรมส่งเสริมการเกษตร . 2544. ตาลโตนด ผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปและรูปแบบโรงผลิต
กรมส่งเสริมการเกษตร. กรุงเทพฯ
กัลยา วาณิชยบัญชา . 2552. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย Excel ห้างหุ้นส่วนจำกัดสามลดา.
กรุงเทพฯ.
เด่นชัย วรเสวต . ศศิวิมล อ่อนสุทธิ . อาทิตยา อ่ำพืงมาตย์ และ โมไนย ไกรฤกษ์ . 2550. ระบบ
ตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล . การ ประชุมทางวิชาการของ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45. กรุงเทพฯ
ปาณิสรา แก้วสวัสดิ์ และคณะ. 2555. ระบบทดสอบคุณภาพน้ำตาลโตนดสดพร้อมดื่มด้วยวิธีการทาง
ไมโครเวฟ. โครงการวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
เรณูภา แจ่มฟ้า . 2545. การผลิตไซรัปจากน้ำตาลสด . วิทยานิพนธ์วิ ทยาสา สตรมหาบัณฑิต .
มหาวิทยาลัยนเรศวร
สุภารัตน์ เตียไพบูลย์ . 2547. ผลของการใช้ความดันสูงและความร้อนต่อคุณภาพของน้ำตาล
โตนด วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
สำนักงานเกษตรจังหวัดเพชรบุรี. 2551. รายงานประจำปี ข้อมูลสถิติจำนวนต้นตาลโตนด
Abbas, Z., Mokhtar, R., Khalid, K., Hashim, M. and Aziz S.A. 2007. RDWG technique of
determination of moisture content in oil palm fruits. The European
Physical Journal Applied Physics. 40(2):207-210.
Al-Mattarneh, H.M.A., Ghodgaonkar, D.K., and Majid W.M. 2002. Microwave non-
destructive testing of fibre concrete using free space microwave
measurements. J. Microw Power Electromagn Energy. 30(2):117-123.
Ali, A.H., Abbas, Z.B., Hassan, J.B., Jusoh, A.B. and Zahari R.B.M. 2011. Microwave
antenna sensing technique for determination of moisture content in
Hevea Latex from Hevea Brasiliensis tree. Australian Journal of Crop
Science. 5(11):1326-1332.
Child, R. 1974. Coconuts. 2nd ed. Longman group Ltd. London.
Guo, W., Zhu, X., Liu, Y., and Zhuang H. 2009. Sugar and water contents of honey
with dielectric property sensing. Journal of Food Engineering. 97(2):275-
281.
Isa, M.M. 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. November 16-18. 529-532.
Kharkovsky, S.N., Akay, M.F., Hasar, U.C., and Cengiz D.A. 2002. Measurement and
monitoring of microwave reflection and transmission properties of

- cement-based specimens. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement. 51(6):1210-1218.
- Nelson, S. O. 2010. Fundamentals of dielectric properties measurements and agricultural applications. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. 44: 98-113.
- Ohler, J.G. 1984. Coconut, tree of life. Food and agriculture organization of the United Nations. Rome.
- Rao, M. A. Rizvi, S. S. H. and Datta, A. K. 2005. Engineering Properties of Foods. Taylor & Francis Group. New York.
- Tongleam, T., Jittiwarakul, N., Kumhom, P., and Chamnongthai K. 2004. Non-destructive grading of mangosteen by using microwave moisture sensing. Inter Symp on Commun and Infor Tech 2004. 2:650-653.
- Tulasidas, T.N., Raghavan, G.S.V., Van de Voort, F., and Girard R. 1995. Dielectric properties of grapes and sugar solution at 2.45 GHz. J. Microw Power Electromagn Energy. 30(2):117-123.
- Xiangjun, L., Raghavan, G.S.V., Jianming D. and Yaylayanb V.A. 2003. Dielectric properties of α -D-glucose aqueous solutions at 2450 MHz. Food Research International. 36: 485-490.
- You, K.Y., Salleh, J., Abbas, Z., and You L.L. 2010. A rectangular patch antenna technique for the determination of moisture content in soil. Proceeding of Progress in Electromagnetic Research. Cambridge, USA. July 5-8. 850-854.