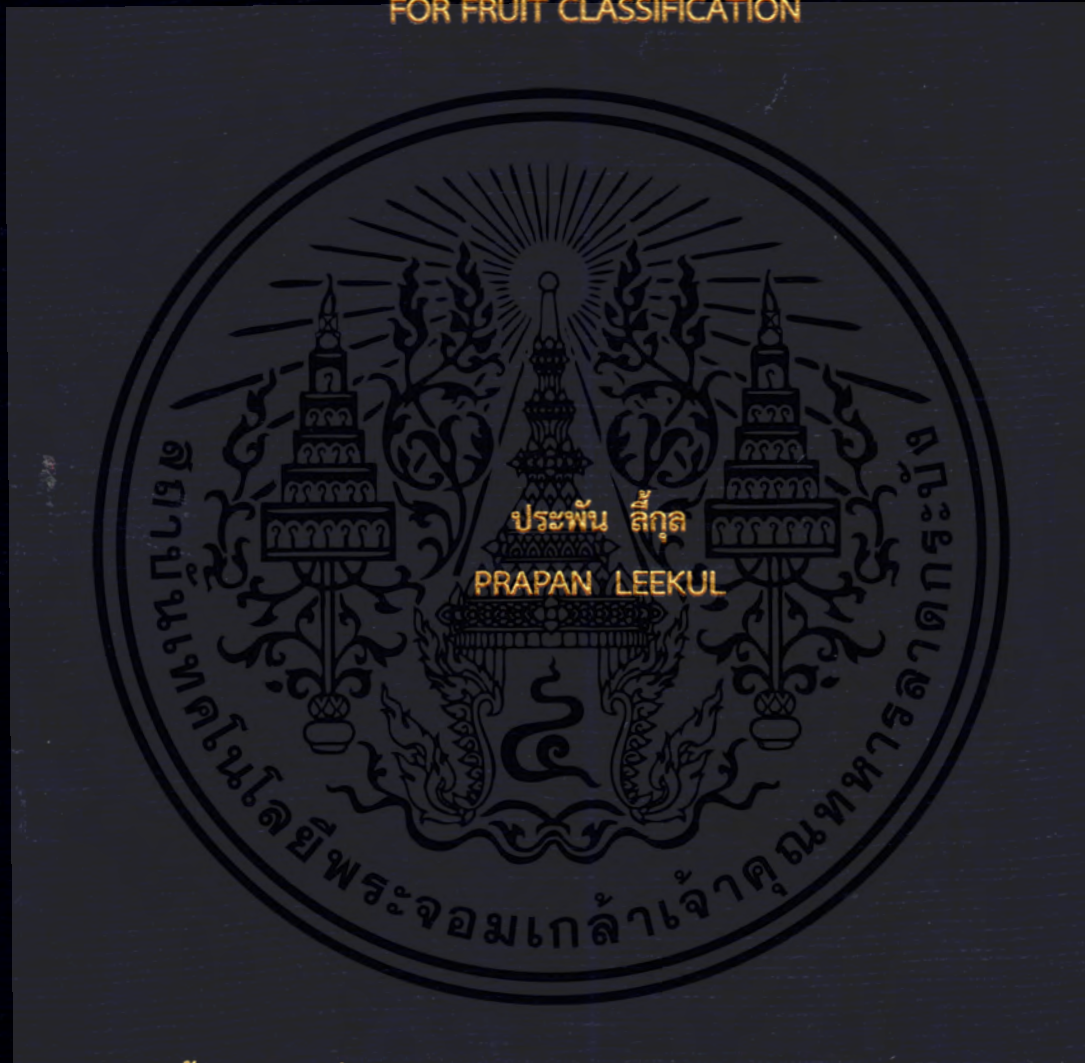


เซ็นเซอร์ไมโครเวฟด้วยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อน
สำหรับคัดแยกผลไม้

MICROWAVE SENSOR USING TRANSMISSION AND REFLECTION COEFFICIENTS
FOR FRUIT CLASSIFICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-D-018-037

เซ็นเซอร์ไมโครเวฟด้วยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อน
สำหรับคัดแยกผลไม้

MICROWAVE SENSOR USING TRANSMISSION AND REFLECTION
COEFFICIENTS FOR FRUIT CLASSIFICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-D-018-037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MICROWAVE SENSOR USING TRANSMISSION AND REFLECTION COEFFICIENTS
FOR FRUIT CLASSIFICATION



PRAPAN LEEKUL

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016
KMUTL-2016-EN-D-018-037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เซ็นเซอร์ไมโครเวฟด้วยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนสำหรับคัดแยกผลไม้
Thesis Title Microwave Sensor Using Transmission and reflection coefficients for Fruit
Classification
นักศึกษา นายประพันธ์ ลีกุล
รหัสประจำตัว 52610104
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-D-018-037

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร.พรชัย	ทรัพย์นิจิ	P.S.
รศ.ดร.ชูวงศ์	พงศ์เจริญพาณิชย์	
ศ.ดร.ประยุทธ์	อัศรเอกมาลิน	
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	
ศ.ดร.โมไนย	ไกรฤกษ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 17 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าเอกสารมีข้อผิดพลาดประการใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องคืนเอกสารฉบับนี้ให้เจ้าของเอกสารนำกลับไปใช้
ณ วันที่ 17 พฤษภาคม พ.ศ. 2559

Thesis	Microwave Sensor Using Transmission and Reflection Coefficients for Fruit Classification
Student	Mr.Prapan Leekul
Student ID.	52610104
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Prof. Dr.Monai Krairiksh

ABSTRACT

This thesis proposed non-destructive microwave sensors for fruit classification. They are applied for tangerine taste classification and for durians immature classification from exporting durians. The operating frequency of a microstrip patch antenna is 2.45 GHz for tangerine classification sensor. The proposed sensor can distinguish bland tangerines from sweet tangerines by using artificial neural network (ANN) to analyze and make decision from s-parameters obtained from couple-patch antennas. From the measured results of the prototype sensor system, the accuracy of tangerine classification sensor is 95.47%. An appropriated condition for the proposed sensor is that the temperature should be less than 30°C together with the low interference signal.

The sensor for categorizing the immature durians from the export durians is developed for working with the conveyor. At the operating frequency of monopole antenna is 915 MHz. The measured s-parameters are analyzed in order to determine k-factor by using Rician probability density function. The k-factor is used to evaluate a threshold for classifying durian. From the experimental result, it is relevant that an accuracy of the proposed durian sensor is 92.7%. The difference of k-factor from $|S_{11}|$ which is measured by changing the position of durians is more obvious than changing the frequency. However, for the difference of k-factor from $|S_{21}|$, changing frequency is more obvious than changing the durian positions. The sensor bandwidth is adjusted to analyze k-factor. From the results, it is found that k-factor of $|S_{11}|$ increases when the bandwidth is reduced.

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เซ็นเซอร์ไมโครเวฟด้วยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนสำหรับคัดแยกผลไม้
นักศึกษา	นายประพันธ์ ลีกุล
รหัสประจำตัว	52610104
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอระบบเซ็นเซอร์คัดแยกผลไม้โดยไมโครเวฟที่ไม่ทำลายด้วยคลื่นไมโครเวฟ ได้แก่ ระบบคัดแยกรสชาติของส้มเขียวหวาน และระบบคัดแยกทุเรียนอ่อนออกจากทุเรียนแก่ส่งออก ระบบเซ็นเซอร์คัดแยกรสชาติส้มเขียวหวาน โดยใช้สายอากาศไมโครสตริปแพทช์ทำงานที่ย่านความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งสามารถคัดแยกส้มที่มีรสชาติดหวานและไม่หวานได้ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม เพื่อวิเคราะห์และตัดสินใจจากการเปลี่ยนแปลงของค่า S พารามิเตอร์ที่ได้จากสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ผลการทดสอบการทำงานของระบบต้นแบบมีความแม่นยำในการคัดแยกรสชาติของส้มเขียวหวานอยู่ที่ 95.47% และระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อสัญญาณรบกวนต่ำและอุณหภูมิไม่เกิน 30 องศาเซลเซียส ระบบเซ็นเซอร์คัดแยกทุเรียนอ่อนออกจากทุเรียนแก่ส่งออก ด้วยสายอากาศโมโนโพลที่ย่านความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งถูกประยุกต์ใช้กับท่อลำเลียงทุเรียน ค่า S พารามิเตอร์ที่วัดได้จากสายอากาศถูกนำมาวิเคราะห์หาค่า k-factor ด้วยการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบไรเซียน เพื่อหาขีดเริ่มเปลี่ยนระดับความแก่ของทุเรียนจากค่า k-factor แล้วนำไปใช้ในการตัดสินใจคัดแยกทุเรียน ผลการทดสอบระบบเซ็นเซอร์ต้นแบบพบว่ามีค่าความแม่นยำในการคัดแยก 92.7% จากนั้นระบบได้รับการพัฒนาให้สามารถทำงานในย่านความถี่กว้างด้วยสายอากาศไดโพลและทำงานร่วมกับสายพานลำเลียง ทดสอบการคัดแยกทุเรียนอ่อนด้วยการวัดในย่านความถี่กว้าง ครอบคลุมช่วงความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ ความแตกต่างของค่า k-factor ที่ได้รับการวัดโดยการเปลี่ยนตำแหน่งของ $|S_{11}|$ มีความชัดเจนมากกว่าการวัดโดยการเปลี่ยนความถี่ และค่า k-factor ของ $|S_{21}|$ จากการเปลี่ยนความถี่ชัดเจนมากกว่าการเปลี่ยนตำแหน่ง และเมื่อทดสอบความแตกต่างของค่า k-factor เมื่อขนาดของแบนด์วิดธ์ลดลง พบว่ามีความแตกต่างของค่า k-factor ของ $|S_{11}|$ เพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องด้วยความกรุณาจาก ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหา ตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนดูแลเอาใจใส่ติดตามงาน ชี้แนะข้อบกพร่อง รวมทั้งฝึกฝนให้ข้าพเจ้ามีแนวคิดและทักษะในการนำเสนอและดำเนินงาน ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อตัวข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ สัญญาเลขที่ PhD003/2552

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ศรวัฒน์ ชิวปรีชา ศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ และ รศ.ดร.ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ที่ให้คำแนะนำทางวิชาการตลอดจนความดูแลเอาใจใส่ และความปรารถนาดีที่มีต่อข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่านที่ได้อบรมสั่งสอน และประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ สมาชิกในห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย สำหรับความช่วยเหลือ มิตรภาพ และความจริงใจที่มีให้แก่กันตลอดระยะเวลาที่ข้าพเจ้าปฏิบัติงานในห้องวิจัยแห่งนี้ รวมถึง เพื่อน พี่ และน้อง ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาแก่ข้าพเจ้าในทุกๆ ด้าน

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ นายอนันต์ ลีกุล และนางยุพิน ลีกุล บิดาและมารดาของข้าพเจ้า ที่ได้ให้ชีวิต โอกาสทางการศึกษา แนะนำปรึกษาที่ดี ให้กำลังใจและความหวังโยมาโดยตลอด และญาติของข้าพเจ้าที่คอยสนับสนุน และเป็นกำลังใจตลอดมา

คุณค่า ประโยชน์ และคุณความดีอันใดที่ได้เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ประพันธ์ ลีกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตการวิจัย.....	4
1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ.....	6
2.2 คุณสมบัติไดโอดีล็คทริก.....	6
2.3 การพัฒนาสายอากาศโมโนโพลแบบแพทช์.....	9
2.4 การพัฒนาสายอากาศแพทช์.....	11
2.5 สนามระยะใกล้.....	13
2.5.1 สนามรอบสายอากาศ.....	13
2.5.2 การสูญเสียตามระยะทาง.....	15
2.6 ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียม.....	16
2.7 แบบจำลองช่องสัญญาณไร้สาย.....	19
2.8 การออกแบบวงจรดิจิทัลด้วยอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้.....	20
2.8.1 การออกแบบวงจร.....	21
2.8.2 การติดตั้ง.....	24
2.8.3 การโปรแกรมข้อมูลลงชิพอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้.....	24
2.9 ภาษาวีเอชดีแอล.....	25
2.9.1 โครงสร้างพื้นฐานของภาษาวีเอชดีแอล.....	25
2.9.2 องค์ประกอบของภาษาวีเอชดีแอล.....	26
บทที่ 3 ระบบคัดแยกรสชาติของส้มเขียวหวาน	
3.1 บทนำ.....	29
3.2 คุณลักษณะของส้มเขียวหวาน.....	29
3.2.1 คุณสมบัติไดโอดีล็คทริกของส้มเขียวหวาน.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 แบบการจำลองผลสัมเขียวหวาน.....	35
3.3 การออกแบบสายอากาศ.....	36
3.3.1 การวิเคราะห์หาจำนวนสายอากาศที่เหมาะสม.....	38
3.3.2 การทดสอบอัตราความผิดพลาดจากจำนวนสายอากาศ.....	39
3.3.3 โครงสร้างและการทำงานของสายอากาศ.....	41
3.4 การจำลองระบบเซ็นเซอร์.....	42
3.5 การออกแบบระบบเซ็นเซอร์.....	45
3.5.1 สายอากาศแพทช์ 2.45 กิกะเฮิรตซ์.....	46
3.5.2 โมดูลกำเนิดความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์.....	47
3.5.3 คัปเปลอร์แบบมีทิศทาง.....	47
3.5.4 สวิตช์สัญญาณความถี่วิทยุ.....	48
3.5.5 อุปกรณ์รับสัญญาณความถี่วิทยุและเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรง.....	48
3.5.6 วงจรขยายอินสตรูเมนต์.....	48
3.5.7 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 12 บิต.....	49
3.6 การสร้างระบบเซ็นเซอร์และการประมวลผล.....	49
3.6.1 การสร้างระบบเซ็นเซอร์.....	49
3.6.2 โครงข่ายประสาทเทียม.....	50
3.6.3 อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้.....	53
3.7 ผลการทดสอบ.....	54
3.7.1 การเปรียบเทียบ.....	54
3.7.2 ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนและอุณหภูมิ.....	55
3.8 สรุป.....	57
บทที่ 4 การคัดแยกทุเรียนอ่อนเพื่อการส่งออก	
4.1 บทนำ.....	58
4.2 การทดลองเพื่อเลือกความถี่ที่เหมาะสม.....	58
4.3 การออกแบบสายอากาศและแบบจำลองทุเรียน.....	59
4.3.1 คุณสมบัติไดโอดเล็กริกของทุเรียน.....	59
4.3.2 แบบจำลองทุเรียน.....	62
4.3.3 การออกแบบสายอากาศ.....	62
4.4 การออกแบบระบบเซ็นเซอร์คัดแยกทุเรียน.....	65
4.5 ผลการจำลองระบบและวิเคราะห์.....	67
4.5.1 ขนาดและตำแหน่งการวางทุเรียน.....	67
4.5.2 วิเคราะห์ความแตกต่างของทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก.....	69
4.5.3 ผลการจำลองการคัดแยกทุเรียน.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของโรงเรียนอัสสัมชัญกรุงเทพฯเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 การสร้างระบบเซ็นเซอร์คัดแยกทุเรียน.....	74
4.7 ผลการทดสอบระบบ.....	75
4.7.1 ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งของกลุ่มทุเรียนตัวอย่าง.....	76
4.7.2 ผลการทดสอบระบบ.....	76
4.8 ระดับแบ่งแยกทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก.....	79
4.9 สรุป	80
บทที่ 5 ระบบคัดแยกทุเรียนย่านความถี่กว้างบนสายพานลำเลียง	
5.1 บทนำ.....	81
5.2 การออกแบบสายอากาศและแบบจำลองทุเรียน.....	81
5.2.1 แบบจำลองทุเรียน.....	81
5.2.2 การออกแบบสายอากาศ.....	82
5.3 การจำลองการทำงานของระบบเซ็นเซอร์คัดแยกทุเรียน.....	84
5.3.1 จำลองการทำงานของระบบ.....	84
5.3.2 ผลการจำลองการทำงาน.....	85
5.4 การสร้างระบบเซ็นเซอร์.....	88
5.4.1 การควบคุมอุปกรณ์สร้างสัญญาณความถี่กว้าง.....	89
5.4.2 การควบคุมระบบสายพานลำเลียง.....	91
5.5 การทดสอบระบบเซ็นเซอร์.....	91
5.5.1 ขั้นตอนการทดสอบระบบเซ็นเซอร์.....	92
5.5.2 ผลการทดสอบระบบเซ็นเซอร์.....	92
5.5.3 ผลการทดสอบความถี่กว้างในช่วงความถี่.....	94
5.6 สรุป.....	96
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	97
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	98
เอกสารอ้างอิง.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ข้อมูลที่นำมาใช้ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม.....	40
3.2 เปรียบเทียบโนดอินพุตเพื่อฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม.....	40
3.3 เปรียบเทียบโนดซ่อนเร้นเพื่อฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม.....	41
3.4 ขนาดของสายอากาศแพทช์.....	42
3.5 ค่าการเปลี่ยนแปลงของ S พารามิเตอร์.....	44
3.6 ฟังก์ชันการจับคู่ (Mapping function) ของเอาต์พุต.....	53
3.7 ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับการสร้างวงจรบนอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้.....	53
3.8 อัตราความผิดพลาดจากสัญญาณรบกวน.....	56
3.9 อัตราความผิดพลาดที่เกิดจากอุณหภูมิ.....	57
4.1 พารามิเตอร์ของทุเรียนทั้ง 3 กลุ่ม.....	59
4.2 ขนาดของสายอากาศโมโนโพลทำงานที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์.....	64
4.3 ค่า k-factor จากการจำลองของ $ S_{11} $	69
4.4 ค่า k-factor จากการจำลองของ $ S_{21} $	70
4.5 การจำลองการตัดแยกทุเรียนด้วย $ S_{11} $	71
4.6 การจำลองการตัดแยกทุเรียนด้วย $ S_{21} $	73
4.7 ค่าเฉลี่ยของ k-factors จาก $ S_{11} $ และ $ S_{21} $ จากการจำลอง.....	74
4.8 ค่าเฉลี่ยของ k-factors จาก $ S_{11} $ และ $ S_{21} $ จากการทดสอบ.....	79
4.9 เปรียบเทียบความแม่นยำที่แต่ละค่าขีดเริ่มเปลี่ยนความถี่.....	79
5.1 ขนาดของสายอากาศไดโพล.....	83
5.2 ผลการจำลองการวัดแบบจำลองทุเรียนด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์.....	86
5.3 ผลการจำลองการวัดแบบจำลองทุเรียนด้วยการเปลี่ยนความถี่.....	87
5.4 ค่า k-factor ของ $ S_{11} $ จากการทดสอบ.....	93
5.5 ค่า k-factor ของ $ S_{21} $ จากการทดสอบ.....	94
5.6 ค่า k-factor จากการเปลี่ยนความถี่ที่แบนด์วิดธ์ 5%	94
5.7 ค่า k-factor จากการเปลี่ยนความถี่ที่แบนด์วิดธ์ 3%	95
5.8 ค่า k-factor จากการเปลี่ยนความถี่ที่แบนด์วิดธ์ 1%	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ .

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	เทคนิคควากาคว่างโดยที่พอร์ทหนึ่งและพอร์ทสองต่ออยู่กับเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรโครงข่าย....8
2.2	สายอากาศแพทช์.....9
2.3	ไมโครสตริปไลน์..... 10
2.4	ลักษณะของไมโครสตริปที่ป้อนกลับแบบโพรบ (Probe feed)..... 13
2.5	สนามบริเวณรอบสายอากาศ (ก) สายอากาศขนาดเล็ก (ข) สายอากาศขนาดใหญ่.....13
2.6	รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่บริเวณสนามรอบสายอากาศ.....15
2.7	สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม..... 17
2.8	โครงข่ายประสาทเทียม.....18
2.9	การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 19
2.10	ขั้นตอนการออกแบบวงจรดิจิทัลบนอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้.....21
2.11	การพัฒนาวงจรด้วยภาษาวีเอชดีแอล..... 22
2.12	วงจรที่พัฒนาด้วยวิธีการวาดผังวงจร (Schematic)..... 23
2.13	การพัฒนาวงจรด้วยขั้นตอนการทำงาน (State diagram)..... 23
2.14	สัญญาณที่ได้จากการจำลองการทำงานในรูปแบบของคลื่น.....24
2.15	การโปรแกรมลงในชิพอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้.....25
2.16	ระดับการพัฒนาวงจรดิจิทัลของภาษาวีเอชดีแอล..... 26
2.17	การเชื่อมต่อและสถาปัตยกรรมของภาษาวีเอชดีแอล..... 27
2.18	แผนผังบรรยายการเชื่อมต่อขององค์ประกอบ..... 27
2.19	บรรยายเชิงพฤติกรรมของสถาปัตยกรรม.....28
3.1	สายพันธุ์ของส้ม (ก) ส้มวาเลนเซีย (ข) ส้มนาเวล (ค) ส้มเขียวหวาน.....30
3.2	การแบ่งพื้นที่บนผิวส้ม..... 30
3.3	ตำแหน่งการวัดของส้มเขียวหวานทั้งเปลือก..... 31
3.4	ตำแหน่งการวัดเนื้อส้มเขียวหวาน..... 32
3.5	การวัดคุณสมบัติทางของน้ำส้มเขียวหวาน..... 33
3.6	การวัดปริมาณความหวานด้วยเครื่องวัดความหวานของน้ำส้มเขียวหวาน..... 33
3.7	ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดโอดเล็กทรอนิกส์ของน้ำส้มกับปริมาณความหวาน (ก) ค่าคงที่ไดโอดเล็กทรอนิกส์ (ข) ตัวประกอบการสูญเสียไดโอดเล็กทรอนิกส์34
3.8	ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดโอดเล็กทรอนิกส์ของผลส้มทั้งเปลือกกับปริมาณความหวาน (ก) ค่าคงที่ไดโอดเล็กทรอนิกส์ (ข) ตัวประกอบการสูญเสียไดโอดเล็กทรอนิกส์35
3.9	แบบจำลองผลส้ม 10 กลีบ และเปลือก 36
3.10	แบบจำลองสายอากาศแพทช์และผลส้ม 36
3.11	ค่า S พารามิเตอร์เมื่อปรับขนาดของสายอากาศตั้งแต่ 3.0-3.2 เซนติเมตร..... 37
3.12	แบบจำลอง (ก) สายอากาศแพทช์ 3 ตัว (ข) สายอากาศแพทช์ 3 ตัวและผลส้ม..... 38
3.13	แบบจำลอง (ก) สายอากาศแพทช์ 4 ตัว (ข) สายอากาศแพทช์ 4 ตัวและผลส้ม..... 39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 แบบจำลอง (ก) สายอากาศแพทช์ 5 ตัว (ข) สายอากาศแพทช์ 5 ตัวและผลส้ม.....	39
3.15 โครงสร้างของสายอากาศ (ก) ลักษณะการวางสายอากาศ (ข) ขนาดของสายอากาศ.....	42
3.16 สัมประสิทธิ์หวน (ก) ลักษณะทางกายภาพ (ข) การกระจายของสนามไฟฟ้า.....	43
3.17 ความสัมพันธ์ของ S พารามิเตอร์ กับความถี่ (ก) $ S_{11} $ (ข) $ S_{41} $ (ค) $ S_{51} $ และ (ง) $ S_{61} $	43
3.18 การเปลี่ยนแปลงของค่า S พารามิเตอร์เมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลง	44
3.19 ระบบเซ็นเซอร์ที่นำเสนอ	45
3.20 สายอากาศแพทช์ตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 5	46
3.21 ค่า S พารามิเตอร์จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการการจำลอง (ก) $ S_{11} $ และ $ S_{41} $ (ข) $ S_{51} $ และ $ S_{61} $	46
3.22 โมดูลแหล่งกำเนิดความถี่วิทยุ 2.4-2.5 กิกะเฮิรตซ์.....	47
3.23 แผนผังการเปลี่ยนแปลงสถานะของลอจิกสำหรับควบคุมแหล่งกำเนิดความถี่วิทยุ.....	47
3.24 คัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง.....	48
3.25 วงจรขยายอินสตรูเมนต์ (ก) อุปกรณ์ของวงจรขยาย (ข) กราฟแสดงผลการขยายสัญญาณ.....	49
3.26 ระบบเซ็นเซอร์ไมโครเวฟ (ก) อุปกรณ์เซ็นเซอร์ไมโครเวฟต้นแบบ (ข) แผงวงจรความถี่สูง (RF circuit board).....	50
3.27 ค่าความสัมพันธ์ของปริมาณความหวานกับแรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับกำลังงาน และที่ผ่านแรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับกำลังงานค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของ (ก) $ S_{11} $ (ข) $ S_{41} $ (ค) $ S_{51} $ และ (ง) $ S_{61} $	51
3.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความแม่นยำและจำนวนของบิต (ก) โนดซ่อนเร้น 10 โนด (ข) โนดซ่อนเร้น 6 โนด	54
3.29 ผลจากการทำนายและทดสอบปริมาณความหวาน	55
3.30 การทดสอบอัตราความผิดพลาดจากสัญญาณรบกวนภายนอก	56
4.1 ทูเรียนสายพันธุ์หมอนทอง	60
4.2 (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียน (ข) ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก ของเนื้อทุเรียน	61
4.3 (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเปลือกทุเรียน (ข) ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก ของเปลือกทุเรียน	61
4.4 แบบจำลองทุเรียน (ก) เปลือกทุเรียน (ข) เนื้อทุเรียน	62
4.5 ผลการจำลองการทำงานของสายอากาศโมโนโพล	63
4.6 สายอากาศโมโนโพล	63
4.7 สายอากาศต้นแบบ	64
4.8 กราฟ $ S_{11} $ ของสายอากาศต้นแบบ	64
4.9 (ก) แบบจำลองของสายอากาศและผลทุเรียน (ข) โครงสร้างของระบบเซ็นเซอร์	65
4.10 ลักษณะการวางท่อลำเลียงทุเรียนเรียง 45 องศา	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ลักษณะช่องสัญญาณของระบบเซ็นเซอร์.....	66
4.12 การเปลี่ยนตำแหน่งซ้าย - ขวาของทุเรียนจำลอง (ก) กึ่งกลาง (ข) ซ้าย (ค) ขวา.....	68
4.13 การเลื่อนตำแหน่งขึ้นลงของทุเรียนที่ระยะ (ก) กึ่งกลาง (ข) ขยับลง 5 เซนติเมตร (ค) ขยับขึ้น 5 เซนติเมตร.....	68
4.14 ค่า $ S_{11} $ จากการจำลองระบบ.....	69
4.15 ค่า $ S_{21} $ จากการจำลองระบบ.....	70
4.16 ค่า $ S_{11} $ และค่า k-factor จากการจำลองการคัดแยกทุเรียน.....	71
4.17 ค่า k-factor ของกลุ่มทุเรียนอ่อนและกลุ่มทุเรียนแก่.....	72
4.18 ค่า $ S_{21} $ และค่า k-factor จากการจำลองการคัดแยกทุเรียน.....	73
4.19 ระบบเซ็นเซอร์คัดแยกทุเรียน.....	75
4.20 ค่าความแปรปรวน ค่า s และ k-factor จากค่า $ S_{11} $ (ก) ทุเรียนอ่อน (ข) ทุเรียนแก่ส่งออก	77
4.21 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัด $ S_{11} $ ทุเรียน	77
4.22 ค่าความแปรปรวน ค่า s และ k-factor จากค่า $ S_{21} $ (ก) ทุเรียนอ่อน (ข) ทุเรียนแก่ส่งออก.....	78
4.23 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัด $ S_{21} $ ทุเรียน	78
5.1 คุณสมบัติไดโอดเล็กทรอนิกส์ของทุเรียนสด (ก) ค่าคงที่ไดโอดเล็กทรอนิกส์ (ข) ตัวประกอบการสูญเสียไดโอดเล็กทรอนิกส์.....	82
5.2 ค่า $ S_{11} $ เมื่อปรับขนาดของสายอากาศ (ก) ปรับความยาว (ข) ปรับความกว้าง.....	83
5.3 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลจำลอง.....	83
5.4 สายอากาศไดโพลต้นแบบ.....	83
5.5 ค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศไดโพลต้นแบบเทียบกับผลการจำลอง.....	84
5.6 โครงสร้างจำลองของระบบเซ็นเซอร์ (ก) ด้านข้าง (ข) ด้านหลัง.....	85
5.7 แบบจำลองการทำงานของระบบเซ็นเซอร์ (ก) ด้านข้าง (ข) ด้านหลัง.....	85
5.8 การแจกแจงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนตำแหน่ง (ก) $ S_{11} $ (ข) $ S_{21} $	86
5.9 การแจกแจงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนความถี่ (ก) $ S_{11} $ (ข) $ S_{21} $	87
5.10 แผนผังระบบเซ็นเซอร์.....	88
5.11 ระบบเซ็นเซอร์ต้นแบบ.....	89
5.12 การสร้างข้อมูลสำหรับควบคุมความถี่.....	90
5.13 แผนผังการเปลี่ยนแปลงสถานะของลอจิกการควบคุมอุปกรณ์สร้างสัญญาณความถี่กว้าง....	91
5.14 แผนผังการเปลี่ยนแปลงสถานะของลอจิกการควบคุมสแต็ปมอเตอร์.....	91
5.15 การแจกแจงความน่าจะเป็นของค่า $ S_{11} $ (ก) เปลี่ยนความถี่ (ข) เปลี่ยนตำแหน่ง.....	92
5.16 การแจกแจงความน่าจะเป็นของค่า $ S_{21} $ (ก) เปลี่ยนความถี่ (ข) เปลี่ยนตำแหน่ง.....	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม และมีเนื้อที่ถือครองทางการเกษตรทั้งหมด 131.60 ล้านไร่ โดยได้ถูกนำมาใช้เป็นพื้นที่สำหรับปลูกไม้ผลยืนต้นเฉลี่ยคือ 27.40 ล้านไร่ [1] เช่น ส้ม ทุเรียน มะม่วง มังคุด และไม้ผลยืนต้นอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งในแต่ละปีให้ผลผลิตทางการเกษตรจำนวนมาก และเป็นรายได้หลักที่สำคัญของประชากรในประเทศ ดังนั้นจึงส่งผลให้ผลไม้เป็นสินค้าเศรษฐกิจสำคัญของประเทศ ซึ่งมีอยู่หลายชนิด เช่น ส้มและทุเรียน โดยส้มถือเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญ ที่นำรายได้เข้าสู่ประเทศไทย โดยผลผลิตของส้มในประเทศนั้น ให้ผลผลิตมากในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ของทุกปี สายพันธุ์ของส้มมีการปลูกมากที่สุดในประเทศไทย คือ ส้มเขียวหวาน และมีมูลค่าการส่งออก 2.14 ล้านบาทในปี 2556 5.59 ล้านบาทในปี 2557 และมีแนวโน้มการส่งออกที่เพิ่มขึ้นจากสถิติ 3 ปี ย้อนหลัง พื้นที่การเพาะปลูกส้มเขียวหวาน พบมากในจังหวัดเชียงใหม่ สุโขทัย กำแพงเพชร เชียงราย แพร่ เป็นต้น ส่วนทุเรียนจัดเป็นผลไม้เศรษฐกิจของไทยที่สำคัญ ซึ่งมีมูลค่าการส่งออกสูงเป็นอันดับหนึ่ง และมีแนวโน้มการส่งออกที่สูงเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยประเทศไทยมีมูลค่าการส่งออกทุเรียนสดในปี 2555 อยู่ที่ 1,695 ล้านบาท ปี 2556 อยู่ที่ 7,345 ล้านบาท และปี 2557 อยู่ที่ 12,435 ล้านบาท [2] ตลาดการส่งออกหลักของทุเรียน ได้แก่ ประเทศจีน ฮองกง และอินโดนีเซีย เมื่อมีการส่งออกในปริมาณมาก จึงมีปัญหาในการคัดแยกคุณภาพของผลไม้มีอยู่หลายชนิดการคัดแยกผลไม้เพื่อการส่งออกที่มีคุณภาพตรงกับความต้องการของผู้บริโภค เช่นรสชาติหรือความสุกของผลไม้ จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในส่วนของควบคุมคุณภาพของผลผลิต จากในอดีตที่ผ่านมาการคัดแยกผลไม้อาศัยเพียงความชำนาญของเกษตรกรเป็นหลัก ดังนั้นจึงส่งผลให้การคัดแยกไม่มีมาตรฐานที่แน่นอน และมีความผิดพลาดสูง ไม่เหมาะสมในการคัดแยกผลไม้ในปริมาณมากและในเวลาจำกัด

ปัญหาหลักในการส่งออกส้มและทุเรียน คือการคัดแยกคุณภาพผลผลิตเพื่อการส่งออก ซึ่งเป็นปัญหาหนึ่งที่ต้องได้รับการแก้ไข เนื่องจากเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อมูลค่าของผลผลิต โดยการคัดแยกแบบดั้งเดิมทำได้เพียงการคัดขนาดและลักษณะภายนอกเท่านั้น โดยอาศัยเพียงความชำนาญของเกษตรกรในการคัดแยก ปัญหาที่พบในการคัดแยกส้มของเกษตรกรคือ ทำได้เพียงการคัดขนาด ลักษณะภายนอกหรือสีของผิวส้ม ซึ่งไม่สามารถคัดแยกถึงคุณภาพภายในของส้มได้ เช่น สภาพเนื้อภายใน รสชาติของส้ม หรือลักษณะของเนื้อส้ม จึงทำให้กระบวนการคัดแยกส้มมีประสิทธิภาพต่ำ และนำมาซึ่งความไม่พอใจของผู้บริโภค ดังนั้นเพื่อเพิ่มมาตรฐานการคัดแยก และเพิ่มมูลค่าของส้มให้กับผู้ผลิตหรือเกษตรกร การคัดแยกจึงควรได้รับการพัฒนา นักวิจัยจึงให้ความสนใจในการคัดแยกส้มอย่างแพร่หลาย เริ่มตั้งแต่การตรวจสอบการเกิดลักษณะของส้มฟ้าม [3] โดยนักวิจัยได้ให้ความสนใจพัฒนาเทคนิคการคัดแยกส้มโดยไม่ทำลายอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น เทคนิค NIR (Near infrared) [4]-[12] เป็นที่นิยมนำมาใช้เนื่องจากมีความแม่นยำสูง แต่ไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้วัดผลไม้ที่มีเปลือกหนา เทคนิคอัลตราโซนิก [13] ถูกนำเสนอสำหรับการใช้ตรวจสอบความชื้นของแอปเปิ้ล การวัดด้วยเทคนิคนี้เครื่องมือวัดต้องสัมผัสกับแอปเปิ้ล จึงไม่สามารถทำการวัดได้อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากต้องหยุดนิ่งขณะวัด เทคนิคการตอบสนองต่อคลื่นเสียง (Acoustic impulse) [14] เหมาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตรวจสอบความแน่นของเนื้อผลไม้ระหว่างการเก็บรักษา แต่ไม่สามารถที่จะตรวจสอบรสชาติของผลไม้ได้ เทคนิคการคัดแยกด้วยสี (Color based) [15] เป็นเทคนิคที่คัดแยกจากลักษณะภายนอก เหมาะสำหรับผลไม้บางชนิด เช่น แอปเปิ้ล แต่สำหรับส้มเขียวหวาน ลักษณะภายนอกไม่ได้บ่งบอกถึงรสชาติของส้ม รวมถึงเทคนิคจมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic nose) [16] เป็นเทคนิคที่มีความแม่นยำในการตรวจสอบ แต่ไม่เหมาะสำหรับการวัดอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการวัดต้องวัดในห้องปิด การเปรียบเทียบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของผลส้มในแต่ละอุณหภูมิ [17] - [19] และรวมถึงในปัจจุบันการนำสายอากาศส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้ในการตรวจวัดคุณภาพผลไม้ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เช่น การคัดทุเรียน มังคุด และส้ม เป็นต้น [20]

ปัญหาในคัดแยกทุเรียนเพื่อการส่งออกคือ ทุเรียนอ่อนซึ่งเป็นทุเรียนที่ไม่พร้อมสุกปะปนไปกับทุเรียนแก่ส่งออก ระดับความแก่ของทุเรียนแบ่งออกเป็น 6 ระดับ คือระดับ 1-6 หมายถึงทุเรียนที่มีความแก่ ตั้งแต่ 50% 60% ... 100% ตามลำดับ ทุเรียนอ่อนคือทุเรียนมีระดับความแก่ต่ำกว่า 70% ซึ่งจะใช้เวลาสุกนาน และให้รสชาติที่ไม่ดี จึงไม่เป็นที่ต้องการในการส่งออก ทุเรียนแก่คือทุเรียนที่มีความแก่ระดับ 4 และ 5 สามารถสุกพร้อมรับประทานได้ภายใน 7-10 วัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสำหรับส่งออกทุเรียนไปยังประเทศที่อยู่ห่างไกล เมื่อสุกแล้วจะให้รสชาติดี จึงเป็นทุเรียนที่เหมาะสมสำหรับการส่งออก [21] เมื่อมีทุเรียนอ่อนปะปนไป จะทำให้ทุเรียนที่ส่งออกไปถูกตีกลับทั้งหมด โดยเฉพาะในช่วงที่ทุเรียนมีราคาสูง และเกิดการไม่เชื่อถือในคุณภาพทุเรียนของไทย [22] การคัดแยกทุเรียนแบบเดิมนั้นใช้วิธีการเคาะที่ผลทุเรียนแล้วฟังเสียงสะท้อนที่เกิดขึ้น เพื่อแบ่งแยกว่าเป็นทุเรียนแก่หรือทุเรียนอ่อน เมื่อทุเรียนเริ่มแก่จะมีช่องว่างระหว่างเนื้อและเปลือกซึ่งแตกต่างจากทุเรียนอ่อนที่เนื้อและเปลือกแน่นชิดติดกัน จึงเกิดเสียงที่แตกต่างกัน ประกอบสังเกตลักษณะอื่นๆ ภายนอกของทุเรียน ซึ่งต้องอาศัยความเชี่ยวชาญเฉพาะบุคคลในการเคาะและฟังเสียง หรือใช้การสุ่มตรวจด้วยการผ่าดูภายในของผลทุเรียน ในกรณีที่ต้องการคัดแยกทุเรียนเพื่อส่งออกซึ่งมีปริมาณมาก การใช้เครื่องจักรมาช่วยจะทำให้การทำงานรวดเร็วขึ้น และมีเสถียรภาพมากกว่า เนื่องจากการคัดแยกด้วยคนจะมีผลกระทบจากอารมณ์ร่วมอยู่ด้วย ทำให้มีเสถียรภาพน้อยกว่า ดังนั้นจึงมีความต้องการให้มีระบบเซ็นเซอร์เพื่อตรวจสอบความอ่อนของทุเรียน สำหรับเครื่องตรวจสอบทุเรียนด้วยการเคาะแบบอัตโนมัติ ใช้การตรวจสอบผลตอบสนองของเสียงที่เกิดขึ้น และวิเคราะห์ในรูปแบบของอัตราส่วนในรูปแบบของเศษส่วน และหลักการของค่าแฟร็กทัลไดเมนชัน (Fractal dimension: FD) ที่ถูกพัฒนาขึ้น [23] เครื่องมือนี้ถูกนำเสนอด้วยความแม่นยำที่ 89.94% และ 88.20% สำหรับเครื่องคัดแยกทุเรียนที่มีน้ำหนัก 3.5-4.0 กิโลกรัม และ 4.0-4.5 กิโลกรัม ตามลำดับ แต่เครื่องตรวจสอบทุเรียนด้วยการเคาะแบบอัตโนมัตินี้ สามารถตรวจสอบทุเรียนได้ครั้งละลูก และใช้เวลาในการตรวจสอบนาน การบอกระดับความอ่อนแก่ของทุเรียน ด้วยการสั่นแบบไม่ทำลายเพื่อวัดความถี่ตอบสนองจากการสั่นด้วยเลเซอร์ดรอปเปอร์ (Laser dropper) เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง (Dry weight) ซึ่งมีความแม่นยำอยู่ที่ 80% [24] การตรวจสอบระดับความแก่ของทุเรียนก่อนการเก็บเกี่ยว ในขณะที่ทุเรียนยังคงอยู่บนต้น เมื่อทุเรียนมีความแก่ที่ 70% โดยการวัดเรดาร์ (Radar cross section: RCS) ของทุเรียนด้วยความถี่กว้าง แล้วประมาณค่าด้วยวิธีโคชี (Cauchy method) ซึ่งโพลจะถูกแยกออกมาจากผลตอบสนองที่ได้ ค่าโพลนี้จะแตกต่างกันไปตามระดับความแก่ของทุเรียน [25] แม้ว่าจะมีงานวิจัยและพัฒนาเซ็นเซอร์สำหรับคัดแยกทุเรียนอยู่มาก [26]-[28] แต่ส่วนใหญ่จะยังคงมีราคาสูง ทำให้การนำไปใช้จริงยังคงเป็นไปได้ยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นไมโครเวฟเป็นเทคนิคที่มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ตัดแยกผลไม้ หลักการพื้นฐานของเซ็นเซอร์ไมโครเวฟอยู่บนพื้นฐานของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่นำมาวัด ซึ่งคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเนื้อผลไม้ จะเปลี่ยนแปลงเมื่อระดับความแก่และรสชาติเปลี่ยน [29]-[30] ก่อนหน้านี้ได้มีการวิจัยที่นำเทคนิคเซ็นเซอร์ไมโครเวฟมาอย่างแพร่หลาย เช่น เพื่อใช้วัดความชื้น [31]-[33] ตรวจสอบคุณภาพภายในของลูกพีช [34] รวมถึงเทคนิคการสร้างภาพด้วยไมโครเวฟ (Microwave imaging techniques) เป็นเทคนิคที่มีความแม่นยำสูง แต่ไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานเนื่องจากมีราคาสูง [35] นอกจากนี้การตัดสินใจยังเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับระบบที่ต้องการความแม่นยำในการวัด โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks: ANNs) เป็นเทคนิคที่มีความแม่นยำในการตัดสินใจ เนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมจะได้รับการฝึกสอนจากคุณลักษณะเฉพาะของข้อมูล เพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม [36] ในการใช้งานจริง โครงข่ายประสาทเทียมจะถูกนำมาสร้างลงบนอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (FPGA)

จากที่กล่าวมาข้างต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงสนใจศึกษาการตัดแยกผลไม้แบบไม่ทำลายด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ มุ่งเน้นที่การค้นคว้าหาวิธีที่เหมาะสมในการตัดแยกผลไม้ให้อยู่ในมาตรฐานเดียวกัน โดยไม่ทำลายสภาพของผลไม้ และลดการใช้เวลาในการตรวจสอบ ให้เกิดความรวดเร็วเพิ่มขึ้น โดยผลไม้ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ส้มและทุเรียน การทดลองในส้มเขียวหวานทำการตรวจวัดเพื่อตัดแยกความแตกต่างระหว่างส้มที่มีรสชาติหวานและไม่หวาน ซึ่งในระบบการตัดแยกส้มเขียวหวานใช้การเชื่อมต่อรวมของสายอากาศแพทช์ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ที่ลำคลื่นหลักชี้ไปในลูกส้ม จากนั้นค่าที่ได้รับจากการวัดลูกส้มนำมาวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ในขั้นตอนการวิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียมสามารถตัดสินใจจากพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ $|S_{21}|$ $|S_{31}|$ $|S_{41}|$ $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$ ในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการออกแบบฮาร์ดแวร์ของโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อนำไปใช้งานในระบบเครื่องมือวัดจริง ตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้งานบนแอปพลิเคชันวงจรรวมเฉพาะงาน (Application specific integrated circuit: ASIC) หรืออุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ ซึ่งเหมาะสมสำหรับระบบการตัดแยกขนาดใหญ่ ถึงแม้ว่าการสร้างฮาร์ดแวร์โดยใช้การประมวลผลสัญญาณเชิงเลข (DSP) หรือไมโครโปรเซสเซอร์จะสามารถสร้างได้ง่าย แต่จะใช้เวลาในการประมวลผลมากกว่า เนื่องจากมีการทำงานเป็นลำดับ ซึ่งแตกต่างจากการทำงานของอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ ที่มีการทำงานลักษณะพร้อมกัน ซึ่งได้มีการศึกษาถึงการทำงานของวงจรที่มีลักษณะการทำงานพร้อมกัน (Concurrent circuit) พบว่ามีความเร็วที่เหนือกว่าไมโครโปรเซสเซอร์และการประมวลผลสัญญาณเชิงเลข โดยเฉพาะการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อน [37] เนื่องจากอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้สามารถกำหนดค่าใหม่ได้ (Reconfigure) ค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้จากการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะถูกนำมากำหนดค่าใหม่เพื่อปรับปรุงการตัดสินใจ เมื่อเปรียบเทียบการนำไปใช้งานระหว่างวงจรรวมเฉพาะงานกับอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ พบว่าอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้มีความยืดหยุ่นมากกว่าและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายกว่า [38]-[39]

การตรวจสอบคุณภาพทุเรียนใช้วิธีการตัดแยก โดยใช้สายอากาศโมโนโพลส่งและรับคลื่นผ่านลูกทุเรียน จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากสายอากาศเพื่อแบ่งแยกระดับความแก่ของทุเรียนด้วยเทคนิคแบบจำลองช่องสัญญาณ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบสื่อสารไร้สาย แบ่งออกเป็น ช่องสัญญาณโรเซียน เมื่อมีคลื่นตรง ที่ส่งจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ และหากไม่มีคลื่นตรงจะพิจารณาเป็นช่องสัญญาณเรย์เลห์ [40] การจำลองการตรวจวัดระดับความแก่ของทุเรียน เริ่มต้นการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากระบบเซ็นเซอร์ตัดแยกทุเรียนอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากทุเรียนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีรูปทรงและขนาดที่แตกต่างกัน ดังนั้นด้วยข้อจำกัดในการวัดนี้จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลทางสถิติ โดยใช้ การแจกแจงแบบไรเซียน (Rician distribution) มาวิเคราะห์สำหรับหาค่า s ความแปรปรวน (σ^2) และ k-factor เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างและใช้เป็นหลักการในการแบ่งแยกระหว่าง ทูเรียนที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งแตกต่างกัน การวัดจะใช้เพียงระดับสัญญาณเฉลี่ยไม่เพียงพอ เนื่องจากค่าที่ได้จะใกล้เคียงกันมาก ก่อนหน้านี้ได้มีการนำเสนอเทคนิคการวัดคลื่นที่สะท้อนจาก ทูเรียนที่มีความถี่ 433 915 และ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ จากระดับความถี่ของทูเรียนที่แตกต่างกัน [41] แสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็นความถี่ที่สูงเกินไปที่จะทะลุเข้าไปในเนื้อทูเรียนได้ และที่ความถี่ 433 และ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ สามารถที่จะทะลุเข้าไปในเนื้อทูเรียนได้ แต่ที่ความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์ มีความยาวคลื่นยาวมากทำให้ขนาดของสายอากาศใหญ่กว่าขนาดของทูเรียนมาก ทำให้ ไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน ดังนั้นจึงใช้ที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ ในการแบ่งระดับทูเรียน ระหว่างทูเรียนอ่อนและทูเรียนแก่ และเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการคัดแยกมากขึ้น โดยให้ สามารถแบ่งระดับความถี่ของทูเรียนได้อย่างละเอียดทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่ ทูเรียนอ่อน ทูเรียนแก่ และทูเรียนสุก ระบบจึงได้รับการพัฒนาเพื่อให้สามารถวัดทูเรียนย่านความถี่กว้าง ในช่วงความถี่ 880 ถึง 933 เมกะเฮิร์ตซ์ ระบบเซ็นเซอร์ถูกประยุกต์ใช้กับระบบสายพานลำเลียง สายอากาศส่งและรับถูก ออกแบบให้สามารถทำงานในย่านความถี่กว้าง ครอบคลุมช่วง 880 ถึง 933 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้ สายอากาศไดโพลแบบแพทช์ จำนวน 2 ตัว ติดตั้งอยู่บริเวณด้านข้างและด้านบนของสายพานลำเลียง ทำการทดสอบความแม่นยำของระบบ รวมถึงศึกษาความถี่ของแบนด์วิดท์ที่เหมาะสมในการ ตรวจวัด และการเปลี่ยนตำแหน่งในการวัด ข้อมูล S พารามิเตอร์ที่ได้จากสายอากาศจะถูกวิเคราะห์ ด้วยฟังก์ชันไรเซียนและคำนวณหาค่า k-factor

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบระบบเซ็นเซอร์คัดแยกผลไม้โดยไม่ทำลาย ผลไม้ที่นำมาศึกษาและวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ได้แก่ ส้มเขียวหวานและทุเรียนหมอนทอง ระบบ เซ็นเซอร์ที่ออกแบบทำงานในย่านความถี่ไมโครเวฟและยูเอชเอฟ โดยระบบเซ็นเซอร์คัดแยกรสชาติ ส้มเขียวหวาน ทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ส่วนระบบเซ็นเซอร์คัดแยกความสุกของทุเรียน ทำงานที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ ใช้ S พารามิเตอร์ที่วัดได้จากระบบนำมาศึกษาถึงความถี่ไปได้ ในการคัดแยกส้มและทุเรียน จากการจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรมจำลอง ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และสร้างเครื่องคัดแยกต้นแบบเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองกับผล ที่ได้จากระบบเซ็นเซอร์

1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึง ความเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตการวิจัยและ รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ การออกแบบสายอากาศ โมโนโพลแบบแพทช์ คุณสมบัติไดโพลเล็กทรอนิกส์ โครงข่ายประสาทเทียม และการแจกแจงแบบไรเซียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 กล่าวถึงการพัฒนาระบบเซ็นเซอร์สำหรับคัดแยกรสชาติของส้มเขียวหวานโดยไม่ทำลาย เริ่มด้วยการสร้างแบบจำลองผลส้มที่มีรสชาติหวานและไม่หวาน การทำงานร่วมกับสายอากาศไมโครสตริปที่แมตช์กับผลส้มหวานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีผลส้มอยู่ตรงกลางแล้วนำค่า S พารามิเตอร์ที่วัดได้มาวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมที่แสดงความเป็นไปได้แบ่งเป็นรสชาติคือ หวานและไม่หวาน จากนั้นทำการสร้างระบบคัดแยกรสชาติของส้มเขียวหวานต้นแบบทดสอบระบบด้วยการคัดแยกส้มเขียวหวานตัวอย่าง

บทที่ 4 กล่าวถึงการศึกษาวิธีการคัดแยกทุเรียนจากระบบเซ็นเซอร์ที่อล่าเสียงที่มีทุเรียนบรรจุอยู่ในอย่างต่อเนื่อง ด้วยเทคนิคการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 915 เมกะเฮิรตซ์ ศึกษาผลการทำงานของระบบด้วยโปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และเก็บค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ ในเชิงสถิติจากการเปลี่ยนตำแหน่งของทุเรียนในขณะที่ทำการวัด เพื่อมาพิจารณาธรรมชาติของข้อมูลแบบจำลองช่องสัญญาณด้วยฟังก์ชันโรเซียน มาวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของค่า k-factor เพื่อเป็นหลักการในการแบ่งแยกระหว่างทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก จากนั้นทำการสร้างระบบคัดแยกทุเรียนต้นแบบ ทดสอบระบบด้วยการคัดแยกทุเรียนตัวอย่าง

บทที่ 5 กล่าวถึงการพัฒนาแบบคัดแยกทุเรียนย่านความถี่กว้างบนสายพานลำเลียงในช่วงความถี่ 880 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 933 เมกะเฮิรตซ์ โดยศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการคัดแยกระดับความแก่ของทุเรียน ซึ่งแบ่งออกเป็นทุเรียนอ่อน ทุเรียนแก่ และทุเรียนสุก โดยใช้ย่านความถี่กว้าง เทียบกับการคัดแยกด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งการวัดที่ความถี่เดียว มีสายพานลำเลียงทุเรียนที่ถูกควบคุมด้วยสเต็ปมอเตอร์ ตรวจวัดทุเรียนขณะที่ทุเรียนเลื่อนไปบนสายพานลำเลียง จำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นสร้างระบบเซ็นเซอร์ต้นแบบ ทดสอบการทำงานของระบบโดยใช้โมเดลที่สร้างขึ้นจากพลาสติกสำหรับขึ้นรูป ภายในบรรจุน้ำเชื่อมที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กทริกเข้าใกล้ทุเรียนอ่อน ทุเรียนแก่ และทุเรียนสุก ศึกษาถึงความแตกต่างของค่า k-factor ที่ได้จากรัด

บทที่ 6 กล่าวถึงข้อสรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทำงานของการใช้คลื่นไมโครเวฟกับวัสดุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน การพัฒนาสายอากาศสำหรับใช้งานในระบบเซ็นเซอร์ รวมถึงทฤษฎีที่นำมาใช้ในการตัดสินใจเพื่อคัดแยกข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์

2.2 คุณสมบัติไดอิเล็กตริก

วัสดุแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เรียกว่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric property) ที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถแบ่งแยกความแตกต่างของวัสดุโดยคุณสมบัติไดอิเล็กตริกได้ ในด้านอิเล็กทรอนิกส์มีการนำคุณสมบัติไดอิเล็กตริกมาประยุกต์ใช้งาน เช่น ค่าการสูญเสียของฉนวนในสายเคเบิล ค่าอิมพีแดนซ์ของฐานรอง (Substrate) หรือความถี่ไดอิเล็กตริกเรโซเนเตอร์ (Dielectric resonator) ซึ่งข้อมูลของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกยังมีประโยชน์สำหรับนักพัฒนาบรรจุภัณฑ์ในการปรับปรุงสารประกอบแม่เหล็ก (Ferrite) หรือตัวดูดซับคลื่น (Absorber) นอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้ในส่วนกระบวนการใช้ไมโครเวฟเพื่ออุตสาหกรรม ได้แก่ อาหาร ผัก ผลไม้ ยาง ไม้ พลาสติก และเซรามิก เป็นต้น คุณสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นค่าไม่คงที่ที่สามารถแปรผันตามความถี่ อุณหภูมิ การจัดเรียงชั้นประจุ ส่วนผสม ความดัน และโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุ ทั้งนี้การนำคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกมาใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดต้องผ่านการวัดอย่างแม่นยำ

คุณสมบัติไดอิเล็กตริก ประกอบด้วยค่าสภาพยอมไฟฟ้า (Permittivity) และความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความแตกต่างของวัสดุแต่ละประเภทที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต่างกัน ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพันธ์เชิงซ้อน คือ $\epsilon_r = \epsilon_r' - \epsilon_r''$ ซึ่ง ϵ_r' คือ ส่วนจริงหรือเรียกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ที่เป็นค่าแสดงความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานของสนามไฟฟ้าของวัสดุ และส่วนของจินตภาพ (ϵ_r'') คือตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงการแปลงพลังงานสนามไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบของความร้อนของวัสดุ

อิเล็กตรอนของไดอิเล็กตริกหรือฉนวนมีแรงยึดเหนี่ยวจากนิวเคลียสสูง ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายจากอะตอมหนึ่งไปยังอะตอมถัดไป [42] เมื่อมีสนามไฟฟ้าสถิตมากระทำกับไดอิเล็กตริก จะมีแรงกระทำระหว่างอิเล็กตรอนและนิวเคลียส นอกจากนี้โมเมนต์ไดโพลทั้งหมดจะวางตัวตามแนวสนามไฟฟ้า โมเมนต์ไดโพลสนามไฟฟ้าหาได้จากสมการ (2.1)

$$p = qd \text{ (C.m)} \quad (2.1)$$

เวกเตอร์โพลาริเซชันไฟฟ้าที่เกี่ยวกับไดอิเล็กตริก เป็นผลรวมของโมเมนต์ไดโพลทั้งหมดดังสมการที่ (2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \left[\frac{1}{\Delta v} \sum_{i=1}^n p \right] \quad (\text{C/m}^2) \quad (2.2)$$

โดยไดโพล n แสดงในเทอมของผลต่างประจุ Δv และ C มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ ดังนั้นเวกเตอร์โพลาไรเซชันสามารถอธิบายการเกิดโมเมนต์ไดโพลไฟฟ้าในไดอิเล็กตริก และสามารถอธิบายถึงผลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อวัสดุฉนวนในระดับมหภาค สุดท้ายนี้ความหนาแน่นพลักซ์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับประจุมีความสัมพันธ์กันด้วย ϵ ซึ่งเป็นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริก ดังแสดงในสมการ (2.3)

$$\epsilon = \epsilon_0(1 + \chi_e) \quad (\text{F/m}) \quad (2.3)$$

โดย ϵ_0 เป็นค่าสภาพยอมไฟฟ้าของอวกาศว่าง (8.854×10^{12} F/m) χ_e เป็นความไวไฟฟ้าของวัสดุ และหน่วย F แทนด้วยฟารัด

เมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอกมากระทำ แรงดึงของอะตอมมีลักษณะคล้ายกับแรงดึงสปริงหรือการยกของ ทำให้เกิดพลังงานศักย์หรือการเก็บพลังงานไฟฟ้าเทียบได้กับตัวเก็บประจุ ซึ่งกลไกพื้นฐานของโพลาริเซชันในวัสดุไดอิเล็กตริกมีอยู่ 3 ประการ คือ

โพลาริเซชันอิเล็กทรอนิกส์ ไดอิเล็กตริกส่วนใหญ่ประพฤติตัวแบบโพลาริเซชัน โดยมีประจุลบ (อิเล็กตรอน) และประจุบวก (นิวเคลียส) ภายในอะตอม ซึ่งจะมีการเคลื่อนที่เมื่อมีสนามไฟฟ้า

โพลาริเซชันทิศทาง วัสดุที่รู้จักกันว่าเป็นวัสดุโพลาร์ โดยทั่วไปประกอบด้วยโมเมนต์ไดโพลไฟฟ้าที่ไม่เป็นศูนย์ เช่น โมเลกุลน้ำ เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าจากภายนอกมากระทำ โมเมนต์ไดโพลของวัสดุโพลาร์จะประพฤติตัวแบบไร้ทิศทาง อย่างไรก็ตามเมื่อมีสนามไฟฟ้าจากภายนอกมากระทำ โมเมนต์ไดโพลจะวางตัวตามแนวเวกเตอร์สนามไฟฟ้า

โพลาริเซชันไอออนิก วัสดุบางประเภทประกอบด้วยไอออนบวกและลบ เมื่อมีสนามไฟฟ้าจากภายนอกมากระทำ การเคลื่อนที่ของไอออนที่สัมพันธ์กันตำแหน่งจะเหมือนกับโพลาริเซชันอิเล็กทรอนิกส์

สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาส่งผลให้เวกเตอร์โพลาไรเซชัน คุณสมบัติไดอิเล็กตริก และความนำเปลี่ยนแปลงไปตามธรรมชาติของสนามไฟฟ้าที่มากระทำ ผลกระทบนี้จะให้คุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกันดังฟังก์ชันของความถี่ ผลของความถี่ที่มีต่อวัสดุสามารถจำลองด้วยวงจรสมมูลสปริงโดยรวมสัมพันธ์การหน่วงและเรโซแนนซ์เข้าไปด้วย สำหรับโพลาริเซชันไอออนิก เรโซแนนซ์ มีแนวโน้มเกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำเนื่องจากมวลที่หนักขึ้นของไอออน แต่ผลกระทบของความถี่จะมีการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันแบบคาบตามเวกเตอร์โพลาไรเซชัน เนื่องจากนิวเคลียส ในอะตอมหนักกว่าอิเล็กตรอน ส่งผลให้อิเล็กตรอนที่อยู่รอบนิวเคลียส เรโซแนนซ์ตรงมายังนิวเคลียส ดังนั้นสำหรับสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุจะไม่เพียงเก็บพลังงานแต่ยังดูดซับพลังงาน การดูดซับพลังงานเป็นผลมาจากความนำของวัสดุ โดยความนำเกิดจากการหมุนของเวกเตอร์โพลาไรเซชันในสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุภายใต้สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแสดงดังสมการ (2.4)

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon' - j\left(\frac{\sigma_e}{\omega}\right) \quad (2.4)$$

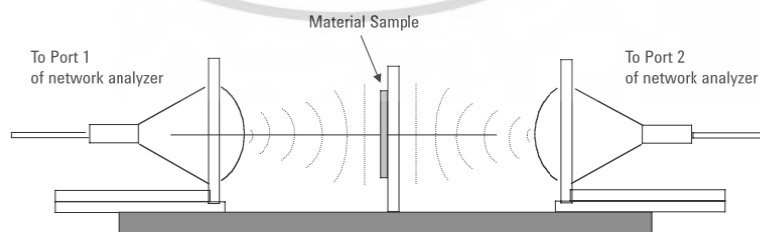
โดย ε เป็นคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของวัสดุ ε' เป็นค่าสภาพยอมไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถของวัสดุในการเก็บพลังงาน ε'' เป็นแฟกเตอร์สูญเสีย ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงาน σ_e เป็นความนำสมมูล และ ω เป็นความถี่เชิงมุม คุณสมบัติไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนที่สัมพันธ์กับอวกาศว่างแสดงดังสมการ (2.5)

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r \quad (2.5)$$

โดย ε'_r เป็นค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ และ ε''_r เป็นค่าตัวประกอบสูญเสียสัมพัทธ์ โดยเทอมแทนเจนต์การสูญเสีย $\tan \delta$ เป็นอัตราส่วนของค่าตัวประกอบสูญเสียต่อค่าสภาพยอมไฟฟ้า วัสดุที่มีค่าแทนเจนต์การสูญเสียเท่ากับศูนย์เป็นวัสดุที่ปราศจากการสูญเสีย ขณะที่ $\tan \delta \ll 1$ แสดงถึงวัสดุที่มีการสูญเสียน้อย และวัสดุที่มีค่า $\tan \delta \gg 1$ เป็นวัสดุที่มีการสูญเสียมาก

วิธีการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุได้มีการคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาเป็นเวลายาวนาน เพื่อหาเทคนิคที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการ แต่ละเทคนิคขึ้นอยู่กับธรรมชาติของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ต้องการวัด ทั้งทางด้านกายภาพ ทางด้านไฟฟ้า ความถี่ที่สนใจ และระดับของความแม่นยำที่ต้องการ วิธีการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกย่านความถี่ไมโครเวฟในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ เทคนิคอวกาศว่าง (Free space technique)

เทคนิคอวกาศว่าง เป็นวิธีการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุโดยไม่สัมผัสหรือทำลายวัสดุที่ใช้ทดสอบ และที่ไม่ต้องเตรียมตัวอย่างวัสดุอย่างพิเศษ เหมาะกับวัสดุที่อุณหภูมิสูง มีขนาดใหญ่ และไม่เป็นสารเนื้อเดียว เหมาะสมกับวัสดุที่มีลักษณะแผ่นบางใหญ่ ดังนั้นเทคนิคอวกาศว่างจึงง่ายต่อการประยุกต์ใช้ในระบบอุตสาหกรรมที่ต้องการตรวจสอบ และควบคุมคุณภาพของวัสดุ เช่น การตรวจสอบค่าความชื้นและความหนาแน่นของวัสดุ เทคนิคอวกาศว่างนี้วัสดุนำมาทดสอบจะวางอยู่ระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ แล้ววัดขนาดและเฟสของสัญญาณที่ส่งผ่านจากสายอากาศส่งผ่านวัสดุที่ต้องการทดสอบ ไปยังสายอากาศรับ ซึ่งผลการวัดจะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ แสดงดังรูปที่ 2.1



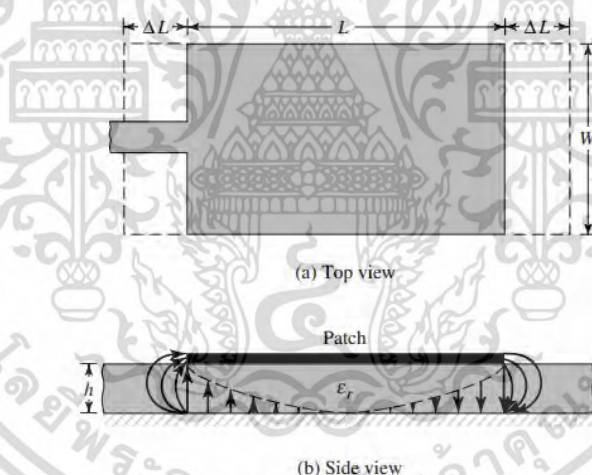
รูปที่ 2.1 เทคนิคอวกาศว่างโดยที่พอร์ตหนึ่งและพอร์ตสองต่ออยู่กับเครื่องวิเคราะห์วงจร coaxial [43]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคอวกาศว่างเป็นวิธีการที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพ และเหมาะประยุกต์ใช้ในการทดสอบกับวัสดุหลากหลาย เช่น การวิจัยด้านผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกกับความสูง ความชื้น และความหนาแน่นของผลผลิต [44] เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ไม่ต้องสัมผัสกับวัสดุ และไม่ทำลายวัสดุที่ต้องการทดสอบ จากเดิมที่เทคนิคนี้จะวัดขนาด (Magnitude) และเฟส (Phase) ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเพื่อคำนวณหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริก [45] ต่อมาได้มีการพัฒนาการคำนวณหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุโดยพิจารณาเฉพาะขนาด ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเพียงอย่างเดียว โดยไม่พิจารณาเฟส [46] เทคนิคนี้ยังคงมีความซับซ้อนอยู่บ้าง เนื่องจากต้องวัดขนาดของทั้งสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

2.3 การพัฒนาสายอากาศโมโนโพลแบบแพทช์

การพัฒนาสายอากาศโมโนโพลแบบแพทช์ เริ่มด้วยการกำหนด คุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการ ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง (Dielectric substrate) และกำหนดความถี่ที่ใช้งาน (f_r) และความหนาของทองแดงที่ใช้สร้างเป็นแพทช์และกราวด์ โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลแสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งสามารถออกแบบความกว้าง (W) และความยาวของแพทช์ (L) ได้ดังสมการที่ (2.6)-(2.7)



รูปที่ 2.2 สายอากาศแพทช์ [47]

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2.6)$$

เมื่อ	ϵ_{reff}	คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล
	ϵ_r	คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแผ่นวัสดุฐานรอง
	h	คือ ความหนาของแผ่นวัสดุฐานรอง
	W	คือ ความกว้างของสายอากาศแพทช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

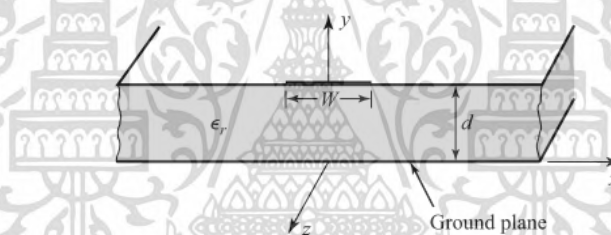
$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.7)$$

เมื่อ f_r คือ ความถี่ที่กำหนด

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.8)$$

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}} \mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (2.9)$$

เมื่อ L คือ ความยาวของสายอากาศแพทช์ ขั้นตอนต่อมาคือ การออกแบบไมโครสตริปไลน์ โดยคำนวณความกว้างของไมโครสตริปไลน์โดยใช้สมการที่ (2.10)-(2.11)



รูปที่ 2.3 ไมโครสตริปไลน์ [48]

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}, \frac{W}{d} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right], \frac{W}{d} > 2 \end{cases} \quad (2.10)$$

เมื่อ W คือ ความกว้างของไมโครสตริปไลน์
 d คือ ความหนาของแผ่นวัสดุฐานรอง
 ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแผ่นวัสดุฐานรอง
 โดยสามารถหาค่า A และ B ได้ดังนี้

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (2.11)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0 \sqrt{\epsilon_r}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Z_0 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ เมื่อแทนค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ϵ_r ของแผ่นวัสดุฐานรอง และค่า Z_0 แทนลงในสมการ (2.11) จะได้ค่า A และ B จากนั้นนำไปแทนที่สมการ (2.10) ทำให้ได้ค่าความกว้างของไมโครสตริปไลน์ จากนั้นจำลองการทำงานของสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นทำการปรับขนาดของสายอากาศเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมสำหรับการทำงานที่ความถี่ 915 เมกะเฮิรตซ์

2.4 การพัฒนาสายอากาศแพทช์

การออกแบบสายอากาศแพทช์ที่มีโครงสร้างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ต้องกำหนดสายอากาศคุณลักษณะของสายอากาศที่ต้องการเบื้องต้นก่อน ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองและกำหนดความถี่ที่ใช้งาน (f_r) เริ่มต้นการคำนวณขนาดของสายอากาศจากการหาค่าความยาวคลื่น (λ) ดังสมการที่ (2.12)

$$\lambda = \frac{c}{f_r} \quad (2.12)$$

โดย c คือความเร็วคลื่นของแสงในสุญญากาศ การออกแบบสายอากาศต้องใช้ความยาวคลื่นในวัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กตริก ดังนั้นสามารถคำนวณความยาวคลื่นในวัสดุไดอิเล็กตริกได้ดังสมการที่ (2.13)

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.13)$$

เมื่อ ϵ_{eff} คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผล ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของอากาศและวัสดุฐานรอง สามารถหาค่าได้จากสมการ (2.14)

$$\epsilon_{eff} = \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} \quad (2.14)$$

ขนาดของสายอากาศแพทช์ที่เหมาะสมกับการแพร่กระจายคลื่นจะมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นในวัสดุฐานรอง

$$\text{ขนาดของสายอากาศ} = \frac{\lambda_g}{2} \quad (2.15)$$

เมื่อได้ขนาดของสายอากาศแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการคำนวณระยะจุดบ่อนสัญญาณจากสมการที่ (2.16)

$$\text{ระยะจุดบ่อนสัญญาณ} = \frac{\lambda_g}{8} \quad (2.16)$$

ขั้นตอนสุดท้ายคือการคำนวณระยะพลังงานที่ถูกแพรกระจ่าย (Fringing field) ของสายอากาศแพทช์ จากค่าคงที่ทางไฟฟ้าและระยะความสูงของวัสดุฐานรอง ดังสมการที่ (2.17) – (2.21)

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (2.17)$$

$$a = 1 + \frac{1}{49} \log \left[\frac{\left(\frac{w}{h}\right)^2 + \left(\frac{1}{52} \frac{w}{h}\right)^2}{\left(\frac{w}{h}\right)^4 + 0.432} \right] + \frac{1}{18.7} \log \left[1 + \left(\frac{1}{18.1} \frac{w}{h}\right)^3 \right] \quad (2.18)$$

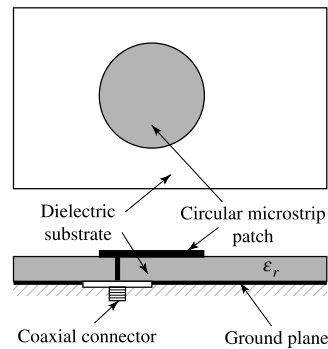
$$b = 0.564 \left(\frac{\varepsilon_r - 0.9}{\varepsilon_r + 3} \right)^{0.053} \quad (2.19)$$

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{w} \right)^{-ab} \quad (2.20)$$

$$\Delta d = 0.412h \left[\frac{\varepsilon_e + 0.300}{\varepsilon_e - 0.258} \right] \left[\frac{w/h + 0.262}{w/h + 0.813} \right] \quad (2.21)$$

จากข้อมูลทั้งหมดในการคำนวณข้างต้น ระยะความกว้าง ระยะความยาว ระยะจุดบ่อนสัญญาณ และระยะพลังงานที่ถูกแพรกระจ่ายได้ ถูกใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองเสมือนจริง โดยใช้โปรแกรมจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสร้างแบบจำลองสายอากาศแพทช์ เพื่อศึกษาถึงขนาดของสายอากาศที่มีสมรรถนะตามที่ต้องการ

ส่วนบ่อนสัญญาณ (Feed line) ให้กับไมโครสตริป ซึ่งส่วนนี้มีความสำคัญมาก เนื่องจากมีผลต่อการโพลาไรเซชัน (Polarization) ของสายอากาศและการแมทซิง (Matching) ไมโครสตริปที่ป้อนกลับแบบโพรบ (Probe feed) วิธีนี้จะใช้สายนำสัญญาณซึ่งมีใช้กันทั่วๆ ไปคือ สายแกนคู่ (Coaxial) เข้าไปต่อร่วมกับฐานของสายอากาศตามรูป ซึ่งการที่จะต่อให้สายนำสัญญาณกับแผ่นตัวนำ (Patch) อยู่ในมุมที่ตั้ง 90 องศา ซึ่งการต่อกับระนาบกราวด์ (Ground plane) เพื่อลดผลของสัญญาณรบกวน การแพรกระจ่ายคลื่นของสายอากาศสำหรับการบ่อนสัญญาณลักษณะนี้จะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นสารตัวกลาง เนื่องจากกรณีที่สารตัวกลางหนามากจะมีการแพรกระจ่ายคลื่นออกมาในปริมาณมาก และจะมีการแพรกระจ่ายน้อยในสารตัวกลางที่มีความหนาของชั้นสารตัวกลางน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.4



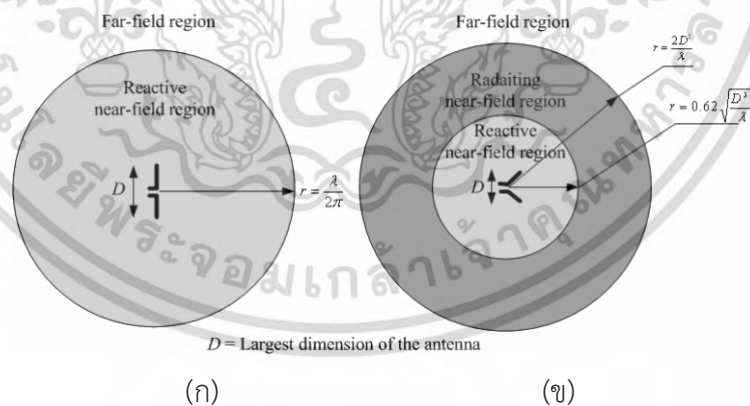
รูปที่ 2.4 ลักษณะของไมโครสตริปที่ป้อนกลับแบบโพรบ (Probe feed) [43]

ข้อดีของการป้อนสัญญาณในลักษณะนี้คือ สามารถต่อสายนำสัญญาณของสายอากาศกับสายนำสัญญาณรูปแบบอื่นได้ง่าย แต่การป้อนสัญญาณลักษณะนี้จะทำให้เกิดรูบนแผ่นตัวนำและจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของการโพลาไรเซชัน และการแพร่กระจายของสัญญาณ

2.5 สนามระยะใกล้

2.5.1 สนามรอบสายอากาศ

สนามบริเวณโดยรอบสายอากาศจะแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ ตามลักษณะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศ คือ สนามระยะใกล้ และสนามระยะไกล ในส่วนของสนามระยะใกล้ นั้น ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน สนามรีแอคทีฟระยะใกล้ และสนามกระจายระยะใกล้ แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สนามบริเวณรอบสายอากาศ (ก) สายอากาศขนาดเล็ก (ข) สายอากาศขนาดใหญ่ [49]

1) สนามรีแอคทีฟระยะใกล้ (Reactive -near field) บริเวณสนามรีแอคทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณที่สนามล้อมรอบสายอากาศมากที่สุด เป็นสนามชนิดรีแอคทีฟเป็นส่วนใหญ่ คือในบริเวณนี้พลังงานจะยังคงถูกสะสมในรูปแบบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ไม่แพร่กระจายออกไป เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างแหล่งจ่ายสัญญาณและสนาม อัตราส่วนของสนามแม่เหล็กสถิตเสมือนและสนามไฟฟ้าสถิตเสมือนจะมีค่าไม่เกิน 377Ω นอกจากนี้สายอากาศจะมีสนามไฟฟ้าเอกสสารนี้เป็นเอกสสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือสนามแม่เหล็กเป็นองค์ประกอบเด่น (Dominant component) เช่น สายอากาศไดโพลไฟฟ้า (Electric dipole) จะมีสนามไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบเด่น สายอากาศไดโพลแม่เหล็ก (Magnetic dipole) ก็จะมีสนามแม่เหล็กเป็นองค์ประกอบเด่น สำหรับสายอากาศขนาดเล็ก ที่มีขนาดของสายอากาศเล็กกว่าความยาวคลื่นใช้งาน บริเวณขอบเขตของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้หาได้จากสมการ (2.22)

$$r = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2.22)$$

สำหรับสายอากาศขนาดใหญ่ บริเวณขอบเขตของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้หาได้จากสมการ (2.23)

$$r = 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (2.23)$$

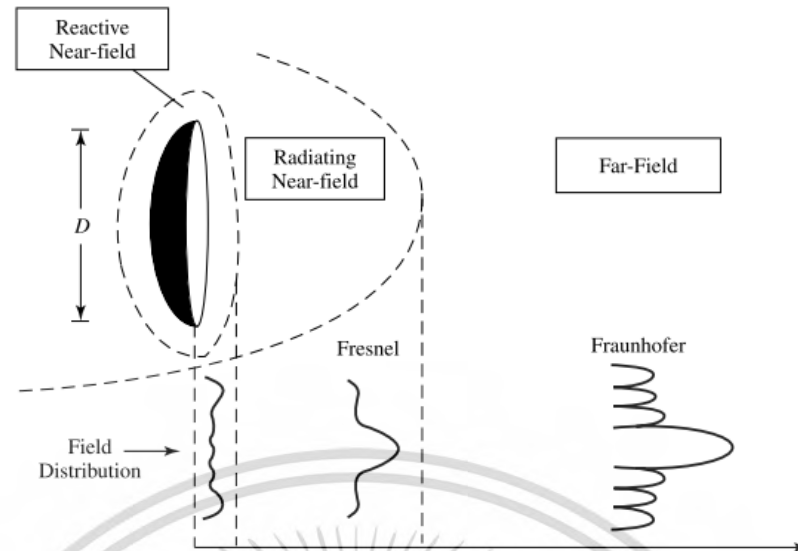
เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น และ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

2) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating-near field) เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกล มุมของการแพร่กระจายคลื่นนั้น แปรผันตามระยะห่างสายอากาศ เมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นสนามบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น ในบริเวณนี้พลังงานที่แพร่กระจายออกไปจะขึ้นอยู่กับการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างแหล่งจ่ายและสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ บริเวณนี้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเริ่มสม่ำเสมอและมีรูปร่างใกล้เคียงกับรูปแพร่กระจายคลื่นในสนามระยะไกล สำหรับสายอากาศขนาดใหญ่ ขอบเขตของสนามในส่วนนี้จะอยู่ในช่วงระยะ ดังสมการที่ (2.24)

$$0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq r \leq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.24)$$

3) สนามระยะไกล (Far field) เป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ที่สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะแพร่กระจายออกไป ตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตั้งฉากกับทิศทางของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งมุมต่างๆ ของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ในสนามบริเวณนี้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะลดทอนด้วยอัตรา $1/r$ ขนาดของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในบริเวณนี้จะเกิดเป็นโลบหลักและโลบย่อย อย่างสมบูรณ์แบบถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่ที่สุดเท่ากับ D ขอบเขตเริ่มต้นของสนามระยะไกล แสดงดังสมการที่ (2.25)

$$r = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.6 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่บริเวณสนามรอบสายอากาศ [43]

2.5.2 การสูญเสียตามระยะทาง

การสูญเสียตามระยะทาง (Path loss) คือการลดลงของความเข้มกำลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายผ่านไปในตัวกลาง การสูญเสียตามระยะทางในสนามระยะใกล้และสนามระยะไกลนั้น มีความแตกต่างกัน โดยในสนามระยะใกล้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานที่ส่งออก (P_{TX}) และกำลังงานที่รับได้ (P_{RX}) เป็นไปตามกฎของพริส แสดงดังสมการที่ (2.26) [50]

$$P(f, d) = \frac{P_{RX}}{P_{TX}} = \frac{G_{TX} G_{RX} \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} = \frac{G_{TX} G_{RX}}{4} \frac{1}{(kd)^2} \quad (2.26)$$

เมื่อ G_{RX} คือ อัตราการขยายของสายอากาศรับ และ G_{TX} คืออัตราการขยายของสายอากาศส่ง d คือ ระยะห่างของสายอากาศ และ k คือ เลขคลื่น (Wave number) ในสนามระยะใกล้ ค่ากำลังงานจะลดลงตามระยะห่างจากสายอากาศในสัดส่วน $1/d^2$ แต่ในสนามระยะใกล้ ค่ากำลังงานจะลดลงตามระยะห่างจากสายอากาศเช่นกัน แต่จะมีสัดส่วนที่มากกว่า คือ $1/d^4$ หรือมากกว่า พฤติกรรมของคลื่นในสนามระยะใกล้ที่สำคัญนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายประการ ข้อแรกคือ กำลังงานที่มีอยู่ในสนามระยะใกล้จะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นกว่าที่คำนวณไว้ตามกฎของพริสจากสนามระยะไกล ซึ่งหมายความว่า จะมีค่า SNR (Signal-to-noise ratio) ที่สูงกว่าและส่งผ่านคลื่นที่ดีกว่า ข้อที่สองคือ เนื่องจากค่ากำลังงานในสนามสนามระยะใกล้จะลดลงอย่างรวดเร็ว มีย่านทำงานที่แน่นอนและจำกัด ดังนั้นระบบที่ทำงานในสนามระยะใกล้จะเกิดการแทรกสอดจากสัญญาณวิทยุ นอกย่านทำงานค่อนข้างน้อย

ในสนามระยะใกล้ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีพฤติกรรมที่ต่างกัน การรับสัญญาณสนามไฟฟ้าต้องใช้สายอากาศที่มีองค์ประกอบหลักทางไฟฟ้า (Electric antenna) เช่น สายอากาศแบบไดโพล การรับสัญญาณสนามแม่เหล็กต้องใช้สายอากาศที่มีองค์ประกอบหลักทางแม่เหล็ก (Magnetic antenna) เช่น สายอากาศแบบลูป สำหรับกรณีการแพร่กระจายคลื่นของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศซึ่งเป็นไดโพลขนาดเล็กในระนาบ azimuthal และรับด้วยสายอากาศทางไฟฟ้าที่มีโพลาริเซชันในแนวตั้ง กำลังงานของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศทางไฟฟ้าที่มีโพลาริเซชันตรงกัน มีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าเฉลี่ยทางเวลา (Time average value) ของกำลังสองของสนามไฟฟ้าคลื่นส่ง ในทำนองเดียวกัน กำลังงานของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศทางแม่เหล็กที่มีโพลาริเซชันตรงกัน

เลขคลื่นเป็นคุณลักษณะหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นปริมาณชนิดสเกลาร์ที่ขึ้นกับความถี่ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนเฟสของการแพร่กระจายของคลื่นระนาบที่กำหนดต่อความยาวมีหน่วยเป็นเรเดียนต่อเมตร

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} \quad (2.27)$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่นใช้งาน และ f คือความถี่ใช้งาน และ c คือความเร็วของแสงในตัวกลางที่กำหนด สำหรับการคำนวณในสุญญากาศ เลขคลื่นจะขึ้นอยู่กับความถี่เท่านั้น แต่ในกรณีในตัวกลางเป็นไดอิเล็กตริก ความยาวคลื่นจะสั้นกว่าในสุญญากาศ เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่ามากกว่า 1 หรือในวัสดุที่มีความซึมซาบแม่เหล็กมากกว่า 1 ดังนั้นสำหรับตัวกลางใดๆ เลขคลื่นสามารถหาได้จากสมการที่ (2.28)

$$k = 2\pi f \sqrt{\mu\epsilon} = 2\pi f \sqrt{\mu_r \epsilon_r \mu_0 \epsilon_0} \quad (2.28)$$

ดังนั้นค่ากำลังงานของคลื่นที่รับได้ที่สายอากาศรับในสนามระยะไกลมีค่าลดลงในอัตราส่วน $1/\epsilon_r^2$ แต่ในสนามระยะใกล้จะมีค่าลดลงเป็นสัดส่วนที่มากกว่าคือ $1/\epsilon_r^4$

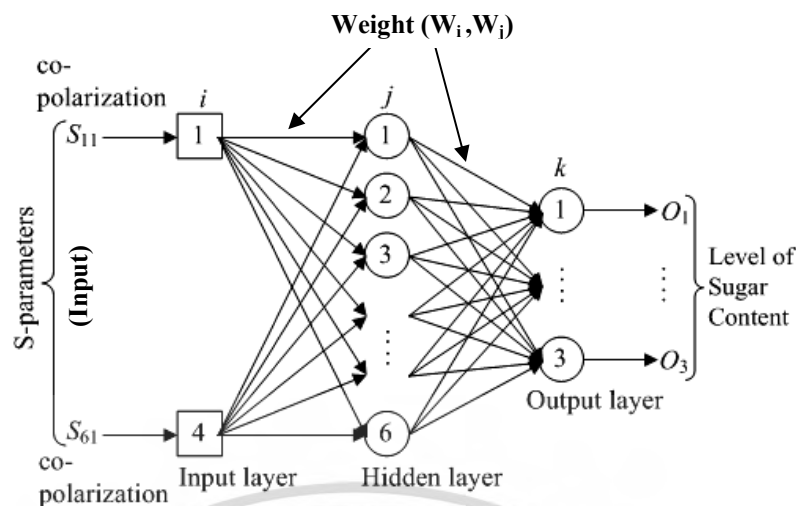
2.6 ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นการจำลองการทำงานของเซลล์ประสาทในสมองของมนุษย์ โดยอาศัยการเรียนรู้ และจัดจำรูปแบบคล้ายกับสมองมนุษย์ ดังนั้นโครงข่ายประสาทเทียมจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานทางด้านวิทยาการคอมพิวเตอร์ และวิศวกรรม เช่น การจดจำรูปแบบที่มีความไม่แน่นอน ลายมือ ลายเซ็น ตัวอักษร รูปหน้า รวมถึงการทำนายต่างๆ เช่น ทำนายระดับน้ำ

โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ (Back propagation) มีลักษณะหลักๆ คือ มีการจัดเซลล์ประสาทเทียมเป็นชั้น (Layer) แสดงดังรูปที่ 2.7 โดยชั้นที่รับข้อมูลเข้าเรียกว่าชั้นอินพุต (Input layer) ชั้นที่ผลิตผลตอบของโครงข่ายเรียกว่าชั้นเอาต์พุต (Output layer) ส่วนชั้นอื่นๆ ที่มีส่วนในการช่วยทำการประมวลผลอยู่ภายในเรียกว่า ชั้นซ่อนเร้น (Hidden layer) ในระหว่างชั้นมีการเชื่อมต่อ โดยกำหนดค่าน้ำหนัก (Weight) กำกับอยู่ที่เส้นเชื่อมทุกเส้น เมื่อข่ายงานเริ่มทำงานจะมีการกำหนดค่าให้แก่ชั้นอินพุต โดยค่าเหล่านี้อาจได้มาจากการกำหนดโดยมนุษย์ จากเซ็นเซอร์ที่วัดค่าต่างๆ หรือผลจากโปรแกรมอื่นๆ จากนั้นชั้นอินพุตจะส่งค่าที่ได้รับไปตามเส้นเชื่อมขาออก โดยที่ค่าที่ส่งออกไปจะถูกคูณกับค่าน้ำหนักของเส้นเชื่อม จากนั้นในชั้นถัดไปจะรับค่าซึ่งเป็นผลรวมจากชั้นต่างๆ แล้วจึงคำนวณผลอย่างง่าย โดยทั่วไปจะใช้ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid function) แล้วส่งค่าไปยังชั้นถัดไป การคำนวณเช่นนี้จะเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ ทีละชั้น จนถึงชั้นเอาต์พุต [51]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้เห็นได้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม [22]

การนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้งานแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการฝึกหัด (Training) หรือการเรียนรู้ (Learning) และขั้นตอนการทดสอบ (Testing) หรือใช้งานจริง (Working) นอกจากนี้ในขั้นตอนการเรียนรู้ยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักคือ

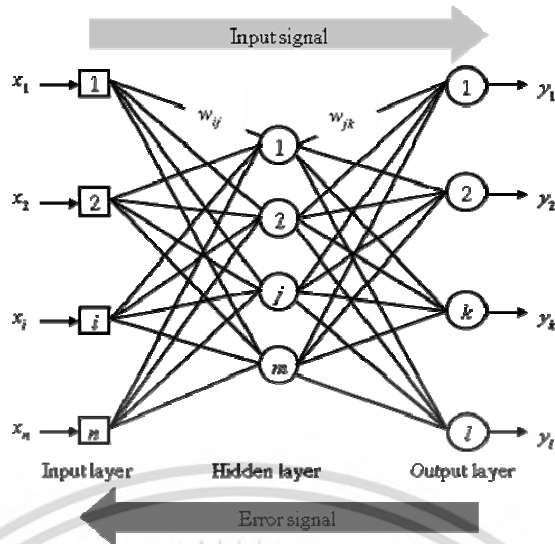
1. การเรียนรู้แบบมีครูสอน (Supervised learning algorithm) เป็นการเรียนแบบที่มีการตรวจคำตอบเพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมปรับตัว ชุดข้อมูลที่ใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียมจะมีคำตอบไว้คอยตรวจดูว่าโครงข่ายประสาทเทียมให้คำตอบที่ถูกหรือไม่ ถ้าตอบไม่ถูก โครงข่ายประสาทเทียมก็จะปรับตัวเองเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น

2. การเรียนรู้แบบไม่มีครูสอน (Unsupervised learning algorithm) เป็นการเรียนแบบไม่มีผู้แนะนำ ไม่มีการตรวจคำตอบว่าถูกหรือผิด โครงข่ายประสาทเทียมจะจัดเรียงโครงสร้างด้วยตัวเองตามลักษณะของข้อมูล ผลลัพธ์ที่ได้ โครงข่ายประสาทเทียมจะสามารถจัดหมวดหมู่ของข้อมูลได้

โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ (Feed forward back propagation) เป็นโครงข่ายประสาทเทียมที่มีการเรียนรู้แบบมีครูสอน วิธีการเรียนรู้ของโครงข่ายประเภทนี้ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักๆ โดยขั้นแรกเรียกว่า การแพร่ไปข้างหน้า (Forward pass) ซึ่งเกี่ยวกับค่าน้ำหนักของโครงข่ายเริ่มต้นที่ได้มาจากการสุ่ม การแพร่สัญญาณอินพุตไปยังชั้นต่างๆ จนถึงชั้นเอาต์พุต และการคำนวณเอาต์พุตออกมา ขั้นตอนที่ 2 เรียกว่า การแพร่ย้อนกลับ (Backward pass) ซึ่งเกี่ยวกับการแพร่ของความผิดพลาดย้อนกลับ (The error backward) ไปในแต่ละชั้นก่อนหน้า (เช่น ชั้นซ่อนเร้นซึ่งเชื่อมต่อกับชั้นเอาต์พุต) พร้อมกับการปรับค่าน้ำหนักจากชั้นซ่อนเร้นไปยังชั้นเอาต์พุตตามกฎความลาดเอียง (The gradient descent rule) การทำงานของโครงข่ายจะทำซ้ำจนกระทั่งเอาต์พุตจริงมีค่าใกล้เคียงกับเอาต์พุตที่ต้องการ ขั้นตอนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ โดยโครงข่ายประกอบด้วยชั้นอินพุตแทนด้วย i ชั้นซ่อนเร้น 1 ชั้นแทนด้วย j และชั้นเอาต์พุต ขณะที่ W_{ij} แทนด้วยค่าน้ำหนัก

หลักการของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นการประมวลผลหรือการคิดที่เลียนแบบสมองวิธีการคิดของมนุษย์ เพื่อให้การตัดสินใจมีความถูกต้องมากที่สุดโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแสดงได้ดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 โครงข่ายประสาทเทียม [22]

การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ฝึกสอนก่อนนำไปใช้งาน มีทั้งหมด 5 ขั้นตอนตามลำดับ
 ขั้นตอนที่ 1: กำหนดค่าเริ่มต้น

$$\left(-\frac{2.4}{F_i}, +\frac{2.4}{F_i} \right) \quad (2.29)$$

ขั้นตอนที่ 2: กำหนดค่าอินพุต (Input) และเอาต์พุต (Output)

อินพุต $x_1(p), x_2(p), \dots, x_n(p)$ (2.30)

เอาต์พุต $y_{d,1}(p), y_{d,2}(p), \dots, y_{d,l}(p)$ (2.31)

ชั้นซ่อนเร้น (a) $y_j(p) = \text{sigmoid} \left[\sum_{i=1}^n x_i(p) \times w_{ij}(p) - \theta_j \right]$ (2.32)

ชั้นเอาต์พุต (b) $y_k(p) = \text{sigmoid} \left[\sum_{j=1}^m x_{jk}(p) \times w_{jk}(p) - \theta_k \right]$ (2.33)

ขั้นตอนที่ 3: หาน้ำหนักที่เหมาะสม

(a) $\delta_k(p) = y_k(p) \times [1 - y_k(p)] \times e_k(p)$ (2.34)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e_k(p) = y_{d,k}(p) - y_k(p) \quad (2.35)$$

$$\Delta w_{jk}(p) = \alpha \times y_j(p) \times \delta_k(p) \quad (2.36)$$

$$w_{jk}(p+1) = w_{jk}(p) + \Delta w_{jk}(p) \quad (2.37)$$

$$(b) \quad \delta_j(p) = y_j(p) \times [1 - y_j(p)] \times \sum_{k=1}^l \delta_k(p) \times w_{jk}(p) \quad (2.38)$$

ค่าผิดพลาดที่นำไปใช้งานไม่เป็น 0 แต่ขึ้นอยู่กับความต้องการของงานที่นำไปใช้

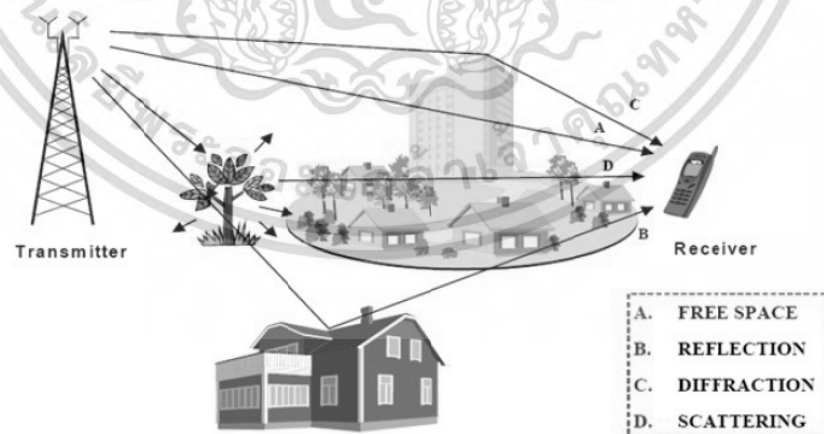
$$\Delta w_{ij}(p) = \alpha \times x_i(p) \times \delta_j(p) \quad (2.39)$$

$$w_{ij}(p+1) = w_{ij}(p) + \Delta w_{ij}(p) \quad (2.40)$$

ขั้นตอนที่ 4: วนซ้ำ เพื่อหาน้ำหนักที่เหมาะสม

2.7 แบบจำลองช่องสัญญาณไร้สาย

ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่องสัญญาณการสื่อสารไร้สาย (Wireless channel) นอกจากลักษณะการแพร่กระจายจากภาคส่งไปยังภาครับโดยตรงหรือ สัญญาณในแนวระดับสายตา (Line of sight) ยังมีลักษณะการแพร่อื่นอีก 3 ประเภท คือ การสะท้อนกลับ (Reflection) การเลี้ยวเบน (Diffraction) และการแตกกระเจิง (Scattering) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [52]

เนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือการแพร่กระจายคลื่นวิทยุสามารถอธิบายได้ด้วย 3 ปรัชญาการณที่แทบจะแยกจากกันอย่างอิสระ ได้แก่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การสูญเสียตามระยะทาง คือ การสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อต้องส่งสัญญาณในช่องสัญญาณไร้สายในระยะทางไกล โดยค่าการสูญเสียจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างภาคส่ง และภาครับ

2) การจางหายจากการบดบัง (Shadow fading) คือ การที่สัญญาณที่แพร่กระจายออกไปบางส่วนถูกบังด้วยสิ่งกีดขวางในสภาพภูมิประเทศ

3) การจางหายจากหลายวิถี (Multipath fading) คือ การซ้อนทับกันของสัญญาณในหลายทิศทาง ซึ่งสัญญาณเหล่านี้คือสัญญาณที่เกิดจากการสะท้อนกลับ การเลี้ยวเบน และการแตกกระเจิงของสัญญาณที่ส่งมาจากภาคส่ง ทำให้สัญญาณที่รับได้ที่ภาครับมีความผันผวนทั้งขนาดและเฟส เนื่องจากสัญญาณในแต่ละทิศทางอาจมีขนาดและเฟสต่างกัน มีทั้งการรวมกันแบบเสริมและหักล้าง และเดินทางมาถึงภาครับไม่พร้อมกัน โดยปกติแล้วการจำลองปรากฏการณ์การจางหายจากหลายวิถีจะใช้ฟังก์ชันทางสถิติ คือ การกระจายแบบเรย์เลห์ (Rayleigh distribution) และการกระจายแบบไรเซียน (Rician distribution)

การประมาณค่าการสูญเสียเนื่องจากการจางหายจากหลายวิถีในช่องสัญญาณไร้สายด้วยการแจกแจงแบบเรย์เลห์ จะใช้ในกรณีที่การแพร่กระจายคลื่นในช่องสัญญาณนั้น ไม่มีส่วนของสัญญาณในแนวระดับสายตา และการแจกแจงแบบไรเซียน หรือการแจกแจงแบบไรซ์ (Rice distribution) เป็นรูปแบบของการแจกแจงความน่าจะเป็นที่ใช้ในการอธิบายลักษณะของการแพร่กระจายสัญญาณไร้สายเคลื่อนที่ หรือสัญญาณวิทยุที่ประกอบไปด้วย สัญญาณในแนวระดับสายตา และสัญญาณจากเส้นทางที่มีการสะท้อนหรือหักเหอื่นๆ ที่เดินทางมาถึงยังภาครับ คุณภาพของสัญญาณที่รับได้สามารถดูได้จากความแรงของสัญญาณในแนวระดับสายตาซึ่งกำหนด ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบไรเซียนแสดงได้ดังสมการที่ (2.41) [40]

$$P_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-(r^2+s^2)/2\sigma^2} I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right) \quad (2.41)$$

เมื่อ I_0 คือ ฟังก์ชันเบสเซลปรับปรุงชนิดที่หนึ่งอันดับที่ศูนย์
 σ^2 คือ ค่าความแปรปรวนของส่วนจริงหรือส่วนจินตภาพ
 s คือ ขนาดของส่วนระยะแนวสายตา

การกระจายแบบไรเซียนโดยทั่วไปจะอธิบายอยู่ในรูปของค่าดัชนีไรเซียน (Rician factor: k) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.42)

$$\text{k-factor} = \frac{s^2/2}{\sigma^2} = \frac{s^2}{2\sigma^2} \quad (2.42)$$

$$\sigma = \frac{s}{\sqrt{2k}} \quad (2.43)$$

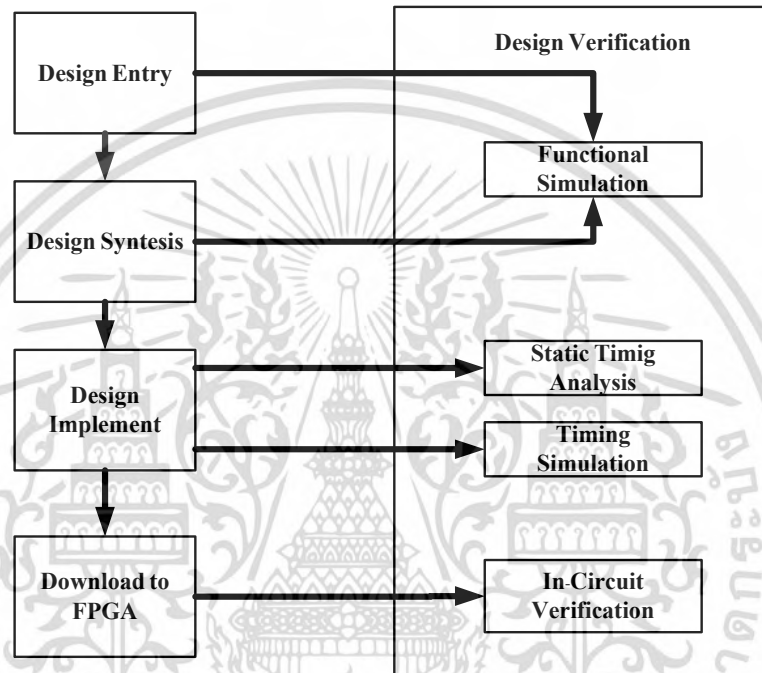
2.8 การออกแบบวงจรดิจิทัลด้วยอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้

วงจรถิติดิจิทัลสามารถพัฒนาและติดตั้งบนอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ ซึ่งมีหลายขั้นตอนในการในการติดตั้ง เบื้องต้นคือการใช้ภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์ (Hardware description language:

HDL) เช่น ภาษาวีเอชดีแอล (VHDL) หรือภาษาเวริล็อก (Verilog HDL) ในการพัฒนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาวงจรในลักษณะใช้ภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์มีข้อดีคือ สามารถติดตั้งวงจรที่พัฒนาได้กับทุกเทคโนโลยี ซึ่งแตกต่างจากวิธีวาดผังวงจร (Schematic) ที่ต้องอาศัยเทคโนโลยีของอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ในการพัฒนาวงจร ขั้นตอนหลังจากการเขียนโค้ดคือการนำโค้ดที่ได้ไปสังเคราะห์ (Synthesis) เพื่อสร้างเป็นวงจร ผลที่ได้จากการสังเคราะห์คือเน็ตลิสต์ในระดับเกต (Gate-level Netlist) โดยจะอยู่ในลักษณะรูปแบบมาตรฐาน EDIF (Electronic data interchange format) หรือ XNF (Xilinx netlist format) ขั้นตอนการพัฒนาและการติดตั้งวงจรดิจิทัลลงบนอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้แสดงในรูปที่ 2.10 รายละเอียดขั้นตอนการพัฒนามีดังนี้ [53]



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการออกแบบวงจรดิจิทัลลงบนอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ [54]

2.8.1 การออกแบบวงจร

การออกแบบวงจร (Design entry) นั้นสามารถออกแบบได้ด้วยวิธีต่างๆ เช่น การออกแบบด้วยวิธีวาดผังวงจร (Schematic) การออกแบบด้วยการเขียนขั้นตอนการทำงาน (State diagram) และการออกแบบด้วยภาษาระดับสูงที่เรียกว่าเฮชดีแอล (Hardware description language: HDL) โดยภาษาวีเอชดีแอลนั้น การพัฒนาวงจรเริ่มจากทำความเข้าใจอัลกอริทึมของการทำงาน จากนั้นนำมาเขียนเป็นภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์หรือวีเอชดีแอล สำหรับการอธิบายพฤติกรรม (Behavioral) การทำงานของวงจรแสดงในรูปที่ 2.11

```

library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
use IEEE.STD_LOGIC_ARITH.ALL;
use IEEE.STD_LOGIC_UNSIGNED.ALL;

entity Step_Dir_Re is
    port( Reset_step,Clk50M : in std_logic;
          Step_v : out std_logic);
end Step_Dir_Re;

architecture Behavioral of Step_Dir_Re is
    signal Clk_out_v,Step1_v,Reset1_v : std_logic;
begin

-----
    process(Reset_step,Clk50M)
        variable count : integer range 0 to 24 := 0;
    begin
        if Reset_step = '1' then
            count := 0;
        elsif Clk50M'Event and Clk50M = '1' then
            if count < 24 then
                count := count + 1;
            else
                count := 0;
            end if;
        end if;
    end process;
-----
    process(Reset_step,Clk_out_v)
        variable count0: std_logic_vector(20 downto 0);
    begin
        if (Reset_step = '1') then
            Step1_v <= '0';
        elsif (Clk_out'event and Clk_out = '1') then
            if (count0 < 400000) then

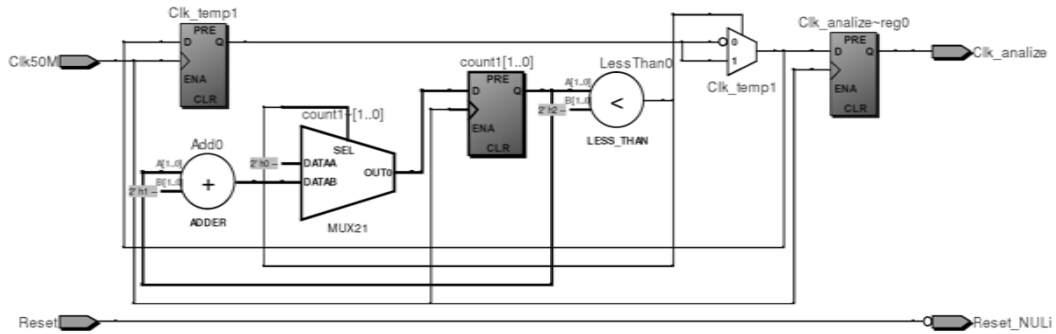
```

รูปที่ 2.11 การพัฒนางจรด้วยภาษาวีเอชดีแอล

การพัฒนางจรด้วยภาษาเอชดีแอลใช้โปรแกรม Text editor หรือใช้ซอฟต์แวร์ที่สนับสนุนการเขียนภาษาเอชดีแอล ซึ่งทำให้สะดวกสำหรับการเขียนรวมถึงสามารถตรวจสอบความถูกต้องตามหลักไวยากรณ์ได้โดยใช้โมเดลซิม (Modelsim) ของบริษัท Model technology เป็นต้น

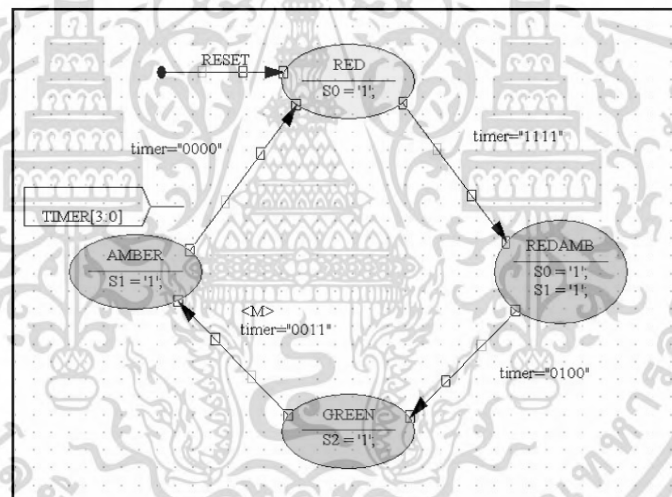
การพัฒนางจรด้วยวิธีการวาดผังวงจรเดียวกัน การพัฒนางจรในลักษณะนี้ ผู้พัฒนาต้องศึกษาถึงหลักการทำงานของวงจรและเทคโนโลยีของอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ที่จะใช้ก่อน จากนั้นจึงนำอุปกรณ์ที่มีอยู่ในโปรแกรมมาพัฒนาเป็นวงจรรวม ซึ่งการพัฒนางจรในลักษณะนี้จะต้องอ้างอิงเทคโนโลยีของบอร์ดทดลองที่ใช้งาน เนื่องจากผังวงจรที่ใช้งานจะต้องฝังตัวอยู่ในบอร์ดทดลองที่นำมาใช้งาน การพัฒนาอยู่ในลักษณะเดียวกับการวาดรูป ผังวงจรตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 วงจรที่พัฒนาด้วยวิธีการวาดผังวงจร (Schematic)

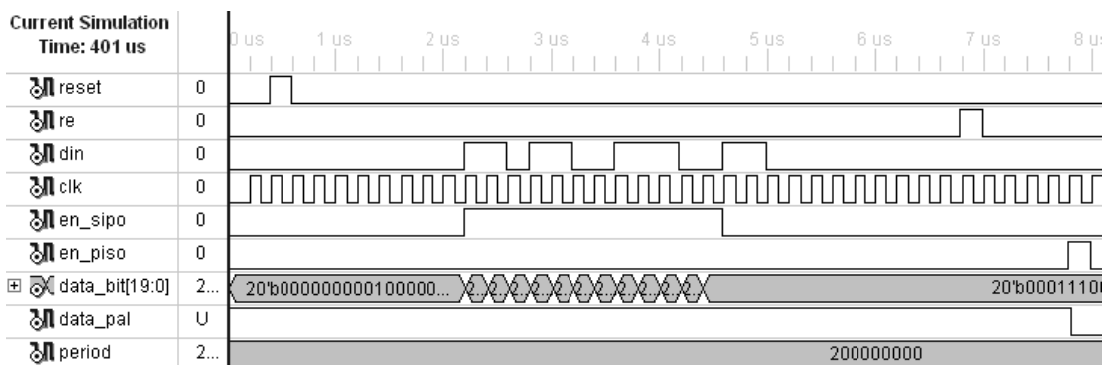
พัฒนางจรด้วยการเขียนขั้นตอนการทำงาน การพัฒนางจรในลักษณะนี้เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ผู้พัฒนาจะต้องเข้าใจถึงขั้นตอนการทำงานที่ต้องการออกแบบคือ ต้องมีลำดับการทำงานขั้นตอนการตัดสินใจ และสุดท้ายเป็นการเลือกเส้นทางจากการตัดสินใจ ซึ่งขั้นตอนการทำงานและตัดสินใจแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การพัฒนางจรด้วยขั้นตอนการทำงาน (State diagram)

จากวิธีการพัฒนางจรทั้งหมด ขั้นตอนต่อมาคือการตรวจสอบการทำงานของวงจรถูกพัฒนาด้วยภาษาเอชดีแอล โดยตรวจสอบว่าวงจรถูกพัฒนาสามารถทำงานได้ตามต้องการหรือไม่ ซึ่งตรวจสอบได้จากการจำลองการทำงานในระดับพฤติกรรม (Behavioral simulation) ของวงจรถูกพัฒนาและแบ่งได้ 2 การตรวจสอบคือ การเขียนภาษาเอชดีแอลเพื่อตรวจสอบวงจรถูกพัฒนาหรือเรียกว่า “Testbench” หรือการจำลองการตรวจสอบด้วยซอฟต์แวร์ HDL Bencher คือผู้ใช้สามารถป้อนสัญญาณอินพุตตามลักษณะที่ต้องการในรูปแบบ Test bench waveform (.tbw) และเรียกใช้งาน ISE simulator เพื่อทดสอบและแสดงผลในรูปแบบของคลื่น (Waveform) ดังแสดงในรูปที่ 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 สัญญาณที่ได้จากการจำลองการทำงานในรูปแบบของคลื่น

ซึ่งจากการตรวจสอบวงจรที่พัฒนาด้วยโปรแกรมซิมูเลเตอร์ (Simulator) จะได้สัญญาณเอาต์พุตที่แสดงให้เห็นถึงการทำงานของวงจรที่ได้พัฒนา (Design under test: DUT) ซึ่งผู้พัฒนาสามารถตรวจสอบว่าวงจรที่พัฒนาทำงานถูกต้องหรือไม่ ซึ่งถ้าไม่ตรงตามความต้องการก็สามารถแก้ไขใหม่ได้ โดยสามารถแก้ไขได้ด้วยผู้พัฒนาเอง

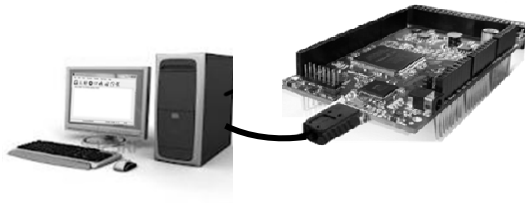
2.8.2 การติดตั้ง

ในขั้นตอนการติดตั้งนี้ จะนำผลที่ได้จากการสังเคราะห์ที่เป็นเน็ตลิสต์ (Design netlist) ที่ได้จาก Design entry ที่เป็น Schematic หรือจากการสังเคราะห์วงจรในกรณีที่เป็น HDL มาทำการคอมไพล์วงจรในระดับเกต จากนั้นทำการแปลงให้เป็นกลุ่มของลอจิก และทำการตรวจสอบว่าสามารถวางหรือบรรจุวงจรลงในชิพเบอร์ที่กำหนดได้หรือไม่ และขั้นตอนต่อไปทำการแมพ (Map) โดยจะต้องมีการคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อทำการพัฒนา และเชื่อมเส้นทาง (Place & Route) ในอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ด้วยซอฟต์แวร์ของผู้ผลิตอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ เช่น Xilinx ISE และ Quartus II เป็นต้น ซึ่งโปรแกรมที่ใช้จะแสดงให้เห็นถึงเวลาที่ใช้ในการทำงานของวงจร (Static timing) และตรวจสอบความถูกต้องจากการจำลองการทำงานระดับฐานเวลา (Timing simulation) ด้วยโปรแกรมซิมูเลเตอร์ การจำลองการทำงานระดับฐานเวลาถือว่าการจำลองการทำงานขั้นสุดท้าย ซึ่งจะต้องทำหลังจากการออกแบบวงจรและเชื่อมต่อเส้นทางการทำงาน การจำลองการทำงานจะเกี่ยวกับเรื่องของเวลา เช่น ความล่าช้าของสัญญาณไฟฟ้าตามเส้นทางต่างๆ ภายในวงจร และระยะคาบของสัญญาณนาฬิกา (Clock period) น้อยที่สุดที่สามารถใช้งานในการทำงานของวงจรได้ ซึ่งถ้าการทำงานไม่ถูกต้องก็สามารถกลับไปแก้ไขโค้ดภาษาเอชดีแอลใหม่ โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

2.8.3 การโปรแกรมข้อมูลลงชิพอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้

จากขั้นตอนการตรวจสอบด้วยการจำลองการทำงานระดับฐานเวลาแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการโปรแกรมข้อมูลลงวงจรลงชิพอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Device programming) การโปรแกรมข้อมูลลงวงจรจะนำไฟล์ที่นามสกุล .bit ที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้าคือ ขั้นตอน Implementation หรือขั้นตอน Generate programming file มาทำการดาวน์โหลดลงบอร์ดทดลองอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ด้วยเครื่องโปรแกรมหรือดาวน์โหลดเคเบิล เป็นการตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานในลำดับสุดท้าย สำหรับการตรวจสอบในวงจรที่นำไปใช้งานจริง (In-circuit verification)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 การโปรแกรมลงในชิพอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้

2.9 ภาษาวีเอชดีแอล

วีเอชดีแอล (VHSIC hardware description language: VHDL) ได้รับการพัฒนาจากกระทรวงกลาโหมของสหรัฐอเมริกา (Department of defense: DOD) ในช่วงปี ค.ศ. 1980 ซึ่งจุดประสงค์หลักของโครงการวีเอชเอสไอซี (Very high speed integrated circuits: VHSIC) คือ การพัฒนาการออกแบบวงจรรวมไหม้ประสิทธิภาพสูงและสามารถพัฒนางจรรวมได้ง่ายโดยมีเป้าหมายหลัก 2 ประการคือ

- 1) สามารถพัฒนาภาษาที่รองรับการออกแบบวงจรที่ซับซ้อน
- 2) ภาษาที่พัฒนาต้องเป็นมาตรฐานหรือเป็นภาษากลางที่สามารถเผยแพร่การพัฒนาภายในกลุ่มนักพัฒนาด้วยกัน

ในปี ค.ศ. 1986 ภาษาวีเอชดีแอลได้รับการปรับปรุง เพื่อให้สามารถกำหนดอยู่ในมาตรฐานของ IEE (Institute of electrical and electronics engineers) ซึ่งถูกประกาศเป็นมาตรฐานในเดือนธันวาคม ค.ศ. 1987 โดยอยู่ในหมวด IEE 1076-1987 หรือเรียกว่า VHDL '87 ภายหลังได้มีการปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จึงได้มีการประกาศปรับปรุงอีกครั้งในปี ค.ศ. 1993 โดยอยู่ในหมวด IEE 1076-1993 หรือเรียกว่าสั้นๆ ว่า VHDL '93 โดยได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มไวยากรณ์เพื่อให้ผู้ใช้สามารถใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้น

2.9.1 โครงสร้างพื้นฐานของภาษาวีเอชดีแอล

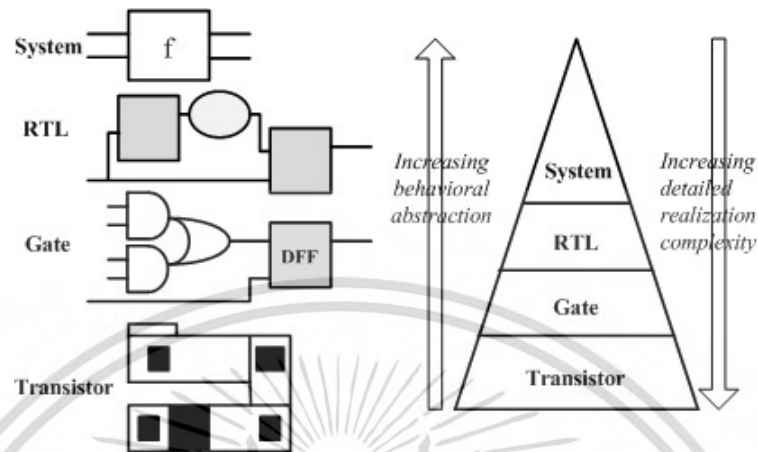
ภาษาวีเอชดีแอลถูกใช้เป็นภาษาสำหรับพัฒนางจรดิจิทัล โดยโครงสร้างสามารถพัฒนาเป็นวงจรได้หลายแบบ เริ่มจากพัฒนางจรลอจิกเกต (Gate) ที่ซับซ้อนต่ำ จนถึงการพัฒนาระบบ (System) ขนาดใหญ่ที่ซับซ้อน ทั้งยังเป็นภาษาที่ผู้ใช้สามารถทำความเข้าใจได้ไม่ยาก สิ่งที่สำคัญของการพัฒนางจรด้วยภาษานี้คือความเป็นการทำงานแบบขนาน (Concurrent) ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญของการพัฒนางจรอิเล็กทรอนิกส์

คุณสมบัติของภาษาวีเอชดีแอลสามารถแสดงให้เห็นถึงการพัฒนางจรดิจิทัลได้หลายระดับ (Level of abstraction) โดยเริ่มจากการพัฒนาในระดับล่างสุดคือ ระดับลอจิกเกต (Gate level) จนถึงในระดับพฤติกรรมการทำงาน (Behavioral level) โดยแต่ละระดับจะมีความแตกต่างกัน เช่น ในกรณีที่ต้องการพัฒนางจรคุณด้วยภาษาวีเอชดีแอล การพัฒนาสามารถทำได้หลายระดับ

- 1) พัฒนางจรอาจเขียนในลักษณะบรรยายพฤติกรรมหรือใช้โอเปอเรเตอร์บวก “+” ซึ่งในภาษาวีเอชดีแอลเขียนคล้ายกับซอฟต์แวร์ เช่น $a \leq b + c$;
- 2) หรือพัฒนางจรบวกในระดับลอจิก
- 3) หรืออาจพัฒนางจรในระดับต่ำสุดคือ ทรานซิสเตอร์ (Layout level)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนางจรในลักษณะเดียวกัน ฟังก์ชันการทำงานในวงจรเหมือนกัน แต่การพัฒนาสามารถทำได้หลายแบบตั้งแต่ระดับ System, RTL, Gate, ถึงระดับ Transistor ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งอยู่กับความเหมาะสมรวมถึงความชำนาญของผู้พัฒนา



รูปที่ 2.16 ระดับการพัฒนางจรดิจิทัลของภาษาวีเอชดีแอล [54]

การพัฒนางจรในแต่ละระดับจะต่างกันอย่างสิ้นเชิง แต่การทำงานของวงจรจะอยู่ในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นเมื่อพิจารณารายละเอียดจากรูปพีระมิดจึงแสดงได้ดังนี้

System Level คือ การบรรยายพฤติกรรมการทำงานของระบบหรือแบบอัลกอริทึม (Algorithm description) การพัฒนาในลักษณะดังกล่าว จัดเป็นระดับบนสุดของการเขียนภาษาวีเอชดีแอล

RTL (Register transfer level) คือ การบรรยายลงลึกในส่วนของวงจรในระดับ Architecture ในระดับนี้จะเห็นรายละเอียดลงไปถึงภายในวงจรเช่น Synchronous หรือ Asynchronous, State machines, Registers, Data path, ต่างๆ รวมถึงการไหลของข้อมูลในแต่ละวงจรที่ถูกพัฒนา

Gate level คือ การบรรยายการพัฒนาลงลึกกว่าระดับ RTL ซึ่งมีรายละเอียดของวงจรระดับฟลิปฟลอป และลอจิกเกต ต่างๆ ที่เชื่อมต่อภายในของวงจร

Transistor level วงจรในระดับล่างสุดเรียกว่า Layout Level ในระดับนี้ภาษาวีเอชดีแอลไม่สามารถอธิบายได้ เนื่องจากข้อมูลมีความเกี่ยวกับค่า Capacitances และ Resistances ของทรานซิสเตอร์ ในระดับนี้ผู้พัฒนาต้องอาศัยซอฟต์แวร์สำหรับสังเคราะห์ในระดับทรานซิสเตอร์ (Layout synthesis) ซึ่งทั่วไปเรียกว่าซอฟต์แวร์ช่วย สำหรับการวางการเชื่อมต่อของทรานซิสเตอร์ (Place and route)

2.9.2 องค์ประกอบของภาษาวีเอชดีแอล

โครงสร้างของภาษาวีเอชดีแอลประกอบด้วย Entity, Architecture, Package, และ Configuration การพัฒนางจรดิจิทัลที่เป็นวงจรซับซ้อนหรือวงจรพื้นฐาน การพัฒนาต้องเขียนในรูปของส่วนองค์ประกอบ (Component) ของภาษาวีเอชดีแอล ซึ่งจะเป็นพื้นฐานการพัฒนาภาษาวีเอชดีแอลประกอบด้วยส่วนของการกำหนดการเชื่อมต่อ (Interface) การกำหนดอินพุตและเอาต์พุตเชิงสถาปัตยกรรม (Architecture) แสดงในรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
ENTITY exp_1 IS
  Input and output
  Physical and other
  parameter'
END exp_1;
```

```
ARCHITECTURE identifier OF exp_1 IS
  Declaration
BEGIN
  Specification of functionality of the
  component
  Interims of its input line and as influenced
END identifier;
```

รูปที่ 2.17 การเชื่อมต่อและสถาปัตยกรรมของภาษาวีเอชดีแอล

การบรรยายเชื่อมต่อต้องขึ้นต้นด้วยคำว่า ENTITY และตามด้วยชื่อขององค์ประกอบและคำว่า IS ภายในแสดงให้เห็นพอร์ตการเชื่อมต่อระหว่างอินพุตและเอาต์พุต การทำงานขององค์ประกอบขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต รวมถึงพารามิเตอร์อื่นตามที่ได้กำหนดการเชื่อมต่อ ในส่วนของการเชื่อมต่อในรูป 2.17 การทำหน้าที่ขององค์ประกอบจะเริ่มหลัง BEGIN

2.9.2.1 การกำหนดการเชื่อมต่อ

การเชื่อมต่อ (Interface description) เป็นระดับสูงสุดในการพัฒนางจร ในระดับการกำหนดพอร์ตเพื่อติดต่อกับองค์ประกอบบล็อกภายนอกแสดงในรูปที่ 2.19 ในบรรทัดแรกเป็นการกำหนดชื่อขององค์ประกอบ ซึ่งกำหนดเป็นชื่อ clock_component และตามด้วย PORT จากนั้นชื่อของพอร์ตต้องอยู่ในวงเล็บ IN และ OUT กำหนดโหมดของสัญญาณเป็นอินพุตหรือเอาต์พุตในลักษณะ BIT เพื่อบ่งบอกชนิดข้อมูล

```
clk_component
En                clk
```

```
ENTITY clk_component IS
  PORT ( en : IN BIT;
         clk : OUT BIT
       );
END clk_component;
```

รูปที่ 2.18 แผนผังบรรยายการเชื่อมต่อขององค์ประกอบ

2.9.2.2 การกำหนดรูปแบบของการบรรยาย

หน้าที่การทำงานของสถาปัตยกรรม (Architecture description) ได้รับการบรรยายในส่วนนี้ ถูกบรรยายในลักษณะการกำหนดค่าของสัญญาณเอาต์พุต ในเทอมของ clock_component แสดงในรูปที่ 2.19

```

ARCHITECTURE behavioral OF clk_component IS
BEGIN
  PROCESS
    VARIABLE periodic : BIT := '0';
  BEGIN
    IF en = '1' THEN
      clk <= periodic;
    END PPROCESS;
  END clk_component;

```

รูปที่ 2.19 บรรยายเชิงพฤติกรรมของสถาปัตยกรรม

การบรรยายเชิงพฤติกรรมกำหนดให้ en เป็นอินพุต และ clk เป็นการะบวนการเริ่มต้น รวมถึงการบรรยายเชิงพฤติกรรมภายในกระบวนการกำหนดให้ช่วงเวลาเป็นตัวแปรที่มีค่าเริ่มต้นเป็น “0” และเมื่อสัญญาณ en เป็น “1” ค่าของช่วงเวลาถูกคอมพลิเมนต์ และส่งข้อมูลให้กับ clk จะได้เป็นข้อมูลเอาต์พุตและนำไปใช้งานหรือส่งต่อบล็อกอื่นต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ระบบการคัดแยกรสชาติของส้มเขียวหวาน

3.1 บทนำ

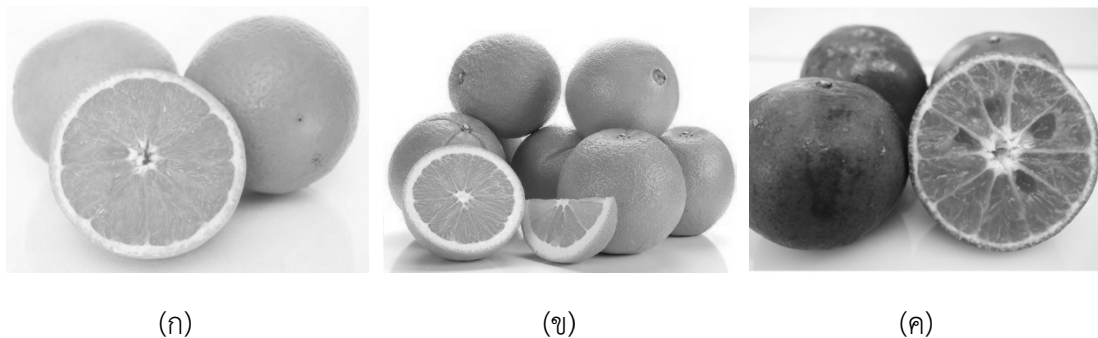
งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาสายอากาศต่อเนื่องจากงานวิจัยที่มีก่อนหน้านี้ [55] ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวเป็นการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแพทช์ 2 ตัวที่อยู่บนระนาบเดียวกันเพื่อใช้ตรวจสอบคุณสมบัติของผลไม้ โดยสายอากาศถูกออกแบบให้แผ่ตรงกับอากาศ จึงส่งผลให้ขนาดของ S พารามิเตอร์ มีการเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน เมื่อค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลไม้เปลี่ยน [56] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพัฒนาสายอากาศไมโครสตริปแพทช์ต่อจากงานวิจัยดังกล่าว เนื่องจากสร้างได้ง่าย ราคาถูก ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรไมโครเวฟอื่น และมีรูปทรงที่กะทัดรัด จึงเหมาะแก่การนำไปสร้างเป็นระบบเซ็นเซอร์ โดยปรับปรุงให้สายอากาศแผ่ตรงกับผลส้มเขียวหวานที่มีรสชาติหวาน สายอากาศถูกออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ เนื่องจากมีขนาดของความยาวคลื่นมากกว่าความหนาของเปลือกส้มเขียวหวาน จึงทำให้สามารถลดผลกระทบที่เกิดจากเปลือกได้ รวมถึงการพัฒนาาระบบเซ็นเซอร์สำหรับคัดแยกรสชาติของส้มเขียวหวานโดยไม่ทำลาย และเปรียบเทียบผลการแบ่งระดับความหวาน กับปริมาณความหวานที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความหวาน (Brix refractometer) เพื่อหาค่าความผิดพลาดของระบบ โครงสร้างเซ็นเซอร์ประกอบด้วยสายอากาศแพทช์ที่แผ่ตรงกับผลส้มหวานทั้งหมด 5 ตัว ประกอบด้วยตัวส่ง 1 ตัว และตัวรับ 4 ตัว โดยใช้หลักการเชื่อมต่อยุทธศาสตร์ระหว่างสายอากาศส่ง-รับ ซึ่งมีผลส้มอยู่ตรงกลาง พารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดคือ ค่า ($|S_{11}|$) ของสายอากาศตัวส่ง และค่าการเชื่อมต่อยุทธศาสตร์ของสายอากาศตัวรับทั้ง 4 ตัว ($|S_{31}|$ $|S_{41}|$ $|S_{51}|$ $|S_{61}|$) เพื่อให้มีความแม่นยำในการตัดสินใจที่มากขึ้นจึงนำข้อมูลที่ได้อามาวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks: ANNs) โดยมีโครงสร้างภายในประกอบด้วย โหนดอินพุต (Input) 4 โหนด โหนดซ่อนเร้น (Hidden) 6 โหนด และโหนดเอาต์พุต (Output) 3 โหนด ที่แสดงความเป็นไปได้ของปริมาณน้ำตาล 7 ระดับ หรือแบ่งเป็นรสชาติได้ 2 รสชาติ ที่เป็นไปได้คือ หวานและไม่หวาน

3.2 คุณลักษณะของส้มเขียวหวาน

3.2.1 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของส้มเขียวหวาน

ส้มมีหลากหลายสายพันธุ์ที่มีขนาดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับภูมิอากาศและภูมิประเทศที่ทำการเพาะปลูก เช่น ส้มวาเลนเซีย (Valencia) ส้มนาเวล (Navel) และส้มเขียวหวาน (Tangerine) เป็นต้น ส้มแต่ละประเภทจะมีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันเช่น ขนาด รูปทรง และความหนาของเปลือก ภายในและเปลือกภายนอกที่ไม่เท่ากันดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นที่ส้มเขียวหวาน เนื่องจากเกษตรกรในพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้ให้ความสนใจ และทำการเพาะปลูกส้มเขียวหวานกันอย่างแพร่หลาย ลักษณะของส้มเขียวหวานคือจะมีเปลือกบางประมาณ 1 เซนติเมตร และใน 1 ผลจะมีกบิลภายในอยู่ประมาณ 10-15 กบิล และระหว่างกบิลส้มจะถูกกันด้วยเส้นใยต่างๆ ลักษณะภายนอกทั่วไปของผลส้มจะมีขนาดความสูงและความกว้าง โดยเฉลี่ยประมาณ 5.9×6.8 เซนติเมตร สีของเปลือกจะเป็นสีเขียวหรือสีเขียวเจือสีส้มดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 สายพันธุ์ของส้ม (ก) ส้มวาเลนเซีย (ข) ส้มนาเวล (ค) ส้มเขียวหวาน

เพื่อวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ในการใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อแบ่งระดับความหวานของ ส้มเขียวหวานโดยไม่ทำลาย จึงต้องมีขั้นตอนการทดลองรวมถึงการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติทาง ไฟฟ้า ดังนั้นการนำส้มเขียวหวานมาทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งแรกที่ได้ทำการทดลอง ส้มเขียวหวานถูกเก็บเกี่ยวจากสวนทั้งหมด 2 ครั้ง ครั้งแรกในช่วง เดือนกันยายน พ.ศ. 2554 (กลุ่ม ก) และครั้งที่ 2 ช่วง เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2555 (กลุ่ม ข) จึงแบ่งออกได้เป็นส้มเขียวหวาน กลุ่ม ก มีทั้งหมด 101 ลูก และส้มเขียวกลุ่ม ข มีทั้งหมด 150 ลูก จากนั้นวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Dielectric property: ϵ_r , ϵ_r'') ของส้มเขียวหวานกลุ่ม ก และเปรียบเทียบกับความหวานเพื่อพิจารณา ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางไฟฟ้ากับความหวาน จากข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปใช้สร้าง แบบจำลองผลส้มเขียวหวานด้วยโปรแกรมจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และส้มเขียวหวานกลุ่ม ข จะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรก 75 ลูก ถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลในการฝึกสอนโครงข่ายประสาท เทียม และกลุ่มที่สอง 75 ลูก ถูกนำมาใช้เพื่อทดสอบระบบเซ็นเซอร์คัดแยกรสชาติของส้มเขียวหวาน โดยขนาดของส้มเขียวหวานทั้งหมดที่นำมาทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 6.0 เซนติเมตร แต่จะมีรสชาติที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.2 การแบ่งพื้นที่บนผิวส้ม

เครื่องมือวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของส้มเขียวหวานของงานวิจัยนี้คือ เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ฮิวเลตต์ แพคการ์ด (Hewlett-Packard) 8510 C และโพรบไดอิเล็กตริก (Agilent 85070 B open-ended coaxial-line) 85070 B [57] ค่าที่ได้จากการวัดแบ่งออกเป็น 2 ค่าคือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) ซึ่งการวัด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางไฟฟ้า จะวัดที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ และก่อนการวัดทุกครั้งต้องปรับเทียบ (Calibrations) เครื่องมือวัดทุกชิ้นก่อนเสมอ การปรับเทียบเครื่องมือวัดค่าคงที่ทางไฟฟ้ามี 3 ขั้นตอน ดังนี้คือ

- 1) วัดอากาศว่าง
- 2) วัดแบบปิดวงจร
- 3) วัดน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

สั้กลุ่ม ก ถูกนำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด เพื่อขจัดสิ่งปนเปื้อนที่มากับผลสั้มาก่อน จะนำมาทำการทดลอง รวมถึงการควบคุมอุณหภูมิภายในห้องทดลองให้อยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส เพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ สั้เขียวหวานแต่ละลูกจะถูกระบุหมายเลขไว้ เพื่อใช้ในการเทียบค่าที่ได้อิเล็กทรอนิกส์กับปริมาณความหวานที่วัดได้จากเครื่องวัดความหวานต่อไป การวัดสั้เขียวหวานแต่ละลูกจะถูกวัดโดยแบ่งออกเป็น 3 กรณี

กรณีที่ 1 การวัดสั้เขียวหวานทั้งลูก

ผลสั้ถูกทำเครื่องหมายด้วยการขีดเส้นจากหัวจุกสั้ด้านบนลงล่าง เพื่อแบ่งพื้นที่บนผิวสั้ ออกเป็น 4 ส่วนเท่าๆ กัน จากนั้นทำเครื่องหมายที่จุดกึ่งกลางของทั้ง 4 พื้นที่ ของผลสั้ ดังแสดง ในรูปที่ 3.2 เมื่อได้ตำแหน่งของสั้ที่ต้องทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า จากนั้นจึงสร้างฐานสำหรับวางผลสั้ขณะทำการวัด เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งขณะวัดของสั้แต่ละลูกและความผิดพลาดที่อาจเกิดจากผลกระทบของฐานรอง



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งการวัดของสั้เขียวหวานทั้งเปลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยฐานรองถูกสร้างมาจากโฟม เนื่องจากโฟมมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าใกล้เคียงกับอากาศ ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่อค่าที่ได้จากการวัดต่ำ รวมถึงใช้วัสดุดูดซับคลื่น (Absorber) เป็นฐานรองชั้นล่างสุด เพื่อป้องกันการสะท้อนของคลื่นที่ไม่ต้องการ ลักษณะการวัดแสดงดังรูปที่ 3.3 การวัดสั้ม 1 ลูก วัดทั้งหมด 4 จุด ตามที่กำหนด แต่ละจุดถูกวัด 1 ครั้ง จากนั้นค่าที่ได้จากการวัดทั้งหมด ถูกนำมาเฉลี่ย เพื่อให้ข้อมูลที่ได้อาจมาจากการวัดสั้มทั้งลูก

กรณีที่ 2 การวัดเนื้อสั้มเขียวหวาน

จากกรณีที่ 1 ผลสั้มถูกกำหนดจุดวัดบนลูกทั้งหมด 4 จุด เรียบร้อยแล้ว จากนั้นในกรณีที่ 2 คือขั้นตอนการเชื่อมเปลือกสั้มออกตามจุดที่กำหนดไว้ทั้ง 4 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และในขั้นตอนของการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า การวัดจะทำในลักษณะเดียวกับการวัดแบบสั้มทั้งเปลือก แต่จะต่างกันตรงกรณีที่ 2 หัวโพรบจะสัมผัสกับเนื้อสั้มโดยตรง ในขั้นตอนนี้จึงเป็นการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเนื้อสั้มเขียวหวาน การวัดถูกทำทั้งหมด 4 ครั้ง เช่นเดียวกันกับการวัดสั้มทั้งเปลือก จากนั้นนำค่าที่ได้จากการวัดเนื้อสั้มทั้ง 4 จุด มาเฉลี่ยเช่นเดียวกัน



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการวัดเนื้อสั้มเขียวหวาน

กรณีที่ 3 การวัดน้ำสั้มเขียวหวาน

ขั้นตอนนี้คือการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำสั้ม ดังนั้นจึงต้องคั้นน้ำสั้มจากผลสั้มเขียวหวาน ปริมาณน้ำสั้มของสั้มเขียวหวานแต่ละลูกถูกกำหนดที่ 30 มิลลิลิตร และบรรจุอยู่ในบีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 30 มิลลิลิตร จากนั้นถูกวัดด้วยโพรบไดอิเล็กตริกทั้งหมด 5 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำส้มเขียวหวาน

หลังจากวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำส้มเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการวัดปริมาณความหวานของน้ำส้มเขียวหวาน (Soluble solids content: SSC) ด้วยเครื่องวัดปริมาณความหวานเพื่อเทียบกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งปริมาณความหวานที่มีค่าสูง หมายถึงน้ำส้มที่มีรสชาติหวานมาก และจากนั้นนำค่าปริมาณความหวานที่วัดได้มาเทียบกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของส้มแต่ละลูกที่ได้จากการวัดทั้ง 3 กรณี การวัดปริมาณความหวานของน้ำส้มด้วยเครื่องวัดความหวานแสดงในรูปที่ 3.6

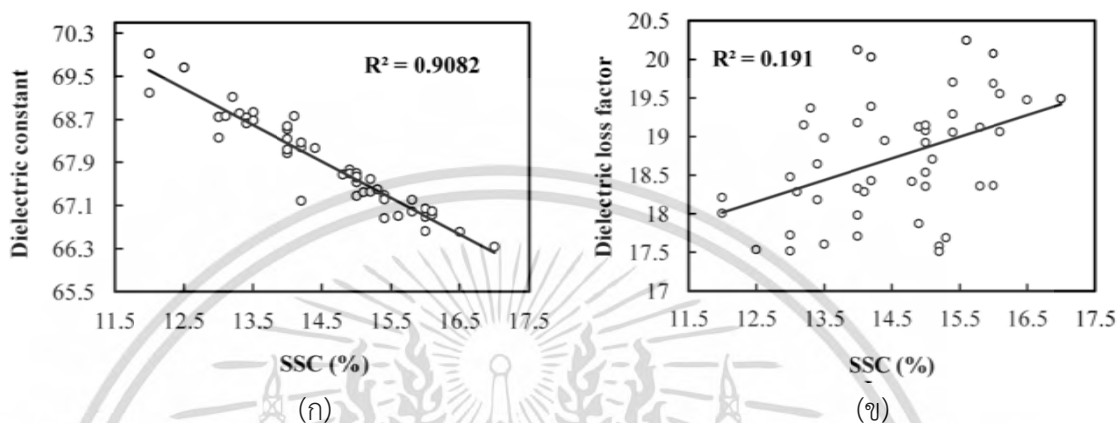


รูปที่ 3.6 การวัดปริมาณความหวานด้วยเครื่องวัดความหวานของน้ำส้มเขียวหวาน

จากนั้นนำน้ำส้มเขียวหวานจากส้มแต่ละลูก มาชิมโดยอาสาสมัครจำนวน 5 คน เพื่อตัดสินใจบอกความหวานของส้มแต่ละลูก นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับปริมาณความหวานที่วัดได้จากเครื่องวัดความหวาน จึงสังเกตได้ว่ากรณีที่ส้มมีรสชาติหวาน คือส้มที่มีค่าปริมาณความหวานมากกว่า 14.5 %brix และส้มที่รสชาติไม่หวาน คือส้มที่มีค่าปริมาณความหวานน้อยกว่า 14.5 %brix

จากวัดคุณสมบัติของน้ำส้มเขียวหวาน เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดโอดีลิกทริกและตัวประกอบการการสูญเสียไดโอดีลิกทริกกับปริมาณความหวาน พบว่าค่าคงที่ไดโอดีลิกทริกของน้ำส้มเขียวหวานอยู่ในช่วง 65.5-70.3 เทียบกับปริมาณความหวานอยู่ในช่วง 11.5-17.5 %brix ปริมาณความหวานของน้ำส้มจะลดลงเมื่อค่าคงที่ไดโอดีลิกทริกลดลง ค่าสหสัมพันธ์ (R^2) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

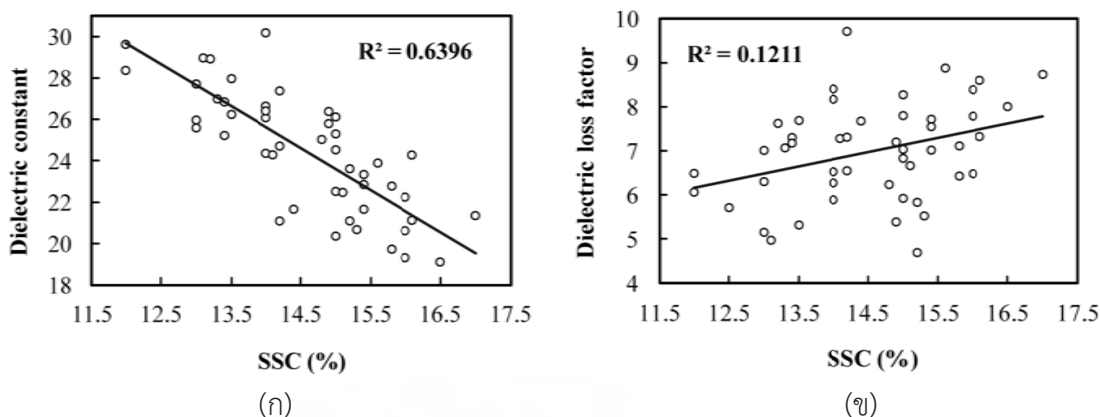
ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') และค่าปริมาณความหวานมีค่าเป็น 0.9082 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ก) โดยที่ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก (ϵ'') และค่าปริมาณความหวานมีค่าน้อยกว่ามาก คือมีค่าอยู่ที่ 0.191 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ข) จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีความสัมพันธ์กับปริมาณความหวานมากกว่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก ดังนั้นจึงให้ความสำคัญกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสำหรับนำมาใช้ในการตัดสินใจความหวานของส้มเขียวหวาน



รูปที่ 3.7 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำส้มกับปริมาณความหวาน
(ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ข) ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก

ขั้นตอนต่อมา เปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเนื้อส้มแต่ละลูกเทียบกับปริมาณความหวาน จากนั้นนำมาวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความหวานกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเนื้อส้ม มีค่า $R^2=0.7449$ และค่าสหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความหวานกับตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก มีค่า $R^2=0.191$ ซึ่งจากค่าที่ได้จะเห็นว่ามีค่าสอดคล้องกับ ผลจากการวัดปริมาณความหวานและคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำส้ม แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เพื่อคัดแยกความหวานของส้มเขียวหวาน

ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความหวานกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกของผลส้มทั้งเปลือกคือ 0.6396 และ 0.1211 แสดงดังรูปที่ 3.8 ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวจะสังเกตได้ว่า ค่าสหสัมพันธ์ของปริมาณความหวานกับตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่าน้อยกว่า ค่าสหสัมพันธ์ของปริมาณความหวานกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกอย่างชัดเจน บ่งบอกว่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้คัดแยกความหวานของส้ม เนื่องจากความสัมพันธ์ของข้อมูลไม่ชัดเจน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์ความหวานของส้มเขียวหวานจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เพื่อแบ่งระดับรสชาติของส้มเขียวหวาน



รูปที่ 3.8 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของผลส้มทั้งเปลือกกับปริมาณความหวาน
(ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ข) ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการคัดแยกความหวานของส้มเขียวหวานโดยไม่ทำลาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของผลส้มทั้งเปลือก ที่ประกอบด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกของส้มเขียวหวานกลุ่ม ก ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่วัดได้ มีผลกระทบที่เกิดจากเปลือกของส้มเขียวหวานรวมอยู่ด้วย แต่ยังคงสอดคล้องกับผลที่วัดได้จากน้ำส้มข้างต้น

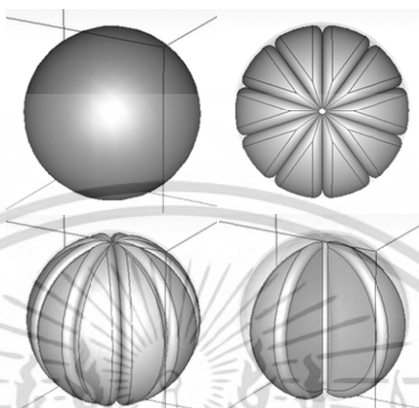
รวมถึงได้จำแนกรสชาติของส้มเขียวหวานจากการชิมเบื้องต้นทั้งกลุ่ม ก และ กลุ่ม ข โดยใช้อาสาสมัครจำนวน 5 คน เพื่อชิมและแบ่งรสชาติของส้มเขียวหวานออกเป็น ส้มที่มีรสชาติหวาน และ ส้มรสชาติไม่หวาน ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่าปริมาณความหวานที่วัดได้ เมื่อปริมาณความหวานน้อยกว่า 14 %brix จัดเป็นกลุ่มของส้มไม่หวาน และที่ปริมาณความหวานตั้งแต่ 14.5 %brix ขึ้นไป จัดเป็นกลุ่มของส้มหวาน สมการสหสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณความหวานกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของส้มทั้งเปลือก คือ $y = -2.0317x + 54.376$ โดยส้มเขียวหวานทั้งเปลือกที่มีรสชาติหวาน จะมีค่าสหสัมพันธ์มีค่า $R^2 = 0.6396$ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกน้อยกว่า 24 และปริมาณความหวานมากกว่า 14.5 %brix นอกจากนี้ปริมาณความหวานและตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกของส้มเขียวหวานทั้งเปลือกมีความสัมพันธ์อย่างไม่ชัดเจน โดยมีค่าสหสัมพันธ์ $R^2 = 0.1211$ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกเป็นค่าคงที่ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7 และปรับเปลี่ยนเฉพาะค่าคงที่ไดอิเล็กตริก จากค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่วัดได้ของส้มเขียวหวานทั้งเปลือก ถูกนำไปสร้างแบบจำลองส้มเขียวหวาน แต่สำหรับเส้นใยระหว่างกลีบของส้มเขียวหวานนั้นไม่ถูกนำมาสร้างเนื่องจากมีลักษณะบางและมีผลต่อการวัดไม่ชัดเจน

3.2.2 แบบการจำลองผลส้มเขียวหวาน

จากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของส้มเขียวหวาน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Vector network analyzer: VNA) ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ เทียบกับรสชาติของส้มเขียวหวาน ผลที่ได้ถูกนำมาใช้สำหรับสร้างแบบจำลองผลส้ม โดยกำหนดให้เปลือกส้มมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r') เท่ากับ 15 และตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก (ϵ_r'') เท่ากับ 7 เนื้อส้มที่มีรสชาติหวานมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 22 และตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) เท่ากับ 7 และเนื้อส้มที่รสชาติไม่หวานมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 28 และตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่เป็นการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

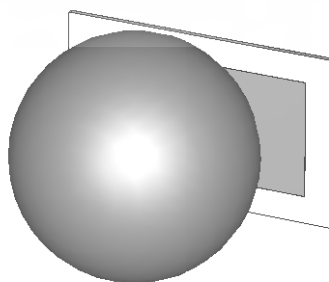
เท่ากับ 7 เช่นกัน ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการวัดผลส้มจริง รวมถึงสภาพทางกายภาพของส้มเขียวหวานถูกกำหนดจากข้อมูลจริง ที่ประกอบด้วย ขนาด และจำนวนกลีบของผลส้ม โดยแบบจำลองของส้มเขียวหวานมีความหนาของเปลือก 1 มิลลิเมตร และมีกลีบของผลส้มจำนวน 10 กลีบ มีขนาด 6×6 เซนติเมตร และมีรสชาติหวาน ดังแสดงในรูปที่ 3.9 แบบจำลองผลส้มที่สร้างขึ้นประกอบด้วยเปลือกส้มด้านนอก และเนื้อส้มด้านใน



รูปที่ 3.9 แบบจำลองผลส้ม 10 กลีบ และเปลือก

3.3 การออกแบบสายอากาศ

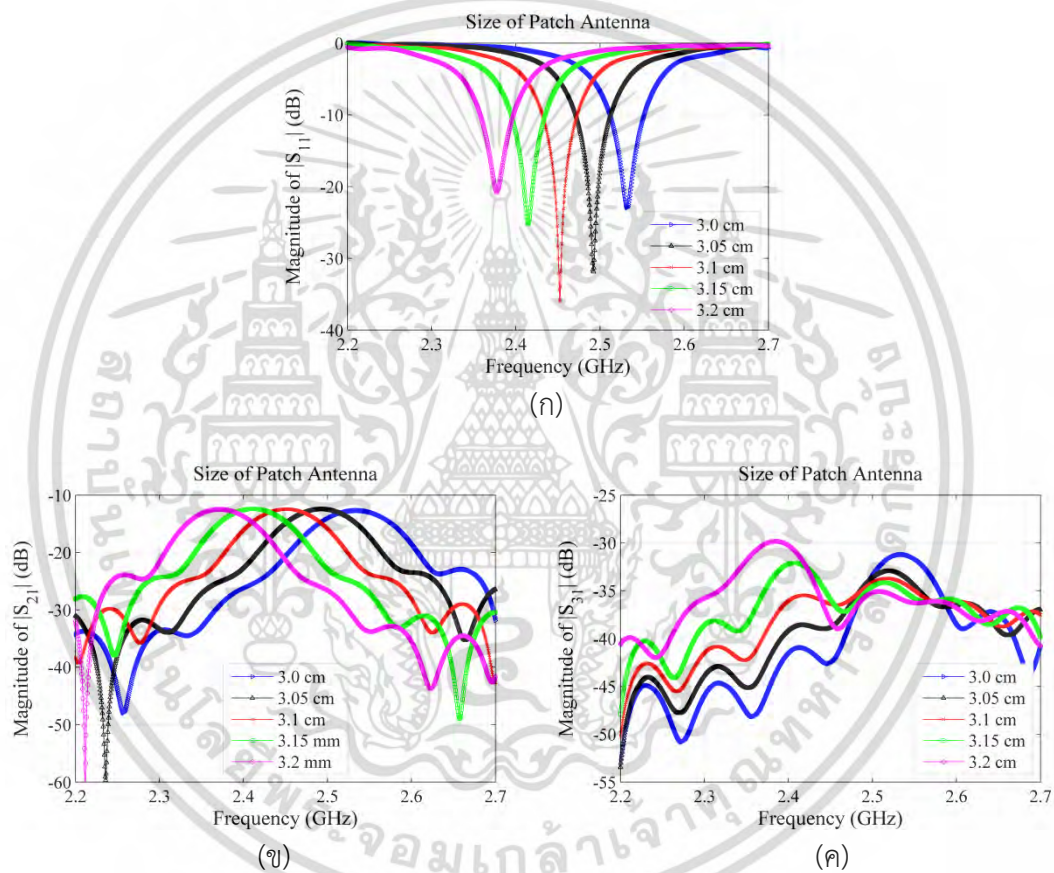
สายอากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสายอากาศแพทช์ที่ออกแบบให้แมตช์กับผลส้มหวาน ทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งในการหาขนาดและจุดบ่อนสัญญาณที่เหมาะสมในการออกแบบสายอากาศกำหนดให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง (Dielectric substrate) เท่ากับ 4.1 คำนวณขนาดของสายอากาศจากความถี่ที่ใช้งาน คือ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ จากการคำนวณจะได้ขนาดของสายอากาศแพทช์มีค่าโดยประมาณคือ 30.2 มิลลิเมตร และคำนวณระยะจุดบ่อนสัญญาณจะได้ระยะจุดบ่อนสัญญาณคือ 7.6 มิลลิเมตร และในขั้นตอนสุดท้ายคือการคำนวณระยะพลังงานที่ถูกแพร่กระจาย (Fringing field) ของสายอากาศแพทช์ จะได้ระยะพลังงานที่ถูกแพร่กระจาย คือประมาณ 10 มิลลิเมตร จากข้อมูลทั้งหมดในการคำนวณข้างต้น ได้ถูกใช้เป็นตัวเริ่มต้นในการจำลองเสมือนจริง โดยใช้โปรแกรมจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสร้างแบบจำลองสายอากาศแพทช์และแบบจำลองส้มเขียวหวานแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แบบจำลองสายอากาศแพทช์และผลส้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ขนาดที่เหมาะสมของสายอากาศ เริ่มจากการปรับขนาดของสายอากาศให้เหมาะสมกับความถี่ใช้งาน โดยสายอากาศที่พัฒนาถูกจำลองในลักษณะสายอากาศ 2 ตัวที่อยู่บนระนาบเดียวกัน และมีระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวที่ 1 กับ สายอากาศตัวที่ 2 ระยะ 1 มิลลิเมตร จำลองสมรรถนะของสายอากาศจากการเลือกปรับขนาดสายอากาศให้เหมาะสมกับการใช้งานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ด้วยการปรับขนาดตั้งแต่ 3.0 - 3.2 เซนติเมตร ซึ่งสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ $|S_{11}|$ $|S_{21}|$ และ $|S_{31}|$ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 จากการสังเกตจะเห็นว่าเมื่อขนาดของสายอากาศเล็กกว่า 3.1 เซนติเมตร สายอากาศจะทำงานได้ดีในช่วงความถี่สูงกว่าความถี่ใช้งาน แต่เมื่อขนาดใหญ่กว่า 3.1 เซนติเมตร จะทำงานที่ความถี่ต่ำกว่า ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของการจำลองกับการคำนวณเบื้องต้น



รูปที่ 3.11 ค่า S พารามิเตอร์เมื่อปรับขนาดของสายอากาศตั้งแต่ 3.0-3.2 เซนติเมตร
(ก) $|S_{11}|$ (ข) $|S_{21}|$ (ค) $|S_{31}|$

การปรับขนาดของสายอากาศข้างต้น แสดงให้เห็นถึงการแมทซ์ในแต่ละช่วงขนาด จากนั้นจึงเลือกช่วงที่เหมาะสมและจำลองการทำงานให้ละเอียดมากขึ้นโดยการปรับขนาดของจุดป้อนสัญญาณ เพื่อหาระยะจุดป้อนสัญญาณที่เหมาะสมเพื่อให้สายอากาศทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ด้วยการปรับระยะห่างจากจุดกึ่งกลางของสายอากาศตั้งแต่ 1.1 - 1.3 เซนติเมตร

จากข้อมูลการปรับขนาดสายอากาศโดยละเอียดและการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ $|S_{21}|$ และ $|S_{31}|$ สรุปขนาดของสายอากาศได้ 3.1 เซนติเมตร และระยะจุดป้อนสัญญาณที่อยู่ห่างจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

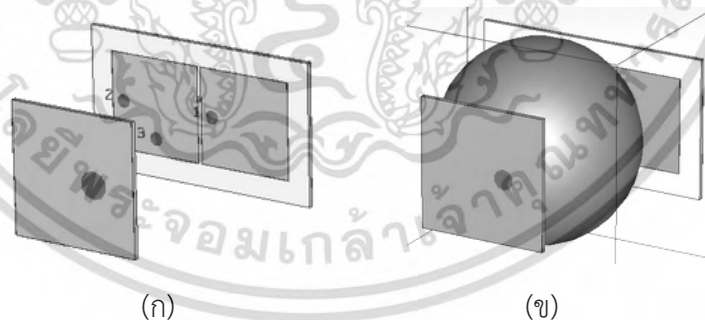
จุดศูนย์กลางของสายอากาศ 1.2 เซนติเมตร เป็นขนาดที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานซึ่งให้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้ ค่า $|S_{11}| = -27.49$ dB ค่า $|S_{21}| = -4.82$ dB และค่า $|S_{31}| = -25.25$ dB ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

3.3.1 การวิเคราะห์หาจำนวนสายอากาศที่เหมาะสม

การพิจารณาถึงจำนวนสายอากาศที่จะใช้สำหรับระบบเซ็นเซอร์จะต้องอยู่บนพื้นฐานของความแม่นยำในการแบ่งระดับรสชาติของส้มเขียวหวาน ซึ่งการวิเคราะห์ คือการแบ่งการจำลองระบบออกเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 ใช้สายอากาศ 3 ตัว กรณีที่ 2 ใช้สายอากาศ 4 ตัว และกรณีที่ 3 ใช้สายอากาศ 5 ตัว จากนั้นทำการจำลองระบบในแต่ละกรณี จากนั้นนำค่า S พารามิเตอร์ทั้งหมดของแต่ละกรณี มาฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแบ่งระดับรสชาติของส้มเขียวหวานในแต่ละกรณี เพื่อหาจำนวนสายอากาศที่เหมาะสม

ในการจำลองการทำงานทั้ง 3 กรณี สายอากาศตัวที่ 1 และตัวที่ 2 อยู่บนระนาบเดียวกัน สายอากาศตัวที่ 1 เป็นสายอากาศส่ง มีจุดป้อนสัญญาณ 1 จุด สายอากาศตัวที่ 2 เป็นสายอากาศรับ ที่ประกอบด้วยจุดรับสัญญาณสองจุด คือ โพลาริเซชันร่วม (Co-polarization) และโพลาริเซชันไขว้ (Cross-polarization) จากนั้นปรับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของส้มเขียวหวานจำลอง ตั้งแต่ส้มหวานจนถึงส้มไม่หวาน คือ $\epsilon_r' = 18$ ถึง $\epsilon_r' = 30$ จากนั้นจึงทำการบันทึกค่า S พารามิเตอร์ของแต่ละกรณี เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบในแต่ละกรณี ตำแหน่งของผลส้มจะอยู่กึ่งกลางระหว่างสายอากาศทั้งหมด และอยู่ในสนามระยะใกล้ของสายอากาศ จึงส่งผลให้การแพร่กระจายจากสายอากาศส่งครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่ผลส้มไปจนถึงสายอากาศรับ

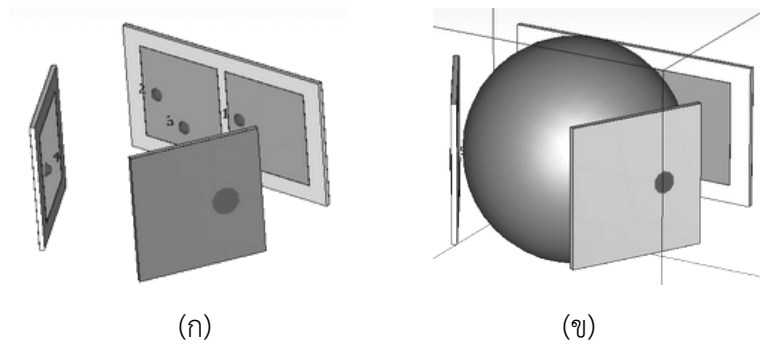
กรณีที่ 1 จำลองสายอากาศ 3 ตัว สายอากาศตัวที่ 3 อยู่ด้านตรงข้ามระหว่างสายอากาศตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยสายอากาศตัวที่ 3 ทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับที่ประกอบด้วยจุดรับสัญญาณหนึ่งจุด และทำหน้าที่เป็นโพลาริเซชันร่วม



รูปที่ 3.12 แบบจำลอง (ก) สายอากาศแพทช์ 3 ตัว (ข) สายอากาศแพทช์ 3 ตัวและผลส้ม

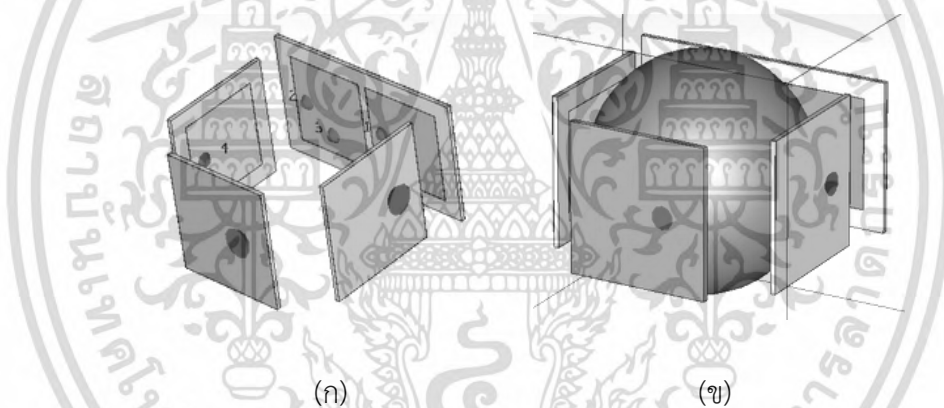
กรณีที่ 2 จำลองสายอากาศ 4 ตัวได้รับการพัฒนาต่อมาจากสายอากาศ 3 ตัว แต่สายอากาศตัวที่ 3 ทำมุมเอียง 45 องศา กับจุดกึ่งกลางระหว่างสายอากาศตัวที่ 1 และ 2 และสำหรับสายอากาศตัวที่ 4 ทำมุมเอียง -45 องศา กับจุดกึ่งกลางระหว่างสายอากาศตัวที่ 1 และ 2 และสายอากาศตัวที่ 3 และ 4 มีจุดรับสัญญาณหนึ่งจุด โดยจุดรับของสายอากาศทั้ง 2 ตัว เป็นโพลาริเซชันร่วม ดังแสดงในรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แบบจำลอง (ก) สายอากาศแพทช์ 4 ตัว (ข) สายอากาศแพทช์ 4 ตัวและผลส้ม

กรณีที่ 3 จำลองสายอากาศ 5 ตัว ซึ่งถูกพัฒนาต่อจากระบบที่ใช้สายอากาศ 4 ตัว ตำแหน่งของสายอากาศตัวที่ 3 และตัวที่ 5 ทำมุมเอียง 90 และ -90 องศา กับสายอากาศตัวที่ 1 และ 2 โดยสายอากาศทั้ง 2 ตัว มีจุดรับสัญญาณ 1 จุด ที่เป็นโพลาริเซชันร่วมกับสายอากาศส่ง และสายอากาศตัวที่ 4 อยู่ด้านตรงข้ามระหว่างสายอากาศตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ซึ่งมีจุดรับสัญญาณ 1 จุด อยู่ในลักษณะโพลาริเซชันร่วม ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แบบจำลอง (ก) สายอากาศแพทช์ 5 ตัว (ข) สายอากาศแพทช์ 5 ตัวและผลส้ม

3.3.2 การทดสอบอัตราความผิดพลาดจากจำนวนสายอากาศ

การสร้างเครื่องมือวัดเพื่อหาความแตกต่างของรสชาติผลไม้ ได้รับการจำลองทั้งหมด 3 แบบ เพื่อหาจำนวนสายอากาศและข้อมูลที่เหมาะสม ในการนำไปใช้สำหรับตัดสินใจเพื่อแบ่งรสชาติของผลไม้ โครงสร้างของสายอากาศทั้งหมด 3 กรณี ในแต่ละกรณีจะแตกต่างกันที่จำนวนอินพุต ที่ใช้สำหรับการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม (ANNs) กรณีที่ 1 ใช้จำนวนอินพุต 4 ตัว คือ $|S_{11}|$ $|S_{21}|$ $|S_{31}|$ และ $|S_{41}|$ และในกรณีที่ 2 ใช้จำนวนอินพุตทั้งหมด 5 อินพุต คือ $|S_{11}|$ $|S_{21}|$ $|S_{31}|$ $|S_{41}|$ และ $|S_{51}|$ และกรณีสุดท้ายคือ $|S_{11}|$ $|S_{21}|$ $|S_{31}|$ $|S_{41}|$ $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$ ใช้จำนวนอินพุตทั้งหมด 6 อินพุต จากการจำลองระบบของสายอากาศทั้ง 3 กรณี ข้อมูลทั้งหมดได้นำมาใช้ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) จำนวนรอบการวนซ้ำ (Loop) อัตราความผิดพลาด (Error rate) ของโครงข่ายประสาทเทียมที่เปรียบเทียบระหว่างคำตอบที่ต้องการกับคำตอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม และอัตราการเรียนรู้ (Learning rate) ซึ่งข้อมูลแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลที่นำมาใช้ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

จำนวนสายอากาศ	อินพุต	ฟังก์ชันถ่ายโอน โนดซ่อนเร้น	ฟังก์ชันถ่ายโอน โนดเอาต์พุต
3	$S_{11}, S_{21}, S_{31}, S_{41}$	PLAN	Pureline
4	$S_{11}, S_{21}, S_{31}, S_{41}, S_{51}$	PLAN	Pureline
5	$S_{11}, S_{21}, S_{31}, S_{41}, S_{51}, S_{61}$	PLAN	Pureline

ค่า S พารามิเตอร์จากการจำลองระบบของสายอากาศถูกกำหนดให้เป็นอินพุตที่ใช้เป็นเลขค่าจริง และค่าตอบที่ต้องการจากระบบของสมการกำหนดให้เป็นเอาต์พุต สำหรับฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียม นอกจากนี้ได้กำหนดตัวแปรสำหรับการฝึกสอน คือ จำนวนโนดอินพุต จำนวนโนดซ่อนเร้น จำนวนโนดเอาต์พุต อัตราการเรียนรู้ และเป้าหมายหรือค่าตอบที่ต้องการ จากนั้นเมื่อฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำเร็จ สิ่งที่ได้รับคือ ค่าถ่วงน้ำหนัก จำนวนรอบการวนซ้ำ และอัตราความผิดพลาด โดยค่าที่ได้จะแตกต่างกันไปในแต่ละกรณี ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบโนดอินพุตเพื่อฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม

โนดอินพุต	โนดซ่อนเร้น	โนดเอาต์พุต	อัตราการเรียนรู้	รอบการวนซ้ำ	อัตราความผิดพลาด
4	6	3	0.05	6,000	10%
5	6	3	0.05	4,500	8%
6	6	3	0.05	3,200	4%

การฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมด้วยข้อมูลของสายอากาศ ทั้ง 3 กรณี แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอัตราความผิดพลาดในแต่ละกรณี โดยเมื่อจำนวนอินพุตเพิ่มมากขึ้น อัตราความผิดพลาดจะลดลง เนื่องจากจำนวนอินพุตที่ใช้ในการฝึกสอนมีเพิ่มมากขึ้นทำให้โครงข่ายประสาทเทียมได้รับการฝึกสอนด้วยข้อมูลที่ครอบคลุม จึงให้ความผิดพลาดลดลง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 การทำซ้ำเพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมในกรณีที่ใช้ 4 อินพุตโนด รอบการวนซ้ำใช้มากกว่าในกรณีที่ใช้ 6 อินพุต เป็นไปตามหลักการของโครงข่ายประสาทเทียม คือเมื่อข้อมูลมีรูปแบบที่ชัดเจน และมีจำนวนเพียงพอสำหรับการเรียนรู้ โครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้โดยใช้เวลาลดลง จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนสายอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้ระบบมีข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์เพื่อตัดสินใจมากขึ้น ส่งผลให้ระบบมีความแม่นยำในการแบ่งระดับความหวานของส้มเขียวหวาน ดังนั้นการสร้างระบบเซ็นเซอร์โดยใช้สายอากาศ 5 ตัว จึงเป็นสิ่งที่เหมาะสม

จากการศึกษาเพื่อหาจำนวนอินพุตที่เหมาะสมสำหรับการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม และในขั้นต่อมาคือการศึกษาเพื่อหาจำนวนโนดซ่อนเร้นที่เหมาะสมสำหรับระบบเซ็นเซอร์ เนื่องจากถ้าจำนวนโนดซ่อนเร้นมากเกินไปจะส่งผลให้ขั้นตอนการออกแบบระบบจริง วงจรที่ออกแบบจะมีความซับซ้อนรวมถึงการใช้ทรัพยากรอย่างสิ้นเปลือง แต่หากใช้จำนวนโนดซ่อนเร้นน้อยเกินไป โครงข่ายประสาทเทียมจะไม่สามารถเรียนรู้ข้อมูลที่นำมาใช้ในการฝึกสอนได้ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบโนดซ่อนเร้นเพื่อฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม

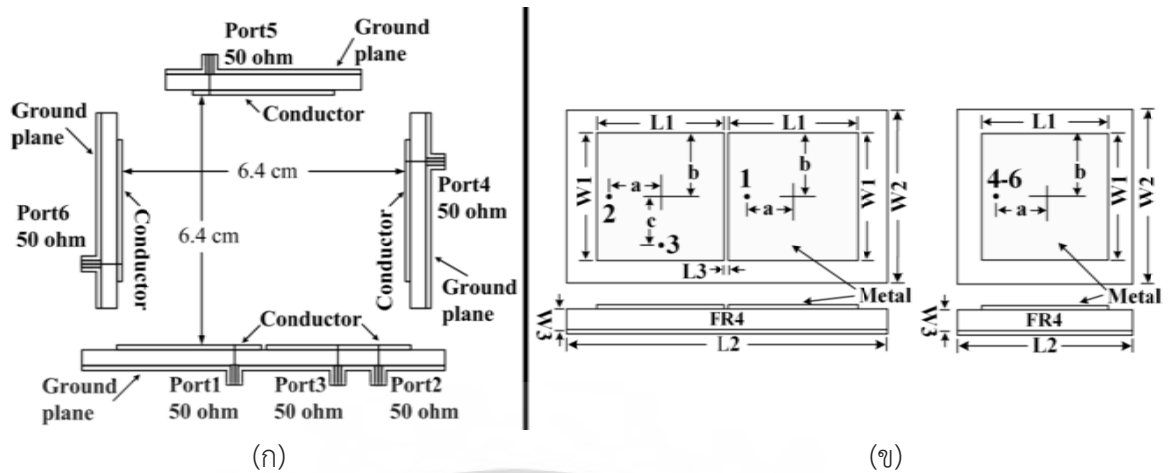
โนดอินพุต	โนดซ่อนเร้น	โนดเอาต์พุต	อัตราการเรียนรู้	รอบการวนซ้ำ	อัตราความผิดพลาด
6	5	3	0.05	6,000	8%
6	6	3	0.05	3,200	4%
6	7	3	0.05	2,000	4%

จากการปรับจำนวนของโนดซ่อนเร้นของโครงข่ายประสาทเทียมตั้งแต่ 5 6 และ 7 โหนด แสดงให้เห็นว่า เมื่อจำนวนโนดซ่อนเร้นน้อยกว่า 6 โหนด การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมใช้เวลานาน และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการเปรียบเทียบคำตอบที่ต้องการกับคำตอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมอยู่ที่ 8% จากนั้นเมื่อเพิ่มจำนวนโนดซ่อนเร้นเป็น 6 โหนด ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นลดลงเหลือ 4% และเมื่อเพิ่มจำนวนโนดซ่อนเร้นเป็น 7 โหนด ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอยู่ที่ 4% เช่นเดิม แต่จำนวนรอบการวนซ้ำเพื่อฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมลดลงเหลือ 2000 รอบ ดังนั้นเพื่อให้การสร้างระบบจริงใช้ทรัพยากรได้อย่างคุ้มค่าที่สุดและมีความแม่นยำ จำนวนโนดซ่อนเร้นที่เหมาะสมคือ 6 โหนดซ่อนเร้น

3.3.3 โครงสร้างและการทำงานของสายอากาศ

จากการวิเคราะห์จำนวนสายอากาศแสดงให้เห็นว่าการใช้สายอากาศ 5 ตัว เหมาะสมสำหรับการนำไปสร้างระบบเซ็นเซอร์ เนื่องจากให้ค่า S พารามิเตอร์ทั้งหมด 6 ตัว คือ $|S_{11}|$ $|S_{21}|$ $|S_{31}|$ $|S_{41}|$ $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$ เพียงพอสำหรับการแบ่งระดับรสชาติของส้มเขียวหวาน

โครงสร้างของสายอากาศคัปเปิลเลอร์แพทช์ คือสายอากาศตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ถูกสร้างขึ้นโดยอยู่บนระนาบกราวด์รวม และวัสดุฐานรองเดียวกัน สายอากาศแพทช์ทั้ง 2 ตัว มีรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งจุดป้อนสัญญาณที่ 1 บนสายอากาศตัวที่ 1 ใช้สำหรับส่งสัญญาณ และจุดป้อนสัญญาณที่ 2 สำหรับรับสัญญาณโพลาริเซชันร่วม และจุดป้อนสัญญาณที่ 3 สำหรับรับสัญญาณโพลาริเซชันไขว้ อยู่บนสายอากาศตัวที่ 2 จุดป้อนสัญญาณที่ 1-3 อยู่บนระนาบเดียวกัน ทำให้สามารถสร้างได้ง่าย สายอากาศแพทช์ตัวที่ 3 4 และ 5 มีขนาดเท่ากัน มีโครงสร้างของสายอากาศเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3.0×3.0 เซนติเมตร วางอยู่บนวัสดุฐานรอง และระนาบกราวด์เท่ากัน คือ 4×4 เซนติเมตร จุดรับสัญญาณของสายอากาศแพทช์ที่ 3 4 และ 5 อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของสายอากาศ 1.1 เซนติเมตร จุดรับสัญญาณที่ 4 บนสายอากาศตัวที่ 3 อยู่ในตำแหน่ง 90 องศาับจุดป้อนสัญญาณที่ 2 และ 3 จุดป้อนสัญญาณที่ 5 บนสายอากาศตัวที่ 4 อยู่ในตำแหน่งที่ตรงข้ามกับจุดป้อนสัญญาณที่ 1 และจุดป้อนสัญญาณที่ 6 บนสายอากาศตัวที่ 5 อยู่ในตำแหน่งด้านที่เหลือ ที่ทำให้โครงสร้างของระบบเซ็นเซอร์มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 3.15 และขนาดของสายอากาศแสดงดังตารางที่ 3.4



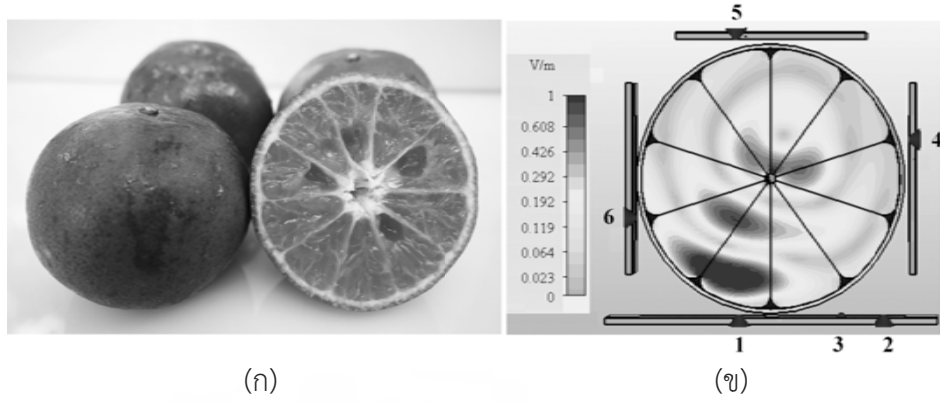
รูปที่ 3.15 โครงสร้างของสายอากาศ (ก) ลักษณะการวางสายอากาศ (ข) ขนาดของสายอากาศ

ตารางที่ 3.4 ขนาดของสายอากาศแพทช์

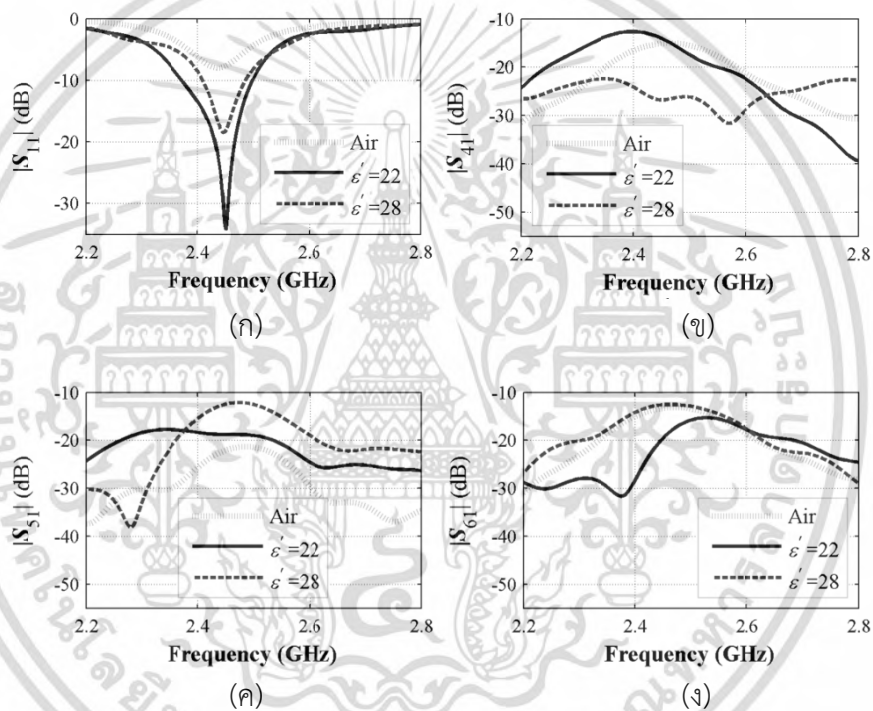
สายอากาศแพทช์(เซนติเมตร)	W1	L1	W2	L2	W3	L3	a	b	c
1	3.1	3.1	4	7.4	1.4	0.1	1.2	1.56	
2	3.1	3.1	4	7.4	1.4	0.1	1.2	1.56	1.2
3-5	3	3	4	4	1.4		1	1.45	

3.4 การจำลองระบบเซ็นเซอร์

ระบบเซ็นเซอร์ประกอบด้วยสายอากาศแพทช์จำนวน 5 ตัว และจุดบ่อนสัญญาณ 6 จุด ระบบเซ็นเซอร์ถูกพัฒนาเพื่อคัดแยกสั้มเขียวหวานจากความหวาน และทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ เปลือกสั้มกำหนดให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') เท่ากับ 15 และตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก (ϵ'') เท่ากับ 7 ซึ่งทั้งสองค่านี้เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดจริงของเปลือกสั้ม และทั้งสองค่านี้ถูกกำหนดให้คงที่ และส่วนของเนื้อสั้มกำหนดให้มีตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกเท่ากับ 7 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดจริงของสั้มและถูกกำหนดให้คงที่ สั้มหวานมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 22 และเนื้อสั้มเขียวหวานประกอบด้วยกลีบบภายในประมาณ 10 กลีบ แสดงดังรูปที่ 3.16 (ก) จากนั้นสร้างแบบจำลองเซ็นเซอร์ด้วยโปรแกรมจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อแสดงให้เห็นถึงสนามไฟฟ้าที่ส่งออกจากสายอากาศแพทช์ พบว่าสนามไฟฟ้ามีความเข้มสูงที่บริเวณใกล้กับสายอากาศและค่อยๆ ลดลงเมื่อระยะห่างเพิ่มมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.16 (ข) และจำลองการทำงานของสายอากาศที่ความถี่ 2.2-2.8 กิกะเฮิร์ตซ์ เพื่อหาผลตอบสนองของสายอากาศแต่ละตัว คือค่า S พารามิเตอร์ ประกอบด้วย $|S_{11}|$ $|S_{41}|$ $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$ โดยที่ $|S_{11}|$ ของสั้มเขียวหวานที่มีรสหวานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ คือ -33.8 dB ส่วนสั้มเขียวหวานที่มีรสชาติไม่หวาน มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกอยู่ที่ 28 และ $|S_{11}|$ มีค่า -18.3 dB แสดงดังรูปที่ 3.17 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพในการคัดแยกสั้มเขียวหวานด้วยความหวานได้



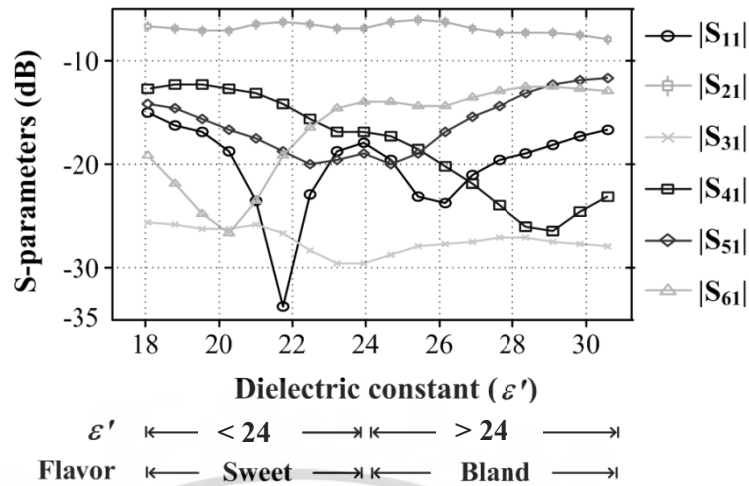
รูปที่ 3.16 ส้มเขียวหวาน (ก) ลักษณะทางกายภาพ (ข) การกระจายของสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ของ S พารามิเตอร์ กับความถี่ (ก) $|S_{11}|$ (ข) $|S_{41}|$ (ค) $|S_{51}|$ และ (ง) $|S_{61}|$

จากทดสอบหาค่าคงที่ไดโอิเล็กทริกเปรียบเทียบกับระดับความหวานของส้มเขียวหวาน พบว่า ค่าคงที่ไดโอิเล็กทริกของผลส้มมีค่าตั้งแต่ 25 ถึง 31 นั้นจัดอยู่ในสมมติฐานที่เป็นส้มไม่หวาน และตั้งแต่ 18 ถึง 24 จัดอยู่ในสมมติฐานที่เป็นส้มหวาน ผลตอบสนองที่ได้จากสายอากาศทั้ง 5 ตัว หรือ S พารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองของส้มเขียวหวานที่หวานและไม่หวาน โดย $|S_{11}|$ $|S_{41}|$ $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$ แปรผันอย่างมีนัยสำคัญกับค่าคงที่ไดโอิเล็กทริกที่เปลี่ยนแปลงไป จึงใช้ค่า S พารามิเตอร์ในการคัดแยก ส้มเขียวหวานจากความหวาน ดังแสดงในรูปที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 การเปลี่ยนแปลงของค่า S พารามิเตอร์เมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 3.5 ค่าการเปลี่ยนแปลงของ S พารามิเตอร์

พารามิเตอร์ S	สูงสุด (เดซิเบล)	ต่ำสุด (เดซิเบล)
$ S_{11} $	-12.47	-33.86
$ S_{21} $	-6.13	-10.62
$ S_{31} $	-25.65	-30.68
$ S_{41} $	-12.35	-35.01
$ S_{51} $	-11.78	-20.05
$ S_{61} $	-12.06	-26.86

ผลการจำลองการทำงานของสายอากาศพบว่าค่าพารามิเตอร์ S นั้นเปลี่ยนแปลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเนื้อส้ม และสายอากาศแต่ละตัว ดังแสดงในตารางที่ 3.5 และผลจากรูปที่ 3.18 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -12.47 เดซิเบล ถึง -33.86 เดซิเบล ซึ่งสามารถสังเกตได้ชัดเจน และแสดงความแตกต่างมากที่สุด จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้วิเคราะห์เพื่อคัดแยกรสชาติของผลส้ม แต่ในส่วนของค่าการเชื่อมต้อรวมของ $|S_{21}|$ และ $|S_{31}|$ แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงน้อยสุด โดยพารามิเตอร์ $|S_{21}|$ เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -6 เดซิเบล ถึง -11 เดซิเบล และพารามิเตอร์ $|S_{31}|$ เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -26 เดซิเบล ถึง -31 เดซิเบล พารามิเตอร์ทั้งสองแสดงการเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจนเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์อื่นๆ ดังนั้นจึงตัดข้อมูลในส่วนของ $|S_{21}|$ และ $|S_{31}|$ ออก เพื่อลดทรัพยากร และความซับซ้อนสำหรับการออกแบบฮาร์ดแวร์ และในค่าการเชื่อมต้อรวมของ $|S_{41}|$ $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$ มีการเปลี่ยนแปลงที่เพียงพอที่สังเกตได้ โดยค่าพารามิเตอร์ $|S_{41}|$ ข้อมูลค่าการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -12 เดซิเบล ถึง -35 เดซิเบล ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงปานกลาง เพื่อให้การคัดแยกมีความแม่นยำขึ้น ข้อมูลจึงได้รับการเก็บไว้ใช้งาน พารามิเตอร์ $|S_{51}|$ มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -12 เดซิเบล ถึง -20 เดซิเบล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสูงเท่ากับพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ แต่มากกว่า $|S_{21}|$ และ $|S_{31}|$ จึงควรเก็บไว้ใช้งานเพื่อเพิ่มความชัดเจนในการตัดสินใจ และพารามิเตอร์ $|S_{61}|$ การเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -12 เดซิเบล ถึง -27 เดซิเบล จัดเป็นความแตกต่างของข้อมูลอยู่ในระดับกลางเช่นเดียวกัน ข้อมูลชุดนี้จึงมีส่วนช่วยในการตัดสินใจคัดแยกส้ม ดังนั้นเพื่อ

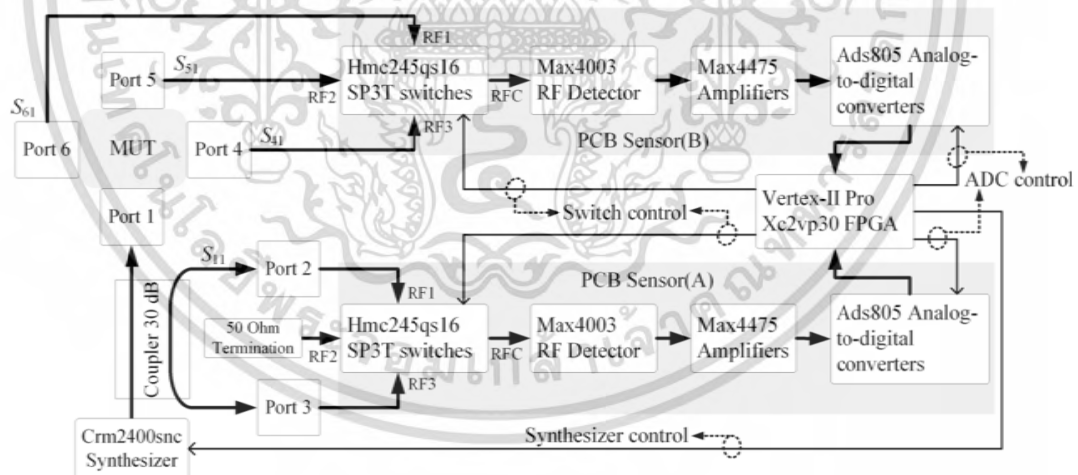
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ใช้งานด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดทรัพยากร และความซับซ้อนแต่ยังคงข้อมูลที่สำคัญเพื่อใช้สำหรับการตัดสินใจในการคัดแยกส้ม ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้งานจริงมีทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ $|S_{11}|$ $|S_{41}|$ $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$

เพื่อแสดงให้เห็นความแตกต่างของค่า S พารามิเตอร์แต่ละตัวที่เปลี่ยนแปลง สามารถหาได้จากกราฟความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของจากกราฟจากตารางที่ 3.4 ดังนี้ $|S_{11}|$ มีค่า 18.73 dB $|S_{21}|$ มีค่า 1.83 dB $|S_{31}|$ มีค่า 4.12 dB $|S_{41}|$ มีค่า 14.31 dB $|S_{51}|$ มีค่า 8.27 dB และ $|S_{61}|$ มีค่า 14.28 dB ซึ่งความแตกต่างของ $|S_{11}|$ $|S_{41}|$ $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$ แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญมากกว่า $|S_{21}|$ และ $|S_{31}|$ จะสังเกตได้ว่า $|S_{31}|$ มีค่าน้อยกว่า $|S_{21}|$ มาก เนื่องจาก $|S_{31}|$ เป็นโพลาริเซชันไขว้

3.5 การออกแบบระบบเซ็นเซอร์

ระบบเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการคัดแยกรสชาติส้มเขียวหวานมีขั้นตอนในการทำงานดังนี้ คือ ผลส้มเขียวหวานจะถูกป้อนเข้าระบบคัดแยกอย่างต่อเนื่อง โดยใช้เวลาคัดแยก 5 วินาทีต่อส้มเขียวหวาน 1 ลูก ดังนั้นในเวลา 1 ชั่วโมง สามารถคัดแยกส้มเขียวหวานได้ 720 ลูก และเงื่อนไขหรือขอบเขตของระบบจะรองรับขนาดของผลส้มเขียวหวานโดยประมาณ 5.9-6.1 เซนติเมตร [58] ดังนั้นเพื่อให้การทำงานของระบบเซ็นเซอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต้องมีระบบการคัดแยกขนาดก่อนทำการตรวจวิเคราะห์ ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของส้มเขียวหวานที่ใช้ ต้องมีขนาดเฉลี่ย 6 เซนติเมตร ระบบเซ็นเซอร์นี้ใช้การส่งสัญญาณจากสายอากาศส่ง ทะลุผ่านส้มเขียวหวานไปยังสายอากาศรับ ทำงานที่ย่านความถี่ไมโครเวฟ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ และข้อมูลที่ได้จากการวัดถูกนำมาวิเคราะห์ระดับความหวาน ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อให้การตัดสินใจมีความแม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 3.19 ระบบเซ็นเซอร์ที่นำเสนอ

การออกแบบระบบเซ็นเซอร์สำหรับประมวลผลเพื่อตัดสินใจประกอบด้วยหลายส่วนได้แก่ โมดูลกำเนิดความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณ คัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง (Directional coupler) ทำหน้าที่หาค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ สวิตช์สัญญาณความถี่วิทยุ (RF Switch) ทำหน้าที่รับพารามิเตอร์ $|S_{41}|$ $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$ จากสายอากาศ อุปกรณ์รับสัญญาณความถี่วิทยุและเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ทำหน้าที่ตรวจจับกำลังงาน และวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

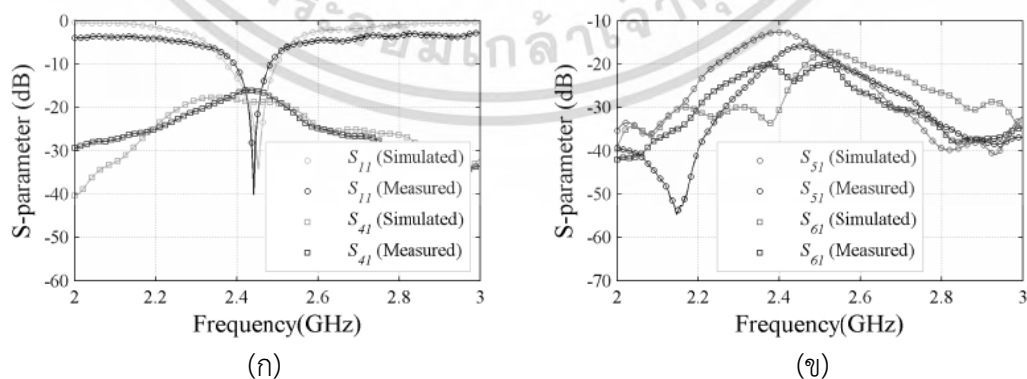
ขนาด 12 บิต ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเป็นสัญญาณเชิงดิจิทัล เพื่อใช้ในการประมวลผลของอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Field programmable gate array: FPGA) ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ก่อนการสร้างระบบจริง อุปกรณ์แต่ละชิ้นต้องถูกนำมาออกแบบและทดสอบจริง ซึ่งประกอบด้วย โมดูลกำเนิดความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ คัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง สวิตช์สัญญาณ ความถี่วิทยุ อุปกรณ์รับสัญญาณความถี่วิทยุและเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรง วงจรขยายอินสตรูเมนต์ และวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 12 บิต

3.5.1 สายอากาศแพทช์ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

องค์ประกอบหลักของระบบเซ็นเซอร์ คือ สายอากาศแพทช์ทั้ง 5 ตัว ที่ทุกตัวทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ถูกนำมาใช้เพื่อรับส่งสัญญาณ มีลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ขนาดและจุดป้อนสัญญาณของสายอากาศที่สร้างขึ้นทั้ง 5 ตัวแสดงดังตารางที่ 3.4

รูปที่ 3.20 สายอากาศแพทช์ตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 5

หลังจากสร้างสายอากาศแพทช์ ขั้นตอนต่อมาคือการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศโดยการวัดค่า S พารามิเตอร์ $|S_{11}|$ $|S_{41}|$ $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$ เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับการจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.21

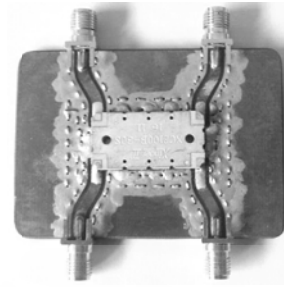


รูปที่ 3.21 ค่า S พารามิเตอร์จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

(ก) $|S_{11}|$ และ $|S_{41}|$ (ข) $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวตรวจจับกำลังงาน เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์สำหรับคัดแยกสั้มเขียวหวาน และสุดท้ายขาที่ 4 ถูกต่อ โหลดปลายสาย 50 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 คัปเปอเรอร์แบบมีทิศทาง

3.5.4 สวิตช์สัญญาณความถี่วิทยุ

ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ทั้งหมดคือ S พารามิเตอร์ จากสายอากาศทั้ง 5 ตัว ดังนั้นการรับ ข้อมูลจากสายอากาศจึงต้องใช้สวิตช์ (Hittite: HMC245QS16) 3 ทาง [61] ในการควบคุม สำหรับการขอมูล S พารามิเตอร์ ตั้งแต่ $|S_{41}|$ ที่ใช้สัญญาณดิจิทัลในการควบคุมคือ $A = 1$ และ $B = 1$ ต่อมาคือ $|S_{51}|$ ใช้สัญญาณดิจิทัลในการควบคุมคือ $A = 1$ และ $B = 0$ สุดท้ายคือ $|S_{61}|$ ใช้สัญญาณ ดิจิตอลควบคุม คือ $A = 0$ และ $B = 1$ โดยข้อมูลได้รับการเรียงลำดับเพื่อนำมาตรวจจับพลังงานใน ขั้นตอนต่อไป

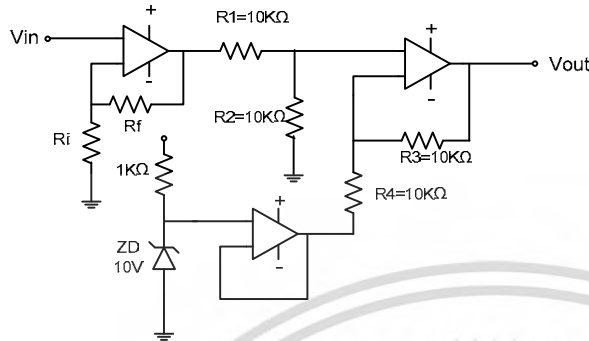
3.5.5 อุปกรณ์รับสัญญาณความถี่วิทยุและเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

เพื่อวิเคราะห์และตัดสินใจในการคัดแยกผลไม่ต้องเปลี่ยนสัญญาณความถี่วิทยุเป็น สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อนำไปใช้งานต่อสำหรับการวิเคราะห์ โดยข้อมูลก่อนหน้าจากสวิตช์ 3 ทาง และคัปเปอเรอร์แบบมีทิศทาง ได้รับมาเพื่อทำงานต่อโดยอุปกรณ์ประกอบด้วยตัวขยายสัญญาณ ทรานสดิวเซอร์ (Low noise amplifiers: MAX2641) ตัวตรวจจับกำลังงาน (RF power detector: MAX4003) [62] และบัฟเฟอร์แอนะล็อกแปลงเป็นดิจิทัล (ADC Buffer: MAX4475) [63] โดยตัว ขยายสัญญาณทรานสดิวเซอร์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณความถี่วิทยุที่ได้รับจากสายอากาศและกรองสัญญาณ ทรานสดิวเซอร์ก่อนส่งสัญญาณความถี่วิทยุให้ตัวตรวจจับกำลังงาน ขั้นตอนต่อไปคือตัวตรวจจับกำลังงานทำ หน้าทีรับสัญญาณความถี่วิทยุที่อยู่ในช่วง -45 ถึง 0 dBm เพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตอยู่ในช่วงกว้าง 0.8 ถึง 1.2 โวลต์ ขั้นตอนสุดท้ายคือ วงจรขยายอินสตรูเมนต์ (Instrument amplifier) ทำหน้าที่ขยายแรงดันไฟฟ้าในช่วงที่ต้องการให้กว้างขึ้นเพื่อให้เห็นการ เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนก่อนนำไปใช้สำหรับวงจรแอนะล็อกแปลงเป็นดิจิทัล (Analog-To-Digital Converter: ADC)

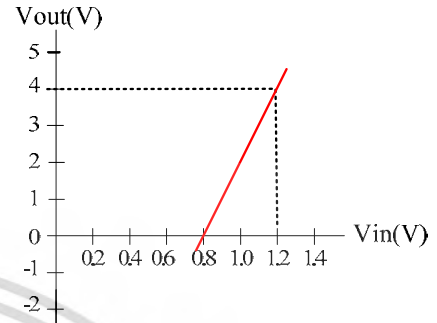
3.5.6 วงจรขยายอินสตรูเมนต์

ความแตกต่างของกำลังงานที่ได้จากตัวตรวจจับกำลังงานของการวัดสั้มเขียวหวาน กำลังงาน ที่ได้มีความแตกต่างกันในช่วงแคบๆ ไม่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนคือ สัญญาณต่ำสุดที่วัดได้อยู่ ที่ประมาณ 0.8 โวลต์ และแรงดันสูงสุดที่วัดได้อยู่ที่ประมาณ 1.2 โวลต์ ซึ่งแรงดันในช่วงนี้จะถูกนำมา ขยายโดยใช้วงจรขยายอินสตรูเมนต์ ดังแสดงในรูป 3.25 (ก) ซึ่งการทำงานคือเมื่อรับสัญญาณต่ำสุด เข้ามาคือ 0.8 โวลต์ สัญญาณจะถูกกดให้เป็น 0 โวลต์ และเมื่อแรงดันขาเข้าเพิ่มขึ้นแรงดันขาออก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถูกขยายอย่างเป็นเชิงเส้น และเมื่อถึงค่าสูงของแรงดันขาเข้าคือ 1.2 โวลต์ แรงดันขาออกก็ถูกขยายเต็มสเกลคือ 5 โวลต์ ดังแสดงในการรูป 3.25 (ข) ซึ่งเท่ากับช่วงกว้างของแรงขาเข้าของวงจรแอนะล็อกแปลงเป็นดิจิตอลคือ 0 - 4 โวลต์



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.25 วงจรขยายอินสตรูเมนต์ (ก) อุปกรณ์ของวงจรขยาย (ข) กราฟแสดงผลการขยายสัญญาณ

3.5.7 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลขนาด 12 บิต

การรับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงและเปลี่ยนเป็นสัญญาณเชิงดิจิตอล การแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเป็นสัญญาณเชิงดิจิตอลทั้งหมด 12 บิต ทำได้โดยใช้ตัวแอนะล็อกแปลงเป็นดิจิตอล (Analog-To-Digital Converter: ADS8506) [64] ซึ่งสัญญาณอินพุต อยู่ในช่วง 0 ถึง 4 โวลต์ ซึ่งใช้สัญญาณควบคุมที่ใช้คือ R/C และ BYTE จากข้อมูลที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกจะนำไปวิเคราะห์และประมวลผลด้วยอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (FPGA) รุ่น Xilinx Virtex-II Pro XC2VP30 [65] และในส่วนของการตัดสินใจ โครงข่ายประสาทเทียมถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเพื่อให้ความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น

3.6 การสร้างระบบเซ็นเซอร์และการประมวลผล

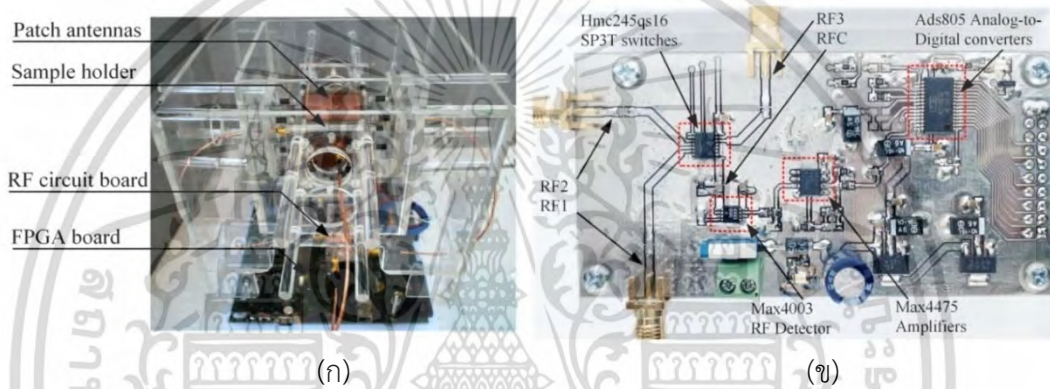
การทำงานของระบบเซ็นเซอร์ประกอบด้วย อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณทำหน้าที่สร้างสัญญาณและส่งออกด้วยสายอากาศส่ง ผ่านวัตถุไปยังสายอากาศรับที่ทำหน้าที่รับสัญญาณ จากนั้นสัญญาณจะถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงานและประมวลผลเพื่อตัดสินใจด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

3.6.1 การสร้างระบบเซ็นเซอร์

องค์ประกอบหลักของระบบเซ็นเซอร์ คือ อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ คัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง อุปกรณ์สวิตซ์ความถี่ วงจรตรวจจับกำลังงาน วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ขนาด 12 บิต และอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ ซึ่งอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณ CRM2400SNC ประกอบด้วย วงจรกำเนิดความถี่ควบคุมด้วยแรงดัน NRF2401AG และเฟสล็อกลูป ซึ่งสร้างสัญญาณความถี่ 2.4-2.5 กิกะเฮิร์ตซ์ สัญญาณเอาต์พุตจากอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณนี้ จะควบคุมได้ด้วยสัญญาณนาฬิกาความถี่สูงสุด 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ประกอบด้วยข้อมูลที่ใช้ควบคุมความถี่ขนาด 144 บิต CE CS และ PWR_UP เพื่อสร้างสัญญาณความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ กำลังงาน 0 เดซิเบลมิลลิวัตต์ (Nordic semiconductor Norway) คัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง XC2100 B-30 S เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อวัดและคำนวณหาค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพทช์ตัวส่ง รวมถึงการเชื่อมต่อของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ของเอกสารนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ อยู่ที่ 30 เดซิเบล อุปกรณ์สวิตซ์ความถี่ HMC245QS16 จากบริษัท Hittite Microwave Corporation (Chelmsford, MA, USA) ใช้สำหรับเลือกอินพุต คือ S พารามิเตอร์ ประกอบด้วย $|S_{11}|$ $|S_{41}|$ $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$ S พารามิเตอร์ที่ถูกเลือกนี้ จะถูกแปลงจากสัญญาณความถี่เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับกำลังงาน MAX4003 (Maxim Integrated, CA USA) จากนั้นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกขยายด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่มีการรบกวนต่ำ MAX4475 (Maxim Integrated, CA USA) ก่อนทำการแปลงจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ด้วยวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่มีความเร็วสูง ADS805 โดยช่วงกว้างของอินพุตของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล คือ 0 - 4 โวลต์ หลังจากนั้นเอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบขนานขนาด 12 บิต (Texas Instrument, USA) และใช้อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ เพื่อควบคุมการทำงานทั้งหมดของระบบ และการตัดสินใจ ดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ระบบเซ็นเซอร์ไมโครเวฟ (ก) อุปกรณ์เซ็นเซอร์ไมโครเวฟต้นแบบ (ข) แผงวงจรความถี่สูง (RF circuit board)

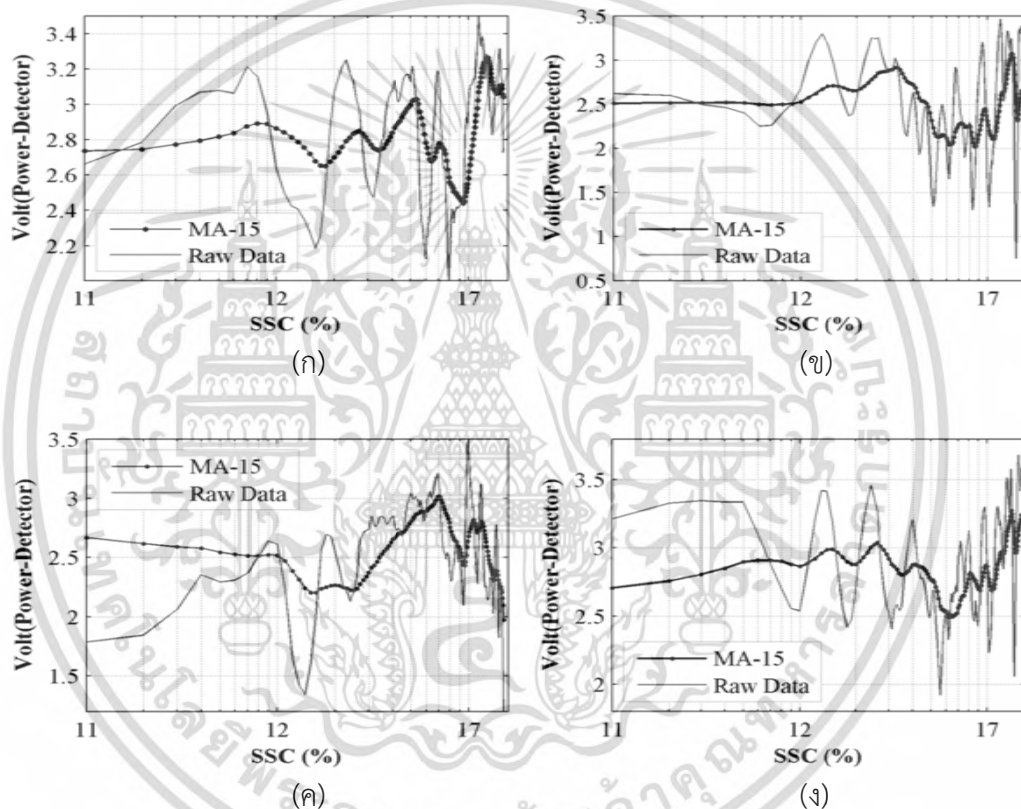
สัญญาณ $|S_{11}|$ $|S_{41}|$ $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$ ที่ส่งมาจากสายอากาศแพทช์ จะถูกรับโดยอุปกรณ์สวิตซ์ความถี่ ก่อนที่จะถูกส่งไปแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรตรวจจับกำลังงาน จากนั้นจะถูกขยายด้วยวงจรขยายสัญญาณแล้วส่งต่อไปยังวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล สัญญาณของ S พารามิเตอร์จะถูกประมวลผลด้วยเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น (Multilayer perceptron: MLP) ของโครงข่ายประสาทเทียม ที่ถูกสร้างอยู่บนอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้เพื่อใช้สำหรับคัดแยกส้มเขียวหวานด้วยความหวาน

3.6.2 โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ (Back propagation) สามารถเรียนรู้ข้อมูลในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น แต่ไม่สามารถเรียนรู้จากข้อมูลที่ไม่มีรูปแบบชัดเจนหรือมีความซับซ้อนสูง ดังนั้นการเตรียมข้อมูลให้เหมาะสม ก่อนนำมาฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจึงมีความจำเป็น การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อคัดแยกรสชาติของส้มเขียวหวานจึงต้องมีการจัดการข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ (Pre-processing) เนื่องจากข้อมูลดิบมีความผันผวน ดังนั้นจึงใช้ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving average: MA) มาใช้กรองข้อมูล ในขั้นตอนของการจัดการข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงจากการจัดการข้อมูลก่อนการวิเคราะห์นี้ จะถูกมาใช้ฝึกสอนโครงข่าย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสาทเทียมเพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนัก (Weights) ระบบที่นำเสนอถูกพัฒนาให้มีความสามารถในการคัดแยกรสชาติของส้มเขียวหวาน โดยให้เรียนรู้และทดสอบจากส้มเขียวหวานกลุ่ม ข (150 ผล) โดยส้มเขียวหวานกลุ่ม ข ถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 75 ผล โดยส้มกลุ่มแรก (75 ผล) ถูกใช้เพื่อฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อให้รู้ถึงคุณลักษณะของส้มที่รสชาติแตกต่างกัน ก่อนนำไปคัดแยกส้มเขียวหวาน และส้มเขียวหวานกลุ่มที่สอง (75 ผล) ถูกใช้เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบ เซ็นเซอร์ที่นำเสนอ โดยส้ม 75 ผล กลุ่มแรกจะถูกจัดการข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ด้วยตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ ซึ่งช่วงความกว้างของหน้าต่างที่เหมาะสมคือ 15 จุด ค่า S พารามิเตอร์ผ่านตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่และไม่ผ่านตัวกรอง แสดงในรูปที่ 3.27 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อข้อมูลผ่านตัวกรอง ข้อมูลจะมีความชัดเจนมากขึ้น แต่ยังคงลักษณะเฉพาะของข้อมูลเดิม



รูป 3.27 ค่าความสัมพันธ์ของปริมาณความหวานกับแรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับกำลังงาน และแรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับกำลังงานที่ผ่านค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของ (ก) $|S_{11}|$ (ข) $|S_{41}|$ (ค) $|S_{51}|$ และ (ง) $|S_{61}|$.

เป็นที่น่าสังเกตว่าผลที่ได้จากการวัดจริงจะแตกต่างจากผลการจำลอง เนื่องจากผลการจำลองเป็นผลที่ได้มาจากแบบจำลองส้มเขียวหวานที่มีลักษณะกลม สมส่วนและสมมาตร แต่สำหรับผลที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 3.27 ส้มเขียวหวานที่นำมาใช้ทดลองทั้ง 75 ผล ลักษณะของส้มจะประกอบไปด้วย รูปทรงที่แตกต่างกัน ขนาดที่ไม่เท่ากัน เปลือกที่ไม่เรียบสม่ำเสมอ ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบและสายอากาศแพทช์จึงให้ผลที่แตกต่างจากการจำลอง เนื่องจากเงื่อนไขและสภาพแวดล้อมระหว่างการจำลองและการทดลองแตกต่างกัน ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดลองจึงมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความความผันผวนค่อนข้างมากในรูปที่ 3.27 แสดงให้เห็นถึงว่าเงื่อนไขของการทดลอง มีความแตกต่างจากการจำลอง

ดังนั้นการนำค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ ที่ขนาดความกว้างของหน้าต่าง 15 จุด เข้ามาแก้ไขความผันผวนที่เกิดขึ้นจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม เนื่องจากข้อมูลที่ผ่านการกรองจะมีรูปแบบที่ชัดเจนขึ้น แต่ยังคงลักษณะหรือนัยสำคัญของข้อมูลไว้เช่นเดิม เมื่อข้อมูลมีรูปแบบที่ชัดเจนการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจึงสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งลักษณะเฉพาะที่สำคัญของข้อมูลที่ยังคงแฝงอยู่ในข้อมูลนั้นๆ จะเป็นสิ่งที่ใช้แบ่งแยกความแตกต่างระหว่างส้มเขียวหวานไม่หวานกับส้มเขียวหวานหวานออกจากกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเลือกขนาดความกว้างของหน้าต่างของค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ เป็นสิ่งสำคัญเนื่องจาก ถ้าขนาดของความกว้างของหน้าต่างน้อยเกินไปจะส่งผลให้ข้อมูลยังคงผันผวนอยู่เช่นเดิม ทำให้ไม่สามารถฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมให้มีประสิทธิภาพ แต่ถ้าเลือกขนาดของความกว้างของหน้าต่างมากเกินไป ข้อมูลจะสูญเสียลักษณะหรือนัยสำคัญของข้อมูลเดิม จะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการสอนแล้ว ไม่สามารถคัดแยกรสชาติของส้มเขียวหวานได้เนื่องจากขาดลักษณะเฉพาะของความแตกต่างระหว่างส้มหวานกับส้มไม่หวาน จากการทดลองปรับเปลี่ยนขนาดของความกว้างของหน้าต่างจาก 5 ถึง 25 จุด กับข้อมูลที่ใช้ฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมจำนวนจุดของความกว้างของหน้าต่างที่เหมาะสมที่สุดคือ 15 จุด ดังนั้นข้อมูลพารามิเตอร์ S ทั้งหมด จะผ่านการกรองด้วยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ทั้งหมด 15 จุด ก่อนที่จะให้ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมเข้ามาเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลก่อนที่จะตัดสินใจในการคัดแยกรสชาติของส้มเขียวหวาน โครงสร้างส่วนหนึ่งที่สำคัญของโครงข่ายประสาทเทียมคือ โหนดซ่อนเร้น เนื่องจากจำนวนโหนดของโหนดซ่อนเร้น เป็นตัวแปรสำคัญในการตัดสินใจของระบบโครงข่ายประสาทเทียม ดังนั้นจึงวิเคราะห์เพื่อหาจำนวนโหนดซ่อนเร้นน้อยที่สุด แต่ยังคงมีความสามารถในการเรียนรู้ และใช้จำนวนการวนซ้ำในขั้นตอนการฝึกสอนน้อย โครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยนี้ใช้อัตราการเรียนรู้ (Learning rate) 0.05 และมีจำนวนอินพุตโหนด 4 อินพุต โดยลักษณะอินพุตที่รับมาเป็นข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของตัวเลขดีจิตอลฐานสอง (2 's complement) และวิเคราะห์จำนวนของโหนดซ่อนเร้นเริ่มจาก 2 จนถึง 12 โหนด เพื่อหาจำนวนโหนดซ่อนเร้นที่เหมาะสมที่สุด ผลที่ได้คือ 6 โหนด ซึ่งหากจำนวนโหนดซ่อนเร้นน้อยเกินไปจะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมไม่สามารถเรียนรู้ได้หรือเรียนรู้ได้ช้า และหากจำนวนโหนดซ่อนเร้นมากเกินไปจะทำให้ต้องใช้ทรัพยากรมากเกินความจำเป็น จำนวนโหนดเอาต์พุต 3 โหนด แบ่งออกเป็นโหนดละ 1 บิต ในลักษณะตัวเลขฐานสอง คือ 0 และ 1 ทำให้สามารถแบ่งระดับความหวานแบ่งออกเป็น 8 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.6

โครงข่ายประสาทเทียมสามารถวิเคราะห์ระดับความหวานของส้มเขียวหวานจากปริมาณความหวานของส้มเขียวหวาน ซึ่งปริมาณความหวานนี้สามารถวัดได้จากบริกรีเฟคโตมิเตอร์ (Brix refractometer) แสดงอยู่ในรูปแบบของเลขจำนวนจริงตั้งแต่ 11 ถึง 18 ที่ปริมาณความหวาน 11 หมายถึงส้มเขียวหวานที่เริ่มมีรสชาติหวาน และที่ปริมาณความหวาน 18 หมายถึงส้มเขียวหวานที่มีรสชาติหวานมาก ซึ่งระดับความหวานคือปริมาณความหวานของส้มเขียวหวานกลุ่ม ข กลุ่มแรกทั้งหมด 75 ลูก การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมกำหนดให้อินพุตคือ $|S_{11}|$ $|S_{41}|$ $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$ และเป้าหมายที่ต้องการ (Target) คือ ระดับความหวานของส้มเขียวหวานในช่วง 11 – 18 และเมื่อ

ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยข้อมูลของส้มเขียวหวานกลุ่ม ข กลุ่มแรก จำนวน 75 ลูก จะได้ค่าถ่วงน้ำหนักที่นำไปใช้ในการตัดสินใจ

ตารางที่ 3.6 ฟังก์ชันการจับคู่ (Mapping function) ของเอาต์พุต

โนดเอาต์พุต			ระดับความหวาน	ปริมาณความหวาน (SSC)
โนดที่ 2	โนดที่ 1	โนดที่ 0		
0	0	0	ระดับ 0	11
0	0	1	ระดับ 1	12
0	1	0	ระดับ 2	13
0	1	1	ระดับ 3	14
1	0	0	ระดับ 4	15
1	0	1	ระดับ 5	16
1	1	0	ระดับ 6	17
1	1	1	ระดับ 7	18

ค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้จากการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมถูกแปลงจากเลขจำนวนจริงเป็นเลขฐานสอง แบบจุดคงที่ (Fixed point) เพื่อพัฒนาลงบนอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ อัตราการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมถูกจำลองตั้งแต่ 0.001 0.01 0.05 และ 0.1 เพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสม สำหรับระบบโครงข่ายประสาทเทียมที่ถูกสร้างเพื่อใช้ในการคัดแยกรสชาติของส้มเขียวหวาน อัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสมที่สุดของการเรียนรู้ของระบบคือ 0.05 โดยใช้ฟังก์ชันการกระตุ้นแบบ PLAN (Piecewise linear approximation of non-linear function) เพื่อลดความซับซ้อนและลดทรัพยากรที่ต้องใช้ [66]

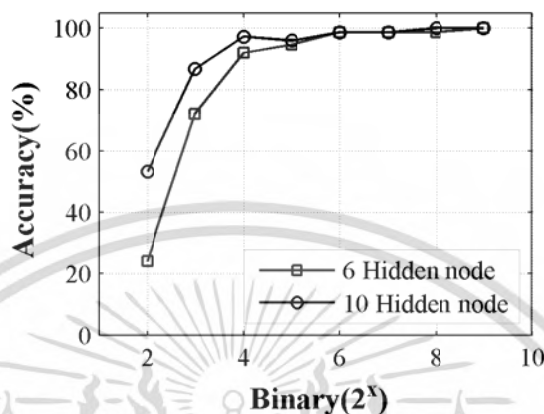
ตารางที่ 3.7 ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับการสร้างวงจรบนอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้

	-8.023	12.7895	-11.6201	-7.0677	-8.8819	-0.2776
w_i	11.845	6.2171	4.2551	3.7701	0.8843	3.3974
	-4.3127	-0.2983	-6.0838	-0.782	-0.3561	-7.1234
	-3.3713	-12.4781	9.1905	2.3259	10.8852	5.3363
	-5.1454	-10.3177	0.6334	-10.4476	10.4782	3.0847
w_j	4.0409	6.1865	9.963	0.5947	-14.5397	2.6457
	-14.5652	9.2816	-6.9323	7.9623	-8.1091	8.2647
θ_j	-2.007	4.5649	-3.4111	-3.2159	-4.4731	-0.3007
θ_k	-4.4512	-0.1921	4.3915			

3.6.3 อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้

ข้อมูลของส้มเขียวหวานกลุ่ม ข กลุ่มแรกถูกนำมาฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนตัวในการประมวลผล ค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้จากการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โนดซ่อนเร้นถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบเซ็นเซอร์ และพัฒนาเป็นวงจรบนอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ นอกจากนี้จำนวนของบิตที่ใช้แทนตัวเลขจำนวนจริง ถูกนำมาทดสอบตั้งแต่ 2-9 บิต เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการแทนค่าบิตข้อมูลมากที่สุด จำนวนบิตที่เหมาะสมคือ 9 บิต สำหรับ 6 โนดซ่อนเร้น และ 10 โนดซ่อนเร้น ดังแสดงในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความแม่นยำและจำนวนของบิต ที่โนดซ่อนเร้น 6 โนดและ 10 โนด

ด้วยเหตุนี้จึงเลือกจำนวนบิต 9 บิต ซึ่งเหมาะสมกับโนดซ่อนเร้นจำนวน 6 โนด ภาษาบรรยายอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ (HDL: Hardware description language) วีเอสไอเอสไอ ถูกนำมาใช้เพื่อเขียนบนอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ และทรัพยากรที่ใช้ทั้งหมด คือ สไลซ์ฟลิปฟลอป (Slice flip flop) จำนวน 387 ตัว ตารางอ้างอิง (Lookup table) 4 อินพุตจำนวน 310 ตัว และออกคิวไปสไลด์ (Occupied slice) จำนวน 274 ตัว ของอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้รุ่น vertex II Pro ความถี่สูงสุดที่ทำงานได้ของวงจรโครงข่ายประสาทเทียมคือ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ และเมื่อโครงข่ายประสาทเทียมทำงานร่วมกับระบบเซ็นเซอร์ ความถี่สูงสุดที่สามารถทำงานได้ของระบบ คือ 5.8 เมกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้นระบบเซ็นเซอร์ที่นำเสนอนี้ใช้ทรัพยากรน้อย ไม่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพสูง

3.7 ผลการทดสอบ

3.7.1 การปรับเทียบ

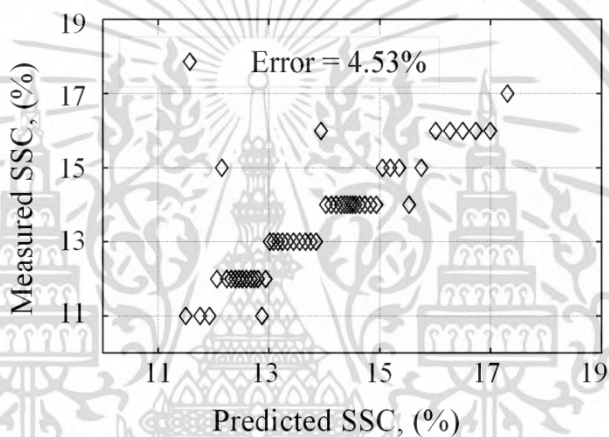
สัญญาณเชื่อมต่อกับระบบเซ็นเซอร์มีความแตกต่างจากสัญญาณเชื่อมต่อของการจำลอง ดังนั้นจึงต้องมีการสอบเทียบระบบก่อนที่จะนำระบบไปใช้งานจริง ขั้นตอนการปรับเทียบเริ่มจากหาค่า S พารามิเตอร์ $|S_{11}|$ $|S_{41}|$ $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$ จากการจำลองของระบบที่ไม่มีผลสัมฤทธิ์ ได้ค่า $|S_{11}| = 0.4113$ ค่า $|S_{41}| = 0.1757$ ค่า $|S_{51}| = 0.0786$ และค่า $|S_{61}| = 0.2157$ ซึ่งค่าที่ได้นี้สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับผลที่ได้จากทดสอบระบบจริงผ่านอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงาน ค่าที่ได้คือ ค่า $|S_{11}| = 0.3441$ ค่า $|S_{41}| = 0.0894$ ค่า $|S_{51}| = 0.0521$ และค่า $|S_{61}| = 0.0908$

ตัวประกอบการปรับเทียบ (Calibration factor) เป็นปัจจัยที่สำคัญในการปรับเทียบ ซึ่งค่าคงที่ปรับเทียบถูกคำนวณจากอัตราส่วนของค่า S พารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองเทียบกับค่า S พารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริง ค่าคงที่ปรับเทียบจะถูกนำมาใช้คูณกับสัญญาณที่วัดได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส้มเขียวหวาน เพื่อให้ระบบเซ็นเซอร์มีความเที่ยงตรง ค่าคงที่สอบเทียบที่นำมาใช้ในระบบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นมีขนาด 1.1953 1.9553 1.5086 และ 2.3756

หลังจากการปรับเทียบแล้ว นำส้มเขียวหวานกลุ่ม ข จำนวน 75 ลูก กลุ่ม 2 มาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพ โดยคุณสมบัติทางไฟฟ้า คือ พารามิเตอร์ $|S_{11}|$ $|S_{41}|$ $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$ ของส้มเขียวหวาน ซึ่งวัดด้วยระบบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้น คุณสมบัติทางเคมีคือปริมาณความหวานวัดโดยใช้ OPTK บริกรีแฟรคโตมิเตอร์ (Brix refractometer) แบบพกพา และคุณสมบัติทางกายภาพของส้มเขียวหวาน คือ การวัดขนาดของผลส้ม ค่าปริมาณความหวานที่ทำนายจากระบบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นของส้มเขียวหวานทั้งเปลือกและค่าปริมาณหวานที่วัดได้จากน้ำส้มด้วยบริกรีแฟรคโตมิเตอร์ อยู่ในรูปแบบของเลขจำนวนนับ คือ 11-18 จากการทำนายและการวัดค่าปริมาณความหวานมีความสอดคล้องกันอย่างชัดเจน รวมถึงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นน้อยกว่า 5% ดังแสดงในรูปที่ 3.29

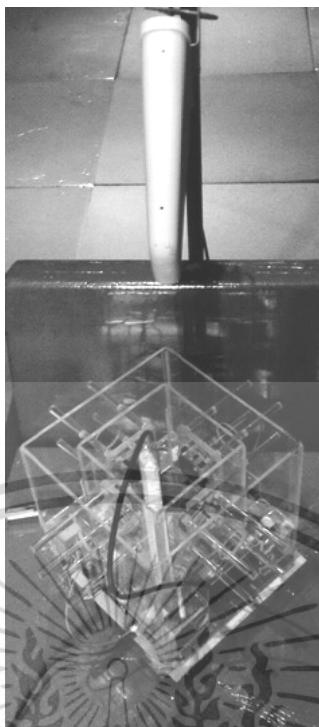


รูปที่ 3.29 ผลจากการทำนายและทดสอบปริมาณความหวาน

3.7.2 ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนและอุณหภูมิ

ระบบเซ็นเซอร์ทำงานในย่านความถี่เสริ (ISM band) จึงไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนที่มีอยู่ทั่วไปได้ อุณหภูมิที่สูงเป็นคุณลักษณะที่ปกติของพื้นที่ในเขตร้อน ดังนั้นในการทดสอบระบบเซ็นเซอร์ จึงต้องคำนึงถึงผลจากอุณหภูมิ ปัญหาจากสัญญาณรบกวนและอุณหภูมิจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงเพื่อนำมาปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบเซ็นเซอร์

การทดลองเพื่อทดสอบภูมิคุ้มกันของระบบต่อสัญญาณรบกวน โดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ Agilent N5182A MXG สร้างสัญญาณต่อเนื่องความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ส่งออกโดยใช้สายอากาศแพทช์ เพื่อจำลองสัญญาณรบกวน และใช้สายอากาศรับเป็นสายอากาศแพทช์ โดยวางสายอากาศไว้บริเวณกึ่งกลางของเซ็นเซอร์ เพื่อวัดความแรงของสัญญาณ สังเกตการเปลี่ยนแปลงของ S พารามิเตอร์ ที่แต่ละระดับการรบกวน โดยทดสอบระดับของสัญญาณรบกวนที่ตั้งแต่ -46.90 ถึง -27.82 dBm ซึ่งเป็นการทดสอบอัตราความผิดพลาดของระบบเซ็นเซอร์ที่ได้จากการวัดอากาศที่ไม่มีสัญญาณรบกวน เทียบกับการวัดอากาศที่มีสัญญาณรบกวน ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 การทดสอบอัตราความผิดพลาดจากสัญญาณรบกวนภายนอก

พบว่าระบบเซ็นเซอร์นี้มีภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวนได้สูงสุดที่ระดับสัญญาณรบกวน -38.75 dBm อัตราความผิดพลาดที่ระดับสัญญาณรบกวนน้อยกว่า -38.75 dBm มีค่าน้อยกว่า 5% ดังแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 อัตราความผิดพลาดจากสัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวน (dBm)	อัตราความผิดพลาด (%)	สัญญาณรบกวน (dBm)	อัตราความผิดพลาด (%)
-46.90	2.59	-34.96	8.46
-44.02	3.10	-33.00	9.68
-42.42	3.28	-31.05	11.51
-40.50	3.98	-29.12	14.32
-38.75	5.64	-27.82	15.84
-36.81	7.63		

การวัดผลกระทบจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อระบบเซ็นเซอร์ โดยทำการทดสอบในห้องที่สามารถควบคุมอุณหภูมิ การทดสอบเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นทีละ 10 องศาเซลเซียส เป็น 40 องศาเซลเซียส และ 50 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องเป่าลมร้อน (Hot air blower) และใช้เทอร์โมมิเตอร์วางที่บริเวณกึ่งกลางของเซ็นเซอร์เพื่อวัดอุณหภูมิ การทดสอบอัตราความผิดพลาดของระบบเซ็นเซอร์ที่ได้จากการวัดอากาศที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เทียบกับการวัดอากาศที่มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น พบว่าการเปลี่ยนแปลงของ S พารามิเตอร์ $|S_{11}|$, $|S_{41}|$, $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$ มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้งานด้านอื่นๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ อัตราความผิดพลาดเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของระบบเซ็นเซอร์เพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 3.9 ความแปรปรวนนี้จะชัดเจนมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จาก 30-50 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราความผิดพลาดจะต่ำที่สุด คือ 2.3%

ตารางที่ 3.9 อัตราความผิดพลาดที่เกิดจากอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (°C)	อัตราความผิดพลาด (%)
30	2.30
40	7.56
50	9.29

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาแล้ว จะเห็นว่าสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการทำงานของระบบเซ็นเซอร์ คือ สภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ ดังนั้นควรควบคุมสภาพแวดล้อมทำงานของระบบเซ็นเซอร์ให้มีสัญญาณรบกวนต่ำ นอกจากนี้ควรให้ระบบเซ็นเซอร์ทำงานที่อุณหภูมิไม่เกิน 30 องศาเซลเซียส เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพมากที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้อัตราความผิดพลาดมากขึ้น อย่างไรก็ตามผลกระทบที่ทำให้ค่าความผิดพลาดระบบเซ็นเซอร์มีค่าสูงนั้น จะเกิดจากรูปทรง ขนาด และลักษณะของผิวสัมผัส มากกว่าผลจากสัญญาณรบกวนและอุณหภูมิ ดังนั้นการคัดเลือกขนาดของสัมผัสเยียวหวานก่อนนำมาตัดแยกรสชาติด้วยระบบเซ็นเซอร์ จึงเป็นสิ่งสำคัญ

3.8 สรุป

ในบทนี้นำเสนอสายอากาศแพทช์เซ็นเซอร์ ทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ที่สามารถแบ่งระดับความหวานของสัมผัสเยียวหวานได้ ระบบเซ็นเซอร์นี้ใช้สายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส จำนวน 5 ตัว สายอากาศแต่ละตัวถูกออกแบบให้แมทช์กับสัมผัสเยียวหวานที่มีรสชาติหวาน ตัวแปร $|S_{11}|$ $|S_{41}|$ $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$ ถูกนำมาใช้เพื่อฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อใช้คัดแยกสัมผัสเยียวหวานที่มีรสชาติหวานและไม่หวาน ระบบควบคุมและวงจรโครงข่ายประสาทเทียมถูกสร้างลงบนอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบผลกระทบของสัญญาณรบกวนและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับระบบเซ็นเซอร์ และสรุปได้ว่าเหมาะสมกับเงื่อนไขการทำงานของระบบในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ และอุณหภูมิไม่เกิน 30 องศาเซลเซียส การทดสอบการทำงานระบบเซ็นเซอร์มีความแม่นยำที่ 95.47% แสดงให้เห็นว่าระบบมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้สำหรับคัดแยกรสชาติของสัมผัสเยียวหวาน

บทที่ 4

การคัดแยกทุเรียนอ่อนเพื่อการส่งออก

4.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการศึกษาวิธีการคัดแยกทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออกจากระบบเซ็นเซอร์ด้วยเทคนิคการแพร่กระจายคลื่นที่มีความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ เนื่องจากความยาวคลื่นที่มีความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ มีขนาดมากกว่าระยะห่างระหว่างหนามทุเรียน จึงทำให้สามารถลดผลกระทบที่เกิดจากหนามที่เปลือกของทุเรียน ระบบเซ็นเซอร์มีลักษณะเป็นท่อลำเลียงที่มีทุเรียนบรรจุอยู่ภายใน การออกแบบสายอากาศจึงต้องคำนึงถึงรูปทรงที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับท่อลำเลียงทุเรียน ดังนั้นจึงเลือกใช้สายอากาศโมโนโพลแบบแพทช์ที่มีรูปทรงยาวไปตามแนวท่อลำเลียง เพื่อให้การวัดมีประสิทธิภาพสูงสุด สายอากาศจะถูกติดตั้งอยู่ภายนอกของท่อลำเลียงโดยรอบ ทำหน้าที่ในการรับและส่งคลื่นต่อเนื่อง (Continuous wave: CW) จากแนวความคิดดังกล่าวจึงเริ่มพัฒนาระบบเซ็นเซอร์ด้วยวิธีการจำลองระบบ โดยใช้โปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเก็บค่า S พารามิเตอร์ ในเชิงสถิติจากการเปลี่ยนตำแหน่งของทุเรียนในขณะทำการวัด เพื่อนำมาวิเคราะห์ ซึ่งวิธีการคือ $|S_{11}|$, $|S_{21}|$, $|S_{31}|$ และ $|S_{41}|$ มาพิจารณาธรรมชาติของข้อมูลด้วย แบบจำลองการแพร่กระจาย (Propagation model) โดยเลือกใช้ฟังก์ชันไรเซียน (Rician) มาวิเคราะห์หาค่าขนาดของส่วนระยะแนวสายตา (s) ค่าความแปรปรวน (σ^2) และ k-factor เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าที่ได้จากทุเรียนและใช้เป็นเกณฑ์ในการคัดแยกระหว่างทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก

4.2 การทดลองเพื่อเลือกความถี่ที่เหมาะสม

การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงคลื่นสะท้อนจากผลทุเรียนที่มีระดับความแก่ที่แตกต่างกันโดยใช้ความถี่ที่แตกต่างกัน และผลที่ได้จากการทดลองถูกจำลองในลักษณะของสัญญาณแบบไรเซียน และพบว่าค่า k-factor ที่ได้มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาเซ็นเซอร์สำหรับคัดแยกทุเรียนโดยการวัดลักษณะของการแพร่กระจายของสัญญาณ

การทดลองเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการคัดแยกความแก่ของทุเรียนและหาความถี่ที่เหมาะสม สำหรับพัฒนาระบบเซ็นเซอร์ การทดลองเริ่มต้นด้วยการศึกษาที่ 3 ความถี่ คือ ที่ความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้นโครงสร้างของระบบการทดลองจึงประกอบด้วย สายอากาศสำหรับรับและส่งสัญญาณต่อเนื่อง ที่ความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์ เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Agilent 8648 C) ใช้สำหรับให้กำเนิดแต่ละความถี่ อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ MAX4003 ที่สามารถตรวจจับกำลังงานได้ตั้งแต่ความถี่ 0 ถึง 3 กิกะเฮิร์ตซ์ และสามารถตรวจจับกำลังงานได้ต่ำสุดได้ที่ -45 dBm ใช้สำหรับวัดกำลังงานของสัญญาณโดยให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง คัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง (Coupling factor 20 dB) ใช้สำหรับวัดสัญญาณสะท้อนแล้วนำมาหาค่า $|S_{11}|$ และทุเรียนหมอนทองตัวอย่างจำนวน 150 ลูก ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม โดยแบ่งตามเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง [29] กลุ่มละ 50 ลูก ได้แก่ กลุ่ม A เป็นทุเรียนอ่อน กลุ่ม B เป็นทุเรียนแก่ และกลุ่ม C เป็นทุเรียนสุก เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งของทุเรียนกลุ่ม A B และ C มีค่า 25.3 38.87 และ 42.6 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของทุเรียนทั้ง 3 กลุ่ม [41]

433 MHz								
กลุ่ม A			กลุ่ม B			กลุ่ม C		
s	σ	k-factor	s	σ	k-factor	s	σ	k-factor
2.873	9.10×10^{-3}	0.496×10^5	2.865	4.4×10^{-3}	2.16×10^5	2.866	3.4×10^{-3}	3.497×10^5

915 MHz								
กลุ่ม A			กลุ่ม B			กลุ่ม C		
s	σ	k-factor	s	σ	k-factor	s	σ	k-factor
2.738	13.7×10^{-3}	0.199×10^5	2.728	7.8×10^{-3}	0.61×10^5	2.726	7.0×10^{-3}	0.759×10^5

2450 MHz								
กลุ่ม A			กลุ่ม B			กลุ่ม C		
s	σ	k-factor	s	σ	k-factor	s	σ	k-factor
2.428	8.10×10^{-3}	0.450×10^5	2.426	8.5×10^{-3}	0.41×10^5	2.429	7.9×10^{-3}	0.467×10^5

ในตารางที่ 4.1 แสดงพารามิเตอร์ของทุเรียนทั้ง 3 กลุ่ม ที่ความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ ประกอบด้วยส่วนระยะแนวสายตา (s) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) และ k-factor ซึ่งค่า s จะมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น สาเหตุมาจากความขรุขระของเปลือกเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น นอกจากนี้ค่า σ ที่ความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์ มีค่าต่ำกว่าที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ ด้วยเหตุผลเดียวกัน อย่างไรก็ตามสำหรับที่ความถี่ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์นั้นความลึกในการทะลุเข้าไปในทุเรียนของสัญญาณน้อยกว่าอีก 2 ความถี่ที่เหลือ ผลกระทบเนื่องมาจากความขรุขระบนเปลือกของทุเรียนทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่แตกต่างกัน ค่า k-factor ของความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์ มีค่าสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับค่า k-factor ที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ที่ความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ สามารถใช้ตรวจวัดทุเรียนได้ ส่วนที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ นั้นมีความถี่สูงเกินไปที่จะนำมาใช้ในการตรวจวัดทุเรียน

ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ เนื่องจากขนาดของสายอากาศและโครงสร้างของระบบเซ็นเซอร์จะมีขนาดที่กะทัดรัดกว่าที่ความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์ และที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ ยังคงสามารถลดผลกระทบที่เกิดจากหนามที่เปลือกของทุเรียนได้ เนื่องจากขนาดของความยาวคลื่น มีขนาดกว้างกว่าระยะห่างระหว่างหนามทุเรียน

4.3 การออกแบบสายอากาศและแบบจำลองทุเรียน

4.3.1 คุณสมบัติไดโพลทริกของทุเรียน

ทุเรียนประกอบด้วยหลายสายพันธุ์ เช่น หมอนทอง ชะนี ก้านยาว กระจุก และพวงมณี เป็นต้น ซึ่งลักษณะทางกายภาพของทุเรียนแต่ละสายพันธุ์จะมีขนาด รูปทรง และผิวของเปลือกแตกต่างกันออกไป เช่น ทุเรียนบางสายพันธุ์มีเปลือกหนา ลูกใหญ่ หรือบางสายพันธุ์เปลือกบาง ลูก

เล็ก รวมถึงรูปทรงของทุเรียนก็จะมี ความแตกต่างกันเช่น ทุเรียนบางสายพันธุ์มีรูปทรงบิดเบี้ยว แต่บางสายพันธุ์รูปทรงสมมาตร ตัวอย่างทุเรียนสายพันธุ์หมอนทอง ดังแสดงในรูปที่ 4.1



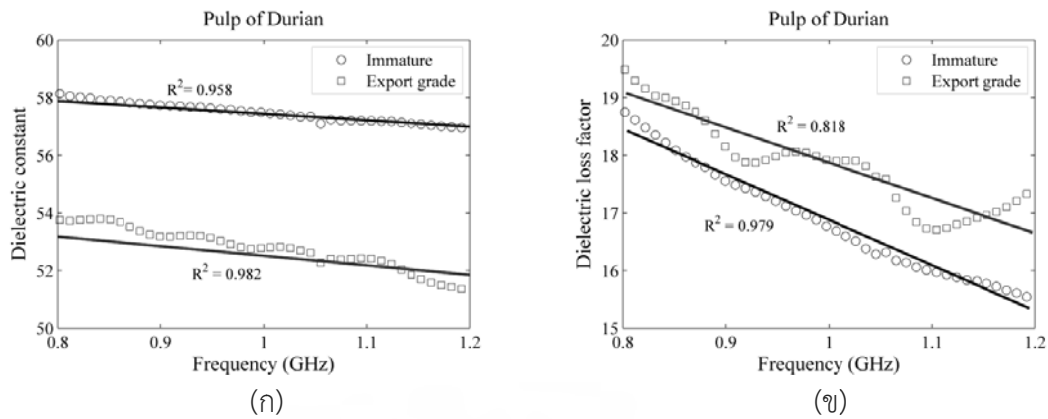
รูปที่ 4.1 ทุเรียนสายพันธุ์หมอนทอง

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก เป็นปัจจัยหลักสิ่งที่จะต้องศึกษาเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองทุเรียนในการจำลองการทำงานของระบบเซ็นเซอร์ การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทุเรียนในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่องวิเคราะห์โครมข่ายอิเวเลตต์ แพคการ์ด (Hewlett-Packard) 8510C และโพรบไดอิเล็กตริก (Agilent 85070 B open-ended coaxial-line) 85070 B ค่าที่ได้จากการวัดแบ่งออกเป็น 2 ค่าคือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) ซึ่งการวัดค่าคงที่ทางไฟฟ้าถูกวัดที่ความถี่ 0.8-1.2 กิกะเฮิรตซ์

การเตรียมทุเรียนสำหรับวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า ทุเรียนที่เก็บมาจากสวนซึ่งมีทั้งทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก ถูกนำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด เพื่อขจัดสิ่งปนเปื้อนที่มาจากเปลือกทุเรียนก่อนจะนำมาทำการทดลอง รวมถึงทำการควบคุมอุณหภูมิภายในห้องทดลองให้อยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส เพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะวัด วิธีการการวัดทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยตัดเนื้อทุเรียนและเปลือกทุเรียนออกเป็นชิ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร จากนั้นวัดด้วยโพรบไดอิเล็กตริก ในลักษณะเดียวกับการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของส้มเขียวหวาน ข้อมูลที่ได้แบ่งออกเป็นข้อมูลของเปลือกทุเรียนและข้อมูลเนื้อทุเรียน

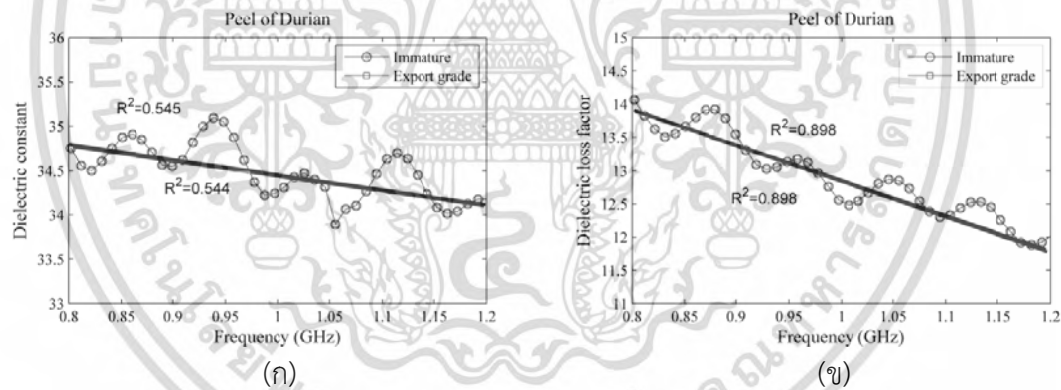
จากการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียนอ่อนและเนื้อทุเรียนแก่ส่งออกจะสังเกตเห็นว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นคุณสมบัติไดอิเล็กตริกจะมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียนอ่อนกับเนื้อทุเรียนแก่ส่งออกจะเห็นว่ามีความแตกต่างกันอย่างเห็นชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) ซึ่งจากความแตกต่างที่ชัดเจน แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพื่อคัดแยกระหว่างทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก แต่สำหรับในกรณีของตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียนจะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข) จากคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียนที่วัด จะถูกนำมาสร้างแบบจำลองทุเรียนเพื่อใช้ในการจำลองระบบเซ็นเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียน (ข) ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียน

ขั้นตอนต่อมาคือ การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเปลือกทุเรียนอ่อนและเปลือกทุเรียนแก่ส่งออก ซึ่งคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเปลือก เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนและพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเปลือกทุเรียนแสดงให้เห็นว่าเปลือกของทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออกมีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน และเช่นเดียวกันคือเมื่อความถี่สูงขึ้นคุณสมบัติไดอิเล็กตริกจะลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเปลือกทุเรียน (ข) ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกของเปลือกทุเรียน

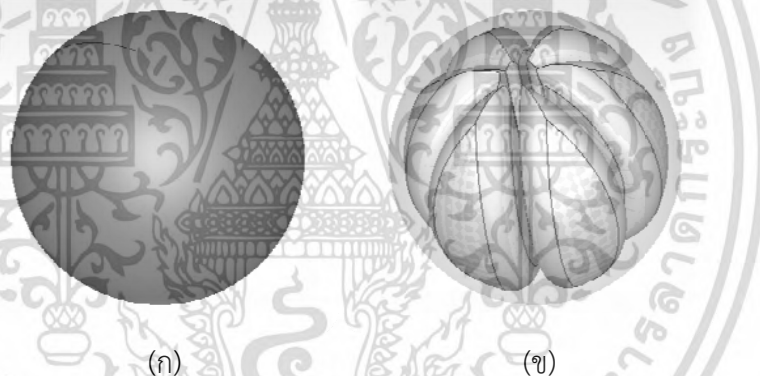
จากความสอดคล้องที่เกิดขึ้นของเปลือกทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออกจะถูกนำไปใช้ในการจำลองการทำงานและออกแบบระบบเซ็นเซอร์ การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทุเรียนในช่วงความถี่ 0.8 -1.2 กิกะเฮิรตซ์ แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกระหว่างทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออกอย่างชัดเจน รวมถึงที่ความถี่ 915 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งระบบเซ็นเซอร์ที่พัฒนาใช้ความถี่ 915 เมกะเฮิรตซ์ ที่เป็นย่านความถี่เสรี สะดวกต่อการสร้างระบบจริง เนื่องจากมีอุปกรณ์รองรับการใช้งานที่ความถี่นี้มีอยู่อย่างหลากหลาย จะสังเกตได้ว่า ที่ความถี่ 915 เมกะเฮิรตซ์นี้ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของทุเรียนแก่ส่งออกอยู่ที่ 53 และทุเรียนอ่อนอยู่ที่ 58 ในส่วนของค่าสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดอิเล็กตริกของทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออกมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นในการจำลองทุเรียนจึงใช้ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกเท่ากับ 18

4.3.2 แบบจำลองทุเรียน

แบบจำลองทุเรียนถูกพัฒนาตามลักษณะพื้นฐานของทุเรียนจริงที่ประกอบด้วย รูปทรง ขนาด ความหนาเปลือก ขนาดของเนื้อภายใน รวมถึงความแตกต่างระหว่างทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออกหรือทุเรียนที่มีความแก่เพียงพอสำหรับการส่งออก จากข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาสร้างแบบจำลองเพื่อให้ครอบคลุมความเป็นไปได้ทั้งหมดของลักษณะทางกายภาพของทุเรียน เนื่องจากขนาดและรูปทรงของทุเรียนมีลักษณะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของทุเรียนแต่ละสายพันธุ์ ดังนั้นการศึกษาถึงผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและรูปร่างของทุเรียนจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการพัฒนาระบบเซ็นเซอร์ การจำลองระบบจึงสร้างแบบจำลองจากทุเรียนจำลองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 17 ถึง 23 เซนติเมตร โดยปรับขนาดครึ่งละ 0.5 เซนติเมตร และระดับความแก่ของทุเรียนจำลองถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มของทุเรียนอ่อน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 58 และตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก 18 ทุเรียนแก่ส่งออกค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 53 และตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก 17.5 ลักษณะทางกายภาพของเปลือกและเนื้อของแบบจำลองทุเรียนแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แบบจำลองทุเรียน (ก) เปลือกทุเรียน (ข) เนื้อทุเรียน

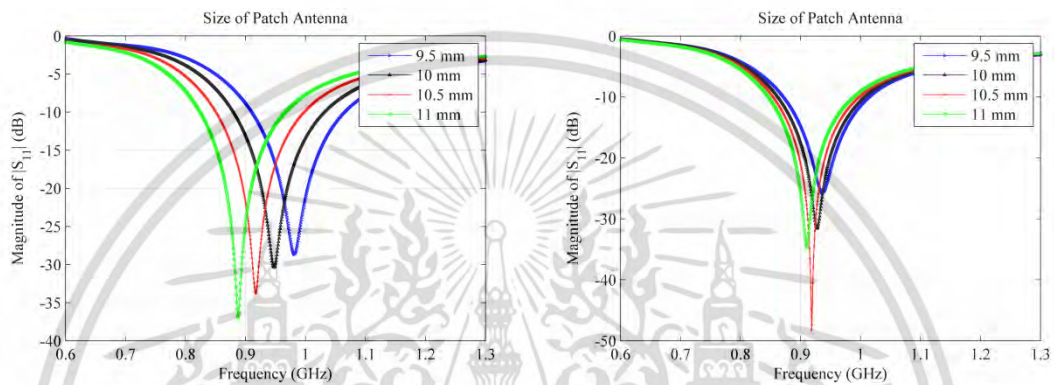
ระบบเซ็นเซอร์ทำงานที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งที่ความถี่ดังกล่าวจะมีความยาวคลื่นประมาณ 32.8 เซนติเมตร นั้นแสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ ความยาวคลื่นจะมีขนาดมากกว่าระยะห่างระหว่างหนามทุเรียน จากความยาวดังกล่าวจึงลดผลกระทบที่เกิดจากหนามของเปลือกของทุเรียน ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองทุเรียนที่สร้างจึงมีลักษณะของเปลือกเป็นพื้นผิวเรียบ เนื่องจากหนามของเปลือกทุเรียนมีผลกระทบต่อการทำงานของระบบเซ็นเซอร์ จากแบบจำลองทุเรียนผิวเรียบทำให้ลดซับซ้อนในการคำนวณ ส่งผลให้การประมวลผลสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โครงสร้างของแบบจำลองทุเรียนที่สร้างมีลักษณะเป็นทรงกลมรี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 17 - 23 เซนติเมตร

4.3.3 การออกแบบสายอากาศ

สายอากาศที่ใช้ในระบบนี้คือสายอากาศแบบโมนโพลแบบแพทช์ เนื่องจากการสายอากาศมีการแพร่กระจายของคลื่นรอบตัว ซึ่งเหมาะกับการติดตั้งรอบท่อลำเลียงทุเรียนทำงานที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ อย่างไรก็ตามการที่สายอากาศเป็นแบบโมนโพลแบบแพทช์ เมื่ออยู่ในตำแหน่งที่ติดตั้งในท่อลำเลียงทุเรียนจะทำให้เกิดการหักเหของคลื่นวิทยุ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของสายอากาศลดลง ดังนั้นการออกแบบสายอากาศแบบโมนโพลแบบแพทช์ที่ใช้ในระบบนี้จึงต้องคำนึงถึงการหักเหของคลื่นวิทยุที่อาจเกิดขึ้นได้จากการที่สายอากาศเป็นแบบโมนโพลแบบแพทช์

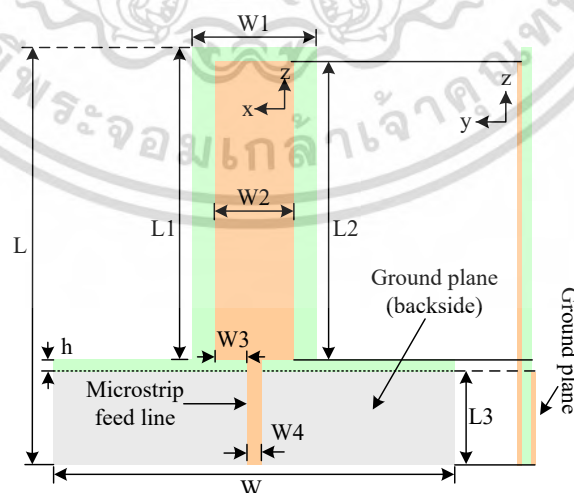
เมกะเฮิร์ตซ์ โครงสร้างสายอากาศโมโนโพล ถูกออกแบบโดยใช้วัสดุฐานรอง (Substrate) FR4 หนา 1.441 มิลลิเมตร มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 4.3 แพทช์ตัวนำและกราวด์สร้างมาจาก ทองแดงหนา 0.0795 มิลลิเมตร จากการคำนวณจะได้ความยาวของสายอากาศได้ 8.5 เซนติเมตร

ในการจำลองการออกแบบสายอากาศ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ϵ_r ของแผ่นวัสดุฐานรอง คือ 4.36 ความกว้างของไมโครสตริปไลน์เป็น 3 มิลลิเมตร จากนั้นจำลองการทำงานของสายอากาศด้วย โปรแกรมจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทำการปรับขนาดของสายอากาศเพื่อหาขนาดที่เหมาะสม ซึ่งจากการปรับขนาดของสายอากาศเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสม ที่สามารถทำงานที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้การจำลอง ผลที่ได้จากการจำลองแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลการจำลองการทำงานของสายอากาศโมโนโพล

สายอากาศที่ออกแบบนี้มีความกว้าง 2.2 เซนติเมตร และยาว 5.6 เซนติเมตร ระบายกราวด์ยาว 12 เซนติเมตร มีค่า $|S_{11}|$ น้อยกว่า -10 dB ที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเพียงพอสำหรับการนำมาใช้งาน สายอากาศที่ออกแบบนี้ จะถูกติดตั้งรอบท่อลำเลียงทั้งหมด 4 ตัว โครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 4.6 ขนาดของสายอากาศแสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.6 สายอากาศโมโนโพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

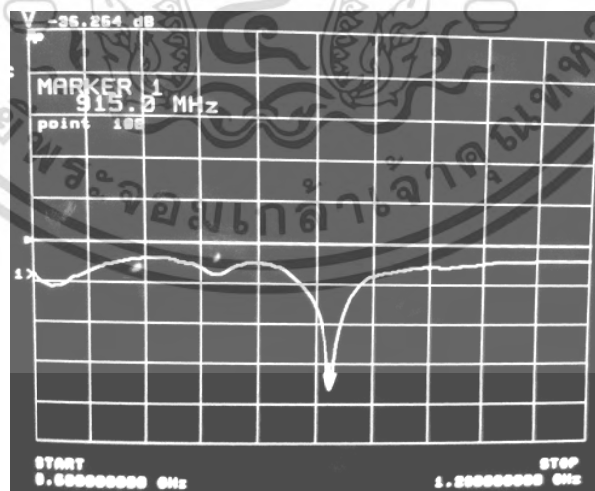
ตารางที่ 4.2 ขนาดของสายอากาศโมโนโพลทำงานที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์

	W	W1	W2	W3	W4	L	L1	L2	L3	h
เซนติเมตร	12.0	4.0	2.2	0.88	0.44	10.0	7.0	5.6	3.0	0.4

จากการจำลองสมรรถนะของสายอากาศ ขั้นตอนต่อมาคือการสร้างสายอากาศต้นแบบตามขนาดของสายอากาศที่ได้จากการจำลองด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ 2 หน้า ชนิด FR4 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จากนั้นทำการวัดคุณสมบัติสายอากาศต้นแบบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (VNA) ประสิทธิภาพของสายอากาศต้นแบบแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 สายอากาศต้นแบบ

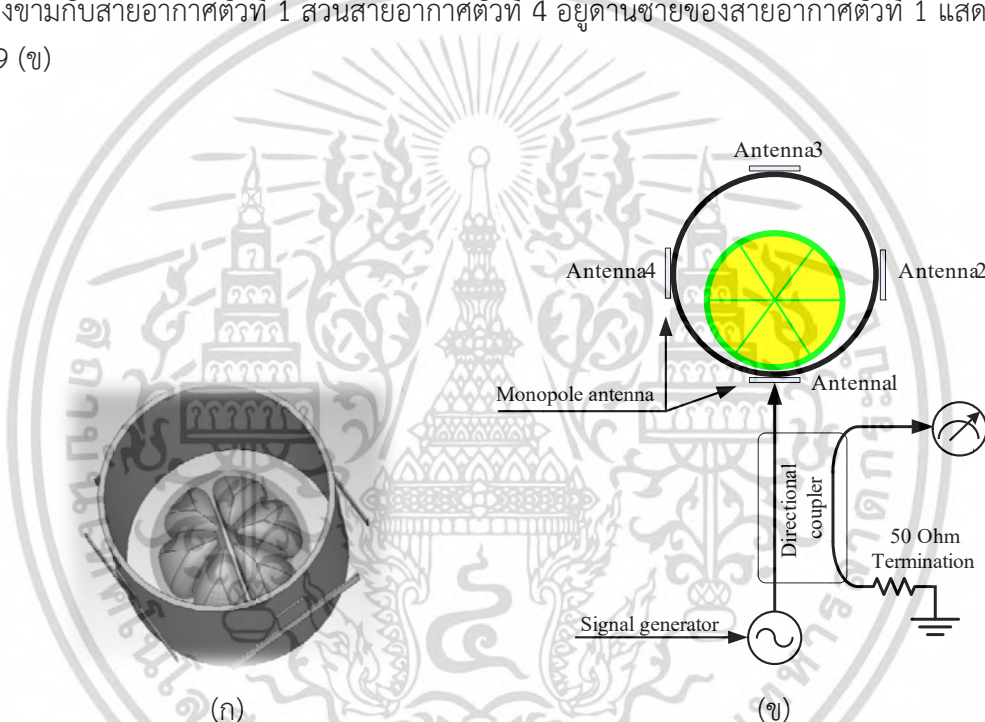


รูปที่ 4.8 กราฟ $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบ

จากคุณสมบัติของสายอากาศต้นแบบแสดงให้เห็นว่าค่า $|S_{11}|$ น้อยกว่า -30 dB ซึ่งสามารถยอมรับได้ และสามารถก่อสร้างระบบเซ็นเซอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การออกแบบระบบเซ็นเซอร์คัดแยกทุเรียน

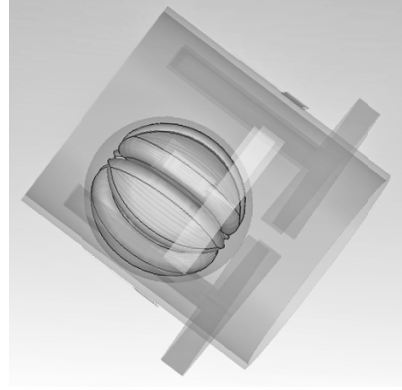
ระบบของเซ็นเซอร์คัดแยกทุเรียนถูกพัฒนาเพื่อให้สามารถคัดแยกทุเรียนได้อย่างต่อเนื่อง โดยระบบลำเลียงทุเรียนถูกออกแบบในลักษณะท่อพลาสติกทรงกระบอก ถูกใช้เพื่อบรรจุทุเรียนและทำหน้าที่เป็นท่อลำเลียง สายอากาศโมนโพลทั้งหมด 4 ตัว วางอยู่รอบนอก ชิดกับท่อลำเลียงแสดงดังรูปที่ 4.9 ระบบเซ็นเซอร์ทำงานที่ความถี่ 915 เมกะเฮิรตซ์ ที่เป็นย่านความถี่เสรี ซึ่งสะดวกต่อการสร้างระบบจริง เนื่องจากมีอุปกรณ์รองรับการใช้งานที่ความถี่นี้อยู่มาก การทำงานของสายอากาศทั้งหมดแบ่งได้ดังนี้ คือ สายอากาศตัวที่ 1 ใช้เพื่อส่งสัญญาณต่อเนื่อง (Continuous wave: CW) ไปยังทุเรียน และสายอากาศตัวที่ 2 3 และ 4 ถูกใช้เป็นสายอากาศรับ ซึ่งสายอากาศรับทั้ง 3 ตัว ทำหน้าที่เป็นตัวรับคลื่นที่สะท้อนจากทุเรียน ตำแหน่งการติดตั้งสายอากาศ คือ สายอากาศตัวที่ 1 อยู่ด้านล่างของท่อลำเลียง สายอากาศตัวที่ 2 อยู่ด้านขวาของสายอากาศตัวที่ 1 สายอากาศตัวที่ 3 อยู่ตรงข้ามกับสายอากาศตัวที่ 1 ส่วนสายอากาศตัวที่ 4 อยู่ด้านซ้ายของสายอากาศตัวที่ 1 แสดงในรูปที่ 4.9 (ข)



รูปที่ 4.9 (ก) แบบจำลองของสายอากาศและผลทุเรียน (ข) โครงสร้างของระบบเซ็นเซอร์

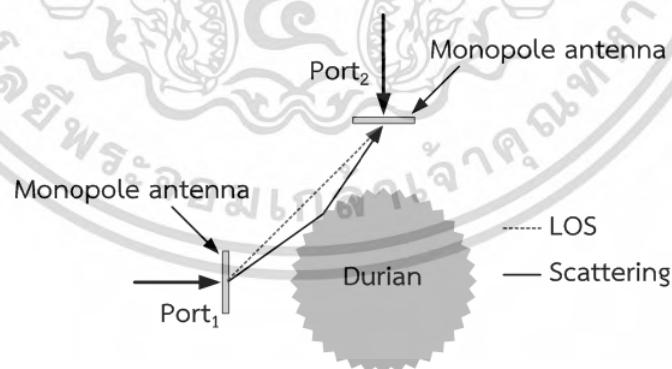
แบบจำลองท่อลำเลียงเพื่อใช้ในการลำเลียงทุเรียน ถูกจำลองจากท่อพลาสติกหรือท่อ PVC ที่มีขายตามท้องตลาด เพื่อให้สามารถสร้างเป็นระบบจริงได้อย่างสะดวก มีความหนา 1 เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางขอบด้านนอก 25 เซนติเมตร และยาว 60 เซนติเมตร เพื่อให้รองรับทุเรียนที่มีขนาดแตกต่างกันได้อย่างเหมาะสม คุณสมบัติทางไฟฟ้าของท่อ PVC คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 4 และตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก 1 ท่อลำเลียงถูกวางในลักษณะทำมุมเอียง 45 องศากับพื้นดังแสดงในรูปที่ 4.10 การวางท่อลำเลียงเอียงในลักษณะดังกล่าว เพื่อให้ทุเรียนสามารถไหลผ่านจากปากท่อไปถึงเซ็นเซอร์เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติได้อย่างสะดวก ใสทุเรียนที่ต้องการวัดทางด้านบนด้านล่างเป็นทางออกสำหรับทุเรียนที่ผ่านกระบวนการวัดสำเร็จแล้ว และขั้นตอนต่อไปคือเลือกเส้นทางจากการตัดสินใจจากเซ็นเซอร์ ระหว่างทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ลักษณะการวางท่อลำเลียงทุเรียนเอียง 45 องศา

เนื่องจากรูปร่างและขนาดของทุเรียนที่ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นในการวัดจึงต้องใช้ข้อมูลทางสถิติ ในขั้นตอนการจำลองเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมความเป็นไปได้ทั้งหมดของขั้นตอนการวัดทุเรียน การปรับตำแหน่งการวัดทุเรียนจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยทุเรียนจำลองที่ถูกวางตามแนวลาดเอียงของท่อ จะถูกเลื่อนตำแหน่งไปตามแนวยาวของท่อลำเลียง จากนั้นได้ทำการจำลองการวัดและเก็บค่า S พารามิเตอร์ นำค่าที่ได้มาใช้สำหรับวิเคราะห์ผลในเชิงสถิติ เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการตัด แยกทุเรียนอ่อนออกจากทุเรียนแก่ส่งออก โดยอาศัยคุณสมบัติของ S พารามิเตอร์ ที่ได้มาจากการวัด ของสายอากาศโมโนโพลทั้ง 4 ตัว นำมาคำนวณค่า k-factor สำหรับช่องสัญญาณของระบบสื่อสาร ไร้สายสามารถอธิบายลักษณะด้วยการกระจายตัวแบบเรย์เลห์ (Rayleigh) หรือการกระจายตัวแบบ ไรเซียน (Rician) การกระจายตัวทั้ง 2 แบบนี้จะแตกต่างกันคือ ไรเซียนจะมีองค์ประกอบของขนาด ของส่วนระยะแนวสายตา แต่เรย์เลห์จะไม่มี โครงสร้างของระบบเซ็นเซอร์ที่ออกแบบแสดงในรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่ามีองค์ประกอบของขนาดของส่วนระยะแนวสายตา ดังนั้นจึงเลือกใช้การวิเคราะห์ ข้อมูลการวัดทุเรียนด้วยไรเซียน



รูปที่ 4.11 ลักษณะช่องสัญญาณของระบบเซ็นเซอร์

การวัดทุเรียนแต่ละลูกถูกปรับตำแหน่งการวัด 5 ครั้งต่อลูก เพื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหา ค่า ความแปรปรวน และขนาดของส่วนระยะแนวสายตา จากนั้นนำไปใช้หาค่า k-factor โดย k-factor คือค่ากำลังสองของส่วนคงที่หารด้วยกำลังสองของค่าความแปรปรวน สมการ k-factor ของฟังก์ชัน ไรเซียนแสดงดังสมการที่ (4.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-(r^2+s^2)/2\sigma^2} I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right) \quad (4.1)$$

โดยที่ I_0 คือ ฟังก์ชันเบสเซลปรับปรุงชนิดที่หนึ่งอันดับที่ศูนย์
 σ^2 คือ ความแปรปรวนของส่วนจริงหรือส่วนจินตภาพ
 s คือ ขนาดของส่วนระยะแนวสายตา

ค่า k-factor จากคลื่นสะท้อนกลับจากผลทุเรียน และคลื่นสะท้อนในทิศทางอื่นๆ ที่ต่างกัน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.2)

$$\text{k-factor} = \frac{s^2/2}{\sigma^2} = \frac{s^2}{2\sigma^2} \quad (4.2)$$

การจำลองถูกสร้างในลักษณะเสมือนจริง เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ และออกแบบระบบ ส่วนประกอบในการจำลองระบบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ แบบจำลองทุเรียนขนาดต่างๆ ท่อลำเลียงที่สร้างจากท่อ PVC และสายอากาศโมโนโพล 4 ตัวถูกวางอยู่รอบท่อลำเลียง

4.5 ผลการจำลองระบบและวิเคราะห์

ระบบเซ็นเซอร์ตัดแยกทุเรียน ประกอบด้วยสายอากาศโมโนโพล 4 ตัว สายอากาศตัวที่ 1 จะทำหน้าที่ส่งสัญญาณต่อเนื่อง ที่ความถี่ 915 เมกะเฮิรตซ์ สายอากาศตัวที่ 2-4 ทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับ ระหว่างสายอากาศตัวที่ 1 สายอากาศตัวที่ 3 จะถูกบังด้วยทุเรียนทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่เกิดคลื่นตรง (Direct wave) ดังนั้นช่องสัญญาณในกรณีนี้จึงเป็นช่องสัญญาณเรย์เลห์ (Rayleigh channel) สายอากาศตัวที่ 2 และตัวที่ 4 อยู่ในตำแหน่งด้านข้างซึ่งเป็นตำแหน่งที่สมมาตรกัน ผลที่ได้จากสายอากาศจึงเหมือนกัน ดังนั้นจึงเลือกจำลองการทำงานเฉพาะสายอากาศตัวที่ 2

4.5.1 ขนาดและตำแหน่งการวางทุเรียน

การพิจารณาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อระบบเป็นสิ่งสำคัญ 2 ตัวแปรหลักที่ได้รับความสนใจคือ ขนาดและตำแหน่งการวางทุเรียน เพื่อให้ผลที่ได้จากการจำลองระบบสามารถนำมาเป็นข้อมูลสำหรับสร้างเซ็นเซอร์ เนื่องจากธรรมชาติของผลทุเรียนจะมีรูปร่างที่แตกต่างกัน และการเลี้ยวของทุเรียนในท่อลำเลียง ทำให้ทิศทางการวางตัวของลูกทุเรียนควบคุมได้ยาก จึงส่งผลให้การวัดไม่สามารถระบุตำแหน่งการวัดลูกทุเรียนให้เหมือนกันทุกลูก ดังนั้นเพื่อให้การจำลองระบบเข้าใกล้การทำงานของระบบจริงมากที่สุดจึงต้องใช้ข้อมูลทางสถิติ การจำลองระบบเซ็นเซอร์จึงอาศัยการปรับตำแหน่งของทุเรียนจำลองทุกครั้งที่ทำกรวัด เพื่อรองรับข้อมูลที่อยู่นอกเหนือการควบคุมที่มาจากกรรูปร่างของทุเรียนและตำแหน่งการวัดที่แตกต่างกัน ดังนี้

1) ขนาดของทุเรียนจำลองถูกสร้างขึ้นอย่างสอดคล้องกับขนาดจริง ตั้งแต่ขนาดเล็กไปถึงขนาดใหญ่ ทุเรียนขนาดเล็กจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 17 เซนติเมตร ทุเรียนขนาดกลางจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 19.5 เซนติเมตร และทุเรียนขนาดใหญ่จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 23 เซนติเมตร เพื่อให้การจำลองเหมือนจริงมากที่สุด ขนาดของทุเรียนจึงถูกปรับจากเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยปรับเพิ่มขึ้นอย่างละเอียดครั้งละ 0.5 เซนติเมตร จาก 17 เซนติเมตร ไปถึง 23

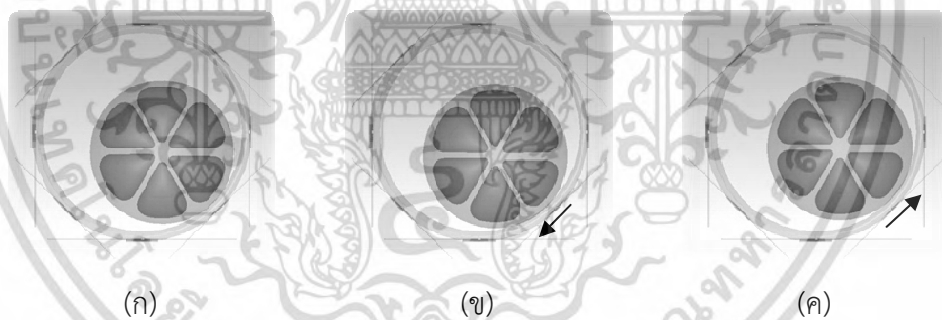
เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

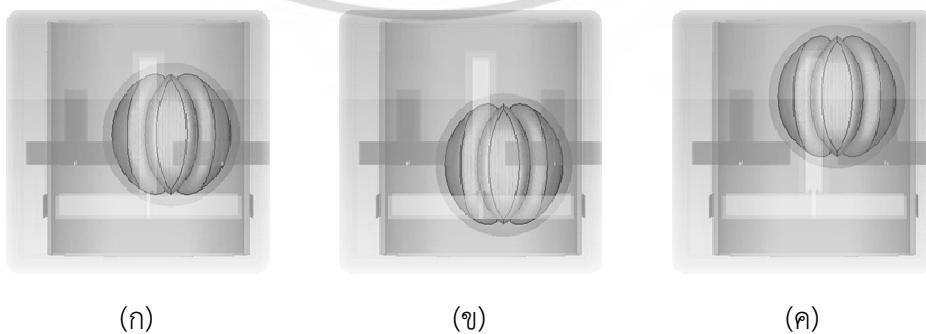
เซนติเมตร ดังนั้นจะได้ขนาดของทุเรียนจำนวน 13 ขนาด ทั้งทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก รวมถึงอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของเปลือกและเนื้อถูกสร้างอย่างสมมาตร เพื่อให้เข้าใจกลไกความเป็นไปได้ทั้งหมดของทุเรียนจริง

2) ตำแหน่งทุเรียนในขณะวัดต้องสอดคล้องกับการวัดจริง ตำแหน่งการวัดต้องมีการเลื่อนขึ้น-ลง และการเลื่อนซ้าย-ขวา ดังนั้นการจำลองการวัดของเซ็นเซอร์ถูกแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ การเลื่อนทุเรียนไปด้านซ้ายและขวาจากจุดกึ่งกลาง และการเลื่อนขึ้น-ลง เพื่อให้ครอบคลุมเงื่อนไขการวัดจริง จากนั้นจำลองระบบเพื่อหาค่า S พารามิเตอร์ จากการวัดทุเรียน ท่อลำเลียงอยู่ในลักษณะเอียง 45 องศา ดังนั้นทุเรียนจะเคลื่อนที่ผ่านเซ็นเซอร์เพื่อวัดและเก็บค่าและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้อย่างต่อเนื่อง

การจำลองระบบเซ็นเซอร์ในเงื่อนไขการเลื่อนซ้าย-ขวา เริ่มต้นจากทุเรียนจำลองถูกวางชิดกับท่อลำเลียง ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ก) จากนั้นขยับจากตำแหน่งกลางไปทางซ้าย 1 เซนติเมตร และขยับจากตำแหน่งกลางไปทางขวา 1 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ข) และ 4.12 (ค) ตามลำดับ โดยถูกใช้กับทุเรียนจำลองทุกขนาด แล้ววัดค่า S พารามิเตอร์ การจำลองระบบเซ็นเซอร์ในเงื่อนไขการเลื่อนขึ้น-ลง ของทุเรียนจำลอง เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากตำแหน่งการวัด ซึ่งตำแหน่งการวัดถูก ปรับจากจุดเริ่มต้น คือจุดศูนย์กลางของสายอากาศ ขยับทุเรียนจำลองไปตามแนวยาวของท่อลำเลียงลงห่างจากจุดกึ่งกลาง 5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ข) และขยับทุเรียนจำลองขึ้นจากจุดกึ่งกลางของท่อลำเลียง 5 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 4.13 (ค) ดังนั้นการเปลี่ยนตำแหน่งของทุเรียนจำลองทั้งหมดคือ 5 ครั้ง



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนตำแหน่งซ้าย - ขวาของทุเรียนจำลอง (ก) กึ่งกลาง (ข) ซ้าย (ค) ขวา



รูปที่ 4.13 การเลื่อนตำแหน่งขึ้นลงของทุเรียนที่ระยะ (ก) กึ่งกลาง (ข) ขยับลง 5 เซนติเมตร

(ค) ขยับขึ้น 5 เซนติเมตร

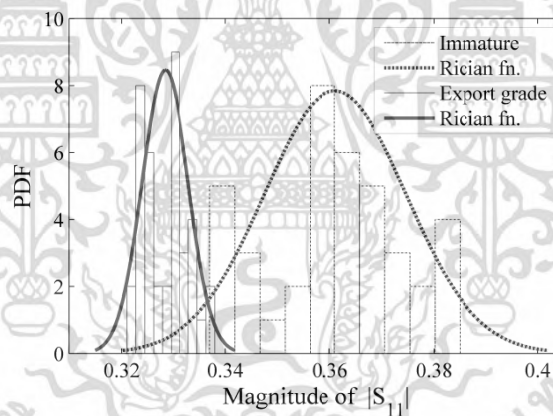
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุนี้ข้อมูลที่ได้จากการวัดทุเรียน 1 ลูก จึงมีทั้งหมด 5 ข้อมูล ดังนั้นสำหรับทุเรียนทั้ง 2 กลุ่ม คือ ทุเรียนอ่อน ($\varepsilon' = 58$ $\varepsilon'' = 17.8$) และทุเรียนแก่ส่งออก ($\varepsilon' = 54$ $\varepsilon'' = 18$) กลุ่มละ 13 ลูก จึงมีจำนวนข้อมูลของทุเรียนอ่อน 65 ข้อมูล และจำนวนข้อมูลของทุเรียนแก่ส่งออก 65 ข้อมูล

4.5.2 วิเคราะห์ความแตกต่างของทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก

ค่าที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยการปรับขนาดและตำแหน่งของทุเรียนจำลอง คือ $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ อย่างละ 130 ข้อมูล จากแบบจำลองทุเรียนตัวอย่างทั้งหมด 2 กลุ่ม คือ ทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก อย่างละ 65 ข้อมูล โดยเป็นการจำลองในลักษณะจำลองของสัญญาณ หลังจากนั้นนำค่า $|S_{11}|$ มาพล็อตกราฟฮิสโทแกรม และวิเคราะห์เส้นแนวโน้มด้วยฟังก์ชันโรเซียน ซึ่งจากการวิเคราะห์เส้นแนวโน้มด้วยฟังก์ชันโรเซียน จะได้ค่าความแปรปรวน (Variance: σ^2) และขนาดของแนวระดับสายตา (Magnitude of the LOS: s) ขนาดของ $|S_{11}|$ ที่ได้จากทุเรียนจำลองอยู่ในช่วง 0.31-0.41 แสดงดังรูปที่ 4.14 จากนั้นคำนวณหาค่าความแปรปรวน และค่า s แล้วคำนวณหาค่า k-factor ด้วยค่าความแปรปรวนและ s ที่ได้จากข้อมูลของ $|S_{11}|$ พบว่าค่า k-factor ของทุเรียนอ่อนมีค่า 360.74 ซึ่งน้อยกว่าค่า k-factor ของทุเรียนแก่ที่มีค่า 2,776.8 ซึ่งมีความแตกต่างระหว่างทุเรียนอ่อนและของทุเรียนแก่ส่งออกอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำค่า k-factor มาใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินใจเพื่อคัดแยกทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก แสดงในตารางที่ 4.3



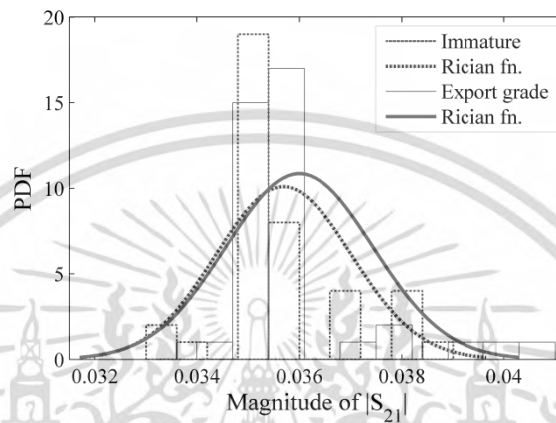
รูปที่ 4.14 ค่า $|S_{11}|$ จากการจำลองระบบ

ตารางที่ 4.3 ค่า k-factor จากการจำลองของ $|S_{11}|$

	$ S_{11} $ (915MHz)	
	ทุเรียนอ่อน	ทุเรียนแก่ส่งออก
s	0.36078	0.32833
σ^2	0.01343	0.00441
k-factor	360.74	2,776.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า $|S_{21}|$ ได้มาจากสายอากาศรับตัวที่ 2 ที่มีตำแหน่งอยู่ด้านข้างของท่อลำเลียงทุเรียน ทำมุม 90 องศา กับสายอากาศตัวที่ 1 นำมาพล็อตกราฟฮิสโทแกรม และวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันโรเซียนเพื่อหาค่า k-factor ซึ่งทำในลักษณะเดียวกับ $|S_{11}|$ แสดงดังรูปที่ 4.15 จากการวิเคราะห์ข้อมูล $|S_{21}|$ ทำให้ได้ค่า k-factor ของทุเรียนอ่อน มีค่า 373.9 ซึ่งมากกว่าค่า k-factor ของทุเรียนแก่ส่งออกที่มีค่า 323.25 ดังแสดงในตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า ค่า k-factor ที่ได้ของ $|S_{21}|$ สามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลเพิ่มเติม เพื่อให้การตัดสินใจคัดแยกทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออกได้แม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 4.15 ค่า $|S_{21}|$ จากการจำลองระบบ

ตารางที่ 4.4 ค่า k-factor จากการจำลองของ $|S_{21}|$

	$ S_{21} $ (915MHz)	
	ทุเรียนอ่อน	ทุเรียนแก่ส่งออก
s	0.03567	0.03597
σ^2	0.00130	0.00141
k-factor	373.9	323.25

4.5.3 ผลการจำลองการคัดแยกทุเรียน

1) การจำลองการคัดแยกทุเรียนด้วย $|S_{11}|$

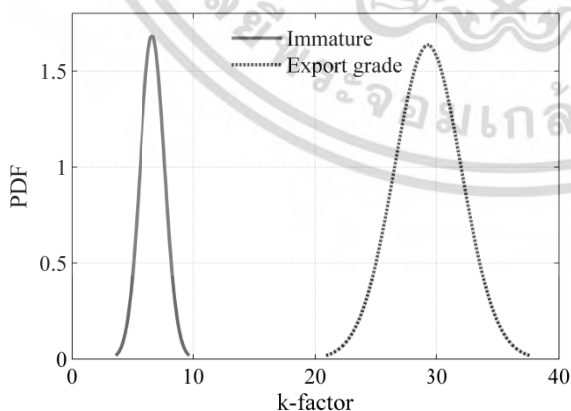
จำลองการทำงานของระบบด้วยแบบจำลองทุเรียนตัวอย่างทั้งหมด 26 ลูก โดยกลุ่มตัวอย่างในการวัดมีทั้งหมด 2 กลุ่ม คือ ทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก อย่างละ 13 ลูก กลุ่มตัวอย่างของทุเรียนจำลองที่สร้างขึ้นมีขนาดตั้งแต่เส้นผ่านศูนย์กลาง 17 เซนติเมตร ถึง 23 เซนติเมตร โดยทุเรียนแต่ละลูกถูกวัดทั้งหมด 10 ครั้ง แต่ละครั้งจะชั่งบับครั้งละ 1 เซนติเมตร โดยเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวยาวของท่อลำเลียงทุกครั้งทีวัด เพื่อจำลองให้เสมือนจริงเมื่อนำไปออกแบบระบบ ซึ่งค่า $|S_{11}|$ ที่วัดได้ทั้งหมดจะมีจำนวน 260 ข้อมูล จะถูกนำมาพล็อตฮิสโทแกรม และคำนวณเส้นแนวโน้ม ด้วยฟังก์ชันโรเซียนเพื่อหาค่า s และค่าความแปรปรวน จากนั้นจึงนำค่า s และค่าความแปรปรวนที่ได้มาคำนวณหาค่า k-factor ผลจากการจำลองแสดงดังในตารางที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 การจำลองการคัดแยกทุเรียนด้วย $|S_{11}|$

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	k-factor	
	ทุเรียนอ่อน	ทุเรียนแก่ส่งออก
17	8.0322	29.5598
17.5	7.9089	31.0524
18	7.9210	32.9138
18.5	7.2945	32.2172
19	7.3032	31.9706
19.5	6.7792	31.8393
20	6.7448	30.7028
20.5	6.0048	28.1098
21	6.0080	28.2619
21.5	5.8046	27.3673
22	5.7740	25.9228
22.5	5.3950	25.2120
23	5.0649	25.0014

ค่า k-factor ที่ได้จากการจำลองของทุเรียนอ่อน ($\epsilon_r = 58$) และทุเรียนแก่ส่งออก ($\epsilon_r = 53$) แต่ละลูก ถูกนำมาพล็อตกราฟฮิสโทแกรม และคำนวณเส้นแนวโน้ม ด้วยฟังก์ชันไรเซชันเพื่อคำนวณหาค่า s และค่าความแปรปรวน เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการคัดแยกทุเรียน 2 กลุ่ม ออกจากกันด้วยค่า k-factor โดยทุเรียนอ่อนมีค่า k-factor เป็น 22.26 และค่า k-factor ของทุเรียนแก่ส่งออกมีค่าเป็น 58.98 ซึ่งทุเรียนแก่ส่งออกมีค่ามากกว่าทุเรียนอ่อน และเมื่อสังเกตกราฟในรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าการใช้แบ่งกลุ่มของทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก 2 ระดับนี้ ทำได้อย่างชัดเจน

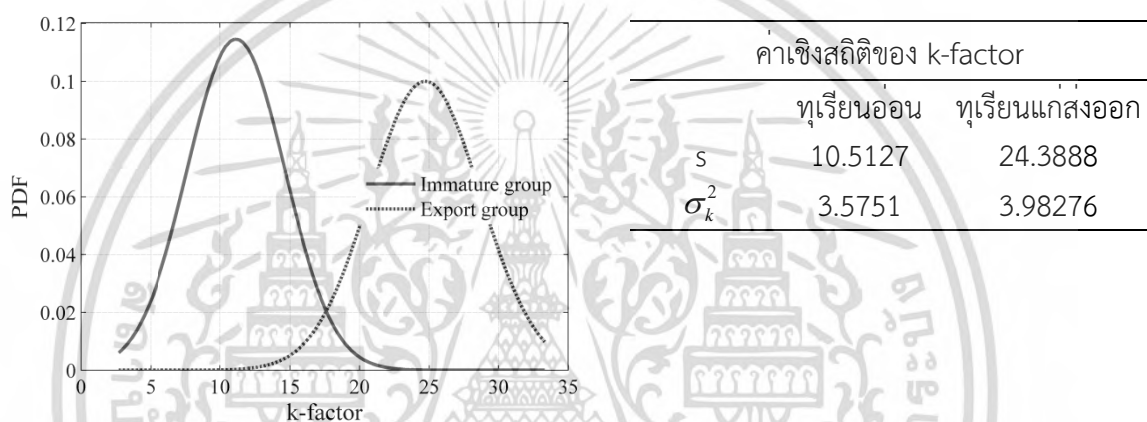


k-factor ของ $ S_{11} $		
	ทุเรียนอ่อน	ทุเรียนแก่ส่งออก
s	6.54415	29.1172
σ_k^2	0.98086	2.68091

รูปที่ 4.16 ค่า $|S_{11}|$ และค่า k-factor จากการจำลองการคัดแยกทุเรียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของการแบ่งระดับความแก่ของทุเรียนด้วยการใช้ k-factor การจำลองจึงแบ่งระดับความแก่หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของทุเรียนอย่างละเอียด โดยแบ่งออกกลุ่มทุเรียนอ่อนและกลุ่มทุเรียนแก่ส่งออก ซึ่งกลุ่มทุเรียนแก่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกอยู่ที่ 53 53.5 54 54.5 55 และกลุ่มทุเรียนอ่อนมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกอยู่ที่ 56 56.5 57 57.5 58 จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ของทั้ง 2 กลุ่ม มาพล็อตฮิสโทแกรม และคำนวณเส้นแนวโน้มด้วยฟังก์ชันไรเซชันและวิเคราะห์หาค่า k-factor ทั้งหมด 130 ค่า ซึ่งผลการเปรียบเทียบความแก่ของทุเรียนอ่อน (75 ลูก) และทุเรียนแก่ส่งออก (75 ลูก) ในรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของทุเรียนมีค่าเข้าใกล้กัน ประสิทธิภาพการคัดแยกอาจลดลงโดยมีความน่าจะเป็นความผิดพลาดเท่ากับ 4 ลูก จากทุเรียนจำลองทั้งหมด 130 ลูก หรือ 3.08% โดยที่ค่า k-factor ของกลุ่มทุเรียนอ่อนเฉลี่ยคือ 10.513 และของทุเรียนแก่ส่งออกเฉลี่ยคือ 24.389 ซึ่งมากกว่าทุเรียนอ่อน



รูปที่ 4.17 ค่า k-factor ของกลุ่มทุเรียนอ่อนและกลุ่มทุเรียนแก่

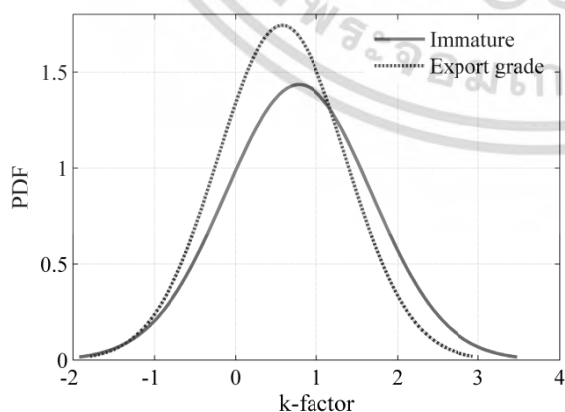
2) การจำลองการคัดแยกทุเรียนด้วย $|S_{21}|$

ขั้นตอนการจำลองค่า $|S_{21}|$ แบ่งทุเรียนออกเป็นกลุ่มตัวอย่างมีทั้งหมด 2 กลุ่มคือทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก และทำการจำลองการทำงานของระบบเซ็นเซอร์เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการคัดแยกทุเรียนแต่ละลูก โดยกลุ่มตัวอย่างของทุเรียนที่นำมาจำลอง มีตั้งแต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 เซนติเมตร ไปถึงขนาด 23 เซนติเมตร ซึ่งค่า $|S_{21}|$ จากสายอากาศที่ได้มีทั้งหมด 10 ค่า ต่อการวัดทุเรียน 1 ลูก จากทุเรียนทั้งหมด 26 ลูก โดยปรับเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวยาวของท่อทุกครั้งที่วัด ซึ่งค่าที่ได้ทั้งหมดของทุเรียนแต่ละลูกจะถูกนำหาค่า k-factor ในลักษณะเดียวกับ $|S_{11}|$ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การจำลองการคัดแยกทุเรียนด้วย $|S_{21}|$

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	k-factor	
	ทุเรียนอ่อน	ทุเรียนแก่ส่งออก
17	2.1716	2.3814
17.5	1.5352	1.8076
18	2.2416	1.1803
18.5	1.1887	0.8873
19	1.8271	0.5912
19.5	0.3830	0.3711
20	0.7469	0.1845
20.5	2.2070×10^{-6}	1.9497×10^{-7}
21	9.8464×10^{-7}	2.9915×10^{-6}
21.5	6.9519×10^{-7}	3.9619×10^{-8}
22	3.4902×10^{-6}	2.9318×10^{-6}
22.5	1.2607×10^{-5}	3.1504×10^{-6}
23	3.2210×10^{-7}	1.3686×10^{-7}

ค่า k-factor ของ $|S_{21}|$ ที่ได้จากทุเรียนแต่ละลูกถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเส้นแนวโน้มและฟังก์ชันไรเซชัน จากนั้นคำนวณหาค่า s และค่าความแปรปรวน เพื่อเปรียบเทียบระหว่างทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคัดแยกทุเรียน ซึ่งผลการเปรียบเทียบจะถูกนำมาพิจารณาและใช้เป็นข้อมูลเสริมในการตัดสินใจ จากข้อมูลที่ได้ของ $|S_{21}|$ ค่า s และค่าความแปรปรวนระหว่างทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออกจะให้ผลแตกต่างจาก $|S_{11}|$ คือ ค่า s และค่าความแปรปรวนของทุเรียนอ่อนจะสูงกว่าทุเรียนแก่ส่งออกจึงทำให้ค่า k-factor ของทุเรียนอ่อนมากกว่าทุเรียนแก่ส่งออกดังแสดงดังรูปที่ 4.18



	k-factor ของ $ S_{21} $	
	ทุเรียนอ่อน	ทุเรียนแก่ส่งออก
s	0.0575541	0.0372687
σ_k^2	0.820823	0.668692

รูปที่ 4.18 ค่า $|S_{21}|$ และค่า k-factor จากการจำลองการคัดแยกทุเรียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองการทำงาน นำค่า S พารามิเตอร์ที่ได้ มาพล็อตกราฟฮิสโทแกรมเพื่อนำมาวิเคราะห์หาเส้นแนวโน้มและค่า k-factor ของ $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ จากทั้ง 2 กรณี แสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน ระหว่างทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก และสามารถใช้บ่งชี้ให้เห็นถึงระดับความแก่ของทุเรียนได้

จากความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก จึงสามารถใช้ค่า k-factor นี้เพื่อแบ่งระดับความแก่ทุเรียนได้ แต่อย่างไรก็ตามในการจำลองของทุเรียนแต่ละลูก จะต้องถูกทดสอบด้วยการวัดหลายครั้งเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุม เช่นเดียวกับการวัดทุเรียนที่ผ่านเข้าไปในระบบเซ็นเซอร์ ทุเรียนอ่อนมีค่า k-factor จาก $|S_{11}|$ อยู่ที่ 5-8 ในขณะที่ทุเรียนแก่ส่งออกมีค่า k-factor จาก $|S_{11}|$ อยู่ที่ 25-32 ค่า k-factor เฉลี่ยของทุเรียนอ่อนและทุเรียนส่งออก มีค่า 6.693 และ 29.24 ตามลำดับ ค่า k-factor จากค่า $|S_{21}|$ ทุเรียนอ่อนมีค่า k-factor อยู่ที่ 3.22×10^{-7} - 2.24 ในขณะที่ทุเรียนแก่ส่งออกมีค่า k-factor จาก $|S_{21}|$ อยู่ที่ 3.96×10^{-8} - 2.38 ค่า k-factor เฉลี่ยของทุเรียนอ่อนและทุเรียนส่งออก มีค่า 0.831 และ 0.569 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.7

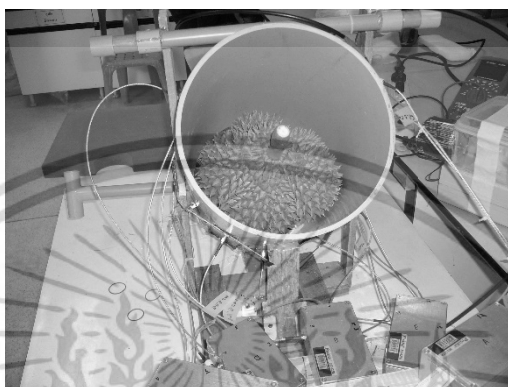
ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของ k-factors จาก $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ จากการจำลอง

ขนาดทุเรียนเฉลี่ย (เซนติเมตร)	k-factors			
	$ S_{11} $		$ S_{21} $	
	ทุเรียนอ่อน	ทุเรียนแก่ส่งออก	ทุเรียนอ่อน	ทุเรียนแก่ส่งออก
20	6.693	29.24	0.831	0.569

4.6 การสร้างระบบเซ็นเซอร์คัดแยกทุเรียน

ระบบเซ็นเซอร์คัดแยกทุเรียนเพื่อการส่งออกถูกสร้างในลักษณะเดียวกับการจำลองระบบในหัวข้อ 4.4 ซึ่งระบบจะ ประกอบด้วยท่อลำเลียงที่สร้างมาจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขอบด้านนอก 25 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร เอียง 45 องศาและสายอากาศโมโนโพล จำนวน 4 ตัว ทำงานที่ความถี่ 915 เมกะเฮิรตซ์ ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ Agilent N5182A MXG สร้างสัญญาณต่อเนื่อง ด้วยกำลังส่ง 10 dBm ไปยังคัปเปอร์แบบมีทิศทางเอาต์พุตของคัปเปอร์แบบมีทิศทาง จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายสัญญาณให้กับสายอากาศโมโนโพลตัวที่ 1 ที่อยู่รอบพื้นผิวด้านนอกของท่อลำเลียง จากนั้นกำลังงานถูกส่งผ่านไปยังผลทุเรียน ทำให้เกิดคลื่นตรง คลื่นสะท้อน และคลื่นเลี้ยวเบน ส่งออกไปยังสายอากาศโมโนโพลอีก 3 ตัว ที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับ อยู่โดยรอบท่อลำเลียง รวมถึงสายอากาศตัวที่ 2 ที่ใช้สำหรับวัดค่า $|S_{21}|$ ซึ่งจะอยู่ในตำแหน่งทำมุม 90 องศา กับสายอากาศตัวที่ 1 สายอากาศตัวที่ 2 ต่ออยู่กับอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงาน (RF detector) รุ่น MAX4003 สามารถตรวจจับกำลังงานได้ในช่วง -45 dBm ถึง 0 dBm ทำหน้าที่แปลงกำลังงานเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง โดยเอาต์พุตที่ได้จะมีขนาดอยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 0.2 โวลต์ ถึง 1.8 โวลต์ จากนั้นจะถูกส่งต่อเข้าอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ (MAX4475) เพื่อขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกแปลงเป็นสัญญาณเชิงดิจิตอลด้วยอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลขนาด 12 บิต แล้วถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ระดับความแก่ของทุเรียนต่อไป

ในการทดสอบผลทุเรียนตัวอย่างจะอยู่ข้างในท่อลำเลียงต้นแบบ และอยู่ด้านหน้าของสายอากาศตัวที่ 3 (port 3) ชายและขวา คือสายอากาศตัวที่ 2 และ 4 ตามลำดับ ท่อลำเลียงต้นแบบที่สร้างขึ้นนี้ บริเวณปลายด้านล่างของท่อถูกเจาะรูด้านข้างเพื่อใส่แท่งพลาสติกสำหรับกั้นลูกทุเรียนให้อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันทุกลูกขณะวัด หลังจากวัดเสร็จ แท่งพลาสติกจะถูกดึงออก เพื่อให้ทุเรียนไหลผ่านท่อลำเลียงออกทางด้านกลาง ท่อลำเลียงมีลักษณะเอียง 45 องศา กับแนวระดับ ถูกยึดด้วยฐานไม้ เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากการสั่นของคลื่นขณะทำการวัด แสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ระบบเซ็นเซอร์คัดแยกทุเรียน

ในการทดสอบระบบ ใช้ทุเรียนตัวอย่างจำนวน 50 ลูก ที่มีค่าน้ำหนักเฉลี่ย 3 กิโลกรัม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 เซนติเมตร และทดสอบระบบแล้วบันทึกค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ ที่ได้ นำค่ามาคำนวณหา k-factor เพื่อวิเคราะห์ค่าระดับสำหรับแบ่งแยกทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก

4.7 ผลการทดสอบระบบ

ขั้นตอนการทดสอบระบบเซ็นเซอร์คัดแยกทุเรียนเพื่อการส่งออก มีขั้นตอนดังนี้

1) เตรียมทุเรียนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ โดยเก็บทุเรียนมาจากสวนทุเรียนในจังหวัดชุมพร จำนวน 50 ลูก มีทั้งทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออกอย่างละ 25 ลูก ซึ่งผ่านการคัดแยกเบื้องต้นโดยชาวสวนผู้มีความชำนาญในการคัดแยกทุเรียน ทุเรียนตัวอย่างที่นำมาทำการทดสอบจะต้องทดสอบให้แล้วเสร็จภายใน 1 -2 วัน เพื่อไม่ให้ระดับความแก่ของทุเรียนตัวอย่างเปลี่ยนแปลง ทุเรียนแต่ละลูกจะมีหมายเลขระบุเฉพาะทุกลูก เพื่อนำข้อมูล S พารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดของทุเรียนแต่ละลูก เปรียบเทียบกับข้อมูลเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งของทุเรียนลูกนั้น

2) วางทุเรียนตัวอย่างลงในท่อลำเลียงทุเรียนต้นแบบที่สร้างขึ้น ทีละลูก สร้างสัญญาณต่อเนื่องความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่มีกำลังงาน 10 dBm ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ Agilent N5182A MXG เพื่อส่งสัญญาณไปยังคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง ผ่านไปยังสายอากาศตัวที่ 1 ทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง โดยกำลังงานที่ออกจากสายอากาศส่งจะถูกส่งไปยังสายอากาศตัวที่ 2 3 และ 4 ที่เป็นสายอากาศรับ

3) วัดค่ากำลังงานที่สะท้อนกลับของสายอากาศตัวที่ 1 ด้วยคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง ซึ่งค่าที่ได้คือค่า $|S_{11}|$ และวัดค่ากำลังงานที่รับได้จากสายอากาศตัวที่ 2 ซึ่งค่าที่ได้คือค่า $|S_{21}|$ โดยใน

ขั้นตอนการวัดทุเรียนตัวอย่างแต่ละลูก จะถูกเปลี่ยนตำแหน่งทั้งหมด 5 ครั้ง เช่นเดียวกับการจำลองการทำงาน จากนั้นบันทึกผลที่ได้จากการวัด

4) หากค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งของทุเรียนตัวอย่างทั้ง 50 ลูก เพื่อพิจารณาถึงระดับความแก่ของทุเรียน จากนั้นแบ่งทุเรียนออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก

5) จัดแบ่งกลุ่ม S พารามิเตอร์ที่วัดได้จากข้อ 3 ตามกลุ่มของทุเรียนที่จำแนกโดยค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งในข้อ 4 จะได้กลุ่ม S พารามิเตอร์ของทุเรียนอ่อน และกลุ่ม S พารามิเตอร์ของทุเรียนแก่ส่งออก แล้วนำ S พารามิเตอร์แต่ละกลุ่มมาพล็อตฮิสโทแกรม เพื่อหาเส้นแนวโน้มจากฟังก์ชันไรเซียน จากนั้นคำนวณหาค่า k-factor ด้วยค่าความแปรปรวนและค่า s ที่ได้จากเส้นแนวโน้ม

4.7.1 ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งของกลุ่มทุเรียนตัวอย่าง

การทดสอบหาค่าน้ำหนักแห้งของทุเรียนตัวอย่าง เพื่อแบ่งทุเรียนตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม ขั้นตอนการหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง คือ ตัดเนื้อทุเรียนให้มีขนาด 3 กรัม นำมาอบแห้งด้วยเตาอบลมร้อน (Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมงหรือจนกระทั่งค่าน้ำหนักคงที่ แล้วนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง ตามสมการที่ (4.3) – (4.4)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น} = (\text{นน.เริ่มต้น} - \text{นน.หลังอบ}) / \text{นน.เริ่มต้น} \times 100 \quad (4.3)$$

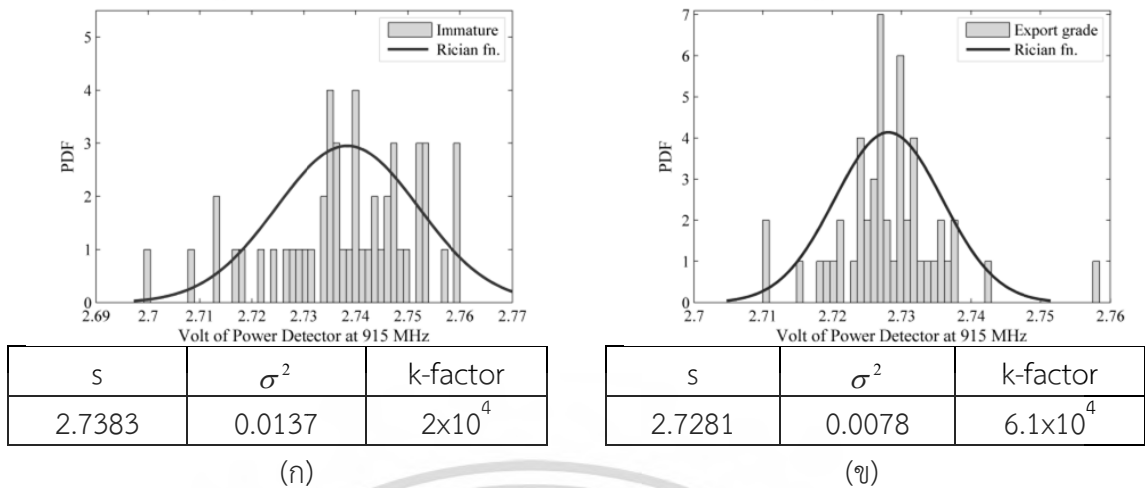
$$\text{ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง} = 100 - \text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น} \quad (4.4)$$

จากการทดสอบ ทุเรียนตัวอย่างจึงถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตามเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งของทุเรียน โดยกำหนดให้กลุ่ม A จัดเป็นกลุ่มของทุเรียนอ่อน และกลุ่ม B จัดเป็นกลุ่มของทุเรียนแก่ส่งออก โดยค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งของทุเรียนกลุ่ม A ที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 14.97 ถึง 34.72 และค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งของทุเรียนกลุ่ม B ที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 34.83 ถึง 40.8

4.7.2 ผลการทดสอบระบบ

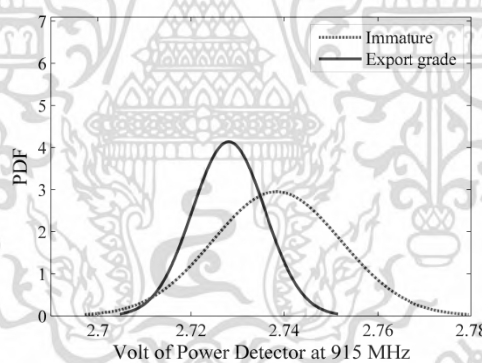
ค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ ของทุเรียนแต่ละลูกที่วัดได้จากระบบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้น นำมาเปรียบเทียบกับกลุ่มของทุเรียนตัวอย่างที่ถูกแบ่งที่ดูตามค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งไว้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่ม A ประกอบด้วยทุเรียนอ่อน 25 ลูก กลุ่ม B ประกอบด้วยทุเรียนแก่ส่งออก 25 ลูก เพื่อแบ่งกลุ่มค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ ของทุเรียนแต่ละลูก เป็นค่า $|S_{11}|$ และค่า $|S_{21}|$ ของทุเรียนกลุ่ม A และค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ ของทุเรียนกลุ่ม B จากนั้นนำข้อมูลมาพล็อตฮิสโทแกรม เพื่อหาเส้นแนวโน้มจากสมการฟังก์ชันไรเซียน แล้วคำนวณหาค่า k-factor ด้วยค่าความแปรปรวนและค่า s ที่ได้จากเส้นแนวโน้ม

ข้อมูล $|S_{11}|$ ของทุเรียนอ่อนกลุ่ม A และทุเรียนแก่ส่งออกกลุ่ม B ถูกนำการวิเคราะห์ด้วยการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability density function: PDF) และเส้นแนวโน้มด้วยฟังก์ชันไรเซียน ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ คือค่าความแปรปรวน ค่า s และ ค่า k-factor ของทุเรียนแต่ละกลุ่ม ซึ่งจากผลการวิเคราะห์สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างค่า s ของทุเรียนแต่ละกลุ่ม โดยกลุ่ม A มีค่า s อยู่ในช่วง 2.873 ซึ่งแตกต่างจากทุเรียนกลุ่ม B ที่ค่า s = 2.865 และค่า k-factor ของทุเรียนอ่อนกลุ่ม A มีค่า 2×10^4 และทุเรียนแก่ส่งออกกลุ่ม B มีค่า k-factor เป็น 6.1×10^4 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าทุเรียนอ่อนมีค่า s และ k-factor ที่แตกต่างจากทุเรียนแก่ส่งออก



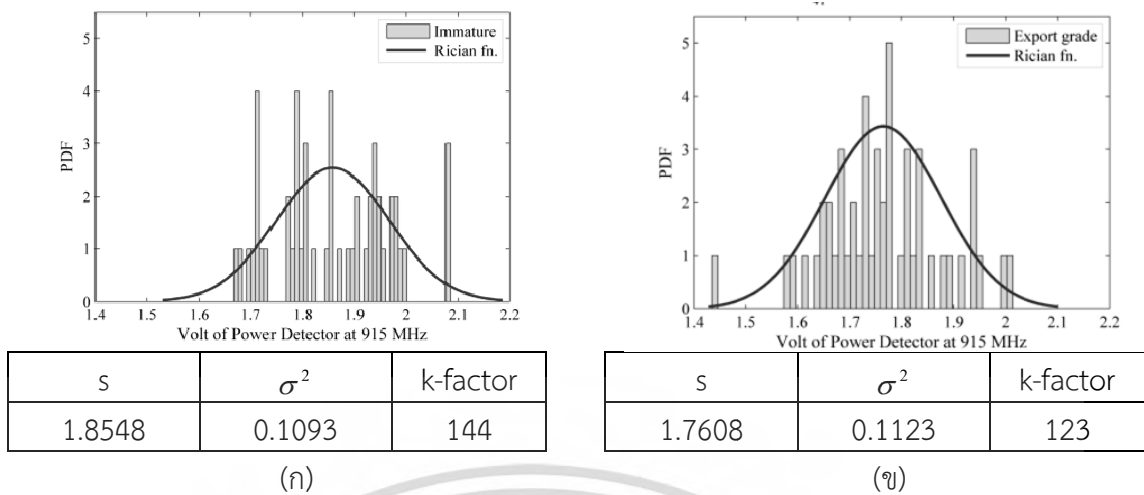
รูปที่ 4.20 ค่าความแปรปรวน ค่า s และ k-factor จากค่า $|S_{11}|$ (ก) ทูเรียนอ่อน
(ข) ทูเรียนแก่ส่งออก

จากข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ ($|S_{11}|$) ของทูเรียนกลุ่ม A และกลุ่ม B อยู่ในช่วง 2.69-2.77 โวลต์ และ 2.7-2.76 โวลต์ ตามลำดับ นำข้อมูลแรงดันไฟฟ้ามาคำนวณหาเส้นแนวโน้ม พบว่าเส้นแนวโน้มของทูเรียนทั้ง 2 กลุ่ม มีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 4.21



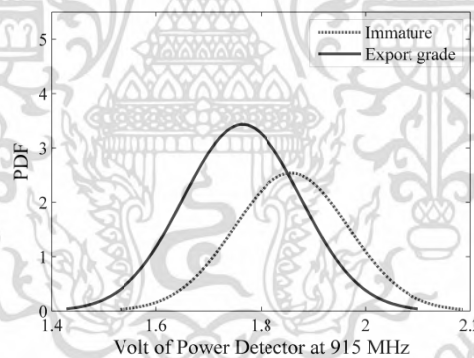
รูปที่ 4.21 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัด $|S_{11}|$ ของทูเรียน

ข้อมูล $|S_{21}|$ ทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ข้อมูล $|S_{11}|$ คือข้อมูลถูกวิเคราะห์ด้วยการแจกแจงความน่าจะเป็น และเส้นแนวโน้มด้วยฟังก์ชันไรเซียน ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์คือค่าความแปรปรวน ค่า s และ ค่า k-factor ของทูเรียนแต่ละกลุ่ม โดยกลุ่ม A มีค่า s อยู่ในช่วง 1.8548 ซึ่งแตกต่างชัดเจนเมื่อเทียบกับทูเรียนกลุ่ม B ที่ค่า s = 1.7608 และทูเรียนอ่อนกลุ่ม A มีค่า k-factor เป็น 144 และทูเรียนแก่ส่งออกกลุ่ม B มีค่า k-factor เป็น 123 ค่า k-factor ที่ได้จากข้อมูล $|S_{21}|$ เป็นข้อมูลสนับสนุน คือเมื่อค่า k-factor มากขึ้นค่าความแปรปรวนมีค่าลดลง จึงทำให้เกิดความแตกต่างของข้อมูลชัดเจนระหว่างกลุ่ม A เมื่อเทียบกับกลุ่ม B ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ค่าความแปรปรวน ค่า s และ k-factor จากค่า $|S_{21}|$ (ก) ทูเรียนอ่อน
(ข) ทูเรียนแก่ส่งออก

จากข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ ($|S_{21}|$) ของทูเรียนกลุ่ม A และกลุ่ม B อยู่ในช่วง 1.4 – 2.2 โวลต์ นำข้อมูลแรงดันไฟฟ้ามาคำนวณหาเส้นแนวโน้ม พบว่าเส้นแนวโน้มของทูเรียนทั้ง 2 กลุ่ม มีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัด $|S_{21}|$ ของทูเรียน

จากผลที่ได้จากการทดสอบสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับผลที่ได้จากการจำลอง นั่นคือ ทูเรียนแก่ส่งออกจะมีค่า k-factor ของ $|S_{11}|$ สูงกว่าทูเรียนอ่อน และสำหรับ $|S_{21}|$ ค่า k-factor ของ ทูเรียนแก่ส่งออกจะมีค่าต่ำกว่า ค่า k-factor ของทูเรียนอ่อน จากความแตกต่างของ ค่า k-factor ที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นได้ว่าพารามิเตอร์ S สามารถใช้คัดแยกความอ่อน-แก่ของทูเรียน โดย ความแตกต่างของ ค่า k-factor ของ $|S_{11}|$ สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนกว่าใน $|S_{21}|$ ซึ่งความแตกต่าง ที่ไม่ชัดเจนอาจเป็นผลมาจากขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันของทูเรียนตัวอย่าง ที่ใช้ในการทดลอง

จากผลการทดสอบการทำงานของระบบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้น กับทูเรียนตัวอย่างจำนวน 100 ลูก ที่แบ่งออกเป็นทูเรียนอ่อน 50 ลูก ทูเรียนแก่ส่งออก 50 ลูก จึงทำให้สามารถสรุปค่าเฉลี่ย k-factor ที่คำนวณได้จากค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ ระหว่างทูเรียนอ่อนและทูเรียนแก่ส่งออกได้ดังแสดงใน

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยของ k-factor จาก $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ จากการทดสอบ

ขนาดทุเรียนเฉลี่ย (เซนติเมตร)	k-factor			
	$ S_{11} $		$ S_{21} $	
	ทุเรียนอ่อน	ทุเรียนแก่ส่งออก	ทุเรียนอ่อน	ทุเรียนแก่ส่งออก
20	2×10^4	6.1×10^4	144	123

4.8 ระดับแบ่งแยกทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก

จากการทดสอบการทำงานของระบบเซ็นเซอร์พบว่าค่า k-factor ที่คำนวณได้จากค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ สามารถแบ่งแยกระดับความแก่ของทุเรียนได้ และสอดคล้องกับผลจากจำลอง ดังนั้นในการตัดสินใจเพื่อคัดระดับความแก่ของทุเรียน จึงใช้ค่า k-factor ที่คำนวณได้จากค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ การกำหนดเงื่อนไขในการตัดสินใจจากค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold) ความแก่ของ $|S_{11}|$ คือเมื่อค่า k-factor ของ $|S_{11}|$ ที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนคือทุเรียนอ่อน และสูงกว่าคือทุเรียนแก่ส่งออก เงื่อนไขสำหรับ $|S_{21}|$ คือเมื่อค่า k-factor ที่ได้จากการคำนวณสูงกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนคือทุเรียนอ่อน และต่ำกว่าคือทุเรียนแก่ส่งออก ซึ่งเริ่มต้นทดลองใช้เฉพาะค่า k-factor ของ $|S_{11}|$ ที่มีการกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนความแก่อย่างเหมาะสม ในการตัดสินใจคัดแยกความแก่ของทุเรียน ความแม่นยำอยู่ที่ 73.2% และเมื่อทดลองใช้ค่าเฉพาะค่า k-factor ของ $|S_{21}|$ ที่มีการกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนความแก่อย่างเหมาะสม ในการตัดสินใจคัดแยกความแก่ของทุเรียน ความแม่นยำอยู่ที่ 65.8% ซึ่งการคัดแยกโดยใช้เฉพาะค่า k-factor จาก $|S_{11}|$ หรือ $|S_{21}|$ เพียงค่าเดียว ความแม่นยำที่ได้ไม่ชัดเจน ดังนั้นการตัดสินใจของระบบเซ็นเซอร์จึงเลือกใช้ทั้งค่า k-factor จาก $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ มาตัดสินใจร่วมกัน โดยปรับเลือกค่าขีดเริ่มเปลี่ยนความแก่ จากค่า k-factor ที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการตัดสินใจคัดแยกทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบความแม่นยำที่แต่ละค่าขีดเริ่มเปลี่ยนความแก่

k-factor		ความแม่นยำ (%)
$ S_{11} $	$ S_{21} $	
2×10^4	123	92.2
3×10^4	128	92.7
4×10^4	133	87.8
5×10^4	138	85.4
6×10^4	143	86.1

การปรับค่าขีดเริ่มเปลี่ยนความแก่ค่า k-factor ของ $|S_{11}|$ อยู่ในช่วง 2×10^4 ถึง 6×10^4 โดยปรับครั้งละ 1×10^4 และการปรับค่าขีดเริ่มเปลี่ยนความแก่ค่า k-factor ของ $|S_{21}|$ อยู่ในช่วง 123-143 โดยปรับครั้งละ 5 และค่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการคัดแยกทุเรียนที่ได้จากการปรับค่าขีดเริ่มเปลี่ยนความแก่ อยู่ในช่วง 85.4% - 92.7% ซึ่งค่าขีดเริ่มเปลี่ยนความแก่ ของ $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ คือ 3×10^4 และ 128 ที่ให้ความแม่นยำ 92.7% ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้งาน

4.9 สรุป

ในบทนี้เป็นการศึกษาระบบเซ็นเซอร์สำหรับตรวจสอบและคัดทุเรียนอ่อนออกจากกลุ่มทุเรียนที่ส่งออกซึ่งเป็นสิ่งสำคัญ ขนาดและรูปร่างของทุเรียนเป็นสิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นการวัดในเชิงสถิติจึงถูกนำมาใช้เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากรูปร่างและเปลือก ซึ่งเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ ระบบเซ็นเซอร์ทำงานที่ความถี่ 915 เมกะเฮิรตซ์ ถูกออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับท่อลำเลียงทุเรียน เพื่อวัดค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ ที่ตำแหน่งการวัดทุเรียนแตกต่างกัน จากนั้นข้อมูลที่ได้ในเชิงสถิติ ถูกนำมาคำนวณหาค่า k-factor ความแตกต่างที่ชัดเจนของค่า k-factor สามารถนำมาใช้คัดแยกทุเรียนได้อย่างแม่นยำโดยความแม่นยำอยู่ที่ 92.7% และระบบเซ็นเซอร์สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมส่งออกทุเรียนได้ เนื่องจากมีต้นทุนในการสร้างต่ำ และเทคนิคนี้ยังสามารถนำไปใช้กับผลไม้ชนิดอื่นได้ เช่น แตงโมหรือส้มโอ เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ระบบคัดแยกทุเรียนย่านความถี่กว้างบนสายพานลำเลียง

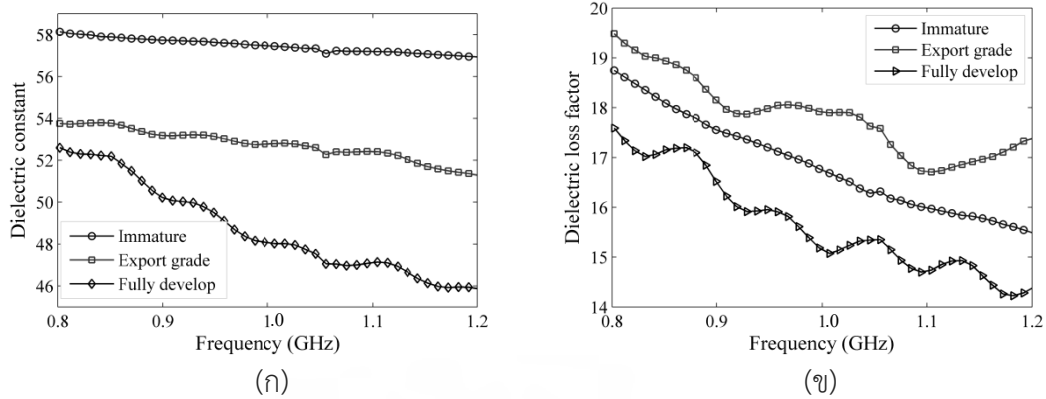
5.1 บทนำ

การคัดแยกทุเรียนอ่อนออกจากทุเรียนแก่ส่งออกอย่างต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแพร่กระจายคลื่น โดยทำงานที่ย่านความถี่แคบ (1 ความถี่) มีขีดจำกัดในการทำงานคือสามารถแยกความแตกต่างของทุเรียนได้ 2 ระดับคือ ทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก การพัฒนาให้ระบบเซ็นเซอร์มีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้นเพื่อให้สามารถแบ่งระดับความแก่ของทุเรียนได้อย่างละเอียดจึงเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจ จากข้อดีที่ความยาวคลื่นของความถี่ 915 เมกะเฮิรตซ์ มีขนาดกว้างมากกว่าขนาดของหนามทุเรียน จึงทำให้ความถี่ดังกล่าวเหมาะสมสำหรับการพัฒนาระบบเซ็นเซอร์ ดังนั้นในบทนี้จึงทำการวิจัยระบบคัดแยกทุเรียนย่านความถี่กว้างที่ครอบคลุมย่านความถี่ 915 เมกะเฮิรตซ์ โดยเลือกช่วงความถี่ 880 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 933 เมกะเฮิรตซ์ในการพัฒนา และเลือกใช้สายอากาศไดโพลแบบแพทช์เนื่องจากมีขนาดกะทัดรัด และสามารถทำงานได้ในย่านความถี่กว้าง ระบบเซ็นเซอร์มีระบบจำลองในลักษณะสายพานลำเลียงทุเรียนที่ถูกควบคุมด้วยสเต็มปีงมอเตอร์ เพื่อให้การวัดทุเรียนมีการปรับตำแหน่งการวัด ดังนั้นทุเรียนจึงถูกวัดทั้งลูกจากการเลื่อนของสายพานลำเลียง สายอากาศส่งทำงานที่ความถี่กว้างถูกติดตั้งอยู่ด้านข้างของสายพานลำเลียง ส่วนของสายอากาศรับทำงานที่ความถี่กว้างเช่นกัน จะถูกติดตั้งอยู่ด้านบนของสายพานลำเลียง ซึ่งสายอากาศถูกใช้เพื่อส่งและตรวจวัดระดับกำลังงานที่แตกต่างระหว่างทุเรียนอ่อน ทุเรียนแก่ส่งออก และทุเรียนสุก เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการคัดแยกทุเรียน ซึ่งจากเทคนิคดังกล่าว จึงทำการจำลองระบบด้วยโปรแกรมจำลองคาสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อเก็บข้อมูลของ S พารามิเตอร์ ในย่านความถี่กว้างรวมถึงการเลื่อนของทุเรียนบนสายพานลำเลียงขณะวัด ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดคือ $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ ในย่านความถี่กว้าง นำข้อมูลมาวิเคราะห์หาค่า k-factor เพื่อเป็นเกณฑ์สำหรับคัดระหว่างทุเรียนอ่อน ทุเรียนแก่ส่งออก และทุเรียนสุก จากนั้นทำการทดสอบระบบเซ็นเซอร์ต้นแบบด้วยโมเดลทุเรียนที่มีคุณสมบัติไดโพลทริกเช่นเดียวกับทุเรียน

5.2 การออกแบบสายอากาศและแบบจำลองทุเรียน

5.2.1 แบบจำลองทุเรียน

ทุเรียนจำลองถูกออกแบบให้มีขนาด รูปทรง และคุณสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อเลียนแบบทุเรียนจริง ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออกถูกนำเสนอในบทที่ 4 สำหรับทุเรียนสุกถูกวัดด้วยโพรบไดโพลทริก และเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (VNA) ซึ่งก่อนการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าเครื่องมือต้องได้รับการปรับเทียบก่อนทุกครั้ง ทุเรียนสุกถูกวัดในลักษณะเดียวกับทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ส่งออก

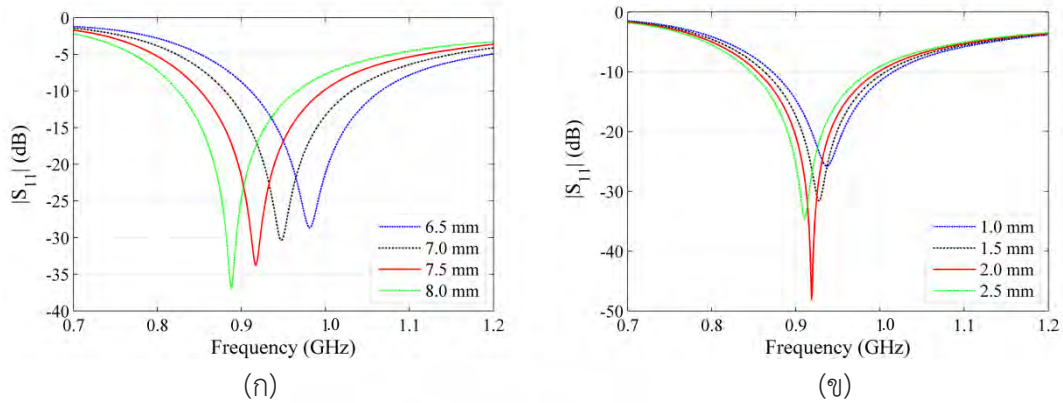


รูปที่ 5.1 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของทุเรียนสุก (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ข) ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก

จากการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของทุเรียนสุกมีค่า 50 และตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่า 16 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของทุเรียนสุกที่ได้จากการวัดถูกนำมาใช้เพื่อพัฒนาแบบจำลองทุเรียนสุกสำหรับทุเรียนอ่อนและทุเรียนแก่ มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 58 และ 53 ตามลำดับ และมีตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก 18 และ 17.5 ตามลำดับ ขนาดของทุเรียนจำลองถูกเฉลี่ยจากขนาดของทุเรียนจริง จึงได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร โครงสร้างและรูปร่างของทุเรียนจำลองถูกในลักษณะเดียวกับในบทที่ 4 แต่ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกจะมีความแตกต่างกันออกไปตามลักษณะความสุกของทุเรียน

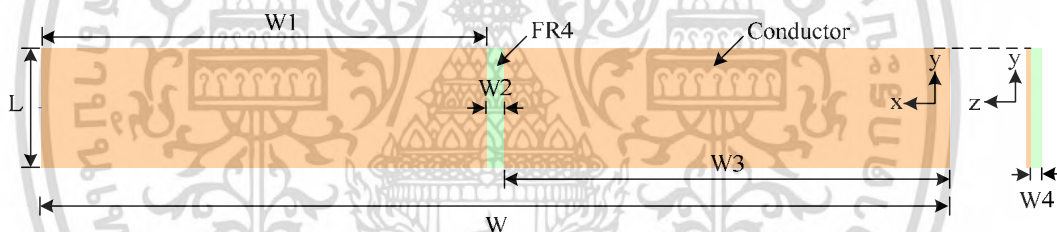
5.2.2 การออกแบบสายอากาศ

สายอากาศไดโพลถูกพัฒนาเพื่อนำมาใช้สร้างระบบเซ็นเซอร์สำหรับคัดแยกทุเรียนที่ถูกเลื่อนบนสายพานลำเลียงจำลอง สายอากาศถูกสร้างจากแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 4.3 หนา 1.441 มิลลิเมตร โดยมีทองแดงอยู่ด้านหน้าและหลัง หนา 0.0795 มิลลิเมตร การคำนวณขนาดของสายอากาศไดโพลที่ความถี่ 880 - 933 เมกะเฮิร์ตซ์ ทำได้โดยการคำนวณเริ่มต้นใช้ความถี่กลางคือ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีความยาวคลื่น 32.8 เซนติเมตร จากการคำนวณได้ความยาวของสายอากาศโดยประมาณ 7.5 เซนติเมตร ความกว้างของสายอากาศ 2 เซนติเมตร จากนั้นจึงจำลองการทำงานของสายอากาศไดโพลด้วยโปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้ขนาดโครงสร้างเบื้องต้นที่ได้จากการคำนวณ การจำลองมุ่งเน้นให้การทำงานของสายอากาศมีค่า $|S_{11}|$ ครอบคลุมในช่วงความถี่ 880 ถึง 933 เมกะเฮิร์ตซ์ ต่ำกว่า -10 dB การจำลองเริ่มต้นด้วยการปรับขนาดของสายอากาศจาก 6.5 ถึง 8 เซนติเมตร เพื่อวิเคราะห์การทำงานให้สามารถทำงานในช่วงความถี่ที่ต้องการ ดังนั้นความยาวที่เหมาะสมของสายอากาศคือ 7.5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.2 (ก) จากความยาวที่เหมาะสมของสายอากาศ ขั้นตอนต่อมาคือการปรับความกว้างที่ทำให้สายอากาศมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB การปรับความกว้างของสายอากาศเริ่มต้นที่ 1 เซนติเมตร ถึง 2.5 เซนติเมตร จากการวิเคราะห์ที่ขนาดความกว้างแต่ละขนาด ความกว้างที่เหมาะสมที่สุดคือ 2 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 5.2 (ข)



รูปที่ 5.2 ค่า $|S_{11}|$ เมื่อปรับขนาดของสายอากาศ (ก) ปรับความยาว (ข) ปรับความกว้าง

จำลองการทำงานของสายอากาศในช่วง 700 ถึง 1200 เมกะเฮิร์ตซ์ จากผลการจำลองสมรรถนะของสายอากาศไดโพล พบว่าสายอากาศทำงานในช่วงความถี่ 850 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 1,000 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ความถี่กลางคือ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ และมีแบนด์วิดท์ 16.7% โดยโครงสร้างของสายอากาศไดโพลแสดงในรูปที่ 5.3 จากสมรรถนะของสายอากาศที่ได้จากการจำลองสามารถนำไปใช้ออกแบบระบบเซ็นเซอร์ โดยขนาดความกว้างและความยาวที่เหมาะสมแสดงในตารางที่ 5.1

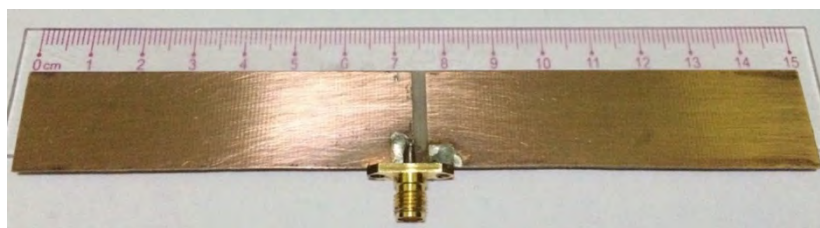


รูปที่ 5.3 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลจำลอง

ตารางที่ 5.1 ขนาดของสายอากาศไดโพล

W	W1	W2	W3	W4	L	หน่วย
15.3	7.5	0.3	7.5	0.1441	2	เซนติเมตร

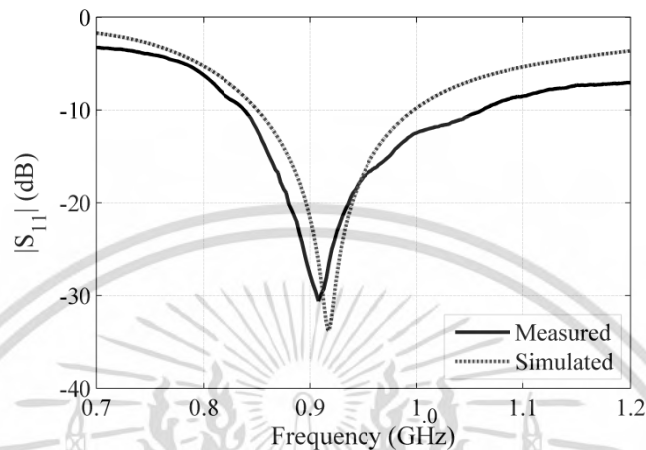
จากโครงสร้างและขนาดที่เหมาะสมของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง ขั้นตอนต่อมาคือนำโครงสร้างและขนาดที่ได้มาสร้างสายอากาศต้นแบบด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ 2 หน้า ชนิด FR4 ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 สายอากาศไดโพลต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ให้บุคคลภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต ผู้ใช้จะรับผิดชอบต่อความเสียหายที่เกิดขึ้น

เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายถูกนำมาใช้เพื่อทดสอบสมรรถนะของสายอากาศไดโพลต้นแบบ การทดสอบอยู่ในช่วงความถี่ 750 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 1200 เมกะเฮิร์ตซ์ เพื่อวิเคราะห์ค่าการสูญเสียย้อนกลับและการทำงานของสายอากาศก่อนนำไปใช้ในการสร้างระบบเซ็นเซอร์ จากนั้นนำผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลอง แสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศไดโพลต้นแบบเทียบกับผลการจำลอง

จากผลการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศไดโพลต้นแบบ แสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบ ให้ผลที่สอดคล้องกับผลจากการจำลอง โดยมีค่า $|S_{11}|$ น้อยกว่า -10 dB ที่ช่วงความถี่ 850 – 1,000 เมกะเฮิร์ตซ์

5.3 การจำลองการทำงานของระบบเซ็นเซอร์คัดแยกทุเรียน

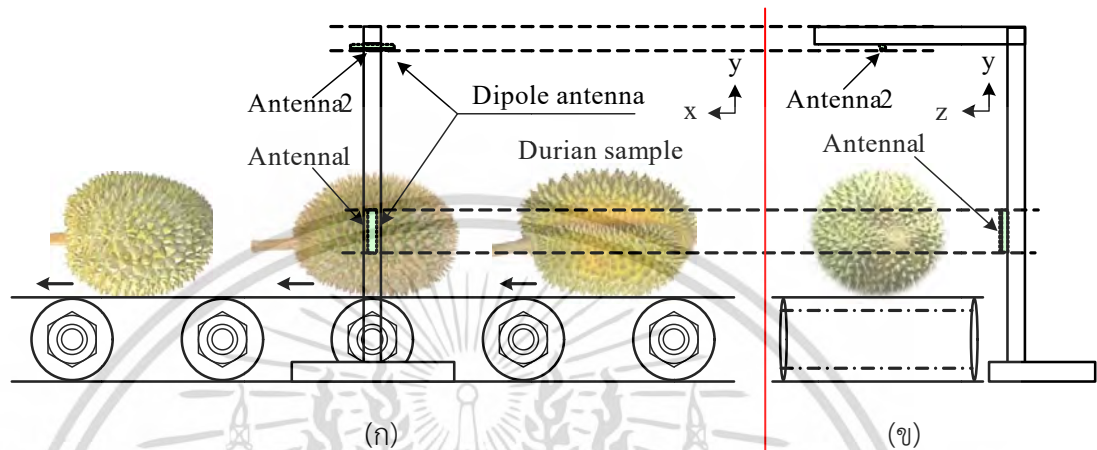
ระบบสายพานลำเลียงสำหรับทุเรียนในอุตสาหกรรมถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังนั้นการพัฒนาาระบบเซ็นเซอร์จึงให้ความสำคัญต่อการออกแบบและพิจารณาถึงความเหมาะสมในขั้นตอนการติดตั้งและการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรม ระบบเซ็นเซอร์ได้รับการออกแบบโดยใช้สายอากาศไดโพล 2 ตัว ติดตั้งสายอากาศตัวที่ 1 อยู่ด้านข้างของสายพานลำเลียง เพื่อใช้สำหรับส่งสัญญาณและใช้สำหรับวัดค่า $|S_{11}|$ สายอากาศตัวที่ 2 ถูกติดตั้งอยู่ด้านบนของโมเดลทุเรียนและสายพานลำเลียงถูกใช้รับคลื่นสะท้อนจากสายอากาศตัวที่ 1 ที่ผ่านจากการวัดแบบจำลองทุเรียนเพื่อวัดค่า $|S_{21}|$ จากนั้นข้อมูลทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์และตัดสินใจเพื่อแบ่งระดับความแก่ของแบบจำลองทุเรียน

5.3.1 การจำลองการทำงานของระบบ

การทำงานของระบบเซ็นเซอร์อยู่ในย่านความถี่กว้าง 880 – 933 เมกะเฮิร์ตซ์ สายอากาศส่งคือสายอากาศตัวที่ 1 จะทำหน้าที่ส่งสัญญาณ ตั้งแต่ 880.25 881.5 882.75... 932.75 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยทำการปรับความถี่เพิ่มครั้งละ 1.25 เมกะเฮิร์ตซ์ ทั้งหมด 43 ความถี่ สัญญาณความถี่ทั้งหมดจะถูกส่งออกจากสายอากาศส่ง และกระทบกับแบบจำลองทุเรียนทำให้เกิดคลื่นการสะท้อน ส่งผ่าน และเลี้ยวเบน จากนั้นคลื่นจะส่งต่อไปยังสายอากาศรับคือสายอากาศตัวที่ 2 ซึ่งสายอากาศตัวที่ 2 จะทำหน้าที่รับสัญญาณที่ผ่านการวัดแบบจำลองทุเรียน สายอากาศทั้ง 2 ตัว ติดตั้งอยู่ห่างจากแบบจำลองทุเรียนเป็นระยะ 15 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระยะสนามระยะไกลของสายอากาศ วิธีการวัดคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

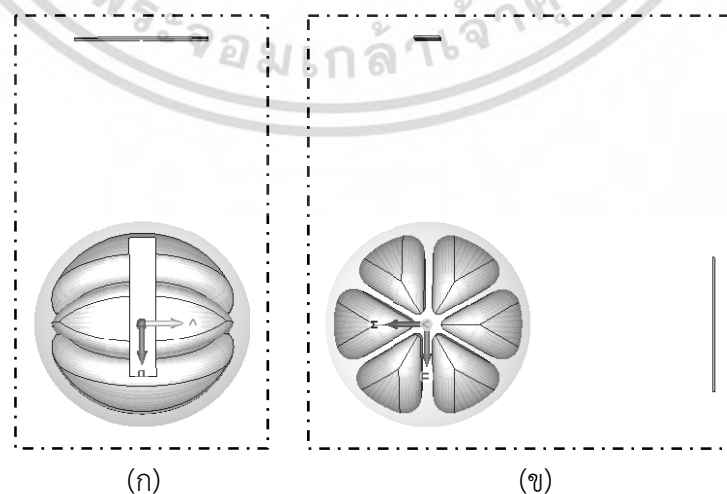
เมื่อแบบจำลองทุเรียนถูกเลื่อนมาตามสายพานลำเลียง ระบบเซ็นเซอร์จะทำการวัดสัญญาณสะท้อนและเลี้ยวเบนจากแบบจำลองทุเรียน โดยเริ่มตั้งแต่ส่วนหัวของแบบจำลองทุเรียนจากนั้นไปยังกลางแบบจำลองทุเรียนและวัดไปถึงส่วนท้ายของแบบจำลองทุเรียน ซึ่งการวัดจะวัดตามแนวการเคลื่อนของสายพานลำเลียง การวัดแต่ละครั้งจะวัดทั้งหมด 43 ความถี่ การวัดตามแนวยาวของสายพานลำเลียงในลักษณะนี้มีข้อดีคือ สามารถติดตั้งระบบเซ็นเซอร์ได้อย่างสะดวกและต้นทุนในการติดตั้งต่ำ



รูปที่ 5.6 โครงสร้างจำลองของระบบเซ็นเซอร์ (ก) ด้านข้าง (ข) ด้านหลัง

5.3.2 ผลการจำลองการทำงาน

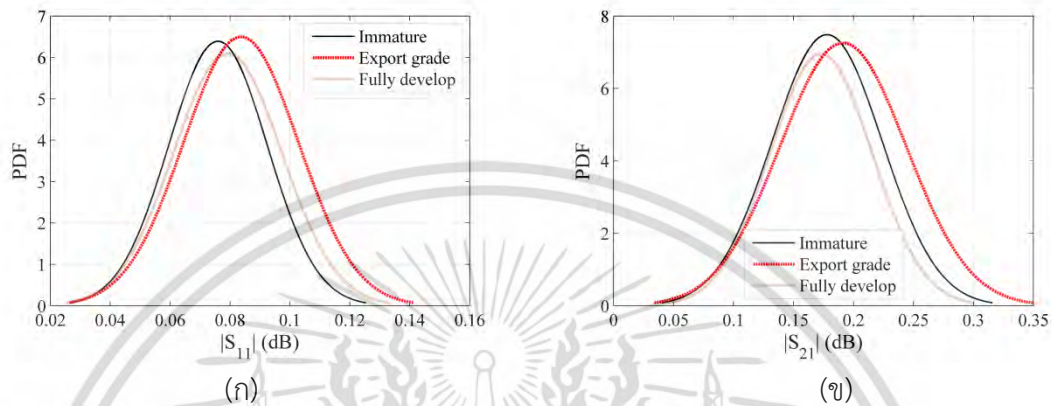
การจำลองการทำงานของระบบเซ็นเซอร์ด้วยโปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ การวัดโมเดลทุเรียนตามแนวความยาวของสายพานลำเลียงทุเรียน โดยที่แบบจำลองทุเรียนเคลื่อนที่ไหลตามสายพานลำเลียง จากนั้นเมื่อมาถึงเซ็นเซอร์ แบบจำลองทุเรียนจะถูกวัด อย่างต่อเนื่องจนแบบจำลองทุเรียนเลื่อนพ้นตำแหน่งของการวัด การวัดแบบจำลองทุเรียนแต่ละลูก แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ การวัดแบบจำลองทุเรียนด้วยการเปลี่ยนความถี่ในช่วง 880 – 933 เมกะเฮิรตซ์ (43 ความถี่) และวัดแบบจำลองทุเรียนด้วยการเปลี่ยนตำแหน่ง จำนวน 50 ตำแหน่ง ตามแนวยาวของแบบจำลองทุเรียน ที่ความถี่ 915 เมกะเฮิรตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แบบจำลองการทำงานของระบบเซ็นเซอร์ (ก) ด้านข้าง (ข) ด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองระบบแบ่งออกเป็นกลุ่มของแบบจำลองทุเรียนอ่อน แบบจำลองทุเรียนแก่ และแบบจำลองทุเรียนสุก ซึ่งจากข้อมูลที่ได้ คือ ค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ ของแบบจำลองทั้ง 3 กลุ่ม จะถูกนำมาพล็อตกราฟฮิสโทแกรมและวิเคราะห์เส้นแนวโน้มด้วยฟังก์ชันไรเซชัน จากนั้นคำนวณหาค่าความแปรปรวนและขนาดของแฉกในระดับสายตา ลักษณะเดียวกับบทที่ 4 แล้วคำนวณหาค่า k-factor จากการเปลี่ยนตำแหน่งและการเปลี่ยนความถี่ ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 ตามลำดับ

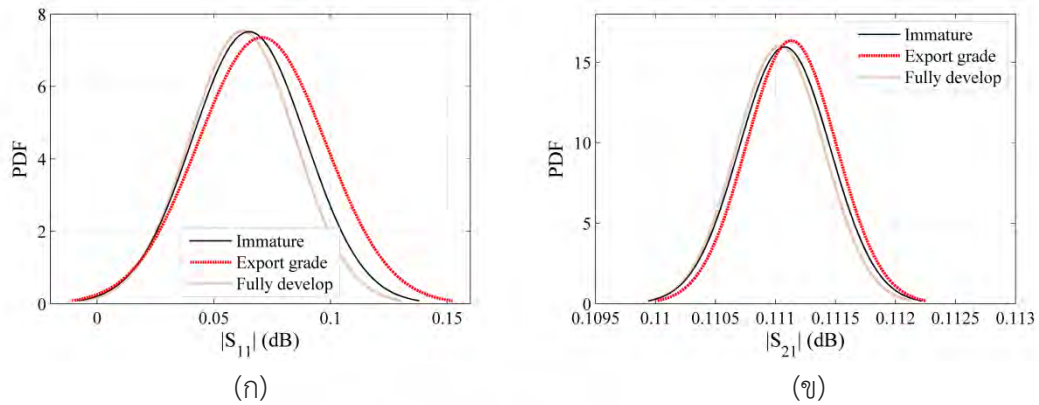


รูปที่ 5.8 การแจกแจงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนตำแหน่ง (ก) $|S_{11}|$ (ข) $|S_{21}|$

ตารางที่ 5.2 ผลการจำลองการวัดแบบจำลองทุเรียนด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งที่ความถี่ 915 เมกะเฮิรตซ์

	k-factor		
	แบบจำลองทุเรียนอ่อน	แบบจำลองทุเรียนแก่	แบบจำลองทุเรียนสุก
$ S_{11} $	200.58	186.35	173.27
$ S_{21} $	14.14	13.94	13.76

ค่า k-factor ที่คำนวณจาก $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ ของการจำลองการวัดด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งของโมเดลทั้ง 3 กลุ่ม จะมีค่าลดลงเมื่อระดับความแก่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าค่า k-factor ของแบบจำลองทุเรียนอ่อนจะมีค่ามากกว่า แบบจำลองทุเรียนแก่ และแบบจำลองทุเรียนสุก เมื่อนำค่า k-factor ที่ได้จากค่า $|S_{11}|$ มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง เมื่อระดับความแก่เพิ่มขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงคำนวณจากความแตกต่างของค่า k-factor ระหว่างระดับความแก่ที่ต้องการเปรียบเทียบกับค่า k-factor ของระดับความแก่ที่ต้องการทราบความเปลี่ยนแปลง พบว่าค่า k-factor มีค่าลดลง 7.09% และ 7.02% ตามลำดับ เฉลี่ยอยู่ที่ 7.05% ส่วนค่า k-factor ที่ได้จากค่า $|S_{21}|$ มีค่าลดลง 1.41% และ 1.29% ตามลำดับ เฉลี่ยอยู่ที่ 1.35% ดังนั้นค่า k-factor ที่ได้จากค่า $|S_{11}|$ ของการเปลี่ยนตำแหน่งมีความแตกต่างกันมากกว่า จึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้แบ่งระดับความแก่ของโมเดล และค่า $|S_{21}|$ สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเสริมเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการแบ่งระดับความแก่ของโมเดลทุเรียน



รูปที่ 5.9 การแจกแจงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนความถี่ (ก) $|S_{11}|$ (ข) $|S_{21}|$

ตารางที่ 5.3 ผลการจำลองการวัดแบบจำลองทุเรียนด้วยการเปลี่ยนความถี่

	k-factor		
	แบบจำลองทุเรียนอ่อน	แบบจำลองทุเรียนแก่	แบบจำลองทุเรียนสุก
$ S_{11} $	7.06	6.84	6.73
$ S_{21} $	1.88×10^4	1.75×10^4	1.66×10^4

ผลที่ได้จากการจำลองการวัดด้วยการเปลี่ยนความถี่ของแบบจำลองทุเรียนทั้ง 3 กลุ่ม ค่า k-factor ของแบบจำลองทุเรียนอ่อนมีค่ามากกว่าแบบจำลองทุเรียนแก่และแบบจำลองทุเรียนสุก โดยเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้ง $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ ในกรณีของค่า k-factor ที่ได้จากค่า $|S_{21}|$ มีค่าสูง เนื่องจากระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้ง 2 ตัวมีระยะห่างมาก ดังนั้นกำลังงานที่รับได้สายอากาศตัวที่ 2 จึงมีค่าน้อย ทำให้ค่าความแปรปรวนที่เกิดจากความถี่มีผลน้อย ส่งผลให้ค่า k-factor มีค่าสูง ในการออกแบบระบบเซ็นเซอร์จึงควรใช้อุปกรณ์ขยายกำลังงานในภาคส่งของระบบเซ็นเซอร์ เมื่อนำค่า k-factor ที่ได้จากค่า $|S_{11}|$ มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง พบว่าค่า k-factor มีค่าลดลง 3.06% และ 1.61% ตามลำดับ เฉลี่ยอยู่ที่ 2.33% ส่วนค่า k-factor ที่ได้จากค่า $|S_{21}|$ มีค่าลดลง 6.91% และ 5.14% ตามลำดับ เฉลี่ยอยู่ที่ 6.03% แสดงให้เห็นว่า ค่า k-factor ที่ได้จากค่า $|S_{21}|$ สามารถนำไปใช้แบ่งระดับความแก่ของแบบจำลองทุเรียนได้ชัดเจนมากกว่าค่า k-factor ที่ได้จากค่า $|S_{11}|$ แต่ค่า $|S_{11}|$ สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเสริมในการแบ่งระดับความแก่ของแบบจำลองทุเรียน

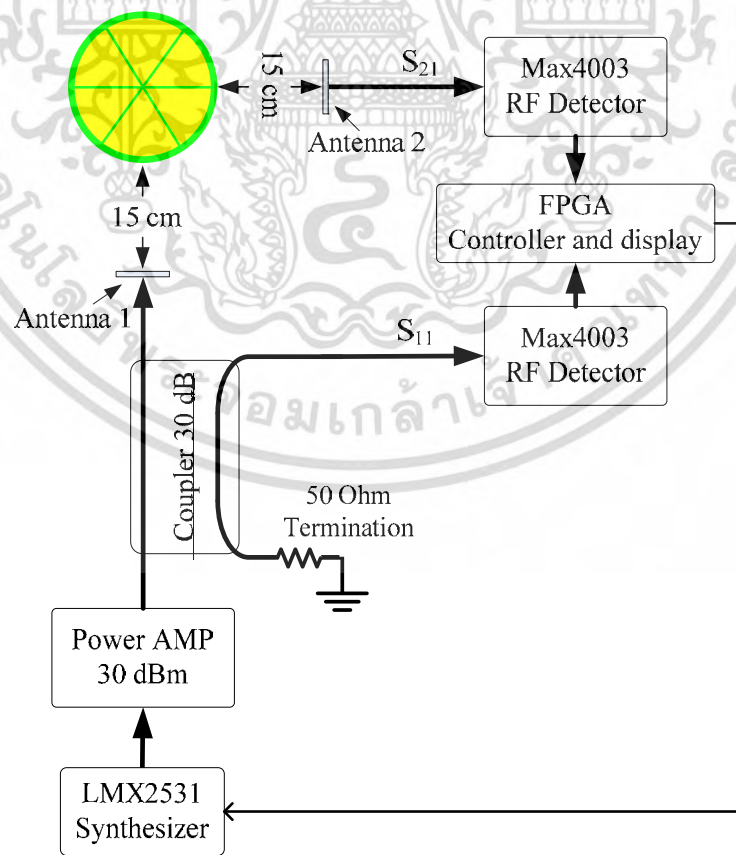
การวัดแบบจำลองทุเรียนโดยใช้การเปลี่ยนตำแหน่ง และการวัดแบบจำลองทุเรียนโดยเปลี่ยนความถี่กว้างในช่วง 880.25 - 932.75 เมกะเฮิรตซ์ ในตารางที่ 5.2 และ 5.3 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่า k-factor ระหว่างแบบจำลองทุเรียนอ่อน แบบจำลองทุเรียนแก่และแบบจำลองทุเรียนสุก เมื่อเปรียบเทียบค่า k-factor ที่ได้จากการจำลองการคัดแยกแบบจำลองทุเรียน แสดงให้เห็นว่าค่า k-factor ที่ได้จากการวัดโดยเปลี่ยนตำแหน่ง มีความชัดเจนในกรณีของ $|S_{11}|$ มากกว่าในกรณีของค่า k-factor จากค่า $|S_{21}|$ ของการเปลี่ยนตำแหน่ง และค่า k-factor จากค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ ของการเปลี่ยนความถี่ มีความแตกต่างระหว่างแบบจำลองทุเรียนทั้ง 3 กลุ่มเช่นกัน แต่ไม่ชัดเจนเท่ากับในกรณีของค่า k-factor จากค่า $|S_{11}|$ ในการเปลี่ยนตำแหน่ง ดังนั้นการวัดทั้ง 2 แบบจึงมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถแบ่งระดับความแก่ของทุเรียนด้วยค่า k-factor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

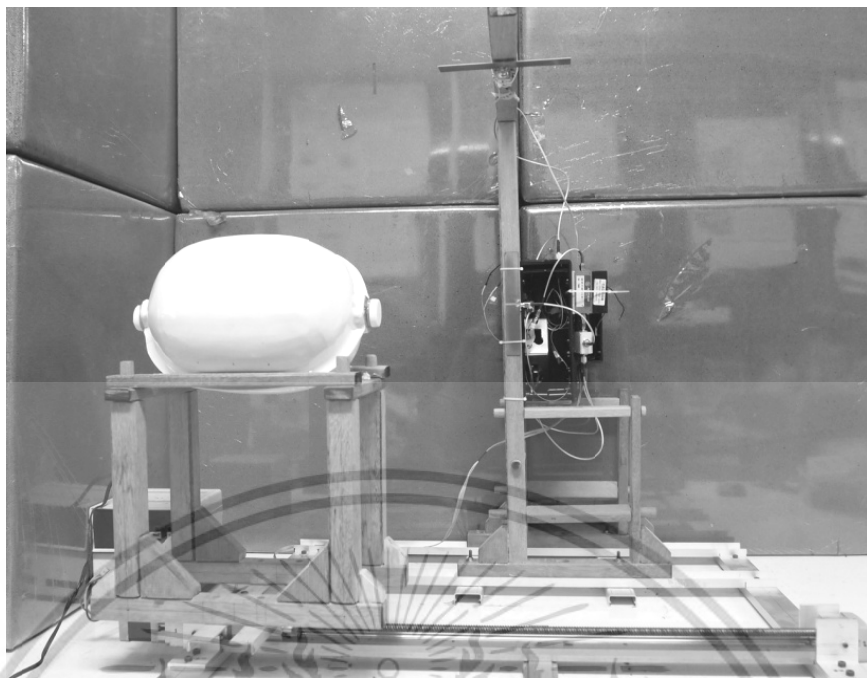
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การสร้างระบบเซ็นเซอร์

จากการจำลองระบบเซ็นเซอร์ที่สามารถคัดแยกได้อย่างต่อเนื่อง นำมาสร้างเป็นระบบเซ็นเซอร์ต้นแบบ เช่นเดียวกับโครงสร้างที่ใช้ในการจำลองการทำงาน โดยระบบเซ็นเซอร์ที่สร้างประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนของสายพานลำเลียงจำลองถูกสร้างมาจากสเตปป์มอเตอร์ ทำหน้าที่ควบคุมสายพานลำเลียงให้เลื่อนด้วยความเร็วคงที่ และส่วนของสายอากาศ ที่ประกอบด้วยสายอากาศไดโพล 2 ตัว สายอากาศตัวที่ 1 ติดตั้งอยู่ด้านข้างของสายพานลำเลียง ทำหน้าที่ส่งสัญญาณที่สร้างจากอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณ (LMX 2531) [67] ความถี่ 880 – 933 เมกะเฮิร์ตซ์ ไปยังอุปกรณ์ขยายกำลังงาน (MITEQ AMF-3F-00820096-14-30P-1) มีอัตราขยาย 45 dB ให้กำลังงานสูงสุดที่ 30 dBm ทนความร้อนได้สูงสุด 65 °C [68] ผ่านคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง (Mini circuits ZFDC-20-50-S+) ทำงานได้ที่ความถี่ 20-2,000 เมกะเฮิร์ตซ์ [69] แล้วส่งออกไปยังสายอากาศตัวที่ 2 ที่สายอากาศรับ ติดตั้งอยู่ด้านบนของสายพานลำเลียง ต่ออยู่กับอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงาน (Mini circuits ZX47-60LN-S+) ตรวจสอบกำลังงานได้ในช่วง 10 ถึง 8,000 เมกะเฮิร์ตซ์ ทนความร้อนได้ 85 °C สามารถตรวจจับกำลังงานได้ในช่วง -60 ถึง 5 dBm [70] ทำหน้าที่แปลงกำลังงานเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกแปลงเป็นสัญญาณเชิงดิจิทัลด้วยอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล 12 บิต ที่ถูกฝังอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ [71] จากนั้นข้อมูลดิจิทัลจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่า k-factor ด้วยอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ แผนผังระบบเซ็นเซอร์ แสดงดังรูปที่ 5.10 และรูปถ่ายของระบบเซ็นเซอร์ต้นแบบที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.11



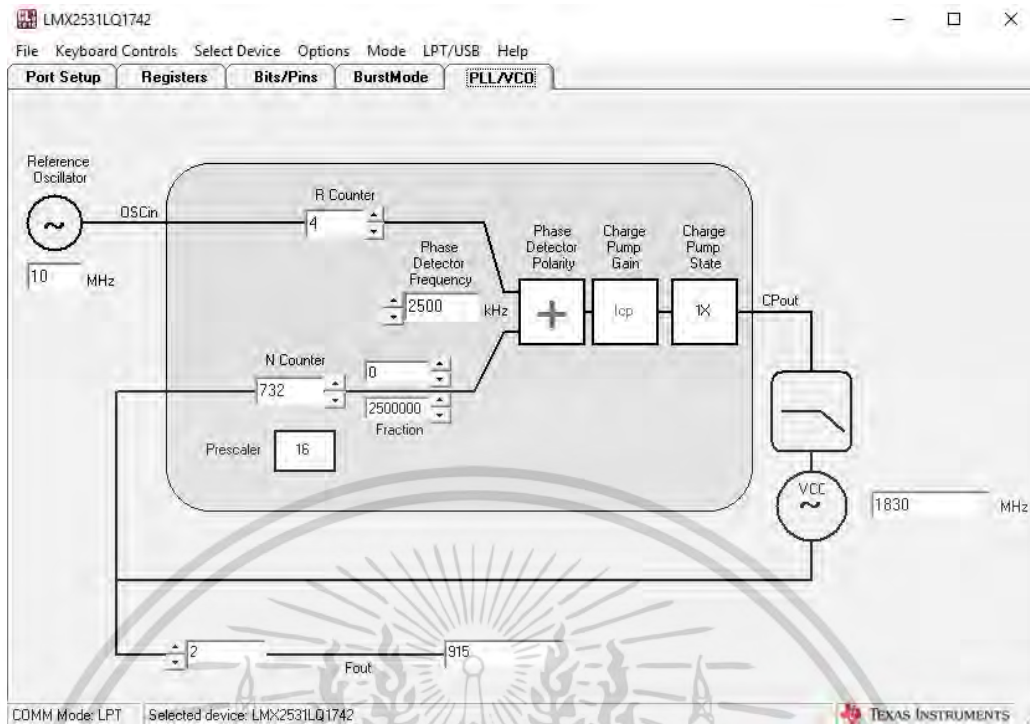
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนตัวเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 ระบบเซ็นเซอร์ต้นแบบ

5.4.1 การควบคุมอุปกรณ์สร้างสัญญาณความถี่กว้าง

อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ถูกใช้เพื่อควบคุมอุปกรณ์สร้างสัญญาณความถี่กว้าง LMX2531LQ1742 ซึ่งสามารถสร้างสัญญาณได้ในช่วงความถี่ 880 ถึง 933 เมกะเฮิร์ตซ์ การควบคุมสามารถทำได้โดยการส่งสัญญาณดิจิทัลแบบขนาน 4 ข้อมูล ที่สร้างจากอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ที่ประกอบด้วยขา LE CE CLK และ Data ข้อมูลสัญญาณของ LE ปกติจะเป็น 1 และจะเป็น 0 เมื่อทำการส่งข้อมูลไปควบคุมการสร้างสัญญาณความถี่ ข้อมูลสัญญาณของ CE ปกติมีค่าเป็น 1 แต่เมื่อต้องการหยุดส่งสัญญาณความถี่ที่สร้างขึ้น CE จะต้องกำหนดให้เป็น 0 ข้อมูลของ CLK ถูกสร้างขึ้นเพื่อควบคุมการทำงานของการทำงานของการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมและอุปกรณ์สร้างสัญญาณความถี่กว้างให้มีความแม่นยำในการสื่อสาร ความถี่สูงสุดที่สามารถสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพคือ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ข้อมูลที่สำคัญที่สุดคือ Data เนื่องจากเป็นข้อมูลที่ถูกใช้เพื่อกำหนดความถี่และความแรงของสัญญาณความถี่ ข้อมูลของ Data ประกอบด้วย R1 R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 และ R12 การสร้าง Data เพื่อควบคุมความถี่และกำลังงานเบื้องต้นถูกสร้างจากโปรแกรม CodeLoader4 ของบริษัท Texas Instruments โปรแกรมถูกติดตั้งบนคอมพิวเตอร์ เพื่อหาข้อมูลสำหรับควบคุมอุปกรณ์สร้างสัญญาณความถี่กว้าง เริ่มต้นจากการกำหนดความถี่อินพุต 10 เมกะเฮิร์ตซ์ สำหรับอุปกรณ์สร้างสัญญาณ จากนั้นทำการปรับ N Counter เพื่อให้ได้ความถี่ตามต้องการ ในกรณีเริ่มต้นกำหนดความถี่ที่ต้องการไว้ที่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ แสดงในรูป 5.12



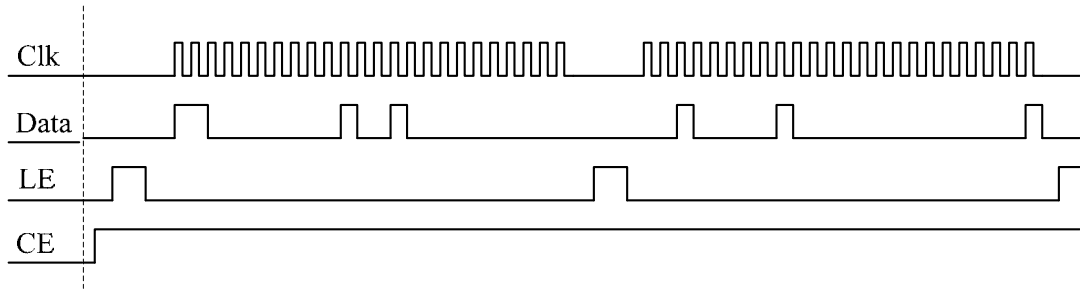
รูปที่ 5.12 การสร้างข้อมูลสำหรับควบคุมความถี่ [72]

เมื่อกำหนดความถี่ที่ต้องการ ค่า R ทั้งหมดจะถูกสร้างด้วยโปรแกรม CodeLoader4 จากนั้นจึงนำไปใช้งาน โดยกำหนด

ค่า R0 คือ 0011000000001001000000000000
 ค่า R1 คือ 00001000001000000000000000100
 ค่า R2 คือ 0001010110100000000100001000
 ค่า R3 คือ 0011101100001001100010001100
 ค่า R4 คือ 00000000000000000000000010000
 ค่า R5 คือ 0010000000000000111111010100
 ค่า R6 คือ 0000001000111001100101011000
 ค่า R7 คือ 000000000000000010000011100
 ค่า R8 คือ 0000000011000000000000100000
 ค่า R9 คือ 0000000000000010111010100100
 ค่า R12 คือ 0000000001000001001000110000

ค่า R0 เป็นข้อมูลที่ใช้กำหนดความถี่ตั้งนั้นค่า R0 จึงต้องเปลี่ยนทั้งหมด 43 ครั้ง เพื่อให้อุปกรณ์สร้างสัญญาณความถี่กว้างเปลี่ยนความถี่ ตั้งนั้นเมื่อต้องการให้ความถี่เปลี่ยนเป็น 880.25 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่า R0 จะมีค่าเป็น 0011000000001001000000000000 และเมื่อความถี่เปลี่ยนเป็น 881.50 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่า R0 จะเป็น 0011000001000100100000000000 และที่ความถี่สุดท้ายคือ 932.75 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่า R0 จะเป็น 0011101010000100100000000000 แต่สำหรับค่า R ตัวอื่นๆ ไม่ต้องเปลี่ยนแปลง เมื่อต้องการเปลี่ยนความถี่ ซึ่งตัวอย่างแผนผังการเปลี่ยนแปลงสถานะของลอจิกสำหรับควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สร้างสัญญาณความถี่กว้างแสดงในรูปที่ 5.13

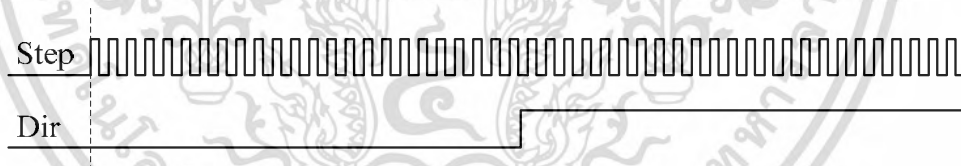
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 แผนผังการเปลี่ยนแปลงสถานะของลอจิกการควบคุมอุปกรณ์สร้างสัญญาณความถี่กว้าง

5.4.2 การควบคุมระบบสายพานลำเลียง

ระบบสายพานลำเลียงถูกสร้างจากสเต็ปปีงมอเตอร์ที่ถูกควบคุมจากอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ โดยการทำงานของสเต็ปปีงมอเตอร์จะเคลื่อนย้ายทุเรียนอย่างแม่นยำและมีความเร็วคงที่ในการเปลี่ยนตำแหน่งทุเรียน ดังนั้นการวัดทุเรียนขณะเคลื่อนที่แต่ละครั้งจึงลดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการวัดได้เป็นอย่างดี สเต็ปปีงมอเตอร์ที่ใช้ในงานนี้เป็นแบบไบโพลาร์ (Bipolar) 2 เฟส 4 สาย แรงดันที่ใช้งานคือ 15 โวลต์ ต้องการกระแสไม่เกิน 2 แอมแปร์ การควบคุมการทำงานของสเต็ปปีงมอเตอร์คือป้อนสัญญาณนาฬิกาเข้าที่ขา Step ซึ่งสามารถควบคุมความเร็วได้ตามความต้องการ ความเร็วในการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณนาฬิกา ที่ความถี่สูงสเต็ปปีงมอเตอร์จะหมุนเร็ว ที่ความถี่ต่ำจะหมุนช้า สำหรับการหมุนซ้ายหรือหมุนขวา สามารถควบคุมได้จากขา Dir โดยการป้อนสัญญาณลอจิก 0 หรือ 1 ในกรณีที่ต้องการให้สเต็ปปีงมอเตอร์หมุนไปทางด้านขวาต้องป้อนลอจิก 0 และถ้าต้องการให้หมุนซ้ายต้องป้อนลอจิก 1 ตัวอย่างการควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์แสดงในลักษณะแผนผังการเปลี่ยนแปลงสถานะของลอจิกดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 แผนผังการเปลี่ยนแปลงสถานะของลอจิกการควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์

5.5 การทดสอบระบบเซ็นเซอร์

การทดสอบระบบเซ็นเซอร์ด้วยโมเดลทุเรียนที่สร้างขึ้น โดยเลือกทุเรียนจำลองที่สร้างจากแผ่นพลาสติกสำหรับขึ้นรูปมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 4 เนื้อทุเรียนสร้างจากน้ำเชื่อมที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกใกล้เคียงกับเนื้อทุเรียนอ่อน แก่ และสุก จากนั้นบันทึกผลที่ได้จากการวัด และนำค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ ที่ได้จากโมเดลที่สร้างขึ้นแต่ละกลุ่มมาพล็อตฮิสโทแกรม เพื่อหาเส้นแนวโน้มของฟังก์ชันโรเซียน จากนั้นคำนวณหาค่า k-factor ด้วยค่าความแปรปรวนและค่า s ที่ได้จากเส้นแนวโน้ม

5.5.1 ขั้นตอนการทดสอบระบบเซ็นเซอร์

ขั้นตอนการเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์และตัดสินใจจากระบบเซ็นเซอร์ต้นแบบ คือ

1) สร้างโมเดลทุเรียนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร เพื่อใช้เป็นโมเดลตัวอย่างในการทดสอบการคัดแยกด้วยระบบเซ็นเซอร์ ภายในโมเดลบรรจุน้ำเชื่อม ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของโมเดลอ่อน โมเดลแก่และโมเดลสุก 58 54 และ 50 ที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ

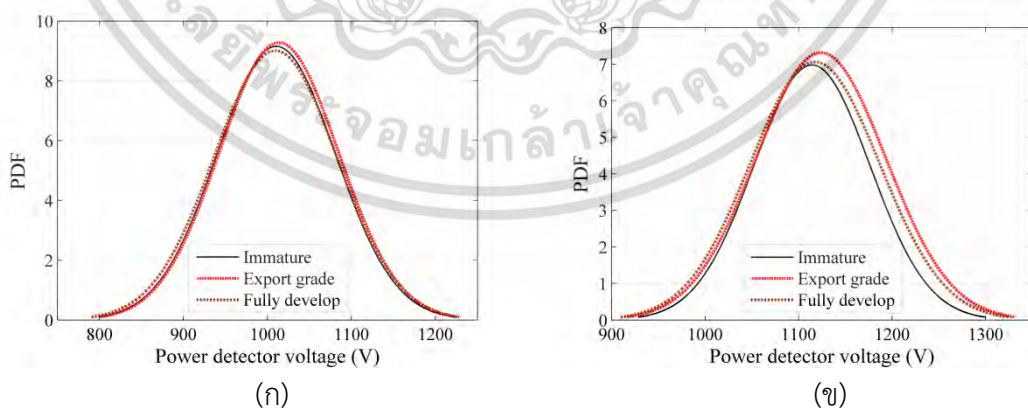
2) วางโมเดลลงบนสายพานลำเลียงจำลอง ระบบเซ็นเซอร์เริ่มทำงาน จากนั้นสแต็ปปั๊มมอเตอร์ทำงานโดยควบคุมการเลื่อนของสายพานลำเลียงด้วยความเร็วคงที่ พร้อมกับสายอากาศส่งเริ่มส่งสัญญาณทำการวัดโมเดลด้วย 2 วิธีการ ประกอบด้วยการวัดที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์โดยเปลี่ยนตำแหน่ง และการวัดที่ตำแหน่งเดียวโดยเปลี่ยนความถี่ซึ่งทำในลักษณะเดียวกับการจำลอง

3) วัดค่ากำลังงานที่สะท้อนกลับของสายอากาศส่ง ด้วยคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางซึ่งค่าที่ได้คือค่า $|S_{11}|$ และวัดค่ากำลังงานที่รับได้จากสายอากาศสายอากาศรับ ซึ่งค่าที่ได้คือค่า $|S_{21}|$ จากนั้นค่าที่ได้ทั้ง 2 ถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง และแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลขนาด 12 บิต ข้อมูลถูกส่งผ่านพอร์ตสื่อสารอนุกรม (RS232) จากอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณค่า k-factor ของโมเดลแต่ละระดับความแก่

4) ทดสอบระบบเซ็นเซอร์ด้วยโมเดลทุเรียน โดยการเปลี่ยนตำแหน่งและเปลี่ยนขนาดความกว้างของแบนด์วิดท์พร้อมกับวัดค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของความกว้างของแบนด์วิดท์ต่อความแม่นยำในการคัดแยกโมเดลแต่ละระดับความแก่

5.5.2 ผลการทดสอบระบบเซ็นเซอร์

ข้อมูล $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ ที่ได้จากการวัดที่ตำแหน่งเดียวแต่เปลี่ยนความถี่ของโมเดลอ่อน โมเดลแก่ และโมเดลสุก ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability density function: PDF) และหาเส้นแนวโน้มด้วยฟังก์ชันโรรี่เซียน ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ คือ ค่าความแปรปรวน ค่าขนาดของแนวระดับสายตา และ ค่า k-factor ของโมเดลทุเรียนแต่ละกลุ่มแสดงดังรูปที่ 5.15 และ 5.16



รูปที่ 5.15 การแจกแจงความน่าจะเป็นของค่า $|S_{11}|$ (ก) เปลี่ยนความถี่ (ข) เปลี่ยนตำแหน่ง

ผลการวิเคราะห์เส้นแนวโน้มพบว่าค่า s ของแรงดันไฟฟ้าของ $|S_{11}|$ ที่ได้จากการวัดโดยการเปลี่ยนความถี่ ของโมเดลอ่อน โมเดลแก่ และโมเดลสุกมีค่า 1,010.4 1,013.6 และ 1,009.4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

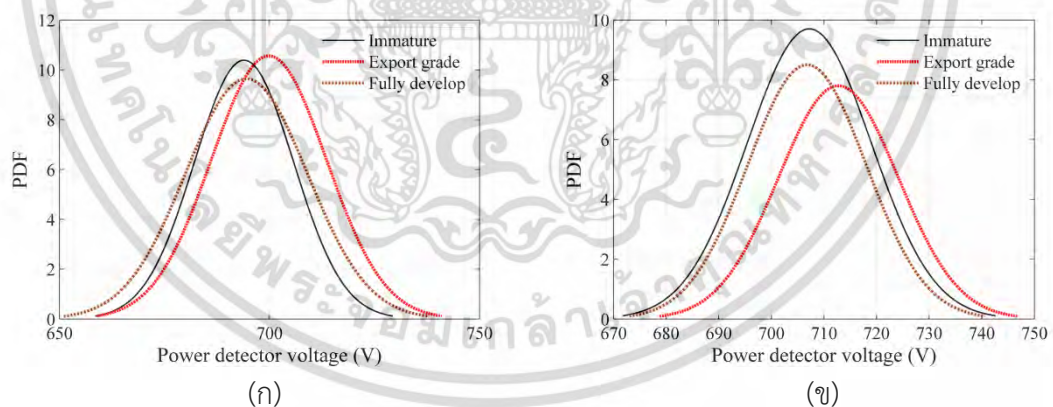
ตามลำดับ ค่า s ของข้อมูล $|S_{11}|$ จากการเปลี่ยนตำแหน่ง คือ 1,114.3 1,123.8 และ 1,117.4 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความแตกต่างของ s ระหว่างโมเดลแต่ละกลุ่มมีค่าต่างกัน ค่า s ที่ได้จากการวัดโดยการเปลี่ยนตำแหน่งมีความแตกต่างชัดเจนกว่าค่า s ที่ได้จากการเปลี่ยนความถี่

จากนั้นนำค่า s ของ $|S_{11}|$ ที่ได้จากการวัดโดยการเปลี่ยนความถี่ และการเปลี่ยนตำแหน่งมาคำนวณหาค่า k -factor เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่า k -factor ที่ได้จากการวัดทั้ง 2 กรณี ของโมเดลทั้ง 3 กลุ่ม แสดงดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ค่า k -factor ของ $|S_{11}|$ จากการทดสอบ

	k-factor ของ $ S_{11} $		
	โมเดลอ่อน	โมเดลแก่	โมเดลสุก
เปลี่ยนความถี่	103.04	102.56	95.88
เปลี่ยนตำแหน่ง	148.14	125.54	118.34

จากการเปรียบเทียบค่า k -factor ที่ได้จากการวัดทั้ง 2 กรณี พบว่า โมเดลอ่อนมีค่า k -factor มากที่สุด และจะลดลงเมื่อระดับความแก่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลอง การวัด โดยการเปลี่ยนความถี่ของโมเดลอ่อน โมเดลแก่ และโมเดลสุก ค่า k -factor มีค่าลดลง 0.47% และ 6.51% ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงคือ 3.5% และการวัดโดยเปลี่ยนตำแหน่ง ค่า k -factor มีค่าลดลง 15.26% และ 5.74% ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงคือ 10.5% จะเห็นว่าความแตกต่างของค่า k -factor จากการวัดของ $|S_{11}|$ โดยการเปลี่ยนตำแหน่งชัดเจนกว่าการวัดโดยการเปลี่ยนความถี่



รูปที่ 5.16 การแจกแจงความน่าจะเป็นของค่า $|S_{21}|$ (ก) เปลี่ยนความถี่ (ข) เปลี่ยนตำแหน่ง

เส้นแนวโน้มที่ได้จากค่า s ของแรงดันไฟฟ้า $|S_{21}|$ ที่วัดได้จากการเปลี่ยนความถี่ของโมเดลอ่อน โมเดลแก่ และโมเดลสุก คือ 693.93 699.86 และ 694.51 ส่วนค่า s ของแรงดันไฟฟ้า $|S_{21}|$ จากการเปลี่ยนตำแหน่ง คือ 707.20 712.73 และ 706.76 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของค่า s ระหว่างโมเดลแต่ละกลุ่มมีค่าต่างกัน ทั้งนี้ค่า s ที่ได้จากการวัดโดยการเปลี่ยนตำแหน่งมีความแตกต่างชัดเจนกว่าค่า s ที่ได้จากการเปลี่ยนความถี่ เช่นเดียวกับผลที่ได้จาก $|S_{11}|$

นำค่า s ของ $|S_{21}|$ ที่ได้จากการวัดทั้ง 2 กรณี คือ โดยการเปลี่ยนความถี่และการเปลี่ยนตำแหน่ง มาคำนวณค่า k -factor เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่า k -factor ที่ได้ของโมเดลทั้ง 3 กลุ่ม แสดงดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ค่า k -factor ของ $|S_{21}|$ จากการทดสอบ

	k-factor $ S_{21} $		
	โมเดลอ่อน	โมเดลแก่	โมเดลสุก
เปลี่ยนความถี่	1730.76	1306.45	1149.65
เปลี่ยนตำแหน่ง	2655	2568	2471

เมื่อเปรียบเทียบ ค่า k -factor ของการวัดทั้งจากการวัดโดยการเปลี่ยนความถี่ และการเปลี่ยนตำแหน่งค่า k -factor ของโมเดลอ่อนมีค่า k -factor มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลอง กรณีของการวัดโดยการเปลี่ยนความถี่ค่า k -factor มีค่าลดลง 24.52% และ 12% ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงคือ 18.26% และการวัดโดยการเปลี่ยนตำแหน่งของโมเดลอ่อน แก่ และสุก ค่า k -factor มีค่าลดลง 3.28% และ 3.78% ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงคือ 3.53% จะเห็นว่าความแตกต่างของค่า k -factor จากการวัดโดยการเปลี่ยนความถี่ชัดเจนกว่าการวัดโดยการเปลี่ยนตำแหน่ง เช่นเดียวกับผลที่ได้จาก $|S_{11}|$

5.5.3 ผลการทดสอบความกว้างของช่วงความถี่

จากที่ได้ทดสอบระบบเซ็นเซอร์ ทั้ง 2 กรณี คือ การวัดที่ความถี่เดียวแต่เปลี่ยนตำแหน่ง และการวัดที่ตำแหน่งเดียวแต่ใช้ความถี่กว้าง ซึ่งจะเห็นว่า ค่า k -factor ที่ได้จากการวัดโดยเปลี่ยนตำแหน่งของ $|S_{11}|$ สามารถแบ่งระดับความแก่ของทุเรียนได้ดีกว่าการเปลี่ยนความถี่ และในกรณีของ $|S_{21}|$ การเปลี่ยนความถี่ในการวัดสามารถแบ่งได้ชัดเจนกว่าการเปลี่ยนตำแหน่ง ดังนั้นในขั้นตอนนี้ จึงเพิ่มการทดสอบการวัดโดยการเปลี่ยนตำแหน่งและการเปลี่ยนความถี่ให้อยู่ในช่วงความถี่กว้างที่แบนด์วิดธ์ 1% 3% และ 5% เพื่อศึกษาถึงความกว้างของแบนด์วิดธ์ที่เหมาะสมสำหรับระบบเซ็นเซอร์ ดังนั้นการทดสอบจึงนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ของ $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ ที่ได้จากการเปลี่ยนตำแหน่งการวัดและเพิ่มความกว้างของแบนด์วิดธ์มาหาเส้นแนวโน้มของค่า k -factor

ตารางที่ 5.6 ค่า k -factor จากการเปลี่ยนความถี่ที่แบนด์วิดธ์ 5%

	k-factor		
	โมเดลอ่อน	โมเดลแก่	โมเดลสุก
$ S_{11} $	103.5	98.7	96.0
$ S_{21} $	1141	1051	1020

ค่า k -factor ที่ได้จากการเปลี่ยนตำแหน่งการวัดด้วยแบนด์วิดธ์ 5% ที่ความถี่กลาง 915 เมกะเฮิรตซ์ พบว่า ค่า k -factor ที่ได้สอดคล้องกับการวัดด้วยความถี่เดียวแต่เปลี่ยนตำแหน่ง และค่า k -factor ที่ได้ของ $|S_{11}|$ ของโมเดลอ่อน โมเดลแก่ และโมเดลสุก มีค่าลดลง 4.56% และ 8.84% เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ โดยเฉลี่ยการลดลงเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ 6.7% ส่วนค่า k-factor ของ $|S_{21}|$ มีค่าเปลี่ยนแปลงลดลง 7.89% และ 2.95% ตามลำดับ โดยเฉลี่ยเปลี่ยนแปลงลดลงอยู่ที่ 5.42%

ตารางที่ 5.7 ค่า k-factor จากการเปลี่ยนความถี่ที่แบนด์วิดธ์ 3%

	k-factor		
	โมเดลอ่อน	โมเดลแก่	โมเดลสุก
$ S_{11} $	106.1	98.3	94.6
$ S_{21} $	1851	1781	1749

การเปลี่ยนตำแหน่งการวัดโมเดลด้วยแบนด์วิดธ์ 3% ที่ความถี่กลาง 915 เมกะเฮิรตซ์ พบว่าค่า k-factor ของ $|S_{11}|$ ของโมเดลอ่อน โมเดลแก่ และโมเดลสุก มีค่าลดลง 7.37% และ 3.72% ตามลำดับ โดยเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงลดลงอยู่ที่ 5.55% ส่วนค่า k-factor ของ $|S_{21}|$ มีค่าเปลี่ยนแปลงลดลง 3.78% และ 1.8% ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโดยเฉลี่ยลดลงอยู่ที่ 2.79%

ตารางที่ 5.8 ค่า k-factor จากการเปลี่ยนความถี่ที่แบนด์วิดธ์ 1%

	k-factor		
	โมเดลอ่อน	โมเดลแก่	โมเดลสุก
$ S_{11} $	176	152	135.8
$ S_{21} $	2535	2323	2272

การเปลี่ยนตำแหน่งการวัดโมเดลด้วยแบนด์วิดธ์ 1% ที่ความถี่กลาง 915 เมกะเฮิรตซ์ พบว่าค่า k-factor ของ $|S_{11}|$ ของโมเดลอ่อน โมเดลแก่ และโมเดลสุก มีการเปลี่ยนแปลงลดลง 13.68% และ 10.64% ตามลำดับ โดยเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงลดลงอยู่ที่ 12.16% ส่วนค่า k-factor ของ $|S_{21}|$ มีค่าเปลี่ยนแปลงลดลง 8.36% และ 2.2% ตามลำดับ เฉลี่ยแล้วเปลี่ยนแปลงลดลงอยู่ที่ 5.28%

จากการทดสอบการเพิ่มขนาดแบนด์วิดธ์เพื่อตรวจวัดโมเดลอ่อน โมเดลแก่ และโมเดลสุก สำหรับแบ่งแยกความแตกต่างของค่า k-factor จากแบนด์วิดธ์ 1% 3% และ 5% จากนั้นวิเคราะห์หาช่วงแบนด์วิดธ์ที่เหมาะสม พบว่าที่แบนด์วิดธ์ 3% และ 5% ความแตกต่างของค่า k-factor ของ $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ ที่เกิดขึ้น ระหว่างโมเดลแต่ละกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกัน ในกรณีแบนด์วิดธ์ 1% ค่าความแตกต่างของค่า k-factor เพิ่มขึ้นเป็น 12.16% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความชัดเจนของการแบ่งระดับความแก่ของโมเดลทุเรียน และในกรณีของ $|S_{21}|$ มีความแตกต่างสูงกว่าแบนด์วิดธ์ 3% และความแตกต่างใกล้เคียงกับ 5% ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อแบนด์วิดธ์แคบลง ทำให้มีข้อมูลน้อยลง การเบี่ยงเบนของข้อมูลจึงน้อยลง ดังนั้นค่า k-factor มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับแบนด์วิดธ์ 3% และ 5% แสดงให้เห็นว่าการคัดแยกระดับความแก่ของโมเดลที่แบนด์วิดธ์ 1% สามารถคัดแยกได้เช่นเดียวกัน แต่ใช้ทรัพยากรน้อยกว่า

5.6 สรุปผล

ในบทนี้ได้ทำการศึกษาและวิจัยระบบคัดแยกทุเรียนย่านความถี่กว้างบนสายพานลำเลียง โดยศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการคัดแยกระดับความแก่ของทุเรียน ซึ่งแบ่งออกเป็นทุเรียนอ่อน ทุเรียนแก่ และทุเรียนสุก โดยใช้ย่านความถี่กว้าง เทียบกับการคัดแยกด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งการวัด ที่ความถี่เดียว ระบบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นประกอบด้วยสายอากาศไดโพล 2 ตัว ทำงานที่ช่วงความถี่ 880 – 933 เมกะเฮิรตซ์ ติดตั้งอยู่ด้านข้างและด้านบนของสายพานลำเลียงจำลอง โดยสายอากาศทั้ง 2 ตัวอยู่ห่างจากสายพานลำเลียงจำลอง 15 เซนติเมตร เพื่อตรวจวัดทุเรียนขณะที่ทุเรียนเลื่อนไปบนสายพานลำเลียง จำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรมจำลองคาสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นสร้างระบบเซ็นเซอร์ต้นแบบ ทดสอบการทำงานของระบบโดยใช้โมเดลที่สร้างขึ้นจากพลาสติกสำหรับขึ้นรูป ภายในบรรจุน้ำเชื่อมที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเข้าใกล้ทุเรียนอ่อน ทุเรียนแก่ และทุเรียนสุก ผลการทดสอบระบบเป็นไปในทิศทางเดียวกับการจำลอง คือ ความแตกต่างของค่า k-factor ที่ได้จากรวัด โดยการเปลี่ยนความถี่ของการวัด โดยการใช้ $|S_{11}|$ มีความชัดเจนมากกว่าการวัดโดยการเปลี่ยนความถี่ และค่า k-factor ของ $|S_{21}|$ จากการเปลี่ยนความถี่ ชัดเจนมากกว่าการเปลี่ยนตำแหน่ง จากนั้นทำการทดสอบระบบเพื่อศึกษาถึงความกว้างของแบนด์วิดท์ที่เหมาะสมสำหรับระบบเซ็นเซอร์ ผลการทดสอบพบว่า ความแตกต่างของค่า k-factor ของ $|S_{11}|$ เพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของแบนด์วิดท์ลดลง เนื่องจากเมื่อแบนด์วิดท์ลดลง ทำให้ได้จำนวนข้อมูลน้อยลง ดังนั้นค่าความแปรปรวนจึงลดลง ดังนั้นเพื่อให้การสร้างระบบเซ็นเซอร์คัดแยกระดับความแก่ของโมเดลทุเรียนให้มีประสิทธิภาพ การใช้ทั้งการเปลี่ยนตำแหน่งและการเปลี่ยนความถี่ ทั้ง $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ ในการตัดสินใจให้ผลแม่นยำขึ้น รวมถึงในกรณีที่ ไม่ต้องให้ทุเรียนเคลื่อนที่ วัดจากการเปลี่ยนความถี่สามารถทำได้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิจัยเพื่อออกแบบระบบเซ็นเซอร์คัดแยกผลไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยไม่ทำลาย ประกอบด้วยระบบเซ็นเซอร์คัดแยกรสชาติส้มเขียวหวาน ระบบเซ็นเซอร์คัดแยกทุเรียนอ่อนออกจากทุเรียนแก่ส่งออก และศึกษาถึงหลักการคัดแยกระดับความแก่ของทุเรียนย่านความถี่กว้างจากโมเดลทุเรียน โดยเริ่มทำการศึกษาค้นคว้าความเป็นไปได้ในการคัดแยกจากการจำลองการทำงานระบบด้วยโปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และสร้างระบบคัดแยกต้นแบบ ผลการทดสอบที่ได้จากระบบเซ็นเซอร์ต้นแบบสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงาน

ระบบเซ็นเซอร์คัดแยกรสชาติส้มเขียวหวาน สามารถแบ่งระดับความหวานของส้มเขียวหวาน ประกอบด้วยสายอากาศไมโครสตริบแพทช์รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ จำนวน 5 ตัว สายอากาศแต่ละตัวถูกออกแบบให้แม่ทซ์กับส้มเขียวหวานที่มีรสชาติหวาน วัดค่า $|S_{11}|$, $|S_{41}|$, $|S_{51}|$ และ $|S_{61}|$ เพื่อนำมาใช้เพื่อฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ในการตัดสินใจคัดแยก ส้มเขียวหวานที่มีรสชาติหวานและไม่หวาน ระบบควบคุมและวงจรโครงข่ายประสาทเทียมถูกสร้างลงบนอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ ผลการทดสอบการทำงานระบบเซ็นเซอร์ต้นแบบ มีค่าแม่นยำในการคัดแยกรสชาติของส้มเขียวหวานอยู่ที่ 95.47% เห็นได้ว่าระบบมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้สำหรับคัดแยกรสชาติของส้มเขียวหวาน นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบผลกระทบของสัญญาณรบกวน และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับระบบเซ็นเซอร์ พบว่าระบบเซ็นเซอร์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อสัญญาณรบกวนน้อยกว่า -38.75 dBm และอุณหภูมิไม่เกิน 30 องศาเซลเซียส

ระบบเซ็นเซอร์สำหรับตรวจสอบและคัดทุเรียนอ่อนออกจากกลุ่มทุเรียนแก่ส่งออกใช้การวัดเชิงสถิติ เนื่องจากเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากขนาด รูปทรงและเปลือกของทุเรียน ซึ่งเป็นสิ่งที่ควบคุมได้ยาก ระบบเซ็นเซอร์คัดแยกทุเรียนอ่อนถูกออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับท่อลำเลียง ประกอบด้วยสายอากาศโมโนโพลทำงานที่ความถี่ 915 เมกะเฮิรตซ์ จำนวน 4 ตัว ติดตั้งอยู่โดยรอบท่อลำเลียงทุเรียน เพื่อวัดค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ โดยปรับตำแหน่งการวางทุเรียนที่การวัดแต่ละครั้งแตกต่างกัน จากนั้นข้อมูลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยช่องสัญญาณโรเซียน คำนวณหาค่า k-factor ผลที่ได้แสดงให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนของค่า k-factor และสามารถนำมาใช้คัดแยกทุเรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบเซ็นเซอร์ต้นแบบมีความแม่นยำในการคัดแยกอยู่ที่ 92.7% เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมส่งออกทุเรียนได้ เนื่องจากมีต้นทุนในการสร้างต่ำ

ต่อมาได้ศึกษาถึงหลักการคัดแยกระดับความแก่ของทุเรียนย่านความถี่กว้างจากโมเดลทุเรียน เพื่อหาความเป็นไปได้ในการแบ่งระดับความแก่ของทุเรียนจากโมเดลทุเรียนต้นแบบ โดยทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดระหว่างการวัดย่านความถี่กว้างที่ตำแหน่งเดิม เทียบกับการเปลี่ยนตำแหน่งการวัดที่ความถี่เดิม ระบบเซ็นเซอร์ประกอบด้วยสายอากาศไดโพล ทำงานที่ช่วงความถี่ 880 ถึง 933 เมกะเฮิรตซ์ จำนวน 2 ตัว อยู่ห่างจากสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่องจำลอง 15 เซนติเมตร เพื่อตรวจวัดทุเรียนขณะที่ทุเรียนเลื่อนไปบนสายพานลำเลียง ผลการทดสอบระบบพบว่าความแตกต่างของค่า k-factor ที่ได้จากการวัดโดยการเปลี่ยนความถี่ของ $|S_{11}|$ มีความชัดเจนมากกว่า การวัดโดยการเปลี่ยนความถี่ และความแตกต่างของค่า k-factor ของ $|S_{21}|$ จากการเปลี่ยนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชัดเจนมากกว่าการเปลี่ยนตำแหน่ง และทดสอบหาความแตกต่างของค่า k-factor เมื่อขนาดของแบนด์วิดธ์ลดลง จาก 5% 3% และ 1% พบว่ามีความแตกต่างค่า k-factor ของ $|S_{11}|$ เพิ่มขึ้นเมื่อแบนด์วิดธ์ลดลง เนื่องจากเมื่อแบนด์วิดธ์ลดลงทำให้ได้จำนวนข้อมูลน้อยลงค่าความแปรปรวนจึงลดลง ดังนั้นเพื่อให้การสร้างระบบเซ็นเซอร์คัดแยกระดับความแก่ของโมเดลทุเรียนให้มีประสิทธิภาพการใช้ทั้งการเปลี่ยนตำแหน่งและการเปลี่ยนความถี่ ทั้ง $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ ในการตัดสินใจให้ผลแม่นยำมากขึ้น รวมถึงในกรณีที่ไม่ต้องให้ทุเรียนเคลื่อนที่ การวัดจากการเปลี่ยนความถี่สามารถทำได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการสร้างระบบเพื่อใช้งานจริง ควรมีการออกแบบระบบป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอก รวมถึงระบบระบายความร้อนเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุณหภูมิ และเพิ่มระบบการตรวจสอบขนาดก่อนที่ผลไม้อาจเข้าสู่ระบบคัดแยก เพื่อให้การคัดแยกผลไม้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นในขณะทำการวัด รวมถึงควรทำความสะอาดผลไม้ และมีกระบวนการคัดแยกขนาด รูปทรง และน้ำหนัก ก่อนทำการคัดแยกด้วยระบบเซ็นเซอร์

เทคนิคการคัดแยกผลไม้โดยไม่ทำลายด้วยเซ็นเซอร์ไมโครเวฟ สามารถนำไปใช้กับผลไม้ชนิดอื่นได้ เช่น แตงโม ส้มโอ เป็นต้น ซึ่งจะได้ดำเนินการในโอกาสต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2553. “ข้อมูลพื้นฐานเศรษฐกิจการเกษตร.” กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. เอกสารสถิติการเกษตรเลขที่ 416. เข้าถึงได้ที่ http://www.oae.go.th/download/download_journal/fundamaton-2553.PDF.
- [2] ศูนย์ข้อมูลผลไม้. (ม.ป.ป.) “คู่มือ/คู่แข่ง ทุเรียน.” สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (ออนไลน์) เข้าถึงได้ที่: <http://www.oae.go.th/fruits/index.php/2013-01-25-03-34-09?id=156>.
- [3] Burns, J.K. and Albrigo, L.G. 1997. “Granulation in Grapefruit.” *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 110: 204-208.
- [4] Kawano, S. Fujiwara, T. and Iwamoto, M. 1993. “Nondestructive Determination of Sugar Content in Satsuma Mandarin using Near Infrared (NIR) Transmittance.” *J.Japan Soc.Hort.Sci.*, vol.62. no.2. pp.465-470.
- [5] Slaughter, D.S. and Crisosto, C.H. 1998. “Nondestructive Internal Quality Assessment of Kiwi Fruit using Near-Infrared Spectroscopy.” *Seminars in Food Analysis.* vol.3. pp.131-140.
- [6] Jha, S.N. and Matsuoka, T. 2004. “Non-Destructive Determination of Acid-Brix Ratio of Tomato Juice using Near Infrared Spectroscopy.” *International Journal of Food Science and Technology.* vol.39. pp.425-430.
- [7] Gomez, A.H. He, Y. and Pereira, A.G. 2006. “Non-Destructive Measurement of Acidity, Soluble Solids and Firmness of Satsuma Mandarin using Vis/NIR-Spectroscopy Techniques.” *Journal of Food Engineering.* vol.77. pp.313-319.
- [8] Seo, Y.W. Noh, S.H. and Lee, K.J. 2006. “Nondestructive Detection of the Internal Defects of Fuji Apple using Vis/NIR Transmittance Spectroscopy.” *American Society of Agricultural and Biological Engineers Meeting Presentation.* paper number 066121. July 2006.
- [9] Cayuela, J.A. 2008. “Vis/NIR Soluble Solids Prediction in Intact Oranges (*Citrus sinensis* L.) cv. Valencia Late by Reflectance.” *Post harvest Biology and Technology.* vol.47. pp.75-80.
- [10] Rahim, A.A.A. Sawal, M.S.A. Tajjudin, M. and Halin, I.S.A. 2011. “A Non-Invasive Method to Measure the Sweetness of Malaysian Papaya Quantitatively using the NIR Full-Transmittance Technique - a Preliminary Study.” *2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks.* pp.379-384.
- [11] Xudong, S. Hailiang, Z. and Yande, L. 2009. “Nondestructive Assessment of Quality of Nanfeng Mandarin Fruit by a Portable Near Infrared Spectroscopy.” *Int.J.Agric&Biol Eng.* vol.2. no.1. pp.65-71. Mar 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Antonucci, F. Pallottino, F. Paglia, G. Aquino, S.D' and Menesatti, P. 2011. "Non-Destructive Estimation of Mandarin Maturity Status Through Portable VIS-NIR Spectrophotometer." *Food Bioprocess Technol.* vol. 4. issue 5. pp. 809-813. Jul. 2011.
- [13] Upchurch, B.L. Miles, G.E. Stroshine, R.L. Furgason, E.S. and Emerson, F.H. 1987 "Ultrasonic Measurement for Detecting Apple Bruises." *Transactions of the ASAE - American Society of Agricultural Engineers.* vol.30 (3). pp.803-809. May-June 1987.
- [14] Wang, J. Gomez, A.H. and Pereira, A.G. 2006. "Acoustic Impulse Response for Measuring the Firmness of Mandarin During Storage." *Journal of Food Quality.* vol.29. no.4. pp.392-404. Aug. 2006.
- [15] Damato, J.P. Bauza, C.G. and Boroni, G. 2011. "Color Based Fruits Classification using GPU." *IEEE Latin America Transactions.* vol.9. no.3. pp.346-350. June 2011.
- [16] Gomez, A.H. Wang, J. Hu, G. and Pereira, A.G. 2006. "Electronic Nose Technique Potential Monitoring Mandarin Maturity." *Sensor and actuators B.* vol.113. issue 1. pp.347-353. 17 Jan. 2006.
- [17] Ritenour, M.A. Albrigo, L.G. and Burns, J.K. 2004. "Granulation in Florida Citrus." *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 117:358-361.
- [18] Nelson, S.O. 2005. "Dielectric Spectroscopy of Fresh Fruits and Vegetables." *Proc. of 2005 Instrumentation and Measurement Technology Conference.* pp.360-364. Ottawa. May 2005.
- [19] Camarena, F. J. Martinez, .A. Ardid, M. Ramis, J. and Espinosa, V. 2005. "Ultrasonic Testing of the Time Evolution Properties of Oranges." *Proc. of 2005 IEEE Ultrasonic Symposium.* pp.1508-1510.
- [20] Krairiksh, M. Varith, J. Kanchanavapasatit, A. Phongcharoenpanich, C. Thanachayanont, A. Sirisuk, P. and Chongcheawchamnan, M. 2009. "Microwave Sensor for Durian Inspection." *Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Antennas, Propagation and Systems (INAS 2009).* pp.221-1-221-4. Malaysia.
- [21] Suttapa, S. Varith, J. Krairiksh, M. Noochuay, C. and Phimpimol, J. 2009. "Microwave Sensor Response in Relation to Durian Maturity." *Proceedings of the 5th CIGR Section VI International Symposium on Food Processing and Monitoring Technology in Bioprocesses and Food Quality Management.* Potsdam. Germany. September 2009.
- [22] สำนักบริหารการค้าสินค้าทั่วไป กลุ่มสินค้าเกษตร. 2553. "สถานการณ์การค้าทุเรียน." กรมการค้าต่างประเทศ (ออนไลน์). เข้าถึงได้ที่: www.dft.go.th. วันที่สืบค้น: พฤษภาคม 2553.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] Phothisonothai, M. 2010. "Nondestructive Maturity Classification of Durian Based on Fractal Features." 10th *International Conference on Information Science, Signal Processing and their Applications (ISSPA 2010)*.
- [24] Kongrattanaprasert, S. Arunrungrusnii, S. Pungsiri, B. and Chamnongthai, K. 2001. "Nondestructive Maturity Determination of Durian by Force Vibration." *International Journal of Uncertainty Fuzziness and Knowledge-based System* 9(06): 703-719. Dec. 2001.
- [25] Tantisoparak, T. Krairiksh, M. Moon, H. Lee, W. and Sarkar, T.K. 2012. "Identification of Maturity of Fruit in the Frequency Domain Using Its Natural Frequencies." *Proc. IEEE Asia-Pacific Conf. Ant. And Prop. (APCAP)*. pp.297-298. Aug. 2012.
- [26] Lertrut, P. Rattanachinakorn, B. Vijitranont, S. Suthiarom, S. Pavenakarn, S. Hirunpradit, H. untarapunnik, S.J and Sluckpetch, S.. 2003. "Durian (in Thai)." *Ministry of Agriculture and Cooperative*. no.13/2547.
- [27] Kalayanamitra, K. 2005. "Evaluation and Classification of Durian Fruit Maturity and its Relationship with Chemical Constituents." *Thai Journal of Agricultural Science*, vol.38. no.1-2. 2005. pp.45-54.
- [28] Ketsa, S. and Dankani, T. 1999. "Firmness and Activities of Polygalacturonase, Pectinesterase, β -Galactosidase and Cellulose in Ripening Durian Harvested at Difference Stages of Maturity." *Scientia Horiculture*. pp.184-188.
- [29] Nelson, S.O. Guo, W. Trabelsi, S. and Kays, S.J. 2007 "Dielectric Properties of Watermelon and Correlation with Soluble Solid Content." *2007 ASABE International meeting*. paper no.07607.
- [30] Sosa-Morales, M.E. 2008. "Influence of the Time on the Dielectric Properties of Mangoes." *ASABE Annual International Meeting*. paper no.08374.
- [31] Ghretli, M. Khalid, K. Grozescu, I.V. Sahri, H. and Abbas, Z. 2007. "Dual Frequency Microstrip Antenna Sensor for Water Content Measurements Independent of Temperature Variation." *Measurement Science and Technology*. vol.18. no.4. pp.1054-1060.
- [32] Ali, A.H. Abbas, Z.B. Hassan, J.B. Jusoh, A.B. and M.Zahari, R.B. 2011. "Microwave Antenna Sensing Technique for Determination of Moisture Content in Hevea Latex from Hevea Brasiliensis Tree." *Australia Journal of Crop Science*. vol.5. no.11. pp.1326-1333. Nov. 2011.
- [33] Ghretli, M.M. Khalid, K. Grazescu, I.V. Sahri, M.H. and Abbas, Z.B. 2007. "Dual-Frequency Microwave Moisture Content Based on Circular Microstrip Antennas." *IEEE Sensors Journal*. vol.7. no.12. pp. 1749-1756. Dec. 2007.

- [34] Lles, L. Allisent, Ruiz Hernandez, N. and Gutierrez. P. 2007. "Application of Microwave Return Loss for Sensing Internal Quality of Peaches." *Biosystems Engineering*. vol.96. no.4. pp.525-539.
- [35] Shull, P. J. 2553. "Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications." New York, NY: Marcel Dekker.
- [36] Haykin, S. 1994. "Neural Networks, A Comprehensive Foundation." New York: Macmillan.
- [37] Omondi, A. R. and Rajapakse, J. C. 2006. "FPGA Implementations of Neural Networks." New York: Springer-Verlag.
- [38] Basheer, I.A. and Hajmeer, M. 2000. "Artificial Neural Networks: Fundamentals, Computing, Design, and Application." *J. Microbio. Methods*. vol.43. pp.3-31.
- [39] Paliwal, M. and Kumar, U. A. 2009. "Neural Networks and Statistical Techniques: A Review of Applications." *Expert Systems With Applications*. vol.36. pp.2-17.
- [40] Saunders, S. R. and Aragon-Zavala, A. 2007. "Antennas And Propagation for Wireless Communication Systems.". Ed 2nd Wiley. ch.10.
- [41] Leekul, P. Yoiyod, P. Chivapreecha, S. Phongcharoenpanich, C. Youryon, P. Bunya-atichart, K. and Krairiksh, M. 2013. "Scattered Waves from Different Maturity Stage of Fruit." *Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*. pp.153-154.
- [42] Hippel, A. von. 1954. "Dielectric Materials and Applications, The Technology." Press of MIT and John Wiley and Sons, New York.
- [43] Agilent. "Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials." Application note.
- [44] Venkatesh, M. S. and G. Raghavan, S. V. 2005. "An overview of dielectric properties measuring techniques." *Can. Biosyst. Eng*. vol.47. pp.7.15-7.30.
- [45] Shull, P. J. 2002 "Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications." New York: Marcel Dekker.
- [46] Ghodgaonkar, D. K. Varadan, V.V. and Varadan, V.K. 1989. "A free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies." *IEEE Tran. Instrument and Measurement*. vol.37. no.3. pp.789-793.
- [47] Balanis, C. A. 1982. "Antenna Theory: Analysis and design." New York: Wiley.
- [48] Pozar, D. M.. 2011. "Microwave Engineering." Ed 4th. New York: Wiley.
- [49] Khan, G.C. 2009. "Near-field UHF RFID Reader Antenna Design." A Thesis Submitted for the Degree of Master of Engineering Department of Electrical and Computer Engineering National University of Singapore.
- [50] Schantz, H. 2005. "A Near Field Propagation Law & A Novel Fundamental Limit to Antenna Gain Versus Size." *IEEE APS Conference*. July 2005.

- [51] Livingstone, D. J. 2008. "Artificial Neural Networks Methods and Applications." Humana Press.
- [52] Clarke, R.H. Jakes. 2012. "Wireless Channel Modeling". (online) Retrieved from <http://www.ee.iitm.ac.in/~giri/pdfs/EE5141/Jakes-Simulation.pdf>, November. 2012.
- [53] Cavanagh, J. J. F. 1985. "Digital Computer Arithmetic Design and Implementation." New York: McGraw-Hill
- [54] ชำนาญ ปัญญาไส และ วัชรกร หนูทอง. 2547. "ภาษา VHDL สำหรับการออกแบบวงจรดิจิทัล." กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- [55] Leekul, P. and Krairiksh, .M. 2011. "Microwave Sensor for Fruit Classification." *AEMC2011 Proc of AEMC 2011*. Calcutta.
- [56] Krairiksh, M. Varith, J. and Kanjanavapastit, A. 2011. "Wireless Sensor Network for Monitoring Maturity Stage of Fruit." *Wireless Sensor Network*. pp.318-321 Sept. 2011.
- [57] Baker-Jarvis, J., Janezic, M. D., Domich, P. D., and Geyer, R. G. 1994. "Analysis of an Open-ended Coaxial Probe with Lift-off for Nondestructive Testing." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 43. pp.711 – 718.
- [58] Jarimopas, B., Toomsaengtong, S., and Inprasit, C. 2007. "Design and Testing of a Mangosteen Fruit sizing machine." *Journal of Food Engineering*. Vol.79. pp. 745 – 751.
- [59] Nordic Semiconductor. "Single chip 2.4 GHz Transceiver." nRF2401A Datasheet.
- [60] Anaren's Xinger. "Model XC2100B-30S." 30 dB Directional Coupler.
- [61] Hittite Microw. "HMC245QS16 / 245QS16E." GaAs MMIC SP3T Non-Reflective Switch, DC - 3.5 GH. Datasheet.
- [62] Datasheet. "Maxim innovation delivered." MAX4003, 100 MHz to 2500 MHz, 45 dB RF Detector in a UCSP.
- [63] Datasheet. "Maxim innovation delivered." MAX4475-MAX4478/ MAX4488/ MAX4489 SOT23, Low-Noise, Low-Distortion, Wide-Band, Rail-to-Rail Op Amps.
- [64] Texas Instruments. "12-Bit, 20MHz Sampling analog-to-digital converter." ADS805 Datasheet. Jan. 1997 [Revised Nov. 2002].
- [65] Xilinx. "User guide: Virtex-II Pro FPGA configuration user guide."
- [66] H.Amin, K.M.Curtis and B.R.Hayes-Gill. 1997. "Piecewise Linear Approximation Applied to Nonlinear Function of a Neural Network." *IEE Proc.-Circuits Devices Syst*. vol.144. no.6. pp.313-317. Dec. 1997.
- [67] Texas Instruments. "LMX2531 High Performance Frequency Synthesizer System with Integrated VCO." LMX2531LQ1742 Datasheet. Oct. 2005 [Revised Dec. 2014].

- [68] MIEQ. “AMF 3F 00820096 14 30P 1 Amplifier.” RF Power Amplifier 500MHz - 1000MHz 1 Watt 46dB.
- [69] Mini-circuit. 2015. “Coaxial Directional Coupler ZFDC-20-50-S+.” Datasheet. [Revised Sep. 2007.]
- [70] Mini-circuit. 2015. “Coaxial Power detector ZX47-60LN-S+.” Datasheet. [Revised Dec. 2015]
- [71] Terasic Technology. 2015. “Altera Deo-Nano board.” User Manual FPGA, Jan 2015.
- [72] Texas Instruments. 2014. “CodeLoader 4 Operating Instructions User's Guide (Rev. A).” Jul 2014.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายประพันธ์ ลีกุล
 วัน เดือน ปีเกิด 26 มิถุนายน 2523
 ที่อยู่ 18/3 หมู่ 4 ต.ป้อมวิ อ.มะขาม จ. จันทบุรี 22150
 โทร. 0-8808-08180

ประวัติการศึกษา 2548 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 2551 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1) โครงข่ายประสาทเทียม
 2) อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้
 3) การพัฒนาระบบไมโครเวฟเซ็นเซอร์
 4) การออกแบบวงจรดิจิทัลด้วยภาษาวีเอชดีแอล

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- 2016 P. Leekul, S. Chivapreecha, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh. "Rician k-factors-based Sensor for Fruit Classification by Maturity Stage." *IEEE Sensors Journal (in press)*.
- 2015 P. Leekul, S. Chivapreecha and M. Krairiksh. "Microwave Sensor for Tangerine Classification based on Coupled-Patch Antennas." *International Journal of Electronics*. Vol. 103. pp. 1287-1300.
- 2014 P. Leekul, T. Limpiti, T. Tantisopharak, P. Yoiyod, S. Chivapreecha, C. Phongcharoenpanich, and M. Krairiksh "Remote Sensing of the Physical Qualities of Fruits." *Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 4 – 7 Nov, 2014.
- 2013 P. Leekul, P. Yoiyod, S. Chivapreecha, C. Phongcharoenpanich, P. Youryon, K. Bunya-atichart, and M. Krairiksh, "Scattered Waves from Different Maturity Stages of Fruits." *Proc. IEEE Asia-Pacific Conf. Ant. And Prop. (APCAP)*, pp.153-154, Aug. 2013.

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ. 2558 – ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศและการสื่อสาร
 คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้