

## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัย

เรื่องระบบโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายเพื่อควบคุมคุณภาพการผลิตผลไม้

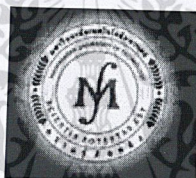
ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2551-2552 จำนวนเงิน 2,000,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 2 ปีระหว่าง 1 ตุลาคม 2550 ถึง 30 กันยายน 2552

สถานที่ทำการวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้ ขอขอบคุณผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ของศูนย์วิจัยพืชสวน จังหวัดจันทบุรี ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านข้อมูล อุปกรณ์ และความช่วยเหลือต่างๆ ขอขอบคุณชาญณรงค์ หนูช่วยและคุณวรัช พฤษาเหตุ สวนทุเรียนอำเภอปะทิว จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดลองภาคสนามตลอดโครงการ



## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาและพัฒนาเซนเซอร์ไมโครเวฟเพื่อตรวจสอบระดับความแก่ของผลไม้ ซึ่งในที่นี้จำกัดอยู่ที่ทุเรียนซึ่งเป็นผลไม้ส่งออกที่มีมูลค่าสูง เซนเซอร์ดังกล่าวใช้สายอากาศไมโครสตริปสองตัววางข้างกันและแต่ละอยู่กับผลทุเรียน สัญญาณที่ส่งจากสายอากาศตัวหนึ่งผ่านผลทุเรียนไปยังสายอากาศอีกตัวหนึ่งที่ใช้รับสัญญาณ จะมีความแรงแปรผันตามระดับความแก่ของทุเรียน จากการศึกษาพบว่าเมื่อเวลาที่เปลี่ยนไปตามวันหลังดอกบานที่เพิ่มขึ้น ปริมาณแป้งในเนื้อทุเรียนจะเพิ่มจนสูงที่สุดที่วันหนึ่ง จากนั้นจะลดลง ในขณะที่ปริมาณน้ำตาลมีการเปลี่ยนแปลงที่สวนทางกัน แต่ปริมาณแป้งสูงกว่าปริมาณน้ำตาลอย่างเห็นได้ชัด ผลลัพธ์ดังกล่าวเป็นเหตุให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียนมีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นในลักษณะที่สวนทางกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแป้ง และความแรงของสัญญาณที่รับได้ก็จะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแป้งในเนื้อทุเรียน จากผลการทดลองกับทุเรียนในสวนที่อำเภอชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช ในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนสิงหาคม ของปี 2551 และ 2552 มีผลทำนองเดียวกันที่สนับสนุนสมมุติฐานข้างต้น

ในการใช้งานเพื่อเตือนชาวสวนให้เก็บทุเรียนในช่วงเวลาที่เหมาะสม เซนเซอร์ดังกล่าวควรสามารถเก็บข้อมูลโดยอัตโนมัติ ดังนั้นคณะนักวิจัยจึงได้พัฒนาเซนเซอร์ที่ใช้ต้นทุนต่ำ ได้วิเคราะห์และออกแบบวงจรรวมเพื่อให้มีขนาดเล็กและกินพลังงานต่ำ แต่ในโครงการนี้ไม่สามารถสร้างวงจรได้ทันในเวลาดำเนินโครงการ จึงจะดำเนินการต่อภายหลัง อย่างไรก็ตามก็ได้ใช้วงจรที่หาได้ในท้องตลาดมาทำเป็นระบบโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายทำงานที่ความถี่ 2.4 GHz เพื่อเก็บผลแล้วเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งที่ใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินความแก่ของทุเรียน พบว่าทำงานได้ดีแต่ยังต้องปรับปรุงแก้ไขให้ระบบคงทนต่อสภาพการใช้งานที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นอย่างมากในแต่ละช่วงเวลาของแต่ละวัน โดยเฉพาะปริมาณฝนที่ตกชุกในช่วงฤดูดังกล่าว

ก่อนที่จะได้ระบบโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่กล่าวมาข้างต้น คณะนักวิจัยได้ศึกษาการกระจายคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 และ 5.8 GHz ในสวนทุเรียน โดยได้วัดสัญญาณวิทยุและทำแบบจำลองช่องสัญญาณดังกล่าว เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการกระจายคลื่นในสวนทุเรียนซึ่งยังไม่มีผู้ใดทำมาก่อน แล้วนำข้อมูลดังกล่าวมาออกแบบระบบสื่อสารที่มีเสถียรภาพ และได้พัฒนาโปรโตคอลเพื่อควบคุมการสื่อสารระหว่างเซนเซอร์ที่ติดกับผลทุเรียนมายัง โหนดแม่ที่ใช้เชื่อมต่อข้อมูลผ่านระบบ GPRS มายังห้องปฏิบัติการ และแสดงผลเป็นกราฟเพื่อทำนายระดับความแก่ของทุเรียน

## Abstract

This research aims to investigate and develop a microwave sensor for detecting maturity stage of fruit which is limited to durian. The sensor consists of coupled patch antennas which a microwave signal is transmitted from one antenna, through a durian fruit, to the other antenna. We found that the coupled signal is proportional to durian's maturity stage corresponding to the day after full-bloom. Starch content in durian pulp increases along the day after full-bloom and reaches the peak at a certain day, then decreases while sugar content has opposite behavior. However, starch content is significantly higher than those of the sugar one. Consequently, dielectric constant of durian pulp decreases and increases in opposite direction to the variation of the starch content. The received signal strength is proportional to the dielectric constant of starch in durian pulp. Experimental results at durian orchard in Cha-uad district, Nakornsrihamarat province during July to August of 2008 and 2009 support the above assumption.

In practical use for warning agriculture to harvest durian in an appropriate time, the sensor should collect data automatically. Therefore, the researchers developed a low cost sensor. An integrated circuit was analyzed and designed to have small size and consume low power. According to time limitation, it will be fabricated after this project. Nevertheless, a wireless sensor network was implemented at the frequency of 2.4 GHz using the microchip available in the local market. Field trial was conducted to collect data and compared with the reference data of percent dry-weight of durian pulp. The reasonably good agreement was found to ensure the warning at the appropriate time. The lesson learned from the experiment is to improve the sensor to be robust to the severe environment due to drastically change of temperature and humidity, particularly heavy rain in such season.

Prior to the implementation of the system, the researchers investigated radio propagation in durian orchard at the frequency of 2.4 and 5.8 GHz by measuring signal strength and producing channel model. This model does not exist before the project. The information was used for designing a stable communication system. A protocol for controlling communication between sensor nodes and the master node was developed. The data was sent to the computer at the laboratory and displayed as a graph via the GPRS service.

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
ระบบโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายเพื่อควบคุมคุณภาพการผลิตผลไม้	1
บทที่ 1 บทนำ	2
บทที่ 2 หลักการพื้นฐาน	3
บทที่ 3 การวิเคราะห์และออกแบบเซนเซอร์วัดทุเรียน	16
บทที่ 4 ผลการทดสอบการหาดัชนีความบริบูรณ์ของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง ด้วยเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ	67
บทที่ 5 แบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางและคุณลักษณะของช่องสัญญาณ การแพร่กระจายคลื่นทางสถิติในสวนทุเรียน ที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.8 GHz	78
บทที่ 6 ระบบโครงข่ายไร้สาย	122
เอกสารอ้างอิง	140
ภาคผนวก	143
การออกแบบและสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิโพรบวัดค่าไดอิเล็กตริก	144
ระบบแสดงผลข้อมูลของเครือข่ายตรวจวัดไร้สายในสวนทุเรียน	151

## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 1.1	อันดับการส่งออกผลไม้สด แช่เย็น แช่แข็งและแห้งของไทย	2
ตารางที่ 1.2	ฤดูกาลผลิตทุเรียนของประเทศไทย	4
ตารางที่ 3.1	การเปรียบเทียบเทคนิคการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริก	18
ตารางที่ 3.2	สรุปผลคุณสมบัติของวงจร Ring VCO ที่ใช้ Delay cell แบบต่างๆ	66
ตารางที่ 5.1	ค่าความแปรปรวนของสัญญาณและรูปแบบความหนาแน่นทางสถิติที่เหมาะสม กรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด ที่ความถี่ 2.4 GHz	97
ตารางที่ 5.2	ค่าความแปรปรวนของสัญญาณและรูปแบบความหนาแน่นทางสถิติที่เหมาะสม กรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างเซ็นเซอร์มายังโหนด ที่ความถี่ 2.4 GHz	101
ตารางที่ 5.3	ค่าความแปรปรวนของสัญญาณและรูปแบบความหนาแน่นทางสถิติที่เหมาะสม กรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด ที่ความถี่ 5.8 GHz	106
ตารางที่ 5.4	ค่าความแปรปรวนของสัญญาณและรูปแบบความหนาแน่นทางสถิติที่เหมาะสม กรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างเซ็นเซอร์มายังโหนดที่ความถี่ 5.8 GHz	111
ตารางที่ 6.1	ตารางข้อมูลขาลง	124
ตารางที่ 6.2	ตัวอย่างข้อมูลในตารางข้อมูลขาลงของโหนดประจำต้น#1	125
ตารางที่ 6.3	ตัวอย่างข้อมูลในตารางข้อมูลขาลงของโหนดประจำต้น#2	125
ตารางที่ 6.4	ตัวอย่างตารางข้อมูลขาขึ้นของโหนดประจำต้น#1	126
ตารางที่ 6.5	ตัวอย่างตารางข้อมูลขาขึ้นของโหนดหลัก	126

## สารบัญรูป

รูป		หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้างของไมโครชิพสำหรับวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	8
รูปที่ 2.2	การส่งข้อมูลจากโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายไปยังระบบแสดงผล	9
รูปที่ 2.3	แผนที่แสดงจังหวัดที่มีการให้บริการ GPRS ของบริษัทเอไอเอส	10
รูปที่ 2.4	แผนที่แสดงจังหวัดในบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีการให้บริการ GPRS ของบริษัทดีแทค	10
รูปที่ 2.5	ตัวอย่างการติดตั้งโหนดลูกประจำลูกทุเรียน	11
รูปที่ 2.6	ตัวอย่างการติดตั้งโหนดหลักประจำต้นทุเรียนแต่ละต้นในสวนทุเรียน	11
รูปที่ 2.7	การหาเส้นทางในการรับส่งข้อมูล	14
รูปที่ 2.8	ช่องสัญญาณในการสื่อสารสำหรับระบบ	15
รูปที่ 3.1	การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ	20
รูปที่ 3.2	โครงสร้างของการจำลองผลในกรณีต่างๆ ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio	22
รูปที่ 3.3	Coupling Model	22
รูปที่ 3.4	Transmission Model	23
รูปที่ 3.5	สายอากาศแบบเชื่อมต่อร่วมติดตั้งด้านเดียวที่มีค่าสภาพยอมของไดอิเล็กตริกเป็น 4.36 ความสูงของแผ่นเท่า 0.6525 มิลลิเมตร	23
รูปที่ 3.6	สายอากาศแบบส่งผ่านติดตั้งทั้งสองด้านที่มีค่าสภาพยอมของไดอิเล็กตริกเป็น 3.48 ความสูงของแผ่นเท่า 1.6 มิลลิเมตร	24
รูปที่ 3.7	แผ่นวงรี	24
รูปที่ 3.8	ตัดแบ่งครึ่งระนาบแผ่นวงรี	25
รูปที่ 3.9	หมุนแผ่นระนาบวงรีที่ตัดแบ่งครึ่งรอบแกน z ไปเป็นมุม 360 องศา	25
รูปที่ 3.10	ผลทุเรียนที่มีหนามและก้าน	26
รูปที่ 3.11	เนื้อทุเรียนและผลทุเรียนที่สมบูรณ์ (ก) เนื้อทุเรียน(ข) ผลทุเรียนที่สมบูรณ์	27
รูปที่ 3.12	ผลของทุเรียนที่กำหนดให้ค่าสภาพยอมเท่ากับหนึ่ง	28
รูปที่ 3.13	(ก) จำนวน Mesh cells (ข) เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (ค) ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่เป็นฟังก์ชันของความถี่	29
รูปที่ 3.14	สายอากาศแบบติดตั้งด้านเดียวบริเวณกลางลูก (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านข้าง	30

รูปที่ 3.15	สายอากาศแบบติดตั้งสองด้านบริเวณกลางลูก	31
รูปที่ 3.16	ค่า S-Parameter ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่	31
รูปที่ 3.17	แบบรูปการแผ่คลื่นในระนาบ H-plane	32
รูปที่ 3.18	แบบรูปการแผ่คลื่นในระนาบ E-plane	32
รูปที่ 3.19	ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่เป็นฟังก์ชันของความถี่	33
รูปที่ 3.20	แบบรูปการแผ่คลื่นของสายอากาศแบบติดตั้งด้านเดียวบริเวณกลางลูก	33
รูปที่ 3.21	แบบรูปการแผ่คลื่นในระนาบ H-plane	34
รูปที่ 3.22	แบบรูปการแผ่คลื่นในระนาบ E-plane	34
รูปที่ 3.23	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ทำการนอร์มัลไลซ์ที่เป็นฟังก์ชัน ของค่าสภาพยอมของเนื้อทึเรียน	35
รูปที่ 3.24	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ทำการนอร์มัลไลซ์ที่เป็นฟังก์ชัน ของค่าสภาพยอมของเนื้อทึเรียน	36
รูปที่ 3.25	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ทำการนอร์มัลไลซ์ที่เป็นฟังก์ชันของ ค่าสภาพยอมของเนื้อทึเรียน โดยทำการเปรียบเทียบกันของขนาดทึเรียนต่างๆ	36
รูปที่ 3.26	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ทำการนอร์มัลไลซ์ที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอม ของเนื้อทึเรียน โดยทำการเปรียบเทียบกันของขนาดทึเรียนต่างๆ	37
รูปที่ 3.27	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อทึเรียน	37
รูปที่ 3.28	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อทึเรียน	38
รูปที่ 3.29	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อทึเรียน โดยทำการเปรียบเทียบกันของขนาดทึเรียนต่างๆ	39
รูปที่ 3.30	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อทึเรียน โดยทำการเปรียบเทียบกันของขนาดทึเรียนต่างๆ	40
รูปที่ 3.31	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ทำการนอร์มัลไลซ์ที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอม ของเนื้อทึเรียน	41
รูปที่ 3.32	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ทำการนอร์มัลไลซ์ที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอม ของเนื้อทึเรียน	41
รูปที่ 3.33	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อทึเรียน	42
รูปที่ 3.34	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อทึเรียน	43
รูปที่ 3.35	โครงสร้างวงจรไมโครเวฟเซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดความอ่อนแก่ของทึเรียน	45
รูปที่ 3.36	โครงสร้างวงจรรขยายล็กการิทึมิกโหมดกระแส	46
รูปที่ 3.37	วงจรรขยายทรานคอนดักแตนซ์ที่มีแบนด์วิทกว้าง	46
รูปที่ 3.38	วงจรรขยายผลต่างกระแสจำกัด	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.39	ผลการจำลองการทำงานที่ความถี่อินพุท 2.5 GHz	47
รูปที่ 3.40	วงจรรขยายสัญญาณแบบล็อกการิทึมด้วยเทคนิค โมดิฟายเซอร์ฮูเปอร์	48
รูปที่ 3.41	วงจรตรวจวัดกำลังงานของสัญญาณ โดยใช้ความไม่เป็นเชิงเส้นของ มอสทรานซิสเตอร์	49
รูปที่ 3.42	วงจรตรวจวัดกำลังงานของสัญญาณ โดยใช้ความไม่เป็นเชิงเส้นของ มอสทรานซิสเตอร์ที่ได้ออกแบบขึ้นใหม่	50
รูปที่ 3.43	แรงดัน $V_{diff}$ vs กำลังงานอินพุท	51
รูปที่ 3.44	วงจรตรวจวัดกำลังงานสัญญาณทั้งหมด	52
รูปที่ 3.45	วงจรรขยายแรงดันจำกัดที่มี 2 อินพุท (Voltage limiting amplifier with auxiliary input)	52
รูปที่ 3.46	วงจรรขยายแรงดันจำกัด (Voltage limiting amplifier)	53
รูปที่ 3.47	ผลการจำลองการทำงานของวงจรตรวจวัดกำลังงาน	53
รูปที่ 3.48	ผลกระทบของแรงดันอินพุทออฟเซตต่อแรงดันเอาต์พุท	54
รูปที่ 3.49	ผังภูมิ (Layout) วงจรตรวจจับกำลังงานสัญญาณ	54
รูปที่ 3.50	วงจรร Ring VCO แบบรูปเดียว	56
รูปที่ 3.51	(ก) วงจรร Ring VCO แบบหลายรูป จำนวน N ภาค	56
รูปที่ 3.51	(ข) วงจรร Ring VCO แบบเส้นทางหน่วงเวลาคู่	56
รูปที่ 3.52	วงจรรซิมอสอินเวอร์เตอร์	57
รูปที่ 3.53	วงจรรซิมอสอินเวอร์เตอร์แบบจำกัดกระแส	58
รูปที่ 3.54	วงจรรขยายสัญญาณผลต่างแบบขาขอสรร่วมที่มี PMOS เป็น โหลด	58
รูปที่ 3.55	วงจรรขยายสัญญาณผลต่างแบบขาขอสรร่วมที่มี โหลดเป็น PMOS ต่อขนานกัน	59
รูปที่ 3.56	วงจรรหน่วงเวลาแบบสัญญาณผลต่างที่ใช้ โหลดที่มีการป้อนกลับแบบบวก	59
รูปที่ 3.57	(ก) current-source loaded differential delay cell (ข) differential delay cell with Symmetric load	60
รูปที่ 3.58	Differential delay cell with symmetric and cross-coupled load	61
รูปที่ 3.59	คุณลักษณะการปรับความถี่ของวงจรร ring VCO ที่ใช้ delay cell ในรูปที่ 3.57-3.58	61
รูปที่ 3.60	Output voltage swing vs. $V_{control}$ ของวงจรร ring VCO ที่ใช้ delay cell ในรูปที่ 3.57 (ก)	62
รูปที่ 3.61	Output voltage swing vs. $V_{control}$ ของวงจรร ring VCO ที่ใช้ delay cell ในรูปที่ 3.57 (ข)	62

รูปที่ 3.62	Output voltage swing vs. Vcontrol ของวงจรรing VCO ที่ใช้ delay cell ในรูปที่ 3.58	63
รูปที่ 3.63	Ring VCO ที่ใช้ current-starved inverter delay cell	63
รูปที่ 3.64	คุณลักษณะการปรับความถี่ของวงจรรing VCO ในรูปที่ 3.63	64
รูปที่ 3.65	Output voltage swing vs. Vcontrol ของวงจรรing VCO ในรูปที่ 3.63	64
รูปที่ 3.66	สัญญาณรบกวนทางเฟสของวงจรรing vco ที่ใช้ delay cell ในรูปที่ 3.57-3.58 และวงจรรing vco ในรูปที่ 3.63	65
รูปที่ 4.1	ส่วนประกอบของชุดวัดไดโอดีเล็กทริก	69
รูปที่ 4.2	ชุดวัดค่าไดโอดีเล็กทริกและการวัดค่าไดโอดีเล็กทริกโดยวิธีโพรบแบบแกนร่วม ปลายเปิด	69
รูปที่ 4.3	การติดเซ็นเซอร์รับผลทุเรียน	70
รูปที่ 4.4	ค่าตอบสนองของคลื่นไมโครเวฟที่ติดกับผลทุเรียน	70
รูปที่ 4.5	ภาพตัดขวางของทุเรียนที่มีขนาดใกล้เคียงกับผลทุเรียนที่ติดเซ็นเซอร์ไมโครเวฟ ในวันที่ 106 วันหลังดอกบาน	71
รูปที่ 4.6	การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในเปลือกและเนื้อทุเรียน	72
รูปที่ 4.7	ปริมาณน้ำตาลแป้งในเนื้อทุเรียน	73
รูปที่ 4.8	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในเนื้อทุเรียน	74
รูปที่ 4.9	ค่าไดโอดีเล็กทริกของทุเรียนในการเก็บข้อมูล ปี พ.ศ. 2551	75
รูปที่ 4.10	ค่าไดโอดีเล็กทริกของทุเรียนในการเก็บข้อมูล ปี พ.ศ. 2552	75
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพ – เคมีกับความบริบูรณ์ของ ทุเรียนพันธุ์หมอนทอง	76
รูปที่ 5.1	ลักษณะของต้นทุเรียนที่ทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณ	79
รูปที่ 5.2	การติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์สัญญาณภายในสวนทุเรียน	80
รูปที่ 5.3	การติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ	81
รูปที่ 5.4	การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นในทางสถิติ	82
รูปที่ 5.5	ผลการทดสอบและแบบจำลองความชันเดี่ยว 86	
รูปที่ 5.6	กราฟค่าสหสัมพันธ์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง ความชันของเส้นกราฟ $Rb$ ของสายอากาศส่งและรับมิโพลาริซแนตตั้ง	88
รูปที่ 5.7	ระดับสัญญาณรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ที่เป็นฟังก์ชัน ของระยะทาง	89
รูปที่ 5.8	ช่องสัญญาณและลำดับขั้นการจำลองระบบสื่อสาร	92
รูปที่ 5.9	ระดับของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้ที่ระยะทางต่างๆ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	เป็นฟังก์ชันของจำนวนการสุ่มสัญญาณที่ความถี่ 2.45 GHz	94
รูปที่ 5.10	ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณที่ระยะห่างระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีค่าเท่ากับ 16 เมตร 32 เมตร 48 เมตร และ 64 เมตร ที่ความถี่ 2.4 GHz	96
รูปที่ 5.11	ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ Rician (Probability Density Function; PDF) ที่ความถี่ 2.4 GHz	96
รูปที่ 5.12	ตำแหน่งของเครื่องส่งบนต้นทุเรียน	98
รูปที่ 5.13	ระดับของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้ที่ตำแหน่งต่างๆ เป็นฟังก์ชันของจำนวนการสุ่มสัญญาณ	99
รูปที่ 5.14	ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณเมื่อเครื่องกำเนิดสัญญาณอยู่ที่ตำแหน่งที่ 4	100
รูปที่ 5.15	ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่เป็นฟังก์ชันของแอมพลิจูดของสัญญาณ	101
รูปที่ 5.16	ระดับของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้ที่ระยะทางต่างๆ เป็นฟังก์ชันของจำนวนการสุ่มสัญญาณที่ความถี่ 5.8 GHz	102
รูปที่ 5.17	ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณที่ระยะห่างระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีค่าเท่ากับ 8 เมตร 32 เมตร 56 เมตร 80 เมตร และ 104 เมตร ที่ความถี่ 5.8 GHz	105
รูปที่ 5.18	ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ Rician (Probability Density Function; PDF) ที่ความถี่ 5.8 GHz	105
รูปที่ 5.19	ตำแหน่งของเครื่องส่งบนต้นทุเรียน	107
รูปที่ 5.20	ระดับของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้ที่ตำแหน่งต่างๆ เป็นฟังก์ชันของจำนวนการสุ่มสัญญาณ	108
รูปที่ 5.21	ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณเมื่อเครื่องกำเนิดสัญญาณ	110
รูปที่ 5.22	ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ Rician (Probability Density Function; PDF) ที่ความถี่ 5.8 GHz	110
รูปที่ 5.23	ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน (โหนดต่อโหนด)	113
รูปที่ 5.24	ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน (เซ็นเซอร์มายังโหนด)	115
รูปที่ 5.25	ค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน	117
รูปที่ 5.26	ค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน	119

รูปที่ 6.1	โนคในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่ออกแบบ	123
รูปที่ 6.2	ผังภูมิการทำงานของ โนคเซนเซอร์	128
รูปที่ 6.3	ขนาดของสายอากาศที่ได้จากการออกแบบ	129
รูปที่ 6.4	การจำลองสายอากาศในโปรแกรมทางแม่เหล็กไฟฟ้า	130
รูปที่ 6.5	ผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรมทางแม่เหล็กไฟฟ้า	130
รูปที่ 6.6	ไดอะแกรมการทำงานของภาคตรวจรับกำลังงาน	131
รูปที่ 6.7	วงจรรขยายสัญญาณความถี่วิทยุ	131
รูปที่ 6.8	วงจรรตรวจรับกำลังงาน	132
รูปที่ 6.9	วงจรรขยายบัฟเฟอร์	132
รูปที่ 6.10	ลายวงจรส่วนตรวจจับกำลังงาน	133
รูปที่ 6.11	วงจรรควบคุมการทำงานภายในเซนเซอร์	134
รูปที่ 6.12	ลายวงจรพิมพ์ของวงจรรควบคุมการทำงาน (ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง	134
รูปที่ 6.13	รูปถ่ายของโนคแม่และโนคลูก	135
รูปที่ 6.14	ผังภูมิและภาพถ่ายการทดลองที่จันทบุรี	136
รูปที่ 6.15	ผังภูมิและภาพถ่ายการทดลองที่นครศรีธรรมราช	137
รูปที่ 6.16	การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณไมโครเวฟตามวันหลังดอกบาน เทียบกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง	138
รูปที่ ผ1	ลักษณะ โพรบที่ใช้วัดค่าไดอิเล็กทริก	144
รูปที่ ผ2	เครื่อง Agilent network analyzer รุ่น E5071C ENA Network Analyzer	145
รูปที่ ผ3	ส่วนประกอบของชุดวัดไดอิเล็กทริก	145
รูปที่ ผ3	ภาชนะใส่เนื้อทุเรียน	146
รูปที่ ผ4	ทรงกระบอกด้านนอก	146
รูปที่ ผ5	ฝาปิด	147
รูปที่ ผ6	จุกปิด	147
รูปที่ ผ7	การประกอบชุดทดสอบ	148
รูปที่ ผ8	ทรงกระบอกด้านนอก	148
รูปที่ ผ9	ฝาปิด	149
รูปที่ ผ10	จุกปิด	149
รูปที่ ผ10	ชุดทดสอบวัดค่าไดอิเล็กทริก	149
รูปที่ ผ10	การประกอบภาชนะใส่ชิ้นทดสอบเข้ากับชุดทดสอบวัดค่าไดอิเล็กทริก	150
รูปที่ ผ11	การควบคุมอุณหภูมิชิ้นทดสอบ	150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัย

### เรื่องระบบโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายเพื่อควบคุมคุณภาพการผลิตผลไม้

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2551-2552 จำนวนเงิน 2,000,000 บาท  
ระยะเวลาทำการวิจัย 2 ปีระหว่าง 1 ตุลาคม 2550 ถึง 30 กันยายน 2552

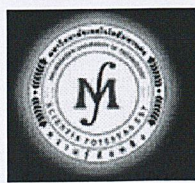
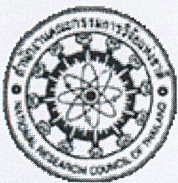
#### รายนามคณะผู้วิจัย

1. นายโมไนย ไกรฤกษ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
หัวหน้าโครงการวิจัย รับผิดชอบการออกแบบระบบและบริหารโครงการ
2. นายอภิรักษ์ รัตนยานนท์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
รับผิดชอบการพัฒนาวงจรรวมของเซนเซอร์วัดผลไม้ม
3. นายมิตรชัย จงเชื้อขำนาญ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
รับผิดชอบการพัฒนาวงจรรีโมตคอนโทรล
4. นายเผ่าถัก ศิริสุข มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร  
รับผิดชอบการพัฒนาการประมวลสัญญาณดิจิทัล
5. นายชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
รับผิดชอบการคำนวณการกระจายคลื่นไมโครเวฟในสวน
6. นายจาดูพงศ์ วาฤทธิ์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
รับผิดชอบทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นไมโครเวฟและคุณภาพผลไม้มก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว
7. นายอภิชาต กาญจนวาทสถิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร  
รับผิดชอบการพัฒนาโปรโตคอลของโครงข่าย

สถานที่ทำการวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้ ขอขอบคุณผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ของศูนย์วิจัยพืชสวน จังหวัดจันทบุรี ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านข้อมูล อุปกรณ์ และความช่วยเหลือต่างๆ ขอขอบคุณชาวนรณรงค์ หนูช่วยและคุณวรัช พฤษาเหตุ สวนทุเรียนอำเภอปะทิว จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดลองภาคสนามตลอดโครงการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมา

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีความอุดมสมบูรณ์ อันมีรากฐานมาจากความแข็งแกร่งและความได้เปรียบด้านความหลากหลายทางชีวภาพ ความอุดมสมบูรณ์ของทรัพยากรธรรมชาติ ความเหมาะสมของสภาพแวดล้อมและลักษณะภูมิศาสตร์ของประเทศ แม้จะพยายามพัฒนาไปสู่การเปลี่ยนแปลงเป็นประเทศอุตสาหกรรม แต่เศรษฐกิจพื้นฐานของประเทศก็ยังคงต้องพึ่งพาอาศัยเกษตรกรรมเป็นหลักและรายได้หลักส่วนหนึ่งของประเทศมาจากการส่งออกผลผลิตทางการเกษตร โดยเฉพาะผลไม้ซึ่งมีผลผลิตออกสู่ตลาดตลอดทั้งปี จากข้อมูลการส่งออกผลไม้สด แช่เย็น แช่แข็งและแห้งในช่วง 10 เดือนแรกของปี 2552 คือในช่วงเดือนมกราคม – ตุลาคม มีการส่งออกผลไม้มากที่สุด 5 อันดับแรก ได้แก่ ทูเรียน ลำไย มังคุด มะม่วง ลิ้นจี่ โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 อันดับการส่งออกผลไม้สด แช่เย็น แช่แข็งและแห้งของไทย [1]

ลำดับ	รายการ	ปริมาณส่งออก/ตัน	มูลค่าการส่งออก/ ล้านเหรียญสหรัฐฯ	ตลาดส่งออก
1	ทูเรียน	236,258	109	จีน ฮองกง อินโดนีเซีย
2	ลำไย	191,576	87	จีน ฮองกง อินโดนีเซีย
3	มังคุด	110,409	49.7	ฮ่องกง จีน เวียดนาม
4	มะม่วง	23,278	14.4	ญี่ปุ่น มาเลเซีย เวียดนาม
5	ลิ้นจี่	16,805	10.2	ฮ่องกง จีน เนเธอร์แลนด์

จากตารางที่ 1.1 แสดงอันดับการส่งออกผลไม้ของไทยในปี 2552 5 อันดับ ซึ่งมีมูลค่าการส่งออกรวมถึง 270.3 ล้านเหรียญสหรัฐฯ โดยส่งออกทูเรียนมากเป็นอันดับ 1 มีปริมาณ 236,258 ตัน มูลค่าส่งออก 109 ล้านเหรียญสหรัฐฯ ลำไยส่งออกมากเป็นอันดับ 2 มีปริมาณการส่งออก 191,576 ตัน มูลค่าการส่งออกเท่ากับ 87 ล้านเหรียญสหรัฐฯ อันดับ 3 มังคุด ปริมาณการส่งออก 110,409 ตัน มูลค่าการส่งออก 49.7 ล้านเหรียญสหรัฐฯ อันดับ 4 มะม่วง ปริมาณส่งออก 23,278 ตัน มูลค่าการส่งออกเท่ากับ 14.4 ล้านเหรียญสหรัฐฯ และอันดับ 5 คือลิ้นจี่ มีปริมาณการส่งออก 16,805 ตัน มูลค่าการส่งออก 10.2 ล้านเหรียญสหรัฐฯ

ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตผลผลิตทางการเกษตรเพื่อป้อนให้แก่ผู้บริโภคในต่างประเทศทั่วโลกที่สำคัญรายหนึ่ง ซึ่งประเทศไทยมีผลผลิตหลายชนิด ที่มีศักยภาพในการแข่งขันทางการตลาดในต่างประเทศ เช่น มะม่วง ลำไย ส้มโอ และลิ้นจี่ เป็นต้น ซึ่งผลผลิตดังกล่าวสามารถสร้างรายได้ให้แก่กลุ่มเกษตรกรผู้ผลิตบริษัทส่งออก รวมถึงสามารถสร้างรายได้ให้แก่ประเทศในการส่งออกสินค้าเกษตรดังกล่าวไปยังตลาดในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างประเทศ จากการคาดการณ์ของศูนย์วิจัยกสิกรรมไทยในปี 2551 มูลค่าการส่งออกผลไม้และผลิตภัณฑ์ของ ไทยจะเติบโตสูงจากปีก่อนประมาณร้อยละ 30 คิดเป็นมูลค่าประมาณ 2,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ ซึ่งเป็นอัตราการขยายตัวที่น่าสนใจมาก สำหรับตลาดส่งออกที่สำคัญ ได้แก่ จีน ฮองกง สหรัฐฯ สหภาพยุโรป ญี่ปุ่น อินโดนีเซีย มาเลเซีย และสิงคโปร์ เป็นต้น โดยมีปัจจัยเกื้อหนุนหลายประการ ทั้งจากการผลักดันนโยบาย ยุทธศาสตร์ผลไม้ไทยสู่ตลาดโลกของภาครัฐ และการที่ไทยอาศัยโอกาสการเปิดเขตการค้าเสรี FTA กับ ประเทศต่างๆ โดยเฉพาะการเปิดเขตการค้าเสรีภายใต้ความตกลงระหว่างอาเซียนกับจีน การเจรจาความตกลง หุ้นส่วนทางเศรษฐกิจไทยและญี่ปุ่น (JTEPA) การเปิดตลาดผลไม้ในตลาดสหรัฐฯ แต่ปัจจุบันการค้ากับ ต่างประเทศนั้น ผู้ส่งออกประสบปัญหาในการส่งออกผลผลิตทางการเกษตรไปยังตลาดต่างประเทศ เนื่องจาก ตลาดต่างประเทศมีความต้องการผลผลิตเกษตรที่มีความปลอดภัยและคุณภาพที่ผ่านการตรวจรับรองระบบการ ผลิตให้เป็นไปตามมาตรฐานเป็นที่ยอมรับในระดับสากล เช่น ระบบมาตรฐาน GlobalGAP เป็นต้น

ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะมีระบบมาตรฐานที่ใช้กันในประเทศ เช่น GAP แล้วนั้น แต่ยังไม่เป็นที่ยอมรับ ในระดับสากล เพราะระบบมาตรฐานที่เราใช้ในประเทศนั้นยังไม่ได้เทียบเคียงกับระบบมาตรฐานระดับสากล หากผลผลิตทางการเกษตรไม่ได้รับการรับรองระบบมาตรฐานในระดับสากล บริษัทผู้ส่งออกประสบปัญหาไม่ สามารถขายผลผลิตไปยังตลาดต่างประเทศได้ ส่งผลให้บริษัทส่งออกไม่สามารถรับซื้อผลผลิตที่ไม่ผ่านการ ตรวจรับรองระบบมาตรฐานสากลจากเกษตรกรได้เช่นกัน ซึ่งการจัดทำระบบมาตรฐานระดับสากลที่ได้รับการ รับรองจากหน่วยงานที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากล เช่น บริษัท เอสจีเอส จำกัด เป็นต้น เพื่อเป็นการรับรอง ผลผลิตทางการเกษตร ด้านคุณภาพ ความปลอดภัย สร้างความน่าเชื่อถือให้กับผู้บริโภคว่าไม่มีสารพิษตกค้าง และไม่ใช่สารเคมีที่เป็นอันตราย ถึงแม้ว่าผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทยจะมีการผลิตอยู่ภายใต้ระบบ มาตรฐาน GAP ของประเทศแล้วก็ตามแต่ยังไม่เพียงพอต่อการยอมรับของตลาดต่างประเทศ

ดังนั้นเพื่อยกระดับมาตรฐานสินค้าเกษตรกรไทยให้เป็นที่ยอมรับในตลาดต่างประเทศและการพัฒนา ระบบมาตรฐานการผลิตของเกษตรกรให้เทียบเท่าระบบมาตรฐานการผลิตระดับสากลเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง ในการทำการค้ากับต่างประเทศในยุคปัจจุบัน การสร้างความเข้าใจ ความตระหนักในการผลิตภายใต้ระบบ มาตรฐานให้แก่กลุ่มเกษตรกรผู้ผลิต ในการเตรียมความพร้อมต่อการเปลี่ยนแปลงการผลิตภายใต้ระบบ มาตรฐานระดับสากล และพัฒนากระบวนการการผลิตผลผลิตทางการเกษตรให้มีคุณภาพตรงตามที่ต้องการ และสามารถผ่านการตรวจรับรองระบบมาตรฐานระดับสากลเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในการทำการค้ากับตลาด ต่างประเทศ

เพื่อให้งานวิจัยนี้มีขอบข่ายที่แคบพอจะทำให้ลุล่วงในเวลา จะศึกษาและทดลองกับทุเรียนเพื่อพิสูจน์ ความเป็นไปได้ในการตรวจสอบผลไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟและส่งข้อมูลผ่าน ไร้สาย

## ช่วงผลผลิตออกสู่ตลาดของทุเรียน

ผลผลิตทุเรียนของประเทศไทยมีตลอดทั้งปี เนื่องจากฤดูกาลให้ผลผลิตที่แตกต่างกันในแต่ละแหล่งผลิต ประกอบกับมีการใช้เทคโนโลยีการผลิตทุเรียนนอกฤดูกาลโดยใช้สารเคมีพาโคลบิวทรากระตุ้นให้มีการออกดอกนอกฤดูกาลหรือต้นฤดูและพื้นที่ของจังหวัดนครศรีธรรมราชและพัทลุงมีความเหมาะสมเอื้ออำนวยต่อการออกดอกนอกฤดูของผลไม้หลายชนิด ส่งผลให้ประเทศไทยสามารถผลิตทุเรียนได้เกือบตลอดทั้งปีดังแสดงในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 ฤดูกาลผลิตทุเรียนของประเทศไทย [2]

ภาค จังหวัด	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ในฤดู		นอกฤดู				
							ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
ภาคตะวันออก		←-----→	←-----→			←-----→							
ภาคใต้	←-----→						←-----→			←-----→		←-----→	

## การเก็บเกี่ยวและการเก็บรักษาทุเรียนหลังเก็บเกี่ยว

การเก็บเกี่ยวทุเรียนจำเป็นต้องพิจารณาถึงลักษณะผลทุเรียน โดยพิจารณาจากสิ่งต่างๆ ดังนี้

### 1. นับอายุผล

โดยการจดบันทึกวันที่ดอกบานของแต่ละพันธุ์แต่ละรุ่นไว้

- พันธุ์เบา เช่น กระจุมทอง ชะนี ลวง ฯลฯ เก็บผลได้หลังจาก ดอกบาน 90-120 วัน
- พันธุ์กลาง เช่น ก้านยาว หมอนทอง ทองยี่หวัด ทรัพย์ศรี ฯลฯ เก็บผลได้หลังจากดอกบาน 120-130 วัน
- พันธุ์หนัก เช่น อีหนัก ฯลฯ เก็บผลได้หลังจากดอกบาน 140 -150 วัน

### 2. คุณลักษณะภายนอก

- เปลือกจะเปลี่ยนจากเขียวสดเป็นสีน้ำตาลหรือเขียวแกมเทาแต่ผลที่อยู่นอกทรงพุ่ม โคนแสงแดดมากจะมีสีน้ำตาลมากกว่าผลที่อยู่ในทรงพุ่ม
- ก้านผลมีสีน้ำตาลคล้ำสาทรอยต่อระหว่างด้านผลตอนบนกับก้านผลตอนล่าง (ปลิง) จะอวบใหญ่ ผลแก่มีก้านขนาดใหญ่ เมื่อตัดแล้วปล่อยจะติดกลับ เมื่อลูบจะรู้สึกผิวของก้านสาทร
- ปลายหนามจะแห้งร่องหนามค่อนข้างห่างและมีสีน้ำตาลและจะพบว่ามีตุ่มเม็ดสีน้ำตาลเล็กๆ อยู่รอบๆ โคนหนาม ซึ่งสังเกตได้ชัดในทุเรียนพันธุ์ก้านยาว
- เคาะหรือใช้นิ้วดีดบริเวณ โคนหนามจะมีเสียงโปรง ไม่แน่นทึบเสียงดีดทุ เมื่อดีดพูของผลทุเรียนบริเวณ โคนหนาม ถ้ามีเสียงโพรงไม่ทึบแสดงว่ามีการหลวมของพูหรือเกิดช่องว่างระหว่างเนื้อกับเปลือกของผลทุเรียน
- ปากปลิง (รอยต่อระหว่างปลายกิ่งกับปลายก้านผล) ขยายโตขึ้นเมื่อทุเรียนแก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความยืดหยุ่นของปลายแหลม เมื่อทุเรียนแก่ปลายหนามจะมีความยืดหยุ่น เมื่อบีบเข้าหากันจะสามารถติดกลับคล้ายสปริง สีหนามโดยผลที่แก่จะมีปลายหนามสีน้ำตาล
- ร่องพู รอยต่อระหว่างพูห่างมากขึ้นแสดงว่าผลแก่
- น้ำที่ก้านผล ทุเรียนแก่น้ำก้านผลใส มีรสหวาน ทุเรียนอ่อนน้ำขุ่นเหนียวติดมือ

การเก็บทุเรียนได้ถูกต้องตามวัยที่ต้องการจะต้องสังเกตลักษณะหลาย ๆ อย่างประกอบกันและจะต้องคำนึงถึงตำแหน่งของผลบนต้นและสภาพดินฟ้าอากาศ เป็นเครื่องช่วยในการตัดสินใจ การเก็บเกี่ยวทุเรียนเพื่อส่งขายต่างประเทศ หากส่งออกทางเครื่องบินให้ตัดทุเรียนที่แก่ 80 % คือ ตัดแล้ว 3-4 วัน ผลจะสุก ส่วนตลาดค่อนข้างไกลหรือตลาดที่ขนส่งทางเรือให้ตัดทุเรียนที่แก่ 70 % คือ ตัดแล้ว 5-7 วัน ผลจะสุก จะเห็นได้ว่าหากมีเครื่องมือช่วยทำนายได้แม่นยำจะเป็นประโยชน์ต่อการส่งออกเป็นอย่างมาก

### การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การตรวจสอบคุณภาพผลไม้ในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการสังเกตลักษณะภายนอกของผลผลิต เช่น ขนาด รูปร่าง สี กลิ่น เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีการประเมินสมบัติทางกายภาพบางประเภทที่ตอบสนองต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้ เช่น การเคาะฟังเสียง เพื่อประมาณความแก่ของทุเรียน หรือ แอปเปิล เป็นต้น ที่ผ่านมามีงานวิจัยหลายชิ้นทั้งในและต่างประเทศได้นำเสนอเทคนิคการทดสอบแบบไม่ทำลายที่ใช้ประมาณคุณภาพของผลไม้ ได้แก่ การตรวจวัดความหนาแน่น (density) [3] การกระทบสัมผัส (impact) [4]-[5] การสั่นสะเทือน (vibration) [6] การใช้เสียง (acoustic) [7] การวัดสมบัติทางแสง (optical properties) [8] การใช้อัลตราโซนิก (ultrasonic) [9] การใช้เครื่องจักรมองเห็นได้ (machine vision) [10] การใช้รังสีอินฟราเรดใกล้ (near-infrared: NIR) [11]-[14] การจับภาพความร้อน (thermal imaging) [15] การใช้ Nuclear Magnetic Resonance (NMR) [16]-[17] การใช้รังสีเอกซเรย์ (X-ray) [16]-[19] การใช้ลำแสง laser [20] และการใช้คลื่นไมโครเวฟ [21] เป็นต้น อย่างไรก็ตาม มีเพียงบางเทคนิคเท่านั้น เช่น NIR ที่สามารถนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ประเทศไทย เทคนิคบางประเภท เช่น NMR และ X-ray มีข้อจำกัดที่สำคัญด้านต้นทุนเครื่องมือและการใช้งานที่แพง อาจไม่คุ้มทุนกับการนำมาใช้ในการคัดแยกหรือตรวจวัดควบคุมคุณภาพผลไม้ได้

NIR เป็นเทคนิคการตรวจสอบคุณภาพผลไม้ที่ประสบความสำเร็จและนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ เทคนิค NIR เป็นการส่งรังสีอินฟราเรดใกล้ให้สัมผัสกับตัววัสดุผลไม้ จากนั้นใช้หัววัดจับสัญญาณของอินฟราเรดที่สะท้อนกลับหรือส่งผ่านผลไม้ที่ได้ อ่านค่าออกมาเป็นสเปกตรัมของช่วงความยาวคลื่น และนำไปเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกายภาพหรือเคมีของผลไม้ได้ดี [14] พบความสัมพันธ์ที่ดีในการทำนายปริมาณความเป็นกรด ( $r=0.93$ ) และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ( $r=0.82$ ) ของแอปเปิลพันธุ์ Jonagold ที่ช่วงความยาวคลื่น 380-1650 nm อย่างไรก็ตามการใช้ NIR ไม่สามารถทำนายค่า elastic modulus ได้แม่นยำนัก ( $r=0.75$ ) การใช้เทคนิค NIR เพื่อการทดสอบแบบไม่ทำลายนี้ จะต้องใช้หัวส่งและวัดสัญญาณ NIR จะต้องสัมผัสกับผลไม้โดยมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเหลวตัวกลางประสานเพื่อลดความสูญเสียของสัญญาณที่ส่งผ่านหรือสะท้อนกลับ ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับทุเรียนที่มีหนามมากและเป็นอุปสรรคต่อการสัมผัสพื้นที่ผิวของหัวส่งและวัดสัญญาณคลื่น NIR

ในการตรวจสอบคุณภาพของทุเรียนนั้น ได้มีการพัฒนาเครื่องมือวัดความแข็งของก้านทุเรียน [22]-[23] แต่วิธีการนี้ยังไม่เหมาะสมที่นำไปใช้จริงเพราะมีความแปรผันสูงมากเมื่อทุเรียนปลูกในพื้นที่ที่สภาพแวดล้อมต่างกัน นอกจากนี้ยังมีการใช้น้ำเพื่อคัดแยกทุเรียนที่มีความถ่วงจำเพาะลดลงตามความแก่ที่เพิ่มขึ้น [3] อย่างไรก็ตามความถ่วงจำเพาะของทุเรียนทั้งผลอ่อนและแก่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1.0 จึงลอยน้ำทั้งหมด ทำให้ไม่สามารถใช้น้ำคัดแยกคุณภาพตามค่าความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันได้ ชงชัยและคณะ [16] ใช้เทคนิค X-ray Computed Tomography (X-ray CT) เพื่อวัดการดูดกลืน X-ray photon ของเนื้อผลทุเรียนภายในที่มีองค์ประกอบที่ต่างกันตามระดับความแก่ 6 ระดับ จาก 50% (อ่อนที่สุด) ถึง 100% (แก่ที่สุด) พบว่าภาพจาก X-ray CT ของเนื้อผลอ่อนที่ระดับ 50% จะทึบดำที่สุดและจะจางลงตามระดับความแก่ที่มากขึ้นจนขาวสว่างที่สุดเมื่อผลมีความแก่ 100% ค่า CT number ที่ -43 สามารถแยกผลที่ระดับความแก่ 70% ออกจาก 50% และ 60% ได้ ส่วนระดับความแก่ที่ 80% ขึ้นไป ค่า CT number เพิ่มขึ้นตามลำดับแต่ไม่สามารถแยกระดับความแก่ได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทุเรียนมีความแก่ 80% จะพบโพรงภายในผลเนื่องจากเนื้อผลมีความแน่นเนื้อมากขึ้น โพรงภายในผลทุเรียนนี้ปรากฏเป็นร่องดำในภาพ X-ray CT เนื่องจากโพรงภายในนี้มีอากาศอยู่ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ ไม่สามารถดูดกลืนคลื่นรังสีเอกซ์เรย์ได้

Nelson et al. [21] ได้ทดลองวัดการส่งผ่าน คลื่นไมโครเวฟเพื่อทำนายการแก่ของผลพีชที่ ความถี่ 0.2-20 GHz พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่า loss tangent มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาแก่ของผลพีช โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์ด้วย ค่า loss tangent มีค่าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.2 โดยมีความสัมพันธ์กับความถี่ในช่วง 0.2-10 GHz เป็นรูปของพาราโบลาหงาย ดังนั้นการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อทำนายการแก่ของทุเรียน จึงสามารถใช้แนวคิดเดียวกับงานทดลองของ Nelson et al. [21] ได้

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัญญาณไมโครเวฟที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของทุเรียน
2. เพื่อพัฒนาโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายเพื่อทำนายวันเหมาะสมกับการเก็บเกี่ยว

## บทที่ 2 หลักการพื้นฐาน

### 1. กล่าวนำ

ในการทดสอบคุณภาพผลไม้ทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว คณะผู้วิจัยมีแนวคิดในการหาความสัมพันธ์พื้นฐานของพารามิเตอร์ด้าน ไมโครเวฟที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับระดับของความแก่ และความสุขของทุเรียน เมื่อออกผลอ่อนบนต้นทุเรียนแล้ว สามารถจัดระดับความแก่-อ่อนได้ตั้งแต่ 50, 60, 70, 80, 90 และ 100% ซึ่งระดับที่ควรเก็บเกี่ยวในการส่งออกควรอยู่ที่ประมาณ 60% แต่ระดับการเก็บเกี่ยวทุเรียนที่บริโภคภายในประเทศอาจปล่อยให้แก่ได้ถึง 70-80% จึงเก็บเกี่ยวหลังจากที่เก็บเกี่ยวแล้วควรมีการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพเคมีและเนื้อสัมผัสในช่วงระยะเวลาการเก็บรักษาเพื่อจำลองการสุกของทุเรียน เพื่อให้สามารถเฝ้าติดตามคุณภาพการสุกจนถึงปลายทางผู้บริโภค ซึ่งจะเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลไม้ไทยได้ตรงตามคุณภาพที่กำหนดไว้ เป็นต้น

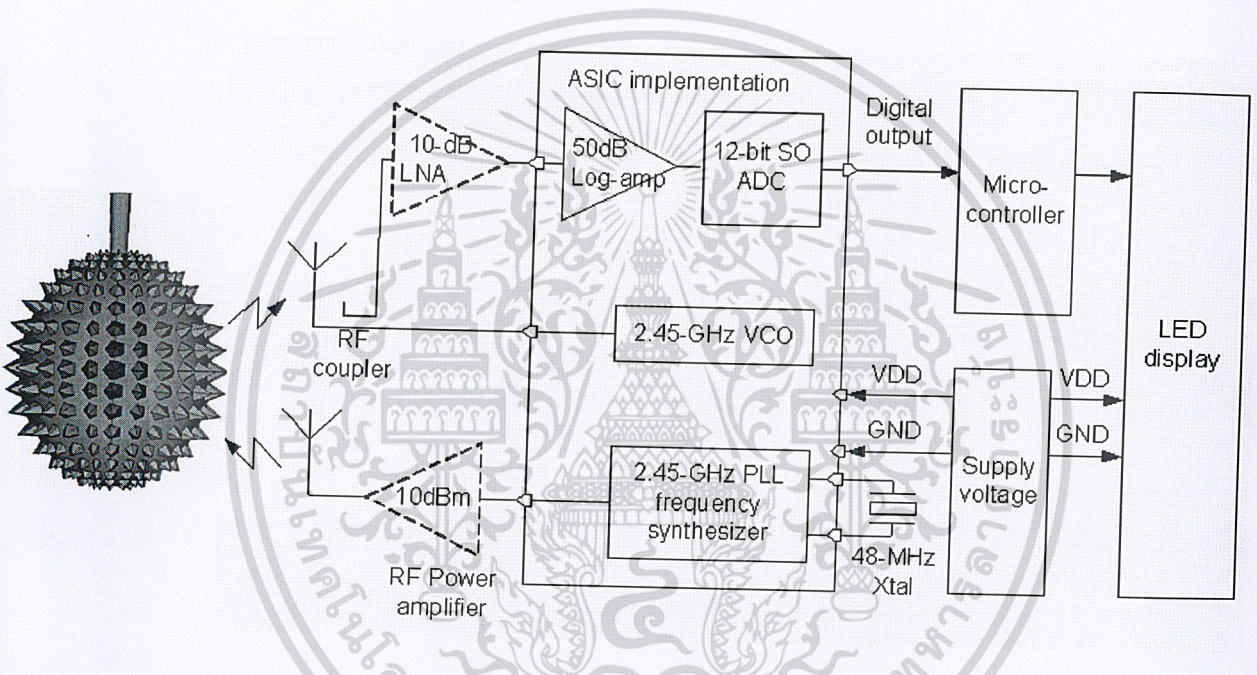
ในการทดสอบหาความสัมพันธ์พื้นฐานของพารามิเตอร์ที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงกับระดับความแก่และสุขของผลไม้ จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ช่วงคือ การทดสอบในห้องปฏิบัติการที่สามารถควบคุมตัวแปรได้ และในภาคสนาม คือสวนผลไม้ของเกษตรกร ผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่าเมื่อทุเรียนมีความแก่ประมาณ 60% เนื้อทุเรียนจะเต็มโพรงภายในผลทุเรียน เมื่อทุเรียนมีความสุขประมาณ 80% เนื้อทุเรียนจะเริ่มรวมเป็นเนื้อเดียวกันและจะหดตัวลงเล็กน้อยทำให้มีความแน่นเนื้อมากขึ้นและจะเกิดโพรงภายในผลทุเรียนชัดเจนขึ้น ความแตกต่างระหว่างการเกิดโพรงภายในทุเรียน ทำให้การดูดซับคลื่นไมโครเวฟแตกต่างกันและน่าจะมี ความสัมพันธ์สอดคล้องกับระดับความแก่ของทุเรียน ส่วนความสุขของทุเรียนนั้นผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่า ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (Total soluble solid: TSS) ในเนื้อทุเรียน ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ ปริมาณแป้งและน้ำตาล จะเพิ่มขึ้นตามการสุกของเนื้อทุเรียน เมื่อเก็บเกี่ยวใหม่ๆ เนื้อทุเรียนค่อนข้างดิบและมี รสชาติฝาด ปริมาณ TSS ที่วัดได้จะน้อย แต่เมื่อสุกพร้อมรับประทานปริมาณ TSS ที่วัดได้จะเพิ่มขึ้น ทำให้มี รสชาติหวาน เนื่องจากค่า TSS มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) ของผลไม้ที่ ความถี่ 2450 MHz ดังนั้นเมื่อทุเรียนสุกค่า TSS จะเพิ่มขึ้นทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกน่าจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้เกิดการลดทอนของคลื่นที่สอดคล้องกับระดับการสุก ตรวจวัดออกมาเป็นพารามิเตอร์ของคลื่น ไมโครเวฟที่แปรความหมายได้สอดคล้องกับการสุกของทุเรียน

### 2. เซนเซอร์วัดทุเรียน

เพื่อให้เซนเซอร์วัดความอ่อนแก่ของทุเรียนมีขนาดเล็ก และใช้กำลังงานต่ำเหมาะสมกับการนำไปใช้ในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย จึงต้องมีการออกแบบ วิจัยและพัฒนาจรรยาหรือไมโครชิพ สำหรับตรวจวัด ความอ่อนแก่ของทุเรียน โดยไมโครชิพที่จะพัฒนานี้มีส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 2.1 คือวงจรสังเคราะห์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่แบบเฟสล็อกกลุ๊ป 2.45 GHz วงจร LC Oscillator ความถี่ 2.45 GHz วงจรขยายกำลังและวงจรตรวจวัดกำลังงานสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ และวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่มีความละเอียด 12 บิต โดยมีข้อกำหนดทางเทคนิค (specifications) ของไมโครชิพที่จะสร้างขึ้นสำหรับวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกดังนี้

- ใช้ความถี่ย่าน 2.45 GHz โดยต้องการให้ปรับค่าความถี่ได้เพื่อทดสอบหาความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับการสะท้อนของคลื่นสัญญาณในย่านความถี่ต่างๆ
- กำลังส่งสัญญาณ 0-10 dBm และความไวในการรับสัญญาณ < -50 dBm
- สามารถตรวจวัดขนาดกำลังงานและเฟสของคลื่นสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากวัตถุให้สัญญาณเอาท์พุทเป็นดิจิทัลที่มีความละเอียด 12 บิต



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของไมโครชิพสำหรับวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

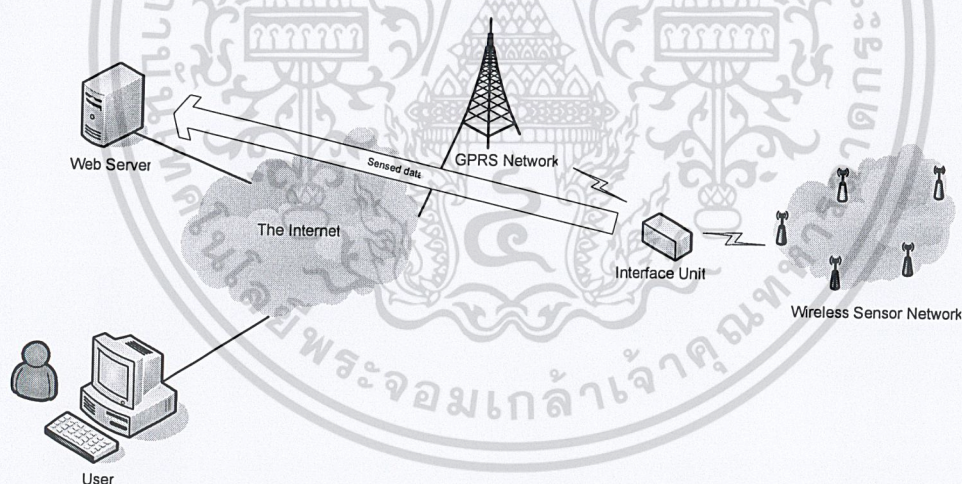
วงจรสังเคราะห์ความถี่แบบเฟสล็อกกลุ๊ป (PLL) 2.45 GHz ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของไมโครชิพนี้ จะใช้โครงสร้างวงจรแบบ fractional-N ซึ่งมีสมรรถนะสูงและสามารถตั้งค่าความถี่สัญญาณได้แบบดิจิทัล วงจร PLL ประกอบด้วยวงจร oscillator วงจร charge pump วงจร phase-frequency detector (PFD) วงจร loop filter วงจร adaptive frequency calibration และวงจร delta-signal modulator

### 3. โครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายในสวนทุเรียน

#### การเชื่อมต่อระหว่างโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายกับระบบแสดงผล

เพื่อที่จะอำนวยความสะดวกต่อเจ้าของสวนในการตรวจสอบถึงข้อมูลต่างๆของสวนทุเรียนที่ตรวจวัดได้จากโหนดต่างๆในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย จึงออกแบบให้มีการแสดงผลของข้อมูลตรวจวัดสามารถกระทำผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งเป็นโครงข่ายที่มีการเชื่อมต่อกันทั่วทั้งโลก ดังนั้นเจ้าของสวนจะสามารถตรวจสอบข้อมูลได้โดยไม่จำกัดถึงสถานที่

จากรูปที่ 2.2 ข้อมูลต่างๆของโครงข่ายไร้สายจะถูกส่งมายังอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Interface unit) ซึ่งจะเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับข้อมูลที่ส่งมาจากโหนดต่างๆในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย จากนั้นอุปกรณ์เชื่อมต่อจะทำการส่งข้อมูลต่างๆที่รับได้เข้าไปยังโครงข่าย GPRS ซึ่งเป็นโครงข่ายข้อมูลบนระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีพื้นที่บริการครอบคลุมถึงจังหวัดระยองและบางส่วนของจังหวัดจันทบุรีซึ่งเป็นจังหวัดที่มีสวนทุเรียนเป็นจำนวนมาก ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 ซึ่งแสดงพื้นที่ที่สามารถรับบริการ GPRS ในโครงข่ายของบริษัทเอไอเอส และดีแทค ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลนี้จะถูกส่งต่อไปยังเว็บเซิร์ฟเวอร์ (Web server) เพื่อให้เจ้าของสวนหรือผู้ที่ได้รับอนุญาตเข้ามาดูข้อมูลที่ตรวจวัดได้ต่อไป



รูปที่ 2.2 การส่งข้อมูลจากโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายไปยังระบบแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชนิดที่สองเรียกว่า โหนดลูก (Client node) ซึ่งจะเป็นโหนดที่ประจำลูกทุเรียนแต่ละลูก ตัวอย่างการติดตั้งโหนดลูกและ โหนดหลักแสดงในภาพที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ



○ Client node    □ Master node

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการติดตั้ง โหนดลูกประจำลูกทุเรียน



□ Master node

รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการติดตั้ง โหนดหลักประจำต้นทุเรียนแต่ละต้นในสวนทุเรียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าที่ของโหนดลูกจะทำหน้าที่ตรวจสอบระดับความอ่อนแอของลูกทุเรียนที่ได้ทำการติดตั้งโหนดลูกเอาไว้ ทั้งนี้เพื่อให้เจ้าของสวนทุเรียนสามารถทราบถึงช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยวผลทุเรียนจากต้น โดยโหนดลูกแต่ละโหนดจะต้องส่งข้อมูลแสดงความอ่อนแอของลูกทุเรียนให้กับโหนดหลักประจำกลุ่มของตัวเองเท่านั้น

สำหรับหน้าที่ของโหนดหลักจะทำหน้าที่ในการติดต่อกับโหนดลูกในกลุ่มของตัวเองเพื่อทำการรับข้อมูลที่แสดงความอ่อนแอของลูกทุเรียนที่ส่งมาจากโหนดลูก จากนั้นจะทำการส่งข้อมูลแสดงความอ่อนแอของลูกทุเรียนทั้งหมดในต้นเข้าไปยังโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย เพื่อให้ข้อมูลเดินทางไปยังระบบแสดงผลเพื่อแสดงถึงความอ่อนแอของลูกทุเรียนต่อเจ้าของสวน นอกจากนี้แล้วโหนดหลักยังทำหน้าที่ในการส่งข้อมูลอื่นๆ ที่จำเป็นสำหรับการดูแลสวนทุเรียนไปยังระบบแสดงผล

เหตุผลที่แบ่งชนิดของโหนดออกเป็น 2 ชนิด เนื่องจากจำนวนลูกทุเรียนในต้นทุเรียนแต่ละต้นจะมีเป็นจำนวนมาก ดังนั้นหากจะให้โหนดที่ประจำลูกทุเรียนทั้งหมดในสวนทุเรียนส่งข้อมูลออกมาในช่วงเวลาพร้อมๆกัน จะทำให้เกิดการคับคั่งของข้อมูลในโครงข่าย ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดการสูญหายของข้อมูล และจะทำให้เจ้าของสวนไม่สามารถทราบถึงจำนวนที่แท้จริงของลูกทุเรียนที่ถึงช่วงเวลาในการเก็บเกี่ยวผล ดังนั้นจึงได้ออกแบบให้มีโหนดหลักประจำต้นทุเรียนแต่ละต้น เพื่อทำหน้าที่ในการรวบรวมข้อมูลแสดงความอ่อนแอของลูกทุเรียนทั้งหมดในต้น และรวบรวมข้อมูลทั้งหมดที่รับได้ให้อยู่ในเฟรมเดียวกัน เพื่อส่งเข้าไปในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย โดยวิธีการนี้จะสามารถลดจำนวนข้อมูลลงไปได้ค่อนข้างมาก ส่งผลให้เกิดความคับคั่งของข้อมูลในโครงข่ายก็จะลดน้อยลงไปด้วย นอกจากนี้แล้วการใช้โหนดหลักยังสามารถส่งข้อมูลนอกเหนือจากการแสดงความอ่อนแอของทุเรียน ข้อมูลเหล่านี้ได้แก่ ข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิ และข้อมูลเกี่ยวกับความชื้นของต้นทุเรียนแต่ละต้น ทั้งนี้เพื่อแจ้งให้เจ้าของสวนทราบถึงสภาพภูมิอากาศในบริเวณสวนของตัวเอง

### โปรโตคอลการเข้าใช้ช่องสัญญาณ (Medium access control protocol)

เนื่องจากโหนดลูกทั้งหมดในต้นทุเรียนจะต้องส่งข้อมูลแสดงความอ่อนแอของผลทุเรียนไปยังโหนดหลัก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีโปรโตคอลในการควบคุมการส่งข้อมูลออกจากโหนดลูกแต่ละโหนดเข้าไปยังช่องสัญญาณ ทั้งนี้เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการชนกันของข้อมูลจากโหนดลูกที่ต้องการส่งข้อมูลออกมาพร้อมกัน โดยในการวิจัยนี้ได้ออกแบบให้ใช้รูปแบบของโปรโตคอล CSMA (Carrier sense multiple access) ซึ่งเป็นโปรโตคอลที่ใช้แพร่หลายทั่วไปในการสื่อสารข้อมูลไร้สาย โดยเฉพาะในมาตรฐานระบบแลนไร้สาย โดยโปรโตคอลชนิดนี้จะกำหนดให้โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลลงไปช่องสัญญาณต้องทำการตรวจสอบก่อนว่าในช่องสัญญาณนั้นมีการส่งข้อมูลออกมาจากโหนดอื่นๆหรือไม่ หากตรวจแล้วว่าในช่องสัญญาณไม่มีการส่งข้อมูล โหนดนั้นจะสามารถส่งข้อมูลเข้าไปในช่องสัญญาณได้ทันที แต่หากตรวจพบการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณ โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลนั้นจะต้องทำการรอกจนกว่าการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณเสร็จสิ้น เสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วจะต้องสุ่มเวลาขึ้นมาช่วงเวลานึงเพื่อหน่วงการส่งข้อมูลของตนเอง และเมื่อการหน่วงเวลาสิ้นสุด โปรโตคอลจึงจะอนุญาตให้ส่งข้อมูลเข้าไปยังช่องสัญญาณได้

ในส่วนของ การส่งข้อมูลระหว่างโหนดหลักด้วยกัน โปรโตคอลที่ใช้ก็เป็นแบบ CSMA เช่นเดียวกับ โปรโตคอลที่ใช้ควบคุมการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณจากโหนดลูกมายังโหนดหลัก แต่ความแรงของการส่งสัญญาณระหว่างโหนดหลักด้วยกันจะสูงกว่า เนื่องมาจากระยะห่างระหว่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างผลทุเรียนด้วยกันจะไกลกว่า

### โปรโตคอลการค้นหาเส้นทางส่งข้อมูลระหว่างโหนดหลัก

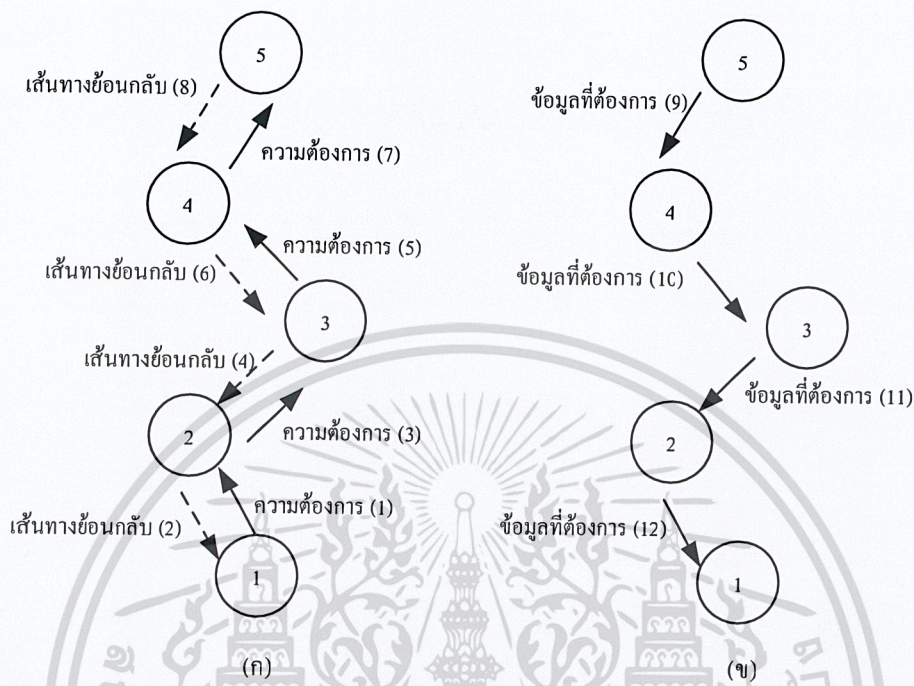
เนื่องจากระยะห่างระหว่างโหนดลูกแต่ละโหนดไปยังโหนดหลักประจำต้นจะค่อนข้างใกล้ การส่งสัญญาณระหว่างโหนดสามารถทำได้ด้วยการส่งสัญญาณหนึ่งการกระโดด (Hop) ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีโปรโตคอลสำหรับค้นหาเส้นทางในการส่งข้อมูลระหว่างโหนดลูกกับโหนดหลัก แต่ในกรณีของการส่งสัญญาณระหว่างโหนดหลักประจำต้นทุเรียนแต่ละต้นไปยังอุปกรณ์เชื่อมต่อที่แสดงในรูปที่ 2.2 ต้องการการส่งสัญญาณมากกว่าหนึ่งการกระโดด เนื่องมาจากระยะห่างระหว่างโหนดหลักกับอุปกรณ์เชื่อมต่อค่อนข้างไกล จึงจำเป็นที่จะต้องมีการโปรโตคอลเพื่อช่วยในการค้นหาเส้นทางส่งข้อมูลจากโหนดหลักไปยังอุปกรณ์เชื่อมต่อ

สำหรับ โปรโตคอลที่ออกแบบสำหรับการส่งข้อมูลแบบหลายการกระโดด (Multi hop) ในโครงการวิจัยนี้จะปรับเปลี่ยนมาจากโปรโตคอล directed diffusion ซึ่งเป็นโปรโตคอลที่ไม่จำเป็นต้องทราบเกี่ยวกับตำแหน่งของโหนดในโครงข่ายก่อนการส่งข้อมูล สำหรับการดำเนินงานของโปรโตคอลสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ โหนดที่ต้องการทราบข้อมูล) ซึ่งก็คืออุปกรณ์เชื่อมต่อ หรืออาจจะเป็นอุปกรณ์ PocketPC ในกรณีที่ต้องการตรวจสอบข้อมูลจากในพื้นที่โดยตรง (จะกระจายเฟรมที่บรรจุความต้องการในการรับข้อมูลชนิดนั้นๆ ไปยังโหนดหลักอื่นๆ ที่อยู่ข้างเคียง เมื่อโหนดหลักที่อยู่ข้างเคียงรับเฟรมที่บรรจุความต้องการในการรับข้อมูลที่ถูส่งออกมา มันก็จะตรวจสอบว่าใครเป็นผู้ต้องการข้อมูล หมายเลขของเฟรมรวมทั้งข้อมูลชนิดที่ต้องการ เมื่อตรวจสอบแล้วว่ามันยังไม่เคยได้รับเฟรมชนิดนี้ มันก็จะกำหนดเส้นทางย้อนกลับ) gradient) ไปยังโหนดที่แพร่กระจายเฟรมนั้นออกมา จากนั้นมันก็จะแพร่กระจายเฟรมที่รับเข้ามานั้นไปสู่โหนดหลักอื่นๆ ที่อยู่ถัดออกไปเรื่อยๆ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการกำหนดเส้นทางย้อนกลับสำหรับโหนดที่ต้องการข้อมูลชนิดนั้นๆ จะมีลักษณะเป็นทอดๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ก)

เมื่อใดก็ตามที่เฟรมที่บรรจุความต้องการในการรับข้อมูลได้ถูกแพร่กระจายไปถึงโหนดหลักที่มีข้อมูลชนิดนั้น โหนดนั้นก็จะส่งข้อมูลที่ต้องการกลับไปยังเส้นทางย้อนกลับที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งจะเห็นว่าการส่งข้อมูลย้อนกลับนั้นไม่ต้องส่งแบบแพร่กระจายอีกต่อไป แต่เฟรมที่บรรจุข้อมูลจะถูกส่งกลับไปยังโหนดต้นทางเป็นทอดๆ ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.7 (ข) อย่างไรก็ตามจะต้องมีการปรับปรุงเส้นทางในการรับข้อมูลอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากอาจจะมีโหนดหลักใดๆ ที่อยู่ระหว่างทางไม่สามารถถ่ายทอดข้อมูลได้ ในการปรับปรุงเส้นทางใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรับข้อมูลนี้ ทางโหนดต้นทางจะส่งเฟรมที่บรรจุความต้องการออกมาตามเวลาที่กำหนดไว้เพื่อการปรับปรุงเส้นทางในการรับข้อมูลนั้นๆ

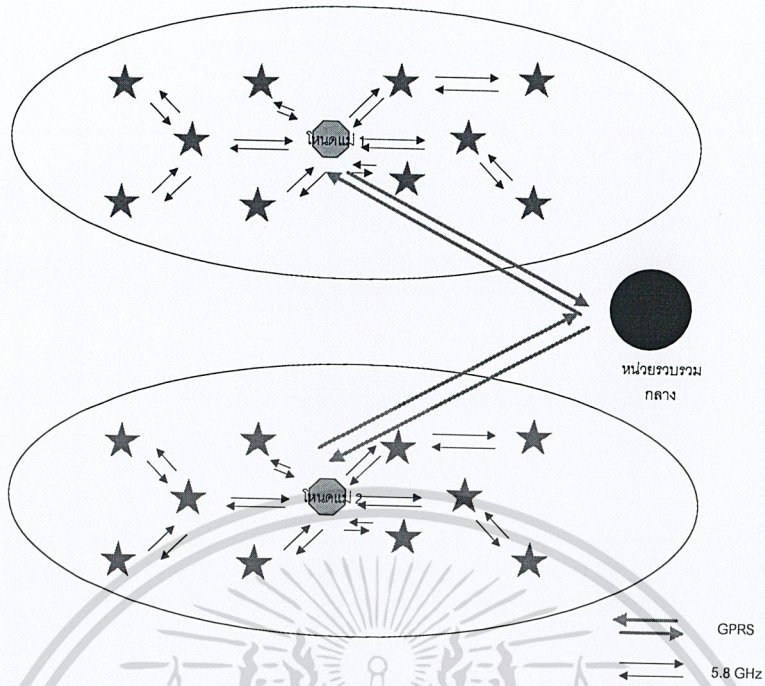


รูปที่ 2.7 การหาเส้นทางในการรับส่งข้อมูล

**สถาปัตยกรรมของอุปกรณ์ในระบบเครือข่ายไร้สาย**

จากรูปที่ 2.8 แสดงระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายสำหรับสวนทุเรียน ส่วนของอุปกรณ์ไร้สายในโหนดลูกและโหนดแม่หรืออีกชื่อหนึ่งว่าเซิร์ฟเวอร์เซ็นเซอร์ไร้สาย (wireless sensor server) นั้นจะต้องประหยัดพลังงาน ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของสถานะแวดล้อมที่ปราศจากแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ขณะเดียวกัน กรณีการใช้พลังงานไฟฟ้าก็เป็นสิ่งที่กำหนดต้นทุนด้วย ข้อมูลของทุเรียนแต่ละผลจะถูกเปลี่ยนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ส่งผ่านช่องทางการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์โหนดลูกและสิ้นสุดที่โหนดแม่ จากนั้น ข้อมูลของผลทุเรียนแต่ละผลในบริเวณพื้นที่การควบคุมของโหนดแม่จะเก็บไว้จนกว่าหน่วยรวบรวมกลางจะส่งคำสั่งร้องขอข้อมูลผ่านทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่องสัญญาณระบบ GPRS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ช่องสัญญาณในการสื่อสารสำหรับระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การวิเคราะห์และออกแบบเซนเซอร์วัดทุเรียน

##### 1. กล่าวนำ

การตรวจสอบทุเรียนทั่วไปจะทำได้โดยนับวันหลังดอกบาน ซึ่งมักมีความคลาดเคลื่อนเมื่ออุณหภูมิและความชื้นมีการเปลี่ยนแปลงทุเรียนจะสุกเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำ ในทางกลับกันจะสุกช้าลงเมื่ออุณหภูมิต่ำและความชื้นสูง ที่ผ่านมามีการวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวกับการตรวจสอบทุเรียน ได้แก่นงานวิจัยในที่ใช้วิธีจิตพิสัยในการประเมินคุณสมบัติของทุเรียน จริงแท้ ศิริพานิช ใช้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งในการจำแนกความแก่ของทุเรียน สายชลเกตุษาและคณะศึกษาความแน่นอนเนื้อที่ระดับความแก่ต่างๆ งานวิจัยที่กล่าวมานี้เป็นการตรวจสอบที่ต้องทำลายซึ่งไม่เหมาะกับการประยุกต์ใช้กับทุเรียนส่งออก วิธีการของกงรัตนประเสริฐและคณะที่ตรวจสอบทุเรียนด้วยแรงสั่นและอัลตราโซนิก ให้ความแม่นยำสูง แต่เครื่องมือมีขนาดใหญ่ ทำให้เหมาะกับการตรวจสอบทุเรียนที่เก็บเกี่ยวมาแล้ว เมื่อเร็วๆ นี้คณะของรัฐปาล์มได้รายงานการใช้คลื่นไมโครเวฟในการตรวจสอบทุเรียนแบบไม่ทำลาย และได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่แสดงให้เห็นความเป็นไปได้ในการใช้คลื่นไมโครเวฟในการตรวจสอบทุเรียน อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวยังต้องใช้โพลที่มีขนาดใหญ่ร่วมกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายที่มีราคาแพง การพัฒนาเซนเซอร์เพื่อตรวจสอบคุณภาพของพืชที่น่าสนใจได้แก่การใช้สายนำคลื่นแทนร่วมเป็นโพลวัดความชื้นของผลปาล์มและเซนเซอร์วัดความแก่ของขมุน

จากข้อมูลของสุภารัตน์ที่แสดงให้เห็นว่าปริมาณของแข็งที่ละลาย แปะ และน้ำตาลรวม เพิ่มขึ้นตามระดับความแก่ทำให้คณะผู้วิจัยมีแนวความคิดที่จะตรวจสอบระดับความแก่ของทุเรียนจากส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาเซนเซอร์เพื่อตรวจสอบระดับความแก่ของทุเรียนโดยไม่ทำลายโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ เซนเซอร์ที่ใช้ในงานดังกล่าวควรมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา เพื่อให้สามารถติดตั้งบนผลทุเรียนได้ ทำให้สามารถตรวจวัดระดับความแก่ตามวันต่างๆ ได้ ผลลัพธ์คือเกษตรกรสามารถทำนายได้ว่าจะต้องเก็บทุเรียนวันใดจึงจะเหมาะสม ในงานวิจัยนี้เราได้นำเสนอสายอากาศแพทช์ที่อยู่ใกล้กันเพื่อใช้วัดการเชื่อมโยงสัญญาณไมโครเวฟผ่านผลทุเรียนและเก็บผลการวัดผ่านโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายหลังจากที่ได้วัดคุณสมบัติทางเคมีและทางไฟฟ้าของเนื้อทุเรียนตามวันต่างๆ เราได้นำมาทำแบบจำลองเนื้อทุเรียนแล้วจึงศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองเทียบกับการทดลอง จากนั้นได้ทำแบบจำลองของสายอากาศแพทช์ที่เชื่อมโยงสัญญาณกันเพื่อใช้เป็นเซนเซอร์วัด  $S_{21}$  เมื่อทดสอบจนเป็นที่พอใจแล้วจึงได้ออกแบบและสร้างเพื่อใช้ในการทดลองในภาคสนาม

## 2. หลักการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ความถี่ไมโครเวฟ

คุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric property) เป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญ ซึ่งวัสดุต่างๆ จะมีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน จึงนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้เพื่อแยกแยะความแตกต่างของวัสดุได้ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ได้จากการวัดอย่างแม่นยำเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์สำหรับการประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ค่าการสูญเสียของฉนวนในสายเคเบิล ค่าอิมพีแดนซ์ของฐานรอง (Substrate) หรือความถี่ไดอิเล็กตริกเรโซเนเตอร์ (Dielectric resonator) ซึ่งข้อมูลของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกยังมีประโยชน์สำหรับนักออกแบบบรรจุกณ์ในการปรับปรุงสารประกอบแม่เหล็ก (Ferrite) หรือตัวดูดซับคลื่น (Absorber) นอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้ในส่วนกระบวนการใช้ไมโครเวฟเพื่ออุตสาหกรรม ได้แก่ อาหาร ผัก ผลไม้ ยาง ไม้ พลาสติก และเซรามิก เป็นต้น คุณสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นค่าไม่คงที่ สามารถแปรผันตามความถี่ อุณหภูมิ การจัดเรียงตัว ประจุ ส่วนผสม ความดัน และโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุ

การศึกษาวิธีการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุมีมาเป็นเวลายาวนาน และได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อหาเทคนิคที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการ โดยที่แต่ละเทคนิคขึ้นอยู่กับธรรมชาติของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ต้องการวัด ทางด้านกายภาพ ทางด้านไฟฟ้า ความถี่ที่สนใจ และระดับของความแม่นยำที่ต้องการ เทคนิคสำหรับการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในย่านความถี่ไมโครเวฟที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ เทคนิคสายส่ง (Transmission line technique) เทคนิคอวกาศว่าง (Free space technique) เทคนิคโพรงเรโซแนนซ์ (Resonant cavity technique) โดยแต่ละเทคนิคมีข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกัน เทคนิคการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกสามารถจำแนกออกได้เป็น เทคนิคการสะท้อนหรือการส่งผ่าน เทคนิคที่เป็นระบบเรโซแนนซ์หรือไม่เรโซแนนซ์ หรือเทคนิคที่มีโครงสร้างแบบเปิดหรือแบบปิด เช่น เทคนิคที่ใช้ท่อนำคลื่นและสายส่งโคแอกเซียล เป็นเทคนิคที่มีโครงสร้างแบบปิด ขณะที่เทคนิคอวกาศว่างและระบบสายโคแอกเซียลแบบปลายเปิด (Open-ended coaxial) เป็นเทคนิคที่มีโครงสร้างแบบเปิด เป็นต้น เทคนิคที่ใช้กันทั่วไปในย่านความถี่ไมโครเวฟมีหลักการทำงานดังนี้

### 2.1 เทคนิคสายส่ง

เทคนิคสายส่งเพื่อการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ทำได้โดยการนำวัสดุที่ต้องการทดสอบวางไว้ภายในสายส่งที่ปิด ซึ่งสายส่งโดยทั่วไปมักเป็นท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมหรือสายโคแอกเซียล ค่าสภาพยอม และค่าความซึมซาบได้สามารถคำนวณได้จากผลการวัดสัญญาณสะท้อน ( $S_{11}$ ) และสัญญาณส่งผ่าน ( $S_{21}$ ) โดยที่วัสดุที่ทดสอบจะต้องบรรจุให้เต็มพื้นที่หน้าตัดของสายส่ง ไม่มีช่องอากาศระหว่างวัตถุและผนังของสายส่ง วัสดุต้องมีเป็นสารเนื้อเดียวและมีผิวหน้าเรียบ

### 2.2 เทคนิคโพรงเรโซแนนซ์

โพรงเรโซแนนซ์เป็นโครงสร้างที่มีค่าตัวประกอบคุณภาพสูง ( $Q$ ) จะเรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่แน่นอน ซึ่งวัสดุที่ต้องการทดสอบจะส่งผลกับความถี่ และค่าตัวประกอบคุณภาพของโพรง ดังนั้นค่าสภาพยอมและค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความซับซ้อนได้จึงสามารถหาได้ที่ความถี่เดียว เทคนิคโพรงเรโซแนนซ์ใช้ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมและแผ่นกั้นเชื่อมต่อทำงานในโหมด  $TE_{10n}$  โดยวัสดุจะถูกวางไว้ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงสุด เมื่อใส่วัสดุผ่านช่องที่ตำแหน่งกึ่งกลางของท่อนำคลื่น จำนวนคี่ของครึ่งความยาวคลื่น ( $n = 2k + 1$ ) จะให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดกับวัสดุที่ทดสอบ ดังนั้นจึงสามารถวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ต้องการทดสอบได้ โดยที่เทคนิคโพรงเรโซแนนซ์เหมาะสำหรับวัสดุที่มีขนาดเล็กๆ การวัดจะวัดได้ที่ความถี่เดียว และเหมาะสำหรับการวัดวัสดุที่มีการสูญเสียน้อย

### 2.3 เทคนิคอวกาศว่าง

เทคนิคอวกาศว่างเป็นวิธีการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุโดยไม่สัมผัสหรือทำลายวัสดุที่ใช้ทดสอบและเป็นวิธีการวัดที่ไม่ต้องเตรียมตัวอย่างวัสดุอย่างพิเศษ เนื่องจากเป็นการวัดที่เหมาะสมกับวัสดุที่อุณหภูมิสูงและไม่เป็นสารเนื้อเดียว ดังนั้นเทคนิคอวกาศว่างจึงง่ายสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบอุตสาหกรรมที่ต้องการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพของวัสดุ เช่นการตรวจสอบค่าความชื้นและความหนาแน่นของวัสดุ โดยจะนำวัสดุที่ต้องการทดสอบมาวางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับแล้ววัดขนาดและเฟสของสัญญาณที่ส่งผ่านจากสายอากาศตัวส่งไปยังตัวรับที่ผ่านวัสดุที่ต้องการทดสอบ ซึ่งผลการวัดจะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ทดสอบ

จากเทคนิคสำหรับการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยแต่ละวิธีมีข้อจำกัดและข้อดีแตกต่างกันไปตามวัสดุที่จะนำมาใช้ทดสอบความถี่ที่สนใจ ขนาดของตัวอย่างวัสดุที่นำมาทดสอบการเตรียมตัวอย่าง หรือแม้กระทั่งความแม่นยำของแต่ละวิธี ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบเทคนิคการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

	เทคนิคสายส่ง	เทคนิคอวกาศว่าง	เทคนิคโพรงเรโซแนนซ์	โคแอกเซียลโพรบ
ความถี่	เป็นช่วง	เป็นช่วง	เดี่ยว	กว้าง
ขนาดของวัสดุ	ปานกลาง	ใหญ่	เล็ก	เล็ก
การควบคุมอุณหภูมิ	ยาก	ง่ายมาก	ง่ายมาก	ง่าย
ความแม่นยำเมื่อวัสดุที่มีการสูญเสียน้อย	ปานกลาง	ปานกลาง	มาก	น้อย
วัสดุที่มีการสูญเสียมาก	ปานกลาง	ปานกลาง	ไม่เหมาะสม	มาก
การเตรียมวัสดุ	ยาก	ง่าย	ยากมาก	ง่าย
สถานะเหมาะสมของวัสดุ	ของแข็ง	แผ่นบางใหญ่	ของแข็ง	ของแข็ง
การทดสอบวัสดุ	ทำลาย	ไม่ทำลาย	ทำลาย	ไม่ทำลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนฐานการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าเทคนิคอวกาศวางนับเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพและน่าสนใจเทคนิคหนึ่ง โดยที่มีการประยุกต์ใช้ในการทดสอบกับวัสดุหลากหลาย เช่น ผลผลิตทางการเกษตรที่มีการวิจัยอย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกกับความสูง ความชื้น และความหนาแน่น เทคนิคนี้น่าสนใจ เนื่องจากเป็นการทดสอบที่ไม่ต้องสัมผัสกับวัสดุและไม่ทำลายวัสดุที่ต้องการทดสอบด้วยการวางวัสดุที่ต้องการทดสอบระหว่างชุดสายอากาศรับส่งแล้ววัดขนาด (magnitude) และเฟส (phase) ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเพื่อคำนวณหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกต่อมาได้มีการพัฒนาต่อโดยการคำนวณหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุจากการพิจารณาเฉพาะขนาด (amplitude) ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเพียงอย่างเดียวโดยไม่พิจารณาเฟสแต่เทคนิคนี้ยังมีความซับซ้อนอยู่บ้าง เนื่องจากต้องวัดขนาดของทั้งสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน นอกจากตัวอย่างเทคนิคของการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่นำเสนอ ยังมีเทคนิคที่น่าสนใจที่มีการวิจัยไว้ก่อนหน้านี้ ได้แก่ เทคนิคการใช้สายอากาศโมโนโพล (Monopole antenna) ใส่เข้าไปในตัวกลางของวัสดุที่ต้องการทดสอบแล้ววัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศนั้น ซึ่งเทคนิคดังกล่าวใช้หลักการที่ว่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในตัวกลางใดๆ เป็นฟังก์ชันของค่าไดอิเล็กตริกในตัวกลางนั้น เทคนิคนี้มีข้อจำกัดที่วัสดุที่ต้องการทดสอบต้องเป็นตัวกลางที่สามารถใช้สายอากาศใส่เข้าไปได้หรือเทคนิคการใช้สายอากาศไดโพล (Dipole antenna) สองตัวเพื่อวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดินโดยใช้หลักการวิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์ร่วม (Mutual impedance) ระหว่างสายอากาศสองตัว

จากที่กล่าวมาจึงเกิดความคิดที่จะนำเทคนิคการใช้สายอากาศไมโครสตริปแพทช์ (Microstrip patch antenna) สองตัวแบบประกบวัสดุที่ต้องการทดสอบแล้วพิจารณาเฉพาะขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเพียงอย่างเดียวเพื่อลดความซับซ้อนของระบบการวัดเดิมแต่เนื่องจากระบบเดิมที่มีทั้งส่วนที่วัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ดังนั้นจะการใช้การสวิตซ์โพลาริเซชัน (Polarization) ของสายอากาศเป็นสองกรณีแทนที่การวัดขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อน ซึ่งโพลาริเซชันที่ใช้เป็นแบบตั้งฉาก (Perpendicular polarization) และแบบขนาน (Parallel polarization)

### 3. หลักการและทฤษฎี

คุณสมบัติไดอิเล็กตริกสามารถนำมาใช้จำแนกวัสดุได้ ซึ่งพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้สำหรับบอกความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ ค่าสภาพยอม ( $\epsilon$ ) และค่าความซึมซาบได้ ( $\mu$ ) ค่าสภาพยอมเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถของวัสดุในสนามไฟฟ้า ค่าสภาพยอมประกอบด้วยส่วนจริง ( $\epsilon'$ ) ที่เรียกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและส่วนจินตภาพ ( $\epsilon''$ ) ที่เรียกว่าตัวประกอบสูญเสีย ดังนั้นค่าสภาพยอมสามารถแสดงได้ดัง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

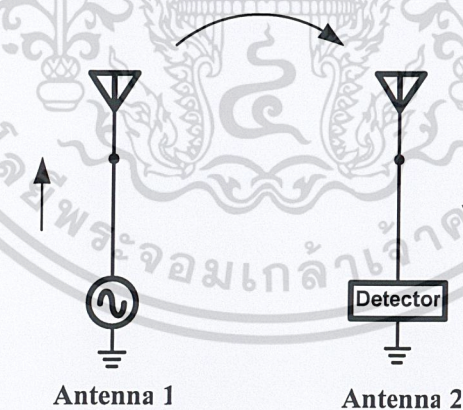
โดยที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกบ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุในการเก็บพลังงานไฟฟ้า ตัวประกอบสูญเสียบ่งบอกถึงพลังงานของสนามไฟฟ้าที่สูญเสียในตัววัสดุ นอกจากนี้พารามิเตอร์ที่มักใช้บ่อยครั้งเรียกว่าแทนเจนต์การสูญเสีย (Loss tangent) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างตัวประกอบสูญเสียกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าสภาพยอมของวัสดุมักถูกนอร์มอลไลซ์ (Normalized) ด้วยค่าสภาพยอมของสุญญากาศและเรียกใหม่ว่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon'_r - j\epsilon''_r \quad (3.2)$$

โดยที่  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  F/m นอกจากนี้ค่าตัวประกอบสูญเสียสัมพัทธ์สามารถเขียนให้อยู่ในฟังก์ชันของสภาพนำ ( $\sigma$ ) ได้ดังนี้

$$\epsilon''_r = \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (3.3)$$

ค่าสภาพยอมเป็นพารามิเตอร์หนึ่งในสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเมื่อสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่านได้จะทำให้รู้ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในตัวกลางนั้นได้



รูปที่ 3.1 การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ

จากรูปที่ 3.1 แสดงถึงการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ โดยที่สายอากาศตัวหนึ่งต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณ สายอากาศอีกตัวต่ออยู่กับตัวตรวจจับสัญญาณ เมื่อสายอากาศตัวที่หนึ่งส่งสัญญาณผ่านตัวกลางมายังสายอากาศตัวที่สองขนาดของสัญญาณที่สายอากาศตัวที่สองตรวจจับได้ เรียกว่า ขนาดของการเชื่อมต่อร่วม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Mutual coupling) ซึ่งค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วมมีผลกระทบโดยตรงมาจากอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศ ดังนั้นเมื่อรู้ค่าขนาดของการเชื่อมต่อร่วม จะสามารถหาค่าไดโอดีคตริกของตัวกลางของคลื่นที่เดินทางผ่านได้

วิธีการที่นำเสนอนี้คือการวัดค่าคุณสมบัติของทุเรียน โดยเลือกพารามิเตอร์ที่เราคาดว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่ออายุของทุเรียนเปลี่ยนไป นั่นก็คือ ค่าคงที่ไดโอดีคตริก โดยนำพารามิเตอร์นี้มาจำลองผลโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ตามเงื่อนไขต่างๆ ที่ได้ตั้งไว้ตามรูปที่ 3.2 เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และสรุป

รูปที่ 3.2 คือ โครงสร้างของการจำลองผลในกรณีต่างๆ ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ซึ่งเราได้แบ่งการจำลองออกเป็น 2 กรณีคือ

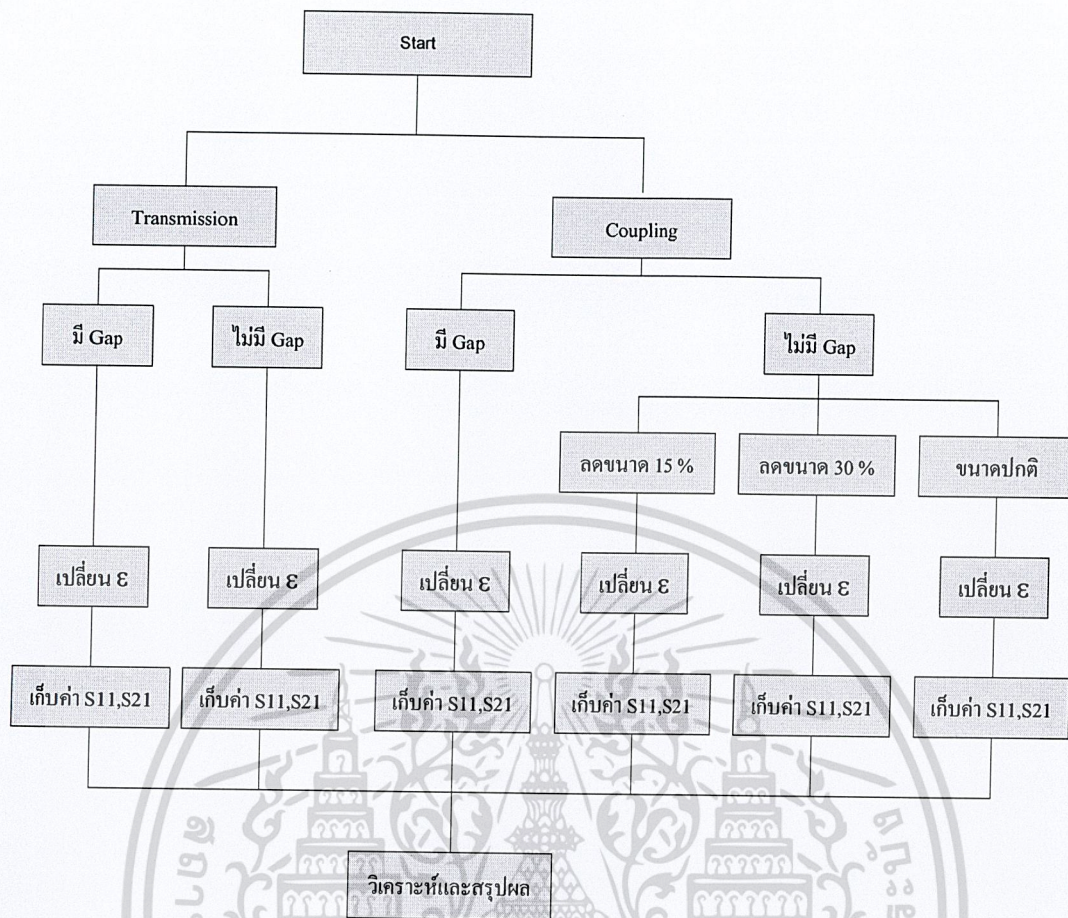
1. Coupling Model
2. Transmission Model

### 1. Coupling Model

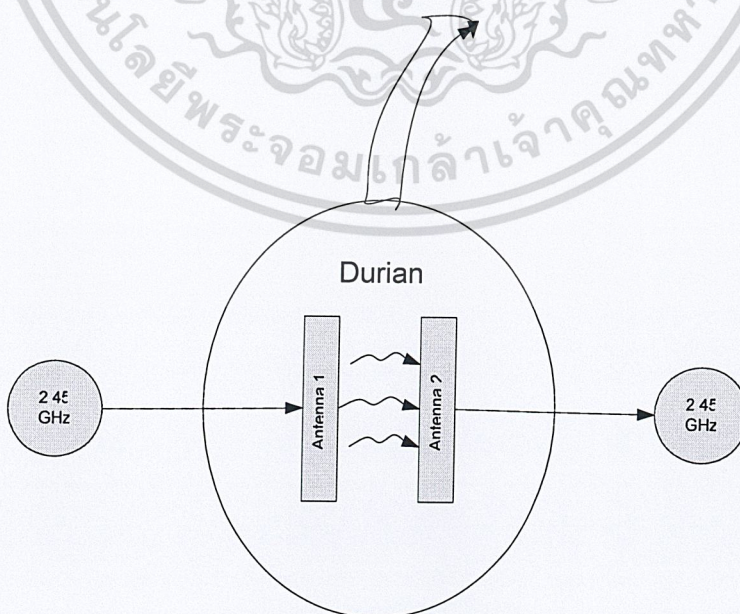
ใช้วิธีการส่งผ่านคลื่นความถี่ 2.45 GHz เข้าไปในผลทุเรียน โดยสายอากาศตัวที่หนึ่งซึ่งเป็นสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมทำหน้าที่เป็นตัวส่งคลื่นเข้าไปในผลทุเรียน โดยที่สายอากาศตัวที่สองมีคุณสมบัติเหมือนสายอากาศตัวที่หนึ่งทุกประการ ทำหน้าที่รับคลื่นของสายอากาศตัวที่หนึ่งที่เข้าและออกมาจากผลทุเรียน โดยที่สายอากาศทั้งสองตัววางอยู่ใกล้กันเพื่อดูผลการคัปปลิง (Coupling) ดังแสดงในรูปที่ 3.3

### 2. Transmission Model

ใช้วิธีการส่งผ่านคลื่นความถี่ 2.45 GHz เข้าไปในผลทุเรียน โดยสายอากาศตัวที่หนึ่งซึ่งเป็นสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมทำหน้าที่เป็นตัวส่งคลื่นเข้าไปในผลทุเรียน โดยที่สายอากาศตัวที่สองมีคุณสมบัติเหมือนสายอากาศตัวที่หนึ่งทุกประการ ทำหน้าที่รับคลื่นของสายอากาศตัวที่หนึ่งที่ส่งผ่านเข้าและออกมาจากผลทุเรียนจากคนละด้านของเปลือกตามรูปที่ 3.4

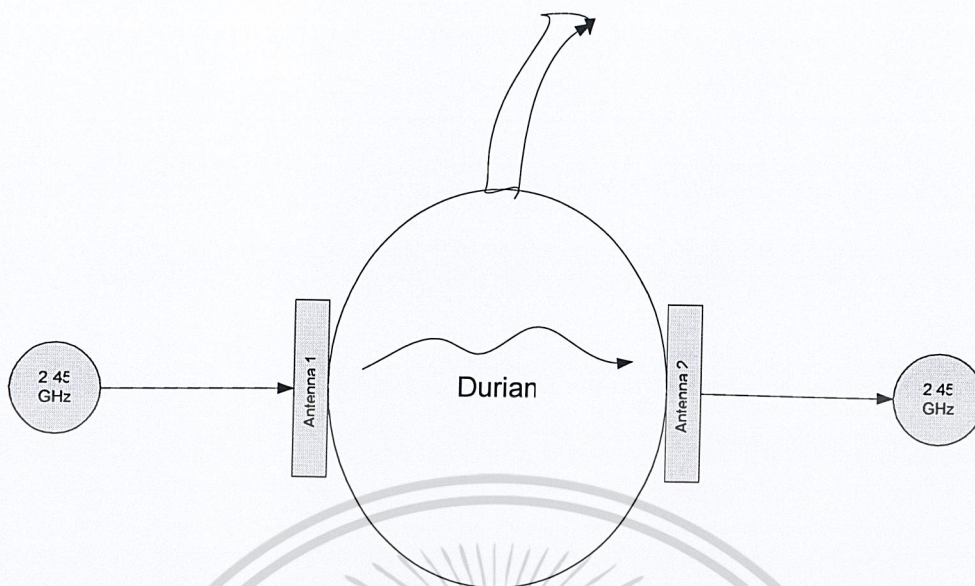


รูปที่ 3.2 โครงสร้างของการจำลองผลในกรณีต่างๆ ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio



รูปที่ 3.3 Coupling Model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

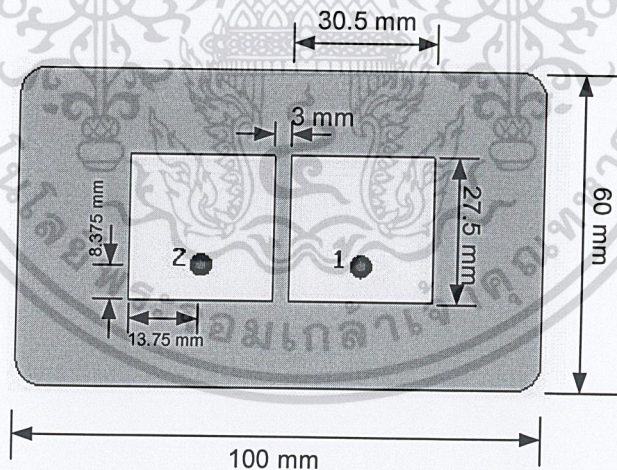


รูปที่ 3.4 Transmission Model

### 3.1 การจำลองโครงสร้างสายอากาศและผลทุเรียน

#### โครงสร้างสายอากาศ

สายอากาศแบบเชื่อมต่อร่วมติดตั้งด้านเดียว

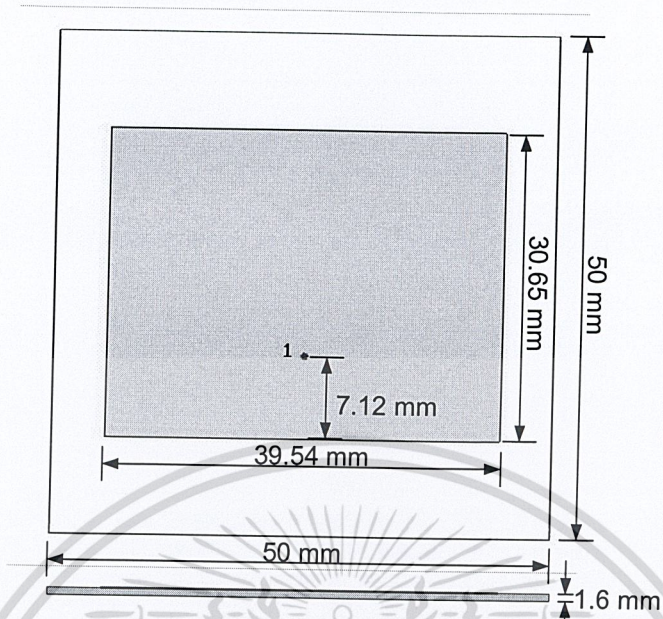


รูปที่ 3.5 สายอากาศแบบเชื่อมต่อร่วมติดตั้งด้านเดียวที่มีค่าสภาพยอมของไดอิเล็กตริกเป็น 4.36

ความสูงของแผ่นเท่า 0.6525 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแบบส่งผ่านติดตั้งทั้งสองด้าน



รูปที่ 3.6 สายอากาศแบบส่งผ่านติดตั้งทั้งสองด้านที่มีค่าสภาพยอมของไดอิเล็กตริกเป็น 3.48  
ความสูงของแผ่นเท่า 1.6 มิลลิเมตร

โครงสร้างผลทุเรียน  
ขั้นตอนการสร้าง

1.สร้างแผ่นวงรี

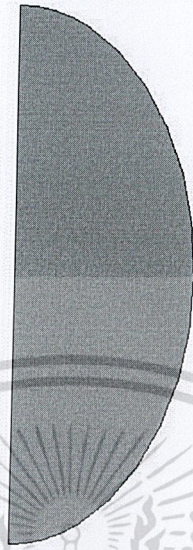


รูปที่ 3.7 แผ่นวงรี

จากรูปที่ 3.7 จะได้แผ่นระนาบเพื่อนำไปทำส่วนของเปลือกทุเรียน

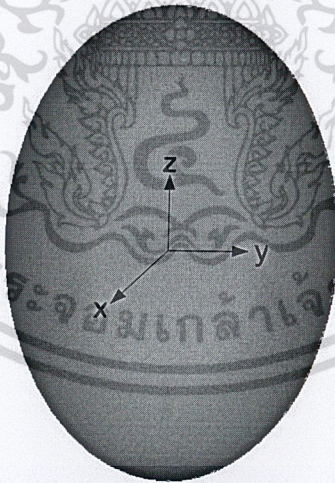
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ตัดแบ่งครึ่งระนาบแผ่นวงรี



รูปที่ 3.8 ตัดแบ่งครึ่งระนาบแผ่นวงรี

## 3. หมุนระนาบวงรี 360 องศา

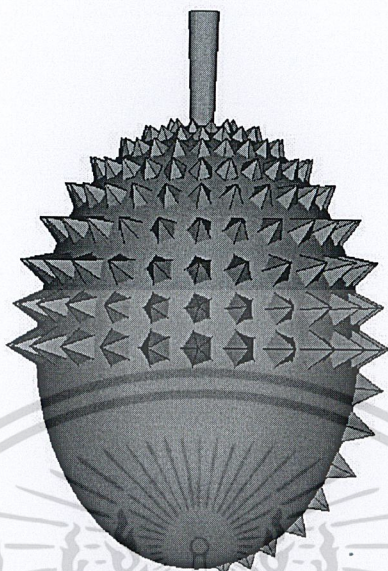


รูปที่ 3.9 หมุนแผ่นระนาบวงรีที่ตัดแบ่งครึ่งรอบแกน  $z$  ไปเป็นมุม 360 องศา

จากรูปที่ 3.9 จะได้รูปทรงวงรีตัน ซึ่งเป็นส่วนของผลทุเรียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

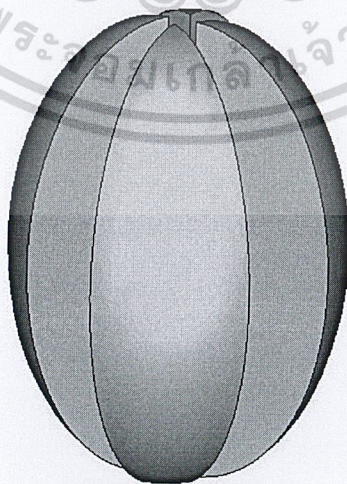
#### 4. สร้างหนามและก้านของทุเรียน



รูปที่ 3.10 ผลทุเรียนที่มีหนามและก้าน

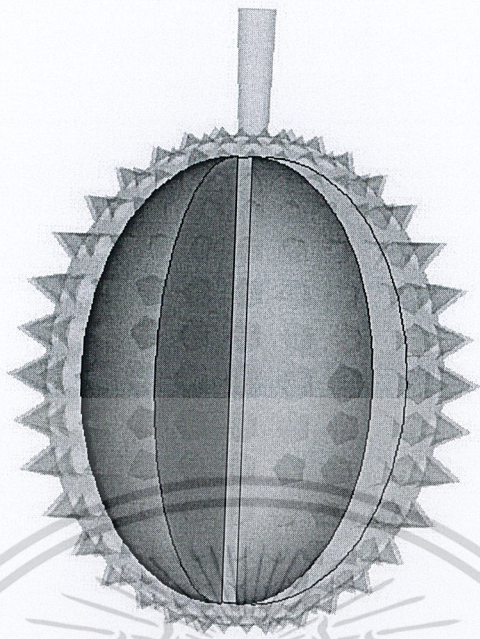
จากรูปที่ 3.10 แสดงผลของทุเรียนที่มีการเพิ่มหนามและก้านเข้าไป โดยที่ขนาดความสูงของหนามทุเรียนประมาณ 2 เซนติเมตร และก้านทุเรียนมีความยาว 10 เซนติเมตร เมื่อเพิ่มหนามเข้าไปจนเต็มจะได้ผลทุเรียนที่เกือบสมบูรณ์ขนาดเพียงส่วนของเนื้อทุเรียน

#### 5. สร้างเนื้อทุเรียน



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(๗)

รูปที่ 3.11 เนื้อทุเรียนและผลทุเรียนที่สมบูรณ์

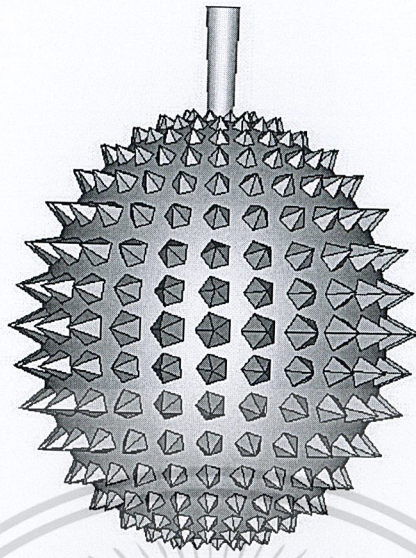
(ก) เนื้อทุเรียน (ข) ผลทุเรียนที่สมบูรณ์

เนื้อทุเรียนที่นำไปแทรกเข้าไปด้านในของผลทุเรียนที่ได้สร้างไว้ในก่อนหน้านี้ ซึ่งทำให้ได้ในผลทุเรียนที่เราต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (๗)

การตั้งค่าเริ่มต้นของโปรแกรม

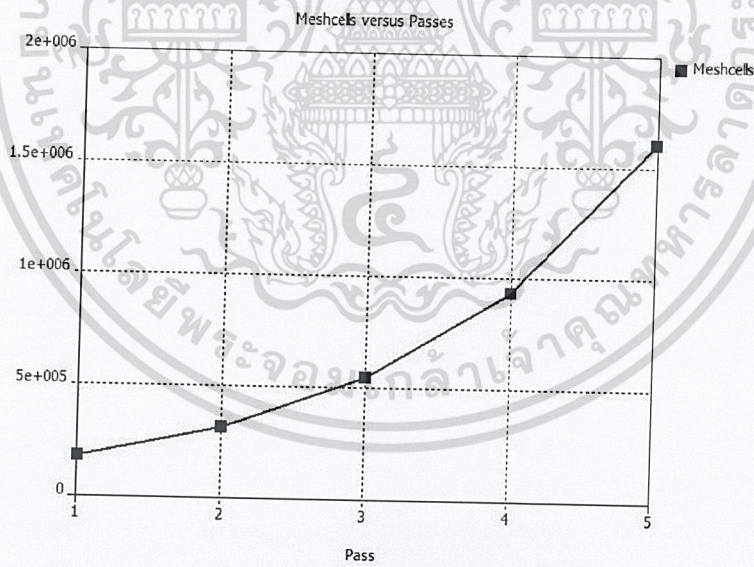
1. การกำหนด Mesh cells ให้เหมาะสมในการคำนวณ

1.1 กำหนดให้ทุเรียนมีค่าไดอิเล็กตริกเท่ากับอากาศ ( $\epsilon_r=1$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 เพื่อให้ขอบเขตการคำนวณสายอากาศเท่ากันทุกครั้งเหมือนกับกรณีที่เปลี่ยนค่าค่าสภาพยอม เพื่อหาความถี่ปฏิบัติการของสายอากาศที่ถูกต้อง



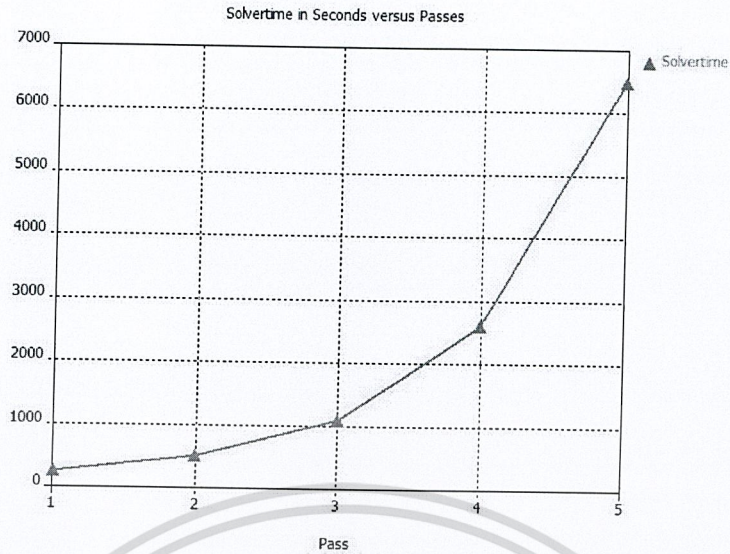
รูปที่ 3.12 ผลของทุเรียนที่กำหนดให้ค่าสภาพยอมเท่ากับหนึ่ง

1.2 จำนวน Mesh cells ที่เพิ่มมากขึ้น ตามการคำนวณในแต่ละครั้ง

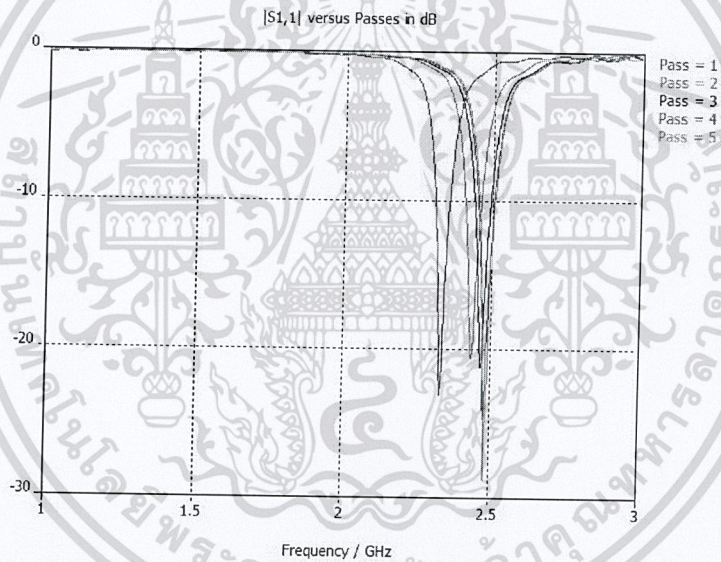


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.13

- (ก) จำนวน Mesh cells
- (ข) เวลาที่ใช้ในการคำนวณ
- (ค) ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

จากรูป 3.13 เมื่อเราพิจารณาทั้งสามรูปจะพบว่า เมื่อจำนวน Mesh cells มีค่ามากขึ้นทำให้เวลาในการคำนวณมากขึ้นและค่าการสูญเสียย้อนกลับจะลู่เข้าสู่ความถี่เรโซแนนซ์เดียวกันมากขึ้นด้วย แต่จากรูป 3.13(ข และ ค) เราจะเห็นว่า เมื่อจำนวนของ Mesh cells มีค่าประมาณ 300,000 Mesh cells จะใช้เวลาประมาณ 2,500 วินาที ซึ่งทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับลู่เข้าสู่ความถี่เรโซแนนซ์เดียวกันกับของจำนวน Mesh cells ที่มีค่า

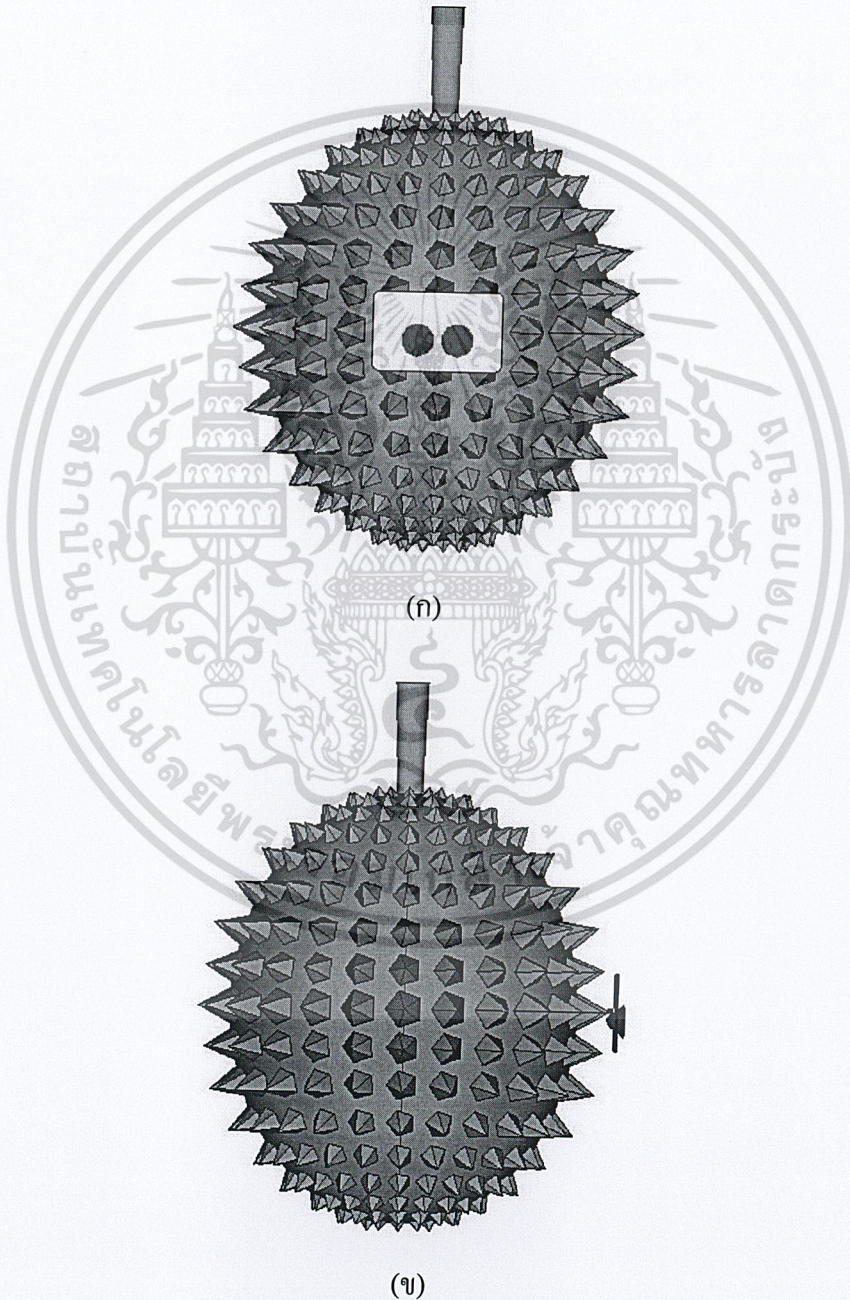
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่า 300,000 Mesh cells ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า 2,500 วินาที ดังนั้นเราจึงเลือกใช้จำนวนของ Mesh cells ที่มีค่าประมาณ 300,000 Mesh cells ในการจำลองโครงสร้างสายอากาศและผลทุเรียน

ตำแหน่งการติดตั้งสายอากาศ

ตำแหน่งการติดตั้งสายอากาศแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

1. สายอากาศแบบติดตั้งด้านเดียวบริเวณกลางลูก

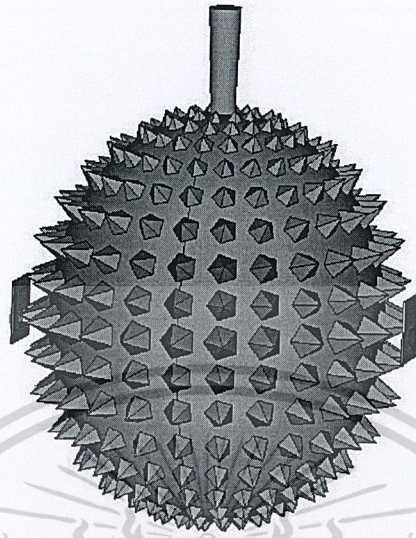


รูปที่ 3.14 สายอากาศแบบติดตั้งด้านเดียวบริเวณกลางลูก

(ก) ด้านหน้า (ข) ด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

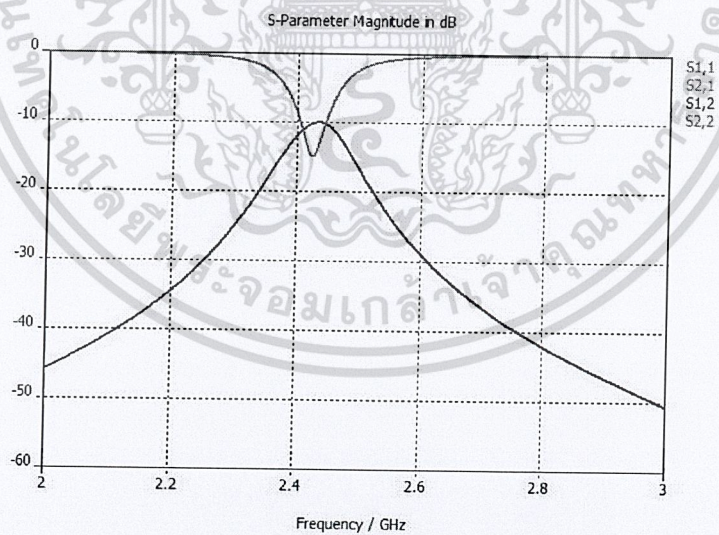
## 2. สายอากาศแบบติดตั้งสองด้าน



รูปที่ 3.15 สายอากาศแบบติดตั้งสองด้านบริเวณกลางลูก

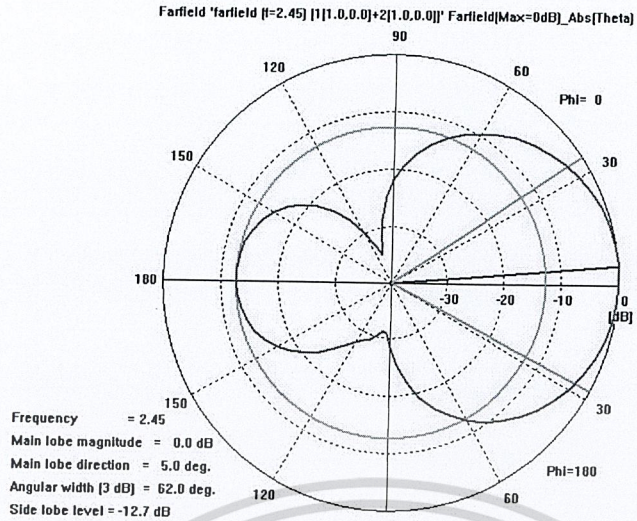
คุณลักษณะของสายอากาศ

### 1. การจำลองทุเรียนที่มีสายอากาศอยู่ด้านเดียว

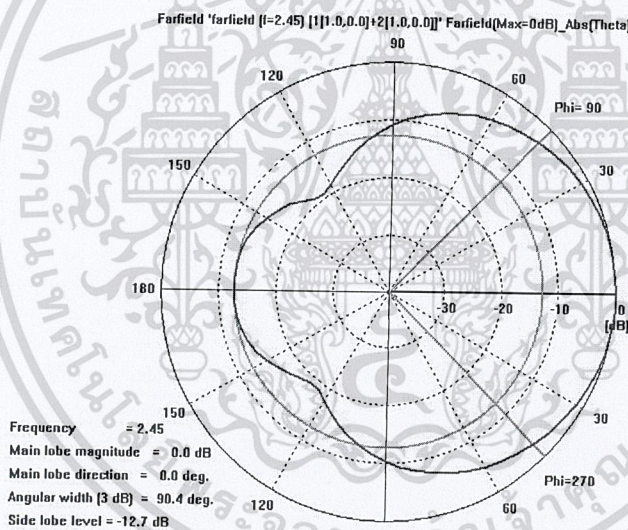


รูปที่ 3.16 ค่า S-Parameter ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แบบรูปการแผ่คลื่นในระนาบ H-plane

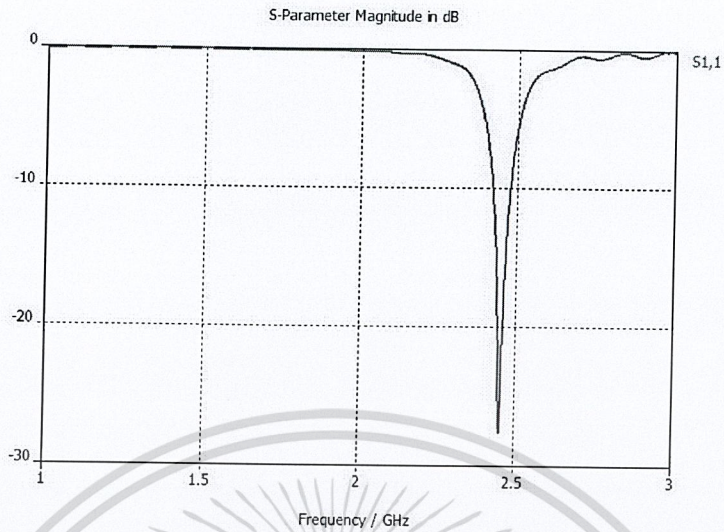


รูปที่ 3.18 แบบรูปการแผ่คลื่นในระนาบ E-plane

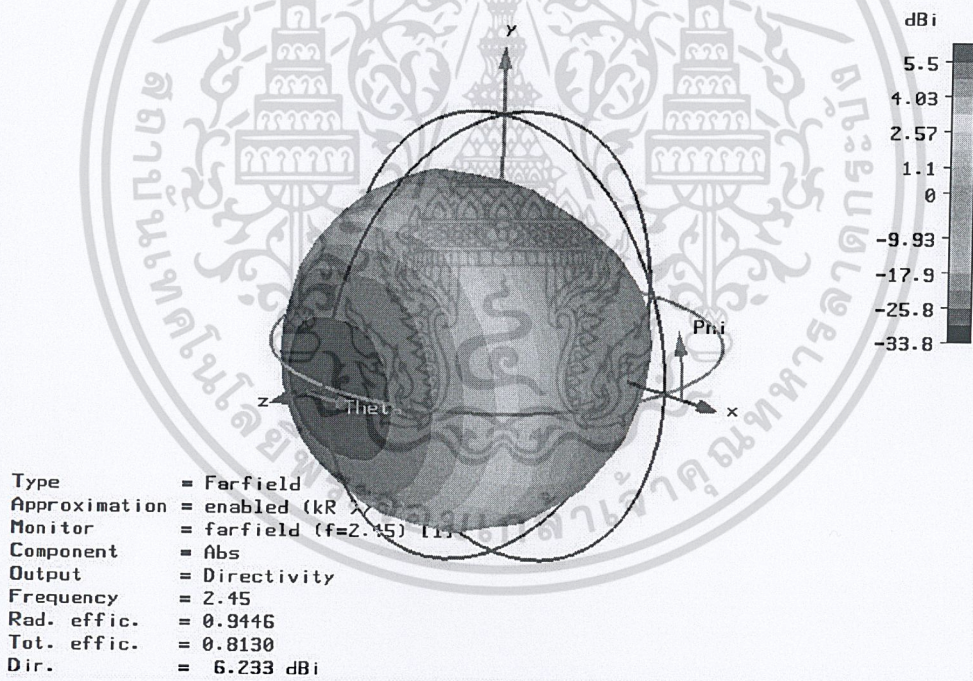
จากผลการจำลองสายอากาศแบบติดตั้งด้านเดียวบริเวณกลางลูก ซึ่งมีแบบรูปการแผ่คลื่นทิศทางเดียว และมีอัตราขยายเท่ากับ 3.370 dBi และมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 62 องศา และ 90.4 องศา ในระนาบ E-plane และ H-plane ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การจำลองทุเรียนที่มีสายอากาศอยู่สองด้าน

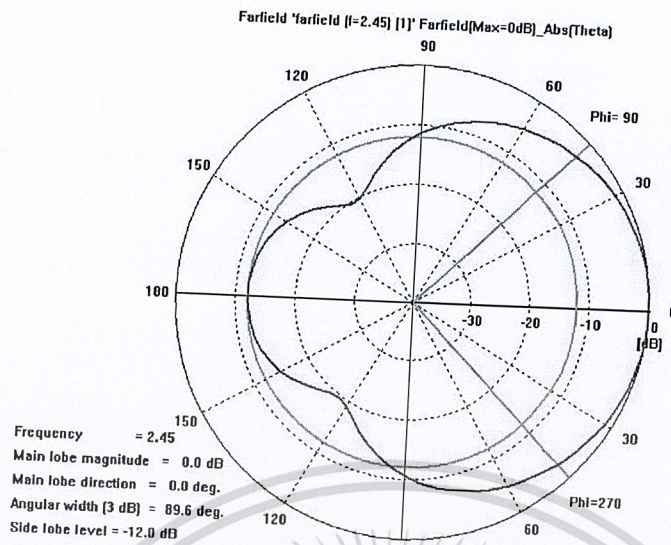


รูปที่ 3.19 ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

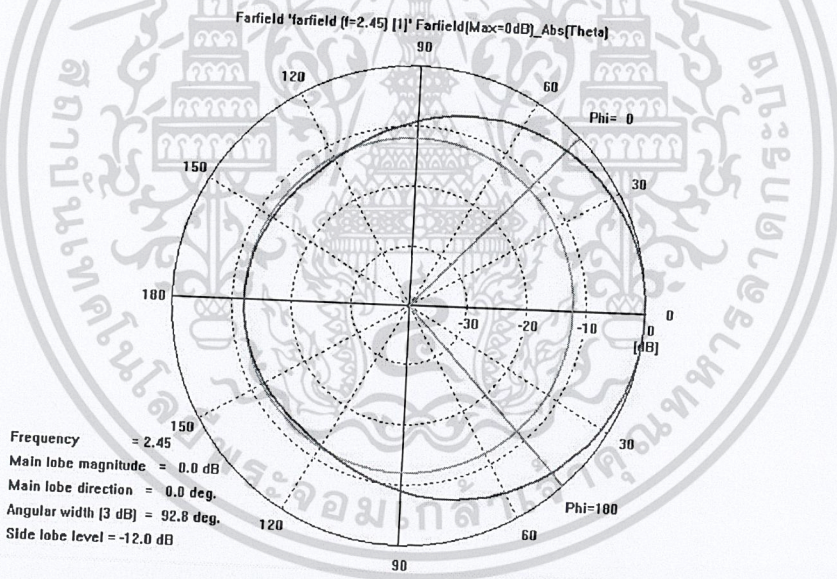


รูปที่ 3.20 แบบรูปการแผ่คลื่นของสายอากาศแบบติดตั้งด้านเดียวบริเวณกลางลูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 แบบรูปการแผ่คลื่นในระนาบ H-plane



รูปที่ 3.22 แบบรูปการแผ่คลื่นในระนาบ E-plane

จากผลการจำลองสายอากาศแบบติดตั้งสองด้านบริเวณกลางลูก ซึ่งมีแบบรูปการแผ่คลื่นทิศทางเดียว และมีอัตราขยายเท่ากับ 6.233 dBi และมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 89.6 องศา และ 92.8 องศา ในระนาบ E-plane และ H-plane ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

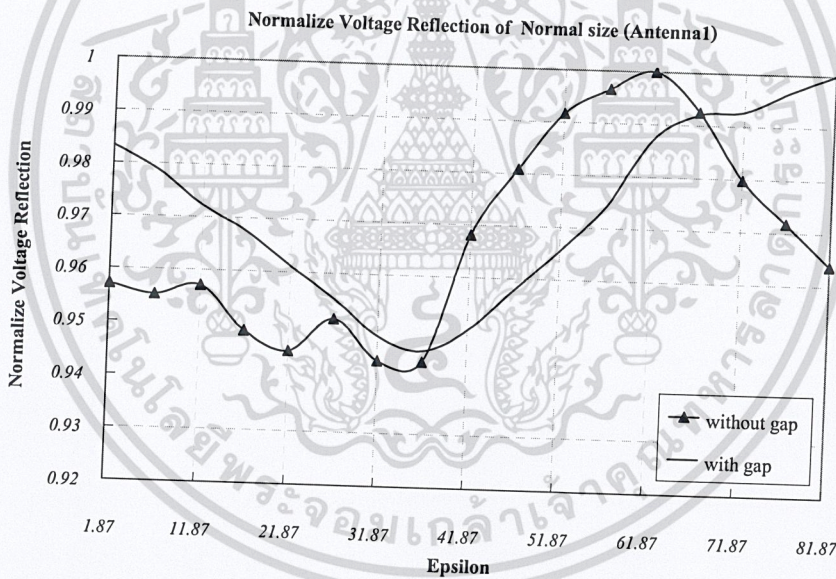
### 3.2 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลการจำลอง

โดยหลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 หลักการ คือ

1. การจำลองแบบเพื่อดูผลกระทบจากค่าสภาพยอมของเนื้อหุเรียน โดยใช้หลักการคัปปลิ่งระหว่างสายอากาศสองตัว (Antenna1)
2. การจำลองแบบเพื่อดูค่าผลกระทบจากค่าสภาพยอมของเนื้อหุเรียน โดยใช้หลักการการส่งผ่านคลื่น (Antenna2)

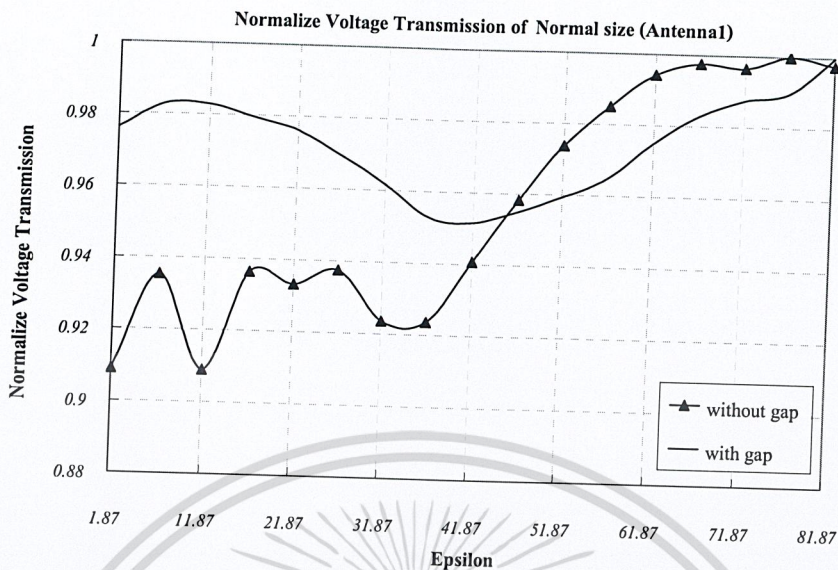
#### 3.2.1 การจำลองแบบเพื่อดูผลกระทบจากค่าสภาพยอมของเนื้อหุเรียนโดยใช้หลักการคัปปลิ่งระหว่างสายอากาศสองตัว (Antenna1)

จากหลักการที่ว่าตัวกลางที่คลื่นแพร่กระจายถูกปิดกั้นหรือมีคุณสมบัติของตัวกลางที่แตกต่างกันจะมีผลให้เกิดคลื่นบางส่วนที่แพร่กระจายเกิดการสะท้อนกลับมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความซึมซาบ ( $\mu$ ) และค่าสภาพยอม ( $\epsilon$ ) ของตัวกลางทั้งสองที่คลื่นแพร่กระจายผ่าน



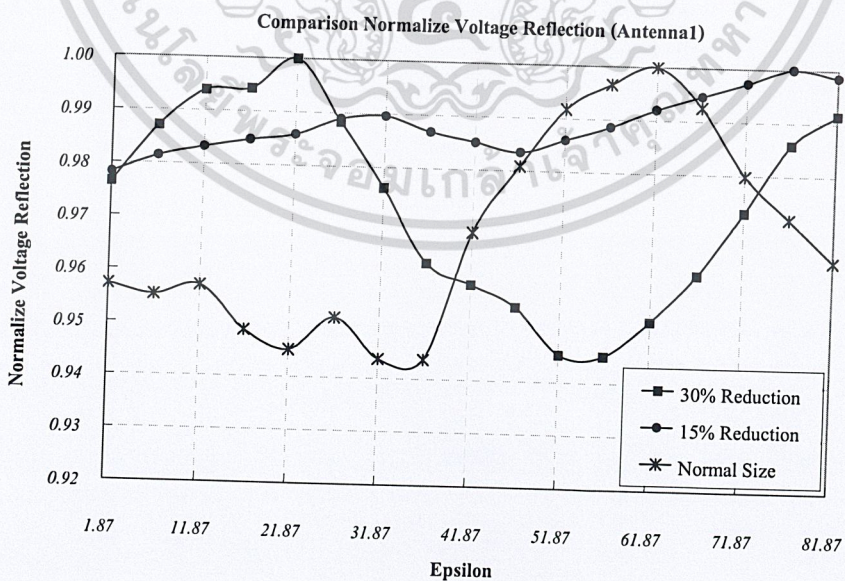
รูปที่ 3.23 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ทำการนอร์แมลไลซ์ที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อหุเรียน

จากรูปที่ 3.23 จะเห็นว่าแนวโน้มของกราฟระหว่างไม่มีและมีส่วนว่างระหว่างเปลือกกับเนื้อ มีแนวโน้มเดียวกัน โดยที่เมื่อค่าสภาพยอมมีค่าต่ำกว่า 41.87 หุเรียนที่ไม่มีช่องว่างระหว่างเปลือกกับเนื้อจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับช่วงที่มีค่าสภาพยอมมากกว่า 41.87



รูปที่ 3.24 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ทำการนอร์มัลไลซ์ที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อทึเรียน

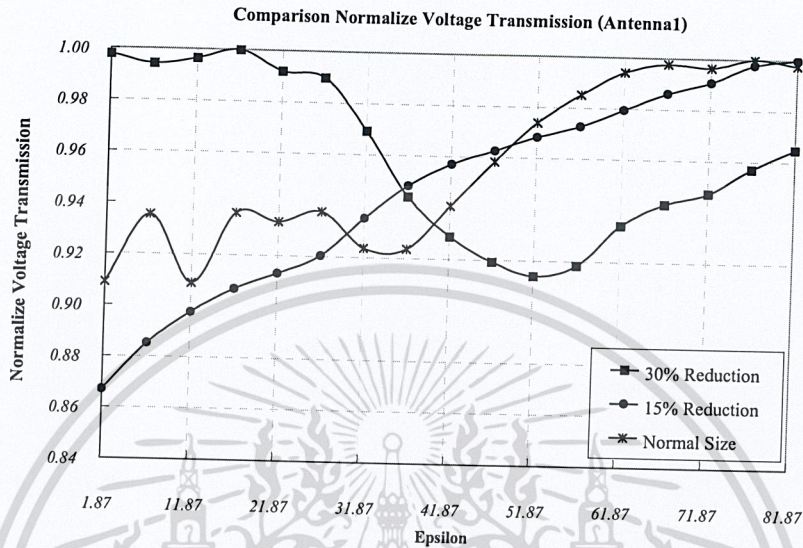
จากรูปที่ 3.24 จะเห็นว่าแนวโน้มของกราฟระหว่างไม่มีและมีช่องว่างระหว่างเปลือกกับเนื้อ มีแนวโน้มเดียวกัน โดยทึเรียนที่ไม่มีช่องว่างระหว่างเปลือกกับเนื้อจะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าสภาพยอมโดยเมื่อค่าสภาพยอมมีค่ามากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านก็มากขึ้นด้วย ส่วนกรณีที่ทึเรียนมีช่องว่างอากาศระหว่างเปลือกกับเนื้อจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน



รูปที่ 3.25 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ทำการนอร์มัลไลซ์ที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อทึเรียน โดยทำการเปรียบเทียบกันของขนาดทึเรียนต่างๆ

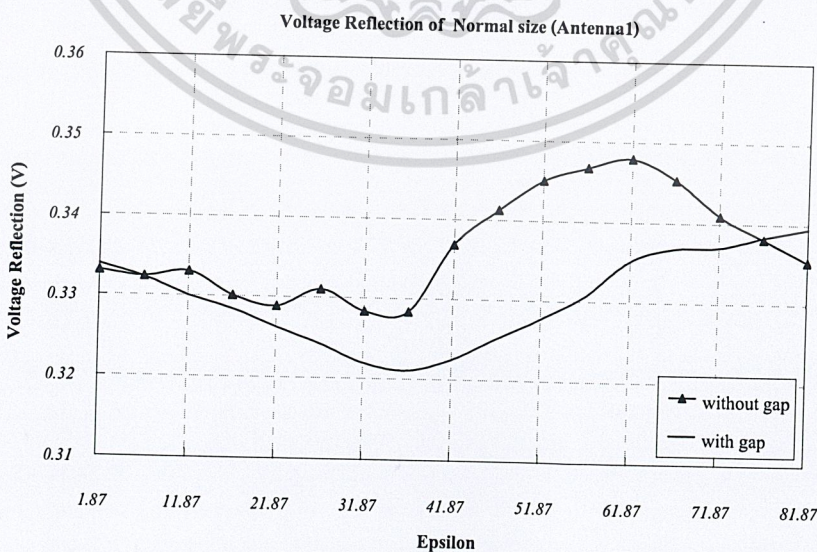
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปรียบเทียบกราฟในรูปที่ 3.25 จะพบว่าขนาดของทุเรียนและค่าสภาพยอมของเนื้อทุเรียน ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยที่แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของทุเรียน ขนาดกลางและเล็กมีแนวโน้มเดียวกัน



รูปที่ 3.26 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ทำการนอแมลไลซ์ที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อทุเรียน โดยทำการเปรียบเทียบกันของขนาดทุเรียนต่างๆ

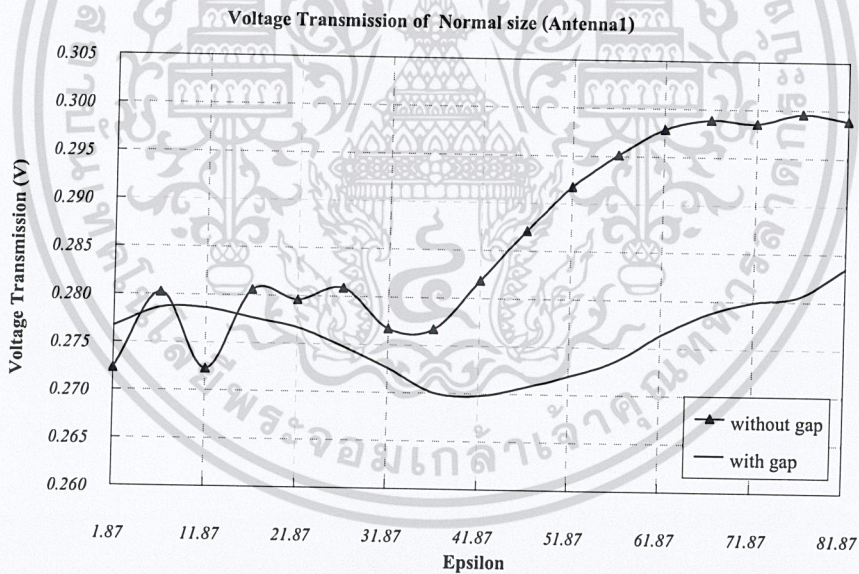
การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ทำการนอแมลไลซ์ จะเห็นว่าแนวโน้มกราฟของทุเรียน ขนาดใหญ่และขนาดกลางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าสภาพยอมในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน แต่ทุเรียนขนาดเล็กมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรกที่แตกต่างกันออกไปและในช่วงที่สองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 3.27 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อทุเรียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

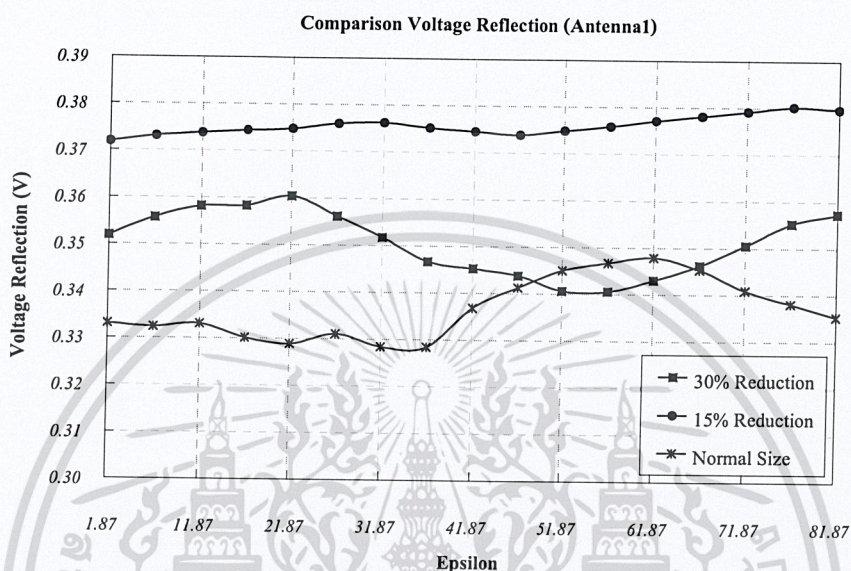
รูปที่ 3.27 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่มีหน่วยเป็น โวลต์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอม เมื่อสายอากาศเป็นแบบคัปปลิ่ง โดยได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่มีและมีช่องว่างอากาศระหว่างเปลือกกับเนื้อทุเรียน จะพบว่า ในช่วงแรกเมื่อค่าสภาพยอมของเนื้อทุเรียนมีค่าน้อยหรือมีค่าใกล้เคียงกับค่าสภาพยอมของเปลือกทุเรียนจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีการเปลี่ยนแปลงน้อย และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของกรณีที่ไม่มีและมีช่องว่างอากาศระหว่างเปลือกกับเนื้อทุเรียนมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อค่าสภาพยอมมีค่ามากกว่า 25.87 จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของทั้งสองกรณีแตกต่างกันมากขึ้น โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของกรณีที่ไม่มีช่องว่างอากาศจะมีค่ามากกว่ากรณีที่มีช่องว่างอากาศซึ่งเป็นเพราะว่าในกรณีที่ไม่มีช่องว่างอากาศคลื่นจะเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าสภาพยอมน้อยไปยังตัวกลางที่มีค่าสภาพยอมสูงกว่าจึงทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมาก ต่างจากกรณีที่มีช่องว่างอากาศ ซึ่งในช่วงที่เนื้อหามีค่าสภาพยอมน้อยๆ หรือมีค่าใกล้เคียงกับค่าสภาพยอมของเปลือกจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อย แต่เมื่อเนื้อทุเรียนมีค่าสภาพยอมที่มากขึ้นหรือแตกต่างจากค่าสภาพยอมของเปลือกทุเรียนมากจะส่งผลให้ค่าของสัมประสิทธิ์การสะท้อนสูงไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3. 27



รูปที่ 3. 28 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อทุเรียน

จากรูปที่ 3. 28 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านหน่วยเป็น โวลต์ที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อทุเรียนขนาดใหญ่กับสายอากาศแบบคัปปลิ่ง จะพบว่า เมื่อเนื้อทุเรียนมีค่าสภาพยอมน้อยกว่า 21.87 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของทั้งสองกรณี คือ กรณีที่ไม่มีและมีช่องว่างอากาศระหว่างเปลือกกับเนื้อทุเรียนจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการแพร่กระจายของคลื่นโดยที่เดินทางจากตัวกลางที่หนึ่งไปยังตัวกลางที่สองซึ่งมีค่าสภาพยอมที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อค่าสภาพยอมมากกว่า 21.87 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของกรณีนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่มีช่องว่างอากาศระหว่างเปลือกกับเนื้อจะมีค่าสูงกว่ากรณีที่มีช่องว่างอากาศ เนื่องจากสายอากาศแบบคัปปลิ่งจะมีคุณสมบัติ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะเปลี่ยนแปลงตามค่าของสัมประสิทธิ์การสะท้อน นั่นคือ เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมากจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมากด้วย แสดงในรูปที่ 3. 28

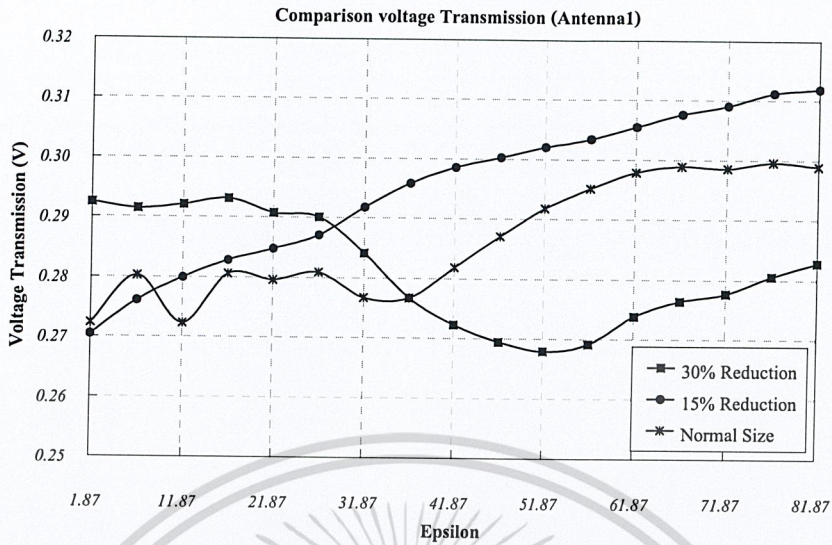


รูปที่ 3.29 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อทิวเรียน โดยทำการเปรียบเทียบกันของขนาดทิวเรียนต่างๆ

จากรูปที่ 3.29 แสดงการเปรียบเทียบผลของสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) ในกรณีที่ผลทิวเรียนมีขนาดต่างกันสามขนาดคือ

1. ขนาดผลทิวเรียนปกติ (ขนาดใหญ่)
2. ขนาดผลทิวเรียนที่ถูกลดลงจากขนาดปกติ 15% (ขนาดกลาง)
3. ขนาดผลทิวเรียนที่ถูกลดลงจากขนาดปกติ 30% (ขนาดเล็ก)

จากเส้นกราฟทั้งสามเส้นของทิวเรียนที่มีขนาดต่างกันมีลักษณะแปรผันตรงตามค่าสภาพยอม ( $\epsilon$ ) กล่าวคือ เมื่อค่าสภาพยอมมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเพิ่มขึ้นและทำให้การส่งผ่านได้มากขึ้นด้วย

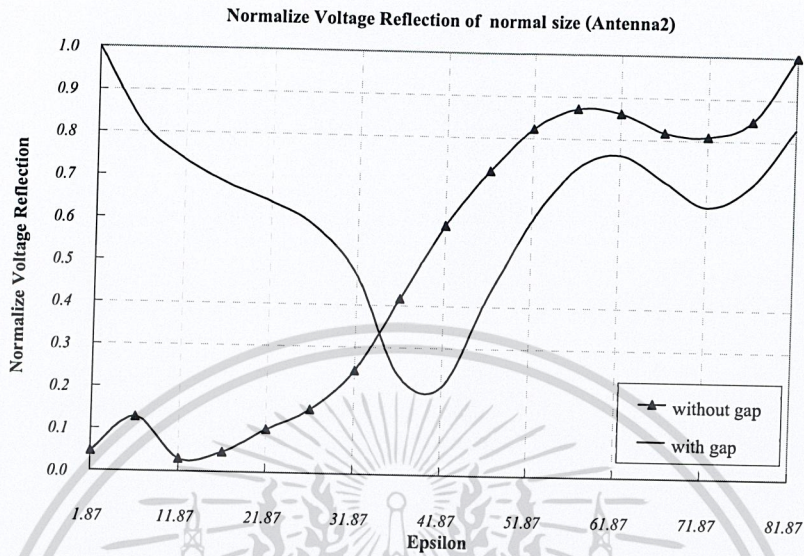


รูปที่ 3.30 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อทุเรียน โดยทำการเปรียบเทียบกันของขนาดทุเรียนต่างๆ

จากรูปที่ 3.30 แสดงการเปรียบเทียบผลของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ( $S_{21}$ ) จากกราฟทั้งสามเส้นของ ทุเรียนที่มีขนาดต่างกันมีลักษณะแปรผันตรงตามค่าสภาพยอมที่เพิ่มขึ้น แต่ช่วงของการเปลี่ยนแปลงนั้นน้อยมากอาจเป็นผลมาจากการสะท้อนและการหักเหของคลื่นที่เดินทางผ่านทุเรียน

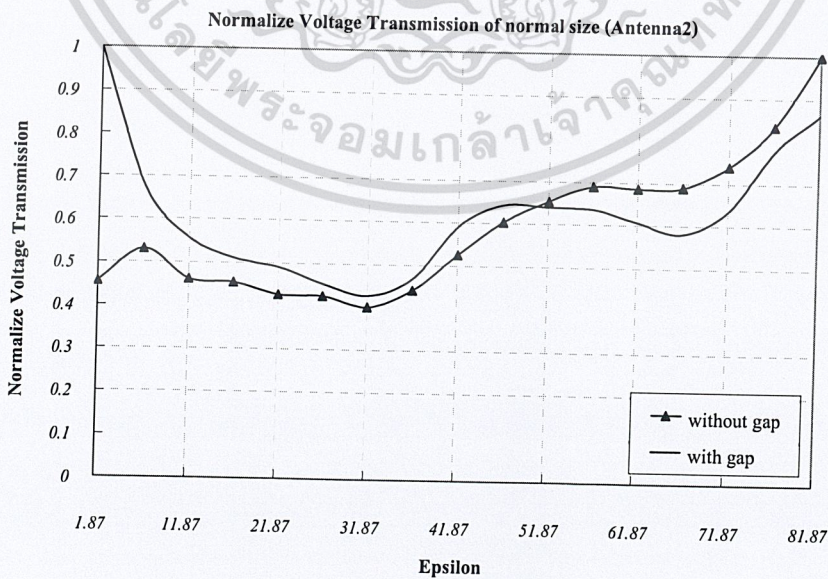
จากรูปที่ 3.29 และ 3.30 จะเห็นได้ว่าเมื่อผลทุเรียนมีขนาดแตกต่างกันก็ยังให้ผลของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

การจำลองแบบเพื่อดูค่าผลกระทบจากค่าสภาพยอมของเนื้อทุเรียนโดยใช้หลักการของการส่งผ่านคลื่น (Antenna2)



รูปที่ 3. 31 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ทำการนอแมลไลซ์ที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อทุเรียน

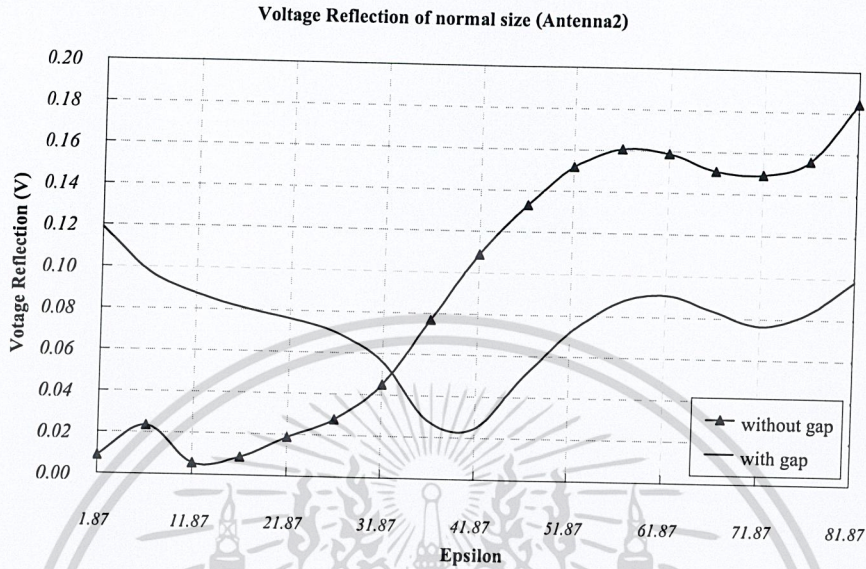
จากกราฟรูปที่ 3.31 ในกรณีที่ไม่มีช่องว่างอากาศระหว่างเปลือกกับเนื้อทุเรียน กราฟจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปในแนวโน้มเดียวกัน คือ ค่าการสะท้อนกลับเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าสภาพยอมมากขึ้นและกรณีที่มีช่องว่างอากาศกราฟมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่กล่าว คือ กราฟมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงไม่แน่นอนเมื่อค่าสภาพยอมมีค่ามากขึ้น



รูปที่ 3. 32 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ทำการนอแมลไลซ์ที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อทุเรียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

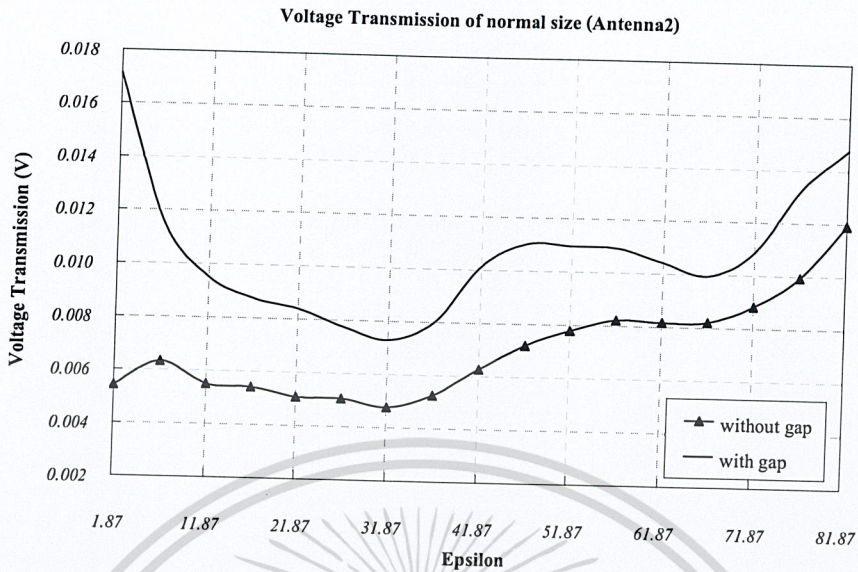
กรณีเมื่อไม่มีช่องว่างอากาศระหว่างเปลือกกับเนื้อทุเรียน กราฟจะมีลักษณะใกล้เคียงกันกับกรณีที่มีช่องว่างอากาศ



รูปที่ 3.33 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อทุเรียน

กรณีที่ 1 คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนในกรณีที่ผลทุเรียนไม่มีช่องว่างอากาศระหว่างเนื้อกับเปลือก จากกราฟมีลักษณะแปรผันตรงกับค่าสภาพยอมเพราะเนื่องมาจากเมื่อค่าสภาพยอมมีค่ามากขึ้นมีผลทำให้การส่งผ่านคลื่นระหว่างสายอากาศสองตัวถูกลดทอนลงและยังเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นบางส่วนจึงทำให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

กรณีที่ 2 คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนในกรณีที่ผลทุเรียนมีช่องว่างอากาศระหว่างเนื้อกับเปลือก กราฟจะเกิดขึ้นสองช่วงคือช่วงแรกคือเมื่อค่าสภาพยอมมีค่าน้อยกว่า 41.87 ช่วงนี้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะมีค่าลดลงเมื่อค่าสภาพยอมมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้ว่าช่องว่างอากาศช่วยทำให้คลื่นเดินทางผ่านผลทุเรียนได้ดีขึ้นและช่วยให้คลื่นเกิดการสะท้อนน้อยลง แต่เมื่อค่าสภาพยอมมีค่ามากกว่า 41.87 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีการแปรผันตรงตามค่าสภาพยอมที่เพิ่มขึ้น แต่ยังคงสังเกตได้ว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีช่องว่างอากาศนั้นเห็นได้ว่าช่องว่างอากาศนั้นช่วยทำให้ค่าการสะท้อนกลับน้อยลง



รูปที่ 3.34 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เป็นฟังก์ชันของค่าสภาพยอมของเนื้อทุเรียน

รูปที่ 3.34 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสายอากาศตัวที่ 1 ( $S_{21}$ ) จากรูปประกอบด้วยเส้นกราฟสองเส้น โดยที่

กรณีที่ 1 คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนในกรณีที่ผลทุเรียนไม่มีช่องว่างอากาศระหว่างเนื้อกับเปลือก จากการจำลองแบบเพื่อดูค่าการส่งผ่านของสายอากาศทั้งสองเมื่อไม่มีสิ่งกีดขวางได้ค่าประมาณ 0.1151 หรือ 18.87-dB เส้นกราฟที่ได้มีลักษณะแปรผันตรงกับค่าสภาพยอม แต่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงน้อยมากและหากนำค่าจากเส้นกราฟมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ในกรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวางจะเห็นได้ว่าคลื่นถูกลดทอนลงอย่างมาก แต่ภายในช่วงการเปลี่ยนแปลงเมื่อค่าสภาพยอมของเนื้อทุเรียนเปลี่ยนแปลงนั้นมีการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอาจเป็นผลมาจากการสะท้อนและการหักเหของคลื่นที่เดินทางผ่าน โครงสร้างทุเรียน

กรณีที่ 2 คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนในกรณีที่ผลทุเรียนมีช่องว่างอากาศระหว่างเนื้อกับเปลือก เส้นกราฟที่ได้ช่วงแรกคือ เมื่อค่าสภาพยอมมีค่าน้อยกว่า 31.87 มีลักษณะแปรผันกับค่าสภาพยอมที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าคลื่นที่ถูกส่งผ่านนั้นถูกลดทอนลงโดยผลทุเรียน และช่วงที่ 2 คือ เมื่อค่าสภาพยอมมีค่ามากกว่า 31.87 เส้นกราฟมีลักษณะแปรผันกับค่าสภาพยอมที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นผลมาจากการเกิดการสะท้อนและหักเหของคลื่นที่ทำให้ค่านั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีช่องว่างอากาศ แสดงให้เห็นว่ากรณีที่ผลทุเรียนมีช่องว่างอากาศระหว่างเนื้อกับเปลือกสามารถส่งผ่านคลื่นได้ดีกว่ากรณีที่ไม่มีช่องว่างอากาศระหว่างเนื้อกับเปลือก การที่มีอากาศภายในผลทุเรียนนั้นช่วยให้คลื่นเดินทางได้สะดวกมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 สรุปผลการจำลอง

จากผลการจำลองทั้งสองกรณี คือ กรณีที่มีการจำลองแบบ เพื่อดูผลกระทบจากค่าสภาพยอมของเนื้อทุเรียน โดยใช้หลักการคัปปลิงระหว่างสายอากาศสองตัว (Antenna1) และการจำลองแบบเพื่อดูค่าผลกระทบจากค่าสภาพยอมของเนื้อทุเรียน โดยใช้หลักการการส่งผ่านคลื่น (Antenna2) โดยได้ทำการศึกษา 2 กรณี คือ กรณีที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่าน ซึ่งได้ทำการจำลอง 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่มีช่องว่างอากาศระหว่างเปลือกกับเนื้อ และ รูปแบบที่ไม่มีช่องว่างอากาศ นอกเหนือจากนั้นยังได้ทำการศึกษาดูการเปลี่ยนแปลงขนาดของผลทุเรียน ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบกัน 3 ขนาด

จากผลการจำลองกรณีที่ทำการคัปปลิงระหว่างสายอากาศสองตัวสามารถสรุปได้ว่า ถึงแม้ผลทุเรียนมีขนาดแตกต่างกันก็ยังไม่ให้ผลของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อค่าสภาพยอมมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเพิ่มขึ้นและทำให้การส่งผ่านได้คืบมากขึ้นด้วยทั้งกรณีที่มีช่องว่างอากาศและไม่มีช่องว่างอากาศระหว่างเปลือกกับเนื้อทุเรียน

ส่วนกรณีที่ทำการจำลองเพื่อดูค่าผลกระทบจากค่าสภาพยอมของเนื้อทุเรียน โดยใช้หลักการการส่งผ่านคลื่นนั้นเราก็ศึกษาทั้งสองกรณี นั้นสามารถสรุปได้ว่า

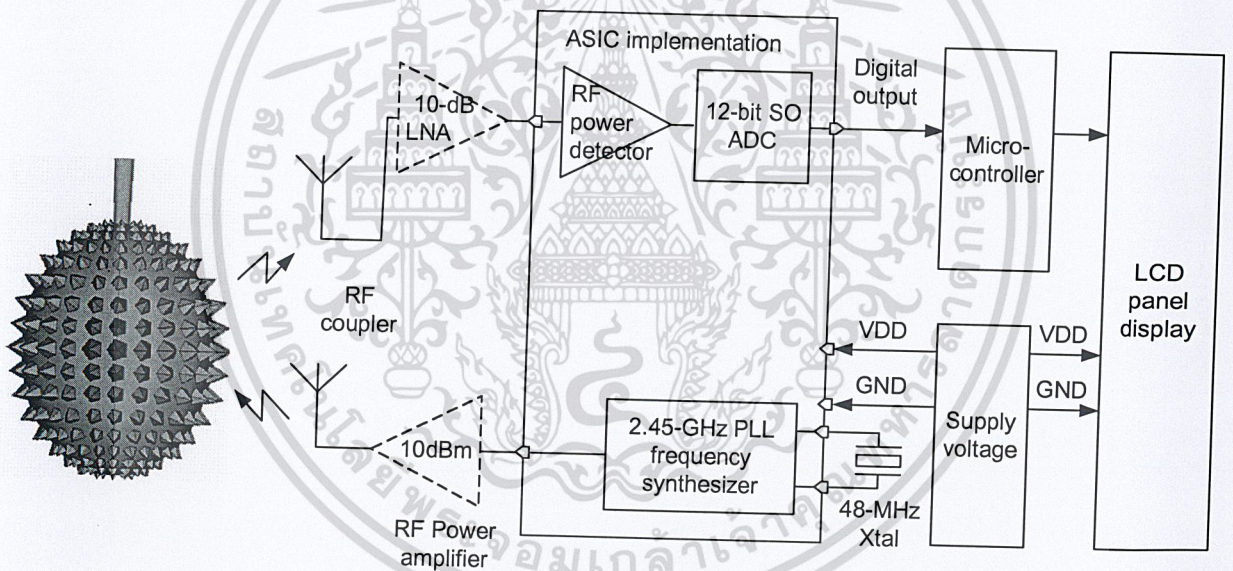
กรณีที่ทำการศึกษาหาผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรวมทั้งผลทุเรียนที่มีช่องว่างอากาศและไม่มีช่องว่างอากาศระหว่างเนื้อกับเปลือก ซึ่งผลจากการจำลองพบว่า ทั้งสองในกรณีนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะแปรผันตรงตามค่าของสภาพยอม แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบทั้งสองกรณีแล้วเห็นได้ว่าช่องว่างอากาศนั้นช่วยทำให้ค่าการสะท้อนนั้นน้อยลง

ส่วนอีกกรณีที่ทำการศึกษาหาผลกระทบของการส่งผ่านของสายอากาศนั้นมีด้วยกันสองกรณีคือ กรณีที่มีช่องว่างและไม่มีช่องว่างอากาศระหว่างเนื้อและเปลือกของทุเรียน นั้นสามารถพบว่า ค่าของสภาพยอมเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีช่องว่างและไม่มีช่องว่างระหว่างเนื้อกับเปลือกของทุเรียนนั้น แสดงให้เห็นว่ากรณีที่มีช่องว่างนั้นสามารถส่งผ่านคลื่นได้ดีกว่ากรณีที่ไม่มีช่องว่าง เนื่องจากการที่มีอากาศภายในผลทุเรียนนั้นช่วยให้คลื่นเดินทางได้สะดวกมากขึ้น

### 3.4 การออกแบบวงจรรวมสำหรับไมโครเวฟเซ็นเซอร์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา วิเคราะห์และออกแบบวงจรรวม (Integrated Circuits) สำหรับไมโครเวฟเซ็นเซอร์ที่ใช้เพื่อตรวจวัดความอ่อนแก่ของทุเรียน ประกอบด้วยวงจรรักษาและส่งสัญญาณคลื่นความถี่ 2.45 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3.35 วงจรภาคส่งสัญญาณประกอบด้วยวงจรสังเคราะห์ความถี่เฟสล็อกคูลและวงจรรขยายกำลังสัญญาณ วงจรภาครับสัญญาณประกอบด้วยวงจรตรวจวัดกำลังงาน และวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลความละเอียด 12 บิต โดยสัญญาณดิจิทัลเอาท์พุทถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อประมวลผลสัญญาณและส่งไปยังจอแสดงผลต่อไป

ไมโครเวฟเซ็นเซอร์ประกอบด้วยวงจรรวมส่วนต่างๆอยู่บอร์ดวงจร ซึ่งมีขนาดใหญ่และใช้กำลังงานมาก จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบและพัฒนาไมโครชิพที่รวมส่วนวงจรต่างๆไว้บนชิพเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.35 โดยมีวัตถุประสงค์ให้ไมโครเวฟเซ็นเซอร์มีขนาดเล็กกลงและใช้กำลังงานน้อยลง เพื่อให้สามารถใช้งานได้สะดวกและมีราคาถูก



รูปที่ 3.35 โครงสร้างวงจรไมโครเวฟเซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดความอ่อนแก่ของทุเรียน

#### 3.4.1 การออกแบบวงจรตรวจวัดกำลังงานสัญญาณ ในย่านความถี่ 2.45 GHz

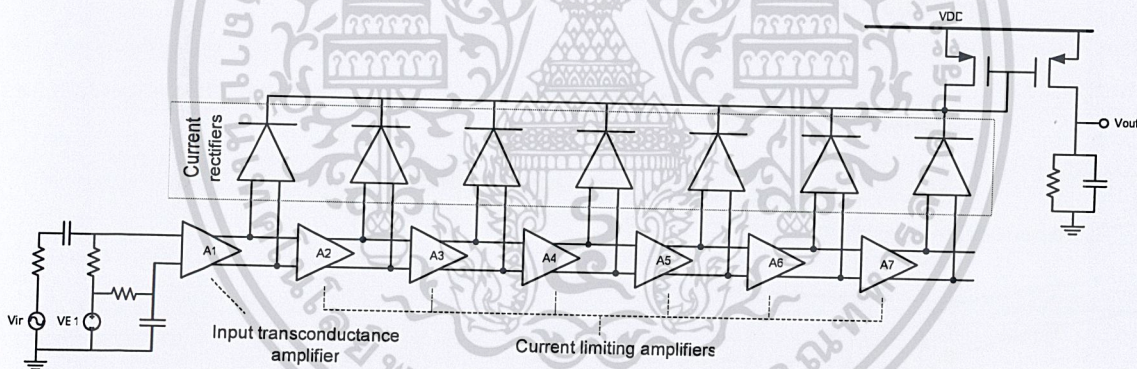
เทคนิคการออกแบบวงจรตรวจวัดกำลังงานสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับความถี่ 2.45 GHz แบ่งออกเป็น 2 เทคนิค คือ 1) เทคนิควงจรรขยายสัญญาณแบบล็อกการิทึม และ 2) เทคนิคความไม่เป็นเชิงเส้นของมอดูเลชันซิสเตอร์ โดยได้ออกแบบและจำลองการทำงานของวงจร ในเทคโนโลยีซิมอส 0.18 ไมโครเมตร โดยใช้โปรแกรม Cadence Spectre

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

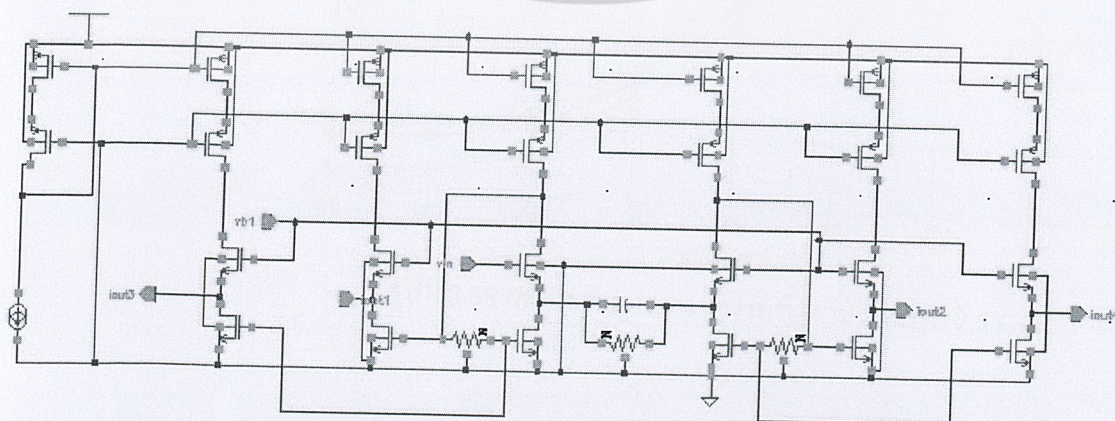
### 3.4.2 การออกแบบวงจรรขยายสัญญาณแบบล็อกการิทึมโดยใช้วงจรรขยายกระแส

วงจรรตรวจวัดกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุได้ออกแบบโดยใช้วงจรรขยายล็อกการิทึมิกโหมดกระแส โดยใช้เทคโนโลยีซีมอส 0.18 ไมโครเมตร เทคนิคการออกแบบวงจรรหลายวิธีได้ถูกศึกษาเพื่อนำมาใช้ลดกำลังงานของวงจรรขยาย โดยรักษาแบนด์วิทอยู่ที่ 2.5 GHz

รูปที่ 3.36 แสดงโครงสร้างวงจรรขยายสัญญาณแบบล็อกการิทึมิกโหมดกระแส ประกอบด้วยวงจรรขยายอินพุททรานคอนดักแตนซ์ และวงจรรขยายกระแสจำกัดแบบดิฟเฟอเรนเชียล 6 ภาค โดยกระแสดิฟเฟอเรนเชียลเอาท์พุทของวงจรรขยายกระแสแต่ละภาคถูกส่งต่อไปยังวงจรรเรกติไฟเออร์ เพื่อทำการรวมกระแสและแปลงเป็นกระแสไฟตรงด้วยวงจรรรองความถี่ต่ำผ่าน สัญญาณอินพุท คลื่นความถี่วิทยุจากสายอากาศ ถูกแปลงเป็นสัญญาณกระแสผลต่างด้วยวงจรรขยายทรานคอนดักแตนซ์ที่มีแบนด์วิทกว้างดังแสดงในรูปที่ 3.37 วงจรรได้นำเอาเทคนิคดีเจเนอเรชั่นแบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ และเทคนิคปรับยอดโดยใช้ตัวต้านทานอนุกรมมาช่วยเพิ่มแบนด์วิทของวงจรรโดยไม่ต้องเพิ่มการใช้กำลังงาน รูปที่ 3.38 แสดงวงจรรขยายผลต่างกระแสจำกัด ที่ได้ใช้เทคนิคดีเจเนอเรชั่นแบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ และเทคนิคปรับยอดโดยใช้ตัวต้านทานอนุกรมมาช่วยเพิ่มแบนด์วิทของวงจรรเช่นกัน



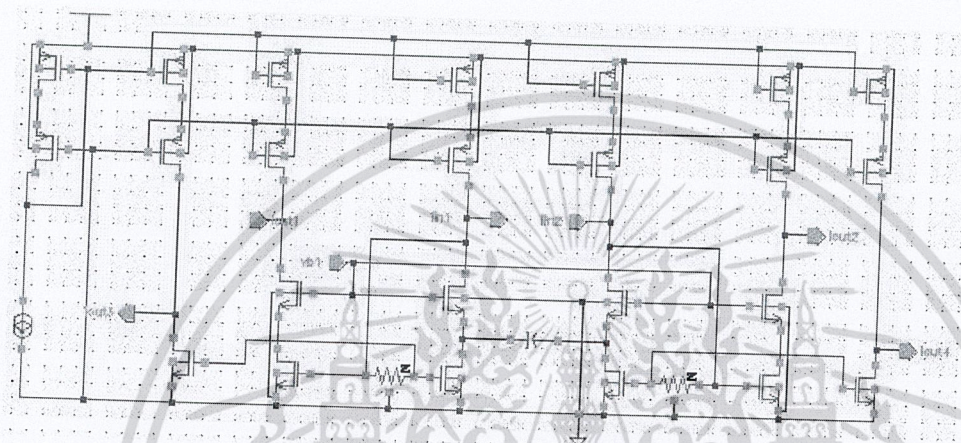
รูปที่ 3.36 โครงสร้างวงจรรขยายล็อกการิทึมิกโหมดกระแส



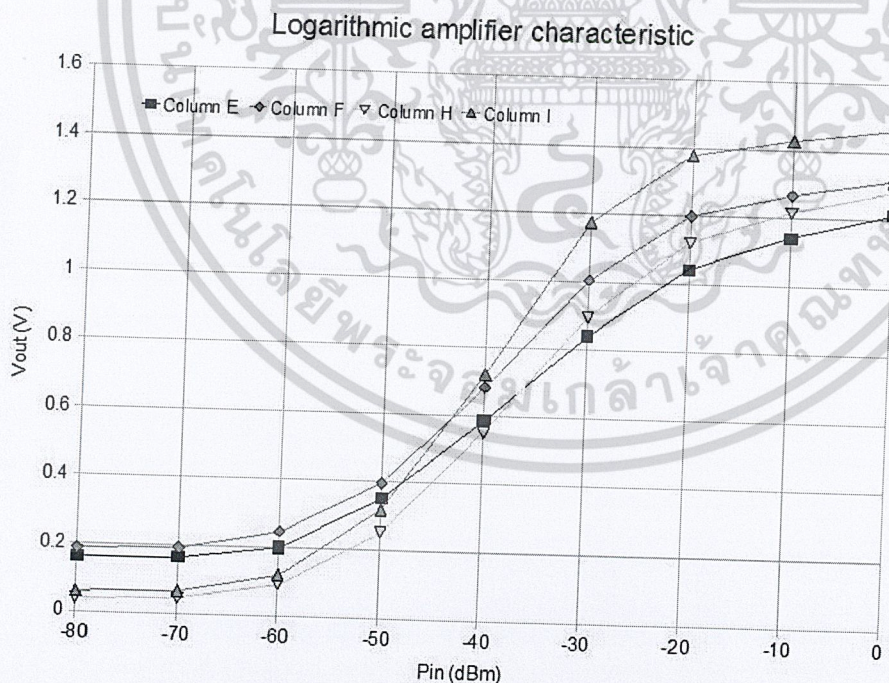
รูปที่ 3.37 วงจรรขยายทรานคอนดักแตนซ์ที่มีแบนด์วิทกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรขยายสัญญาณแบบล็อกการิทึมทั้งหมดถูกออกแบบและจำลองการทำงานโดยโปรแกรม Cadence Spectre ด้วยพารามิเตอร์จากเทคโนโลยีซีมอส 0.18 ไมโครเมตร วงจรใช้กระแสไฟตรง 22.5 มิลลิแอมป์จากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง 1.8 โวลต์ รูปที่ 3.39 แสดงผลที่ได้จากการจำลองการทำงานแบบทรานเซียนเมื่อป้อนสัญญาณอินพุตที่มีความถี่ 2.5 GHz ที่ระดับกำลังงานต่างๆ โดยวงจรมีคุณสมบัติการตรวจวัดกำลังงานที่ได้อยู่ในช่วงกำลังงานอินพุตตั้งแต่ -60 ถึง -20 dBm



รูปที่ 3.38 วงจรรขยายผลต่างกระแสจำกัด

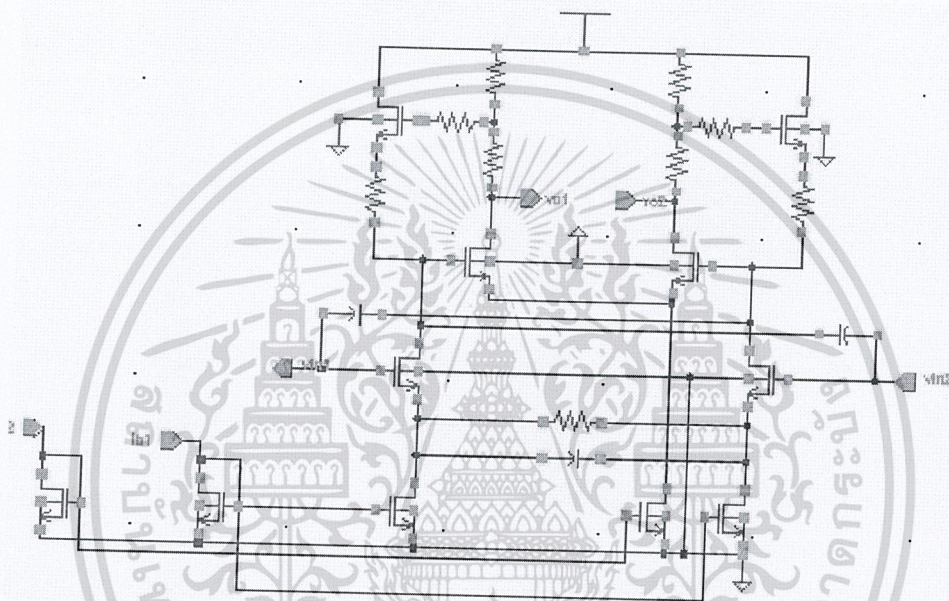


รูปที่ 3.39 ผลการจำลองการทำงานที่ความถี่อินพุต 2.5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณแบบล็อกการิทึมด้วยเทคนิคโมดิฟายเชอร์รี่ฮูเปอร์

วงจรขยายสัญญาณแบบล็อกการิทึมที่มิกด้วยเทคนิค โมดิฟายเชอร์รี่ฮูเปอร์โดยใช้การต่อเรียงกันของ วงจรขยายแรงดันจำกัดได้ถูกออกแบบขึ้นเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงาน โดยวงจรขยายแรงดันจำกัดที่ใช้ เทคนิคโมดิฟายเชอร์รี่ฮูเปอร์แสดงในรูปที่ 3.40 วงจรทั้งหมดมี 5 ภาคขยายและถูกออกแบบด้วยเทคโนโลยี ซีมอส 0.18 ไมโครเมตร ผลการจำลองการทำงานปรากฏว่าวงจรมีคุณสมบัติและประสิทธิภาพการทำงาน ใกล้เคียงกับวงจรโหมดกระแสในหัวข้อที่ผ่านมา



รูปที่ 3.40 วงจรขยายสัญญาณแบบล็อกการิทึมด้วยเทคนิค โมดิฟายเชอร์รี่ฮูเปอร์

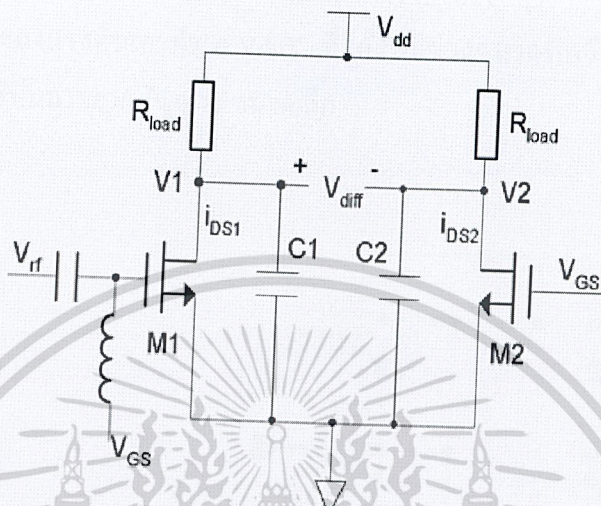
### 3.4.4 วงจรตรวจวัดกำลังงานสัญญาณโดยอาศัยความไม่เป็นเชิงเส้นของมอสทรานซิสเตอร์

รูปที่ 3.41 แสดงวงจรตรวจวัดกำลังงานของสัญญาณใช้ความไม่เป็นเชิงเส้นของมอสทรานซิสเตอร์ โดยมอสทรานซิสเตอร์ M1 ทำหน้าที่ตรวจวัดกำลังงานสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่อินพุทของวงจร และ M2 สร้างแรงดันออฟเซตไฟตรงเพื่อหักล้างความผิดพลาดที่เอาท์พุทซึ่งเกิดจากการผันแปรคุณสมบัติของ ทรานซิสเตอร์จากกระบวนการสร้างวงจรและอุณหภูมิ โดย M1 และ M2 มีขนาดเท่ากันและมีการไบอัสอยู่ใน ย่านการทำงานอื่นตัวที่เหมือนกัน ดังนั้นกระแสเดรนของ M1 และ M2 มีค่าดังสมการที่ (3.1) และ (3.2) โดย  $V_{rf} = V_i \cos(\omega t)$  ดังนั้นแรงดันผลต่างที่เอาท์พุท  $v_{diff}$  มีค่าดังสมการที่ (3.3) และตัวเก็บประจุ  $C1$  ทำหน้าที่ กรองความถี่ต่ำผ่านทำให้ได้แรงดันเอาท์พุท  $v_{diff}$  ดังสมการที่ (3.4) โดยจะเห็นได้ว่า  $v_{diff}$  มีค่าแปรผันกับค่า กำลังสองของแรงดันอินพุท ทำให้สามารถใช้บอกค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุทได้ เนื่องจากค่ากำลังงาน สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_{DS1} = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2 L} (V_{GS} + V_{rf} - V_t)^2 \tag{3.1}$$

$$i_{DS2} = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2 L} (V_{GS} - V_t)^2. \tag{3.2}$$



รูปที่ 3.41 วงจรตรวจวัดกำลังงานของสัญญาณโดยใช้ความไม่เป็นเชิงเส้นของมอสทรานซิสเตอร์

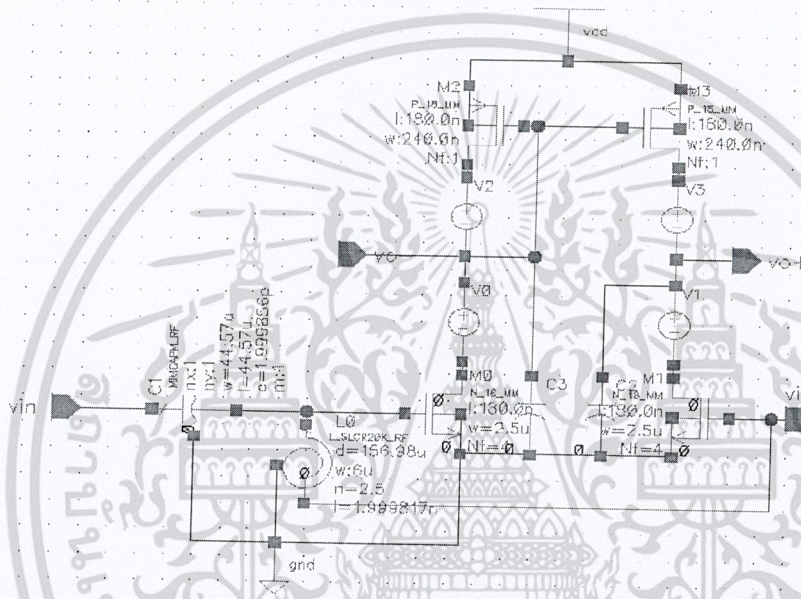
$$\begin{aligned} V_{diff} &= V_1 - V_2 \\ &= R_{load} \times (i_{DS1} - i_{DS2}) \\ &= R_{load} \times \left[ \frac{\mu_n C_{ox} W}{4 L} V_i^2 + \frac{\mu_n C_{ox} W}{4 L} V_i^2 \cos(2\omega t) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\mu_n C_{ox} W}{L} (V_{GS} - V_t) V_i \cos(\omega t) \right]. \end{aligned} \tag{3.3}$$

$$V_{diff} = \frac{\mu_n C_{ox} W}{4 L} R_{load} V_i^2 \tag{3.4}$$

$$\begin{aligned} \text{Power (dBm)} &= 10 \log_{10} \left( \frac{V_{rms}^2}{50} \right) \\ &= 10 \log_{10} \left( \frac{\text{avg} [V^2(t)]}{50} \right) \end{aligned} \tag{3.5}$$

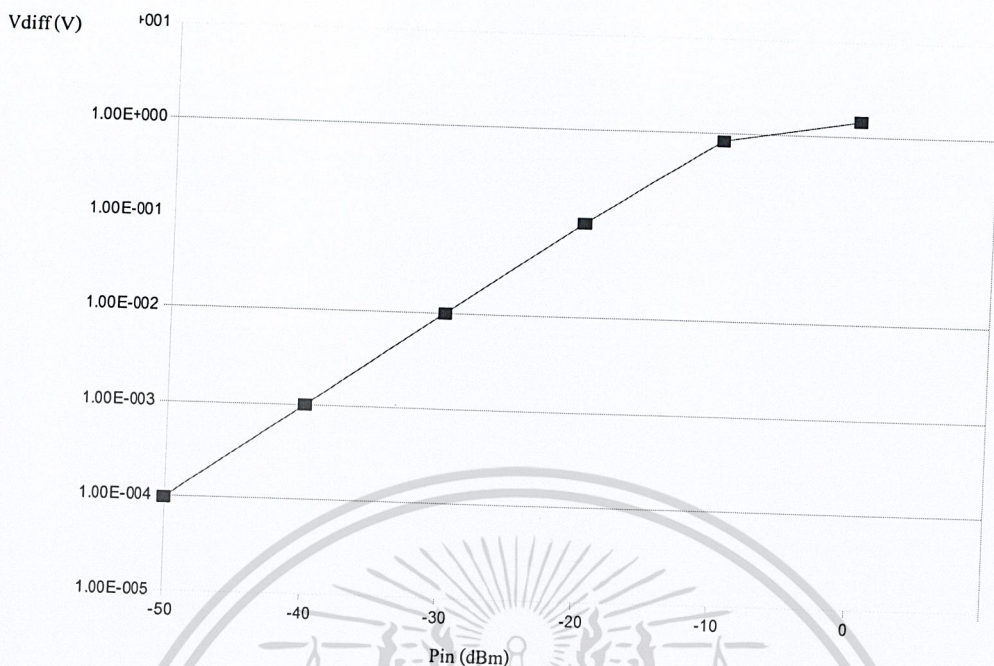
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงวงจรในรูปที่ 3.41 ให้มีอัตราขยายสูงขึ้น โดยใช้วงจรสะท้อนกระแสเป็นโหลด ดังรูปที่ 3.42 ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่มีขนาดใหญ่ขึ้น รูปที่ 3.43 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรด้วย เทคโนโลยีซิมอส 0.18 ไมโครเมตร โดยใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง 1.8 โวลต์ และเปลี่ยนแปลงค่ากำลังงานของ สัญญาณอินพุตที่ความถี่ 2.5 GHz ตั้งแต่ -50 ถึง 0 dBm จะได้แรงดันเอาต์พุต  $V_{diff}$  ตั้งแต่ 100 ไมโครโวลต์ ถึง 1 โวลต์ เนื่องจากขนาดของแรงดันเอาต์พุต  $V_{diff}$  ที่ได้รับมีช่วงขนาดที่กว้างถึง  $10^4$  เท่า ทำให้ต้องใช้ วงจรขยายสัญญาณล็อกการิทึมมาขยายสัญญาณขนาดเล็ก



รูปที่ 3.42 วงจรตรวจวัดกำลังงานของสัญญาณ โดยใช้ความไม่เป็นเชิงเส้นของมอสทรานซิสเตอร์ที่ได้ ออกแบบขึ้นใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.43 แรงดัน Vdiff vs กำลังงานอินพุต

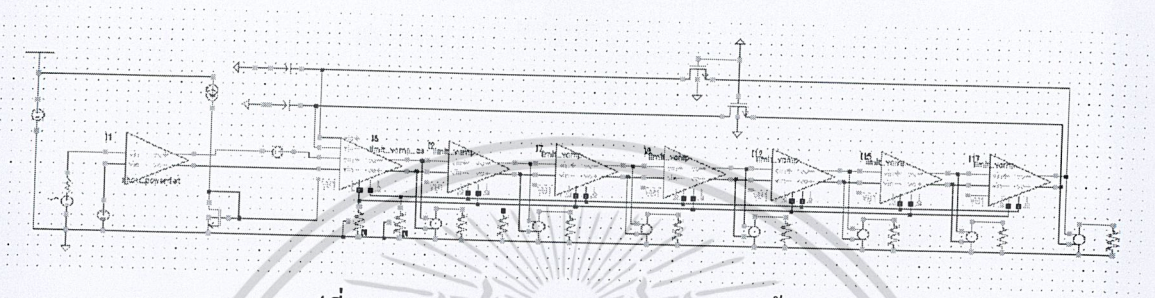
รูปที่ 3.44 แสดงโครงสร้างวงจรตรวจวัดกำลังงานสัญญาณทั้งหมด ประกอบด้วยวงจรถยายในรูปแบบที่ 3.42 เป็นส่วนหน้าสุดที่เชื่อมต่อกับสัญญาณอินพุต วงจรถยายแรงดันจำกัดที่มีขาอินพุตเสริม (voltage limiting amplifier with auxiliary input) เพื่อกำจัดผลกระทบของแรงดันออฟเซ็ทที่อาจทำให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรเกิดการอิ่มตัว (Saturation) และวงจรถยายแรงดันจำกัด (voltage limiting amplifier) ที่เหมือนกัน 6 ภาค ทำหน้าที่วงจรถยายสัญญาณแบบล็อกการิทึม โดยวงจรถยายแรงดันจำกัดแต่ละภาคมีอัตราขยายประมาณ 10 dB

รูปที่ 3.45 แสดงวงจรถยายแรงดันจำกัดที่มีขาอินพุตเสริม โดยเป็นวงจรถยายสัญญาณผลต่างที่มี 2 อินพุตเพื่อรับสัญญาณอินพุตจากวงจรตรวจวัดกำลังงานและแรงดันเอาต์พุตที่ถูกป้อนกลับผ่านมอดูเลชันซิสเตอร์เพื่อกำจัดผลกระทบของแรงดันออฟเซ็ทภายในวงจรถยาย รูปที่ 3.46 แสดงวงจรถยายแรงดันจำกัดที่เหมือนกันทั้ง 6 ภาค โดยเป็นวงจรถยายสัญญาณผลต่างที่ให้แรงดันและกระแสเอาต์พุต แรงดันเอาต์พุตจะถูกส่งต่อไปยังวงจรถยายในภาคต่อไป ในขณะที่กระแสเอาต์พุตของแต่ละภาคถูกนำมารวมกันจ่ายลงโหลดตัวต้านทานเพื่อสร้างแรงดันไฟตรงเอาต์พุตของวงจรถยายทั้งหมด

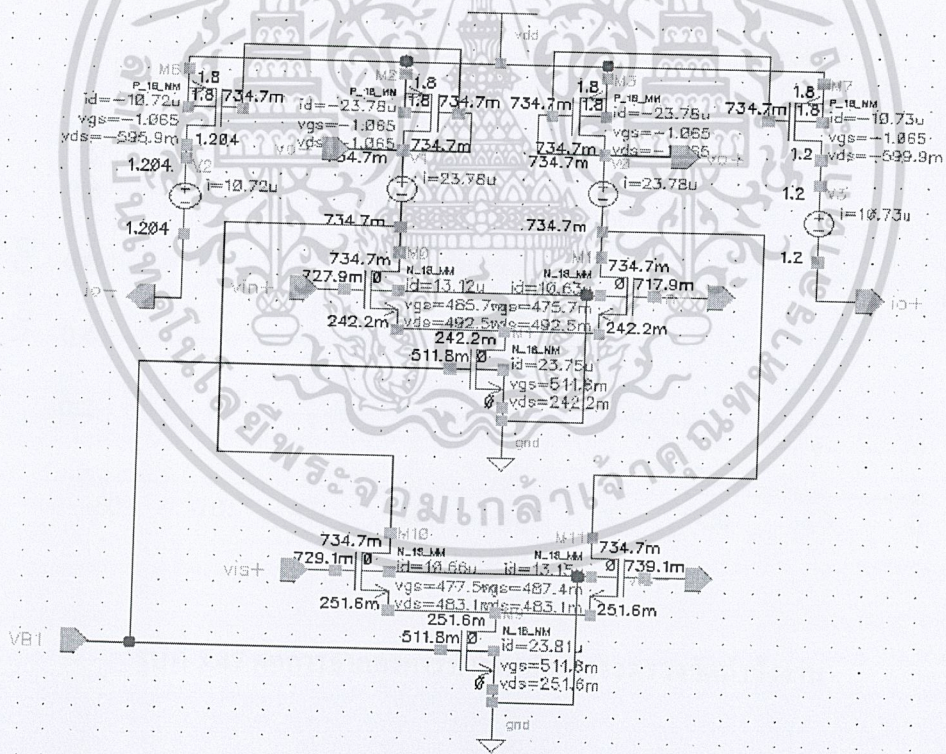
รูปที่ 3.47 แสดงผลการจำลองคุณลักษณะของแรงดันเอาต์พุตต่อกำลังงานอินพุตของวงจร ด้วยเทคโนโลยีซิมอส 0.18 ไมโครเมตร โดยใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง 1.8 โวลต์ และเปลี่ยนแปลงค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตที่ความถี่ 2.5 GHz ตั้งแต่ -80 ถึง 0 dBm แสดงให้เห็นว่าวงจรสามารถตรวจวัดกำลังงานสัญญาณอินพุตได้ดีในช่วงกำลังงานสัญญาณอินพุตตั้งแต่ -70 ถึง -20 dBm โดยวงจรใช้กำลังงานทั้งหมดเท่ากับ 0.712 mW รูปที่ 3.47 ยังแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของแรงดันเอาต์พุตต่อกำลังงานอินพุตภายใต้แรงดันออฟเซ็ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินพุต 25 mV ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้นเหมือนเดิมไม่มีการอ้อมตัวของแรงดันเอาต์พุต ดังนั้นวงจรยังสามารถตรวจวัดกำลังงานอินพุตได้ตามปกติ รูปที่ 3.48 แสดงผลกระทบของแรงดันอินพุตออฟเซ็ทต่อค่าแรงดันเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตที่มีความถี่ 2.5 GHz และมีกำลังงานเท่ากับ -50 dBm ภายใต้ค่าแรงดันอินพุตออฟเซ็ทตั้งแต่ 0 ถึง 100 mV จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันออฟเซ็ท โดยที่ คุณลักษณะของแรงดันเอาต์พุตต่อกำลังงานอินพุตยังมีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นเหมือนเดิม

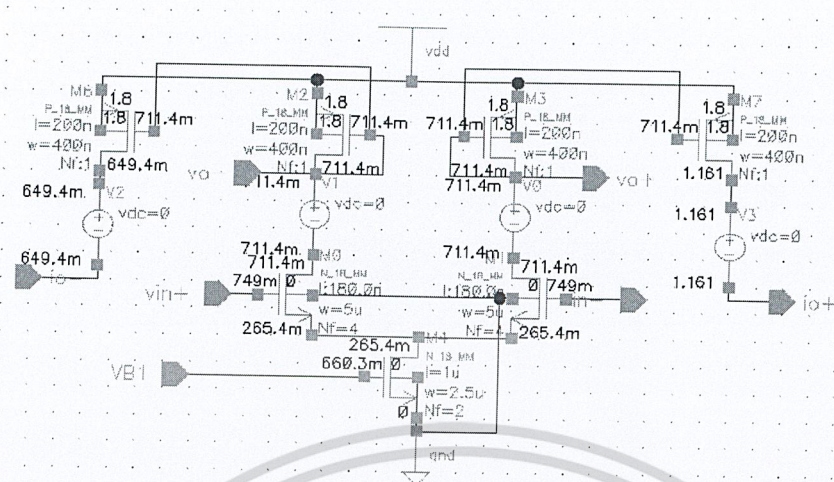


รูปที่ 3.44 วงจรตรวจวัดกำลังงานสัญญาณทั้งหมด

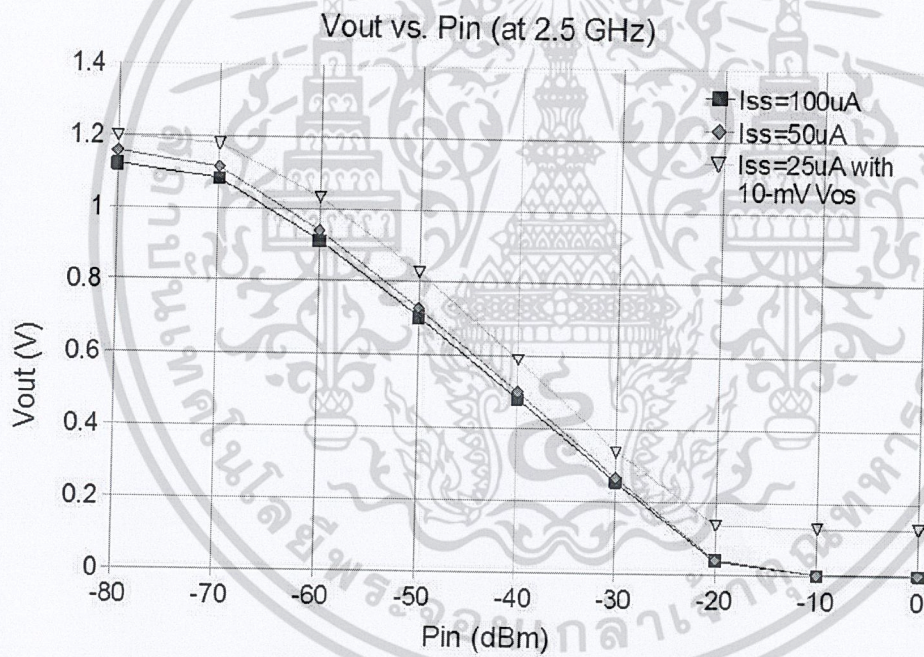


รูปที่ 3.45 วงจรขยายแรงดันจำกัดที่มี 2 อินพุต (Voltage limiting amplifier with auxiliary input)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

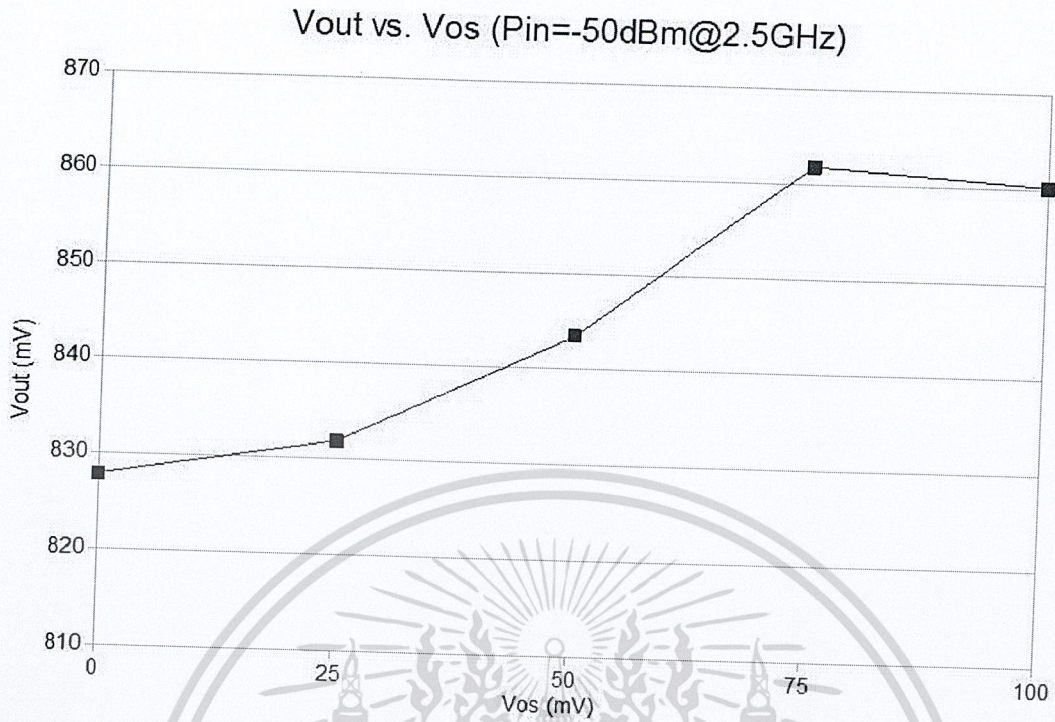


รูปที่ 3.46 วงจรขยายแรงดันจำกัด (Voltage limiting amplifier)

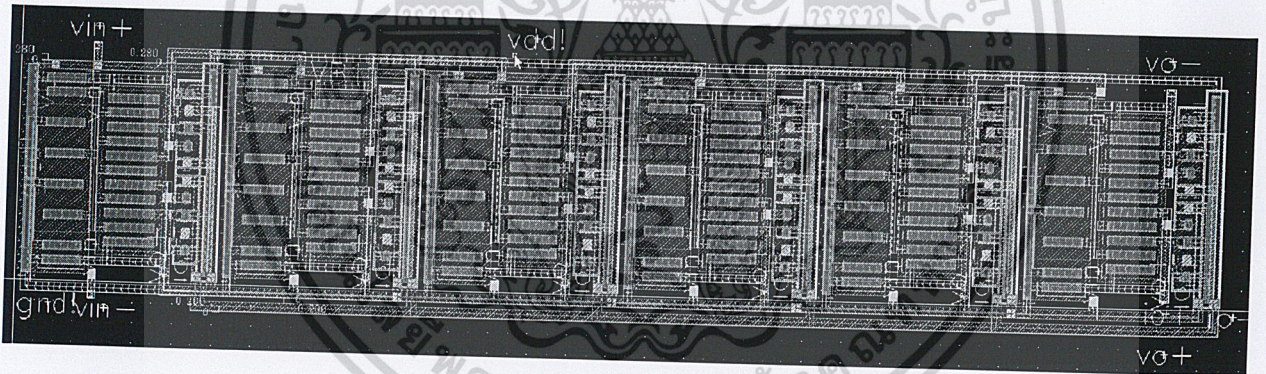


รูปที่ 3.47 ผลการจำลองการทำงานของวงจรตรวจวัดกำลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.48 ผลกระทบของแรงดันอินพุตออฟเซ็ทต่อแรงดันเอาต์พุต



รูปที่ 3.49 ผังภูมิ (Layout) วงจรตรวจจับกำลังงานสัญญาณ

### 3.4.5 การออกแบบและจำลองการทำงานของวงจรรอสซิลเลเตอร์ ในย่านความถี่ 2.45 GHz

วงจรรอสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage-controlled oscillator: VCO) เป็นส่วนวงจรที่สำคัญที่สุดในการทำงานของวงจรสังเคราะห์ความถี่เฟสล็อกกัลูป (Phase-locked loop: PLL) เพราะทำหน้าที่สร้างสัญญาณเอาต์พุตตามความถี่ที่ต้องการ วงจร VCO ในเทคโนโลยีซีมอสสามารถสร้างได้ด้วยโครงสร้างแบบวงแหวน (Ring VCO) แบบรีแลกเซชัน (Relaxation VCO) และแบบ LC เรโซแนนท์ (LV resonant VCO) วงจร LC VCO มีประสิทธิภาพการทำงานด้านความถี่และสัญญาณรบกวนดีที่สุด เนื่องจากค่า Q ที่สูงของวงจร LC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรโซแนนซ์ อย่างไรก็ตามตัวเหนี่ยวนำที่มีค่า Q สูงสร้างได้ยากและมีต้นทุนสูงเพราะต้องใช้กระบวนการสร้างเพิ่มเติมจากเทคโนโลยีซีมอสปกติ และใช้พื้นที่ชิพค่อนข้างมาก

วงจร Ring VCO สามารถสร้างได้ด้วยกระบวนการปกติในเทคโนโลยีซีมอสมาตรฐาน ออกแบบได้ง่ายกว่าและใช้พื้นที่ชิพน้อยกว่าวงจร LC VCO วงจร Ring VCO ยังให้สัญญาณเอาต์พุตได้หลายเฟส (Multi-phase) พร้อมกันและมีช่วงการควบคุมความถี่กว้าง (Wide frequency tuning range) ดังนั้นวงจร Ring VCO จึงเหมาะสมสำหรับใช้ในวงจร PLL ที่ใช้กำลังงานต่ำและต้องการค่าสัญญาณรบกวนทางเฟส (Phase noise) ไม่ต่ำมากนัก

### 3.5 โครงสร้างและหลักการทำงานของวงจร Ring VCO

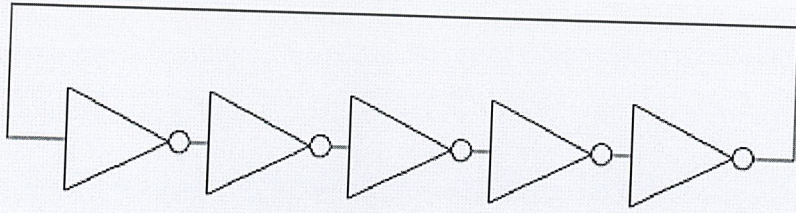
#### 3.5.1 โครงสร้างแบบลูปเดียว (Single-loop Structure)

วงจร Ring VCO พื้นฐานแบบลูปเดียวประกอบด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ต่อกันแบบอนุกรมในลูปปิดดังรูปที่ 3.48 โดยมีจำนวนอินเวอร์เตอร์เป็นจำนวนคี่ไม่น้อยกว่า 3 ภาค การป้อนกลับทำให้ลูปไม่เสถียรภาพและเกิดการออสซิลเลต และความถี่ของการออสซิลเลต ( $f_{osc}$ ) ขึ้นอยู่กับจำนวนภาคและเวลาหน่วง (delay) ของอินเวอร์เตอร์ โดยมีค่าดังสมการที่ (3.6) และ (3.7) เมื่อ N คือจำนวนภาคของอินเวอร์เตอร์  $\tau_d$  คือเวลาหน่วงของอินเวอร์เตอร์  $I_{inv}$  คือกระแสเอาต์พุตสูงสุดของอินเวอร์เตอร์ที่ไปอัดและคายประจุในตัวเก็บประจุโหลด  $V_{pk}$  คือขนาดแรงดันเอาต์พุตสูงสุดของอินเวอร์เตอร์ และ  $C_L$  คือค่าตัวเก็บประจุโหลดของอินเวอร์เตอร์

$$f_{osc} = 1/(2N\tau_d) \tag{3.6}$$

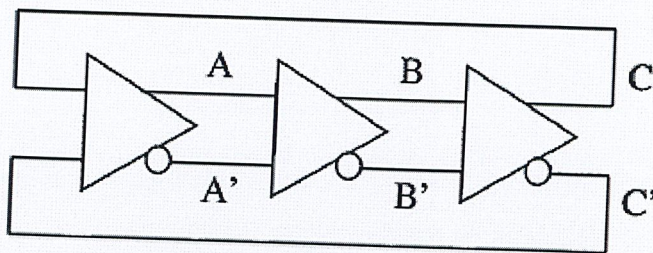
$$f_{osc} = I_{inv}/(2NV_{pk}C_L) \tag{3.7}$$

ความถี่การออสซิลเลตของวงจร Ring VCO สามารถถูกปรับค่าได้ด้วยการปรับค่ากระแสของอินเวอร์เตอร์ และ โดยใช้ตัวเก็บประจุโหลดที่ปรับค่าได้



(ก) แบบสัญญาณข้างเดียว (Single-ended)

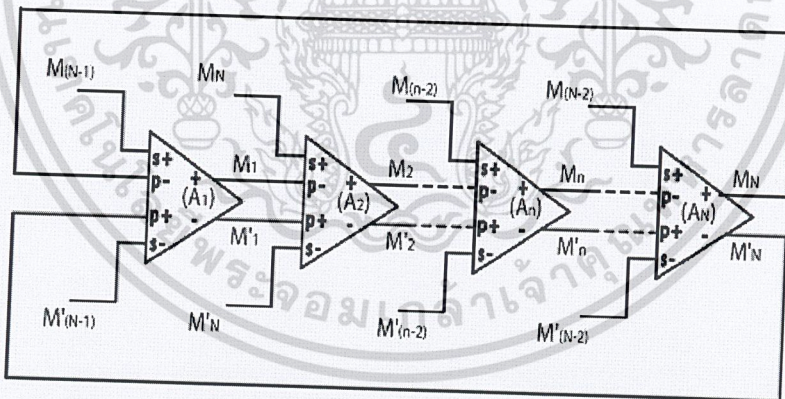
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



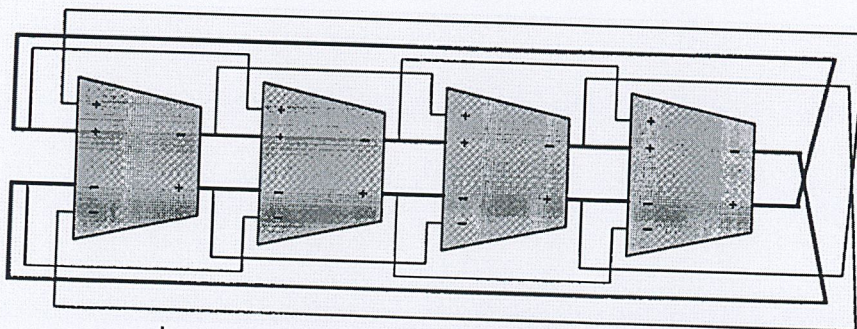
(ข) แบบสัญญาณผลต่าง (Differential)  
รูปที่ 3.50 วงจร Ring VCO แบบรูปเดี่ยว

### 3.5.2 โครงสร้างแบบหลายลูป (Multi-loop structure)

โครงสร้างแบบหลายลูปดังเช่นแบบรูปการผ่านหลายทาง (Multiple-pass loop) ในรูปที่ 3.51 สามารถใช้เพิ่มความถี่การอสซิลเลตของวงจร Ring VCO ได้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับวงจรที่ใช้โครงสร้างแบบรูปเดี่ยว โครงสร้างแบบหลายลูปที่ได้มีการนำเสนอ ได้แก่ แบบรูปป้อนกลับย่อย (Subfeedback loops) แบบอินเทอร์โพลาค่าเอาต์พุต (output interpolation) แบบป้อนกลับหลายลูป (Multiple feedback loops) และแบบเส้นทางหน่วงเวลาคู่ (Dual-delay paths) โดยโครงสร้างทั้งหมดได้ใช้หลักการพื้นฐานของลูปป้อนกลับที่มีการเชื่อมโยงกัน (Intercoupled feedback loops) เพื่อเพิ่มความถี่การอสซิลเลต โดยได้ถูกพัฒนามาจากโครงสร้างวงจรออสซิลเลเตอร์แบบเชื่อมโยง (Coupled oscillator)



รูปที่ 3.51 (ก) วงจร Ring VCO แบบหลายลูป จำนวน N ภาค



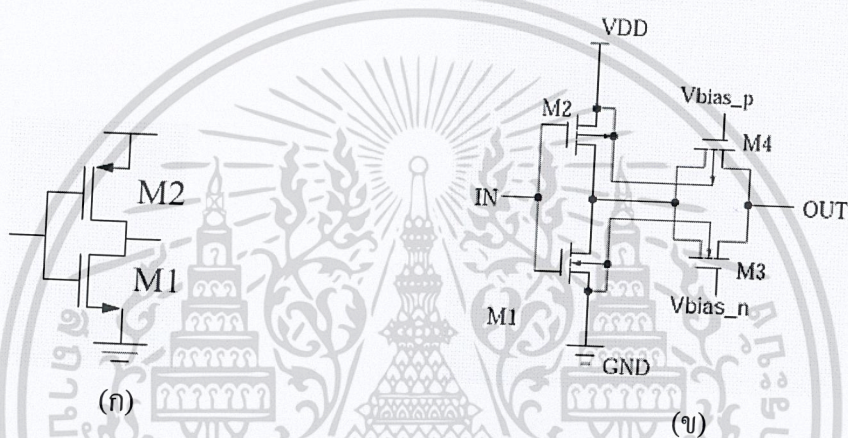
รูปที่ 3.51 (ข) วงจร Ring VCO แบบเส้นทางหน่วงเวลาคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.3 วงจรหน่วงเวลาสำหรับวงจร Ring VCO

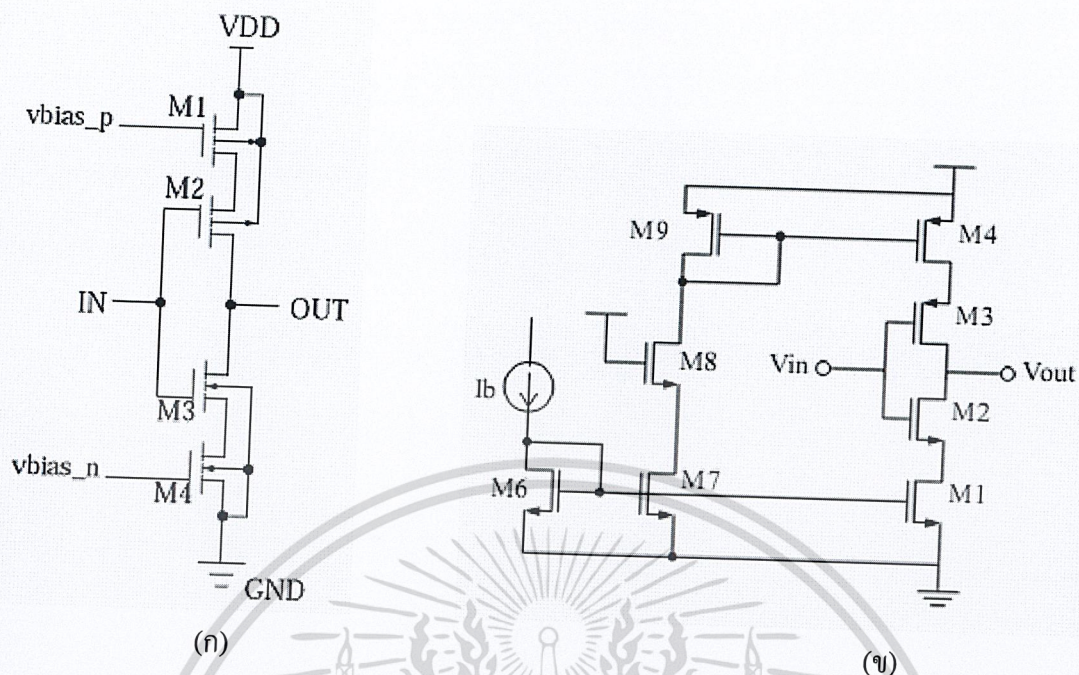
#### 3.5.3.1 วงจรหน่วงเวลาแบบสัญญาณข้างเดียว (Single-ended delay cell)

วงจรหน่วงเวลาแบบสัญญาณข้างเดียวที่ง่ายที่สุดคือวงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์ (CMOS inverter) (รูปที่ 3.52 (ก)) ที่มีทรานซิสเตอร์ M1 และ M2 ทำงาน ON และ OFF สลับกันโดยขึ้นกับค่าแรงดันที่ขาเกต ดังนั้นทรานซิสเตอร์ทั้งสองมีการทำงานแบบสวิทช์เต็มตัว (Full switching) จึงจัดได้ว่าเป็นวงจรหน่วงเวลาแบบอิ่มตัว (Saturated delay cell) โดยวงจรสามารถถูกปรับเวลาหน่วงด้วยการใช้วงจรเกตผ่าน (CMOS Transmission gate) ปรับกระแสที่จ่ายให้อาห์พุท (รูปที่ 3.52 (ข)) หรือใช้ตัวเก็บประจุโหลดที่ปรับค่าได้



รูปที่ 3.52 วงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์

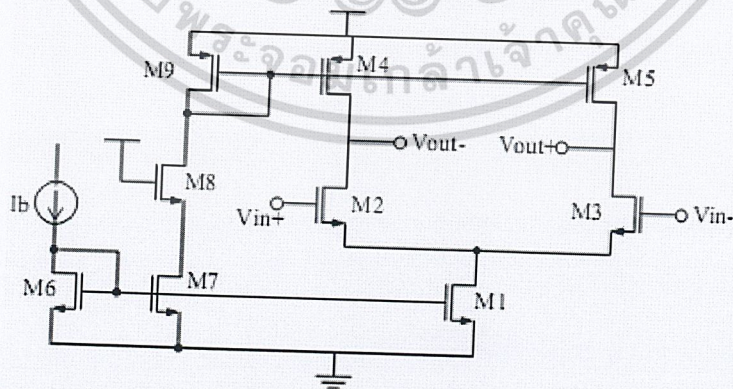
วงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์ยังสามารถถูกปรับค่ากระแสได้โดยใช้โครงสร้างวงจรแบบจำกัดกระแส (Current-Starved CMOS inverter) ดังแสดงในรูปที่ 3.53 ซึ่งเป็นวงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์ที่มีทรานซิสเตอร์ M1 และ M4 ในการจำกัดกระแสที่อินเวอร์เตอร์จ่ายให้โหลดที่เอาต์พุท โดยใช้แรงดันที่ขาเกตของ M1 และ M4 หรือกระแสไบอัส ( $I_b$  ในรูปที่ 3.53 (ข)) ในการปรับค่ากระแสเอาต์พุทที่จ่ายโหลดและค่าเวลาหน่วงของวงจร



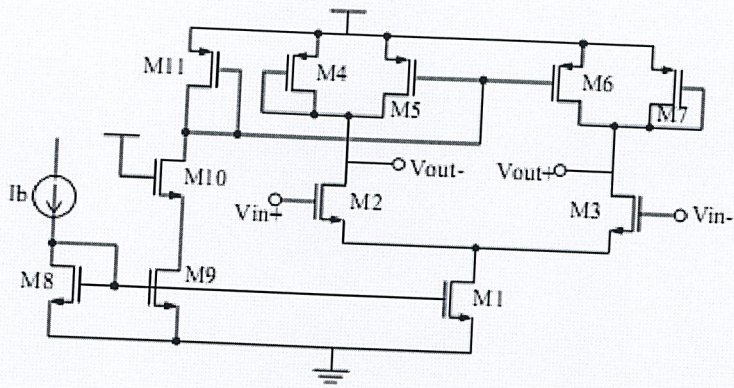
รูปที่ 3.53 วงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์แบบจำกัดกระแส

3.5.3.2 วงจรหน่วงเวลาแบบสัญญาณผลต่าง

วงจรหน่วงเวลาแบบสัญญาณผลต่างช่วยลดสัญญาณรบกวนทางเฟสที่มาจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงได้ รูปที่ 3.54 แสดงตัวอย่างวงจรหน่วงเวลาแบบสัญญาณผลต่างที่ใช้โครงสร้างวงจรถยายสัญญาณผลต่างแบบขาซอสร่วมและมีโหลดเป็น PMOS ที่ทำงานในย่านอิมิตัวหรือย่าน ไตรโอด ซึ่งสามารถปรับเวลาหน่วงได้ด้วยการปรับค่ากระแส  $I_b$  โดยวงจรที่ทำหน้าที่เป็นโหลดได้ถูกนำเสนอในหลายรูปแบบเช่น โหลดตัวต้านทาน หรือโหลดที่ใช้ NMOS และ/หรือ PMOS ต่อขนานกันในรูปแบบต่างๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.55

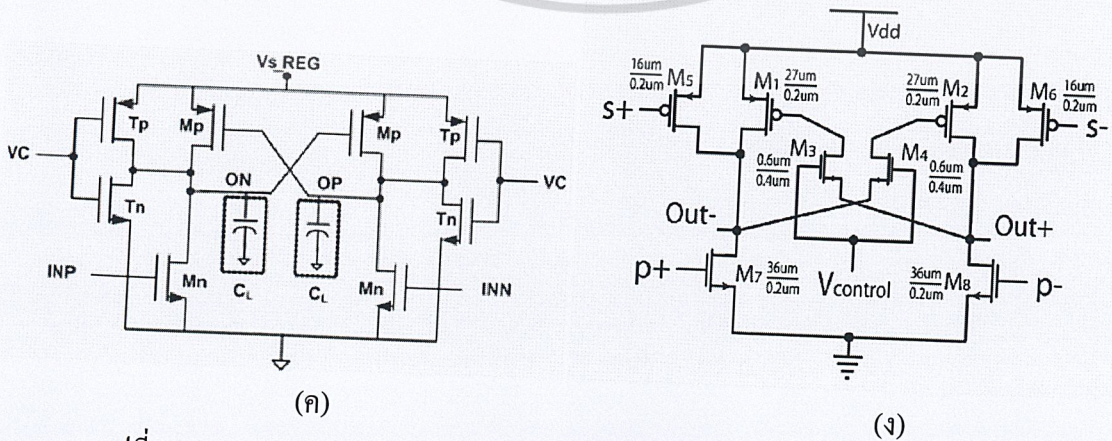


รูปที่ 3.54 วงจรขยายสัญญาณผลต่างแบบขาซอสร่วมที่มี PMOS เป็นโหลด



รูปที่ 3.55 วงจรขยายสัญญาณผลต่างแบบขาออกพร้อมที่มีโหลดเป็น PMOS ต่อขนานกัน

เพื่อลดกำลังงานของวงจร Ring VCO วงจรหน่วงเวลาควรมีอัตราขยายสูงโดยที่ใช้กระแสไฟน้อยที่สุด โดยได้มีการใช้โหลดที่มีการป้อนกลับแบบบวกบางส่วน (partial positive feedback) มาเพื่อสร้างความต้านทานลบ (Negative resistance) เพื่อหักล้างกับค่าความต้านทานบวกที่เป็นโหลด ดังนั้นค่าความต้านทานโหลดและอัตราขยายไฟตรงของวงจรหน่วงเวลาจึงมีค่าสูงขึ้น ทำให้สามารถประหยัดกำลังงานของวงจร Ring VCO ได้



รูปที่ 3.56 วงจรหน่วงเวลาแบบสัญญาณผลต่างที่ใช้โหลดที่มีการป้อนกลับแบบบวก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปโดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การออกแบบและจำลองการทำงานของวงจร Ring VCO

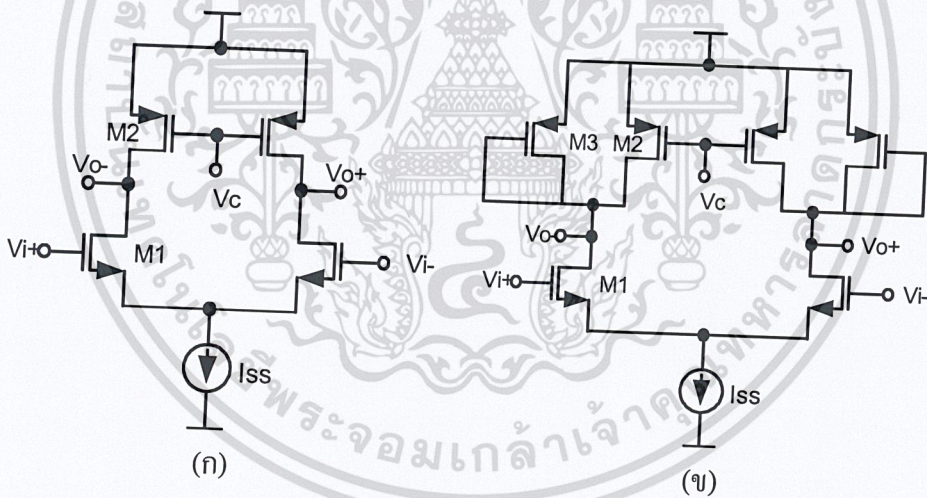
3.6.1 วงจร Ring VCO ที่ใช้ Differential Delay Cell

วงจร Ring VCO แบบ 3 ภาคขยายได้ถูกออกแบบขึ้นโดยใช้ delay cells ในรูปที่ 3.57 (ก)-(ข) และรูปที่ 3.58 ด้วยเทคโนโลยีซิมอส 0.18 ไมโครเมตร แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง 1.8 V และใช้กำลังไฟไม่เกิน 1 mW

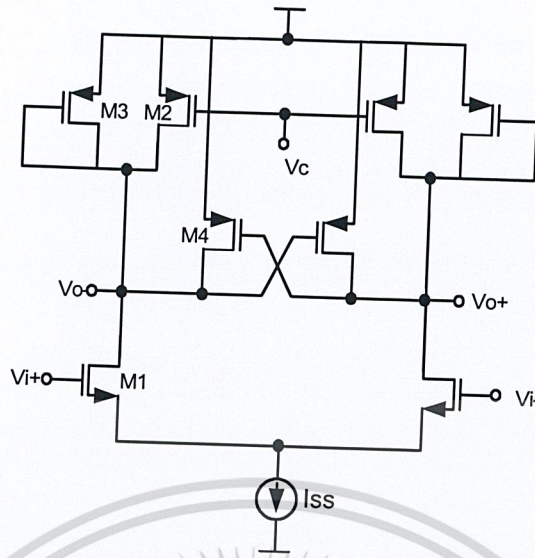
ผลการจำลองการทำงานของวงจร ring vco ในรูปที่ 3.50 แสดงว่าวงจร ring vco ที่ใช้ delay cell ในรูปที่ 3.57 (ก) มีช่วงความเป็นเชิงเส้นในการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อปรับแรงดันควบคุม  $V_c$  ตั้งแต่แรงดัน  $V_c$  มีค่าเท่ากับ 0 – 0.3 โวลต์ และมีย่านความถี่ตั้งแต่ 2.63 – 2.1 GHz มีค่า  $KVCO$  ประมาณ 1600MHz/V

วงจร ring vco ที่ใช้ delay cell ในวงจรรูปที่ 3.57 (ข) มีช่วงความเป็นเชิงเส้นในการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อปรับแรงดันควบคุม  $V_c$  ตั้งแต่แรงดัน  $V_c$  มีค่าเท่ากับ 0 – 0.3 โวลต์ และมีย่านความถี่ตั้งแต่ 2.7 – 2.3 GHz มีค่า  $KVCO$  เท่ากับ 1300MHz/V

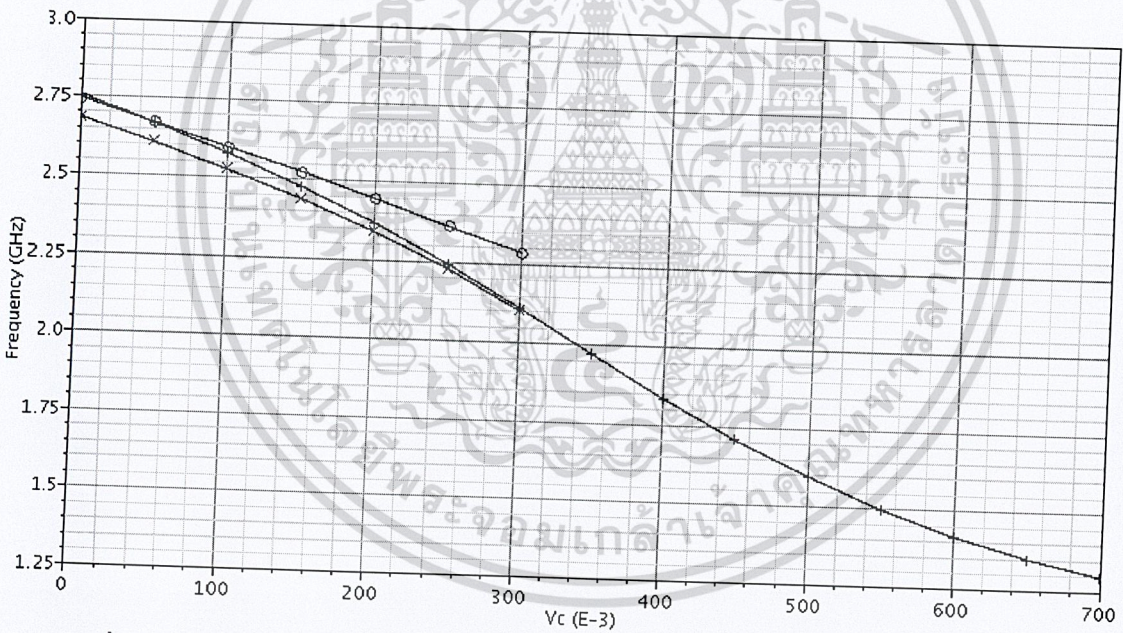
วงจร ring vco ที่ใช้ delay cell ในวงจรในรูปที่ 3.58 มีช่วงความเป็นเชิงเส้นในการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อปรับเปลี่ยนแรงดันควบคุม  $V_c$  ตั้งแต่แรงดัน  $V_c$  มีค่าเท่ากับ 0 – 0.7 โวลต์ และมีย่านความถี่ตั้งแต่ 2.7 – 1.5 GHz มีค่า  $KVCO$  ประมาณ 2000MHz/V



รูปที่ 3.57 (ก) current-source loaded differential delay cell (ข) differential delay cell with Symmetric load

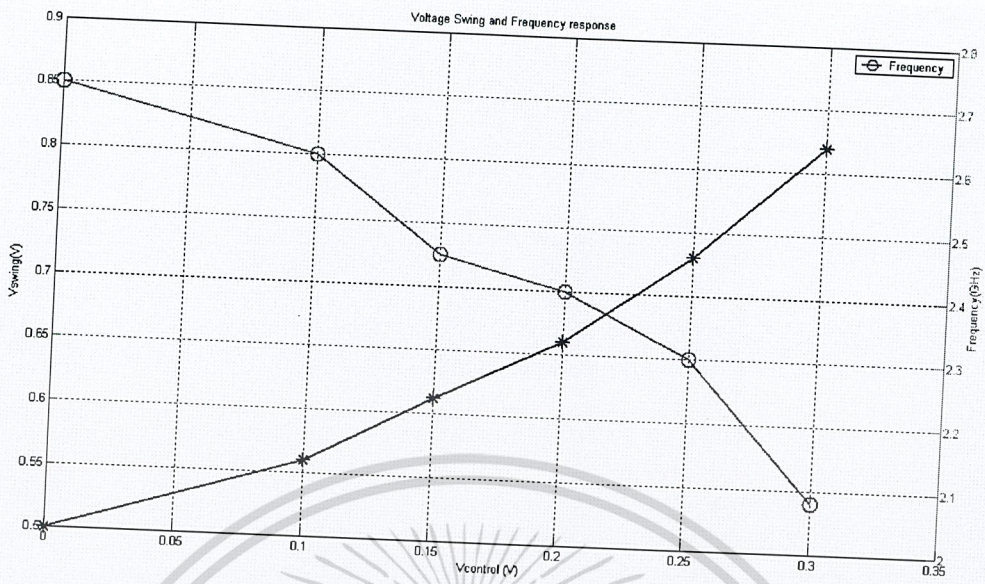


รูปที่ 3.58 Differential delay cell with symmetric and cross-coupled load

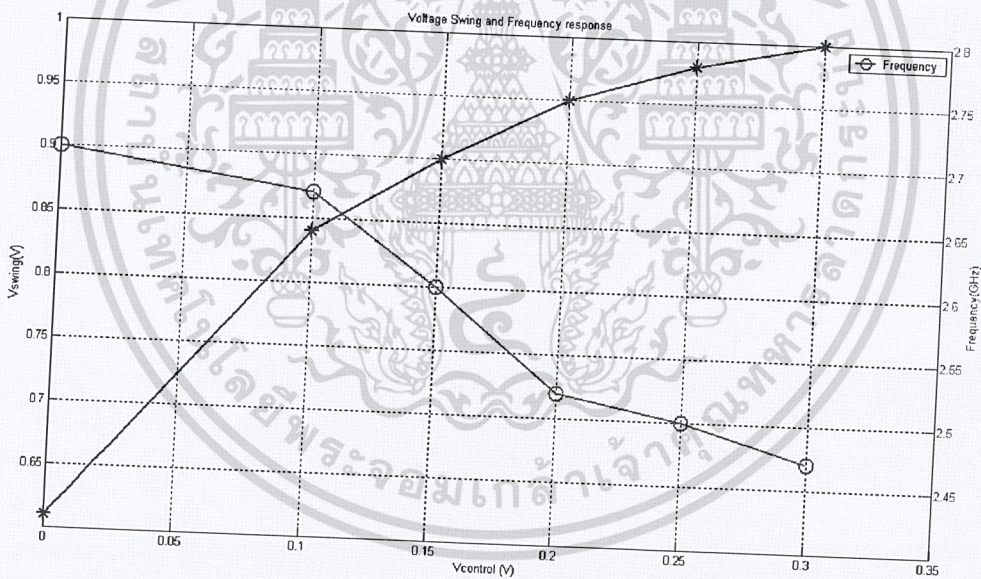


รูปที่ 3.59 คุณลักษณะการปรับความถี่ของวงจรรing VCO ที่ใช้ delay cell ในรูปที่ 3.57-3.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

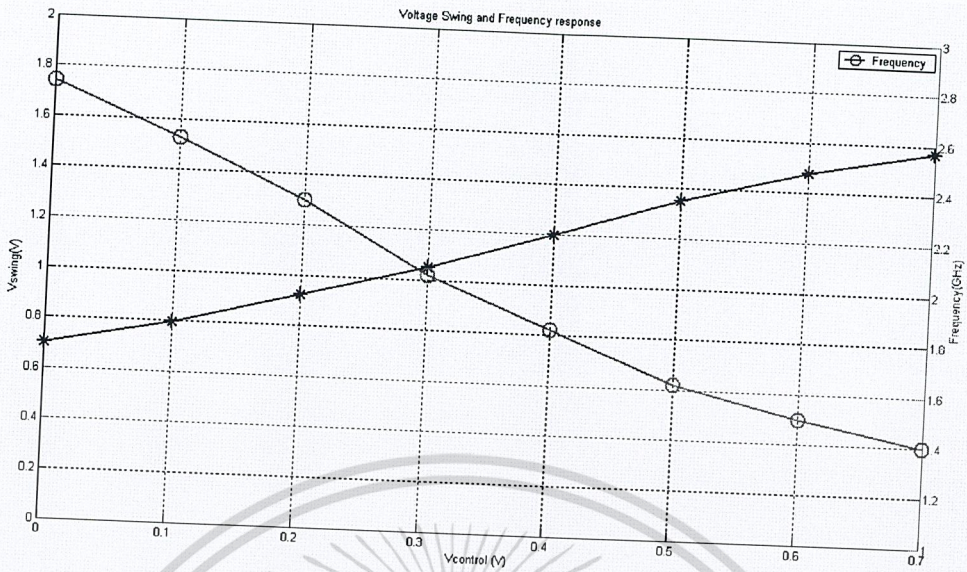


รูปที่ 3.60 Output voltage swing vs. Vcontrol ของวงจรรing VCO ที่ใช้ delay cell ในรูปที่ 3.57 (ก)



รูปที่ 3.61 Output voltage swing vs. Vcontrol ของวงจรรing VCO ที่ใช้ delay cell ในรูปที่ 3.57 (ข)

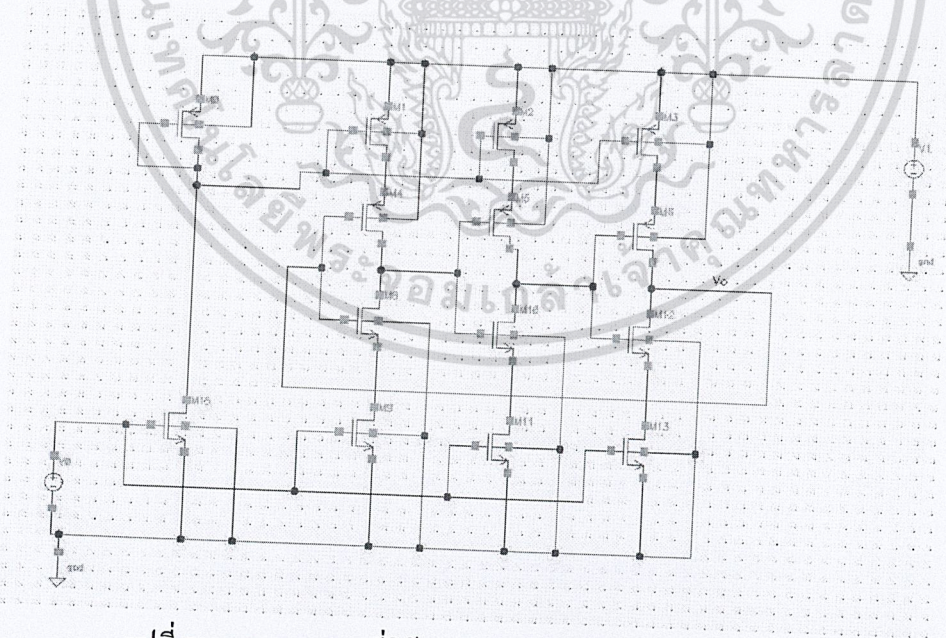
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.62 Output voltage swing vs. Vcontrol ของวงจรรing VCO ที่ใช้ delay cell ในรูปที่ 3.58

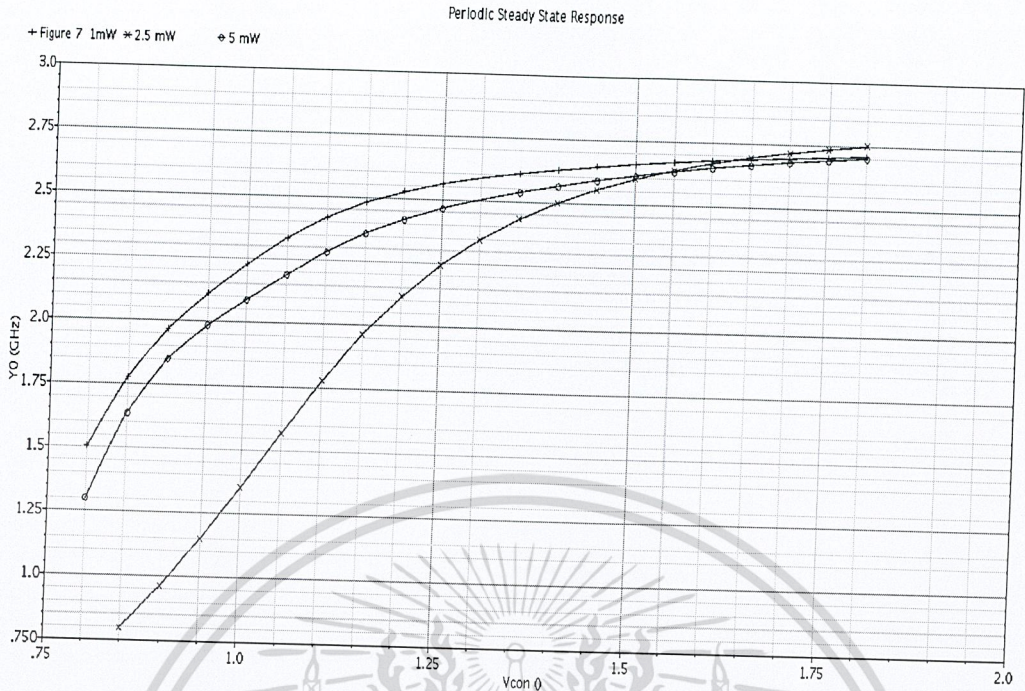
3.6.2 วงจรรing VCO ที่ใช้ current-starved inverter delay cell

วงจรรing VCO แบบ 3 ภาคขยายได้ถูกออกแบบขึ้นโดยใช้ delay cells ในรูปที่ 3.63 ด้วยเทคโนโลยีซีมอส 0.18 ไมโครเมตร แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง 1.8 V



รูปที่ 3.63 Ring VCO ที่ใช้ current-starved inverter delay cell

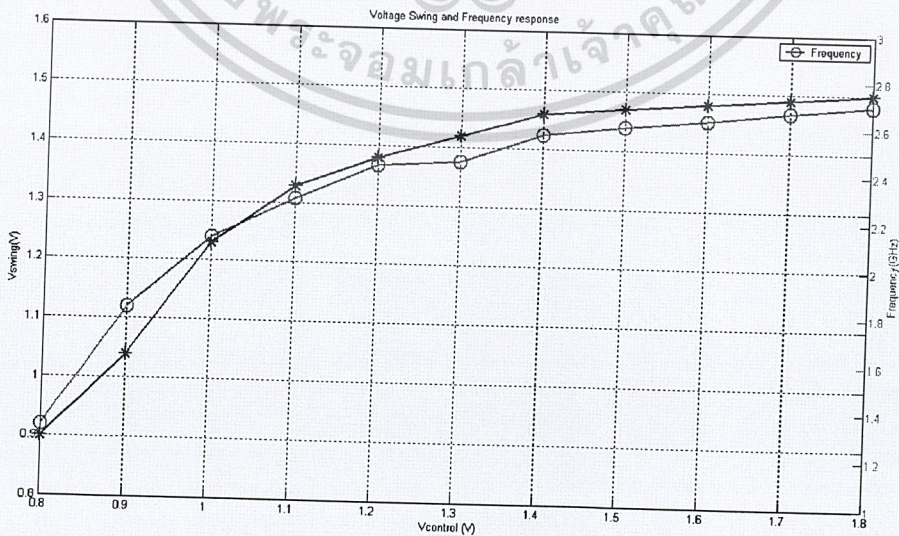
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.64 คุณลักษณะการปรับความถี่ของวงจรรing VCO ในรูปที่ 3.63

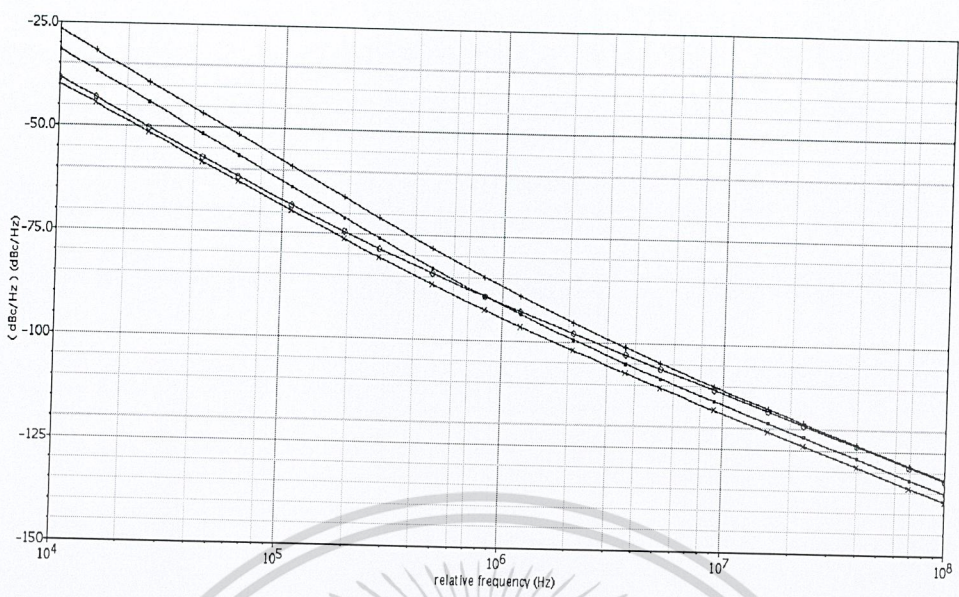
รูปที่ 3.64 แสดงผลการจำลองคุณลักษณะการปรับความถี่ของวงจรรing VCO ที่ใช้ current starved delay cell ที่ค่าการใช้กำลังงาน 1 mW, 2.5 mW และ 5 mW แสดงว่าวงจรมีความสามารถปรับความถี่ได้ตั้งแต่ประมาณ 0.75 GHz – 2.75 GHz

รูปที่ 3.65 แสดง Output signal swing ของวงจรรing VCO ในรูปที่ 3.63 เมื่อปรับแรงดัน  $V_{control}$  ตั้งแต่ 0.8-1.8 V โดยวงจรมีขนาดแรงดัน output ตั้งแต่ 0.9-1.5V



รูปที่ 3.65 Output voltage swing vs.  $V_{control}$  ของวงจรรing VCO ในรูปที่ 3.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.66 สัญญาณรบกวนทางเฟสของวงจรรing vco ที่ใช้ delay cell ในรูปที่ 3.57-3.58 และวงจรรing vco ในรูปที่ 3.63

รูปที่ 3.66 แสดงผลการจำลองสัญญาณทางเฟส (phase noise) ของวงจรรing VCO ทั้งหมด โดยทุกวงจรมีค่า phase noise อยู่ระหว่าง -80 ถึง -96 dBc/Hz ที่ความถี่ offset 1 MHz โดยค่า phase noise มีค่าลดลงเมื่อใช้กำลังงานสูงขึ้น ดังสรุปในตารางที่ 3.2

**3.7 สรุป**

คณะวิจัยได้ออกแบบวงจรตรวจวัดกำลังงานสัญญาณในย่านความถี่ 2.45 GHz โดยใช้เทคนิคความไม่เชิงเส้นของมอดูเลชันและวงจรมอดูเลชันด้วยเทคนิคไมโครเมตรทำงานด้วยแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง 1.8 V ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Cadence Spectre แสดงว่าวงจรถูกำลังงานประมาณ 0.712 mW ซึ่งมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับวงจรถูกำลังงานสัญญาณอื่นๆที่เคยมีการรายงานมาก่อน วงจรที่เสนอนั้นสามารถทำงานได้ดีในช่วงกำลังงานอินพุตตั้งแต่ -70 dBm ถึง -20 dBm โดยมีให้ค่าแรงดันเอาต์พุตตั้งแต่ 1.2 V ถึง 0.15V ตามลำดับ

เนื่องจาก Fabricate chip ไม่ทันในโครงการนี้จึงใช้ Module TRW 2.4 ที่มีขายตามท้องตลาดไปก่อน

ตารางที่ 3.2 สรุปผลคุณสมบัติของวงจร Ring VCO ที่ใช้ Delay cell แบบต่างๆ

วงจร delay cell ที่ใช้	การใช้กำลังงาน	ช่วงการปรับความถี่	ช่วงแรงดันควบคุม	สัญญาณรบกวนทางเฟสที่ความถี่ offset 1MHz
23 (ก)	1 mW	2.63 – 2.1GHz	0-0.3 V	-83.0 ~ -82.4dBc@1MHz
23 (ข)		2.7-2.3GHz	0-0.3 V	-89.5 ~ -85.7dBc@1MHz
24		2.7G -1.3GHz	0-0.7 V	-91.8 ~ -83.9dBc@1MHz
29		1.5-2.7GHz	0.8-1.8 V	-90.5 ~ -87.5dBc@1MHz
23 (ก)	2.5 mW	2.62-2.26 GHz	0-0.3 V	-87.0 ~ -85.5dBc@1MHz
23 (ข)		2.7-2.52 GHz	0-0.3 V	-91.4 ~ -90.8dBc@1MHz
24		2.7-1.3GHz	0-0.7 V	-93.7 ~ -86.6dBc@1MHz
29		0.8-2.75GHz	0.8-1.8 V	-95.8 ~ -86.5dBc@1MHz
23 (ก)	5 mW	2.72 – 2.1GHz	0-0.3 V	-89.5 ~ -87.5dBc@1MHz
23 (ข)		2.7-2.5GHz	0-0.3 V	-93.8 ~ -91.0dBc@1MHz
24		2.7-1.4G	0-0.7 V	-95.7 ~ -89.1dBc@1MHz
29		1.3 -2.7GHz	0.8-1.8 V	-96.4 ~ -94.3dBc@1MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบการหาดัชนีความบริสุทธิ์ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองด้วยเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ

#### 1. กล่าวนำ

ปัญหาที่สำคัญในการส่งออกทุเรียนคือ คุณภาพของผลผลิตที่ส่งออกจำหน่ายไม่มีความสม่ำเสมอและไม่ตรงตามมาตรฐานของลูกค้าที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ โดยปัญหาที่มักพบคือมีทุเรียนผลอ่อนคละปนไปกับทุเรียนผลปกติจำนวนมาก ตลอดจนภายในทุเรียนบางผลมีหนอนเจาะเมล็ด ซึ่งกลายเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อชื่อเสียงการส่งออกทุเรียนของประเทศไทย และเพื่อเป็นการลดความเสียหายที่เกิด จึงได้พยายามหาวิธีการปฏิบัติต่าง ๆ มาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ โดยที่วิธีการปฏิบัติส่วนใหญ่จำเป็นต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญในการตรวจสอบ นอกจากนี้การสุ่มตัวอย่างผลผลิตเพื่อมาตรวจสอบบางครั้งยังเป็นวิธีที่ได้ผลไม่แน่นอนเนื่องจากผลผลิตที่สุ่มอาจมีไม่เพียงพอที่จะเป็นตัวแทนของผลผลิตทั้งหมด และยังต้องมีการทำลายผลผลิตที่ตรวจสอบ ซึ่งถือว่าเป็นการสูญเสียทางเศรษฐกิจ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดหาความบริสุทธิ์ของผลทุเรียน โดยการใช้เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟต้นแบบรุ่นที่ 1 โดยศึกษาคุณสมบัติของเนื้อทุเรียนคือ ปริมาณแป้ง น้ำตาลรีดิวิซ ปริมาณความชื้น และค่าไดอิเล็กตริกของผลทุเรียน และใช้ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งของเนื้อทุเรียนเป็นมาตรฐานความบริสุทธิ์ และหาความสัมพันธ์ของค่าการตอบสนองเซนเซอร์กับการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา เคมี กายภาพ รวมถึงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของทุเรียนในแต่ละระยะความบริสุทธิ์ว่าเป็นอย่างไร เพื่อให้ได้ผลที่แม่นยำและเป็นการลดปัญหาการส่งออกทุเรียนที่ไม่ได้มาตรฐาน

จากผลการดำเนินงานที่ผ่านมา ผลที่ได้ประกอบด้วยผลการทดสอบหาดัชนีความสุกแก่ของทุเรียนโดยใช้เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ ซึ่งได้ทำการทดสอบเก็บข้อมูลทั้งหมด 4 ครั้งดังต่อไปนี้

1. ศูนย์วิจัยพืชสวน อ.ขลุง จ.จันทบุรี วันที่ 9 เมษายน ถึง 8 พฤษภาคม พ.ศ. 2551 ทุเรียนมีอายุหลังดอกบานในวันเริ่มเก็บข้อมูลประมาณ 99 วัน
2. อ.ชะอวด จ.นครศรีธรรมราช วันที่ 13 กรกฎาคม ถึง 13 สิงหาคม พ.ศ. 2551 ทุเรียนมีอายุหลังดอกบานในวันเริ่มเก็บข้อมูลประมาณ 91 วัน
3. ศูนย์วิจัยพืชสวน อ.ขลุง จ.จันทบุรี วันที่ 3 พฤษภาคม ถึง 2 มิถุนายน พ.ศ.2552 ทุเรียนมีอายุหลังดอกบานในวันเริ่มเก็บข้อมูลประมาณ 93 วัน
4. อ.ชะอวด จ.นครศรีธรรมราช วันที่ 19 กรกฎาคม ถึง 16 สิงหาคม พ.ศ. 2552 ทุเรียนมีอายุหลังดอกบานในวันเริ่มเก็บข้อมูลประมาณ 94 วัน

จากการทดสอบที่ผ่านมาพบว่าผลของค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟของการเก็บข้อมูลที่ศูนย์วิจัยพืชสวน อ.ขลุง จ.จันทบุรี ทั้งสองครั้งมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง เนื่องจากสวนทุเรียนของศูนย์วิจัยพืชสวนจันทบุรีอยู่ทางภาคตะวันออกของประเทศ มีลักษณะภูมิอากาศแบบร้อนชื้น จึงพบว่าปริมาณความชื้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมพัทธ์ค่อนข้างสูง อยู่ในช่วง 38-98 เปอร์เซ็นต์ ประกอบกับมีฝนตกอย่างสม่ำเสมอ และมีอุณหภูมิ 24-35.5 องศาเซลเซียส โดยสภาพแวดล้อมดังกล่าวอาจส่งผลต่อเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นในรายงานการสรุปผล ในฉบับนี้จึงได้สรุปผลการทดสอบจากการเก็บข้อมูลที่ สวนเกษตรกร อ.ชะอวด จ.นครศรีธรรมราช

## 2. วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

- 2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของทุเรียน ที่มีผลต่อเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ
- 2.2 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของทุเรียน เพื่อนำมาหาดัชนีความสุขของทุเรียนจากการตรวจสอบด้วยเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ

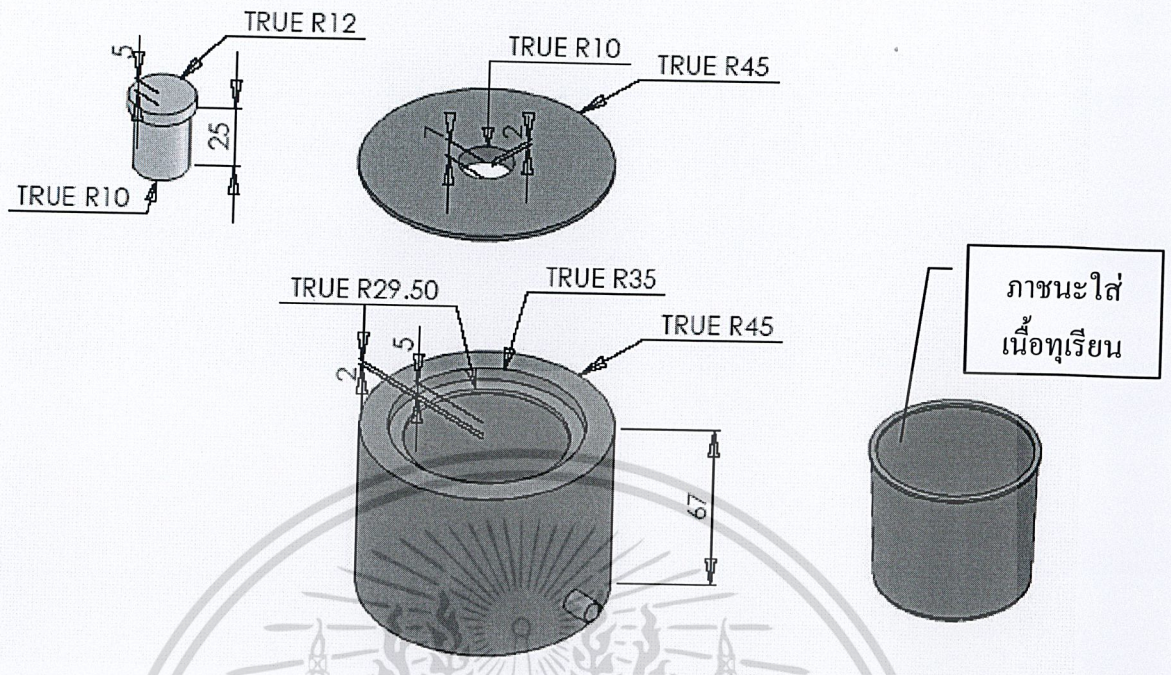
## 3. วิธีการดำเนินงาน

- 3.1 การทดสอบการตอบสนองของเซ็นเซอร์คลื่นไมโครเวฟ
  - 3.1.1 เลือกต้นทุเรียนพันธุ์หมอนทอง จากศูนย์วิจัยจากสวนทุเรียนใน อ.ชะอวด จ.นครศรีธรรมราช ที่มีลักษณะที่สมบูรณ์ ไม่ติดโรค
  - 3.1.2 เลือกตัดตั้งเซนเซอร์กับผลทุเรียนผลที่มีลักษณะดี ไม่ติดโรค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัดขวางประมาณ 20 ซม. และสามารถติดตั้งเซนเซอร์ตรงกับพูของผลทุเรียนได้พอดี
  - 3.1.3 อ่านและบันทึกข้อมูลจากเซ็นเซอร์ทุกวัน โดยอ่านซ้ำ 10 ครั้ง แล้วนำค่ามาเฉลี่ยเป็นผลการตอบสนองของแต่ละวัน แล้วนำผลที่ได้มาแปลงเป็นเลขฐานสิบ
- 3.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติกายภาพและทางเคมีของผลทุเรียน
  - 3.2.1 เก็บตัวอย่างผลทุเรียนที่มีความแก่และขนาดผลใกล้เคียงกัน จำนวน 3 ผล ผ่าผลทุเรียนตามแนวยาวและแนวขวาง ถ่ายภาพดิจิทัล และเก็บตัวอย่างเนื้อทุเรียนและเปลือกทุเรียนตัวอย่างละ 30 เพื่อนำไปทดสอบหาปริมาณความชื้น โดยการนำตัวอย่างอบด้วยตู้อบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักของตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลง จากนั้นจึงนำมาคำนวณหาปริมาณความชื้นและร้อยละน้ำหนักเนื้อแห้ง
  - 3.2.2 เก็บตัวอย่างเนื้อทุเรียนเป็นชิ้น ๆ ละ 10 กรัม ผลละ 3 ชิ้น เพื่อนำไปทดสอบหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และแป้ง
  - 3.2.3 วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar as glucose, DNS-method) และแป้งในเนื้อทุเรียนตามวิธีของ AOAC and Miller

## 3.3 การศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของทุเรียน

### 3.3.1 การออกแบบชุดวัดค่าไดอิเล็กตริก

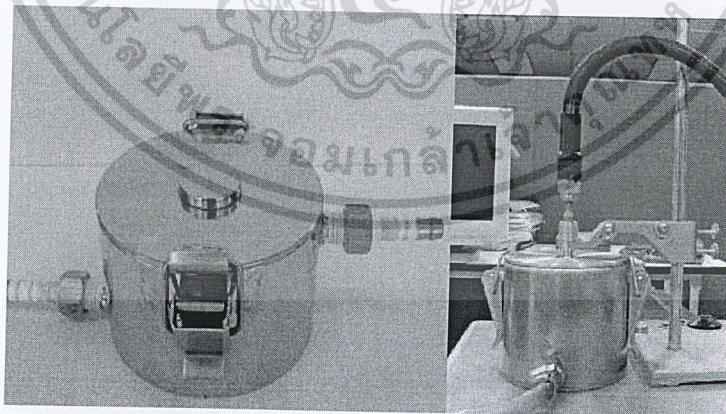
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของชุดวัดไดอิเล็กทริก

3.3.2 ทำการวัดค่าไดอิเล็กทริกโดยวิธีโพรบแบบแกนร่วมปลายเปิด (open-ended co-axial probe) เชื่อมต่อกับ Agilent network analyzer

3.3.3 ทดสอบวัดค่าไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส ที่ความถี่ 2-3 GHz



รูปที่ 4.2 ชุดวัดค่าไดอิเล็กทริกและการวัดค่าไดอิเล็กทริกโดยวิธีโพรบแบบแกนร่วมปลายเปิด

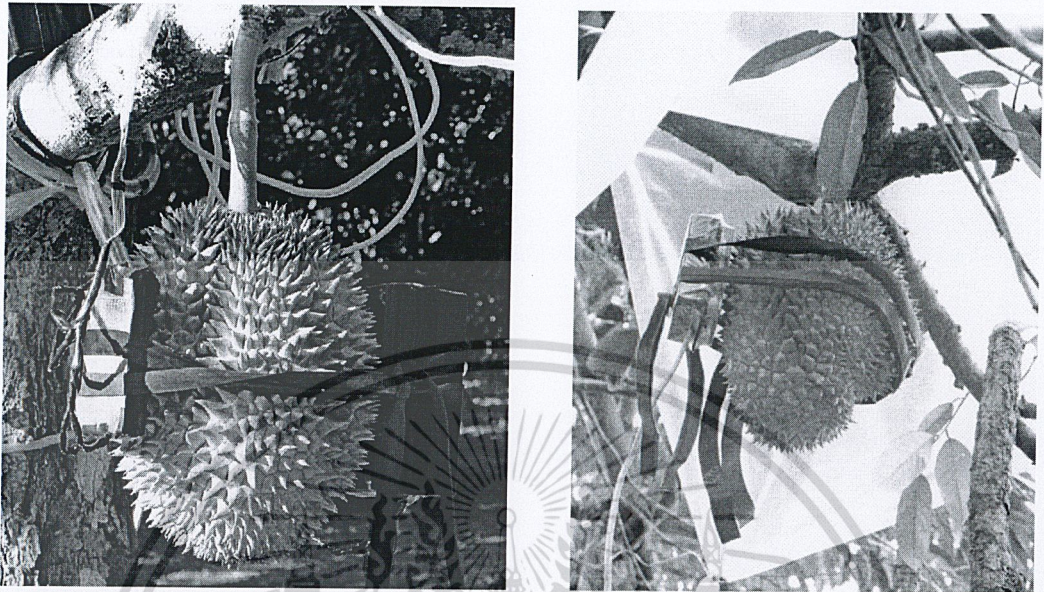
#### 4. ผลและวิจารณ์

##### 4.1 ผลการตอบสนองของคลื่นไมโครเวฟที่ติดตั้งเซ็นเซอร์บนผลทุเรียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำการทดสอบ การติดตั้งเซนเซอร์กับผลทุเรียน ได้ยึดตัวเซนเซอร์กับผลทุเรียนในลักษณะดังรูป

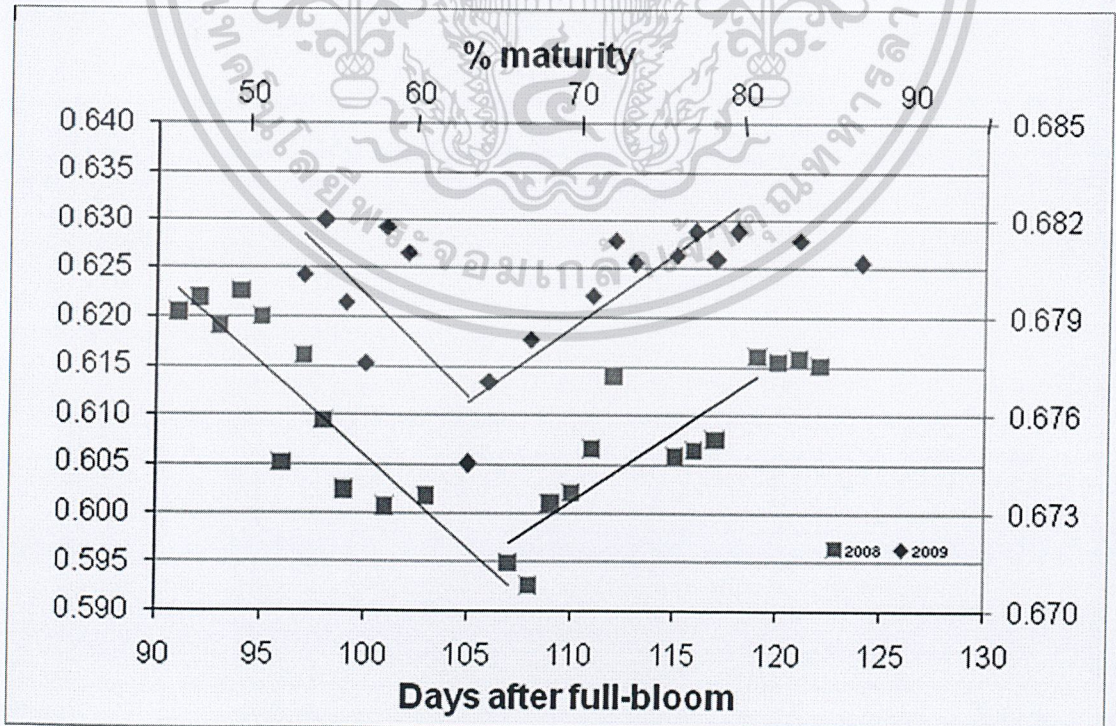
รูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การติดเซ็นเซอร์บนผลทุเรียน

เมื่อทำการบันทึกผลจากเซนเซอร์ในแต่ละวันจะ ได้ผลเฉลี่ยของค่าการตอบสนองเซนเซอร์ของแต่ละ

วัน ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ค่าตอบสนองของคลื่นไมโครเวฟที่ติดกับผลทุเรียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

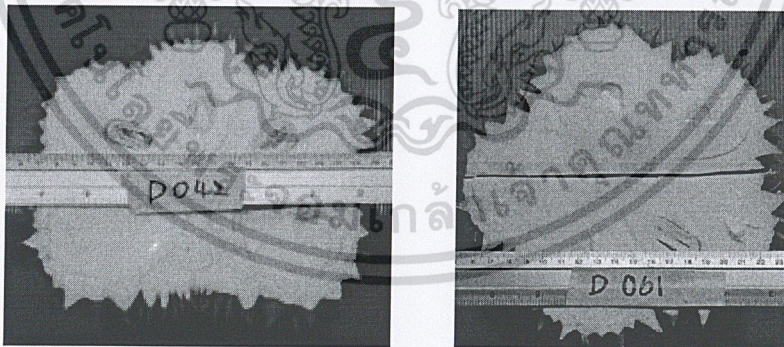
จากผลของค่าเฉลี่ยของการตอบสนองเซนเซอร์จะพบว่าค่าการตอบสนองมีความสัมพันธ์กับความบริสุทธิ์ของทุเรียน โดยแบ่งเป็นสองช่วงคือช่วงแรกตั้งแต่วันที่ 90-103 วันหลังดอกบาน พบว่าค่ามีแนวโน้มลดลง หลังจากนั้นแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่วันที่ 103-115 วันหลังดอกบาน หลังจากนั้นค่าการตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่

เมื่อเปรียบเทียบผลของค่าการตอบสนองของเซนเซอร์ในการทดสอบทั้งสองครั้ง พบว่ามีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน มีจุดผกผันที่สามารถแสดงความบริสุทธิ์ของทุเรียนได้ใกล้เคียงกัน แต่ค่าที่ได้จะมีความแตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ [25] ซึ่งแบ่งระดับความบริสุทธิ์ของทุเรียนเป็น 50, 60, 70, 80 และ 90% จะพบว่าจะมีความแตกต่างของระยะวันหลังดอกบานประมาณ 10 วัน ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากการนับระยะวันดอกบานของทุเรียนในแต่ละฤดูกาล

จากรูปที่ 4.4 จะให้เห็นได้ว่าจุดผกผันของค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟสามารถแสดงดัชนีความบริสุทธิ์ของทุเรียนประมาณ 70% ซึ่งเป็นความบริสุทธิ์ของทุเรียนที่ระดับต่ำสุดสามารถจำหน่ายต่างประเทศโดยขนส่งทางเรือ สามารถสุกได้ใน 7-10 วันแล้วมีรสชาติยอมรับได้ [24]

#### 4.2 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเปลือกและเนื้อทุเรียน

จากผลค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟที่ระดับความบริสุทธิ์ประมาณ 70% จะสอดคล้องกับผลทุเรียนในวันที่ 106 วันหลังดอกบาน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะเปลือกและเนื้อทุเรียนของผลที่มีขนาดใกล้เคียงกับผลที่ติดเซนเซอร์จะมีลักษณะดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ภาพตัดขวางของทุเรียนที่มีขนาดใกล้เคียงกับผลทุเรียนที่ติดเซนเซอร์ไมโครเวฟ ในวันที่ 106 วันหลังดอกบาน

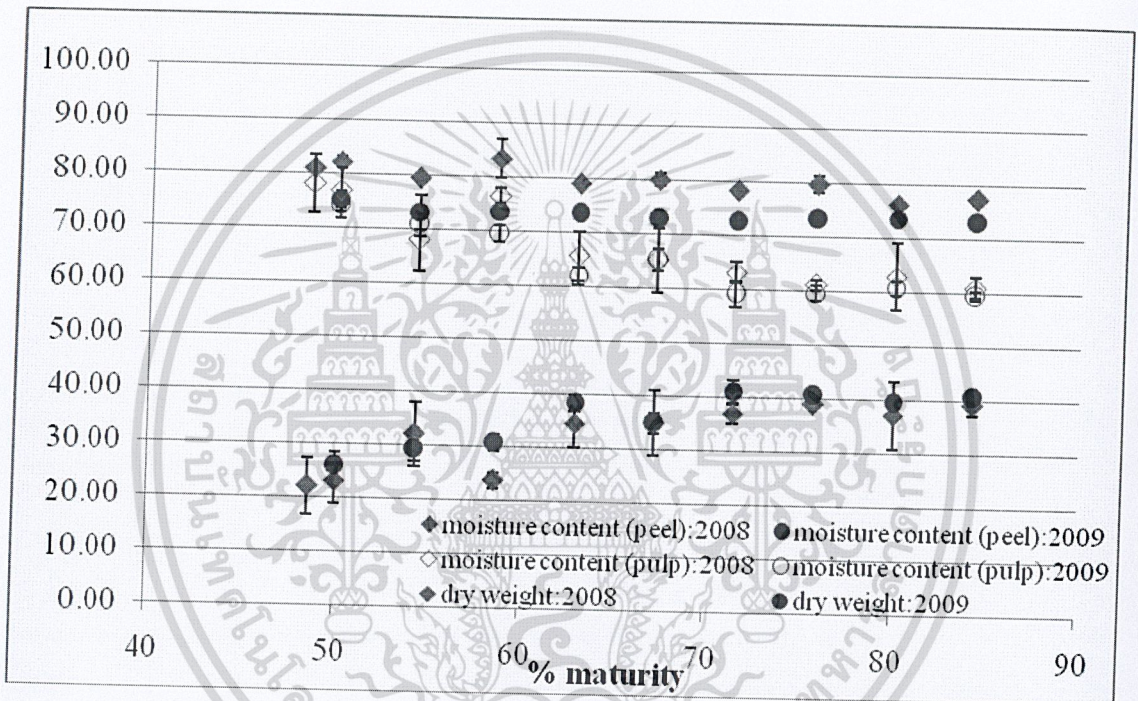
รูปที่ 4.5 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของผลทุเรียนที่มีขนาดใกล้เคียงกับผลทุเรียนที่ติดเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ เมื่อสังเกตในการตัดแนวขวาง การเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพของเนื้อทุเรียนจะ ไม่มีการขยายของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนเนื้อทุเรียนเนื่องจากเป็นช่วงที่ทุเรียนพัฒนาไปสู่ระยะการแก่ แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงของลักษณะของเนื้อและเมล็ด โดยเนื้อของทุเรียนเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อนและเมล็ดมีลักษณะที่เจริญเต็มที่และมีสีน้ำตาล

จากภาพตัดแนวขวางพบว่าเปลือกมีความหนาอยู่ประมาณ 2-3 เซนติเมตร โดยไม่มีการเพิ่มความหนาของเปลือกเนื่องจากทุเรียนอยู่ในระยะพัฒนาไปสู่การแก่ จึงสังเกตได้จากสีของเปลือกที่ปลายหนามเริ่มเป็นสีน้ำตาลเข้มขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นผลของปริมาณความชื้นในเปลือกที่เปลี่ยนแปลงไป

### 4.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในเปลือกและเนื้อทุเรียน



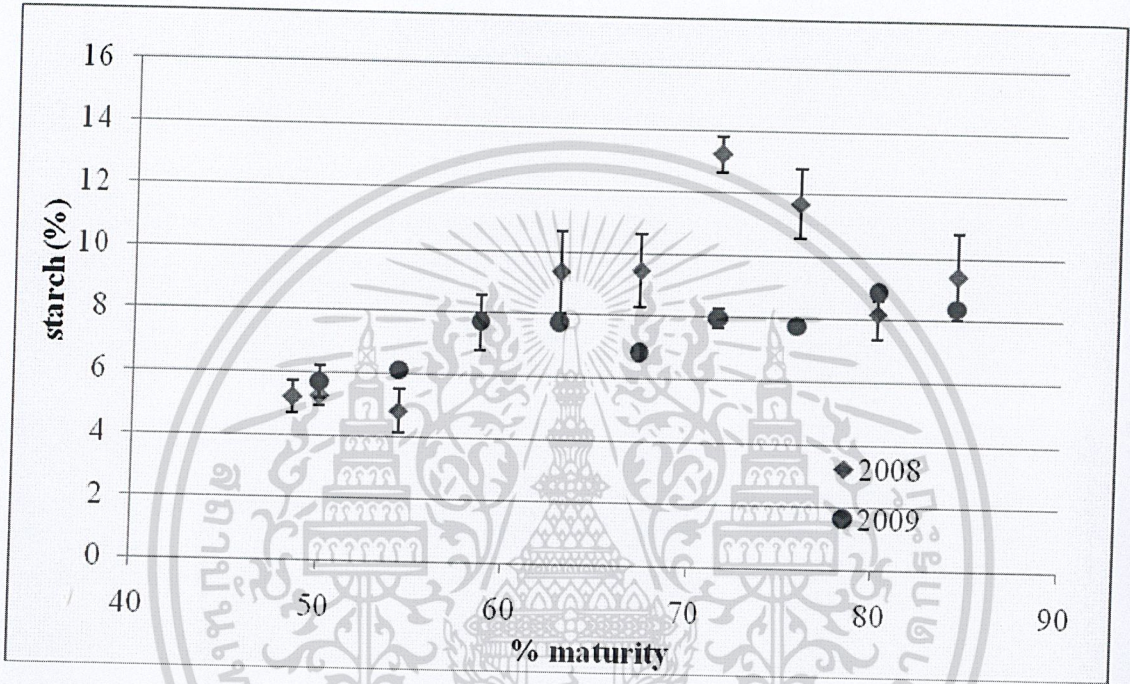
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในเปลือกและเนื้อทุเรียน

รูปที่ 4.6 แสดงปริมาณความชื้นในเปลือกและเนื้อทุเรียน โดยเนื้อทุเรียนมีความชื้นอยู่ในช่วง 60-78 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก และเปลือกมีความชื้นอยู่ในช่วง 76-83 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จึงเห็นได้ว่าความชื้นของเปลือกจะมีค่าสูงกว่าเนื้อทุเรียนและมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ส่วนความชื้นของเนื้อทุเรียนจะมีแนวโน้มลดลงเป็นส่วนผกผันกับค่าร้อยละน้ำหนักแห้ง

ค่าร้อยละน้ำหนักแห้งของเนื้อทุเรียนมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 22-41 โดยค่าจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนวันหลังดอกบาน โดยทุเรียนที่มีความบริบูรณ์ประมาณ 70 % มีค่าร้อยละน้ำหนักแห้งมากกว่า 32 ซึ่งตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ ทุเรียนพันธุ์หมอนทองจะต้องมีค่าร้อยละน้ำหนักแห้งขั้นต่ำเท่ากับ 32

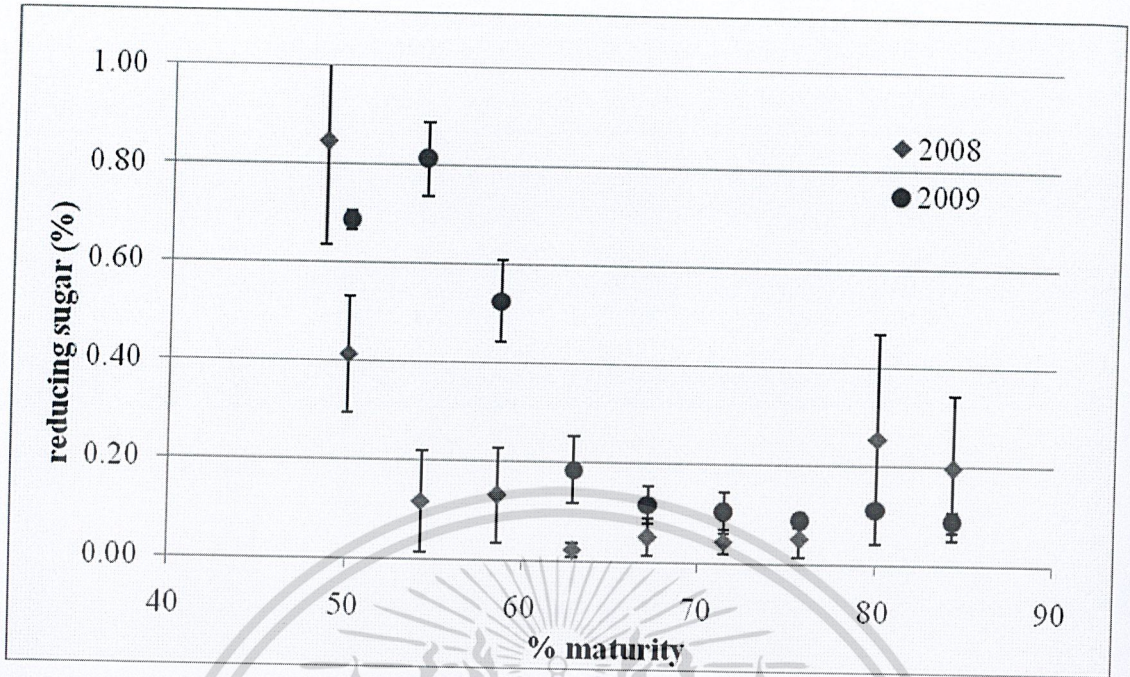
#### 4.4 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเนื้อทุเรียน

การหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และแป้งของเนื้อทุเรียนหลังจากที่ได้ทำการทดสอบกับเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ ได้ทำการเก็บเนื้อทุเรียนทุก ๆ 3 วันจากการสุ่มผลทุเรียนจากต้นเดียวกันที่มีขนาดผลและความแก่ใกล้เคียงกับผลทุเรียนติดเซ็นเซอร์ ซึ่งในการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และแป้งในเนื้อทุเรียนจะทำการอ้างอิงมาตรฐานของการดูดกลืนแสงของสารละลายกลูโคส ซึ่งปริมาณแป้งของเนื้อทุเรียนแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ปริมาณน้ำตาลแป้งในเนื้อทุเรียน

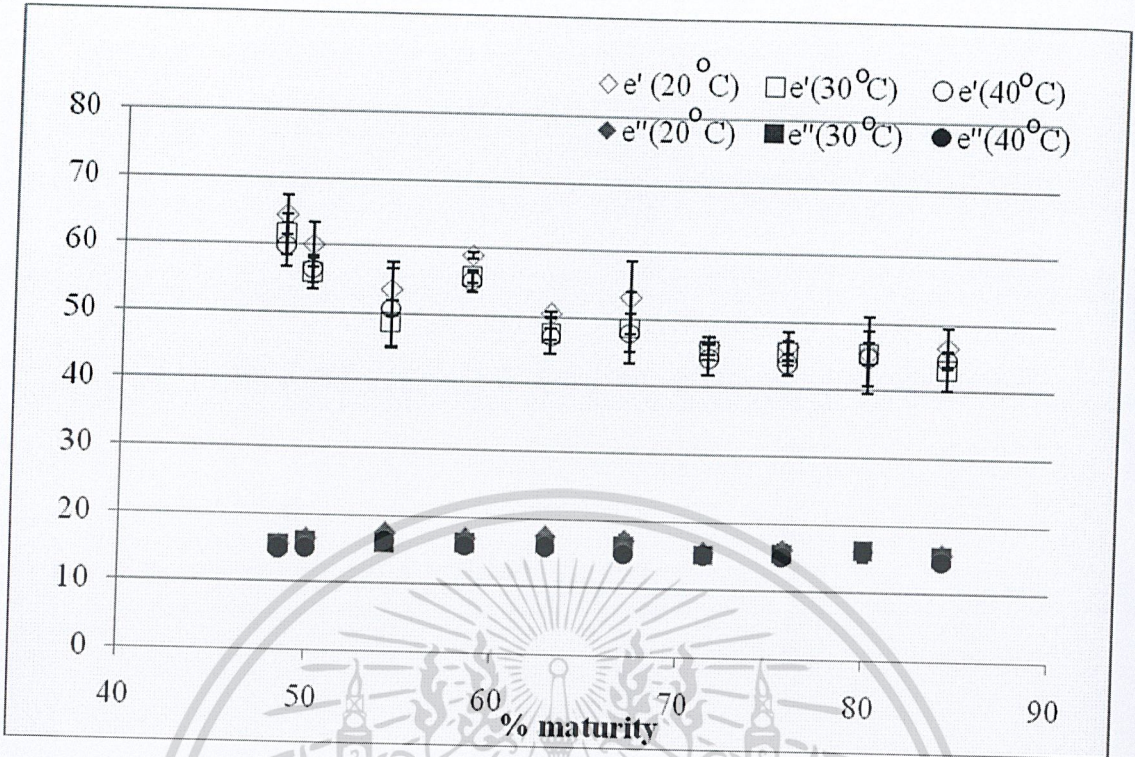
จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณแป้งเนื้อทุเรียนมีค่าอยู่ในช่วง 4.8-13.2 เปอร์เซ็นต์ ส่วนน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าอยู่ในช่วง 0.02-0.84 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณแป้งจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นผกผันกับปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นปริมาณแป้งจึงอาจจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติภายในของทุเรียนมากกว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์



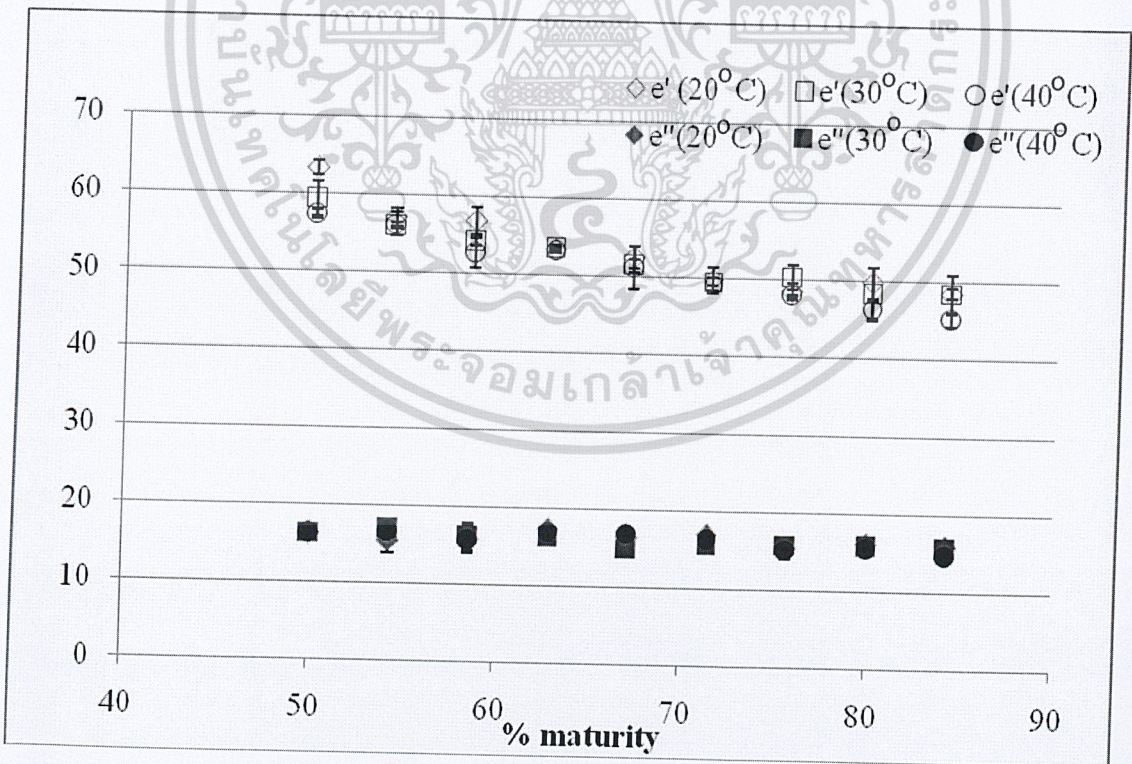
รูปที่ 4.8 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในเนื้อทุเรียน

4.5 คุณสมบัติคิงที่ไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียน

จากการวัดค่าคิงที่ไดอิเล็กตริกของทุเรียนที่อุณหภูมิ 20, 30 และ 40 °C จะพบว่าค่า dielectric constant ( $\epsilon'$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 43.1-64.4 โดยมีแนวโน้มลดลงสอดคล้องกับปริมาณความชื้น ส่วนค่า dielectric loss ( $\epsilon''$ ) 14.6-17.4 มีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างคงที่ แสดงว่าค่า  $\epsilon'$  เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟที่จะแสดงถึงความบริบูรณ์ของทุเรียน



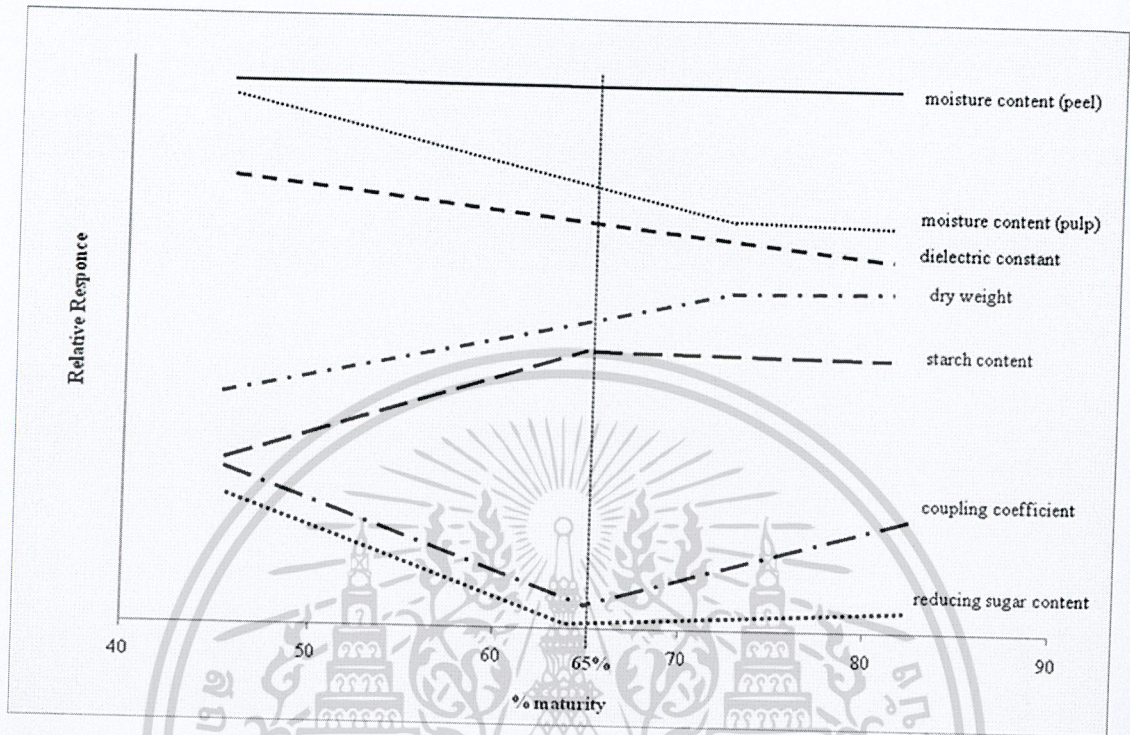
รูปที่ 4.9 ค่าไดอิเล็กตริกของทุเรียนในการเก็บข้อมูล ปี พ.ศ. 2551



รูปที่ 4.10 ค่าไดอิเล็กตริกของทุเรียนในการเก็บข้อมูล ปี พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมี ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และปริมาณความชื้นของทุเรียน



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีกับความบริสุทธิ์ของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง

จากรูปที่ 4.11 จะพบว่าค่าการตอบสนองเซนเซอร์ของเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟจะมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และผกผันกับปริมาณแป้ง ส่วนค่า  $\epsilon'$  มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณความชื้น โดยจุดผกผันของค่าตอบสนองเซนเซอร์สามารถแสดงดัชนีความบริสุทธิ์ของทุเรียนประมาณ 70% นอกจากนี้จุดผกผันดังกล่าวทุเรียนยังมีค่าน้ำหนักแห้งมากกว่า 32 ดังนั้นจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นและน้ำหนักแห้งมีผลต่อค่า  $\epsilon'$  ซึ่งค่าความชื้นและน้ำหนักแห้งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ ซึ่งหมายถึงเมื่อทุเรียนมีความบริสุทธิ์น้อยกว่า 70% จะมีการสะสมแป้งเพิ่มมากขึ้น และมีความชื้นน้อยลงทำให้มีค่าน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า  $\epsilon'$  ลดลง เมื่อทุเรียนมีความบริสุทธิ์มากกว่า 70% อาจจะมีการเปลี่ยนแป้งบางส่วนไปเป็นน้ำตาล และส่งผลต่อค่า  $\epsilon'$  ดังนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจึงมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียนมากกว่าค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟซึ่งสามารถแสดงดัชนีความบริสุทธิ์ของทุเรียนที่ระยะต่าง ๆ

## 5. สรุปผล

จากผลการทดสอบจะพบว่าค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.590-0.615 สามารถแสดงดัชนีความบริสุทธิ์ของทุเรียนที่ระดับความบริสุทธิ์ 60-90% โดยจุดผกผันของค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟมีความสัมพันธ์กับระดับความบริสุทธิ์ที่ระดับประมาณ 70% โดยค่าตอบสนองที่ได้ของการเก็บข้อมูลทั้งสองฤดูกาลมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน แต่มีค่าที่แตกต่างกัน นอกจากนั้นค่าตอบสนองเซนเซอร์จะมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และผกผันกับปริมาณแป้ง ส่วนค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นและน้ำหนักแห้งของทุเรียน ดังนั้นดัชนีการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองโดยเทคนิคการใช้เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเก็บเกี่ยวผลผลิตของเกษตรกรได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### แบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางและคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นทางสถิติในสวนทุเรียน ที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.8 GHz

#### 1. กล่าวนำ

ในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางจากจุดหนึ่งผ่านช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น (Propagation channel) ไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งพลังงานของคลื่นที่ส่งไปจะถูกลดทอนและเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง เวลา และคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นที่คลื่นเดินทางผ่าน [26] ซึ่งคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่คลื่นแพร่กระจายผ่าน เช่น โครงสร้างของอาคาร ต้นไม้ สิ่งกีดขวาง และลักษณะการติดตั้งสายอากาศ เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาการแพร่กระจายของคลื่นจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการทำนายความต้องการของระบบเพื่อใช้ในการออกแบบระบบการสื่อสารให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

การลดทอนตามระยะทางและความแปรปรวนของสัญญาณที่แพร่กระจายคลื่นจะถูกเรียกว่า การจางหาย (Fading) การจางหายของสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ [27] ได้แก่ การจางหายเนื่องจากระยะทางด้วยสเกลขนาดใหญ่ (Large-scale fading) และการจางหายของสัญญาณจากระยะทางด้วยสเกลขนาดเล็ก (Small-scale fading) การจางหายเนื่องจากระยะทางด้วยสเกลขนาดใหญ่จะให้ความสำคัญกับขนาดความแรงของสัญญาณที่มาถึงยังจุดรับสัญญาณเมื่อเทียบกับระยะทางเป็นหลัก ส่วนการจางหายของสัญญาณจากระยะทางด้วยสเกลขนาดเล็กจะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณตามเวลาอีกด้วย

รายงานฉบับนี้แบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ ส่วนแรกศึกษาการสูญเสียตามเส้นทางของการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 GHz และความถี่ 5.8 GHz ส่วนที่สองศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณตามเวลาที่ความถี่ 2.4 GHz และความถี่ 5.8 GHz

ในหัวข้อที่ 2 กล่าวถึงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบสัญญาณการสูญเสียตามเส้นทางและการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณตามเวลาและสภาพแวดล้อมการทดสอบการแพร่กระจายคลื่น

ในหัวข้อที่ 3 นำเสนอผลการทดสอบสัญญาณการสูญเสียตามเส้นทางของการแพร่กระจายคลื่น (Path loss) ที่มีการเปลี่ยนแปลงความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ รวมทั้งแสดงการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวและการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ [28]

ในหัวข้อที่ 4 นำเสนอผลการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นตามเวลา (Time varying) รวมทั้งแสดงการวิเคราะห์ข้อมูลการแพร่กระจายคลื่นทางสถิติด้วยการเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางสถิติของการกระจายตัวแบบ Rician [29] ซึ่งได้ถูกนำมาวิเคราะห์สัญญาณที่มีองค์ประกอบของสัญญาณหลัก เช่น การแพร่กระจายในแนวเส้นสายตา และองค์ประกอบของสัญญาณจากหลายเส้นทางที่เกิดขึ้นจากการสะท้อน หักเหของคลื่นจากสภาพแวดล้อม ซึ่งมีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของสวนทุเรียน จากนั้นนำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์ของการกระจายตัวแบบ Rician มาวิเคราะห์ร่วมกับการจำลองระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลเพื่อคำนวณหาค่าอัตราบิตผิดพลาด (BER; Bit error rate) ซึ่งมีความสำคัญต่อระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลที่มีอัตราส่งข้อมูลสูง

## 2. การติดตั้งอุปกรณ์และการทดสอบสัญญาณการสูญเสียตามเส้นทางและการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณตามเวลา

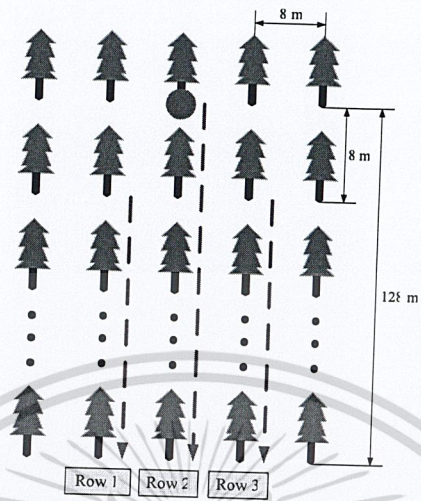
การทดลองการแพร่กระจายคลื่นในสวนได้จัดขึ้นที่ศูนย์วิจัยพืชสวน อ. พลับ จ. จันทบุรี



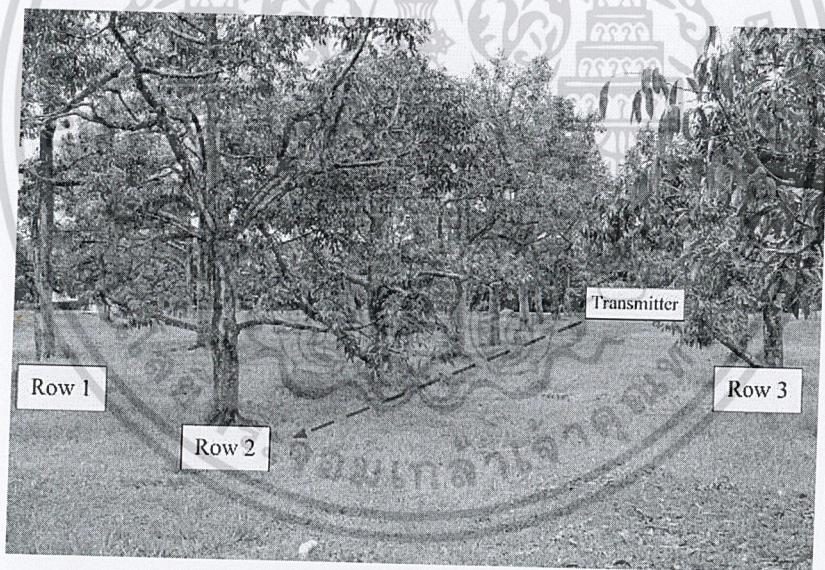
รูปที่ 5.1 ลักษณะของต้นทุเรียนที่ทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณ

มีสภาพแวดล้อมของสวนทุเรียนประกอบด้วยต้นทุเรียนที่มีความสูงประมาณ 10 เมตร มีลักษณะเป็นพุ่มสมมาตรกันโดยรอบต้น ดังแสดงในรูปที่ 5.1 สวนทุเรียนที่ทำการทดสอบนั้นจะมีรูปแบบของระยะห่างระหว่างต้นทุเรียนที่เท่าๆกัน คือมีระยะห่างระหว่างต้นเท่ากับ 8 เมตร และระยะห่างระหว่างแถวเท่ากับ 8 เมตรเช่นกัน โดยมีพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ราบ ดังแสดงในรูปที่ 5.2

### 2.1 การทดสอบสัญญาณการสูญเสียตามเส้นทาง



(ก) แบบจำลองสวนทุเรียนที่จะทำการทดสอบ



(ข) รูปถ่ายสวนทุเรียนที่ทำการทดสอบ

### รูปที่ 5.2 การติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์สัญญาณภายในสวนทุเรียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

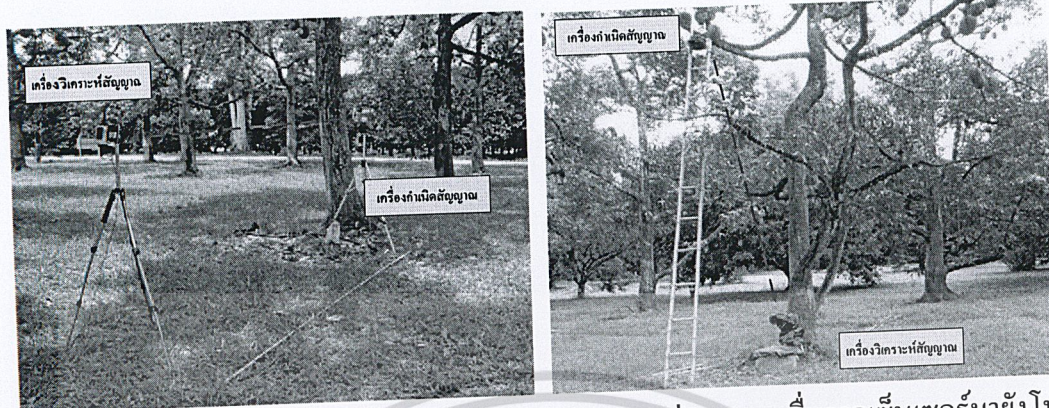


รูปที่ 5.3 การติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ

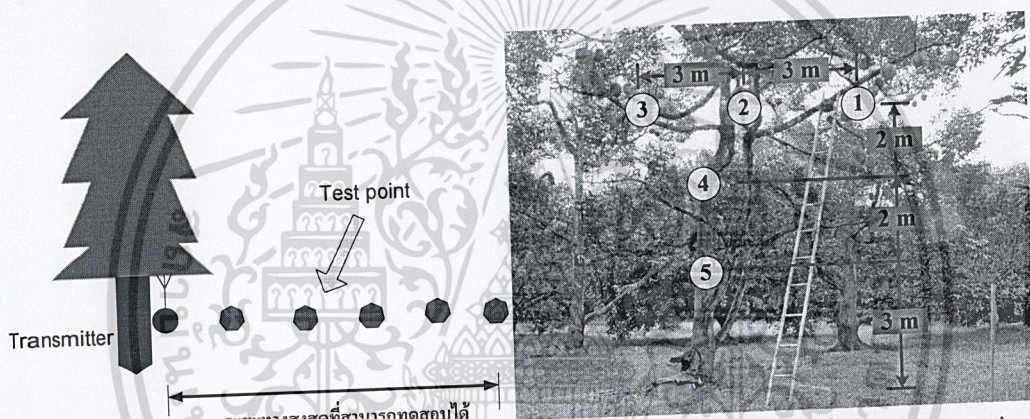
การศึกษาในส่วนแรกเป็นการศึกษาการสูญเสียตามเส้นทางของการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 GHz และความถี่ 5.8 GHz

โดยติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบสัญญาณการสูญเสียตามเส้นทางจะใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal generator) ในการส่งสัญญาณที่ความถี่ 2.4 GHz ที่มีกำลังงานในการส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm และเครื่องกำเนิดสัญญาณ ในการส่งสัญญาณที่ความถี่ 5.8 GHz ที่มีกำลังงานในการส่งสัญญาณเท่ากับ 11- dBm (กำลังงานในการส่งสัญญาณที่ความถี่ 2.4 และ 5.8 GHz มีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากข้อจำกัดของค่าสูงสุดของเครื่องกำเนิดสัญญาณ จึงทำให้มีความจำเป็นต้องใช้โมดูลเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ความถี่ 5.8 GHz ที่มีค่ากำลังงานต่ำกว่า ทั้งนี้การทดสอบระดับสัญญาณจะคำนึงถึงรูปแบบและระดับการลดทอนตลอดระยะทางดังนั้น กำลังงานส่งที่ความถี่ 5.8 GHz จึงมีค่าเพียงพอต่อการทดสอบ) ในส่วนการรับสัญญาณใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบเคลื่อนที่ได้ (Spectrum analyzer) ในการรับสัญญาณภายในสวนทุเรียน ซึ่งในการทดสอบสัญญาณการสูญเสียตามเส้นทางนั้นจะมีการทดสอบสัญญาณตามแถวของต้นทุเรียนทั้งหมด 3 แถว ซึ่งแต่ละแถวมีระยะห่างกันเท่ากับ 8 เมตร ดังรูปที่ 5.2 (ก)

## 2.2 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณตามเวลาทางสถิติ



(ก) การแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด (ข) การแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์มายังโหนด



(ค) ตำแหน่งการทดสอบระหว่างโหนดต่อโหนด (ง) ตำแหน่งการแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์มายังโหนด

รูปที่ 5.4 การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นในทางสถิติ

สำหรับการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนนั้นใบของทุเรียนมีลักษณะที่ไม่หนาที่มาก ระยะห่างของต้นทุเรียนมีระยะเท่ากับ 8 เมตร การทดสอบสัญญาณทำโดยการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นในทางสถิติ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1 การจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนดดังแสดงในรูปที่ 5.4 (ก) การจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์มายังโหนดดังแสดงในรูปที่ 5.4 (ข) ตำแหน่งการทดสอบระหว่างโหนดต่อโหนดดังแสดงในรูปที่ 5.4 (ค) และตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบจากเซ็นเซอร์มายังโหนดดังแสดงในรูปที่ 5.4 (ง)

การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.4(ค) โดยติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์สัญญาณให้มีความสูงประมาณ 0.5 เมตร เครื่องส่งทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ด้วยกำลังส่งเท่ากับ 10 dBm และ 11- dBm ตามลำดับ สายอากาศทางด้านส่งและทางด้านรับที่ทดสอบเป็นสายอากาศโมโนโพลหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่นมีอัตราขยายประมาณ 2 dBi โดยในการเอ็กสักรีนเป็นเอ็กสักร์ที่ส่งวนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบได้ติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณที่บริเวณ โคนต้นทุเรียน ส่วนทางด้านรับติดตั้งเครื่องวิเคราะห์สัญญาณห่างออกมาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณในแนวเส้นสายคาที่ตำแหน่งต่างๆ

การจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์มายังโหนดซึ่งในที่นี้ได้ทดสอบการรับสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ โดยติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณบนต้นทุเรียนเพื่อจำลองตัวตรวจจับบนต้นทุเรียนและเครื่องวิเคราะห์สัญญาณติดตั้งให้มีความสูงประมาณ 0.5 เมตรที่โคนต้น ในแต่ละตำแหน่งจะบันทึกค่าสัญญาณที่ได้รับได้ในทุกๆ 2 วินาที จนครบจำนวน 1,000 ครั้ง หลังจากนั้นจะนำค่าที่ได้ไปทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของสัญญาณในทางสถิติต่อไป

### 3. การทดสอบสัญญาณการสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น (Path loss)

#### 3.1 หลักการ

ในการศึกษาการจางหายเนื่องจากระยะทางด้วยสเกลขนาดใหญ่จะมุ่งเน้นถึงการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมต่างๆ กระบวนการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นอาจทำได้โดย 1.) ทดสอบระดับสัญญาณจากสถานที่จริง จากนั้นสร้างกราฟขึ้นมาอธิบาย(Fit Curve) และสร้างสมการการแพร่กระจายคลื่น เพื่อใช้ในการทำนายระดับสัญญาณที่ระยะต่างๆ 2.) ใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์เช่น ทฤษฎีการเลี้ยวเบนของคลื่น หรือทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆ ที่มีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่สนใจ เพื่อทำนายการแพร่กระจายคลื่นและสร้างเป็นแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น โดยที่ไม่จำเป็นต้องทดสอบในทุกสถานการณ์ สำหรับแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น ได้มีการสร้างขึ้นสำหรับการทำนายการลดทอนของคลื่นขึ้นมาหลายแบบจำลองด้วยกัน ตัวอย่างเช่น แบบจำลองช่องว่างอิสระ (Free-space model) แบบจำลองสองรังสี (Two-ray model) และแบบจำลองฮาตา (Hata model) เป็นต้น เพื่อใช้ในการทำนายระยะบริการสูงสุดของการสื่อสาร ในการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.8 GHz นั้นแบบจำลองของฮาตาจะไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับทดสอบการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนได้ เนื่องจากแบบจำลองนี้ จะมีความแม่นยำ เมื่อความถี่ที่ใช้ต้องมีค่ามากกว่า 150 MHz แต่ไม่เกิน 1500 MHz ความสูงของสายอากาศด้านส่งที่ใช้ต้องมีค่ามากกว่า 30 เมตร แต่ไม่เกิน 200 เมตร ความสูงของสายอากาศรับที่ใช้มีค่ามากกว่า 1 เมตร แต่ไม่เกิน 10 เมตร ดังนั้นการศึกษาและสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.8 GHz จะทำโดยการทดสอบระดับสัญญาณในสถานที่จริงและนำมาสร้างแบบจำลอง การแพร่กระจายคลื่น ซึ่งผลการศึกษาก็มีความสำคัญอย่างมากเพื่อนำไปใช้ทำนายระดับสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นในการติดตั้งตัวตรวจจับแบบไร้สายในระบบของตรวจจับแบบไร้สายในสวนทุเรียน [30]

#### 3.1.1 การสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น

ในการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นจะใช้แบบจำลองอย่างง่าย (Empirical Model) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้มาจากข้อมูลที่ทดสอบในสถานการณ์จริง จากนั้นนำมาสร้างกราฟเส้นตรงโดยวิธีถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) เพื่อหาค่าความชันของเส้นกราฟหรือเรียกว่าเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน(Path Loss Exponent;  $n$ ) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลากเส้นกราฟเส้นตรงผ่านกลุ่มจุดข้อมูลที่กำหนดทำโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Method of Least squares) วิธีนี้ให้หาค่า  $\sum x_i$  ,  $\sum y_i$  ,  $\sum x_i y_i$  และ  $\sum x_i^2$  แล้วนำไปแทนค่าหาความชัน  $n$  และระยะตัดแกน คือ  $c$  จากสมการต่อไปนี แล้วนำไปแทนในสมการเส้นตรง  $y = nx + c$  แทนค่า  $x$  ลงในสมการเพื่อหาค่า  $y$  ที่ดีที่สุด

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2}$$

$$c = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{i=1}^N y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N x_i y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2}$$

เมื่อทราบสมการเส้นตรงที่ดีที่สุด ดังนั้นเราสามารถลากเส้นกราฟที่ดีที่สุดได้ เส้นกราฟนี้เรียกว่า เส้นการถดถอย (Regression line) หรือเส้นการทำนาย (Prediction line) โดยการทำนายค่า  $y$  เมื่อทราบค่า  $x$  หลักการของวิธีนี้ทำให้ได้ผลบวกของ  $y^2$  ของทุกจุดข้อมูลมีค่าน้อยที่สุดหลักการนี้ทำให้ได้สูตรของความชัน  $n$  และ ค่าเริ่มต้น  $c$

เพื่อที่จะตรวจสอบระดับของความถูกต้องของกราฟเส้นตรงที่ลากผ่านกลุ่มจุดข้อมูลที่กำหนด จะตรวจสอบโดยการพิจารณาผลการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างกราฟการซึ่งค่าสหสัมพันธ์นี้คือค่าที่แสดงความสัมพันธ์กันของชุดข้อมูล ถ้าชุดของข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์แบบสมบูรณ์ค่าสหสัมพันธ์จะมีค่าเท่ากับ 1

### 3.1.2 แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว

ค่าการลดทอนของระดับสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางจากการทดสอบระดับสัญญาณสามารถเขียนกราฟการถดถอยเชิงเส้นที่มีเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน  $n$  ได้ตามสมการด้านล่างต่อไปนี้

$$L_{LOS}(d) = L(d_0) + 10 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right)^n \text{ (dB)} \quad (5.1)$$

เมื่อ  $L_{LOS}$  คือค่าการลดทอนที่ระยะทางใด ๆ  $L(d_0)$  คือค่าการลดทอนเริ่มต้นที่ระยะทาง  $d_0$

ทำให้สามารถที่จะใช้กราฟถดถอยเชิงเส้นของระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบซึ่งอยู่ในรูปของเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน  $n$  เพื่อที่จะทำนายค่าระดับสัญญาณที่ระยะทางใด ๆ ของช่องทางการแพร่กระจายคลื่นนั้น หรือช่องสัญญาณที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่

แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ยวนั้นเหมาะสมสำหรับการทำนายระดับสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นที่มีระยะทางไกล เนื่องจากระดับสัญญาณที่สุ่มในระยะทางต่างๆ ที่มีระยะที่ห่างกันจะมีแนวโน้มการลดทอนเป็นเส้นตรง เมื่อทดสอบการลดทอนการแพร่กระจายคลื่นที่ระยะทางสั้นๆ พบว่าแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่จะมีความเหมาะสมมากกว่า ค่าการลดทอนของระดับสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางจากการทดสอบระดับสัญญาณสามารถเขียนกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ที่มีค่าความชันเป็น  $n_1$  และ  $n_2$  ได้ตามสมการ (5.2) ดังต่อไปนี้

$$L_{LOS}(d) = \begin{cases} L_{Rb.1} + 10 \log_{10} \left( \frac{d}{Rb} \right)^{n_1} & \text{for } d < Rb \\ L_{Rb.2} + 10 \log_{10} \left( \frac{d}{Rb} \right)^{n_2} & \text{for } d > Rb \end{cases} \quad (\text{dB}) \quad (5.2)$$

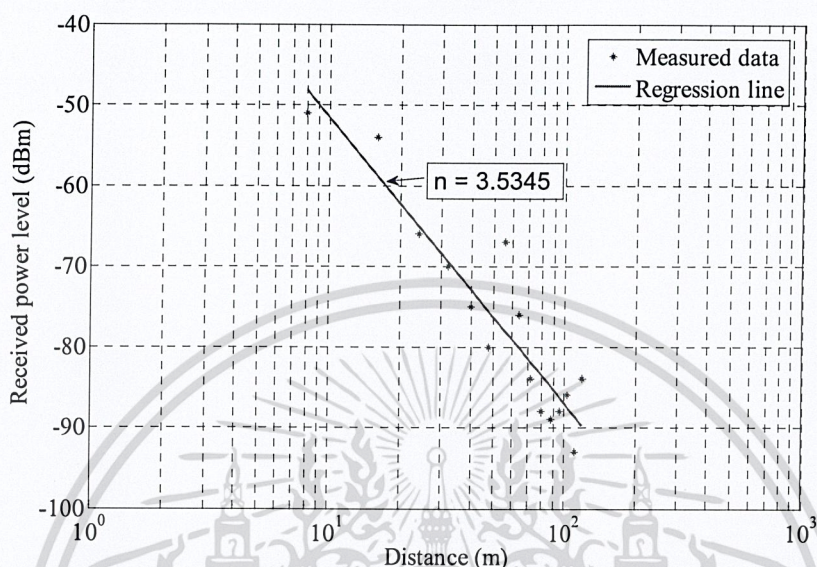
เมื่อ  $L_{LOS}$  คือค่าการลดทอนตลอดระยะทางใด ๆ  $Rb$  คือระยะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟ  $L_{Rb.1}$  คือค่าการลดทอนเริ่มต้นและ  $n_1$  คือเลขชี้กำลังของค่าการลดทอนที่ระยะทาง  $d$  มีค่าน้อยกว่า  $Rb$  และ  $L_{Rb.2}$  คือค่าการลดทอนเริ่มต้นและ  $n_2$  คือเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน ที่ระยะทาง  $d$  มีค่ามากกว่า  $Rb$

ดังนั้นเราสามารถที่จะใช้กราฟถดถอยเชิงเส้นของระดับสัญญาณแบบความชันคู่ที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งอยู่ในรูปของเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน  $n_1$  และ  $n_2$  เพื่อที่จะทำนายค่าระดับสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ของช่องทางการแพร่กระจายคลื่นนั้นหรือช่องสัญญาณที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันได้ดีกว่าการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยว

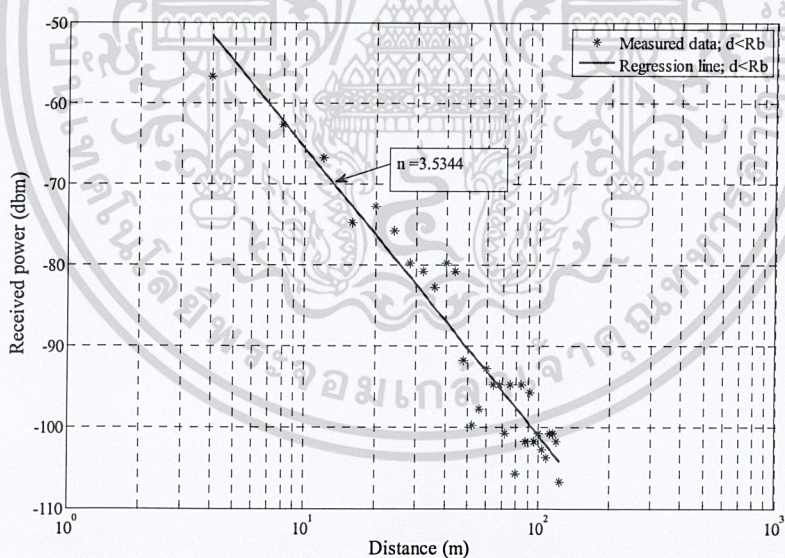
ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟ  $Rb$  ในการเขียนเส้นกราฟจากการทดลองนั้น จะทำโดยการเปลี่ยนแปลงระยะทาง  $Rb$  และคำนวณค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบ โดยแบ่งการคำนวณออกเป็นสองช่วงคือช่วงระยะทางที่น้อยกว่าระยะ  $Rb$  และช่วงระยะทางที่มากกว่าระยะ  $Rb$

### 3.2 ผลการทดสอบและแบบจำลองการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง

#### 3.2.1 แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวเมื่อความสูงของสายอากาศส่งสูง 50 เซนติเมตรและสายอากาศรับสูง 50 เซนติเมตร และโพลาไรซ์ของสายอากาศแบบแนวตั้ง



(ก) ความถี่ 2.45GHz



(ข) ความถี่ 5.8 GHz

#### รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบและแบบจำลองความชันเดียว

รูปที่ 5.5 แสดงกำลังงานรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางของสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่มีโพลาไรซ์แนวตั้ง จากกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

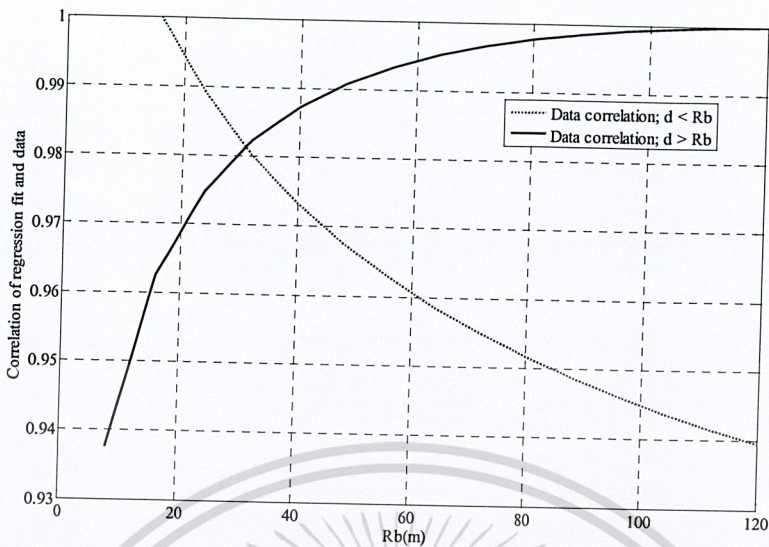
เดี่ยพบค่าเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน  $n$  ที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 3.5345 และ 3.5344 ตามลำดับ

เพื่อที่จะตรวจสอบระดับของความถูกต้องของกราฟเส้นตรงที่ลากผ่านกลุ่มจุดข้อมูลที่กำหนด ผลการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 0.93 และ 0.92 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน  $n$  ของทั้งสองความถี่พบว่ามีความใกล้เคียงกัน

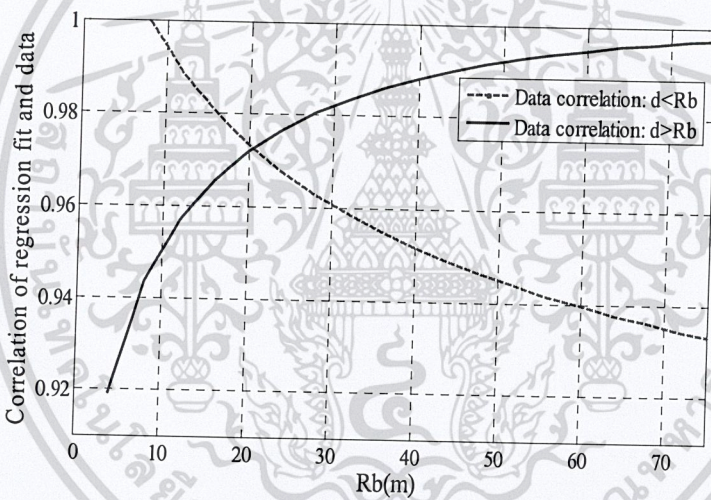
### 3.2.2 แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่เมื่อความสูงของสายอากาศสูง 50 เซนติเมตรและสายอากาศรับสูง 50 เซนติเมตร และโพลาริซชันของสายอากาศแบบแนวตั้ง

จากวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวพบว่าค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 0.93 และ 0.92 ตามลำดับซึ่งยังคงมีค่าน้อยและโดยปกติการลดทอนจะมีการเปลี่ยนความชันที่จุดเปลี่ยนความชัน  $R_b$  เนื่องจากที่ระยะทางไกลๆ จากแหล่งกำเนิดจะเกิดความต่างเฟสกันมากระหว่างองค์ประกอบของคลื่นที่มายังจุดสังเกต (Multi path) แต่เมื่อระยะทางมากกว่าจุดเปลี่ยนความชัน  $R_b$  ความต่างเฟสกันมากระหว่างองค์ประกอบของคลื่นที่มายังจุดสังเกตจะมีค่าน้อยลง ทำให้เกิดความชันหรือค่าเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน  $n$  ต่างกัน ซึ่งตำแหน่งจุดเปลี่ยนความชัน  $R_b$  จะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้งาน โดยเมื่อค่าความถี่ต่ำจุดเปลี่ยนความชัน  $R_b$  จะห่างจากแหล่งกำเนิดมากกว่าเมื่อความถี่สูงขึ้น ซึ่งแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ จะให้มีความถูกต้องมากกว่าแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวเนื่องจากรวมผลของการเปลี่ยนแปลงเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน  $n$  เข้ารวมในแบบจำลองด้วย

กราฟถดถอยเชิงเส้นของระดับสัญญาณแบบความชันคู่ที่ได้จากการทดสอบซึ่งอยู่ในรูปของเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน  $n_1$  และ  $n_2$  เพื่อที่จะทำการทำนายค่าระดับสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ของช่องทางการแพร่กระจายคลื่นนั้น หรือช่องสัญญาณที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันได้ดีกว่าการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว



(ก) ความถี่ 2.45GHz



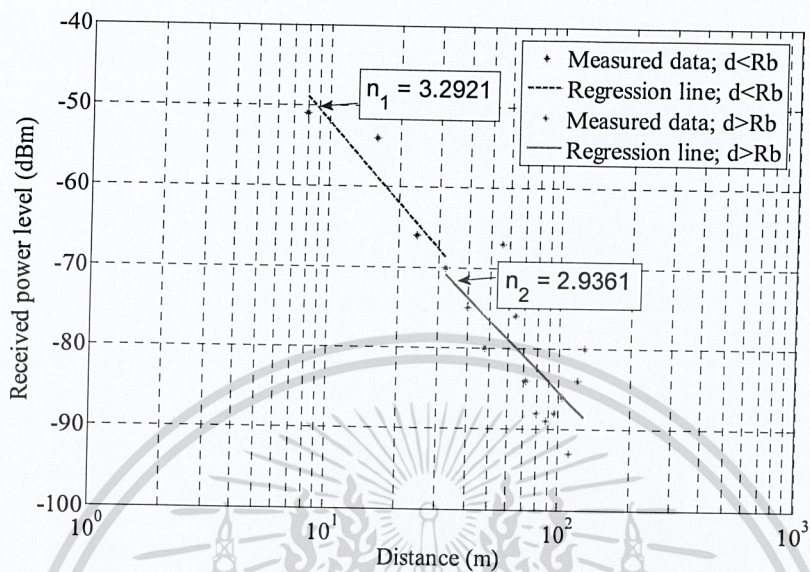
(ข) ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 5.6 กราฟค่าสหสัมพันธ์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟ  $R_b$  ของสายอากาศส่งและรับมีโพลาริซแนตตั้ง

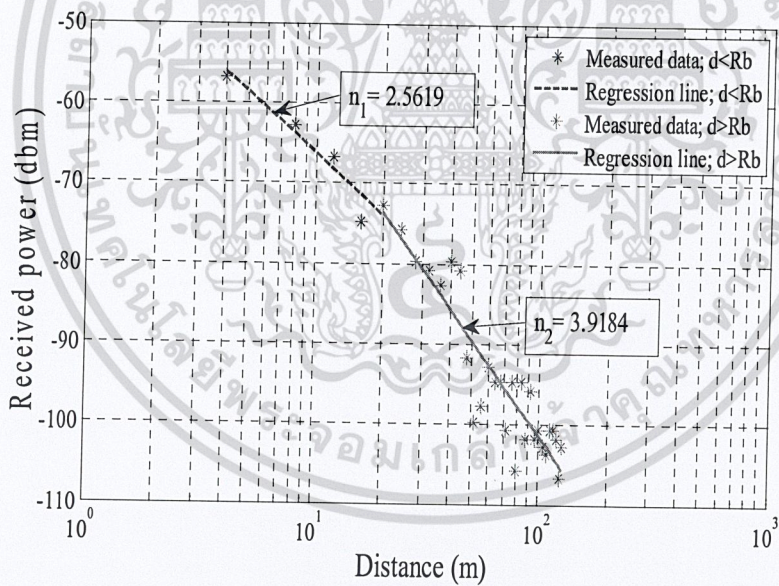
กราฟค่าสหสัมพันธ์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟ ( $R_b$ ) ของสายอากาศส่งและรับมีโพลาริซแนตตั้งดังแสดงในรูปที่ 5. 6 แสดงถึงตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ทำให้ค่าสหสัมพันธ์ของเส้นกราฟที่ระยะทางน้อยกว่า  $R_b$  และเส้นกราฟสหสัมพันธ์ที่ระยะทางมากกว่า  $R_b$  ตัดกัน ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับที่ความถี่ 2.4 GHz มีค่าเท่ากับ 31 เมตรและที่ความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 20 เมตร ซึ่งมีความสอดคล้องกันในทางทฤษฎี และมีค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ (Correlation) สำหรับที่ความถี่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GHz มีค่าเท่ากับ 0.98 และที่ความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 0.97 ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่าแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการลดออยเชิงเส้นแบบความชันเดียว



(ก) ความถี่ 2.45GHz



(ข) ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 5.7 ระดับสัญญาณรับและกราฟการลดออยเชิงเส้นแบบความชันคู่ที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง

รูปที่ 5.7 แสดงถึงระดับสัญญาณรับและกราฟการลดออยเชิงเส้นแบบความชันคู่ที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีโพลาริซเนตตั้ง จากกราฟการลดออยเชิงเส้นแบบความชันคู่ที่ความถี่ 2.4 GHz พบว่าค่า  $n_1$  มีค่าเท่ากับ 3.2921 และค่า  $n_2$  มีค่าเท่ากับ 2.9361 และที่ความถี่ 5.8 GHz พบว่าค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$n_1$  มีค่าเท่ากับ 2.5619 และค่า  $n_2$  มีค่าเท่ากับ 3.9184 ซึ่งพบว่าที่ความถี่ 5.8 GHz มีค่าการลดทอนบริเวณระยะทางไกลมากกว่าที่ความถี่ 2.4 GHz

#### 4. การเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นตามเวลา (Time varying)

##### 4.1 หลักการ

##### 4.1.1 คุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นทางสถิติ

ในการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายนั้น สัญญาณที่มาถึงยังสายอากาศรับจะประกอบด้วยองค์ประกอบสัญญาณหลักที่ไม่มีเงาจากสาย (Line-of-sight ray) และองค์ประกอบของสัญญาณจากหลายเส้นทางที่เกิดขึ้นจากการสะท้อน หักเหของคลื่นจากสภาพแวดล้อม (Multiple reflective ray) การจางหายของสัญญาณจะประกอบด้วยเงาจากตามระยะทาง (Large scale fading) และการจางหายที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Time fading) สำหรับการสื่อสารของระบบสื่อสารที่มีการกำหนดระยะทางคงที่ (ตัวอย่างเช่นระบบโครงข่ายตรวจจับแบบไร้สาย) และอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเช่น ในบริเวณป่าไม้ ลานจอดรถ เป็นต้น ค่าระดับสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะมีผลต่อการสื่อสารข้อมูลในระบบดิจิทัลเป็นอย่างมาก เช่น อาจทำให้เกิดการผิดพลาดของข้อมูล (บิตข้อมูลผิดพลาด) จนทำให้การติดต่อสื่อสารข้อมูลขาดความน่าเชื่อถือได้ ดังนั้นในการนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางสถิติของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นจึงมีความสำคัญ

คุณลักษณะทางสถิติของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาจะมีลักษณะสอดคล้องกับการกระจายตัวทางสถิติแบบ Rayleigh และการกระจายตัวแบบ Rician เป็นสำคัญ สำหรับในกรณีของการกระจายตัวแบบ Rician ได้ถูกนำมาวิเคราะห์สัญญาณที่มีองค์ประกอบของสัญญาณหลัก เช่น การแพร่กระจายในแนวเส้นสายตา และองค์ประกอบของสัญญาณจากหลายเส้นทางที่เกิดขึ้นจากการสะท้อน หักเหของคลื่นจากสภาพแวดล้อม การกระจายตัวแบบ Rician สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [31]

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2+A^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right) \quad (5.3)$$

โดยที่  $r$  คือ แอมพลิจูดของสัญญาณที่รับได้

$A$  คือ แอมพลิจูดของสัญญาณหลัก

$I_0(\cdot)$  คือ ฟังก์ชันของเบสเซลดัดแปลง (Modified Bessel Function)

เมื่อสัญญาณในส่วนขององค์ประกอบหลักมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบของสัญญาณจากหลายเส้นทางที่เกิดขึ้นจากการสะท้อนจากทิศทางอื่น ดังนั้นการกระจายตัวของสัญญาณจะเป็นลักษณะของ Rayleigh ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (5.4)$$

การกระจายตัวแบบ Rician นั้นสามารถอธิบายในเทอมของค่า  $K$  ได้ ซึ่งกำหนดเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังงานของสัญญาณองค์ประกอบหลักที่ไม่มีการจางหายต่อค่าของระดับสัญญาณที่มาจากหลากหลายทิศทาง ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

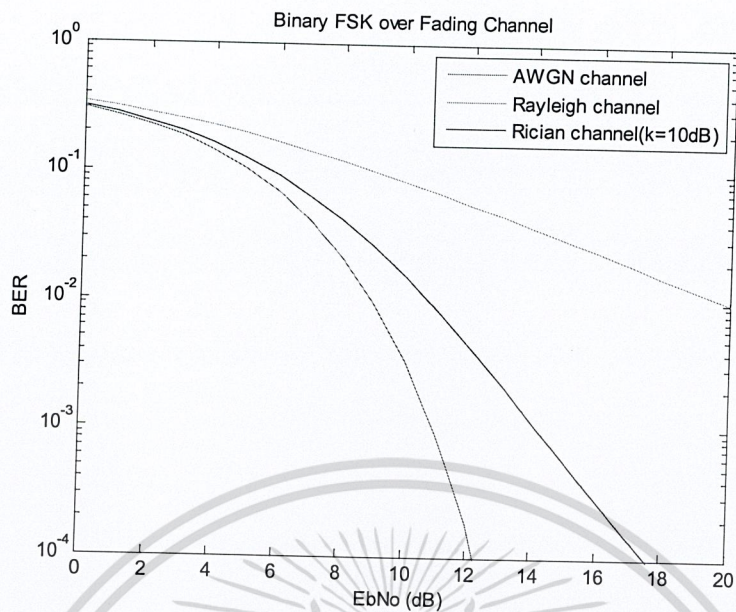
$$K(\text{dB}) = 10 \log\left(\frac{A^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.5)$$

ดังนั้นการกระจายตัวแบบ Rayleigh สามารถพิจารณาเป็นกรณีของช่องสัญญาณการสื่อสารที่ไม่อยู่ในแนวเส้นสายตา (Non-line of sight) สำหรับตัวอย่างการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายที่มีการกระจายตัวเป็นแบบ Rician เช่น การติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับตัวเซ็นเซอร์ที่ติดบนรถยนต์ การแพร่กระจายคลื่นในสวนที่มีต้นไม้ไม่หนาที่บมากนัก เป็นต้น และตัวอย่างการกระจายตัวแบบ Rayleigh เช่น การติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับส่วนประกอบของรถยนต์ที่มีการกีดขวางการแพร่กระจายคลื่น หรือการแพร่กระจายคลื่นในป่าที่มีลักษณะของต้นไม้หนาที่บ เป็นต้น [32]

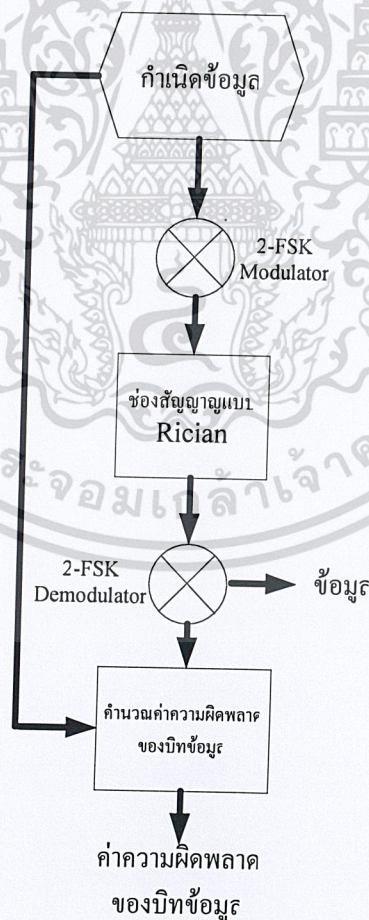
#### 4.1.2 การจำลองระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลเพื่อคำนวณหาค่าอัตราผิดพลาด (BER; Bit error rate)

จากการทดสอบระดับสัญญาณทางสถิติทำให้ทราบถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณเบื้องต้นผ่านค่าตัวแปร  $K$  ของช่องสัญญาณการจางหายแบบ Rician ดังนั้นสามารถที่จะทำนายค่าความผิดพลาดของการสื่อสารข้อมูลอย่างง่ายได้ 2 วิธีด้วยกันคือ 1.) ทำนายค่าความผิดพลาดของการสื่อสารข้อมูลผ่านทางทฤษฎีการสื่อสารข้อมูลที่ได้จากสมการแม่นยำตรง 2.) ทำนายค่าความผิดพลาดของการสื่อสารข้อมูลผ่านการจำลองระบบการสื่อสาร การทำนายทางทฤษฎีการสื่อสารข้อมูลที่ได้จากสมการแม่นยำตรงจะเป็นการคำนวณแบบประมาณที่ประกอบด้วยฟังก์ชันค่าความผิดพลาดในทางสถิติสำหรับเป็นตัวแทนการมอดูเลตสัญญาณในแบบต่างๆ โดยสามารถรวมผลของลักษณะช่องสัญญาณทางสถิติร่วมด้วยในการทำนาย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องมือสำเร็จในโปรแกรม MATLAB ที่มีชื่อว่า BERTool เพื่อทำนายค่าความผิดพลาดของบิตข้อมูลในทางทฤษฎีได้

ในรายงานนี้จะทำการคำนวณการสื่อสารในระบบ Frequency Shift Keying หรือที่เรียกว่า FSK ซึ่งเป็นระบบการมอดูเลตแบบพื้นฐานที่ใช้ในระบบตรวจจับแบบไร้สายทั่วไป



(ก) ค่าความผิดพลาดของบิตข้อมูลกับช่องสัญญาณต่างๆ



(ข) ลำดับขั้นการจำลองระบบสื่อสาร (การสื่อสารแบบ 2-FSK บนช่องสัญญาณ Rician)

### รูปที่ 5.8 ช่องสัญญาณและลำดับขั้นการจำลองระบบสื่อสาร

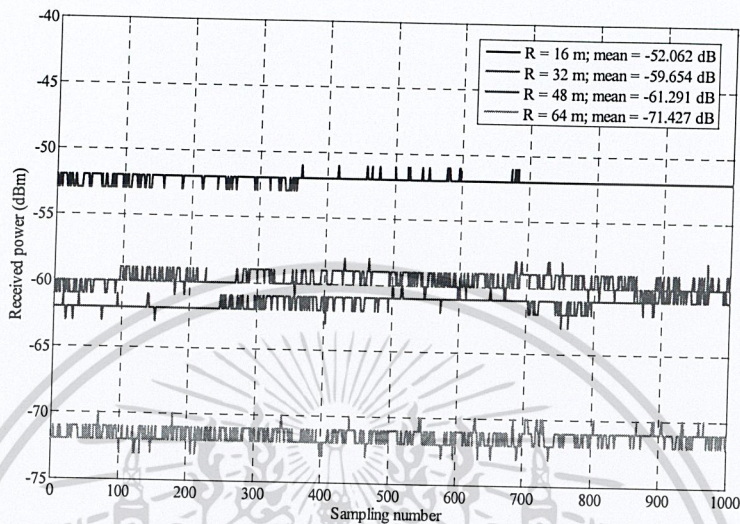
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.8 (ก) แสดงค่าความผิดพลาดของบิตข้อมูลกับช่องสัญญาณต่างๆ ในการคำนวณทางทฤษฎี กำหนดชนิดการมอดูเลตที่แบบ FSK ลำดับ 2 (2-FSK) ซึ่งใช้ 2 บิตแทน 1 สัญลักษณ์ แพร่กระจายผ่านช่องสัญญาณที่มีลักษณะการกระจายตัวทางสถิติแบบ Rician ( $K=10\text{dB}$ ) ช่องสัญญาณแบบ Gaussian และช่องสัญญาณแบบ Rayleigh โดยเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน ( $E_b/N_0$ ) เพื่อทำนายค่าความผิดพลาดของบิตข้อมูล จากรูปที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของบิตข้อมูลในช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน ช่องสัญญาณแบบ Rayleigh จะเหมาะสมกับการทำนายการสื่อสารในลักษณะที่ไม่เห็นแหล่งกำเนิด หรือไม่มีองค์ประกอบสัญญาณหลัก ซึ่งค่าความผิดพลาดของบิตข้อมูลจะมีค่ามากในทุกๆ อัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน เมื่อเปรียบเทียบกับช่องสัญญาณแบบ Rician ( $K=10\text{dB}$ ) ซึ่งถูกใช้เป็นตัวแทนการสื่อสารในลักษณะที่เห็นแหล่งกำเนิด และมีองค์ประกอบอื่นๆ ที่เกิดจากการสะท้อน หักเหกรวมเข้าด้วยกันที่จุดสังเกต ถ้าค่า  $K$  มีค่าน้อย ค่าความผิดพลาดของบิตข้อมูลจะเข้าใกล้ในกรณีของช่องสัญญาณแบบ Rayleigh สำหรับช่องสัญญาณแบบ Gaussian เป็นช่องสัญญาณที่มีการจางหายต่ำซึ่งไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ [33]

รูปที่ 5.8 (ข) แสดงลำดับขั้นการคำนวณเพื่อทำนายค่าความผิดพลาดของการสื่อสารข้อมูลผ่านทางการจำลองระบบการสื่อสาร ขั้นตอนที่ 1 เป็นการกำเนิดข้อมูลที่มีลักษณะลอจิก 0 และ 1 (Binary) ที่ใช้ 2 บิตแทน 1 สัญลักษณ์ กำเนิดจำนวนบิตเท่ากับ 100,000 บิต ผ่านการมอดูเลตที่แบบ-2 FSK ผ่านช่องสัญญาณแบบ Rician ที่มีค่า  $K$  ต่างกันซึ่งได้จากการทดสอบทางสถิติ จากนั้นทำการดีมอดูเลต และนำมาคำนวณค่าความผิดพลาดของบิตข้อมูลกับข้อมูลต้นแบบ โดยที่ทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน ( $E_b/N_0$ ) จาก 1 dB ไปจนถึง 20 dB

## 4.2 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นตามเวลาและการจำลองอัตรามิติผิดพลาด

### 4.2.1 ผลการทดสอบในกรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนดที่ความถี่ 2.4 GHz

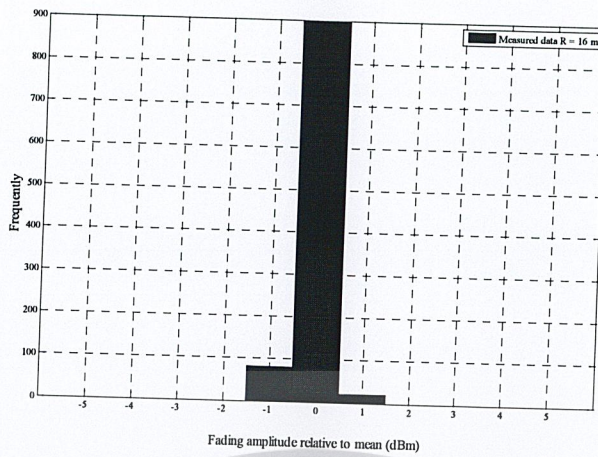


รูปที่ 5.9 ระดับของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้ที่ระยะทางต่างๆ เป็นฟังก์ชันของจำนวนการสุ่มสัญญาณที่ความถี่ 2.45 GHz

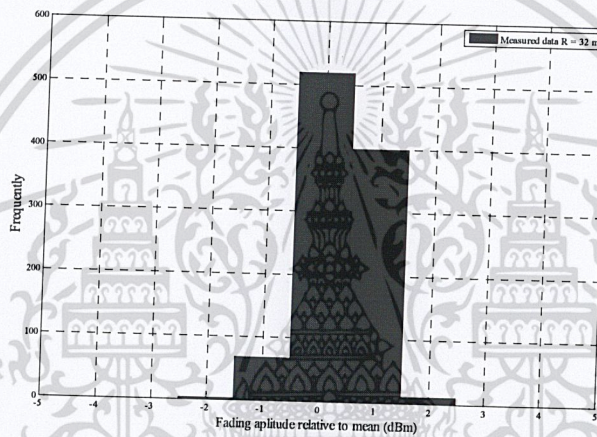
ในรูปที่ 5.9 แสดงถึงระดับของสัญญาณที่เปลี่ยนไปตามเวลาที่รับได้จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ โดยที่ระดับของสัญญาณรบกวนของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณอยู่ที่ -115 dBm

ที่ความถี่ 2.4 GHz พบว่าเมื่อเครื่องวิเคราะห์สัญญาณห่างจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ 8 m จะมีระดับสัญญาณเฉลี่ยเท่ากับ -52 dBm ระดับของสัญญาณที่รับได้ในระยะตั้งแต่ 32 m และ 48 m มีระดับของสัญญาณใกล้เคียงกัน และพบว่าที่ระยะไกลขึ้นจะมีการแกว่งของสัญญาณมากขึ้นที่ดังที่ระยะ 64 m เนื่องจากสัญญาณที่มาถึงเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเป็นองค์ประกอบสัญญาณที่มาจากหลายเส้นทาง ซึ่งเกิดจากการสะท้อนจากสภาพแวดล้อม เช่น ต้นไม้ พื้นดิน โดยที่องค์ประกอบของสัญญาณหลักมีค่าน้อยลงเนื่องจากการกีดขวางจากต้นไม้

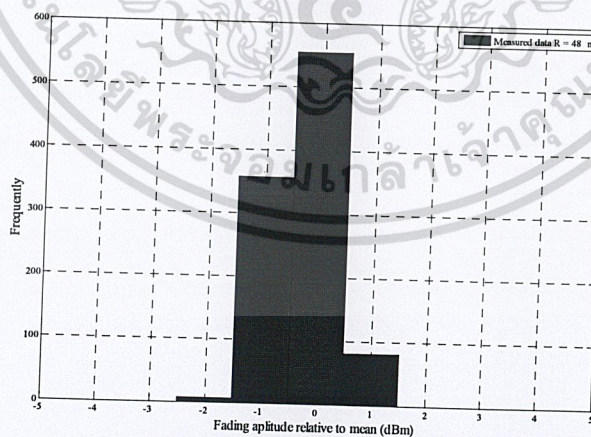
จากการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณที่เปลี่ยนไปตามเวลา นำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยการนำมาเขียนกราฟความหนาแน่นของการกระจายตัวทางสถิติ (Histogram plot) และทำการเขียนกราฟเส้น (Histogram fit curve) จากนั้นนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับรูปแบบการกระจายตัวทางสถิติที่สื่อถึงลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นนั้นๆ



(ก) ระยะทดสอบ 16 เมตร

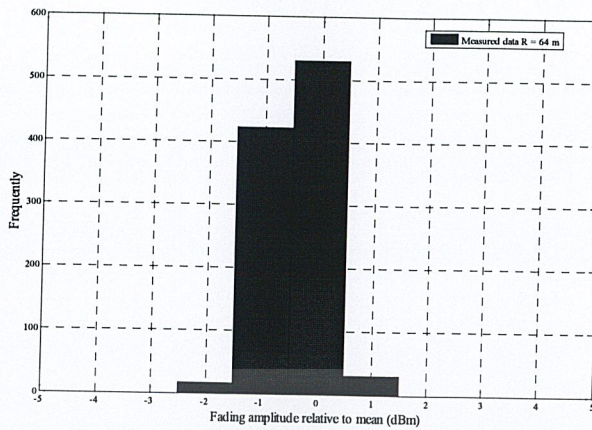


(ข) ระยะทดสอบ 32 เมตร



(ค) ระยะทดสอบ 48 เมตร

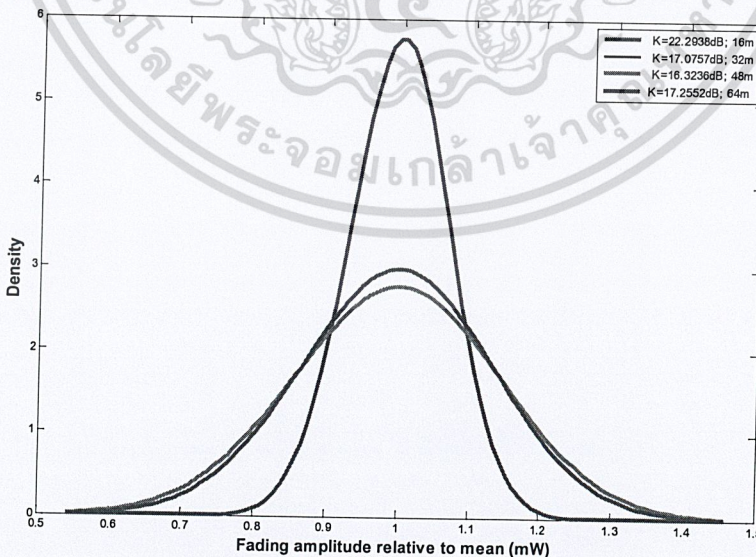
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) ระยะทดสอบ 64 เมตร

รูปที่ 5.10 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณที่ระยะห่างระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีค่าเท่ากับ 16 เมตร 32 เมตร 48 เมตร และ 64 เมตร ที่ความถี่ 2.4 GHz

จากรูปที่ 5.10 แสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้ที่ตำแหน่งต่างๆ พบว่าที่ระยะห่างระหว่างเครื่องวิเคราะห์สัญญาณกับเครื่องกำเนิดสัญญาณมีค่าเท่ากับ 16 m จะมีค่าการเบี่ยงเบนที่ค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับที่ระยะ 32 m 48 m และ 64 m นอกจากนี้ยังพบอีกว่า เมื่อเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีระยะห่างจากเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ไกลมากขึ้น จะส่งผลให้เกิดการเบี่ยงเบนของสัญญาณมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 5.11 ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ Rician (Probability Density Function; PDF) ที่ความถี่ 2.4 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

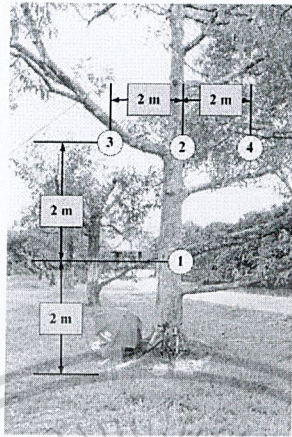
จากรูปที่ 5.11 แสดงกราฟ PDF (Probability Density Function) เมื่อวิเคราะห์ความหนาแน่นของความเป็นของสัญญาณที่จุดต่างๆ พบว่า เมื่อเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีระยะห่างจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเท่ากับ 16 เมตร จะมีการกระจายตัวของสัญญาณน้อย ซึ่งจากสมการที่ (5.3) จะทำให้ได้ค่า K ที่มีค่าค่อนข้างสูง (คือมีค่าเท่ากับ 22.2938 dB) เมื่อเปรียบเทียบกับที่ระยะ 32 เมตร 48 เมตร และ 64 เมตร ทั้งนี้ในสภาวะการทดสอบจริง เครื่องวิเคราะห์สัญญาณจะถูกค้นพบเร็วขึ้นมากที่ระยะทาง 32 เมตร 48 เมตร และ 64 เมตร และเครื่องกำเนิดสัญญาณมีระดับกำลังงานส่งที่ต่ำทำให้เกิดการกระจายตัวทางสถิติ

ตารางที่ 5.1 ค่าความแปรปรวนของสัญญาณและรูปแบบความหนาแน่นทางสถิติที่เหมาะสม กรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนดที่ความถี่ 2.4 GHz

Location	Average received power (dBm)	Variance ( $\sigma^2$ ) (PDF)
		Received power (dBm)
Rician		
R = 16 เมตร	-52.062	0.00294839 (K=22.2938)
R = 32 เมตร	-59.654	0.00980383 (K=17.0757)
R = 48 เมตร	-61.291	0.01165750 (K=16.3236)
R = 64 เมตร	-71.427	0.00940679 (K=17.2552)

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าความแปรปรวนของสัญญาณเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ และนำการกระจายตัวแบบ Rician มาเทียบเคียง เนื่องจากการกระจายตัวชนิดนี้ได้รับความนิยมในการนำมาทำนายหรือทำการคำนวณในด้านการสื่อสารเป็นอย่างมาก เพราะให้ความถูกต้องและเหมาะสมกับการสื่อสารในกรณีที่มีหลายเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นที่มาถึงยังเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมากกว่าการกระจายตัวในแบบอื่นๆ

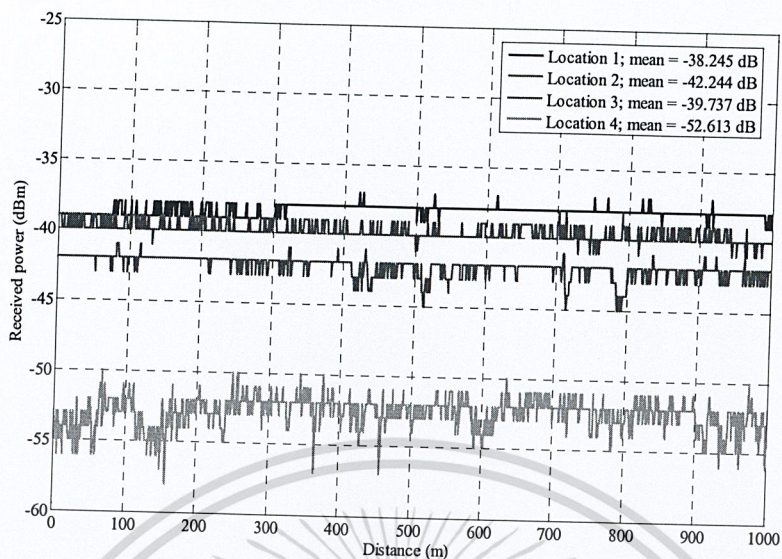
#### 4.2.2 ผลการทดสอบในกรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์มายังโหนดที่ความถี่ 2.4 GHz



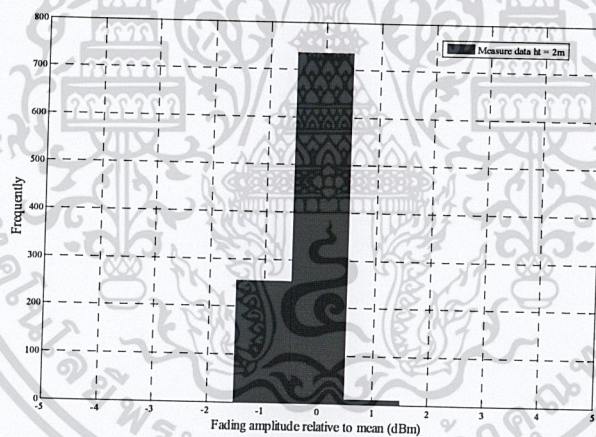
รูปที่ 5.12 ตำแหน่งของเครื่องส่งบนต้นทุเรียน

ในส่วนนี้จะทดสอบการแพร่กระจายคลื่นทางด้านสถิติเช่นเดียวกัน แต่ในหัวข้อนี้จะเป็นการจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์ที่ติดบนผลทุเรียนที่ตำแหน่งต่างๆ มายังโหนดที่ติดตั้งอยู่บริเวณโคนของต้นทุเรียน [34] ดังที่แสดงในรูปที่ 5.12 โดยที่ในการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นนั้นจะจำลองตำแหน่งของเซ็นเซอร์ที่จะส่งสัญญาณมายังโหนดทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งที่ 1 มีความสูงเท่ากับ 2 เมตร และตำแหน่งที่ 3 2 และ 4 มีความสูงเท่ากับ 4 เมตร ระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่ 1 และ 2 ห่างกันเท่ากับ 2 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.12 ซึ่งในแต่ละตำแหน่งจะบันทึกค่าทางสถิติจำนวน 1,000 ค่า โดยที่แต่ละค่าจะบันทึกในทุกๆ 2 วินาที หลังจากนั้นจะนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อไป

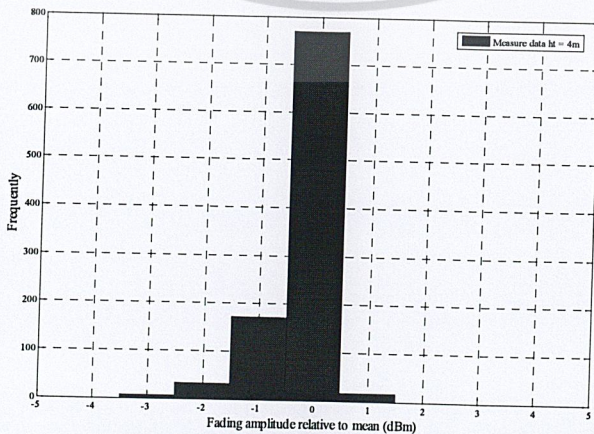
จากการทดสอบในกรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างเซ็นเซอร์ที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.12 มายังโหนดที่อยู่บริเวณโคนต้นทุเรียน พบว่า ระดับของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้มีค่าเฉลี่ยที่ตำแหน่งที่ 1 2 และ 3 คือ มีค่าประมาณ -40 dBm แต่จะพบว่า ตำแหน่งที่ 4 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีระยะห่างกันมากที่สุด จะมีระดับของสัญญาณเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ มีค่าเท่ากับ 52.613- dBm ดังแสดงในรูปที่ 5.13 และเมื่อพิจารณาสัญญาณตำแหน่งที่ 4 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีระยะทางที่ไกลที่สุดและอาจเป็นจุดบอดของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่งและรับ พบว่ามีการแกว่งของระดับสัญญาณที่สูงกว่าที่ตำแหน่งอื่นๆ



รูปที่ 5.13 ระดับของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้ที่ตำแหน่งต่างๆเป็นฟังก์ชันของจำนวนการสุ่มสัญญาณ

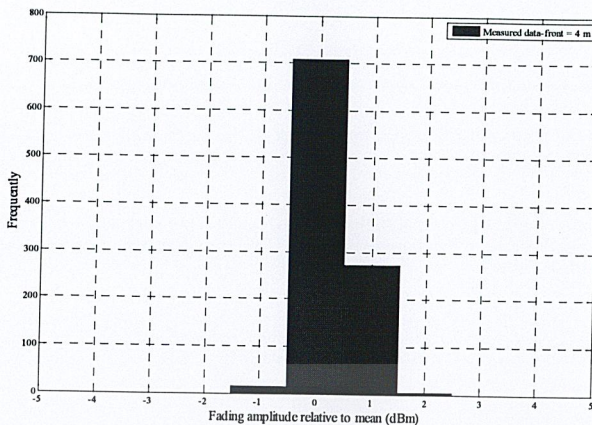


(ก) ตำแหน่งที่ 1

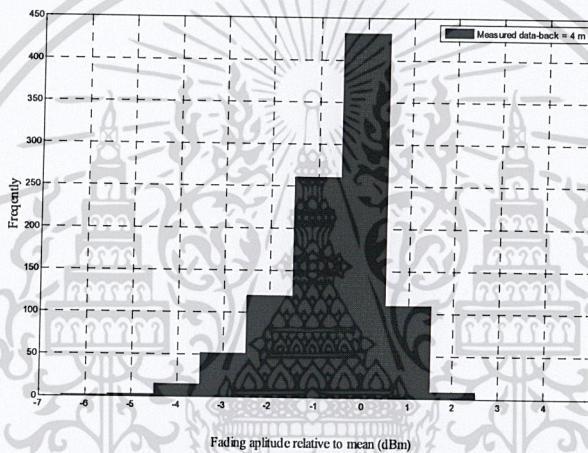


(ข) ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



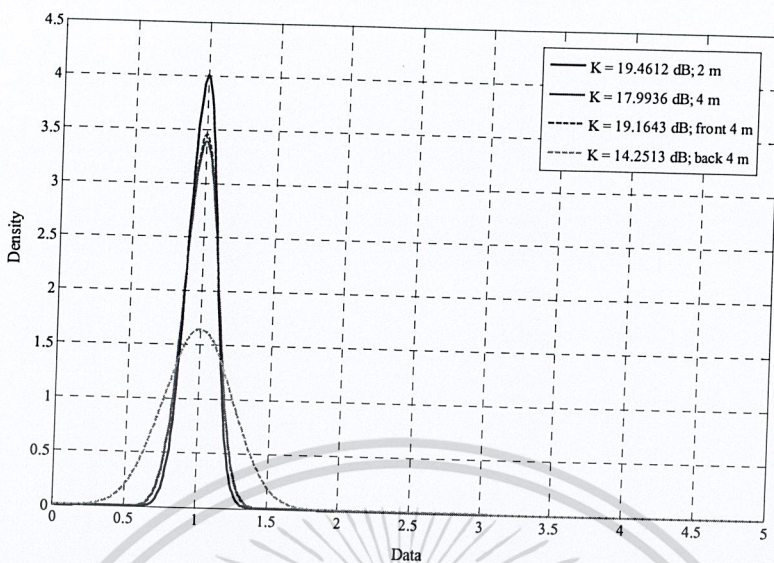
(ค) ตำแหน่งที่ 3



(ง) ตำแหน่งที่ 4

รูปที่ 5.14 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณเมื่อเครื่องกำเนิดสัญญาณอยู่ที่ตำแหน่งที่ 4

จากการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณที่เปลี่ยนไปตามเวลา นำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยในรูปที่ 5.14 แสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้ที่ตำแหน่งต่างๆ นั่นคือ เครื่องกำเนิดสัญญาณอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ พบว่า ที่ตำแหน่งที่ 1 2 และ 3 จะมีการกระจายตัวของสัญญาณต่ำกว่าที่ตำแหน่งที่ 4



รูปที่ 5.15 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่เป็นฟังก์ชันของแอมพลิจูดของสัญญาณ

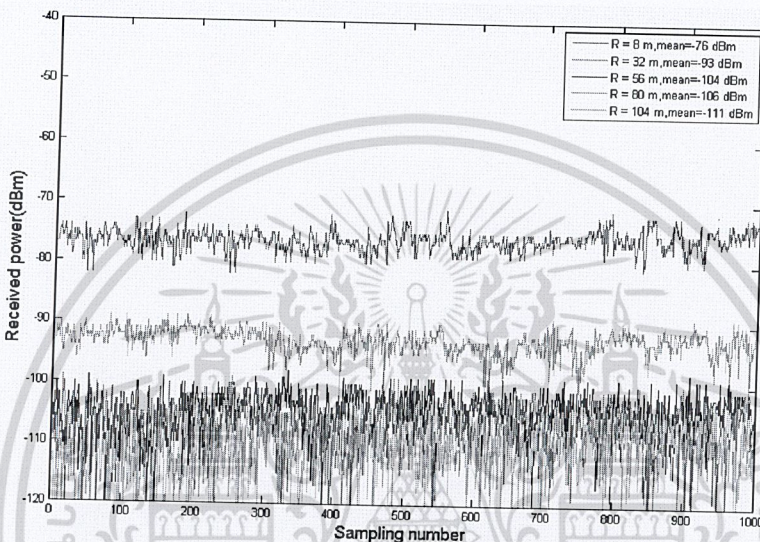
จากรูปที่ 5.15 แสดงกราฟ PDF เมื่อทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของสัญญาณที่จุดต่างๆ พบว่า เมื่อเครื่องกำเนิดสัญญาณอยู่ตรงตำแหน่งที่ 1 จะมีการกระจายตัวของสัญญาณน้อย ซึ่งจากสมการที่ 5.5 จะทำให้ได้ค่า K ที่มีค่าค่อนข้างสูงมาก (คือ มีค่าเท่ากับ 19.4612 dB) เมื่อเปรียบเทียบกับที่ตำแหน่งอื่นๆ และผลในรูปที่ 5.15 จะเห็นว่า กราฟของข้อมูลจากการทดสอบมีความสอดคล้องกันมาก สาเหตุเนื่องจากระยะทางที่ใกล้และไม่มีสิ่งกีดขวาง แต่เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง 2 3 และ 4 พบว่า ในตำแหน่งที่ 4 จะมีการกระจายตัวของสัญญาณมากที่สุด สาเหตุเนื่องมาจากตำแหน่งที่ 4 มีการกีดขวางของกิ่งไม้ ส่งผลให้ระดับกำลังงานส่งต่ำลงและเกิดการสะท้อนในหลายทิศทาง ทำให้เกิดการกระจายตัวทางสถิติมาก

ตารางที่ 5.2 ค่าความแปรปรวนของสัญญาณและรูปแบบความหนาแน่นทางสถิติที่เหมาะสม กรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างเซ็นเซอร์มายังโหนดที่ความถี่ 2.4 GHz

Location	Average received power (dBm)	PDF Variance ( $\sigma^2$ )
		Received power (dBm)
		Rician
1	-38.245	0.0056604 (K=19.4612 dB)
2	-42.244	0.00793598 (K=17.9936 dB)
3	-39.737	0.00606085 (K=19.1643 dB)
4	-52.613	0.01878610 (K=14.2513 dB)

ตารางที่ 5. 2 แสดงค่าความแปรปรวนของสัญญาณเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ และนำการกระจายตัวแบบ Rician มาเทียบเคียง เนื่องจากการกระจายตัวชนิดนี้ได้รับความนิยมในการนำมาทำนายหรือทำการคำนวณในด้านการสื่อสารเป็นอย่างมาก เพราะให้ความถูกต้องและเหมาะสมกับการสื่อสารในกรณีที่มีหลายเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นที่มาถึงยังเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมากกว่าการกระจายตัวในแบบอื่นๆ

### 4.2.3 ผลการทดสอบในกรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนดที่ความถี่ 5.8 GHz



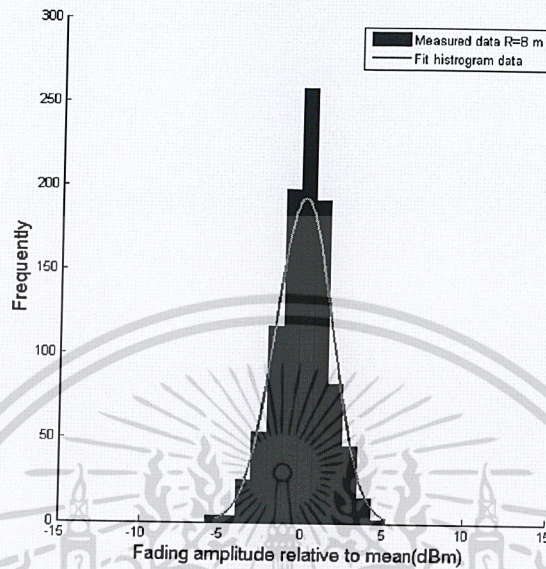
รูปที่ 5. 16 ระดับของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้ที่ระยะทางต่างๆ เป็นฟังก์ชันของจำนวนการสุ่มสัญญาณที่ความถี่ 5.8 GHz

ในรูปที่ 5.16 แสดงถึงระดับของสัญญาณที่เปลี่ยนไปตามเวลาที่รับได้จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ โดยที่ระดับของสัญญาณรบกวนของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณอยู่ที่ -115 dBm

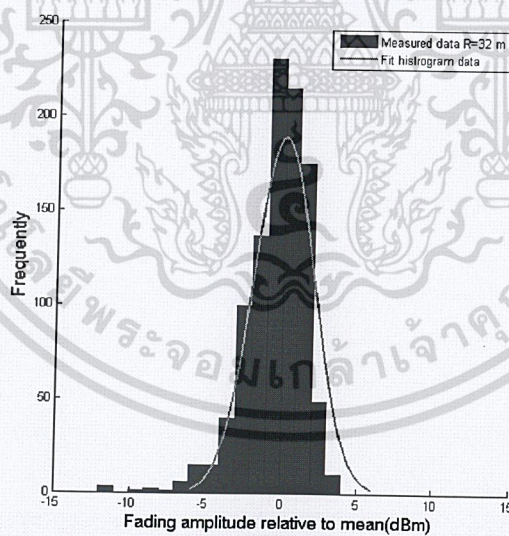
ที่ความถี่ 5.8 GHz พบว่าเมื่อเครื่องวิเคราะห์สัญญาณห่างจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเท่ากับ 8 m จะมีระดับสัญญาณเฉลี่ยเท่ากับ -76 dBm ระดับของสัญญาณที่รับได้ในระยะตั้งแต่ 56 m เป็นต้นไป หรือในตำแหน่งที่ 3 4 และ 5 มีระดับของสัญญาณใกล้เคียงกับระดับของสัญญาณรบกวนของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ สาเหตุเกิดจากการสูญเสียตามระยะทางที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงการแกว่งของระดับสัญญาณในตำแหน่งที่ 3 4 และ 5 พบว่า ที่ระยะไกลขึ้นจะมีการแกว่งของสัญญาณมากขึ้น เนื่องจากสัญญาณที่มาถึงเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเป็นองค์ประกอบสัญญาณที่มาจากหลายเส้นทาง ซึ่งเกิดจากการสะท้อนจากสภาพแวดล้อม เช่น ต้นไม้ พื้นดิน โดยที่องค์ประกอบของสัญญาณหลักมีค่าน้อยลงเนื่องจากการกีดขวางจากต้นไม้

จากการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณที่เปลี่ยนไปตามเวลา นำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยการนำมาเขียนกราฟความหนาแน่นของการกระจายตัวทางสถิติ (Histogram plot) และทำการเขียนกราฟเส้น (Histogram เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

fit curve) จากนั้นนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับรูปแบบการกระจายตัวทางสถิติที่สื่อถึงลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นนั้นๆ

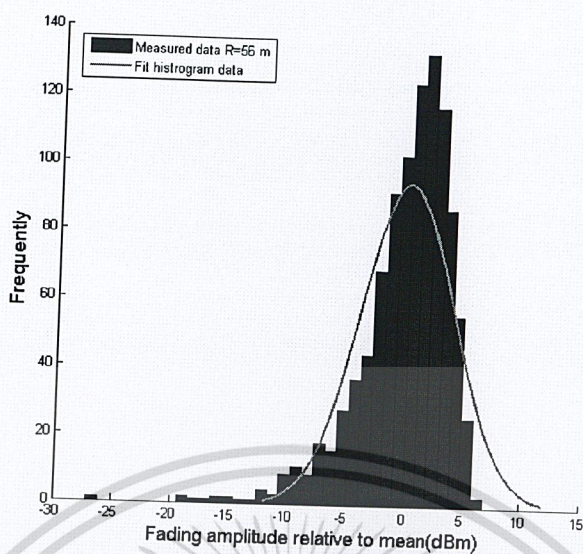


(ก) ระยะทดสอบ 8 เมตร

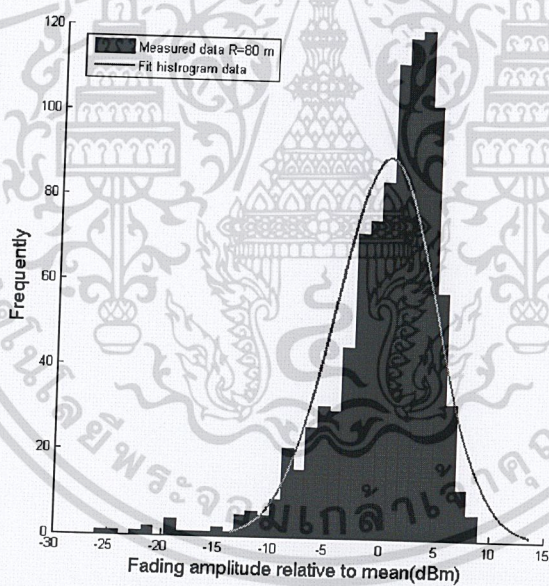


(ข) ระยะทดสอบ 32 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

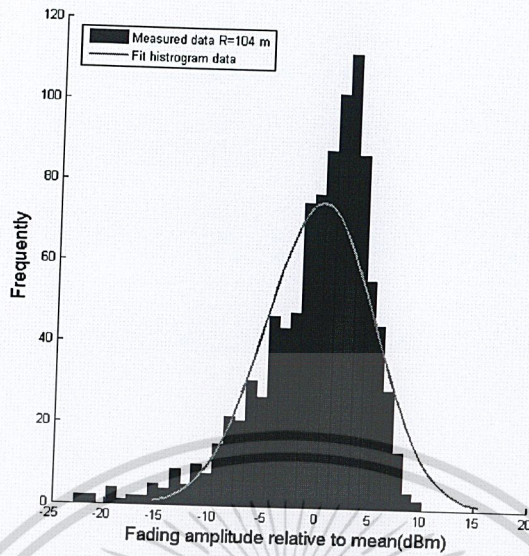


(ค) ระยะทดสอบ 56 เมตร



(ง) ระยะทดสอบ 80 เมตร

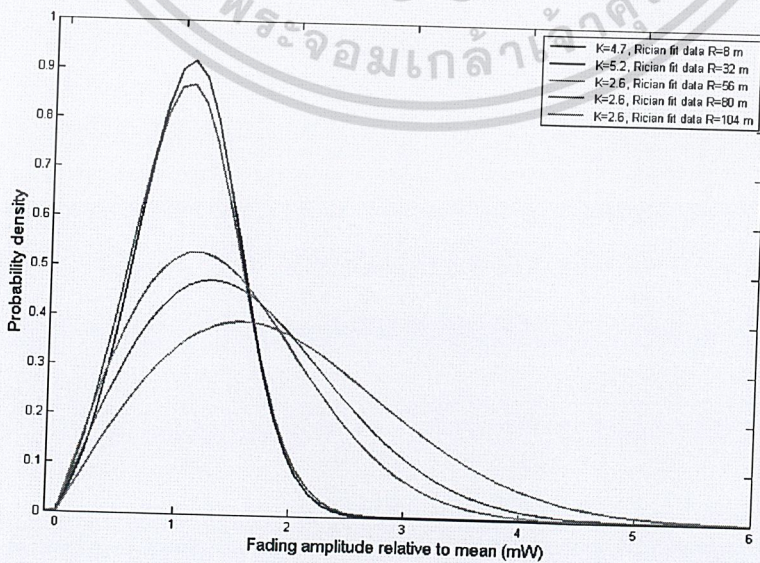
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) ระยะทดสอบ 104 เมตร

รูปที่ 5.17 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณที่ระยะห่างระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีค่าเท่ากับ 8 เมตร 32 เมตร 56 เมตร 80 เมตร และ 104 เมตร ที่ความถี่ 5.8 GHz

จากรูปที่ 5.17 แสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้ที่ตำแหน่งต่างๆ พบว่าที่ระยะห่างระหว่างเครื่องวิเคราะห์สัญญาณกับเครื่องกำเนิดสัญญาณมีค่าเท่ากับ 8 และ 32 m จะมีความการเบี่ยงเบนที่ค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับที่ระยะ 56 80 และ 104 m นอกจากนี้ยังพบอีกว่า เมื่อเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีระยะห่างจากเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ไกลมากขึ้น จะส่งผลให้เกิดการเบี่ยงเบนของสัญญาณมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 5.18 ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ Rician (Probability Density Function; PDF) ที่ความถี่ 5.8 GHz  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

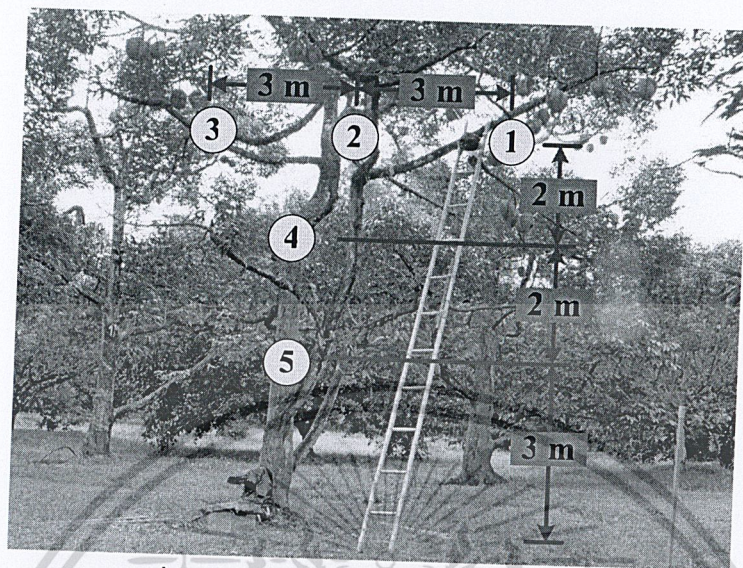
ตารางที่ 5.3 ค่าความแปรปรวนของสัญญาณและรูปแบบความหนาแน่นทางสถิติที่เหมาะสม กรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนดที่ความถี่ 5.8 GHz

Location	Average received power (dBm)	Variance ( $\sigma^2$ ) (PDF)	
		Received power (mW)	
		Normal	Rician
R=8 m	-76	0.195002	0.197015 (K=4.7)
R=32 m	-93	0.180233	0.1802 (K=5.2)
R=56 m	-104	0.811652	0.563242 (K=2.6)
R=80 m	-106	1.18127	0.705462 (K=2.6)
R=104 m	-111	2.14995	1.03557 (K=2.6)

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าความแปรปรวนของสัญญาณในกรณีที่ทำการ fit curve เทียบกับการกระจายตัวแบบ Normal และการกระจายตัวแบบ Rician ในที่นี้จะทำการ fit curve เทียบกับการกระจายตัวแบบ Rician เป็นหลัก เนื่องจากการกระจายตัวชนิดนี้ได้รับความนิยมในการนำมาทำนายหรือคำนวณในด้านการสื่อสารเป็นอย่างมาก เพราะให้ความถูกต้องและเหมาะสมกับการสื่อสารในกรณีที่มียหลายเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นที่มาถึงยังเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมากกว่าการกระจายตัวในแบบอื่นๆ

จากรูปที่ 5.18 แสดงกราฟ PDF (Probability Density Function) เมื่อทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของสัญญาณที่จุดต่างๆ พบว่า เมื่อระยะทดสอบมีเท่ากับ 8 และ 32 m จะมีการกระจายตัวของสัญญาณน้อย ซึ่งจากสมการที่ 5.5 จะทำให้ได้ค่า K ที่มีค่าค่อนข้างสูง (คือมีค่าเท่ากับ 4.7 dB และ 5.6 dB ตามลำดับ) เมื่อเปรียบเทียบกับที่ระยะ 56 80 และ 104 m

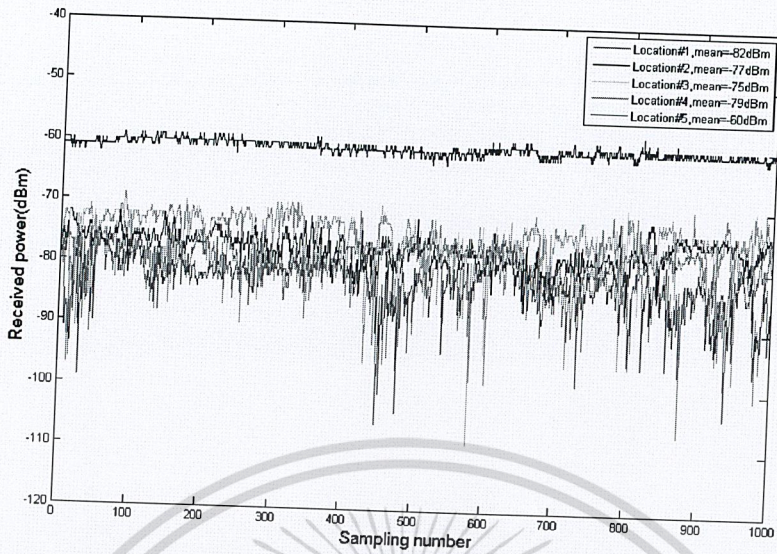
#### 4.2.4 ผลการทดสอบในกรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์มายังโหนดที่ความถี่ 5.8 GHz



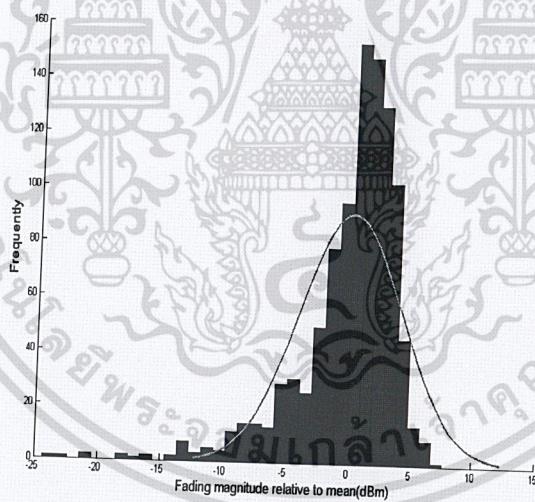
รูปที่ 5.19 ตำแหน่งของเครื่องส่งบนต้นทุเรียน

ในส่วนนี้จะทดสอบการแพร่กระจายคลื่นทางด้านสถิติเช่นเดียวกัน แต่ในหัวข้อนี้จะเป็นการจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์ที่ติดบนผลทุเรียนที่ตำแหน่งต่างๆ มายังโหนดที่ติดตั้งอยู่บริเวณโคนของต้นทุเรียน ดังที่แสดงในรูปที่ 5.19 โดยที่ในการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นนั้นจะจำลองตำแหน่งของเซ็นเซอร์ที่จะส่งสัญญาณมายังโหนดทั้งหมด 5 ตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งที่ 1 2 และ 3 มีความสูงเท่ากับ 7 m และระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่ 1 และ 2 กับตำแหน่งที่ 2 และ 3 ห่างกันเท่ากับ 3 m ส่วนตำแหน่งที่ 4 และ 5 มีความสูงเท่ากับ 5 และ 3 m ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งในแต่ละตำแหน่งจะทำการบันทึกค่าทางสถิติจำนวน 1,000 ค่า โดยที่แต่ละค่าจะทำการบันทึกในทุกๆ 2 วินาที หลังจากนั้นจะนำค่าที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ต่อไป

จากการทดสอบในกรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างเซ็นเซอร์ที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.19 มายังโหนดที่อยู่บริเวณโคนต้นทุเรียน พบว่า ระดับของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้มีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน คือ มีค่าประมาณ -75 dBm แต่จะพบว่า ตำแหน่งที่ 5 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีระยะห่างกันน้อยที่สุด จะมีระดับของสัญญาณเฉลี่ยสูงที่สุด คือ มีค่าเท่ากับ -60 dBm ดังแสดงในรูปที่ 5.20 และเมื่อพิจารณาสัญญาณตำแหน่งที่ 1 และ 3 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีระยะทางที่ไกลที่สุด พบว่า มีการแกว่งของระดับสัญญาณที่ใกล้เคียงกันและมีค่าการแกว่งที่สูงกว่าที่ตำแหน่งอื่นๆ

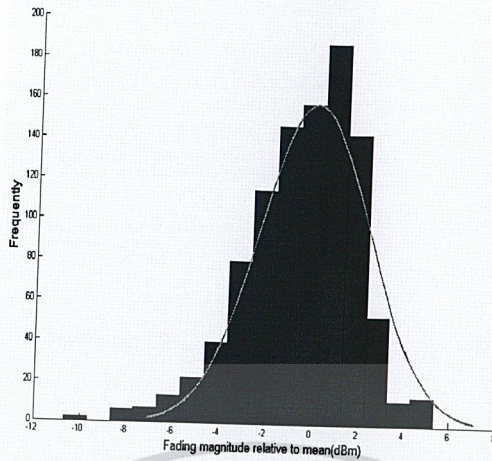


รูปที่ 5.20 ระดับของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้ที่ตำแหน่งต่างๆ เป็นฟังก์ชันของจำนวนการสุ่มสัญญาณ

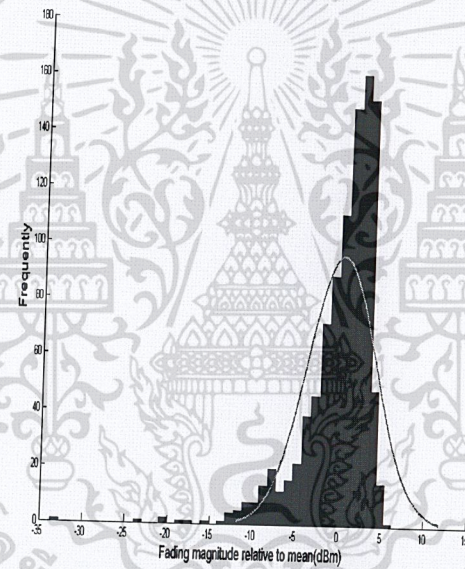


(ก) ตำแหน่งที่ 1

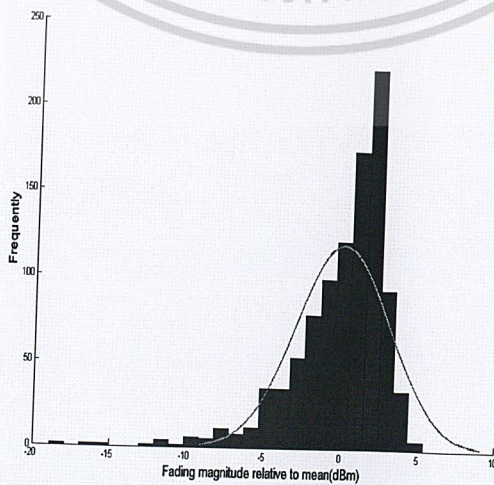
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



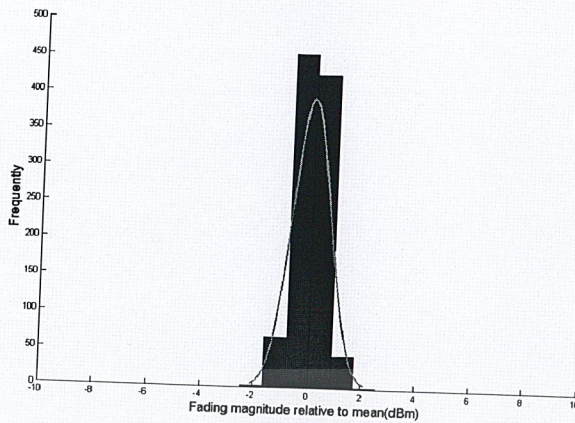
(ข) ตำแหน่งที่ 2



(ค) ตำแหน่งที่ 3



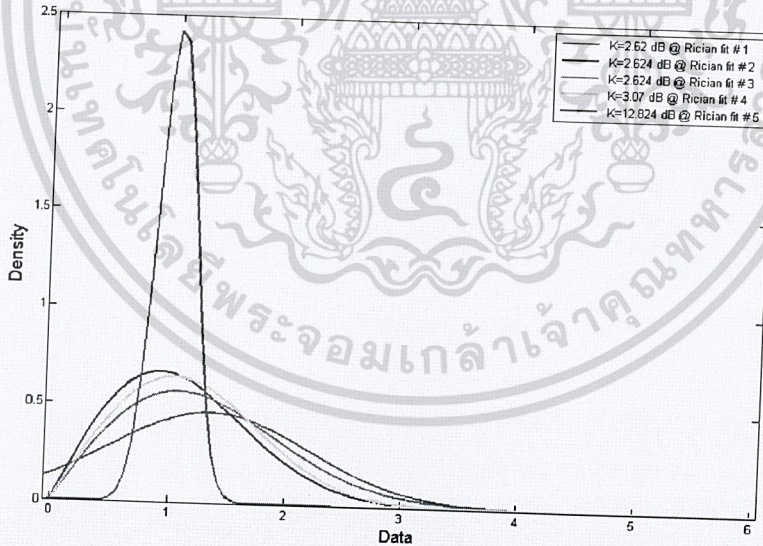
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ (ง) ตำแหน่งที่ 4 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) ตำแหน่งที่ 5

รูปที่ 5.21 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณเมื่อเครื่องกำเนิดสัญญาณ

ในรูปที่ 5.21 แสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้ที่ตำแหน่งต่างๆ จากเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ติดตั้งในตำแหน่งที่ 1 2 3 4 และ 5 ตามลำดับ พบว่า ที่ตำแหน่งที่ 1 3 และ 4 จะมีการกระจายตัวของสัญญาณมากกว่าที่ตำแหน่งที่ 2 และ 5 โดยที่ตำแหน่งที่ 1 และ 3 นั้น ระยะห่างระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีระยะทางที่ไกลกว่าตำแหน่งอื่นๆ



รูปที่ 5.22 ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ Rician (Probability Density Function; PDF) ที่ความถี่ 5.8 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ค่าความแปรปรวนของสัญญาณและรูปแบบความหนาแน่นทางสถิติที่เหมาะสม กรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างเซ็นเซอร์มายังโหนดที่ความถี่ 5.8 GHz

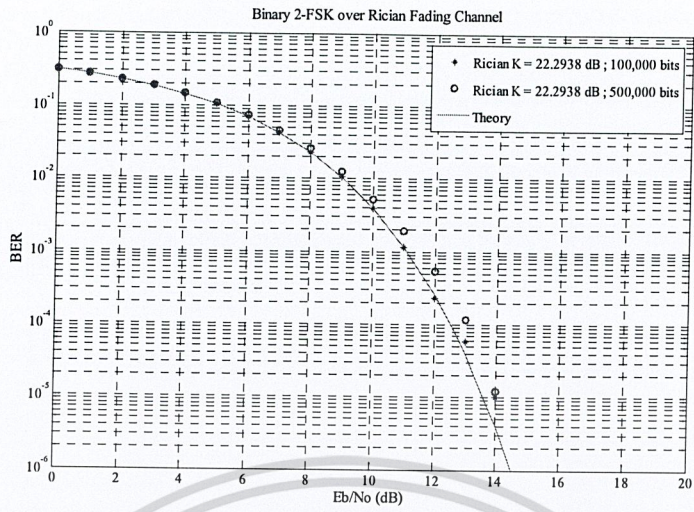
Location	Average received power (dBm)	PDF Variance ( $\sigma^2$ )	
		Received power (dBm)	Received power (mW)
		Normal (Fig.15-19)	Rician
#1	-82	0.73892	0.544453(K=2.62 dB)
#2	-77	0.352652	0.352652(K=2.624 dB)
#3	-75	0.487257	0.487257(K=2.624 dB)
#4	-79	0.026784	0.356786(K=3.07 dB)
#5	-60	0.356706	0.0267847(K=12.824 dB)

จากรูปที่ 5.22 แสดงกราฟ PDF (Probability Density Function) เมื่อวิเคราะห์ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของสัญญาณที่จุดต่างๆ พบว่า เมื่อเครื่องกำเนิดสัญญาณอยู่ตรงตำแหน่งที่ 5 จะมีการกระจายตัวของสัญญาณน้อย ซึ่งจากสมการที่ (5.3) จะทำให้ได้ค่า K ที่มีค่าค่อนข้างสูงมาก) คือ มีค่าเท่ากับ 12.824 dB (เมื่อเปรียบเทียบกับที่ตำแหน่งอื่นๆ

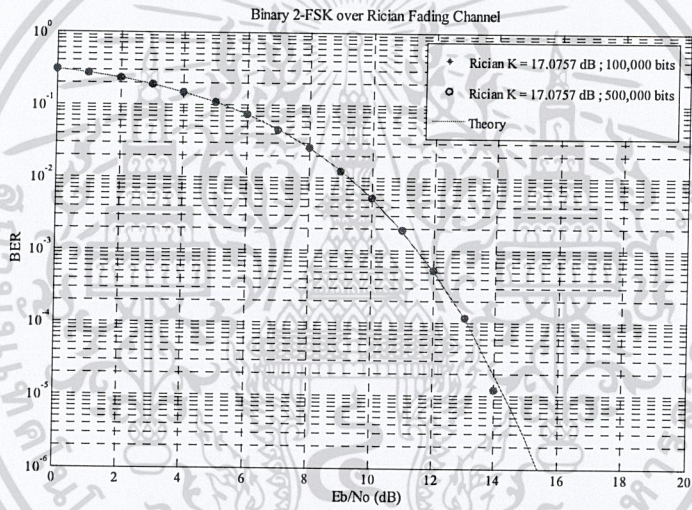
#### 4.3 ผลการจำลองค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล

จากช่องสัญญาณแบบ Rician ค่า K ในการทดสอบทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 นำมากำหนดค่าช่องสัญญาณแบบ Rician และจำลองค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลเพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการออกแบบติดตั้งระบบตัวตรวจจับแบบไร้สาย

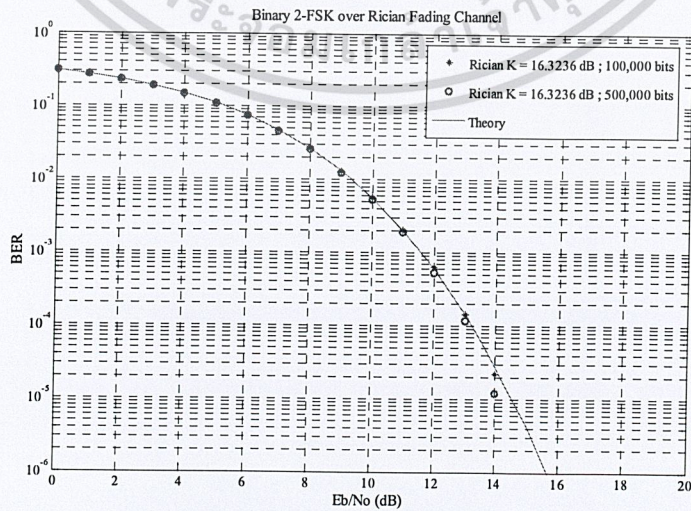
##### 4.3.1 ผลการจำลองค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลของการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนดที่ความถี่ 2.4 GHz



ระยะทาง 16 เมตร

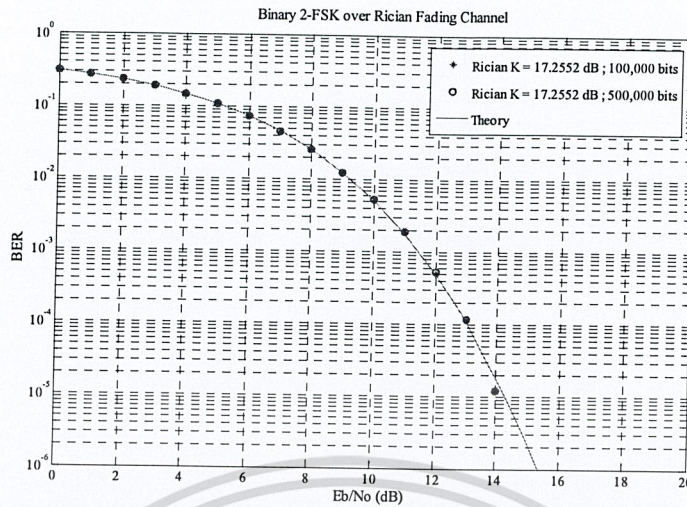


(จ) ระยะทาง 32 เมตร



(ค) ระยะทาง 48 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



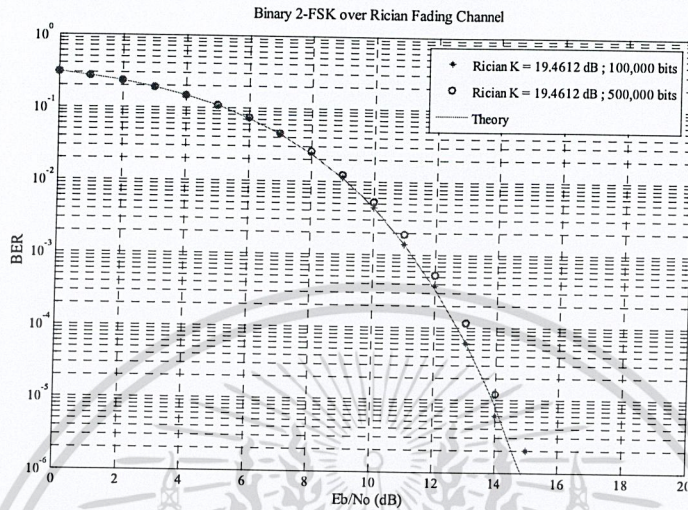
(ง) ระยะทาง 64 เมตร

รูปที่ 5.23 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน (โหนดต่อโหนด)

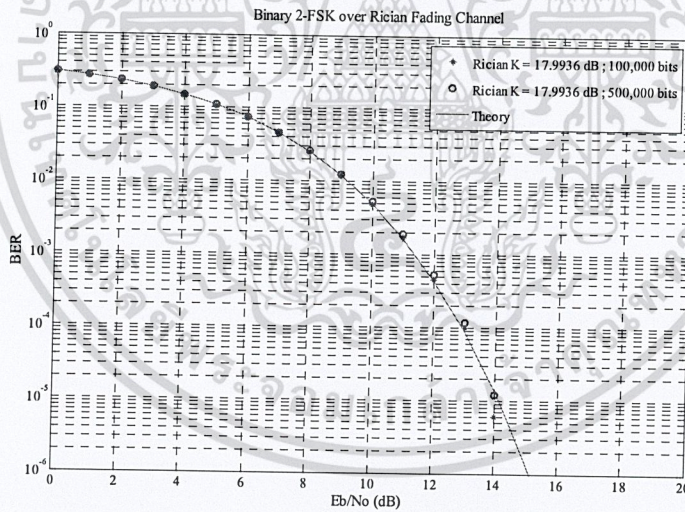
รูปที่ 5.23 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตของข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน ผลที่ได้จากการจำลองพบว่ามีความสอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎีเป็นอย่างดี ซึ่งพบว่าพบว่าที่ตำแหน่งที่ 48 32 และ 64 เมตร ค่า K มีค่าเท่ากับ 17.0757 dB 16.3236 dB และ 17.2552 dB ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าตำแหน่งที่ 1 จะส่งผลต่อค่าความผิดพลาดบิตของข้อมูลที่สูงขึ้น สำหรับในตำแหน่งที่ 16 เมตรนั้น พบว่ามีค่า K สูง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 22.2938 dB ถ้าค่า K มีค่าต่ำจะส่งผลต่อค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลที่สูงขึ้น ในการออกแบบระบบจะต้องกำหนดค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ เพื่อหาค่ากำลังงานที่เหมาะสม

จากรูปที่ 5.23 พบว่าค่าอัตราผิดพลาดบิตข้อมูล ของการทดสอบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด นั้นเมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบเมื่อกำหนดบิตข้อมูล 100,000 บิต และเพิ่มจำนวนบิตเท่ากับ 500,000 บิตนั้นที่ค่าคงที่ K ต่างๆค่าอัตราผิดพลาดบิตข้อมูลของกราฟข้อมูล 100,000 บิต และ 500,000 บิต นั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากและกราฟทั้ง 2 เส้นนั้นก็มีความใกล้เคียงกันกับค่าทางทฤษฎีที่เป็นค่าอัตราผิดพลาดบิตข้อมูลที่มีช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแบบ Rician

### 4.3.2 ผลการจำลองค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลของการแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์มายังโหนดที่ความถี่ 2.4 GHz

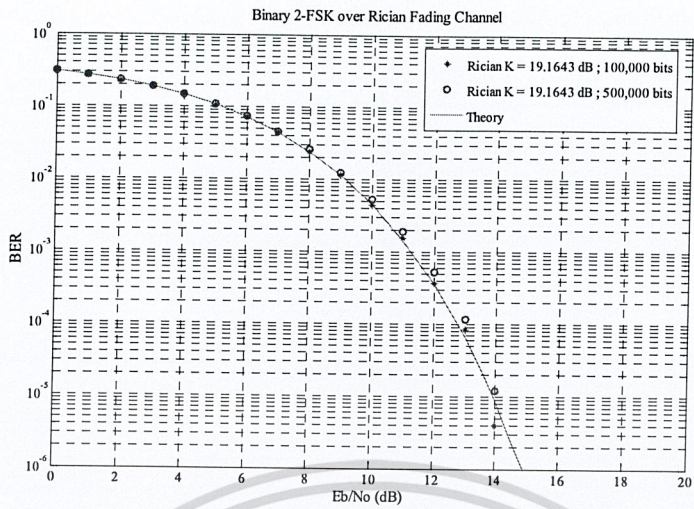


ตำแหน่งที่ 1

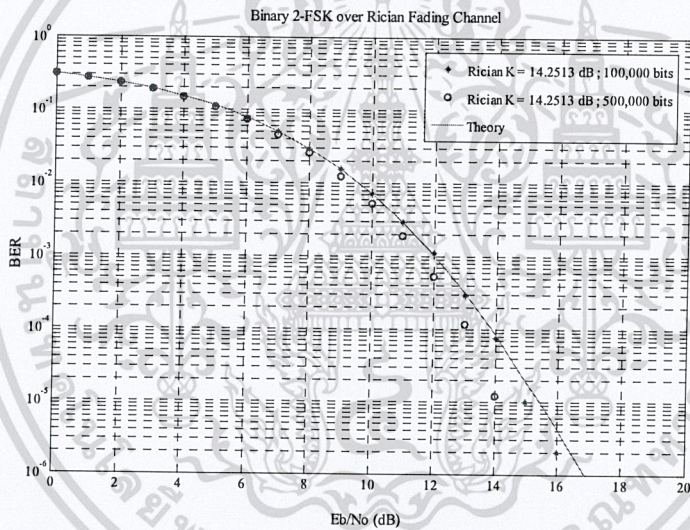


ตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตำแหน่งที่ 3



ตำแหน่งที่ 4

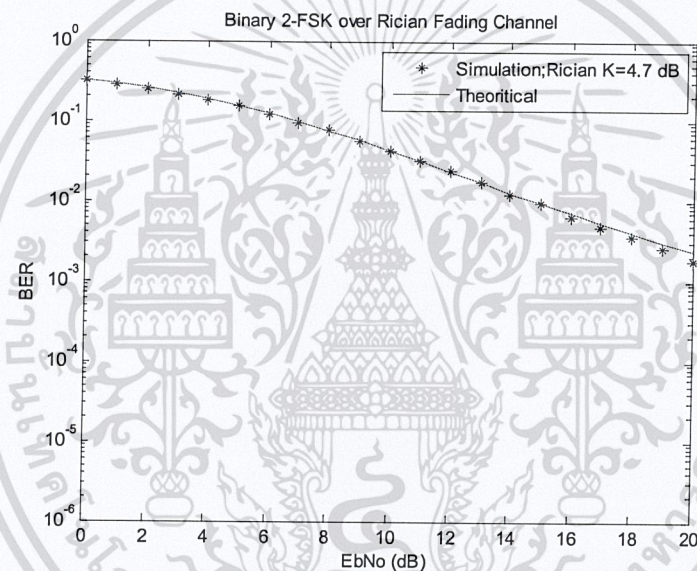
รูปที่ 5.24 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน (เซ็นเซอร์มายังโหนด)

รูปที่ 5.24 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตของข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน ผลที่ได้จากการจำลองพบที่มีความสอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎีเมื่อเพิ่มจำนวนบิตเท่ากับ 500,000 บิต ผ่านการมอดูเลตแบบ 2-FSK ผ่านช่องสัญญาณแบบไรซ์ ที่มีค่า K ต่างกันซึ่งได้จากการทดสอบทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 2 จากนั้นทำการคิมอดูเลต และนำมาคำนวณค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลกับข้อมูลต้นแบบ ในรูปที่ 5.24 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตของข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

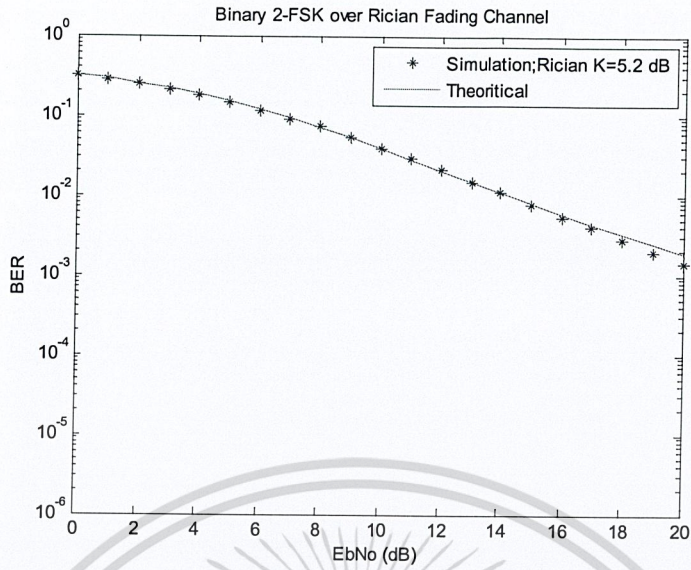
ระดับสัญญาณรบกวนเมื่อกำเนิดบิตข้อมูล 100,000 บิต และเพิ่มจำนวนบิตเท่ากับ 500,000 บิต ในกรณีการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด ผลที่ได้จากการจำลองพบที่มีความสอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎี กรณีในการแพร่กระจายคลื่นระหว่างเซ็นเซอร์มายังโหนด ดังแสดงในรูปที่ 5.24 ผลที่ได้จากการจำลองพบที่มีความสอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งพบว่า ที่ตำแหน่งที่ 2 3 และ 4 เมตรนั้น ค่า  $K$  มีค่าเท่ากับ 17.9936 dB 19.1643 dB และ 14.2513 dB ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าที่ระยะ 16 เมตร จะส่งผลต่อค่าความผิดพลาดบิตของข้อมูลที่สูงขึ้น สำหรับในตำแหน่งที่ 1 พบว่ามีค่า  $K$  สูง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 19.4612 dB

#### 4.3.3 ผลการจำลองค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลของการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนดที่ความถี่ 5.8 GHz

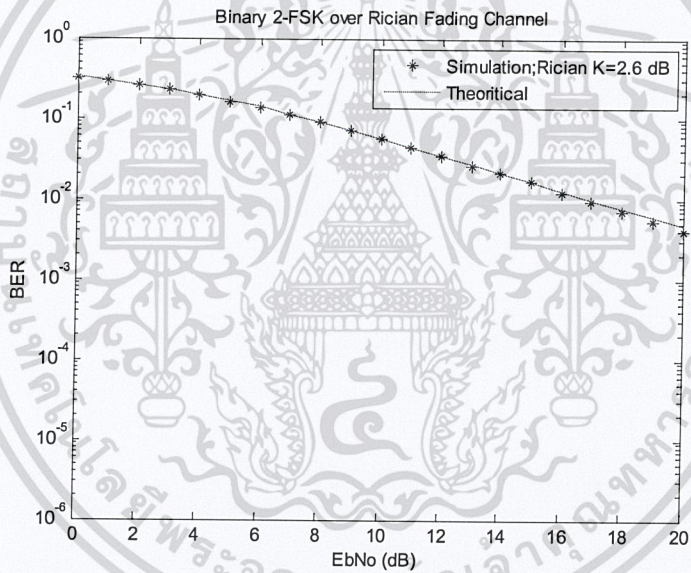


ระยะทาง 8 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ระยะทาง 32 เมตร



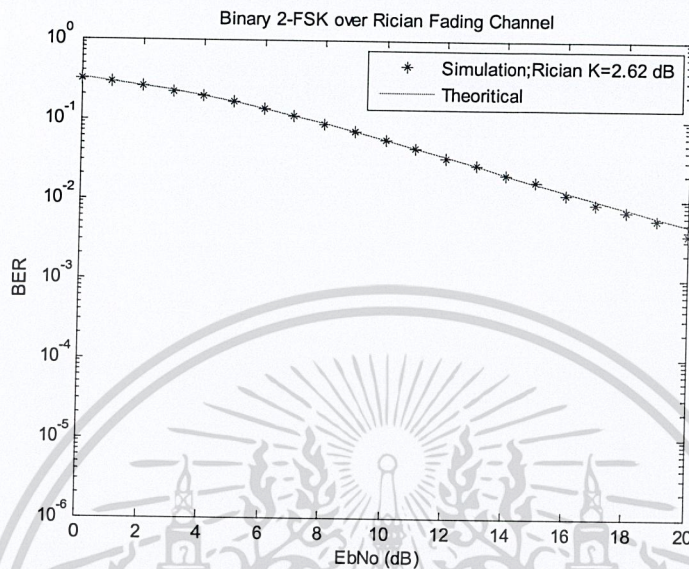
ระยะทาง 56 80 และ 104 เมตร

รูปที่ 5.25 ค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน

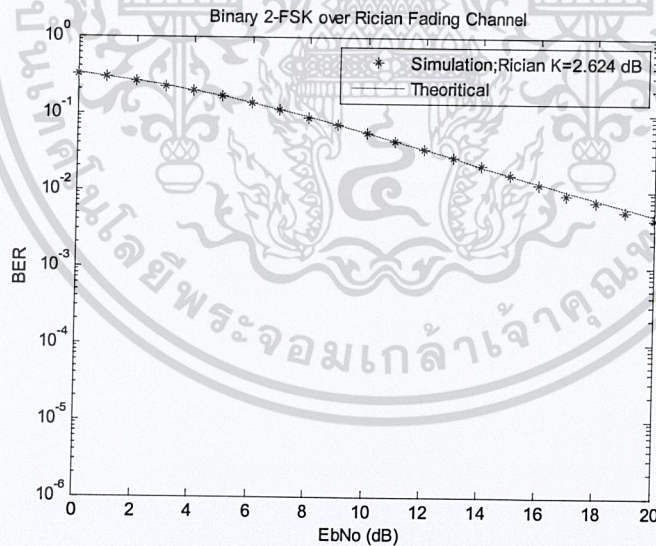
รูปที่ 5.25 แสดงค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน ผลที่ได้จากการจำลองพบที่มีความสอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎีเป็นอย่างดี ซึ่งพบว่าค่า Rician K มีค่าต่ำจะส่งผลต่อค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลที่สูงขึ้น ในการออกแบบระบบจะต้องกำหนดค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลที่ต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ เพื่อหาค่ากำลังงานที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 ผลการจำลองค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลของการแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์มายังโหนดที่ความถี่ 5.8 GHz

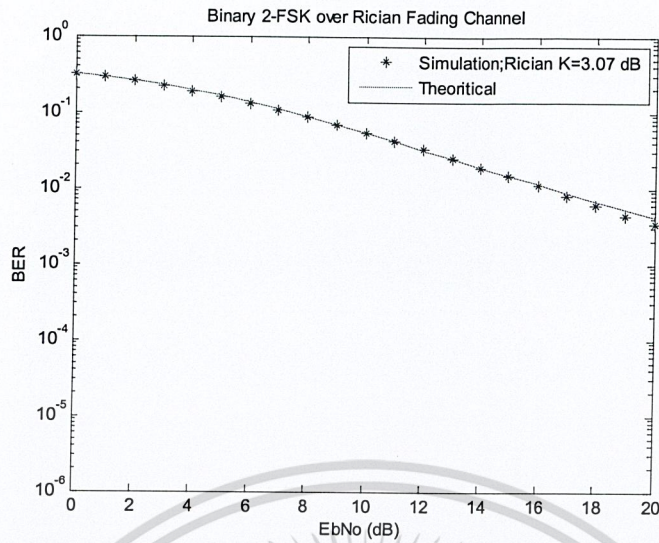


(ก) ตำแหน่งที่ 1

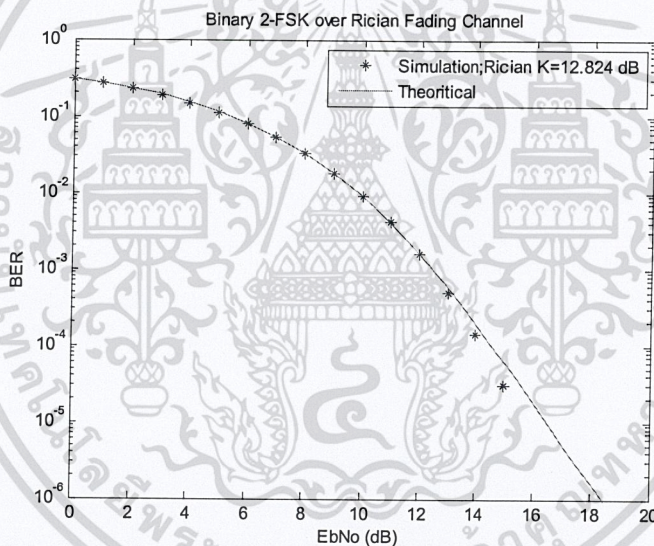


(ข) ตำแหน่งที่ 2 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ตำแหน่งที่ 4



(ง) ตำแหน่งที่ 5

รูปที่ 5.26 ค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน

รูปที่ 5.26 แสดงค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน ผลที่ได้จากการจำลองพบว่ามีผลสอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎีเป็นอย่างดี ซึ่งพบว่าค่า Rician K มีค่าต่ำจะส่งผลต่อค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลที่สูงขึ้น สำหรับในตำแหน่งที่ 5 พบว่ามีค่า Rician K สูง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.824 dB เนื่องจากอยู่ใกล้กับเครื่องส่ง สำหรับการออกแบบระบบจะต้องกำหนดค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลที่ต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ เพื่อหาค่ากำลังงานที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. บทสรุป

### 5.1 การสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น (Path loss)

การศึกษาการสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น ประกอบด้วยผลการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น ทั้งแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการลดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว และแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการลดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ จากผลการทดสอบระดับสัญญาณ ค่าการสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น โดยจากแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการลดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ นั้นพบว่า แบบจำลองนี้สอดคล้องกับค่าการสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนมากกว่าแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการลดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว เนื่องจากการลดทอนจะมีการเปลี่ยนความชันที่จุดเปลี่ยนความชัน  $R_b$  ทำให้เกิดความชันหรือค่าเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน  $n$  ต่างกัน ซึ่งตำแหน่งจุดเปลี่ยนความชัน  $R_b$  จะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้งาน โดยเมื่อค่าความถี่ต่ำจุดเปลี่ยนความชัน  $R_b$  จะห่างจากแหล่งกำเนิดมากกว่าเมื่อความถี่สูงขึ้น ซึ่งแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการลดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ จึงให้ความถูกต้องมากกว่าแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการลดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวเนื่องจากรวมผลของการเปลี่ยนแปลงเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน  $n$  เข้ารวมในแบบจำลองด้วย

### 5.2 การเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นตามเวลา (Time varying)

การทดสอบทางสถิติในแต่ละตำแหน่งได้บันทึกค่าทางสถิติจำนวน 1,000 ค่า โดยที่แต่ละค่าจะทำการบันทึกในทุกๆ 2 วินาที หลังจากนั้นจะนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ พบว่าที่ระยะทางมากขึ้นจะส่งผลต่อการเบี่ยงเบนของสัญญาณมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากระดับสัญญาณต่ำลง และผลของสภาพแวดล้อม จึงส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนของสัญญาณที่รับมากขึ้น

จากการทดสอบการแพร่กระจายคลื่น โดยจำลองการสื่อสารจากเซ็นเซอร์ที่ติดบนผลทุเรียนที่ตำแหน่งต่างๆ ระดับสัญญาณจะมีการกระจายตัวของสัญญาณไม่มากเนื่องจากมีระยะทางใกล้กับแหล่งกำเนิด จากผลการทดสอบทางสถิติทั้งหมดในการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.8 GHz พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบสามารถเปรียบเทียบกับการกระจายตัวทางสถิติแบบ Rician ซึ่งเป็นการกระจายตัวทางสถิติที่ใช้อธิบายการแพร่กระจายคลื่น โดยที่ผลการทดสอบสามารถเปรียบเทียบกับการกระจายตัวแบบ Rician ที่มีค่า  $K$  มากกว่า 0 dB ซึ่งแสดงว่าช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นมีองค์ประกอบของสัญญาณหลักในแนวเส้นสายตา (Line-of-sight) มากกว่าองค์ประกอบของสัญญาณที่มาจากหลายทิศทาง (Multi-path ray) แต่ค่า  $K$  ที่ได้จากการทดสอบค่อนข้างต่ำแสดงถึงช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นนี้ที่ความถี่ 5.8 GHz มีความแปรปรวนของสัญญาณที่ค่อนข้างสูง

สำหรับผลการจำลองระบบของค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวนพบว่ามีความสอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎีสำหรับการออกแบบระบบจะต้องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดค่าความผิดพลาดบัพข้อมูลที่ต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ของระบบ เพื่อหาค่ากำลังงานที่เหมาะสมตามที่ได้ทำการทดสอบในรายงานฉบับนี้ หรือหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งตัวตรวจจับ หรือเครือข่าย เพื่อให้ระบบสื่อสารที่ทำการออกแบบมีความน่าเชื่อถือสูง

ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในการทำนายความต้องการของระบบ ก็คือ จะต้องทราบถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นซึ่งจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่คลื่นแพร่กระจายผ่าน เช่น โครงสร้างของอาคาร ต้นไม้ สิ่งกีดขวาง และลักษณะการติดตั้งสายอากาศ เป็นต้น โดยที่จะอยู่ในรูปของการลดทอนตามระยะทางและการแปรปรวนของสัญญาณที่แพร่กระจายคลื่น เพื่อใช้ในการออกแบบระบบการสื่อสารให้มีประสิทธิภาพสูงสุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6 ระบบโครงข่ายไร้สาย

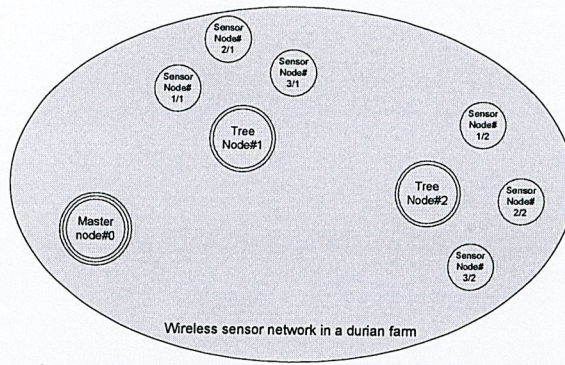
### 1. กล่าวนำ

เนื่องจากสวนทุเรียนสวนหนึ่งประกอบไปด้วยต้นทุเรียนจำนวนมาก ดังนั้นการตรวจวัดโดยการใช้อินเทอร์เน็ตตรวจสอบทีละลูกในลักษณะการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด (Point-To-Point) จึงไม่เหมาะสม เนื่องจากเกษตรกรต้องเข้าไปใกล้กับจุดที่สามารถรับส่งสัญญาณจึงทำให้เสียเวลาในการตรวจวัด เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวนี้ ผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์โครงข่ายเซนเซอร์แบบไร้สาย (Wireless Sensor Network) เข้ากับการวัดค่าความแก่ของผลทุเรียนจากอินเทอร์เน็ต ซึ่งโครงข่ายตรวจวัดแบบไร้สายนี้จะช่วยอำนวยความสะดวกต่อเกษตรกรในการเก็บค่าการตรวจวัดผลทุเรียนจากต้นต่างๆแบบอัตโนมัติ และ โหนดต่างๆในเครือข่ายจะสามารถส่งข้อมูลถึงกันได้โดยไม่จำกัดเรื่องระยะทาง

สำหรับ โครงสร้างของระบบสื่อสารเพื่อการตรวจวัดค่าความสุกแก่ของทุเรียนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นส่วนการสื่อสารในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย และส่วนที่สองเป็นส่วนการสื่อสารผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ในส่วนแรกจะเป็นการสื่อสารระหว่างโหนดต่างๆ ในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย โดยจะมี โหนดหลัก (Master node) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานทั้งหมด และเมื่อ โหนดหลักได้รับข้อมูลตรวจวัดค่าความสุกแก่ของผลทุเรียน โหนดหลักก็จะส่งข้อมูลนั้นผ่านเครือข่าย GPRS ซึ่งจะเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไปเก็บในฐานข้อมูลของเครื่องให้บริการ

### 2. โหนดในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

ในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่ประยุกต์การตรวจวัดค่าความสุกแก่ของผลทุเรียนนี้จะประกอบด้วย โหนด 3 ประเภท ได้แก่ โหนดหลัก (Master node) โหนดประจำต้น (Tree node) และ โหนดตรวจวัด (Sensor node) ดังแสดงในรูปที่ 6.1 สำหรับเหตุผลที่แบ่งชนิดของโหนดออกเป็น 3 ชนิด เนื่องจากการคำนึงถึงประสิทธิภาพในการทำงานของโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย โดยโหนดหลักจะเสมือนกับเป็นผู้ควบคุมหลักของโครงข่ายทั้งหมด และเนื่องจากจำนวนลูกทุเรียนในแต่ละต้นมีเป็นจำนวนมาก หากให้โหนดตรวจวัดทำการส่งข้อมูลโดยตรงถึงโหนดหลักจะทำให้โครงข่ายเกิดความคับคั่งเนื่องมาจากจำนวนข้อมูลที่มากจนเกินไป ดังนั้นเพื่อเป็นการลดจำนวนของข้อมูล จึงต้องมีโหนดประจำต้นเพื่อเป็นจุดรวบรวมข้อมูลในต้นนั้นๆแล้วจึงส่งต่อไปให้โหนดหลักอีกทอดหนึ่ง



รูปที่ 6.1 โหนดในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่ออกแบบ

### 3. โพรโทคอลค้นหาเส้นทางในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

สำหรับการสื่อสารในโครงข่ายใดๆ ปกติจะต้องมีการกำหนดโปรโตคอลซึ่งเป็นกระบวนการที่ทุกๆ โหนดในโครงข่ายจะต้องปฏิบัติตามเพื่อทำให้การสื่อสารเกิดขึ้นอย่างราบรื่นและมีประสิทธิภาพ ซึ่งในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายในการวิจัยนี้จะประกอบไปด้วยโปรโตคอลหลักสองโปรโตคอล ได้แก่ โปรโตคอลควบคุมการเข้าใช้ช่องสัญญาณ (Medium access control protocol) ที่มีไว้สำหรับควบคุมการส่งข้อมูลเข้าไปช่องสัญญาณ ซึ่งโปรโตคอลที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นโปรโตคอลประเภท CSMA (Carrier sense multiple access) ซึ่งเป็นโปรโตคอลที่ถูกกำหนดให้ทำงานในอาร์ทอปโมดูลสำเร็จรูปที่ได้เลือกใช้งาน สำหรับโปรโตคอลที่สำคัญอีกตัวหนึ่งได้แก่โปรโตคอลค้นหาเส้นทางในการส่งข้อมูล (Routing protocol) เนื่องจากสวนทุเรียนโดยปกติจะมีขนาดกว้างและพลังงานที่ป้อนให้กับวงจรของโหนดแต่ละตัวในโครงข่ายมีจำกัดซึ่งส่งผลให้ระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างโหนดถูกจำกัดไปด้วย ทำให้โหนดประจำต้นบางตัวไม่สามารถส่งข้อมูลโดยตรงไปยังโหนดหลักได้ ดังนั้นจึงต้องอาศัยโหนดประจำต้นอื่นๆ ช่วยถ่ายทอดข้อมูลไปยังโหนดหลัก ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบโปรโตคอลค้นหาเส้นทางในการส่งข้อมูลในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายเพื่อให้เหมาะกับการทำงานในสวนทุเรียน

โปรโตคอลสำหรับติดต่อสื่อสารในโครงข่ายไร้สาย จะเริ่มต้นจากการที่ในแต่ละรอบของการตรวจสอบค่าความสุกแก่ของผลทุเรียน โหนดหลักจะต้องทำการตรวจสอบจำนวนที่แน่นอนของโหนดประจำต้นในสวนทุเรียน ทั้งนี้เนื่องจากจำนวนของโหนดประจำต้นไม่สามารถโปรแกรมในหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ไว้ล่วงหน้า เพราะการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของโหนดประจำต้นในเครือข่ายจะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในแต่ละวัน ตัวอย่างเช่น เมื่อแบตเตอรี่ของโหนดประจำต้นหมด โหนดนั้นก็เลยไม่สามารถทำงานได้ หรือมีการติดตั้งโหนดประจำต้นเพิ่มเติมเข้าไปในโครงข่าย เป็นต้น โดยการตรวจสอบจำนวนโหนดประจำต้นจะเริ่มจากการที่โหนดหลักจะส่งเฟรมให้โหนดประจำต้นทำการรายงานตัวต่อโหนดหลัก (Request to Report Oneself Frame: RRO) โดยเมื่อส่งเฟรมดังกล่าวออกไปโหนดหลักก็จะทำการตั้งค่าเวลาสิ้นสุดของการรายงานตัว (Timeout for report oneself) เมื่อโหนดประจำต้นใดๆ ได้รับเฟรมให้รายงานตัวก็จะทำการสุ่มค่าเวลาที่จะส่งเฟรมรายงานตัว (Report Oneself Frame: RO) และทำการกระจายเฟรมดังกล่าวออกไปพร้อมๆ กับการเพิ่ม

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลลงในตารางข้อมูลขาลงไปสู่โนดหลัก (Downward routing table) ซึ่งมีส่วนประกอบของตารางดังแสดงในตารางที่ 6.1 ซึ่งข้อมูลในคอลัมน์แรกของตารางจะเป็นหมายเลขของโนดประจำต้นที่ส่งข้อมูลออกมา ซึ่งในที่นี้คือ หมายเลขของโนดหลัก ในคอลัมน์ที่สองเป็นหมายเลขของโนดประจำต้นที่กระจายเฟรม RRO ส่วนคอลัมน์สุดท้ายเป็นจำนวนครั้งของการถ่ายทอดเฟรม RRO ตั้งแต่ส่งออกมาจากโนดหลัก โดยในเฟรม RRO จะมีฟิลด์แสดงจำนวนของการถ่ายทอดเฟรมและทุกครั้งที่มีการกระจายเฟรมออกไปจะมีการเพิ่มค่าในฟิลด์นี้ครั้งละหนึ่งค่า

ตารางที่ 6.1 ตารางข้อมูลขาลง

ID of actual transmitting station	ID of the latest transmitting station	Number of hops

เมื่อถึงเวลาที่จะทำการส่งเฟรมรายงานตัวจากโนดประจำต้นแต่ละตัว โหนดประจำต้นตัวนั้นก็จะทำการค้นหาในตารางข้อมูลขาไปเพื่อตรวจหาว่าถ้าต้องการส่งเฟรม RO กลับไปหาโนดหลักจะต้องส่งไปให้กับโนดประจำต้นตัวใดในโครงข่าย ถ้าหากพบหลายเส้นทางที่จะส่งข้อมูล โหนดประจำต้นตัวนั้นก็จะทำการเลือกหมายเลขของโนดประจำต้นตัวที่อยู่ถัดออกไปที่มีจำนวนครั้งของการถ่ายทอดข้อมูลน้อยที่สุด ซึ่งอาจหมายถึงเส้นทางที่มีระยะทางที่สั้นที่สุดที่เฟรม RO จะเดินทางไปสู่โนดหลัก เมื่อเลือกเส้นทางได้แล้ว โหนดประจำต้นตัวนั้นก็จะทำการส่งเฟรม RO ต่อไปยังโนดประจำต้นปลายทางที่ได้เลือกเอาไว้ เมื่อโนดประจำต้นปลายทางได้รับเฟรม RO ก็จะทำให้ทำการเพิ่มข้อมูลลงในตารางข้อมูลขาขึ้น (Upward Routing Table) ซึ่งก็มีส่วนประกอบเช่นเดียวกับตารางข้อมูลขาไป

โดยวิธีการเช่นนี้จะทำให้เฟรม RO จากโนดประจำต้นแต่ละตัวที่อยู่ในโครงข่ายสามารถเดินทางไปถึงโนดหลักเพื่อให้โนดหลักทราบถึงจำนวนแท้จริงของโนดประจำต้นในโครงข่ายเพื่อที่จะได้ทำการส่งเฟรมสอบถามข้อมูลความสุกแก่ของทุเรียนในต้นนั้นๆ ได้ (Request to Report Durian Maturity frame: RRDM) และเมื่อสิ้นสุดเวลาของการรายงานตัวที่โนดหลักตั้งเอาไว้ โหนดหลักก็จะเริ่มทำการส่งเฟรม RRDM โดยการส่งเฟรมจะเรียงจากหมายเลขของโนดประจำต้นตัวแรกที่ส่งเฟรม RO มาถึงจนถึงหมายเลขประจำต้นตัวสุดท้ายที่ส่งเฟรม และเนื่องจากโนดหลักได้ทำการเพิ่มข้อมูลในตารางขาขึ้นของตัวเองเมื่อครั้งที่ได้รับเฟรม RO เช่นกัน โหนดหลักจึงสามารถเลือกหมายเลขของโนดประจำต้นตัวถัดไปที่จะสามารถส่งเฟรม RRDM จนไปถึงโนดประจำต้นปลายทางที่ต้องการติดต่อได้ เมื่อเฟรม RRDM เดินทางไปถึงโนดประจำต้นตัวถัดไปที่ถูกเลือกโดยโนดหลัก โหนดประจำต้นตัวนั้นก็จะค้นในตารางข้อมูลขาขึ้นเพื่อหาหมายเลขของโนดประจำต้นถัดออกไป ด้วยวิธีนี้เฟรม RRDM จะสามารถเดินทางไปจนถึงโนดประจำต้นปลายทาง และเมื่อโนดประจำต้นปลายทางได้รับเฟรม RRDM ก็จะทำให้ทำการกระจายเฟรมสอบถามข้อมูลความสุกแก่ของทุเรียนไปยังโนดตรวจวัด (Request to

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อใดๆ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sensor node to Report Durian Maturity: RSRDM) ออกไปให้โนดตรวจวัดที่อยู่ในต้นของตัวเอง เมื่อโนดตรวจวัดได้รับเฟรม RSRDM ก็จะทำการตรวจวัดค่าความสุกแก่ของผลทุเรียน จากนั้นก็จะส่งเฟรมข้อมูลรายงานค่าความสุกแก่ของผลทุเรียน (Durian Maturity frame: DM) กลับไปให้โนดประจำต้นของตัวเอง และเมื่อโนดประจำต้นของตัวเองได้รับข้อมูลความสุกแก่ของผลทุเรียนที่ได้จากโนดตรวจวัด โหนดประจำต้นก็จะส่งเฟรมข้อมูลตรวจวัด (Report Durian Maturity frame: RDM) กลับไปให้โนดหลักโดยใช้ข้อมูลในตารางข้อมูลขาลง

### 3.1 ตัวอย่างการทำงานของโปรโตคอลค้นหาเส้นทาง

ในตัวอย่างนี้สมมติว่าในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายประกอบด้วยโนดหลัก โหนดประจำต้น 2 โหนด และโนดประจำต้นแต่ละ โหนดมีโนดตรวจวัดจำนวน 3 โหนด ดังแสดงในรูปที่ 6.1

**ขั้นตอนที่ 1** โหนดหลักกระจายเฟรม RRO ออกไป โหนดประจำต้นหมายเลข 1 และได้รับเฟรมดังกล่าว แต่โนดประจำต้นหมายเลข 2 ไม่ได้รับเนื่องจากอยู่ห่างออกไปเกินระยะได้รับสัญญาณ จากนั้น โหนดประจำต้นหมายเลข 1 ทำการตั้งเวลาในการส่งเฟรม RO และปรับปรุงข้อมูลในตารางข้อมูลขาลง ดังแสดงในตารางที่ 6.2 จากนั้นกระจายเฟรม RRO ออกไป

ตารางที่ 6.2 ตัวอย่างข้อมูลในตารางข้อมูลขาลงของ โหนดประจำต้น#1

ID of actual transmitting station	ID of the latest transmitting station	Number of hops
0	0	1

**ขั้นตอนที่ 2** เฟรม RRO เดินทางไปถึงโนดประจำต้นหมายเลข 2 จากนั้น โหนดประจำต้นหมายเลข 2 ทำการตั้งเวลาในการส่งเฟรม RO ของตัวเองและปรับปรุงข้อมูลในตารางข้อมูลขาลง ดังแสดงในตารางที่ 6.3 จากนั้นกระจายเฟรม RRO ออกไป

ตารางที่ 6.3 ตัวอย่างข้อมูลในตารางข้อมูลขาลงของ โหนดประจำต้น#2

ID of actual transmitting station	ID of the latest transmitting station	Number of hops
0	1	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ขั้นตอนที่ 3** เมื่อถึงเวลาที่ตั้งเอาไว้ โหนดประจำต้นหมายเลข 1 ทำการส่งเฟรม RO ของตัวเองกลับไปให้ โหนดหลัก เมื่อค้นในตารางข้อมูลขาของของตัวเองพบว่าต้องส่งเฟรม RO ผ่าน โหนดหมายเลข 0 ซึ่งก็คือหมายเลขของ โหนดหลักนั่นเอง (เนื่องจาก โหนดประจำต้นหมายเลข 1 สามารถรับข้อมูลได้โดยตรงจาก โหนดหลัก) ส่วน โหนดประจำต้นหมายเลข 2 เมื่อค้นในตารางข้อมูลขาของพบว่าต้องส่งเฟรม RO ของตัวเองผ่านไปยัง โหนดประจำต้นหมายเลข 1

**ขั้นตอนที่ 4** เมื่อเฟรม RO ของ โหนดประจำต้นหมายเลข 2 มาถึง โหนดประจำต้นหมายเลข 1 โหนดประจำต้นหมายเลข 1 ก็จะทำการปรับปรุงตารางข้อมูลขาขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 6.4 แล้วจึงตรวจสอบตารางข้อมูลขาของของตัวเอง พบว่าสามารถส่งเฟรม RO ของ โหนดประจำต้นหมายเลข 2 ไปยัง โหนดหลักได้โดยตรง

ตารางที่ 6.4 ตัวอย่างตารางข้อมูลขาขึ้นของ โหนดประจำต้น#1

ID of actual transmitting station	ID of the latest transmitting station	Number of hops
2	2	1

**ขั้นตอนที่ 5** เมื่อเฟรม RO ของ โหนดประจำต้นหมายเลข 1 และ 2 เดินทางไปถึง โหนดหลัก โหนดหลักทำการปรับปรุงข้อมูลในตารางข้อมูลขาขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 ตัวอย่างตารางข้อมูลขาขึ้นของ โหนดหลัก

ID of actual transmitting station	ID of the latest transmitting station	Number of hops
1	1	1
2	1	2

**ขั้นตอนที่ 6** โหนดหลักทำการส่งเฟรม RRDM ไปให้ โหนดประจำต้นหมายเลข 1 เมื่อตรวจสอบในตารางข้อมูลขาขึ้นของตัวเอง พบว่าสามารถส่งข้อมูลไปให้ โหนดประจำต้นหมายเลข 1 ได้โดยตรง

**ขั้นตอนที่ 7** เมื่อเฟรม RRDM เดินทางไปถึงโนดประจำต้นหมายเลข 1 โนดประจำต้นหมายเลข 1 กระจายเฟรม RSRDM ออกไปให้โนดตรวจวัดในต้นของตัวเองและเมื่อโนดตรวจวัดของตัวเองส่งเฟรม DM กลับมาให้ โนดประจำต้นหมายเลข 1 ก็ส่งเฟรม RDM ต่อไปให้โนดหลักโดยใช้ตารางข้อมูลกลางของตัวเอง

**ขั้นตอนที่ 8** โนดหลักทำการส่งเฟรม RRDM ไปให้โนดประจำต้นหมายเลข 2 เมื่อตรวจสอบในตารางข้อมูลขาขึ้นของตัวเอง พบว่าสามารถส่งข้อมูลไปให้โนดประจำต้นหมายเลข 2 ผ่านทางโนดประจำต้นหมายเลข 1

**ขั้นตอนที่ 9** โนดประจำต้นหมายเลข 1 เมื่อได้รับเฟรม RRDM ของโนดประจำต้นหมายเลข 2 ก็ทำการตรวจสอบข้อมูลขาขึ้น พบว่าสามารถส่งเฟรม RRDM ไปยังโนดประจำต้นหมายเลข 2 ได้โดยตรง

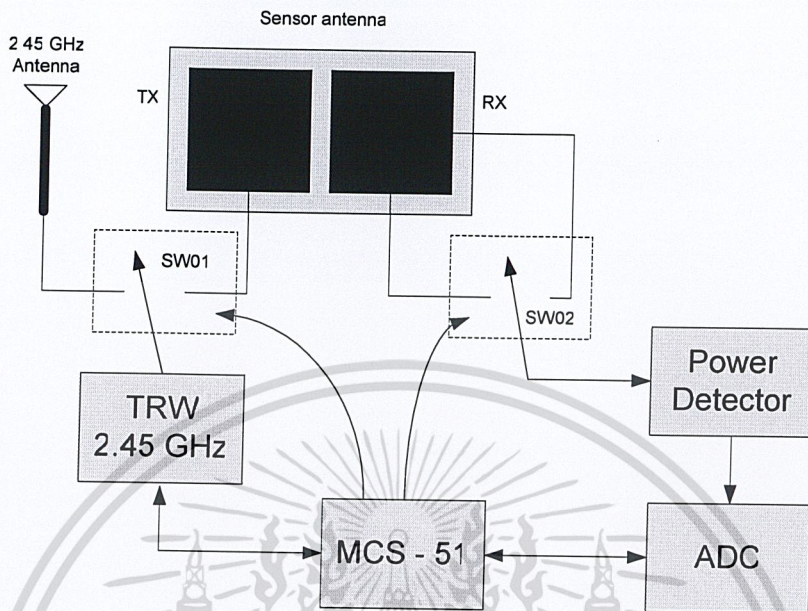
**ขั้นตอนที่ 10** เมื่อเฟรม RRDM เดินทางไปถึงโนดประจำต้นหมายเลข 2 โนดประจำต้นหมายเลข 2 กระจายเฟรม RSRDM ออกไปให้โนดตรวจวัดในต้นของตัวเองและเมื่อโนดตรวจวัดของตัวเองรายงานค่าความสูงแก่ของผลทุเรียนกลับมาให้ เมื่อค้นในตารางข้อมูลกลาง โนดประจำต้นหมายเลข 2 พบว่าต้องส่งเฟรม RDM ต่อไปให้โนดหลักผ่านทางโนดประจำต้นหมายเลข 1

**ขั้นตอนที่ 11** เมื่อโนดประจำต้นหมายเลข 1 ได้รับเฟรม RDM จากโนดประจำต้นหมายเลข 2 จากนั้นทำการตรวจสอบข้อมูลในตารางขา ลง พบว่าสามารถส่งเฟรมดังกล่าวไปยังโนดหลักได้โดยตรง

#### 4. รูปแบบของเฟรมในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

รูปแบบทั่วไปของเฟรมที่รับส่งภายในโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายประกอบด้วยส่วนประกอบของเฟรมมีฟิลด์ที่มีขนาด 8 บิตทั้งหมด 14 ฟิลด์ประกอบด้วย ฟิลด์เริ่มต้น ฟิลด์ชนิดของเฟรม ฟิลด์ลำดับของเฟรม ฟิลด์จำนวนครั้งของส่งต่อ ฟิลด์หมายเลขของโหนดปลายทางที่แท้จริง ฟิลด์หมายเลขปลายทางของโหนดถัดออกไป ฟิลด์หมายเลขของโหนดที่ส่งเฟรมที่แท้จริง ฟิลด์หมายเลขของโหนดที่ทำหน้าที่ถ่ายทอดเฟรม ฟิลด์หมายเลขของโหนดตรวจวัด ส่วนอีกสี่ฟิลด์ต่อมาเป็นฟิลด์บรรจุค่าการตรวจวัด ปิดท้ายเฟรมด้วยฟิลด์สิ้นสุด สำหรับชนิดของเฟรมที่รับส่งประกอบไปด้วยเฟรมดังต่อไปนี้ เฟรม RRO เฟรม RO เฟรม RRDM เฟรม RSRDM เฟรม RDM และเฟรม ACK อย่างไรก็ตามชนิดของเฟรมบางชนิดไม่ได้ประกอบด้วยฟิลด์ทั้งหมด อย่างเช่น เฟรม ACK จะประกอบด้วยฟิลด์ 5 ฟิลด์เท่านั้น ซึ่งได้แก่ ฟิลด์เริ่มต้น ฟิลด์ชนิดของเฟรม ฟิลด์หมายเลขโหนดปลายทาง ฟิลด์หมายเลขโหนดต้นทาง ฟิลด์สิ้นสุด

## 5. การออกแบบโนดเซนเซอร์



รูปที่ 6.2 ฟังก์ชันการทำงานของโนดเซนเซอร์

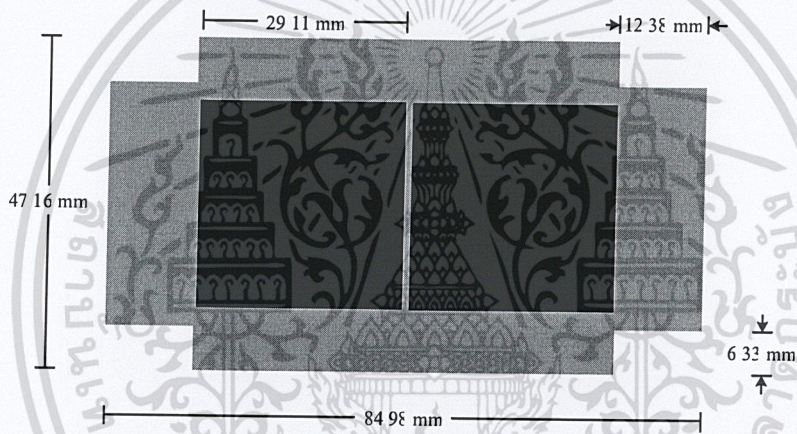
จากรูปที่ 6.2 เป็นฟังก์ชันการทำงานของโนดเซนเซอร์ ซึ่งมีไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เป็นตัวคุมการทำงานหลัก โมดูล TRW 2.45GHz ทำหน้าที่เป็นตัวรับ-ส่งข้อมูล ในขณะที่เดียวกันก็ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดความถี่เพื่อป้อนให้กับสายอากาศเซนเซอร์ (Sensor antenna) ด้วย โดยมีขั้นตอนการทำงานเป็นลำดับดังต่อไปนี้

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งสัญญาณกระตุ้นให้ SW01 ทำงานโดยสวิตช์ไปที่ตำแหน่งสายอากาศเซนเซอร์ภาคส่ง (TX) เพื่อส่งสัญญาณความถี่ 2.45GHz เข้าไปในผลไม้ที่ทำการวัด ซึ่ง SW01 ทำหน้าที่สลับเส้นทางการส่งข้อมูลระหว่างสายอากาศส่งข้อมูล (2.45GHz antenna) และสายอากาศเซนเซอร์
2. สัญญาณเชื่อมต่อยุบรวมจากสายอากาศส่ง (Coupling) ไปยังสายอากาศรับ (RX) เพื่อส่งต่อไปยังภาคตรวจรับกำลังงาน (Power detector) ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณวิทยุ (RF) ที่รับได้ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ซึ่งมีระดับที่แตกต่างกันจากการวัด
3. สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่ได้จากภาคตรวจรับกำลังงานจะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยวงจรการแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Converter: ADC) ขนาด 12 บิตเพื่อส่งต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์
4. ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณควบคุมให้ SW01 สลับไปยังตำแหน่งสายอากาศส่งข้อมูลเพื่อส่งข้อมูลที่ได้ออกไป ซึ่งข้อมูลที่ได้ในแต่ละตัวจะส่งไปยังเซนเซอร์ประจำต้น จากนั้นเซนเซอร์ประจำต้นจะส่ง

ข้อมูลทั้งหมดไปยังโหนดแม่ ซึ่งทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลทั้งหมดแล้วจัดส่งไปยังคอมพิวเตอร์ส่วนกลางผ่านระบบ GPRS

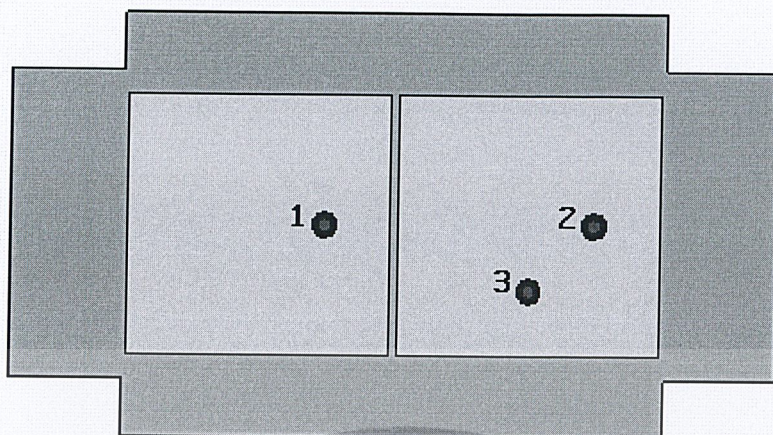
### 5.1 ส่วนสายอากาศ

สายอากาศที่นำมาใช้เป็นตัวเซ็นเซอร์ในระบบโครงข่ายไร้สายเป็นสายอากาศไมโครสตริปแพทช์ โดยออกแบบให้สายอากาศสองตัววางห่างกันในระยะประชิดที่ใกล้ที่สุดเพื่อให้สามารถรับสัญญาณเชื่อมต่อกันได้ดีที่สุด สายอากาศตัวแรกต่อกับเครื่องกำเนิดสัญญาณทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง สายอากาศอีกตัวต่อกับเครื่องรับกำลังงานสัญญาณทำหน้าที่เป็นสายอากาศตัวรับ ซึ่งสายอากาศทั้งสองตัวถูกออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ โดยให้สายอากาศแผ่คลื่นในโหมด 1 ขนาดของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 6.3



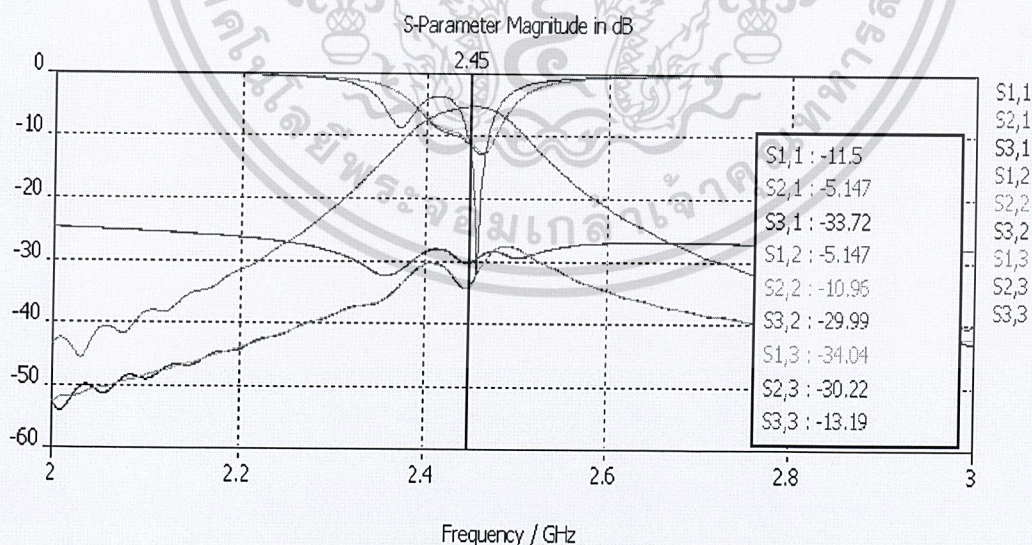
รูปที่ 6.3 ขนาดของสายอากาศที่ได้จากการออกแบบ

จากนั้นนำขนาดของสายอากาศที่ได้จากการออกแบบไปจำลองในโปรแกรมทางแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบว่าสายอากาศที่ได้ออกแบบสามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์



รูปที่ 6.4 การจำลองสายอากาศในโปรแกรมทางแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 6.4 จะเห็นได้ว่าสายอากาศไมโครสตริปแพทช์ที่ใช้จำลองในโปรแกรมทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีจุดป้อนสัญญาณ 3 จุด ซึ่งในการนำไปใช้งานจริง จะมีสวิตซ์ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนโพลาริเซชัน โดยที่จุดป้อนหมายเลข 1 เป็นจุดป้อนสัญญาณของสายอากาศที่ทำหน้าที่เป็นตัวส่ง จุดป้อนหมายเลข 2 เป็นจุดป้อนสัญญาณของสายอากาศที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณในกรณีโพลาริเซชันขนาน ส่วนจุดป้อนหมายเลข 3 เป็นจุดป้อนสัญญาณของสายอากาศที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณในกรณีโพลาริเซชันตั้งฉาก



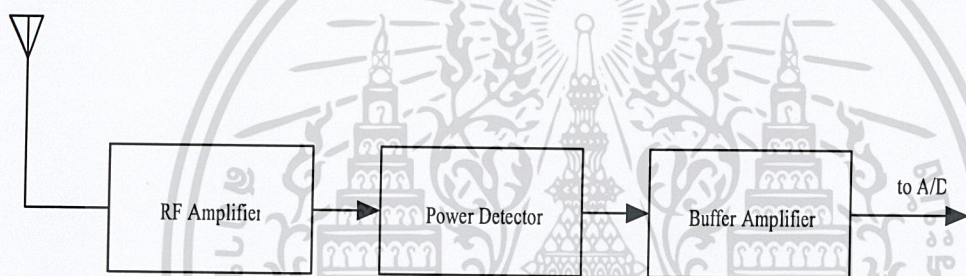
รูปที่ 6.5 ผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรมทางแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

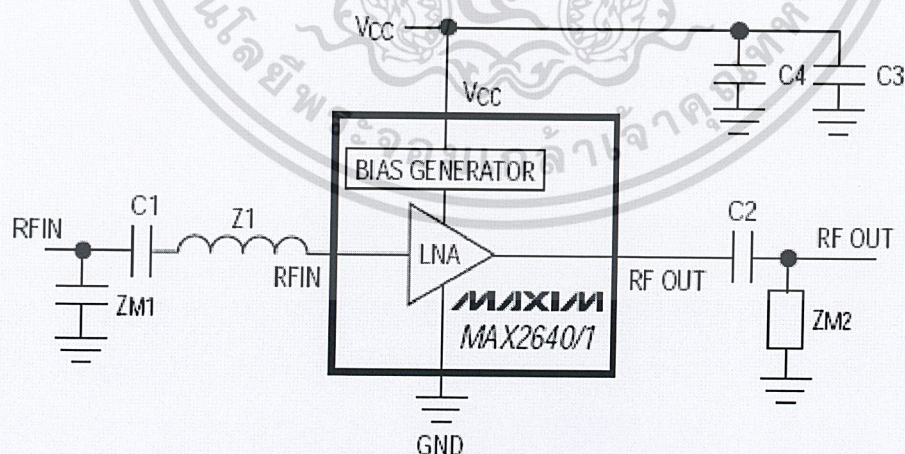
จากรูปที่ 6.5 เป็นผลของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) ของแต่ละจุดป้อนสัญญาณที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมทางแม่เหล็กไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของจุดป้อนสัญญาณทั้ง 3 จุดมีค่าต่ำกว่า -10 dB ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ แสดงว่าสายอากาศนี้มีค่าแมตซ์ที่ดี (Matching) ซึ่งทำให้สายอากาศสามารถทำงานที่ความถี่ดังกล่าวได้

## 5.2 ส่วนวงจรตรวจรับกำลังงาน

ส่วนของภาคตรวจรับกำลังงาน (Power detector) ประกอบด้วยวงจรขยายความถี่วิทยุ (RF Amplifier) วงจรรับกำลังงาน (Power detector) และวงจรขยายบัฟเฟอร์ (Buffer Amplifier) ดังแสดงในรูปที่ 6.6 ซึ่งมีวงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุ วงจรตรวจรับกำลังงาน วงจรขยายบัฟเฟอร์และรูปถ่าย ดังแสดงในรูปที่ 6.7 ถึง 6.10 ตามลำดับ

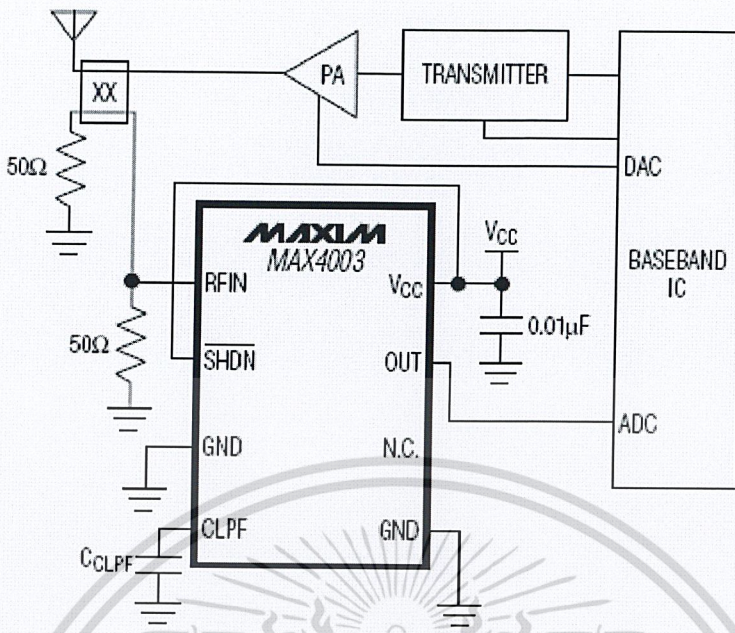


รูปที่ 6.6 ไคอะแกรมการทำงานของภาคตรวจรับกำลังงาน

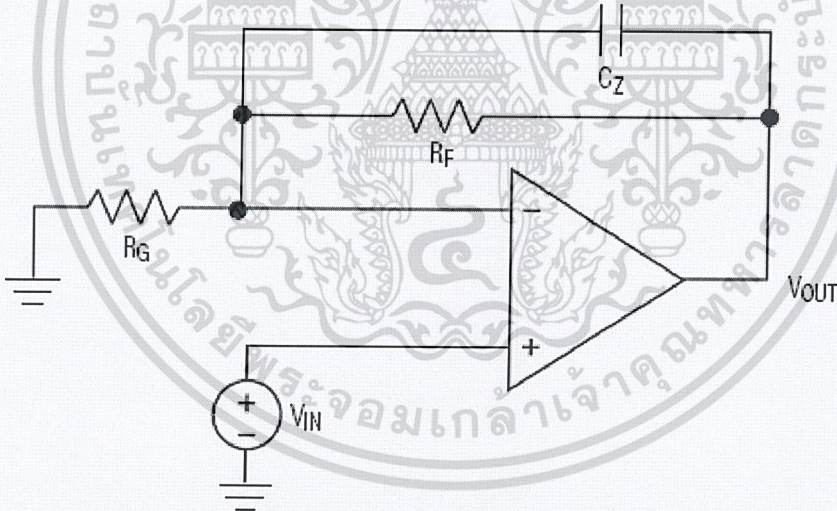


รูปที่ 6.7 วงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

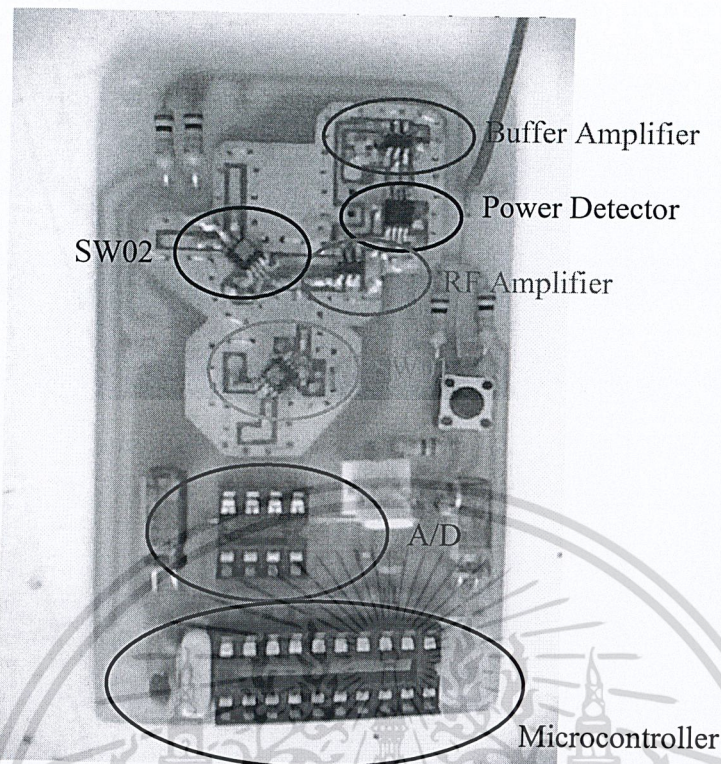


รูปที่ 6.8 วงจรตรวจรับกำลังงาน



รูปที่ 6.9 วงจรขยายบัพเฟออร์

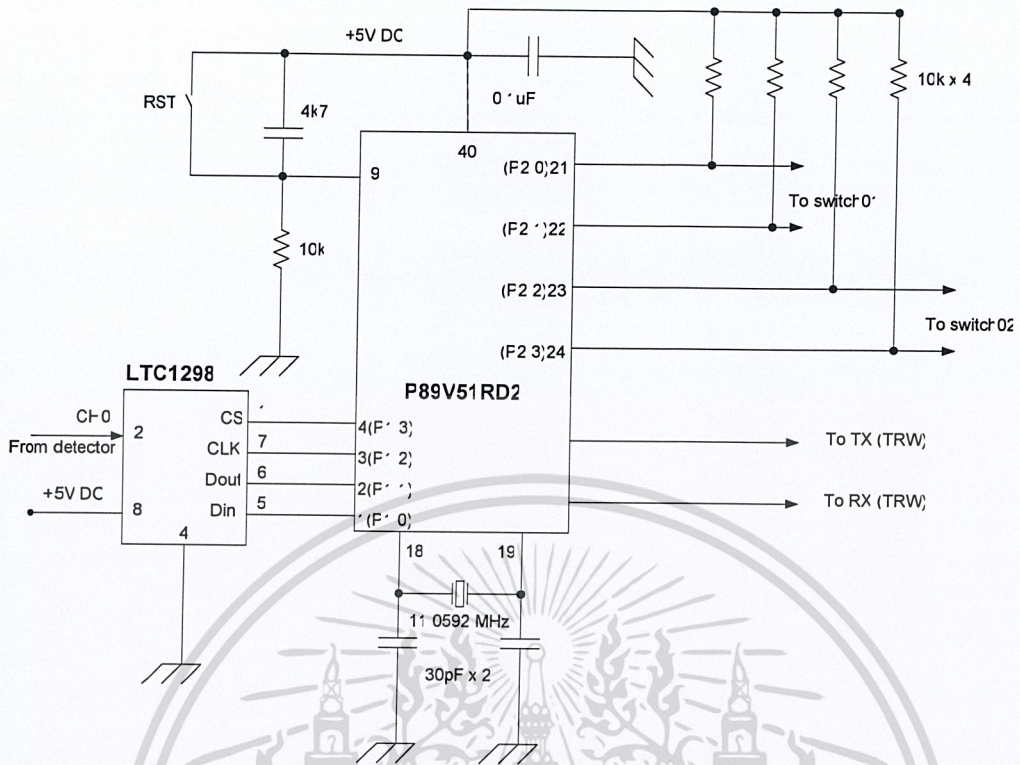
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



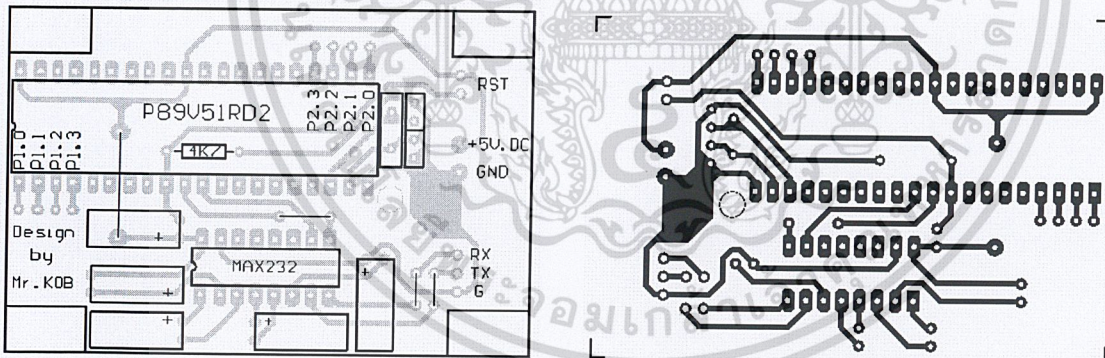
รูปที่ 6.10 สายวงจรส่วนตรวจจับกำลังงาน

### 5.3 ส่วนวงจรควบคุมการทำงาน

ในรูปที่ 6.11 เป็นวงจรควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ P89V51RD2 ขนาด 40 ขาซึ่งสามารถเขียนข้อมูลได้ด้วยวิธีการแบบ ISP (In-System Programming) ทำให้การแก้โปรแกรมต่างๆ ทำได้โดยง่าย ไม่ยุ่งยาก สะดวก และรวดเร็ว โดยรูปที่ 6.11คือสายวงจรพิมพ์ด้านบน (ก) และด้านล่าง (ข) และมีลายพิมพ์ในรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.11 วงจรควบคุมการทำงานภายในเซนเซอร์



(ก)

(ข)

รูปที่ 6.12 ลายวงจรพิมพ์ของวงจรควบคุมการทำงาน

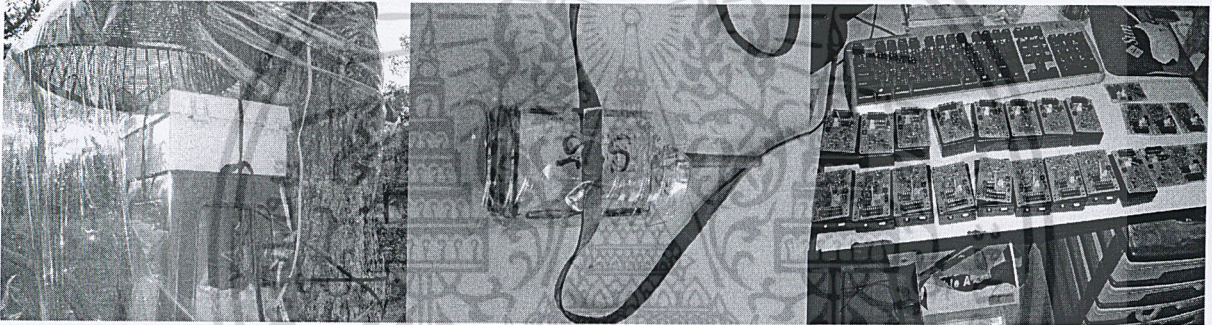
(ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. การทดสอบภาคสนาม

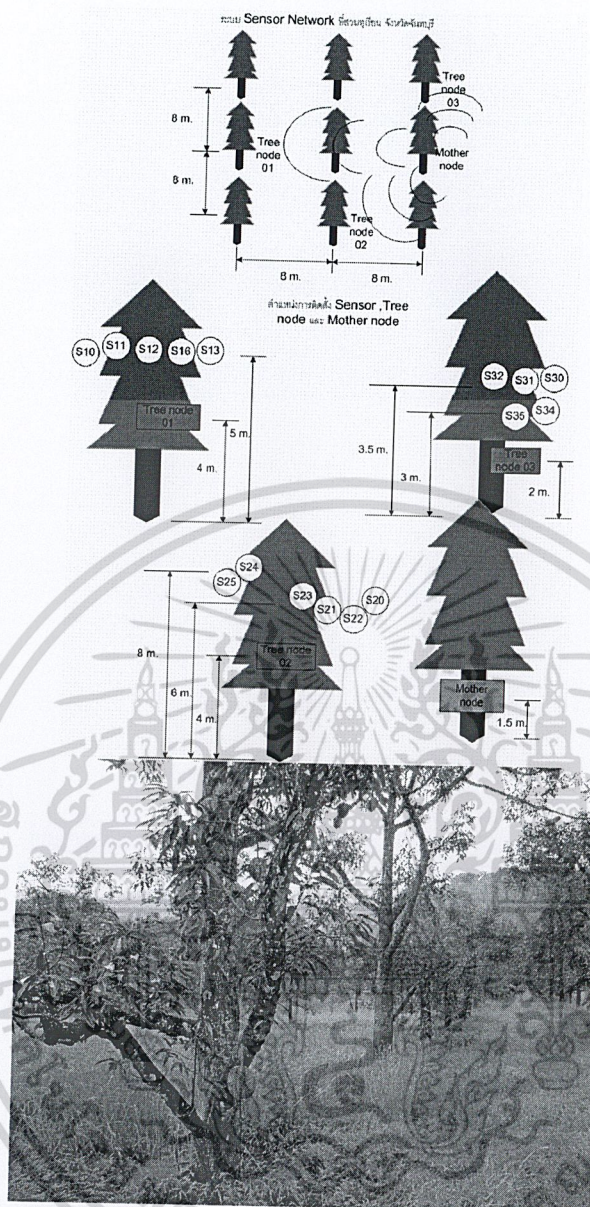
ได้ออกแบบและสร้างเซนเซอร์ทั้งหมด 16 ตัว มีรูปถ่ายของโนคแม่และโนคลูกแสดงในรูปที่ 6.13 เพื่อทดสอบการส่งสัญญาณระดับความถี่ของทุเรียนที่ศูนย์วิจัยพืชสวน จังหวัดจันทบุรี ในเดือนพฤษภาคม 2552 และที่อำเภอชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช ในเดือนสิงหาคม 2552

จากข้อมูลของโมดูล TRW 2.4 ซึ่งเป็นโมดูลที่ใช้ส่งสัญญาณไมโครเวฟความถี่ 2.4 GHz ซึ่งในโครงการนี้ นำมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์และเครื่องรับส่งสัญญาณ พบว่ามีความไวในการรับสัญญาณเท่ากับ  $-80$  dBm และมีกำลังส่งเท่ากับ  $+4$  dBm เมื่อใช้สายอากาศโมโนโพลที่มีอัตราขยายเท่ากับ 2.1 dBi การส่งสัญญาณจากเซนเซอร์ถึงเซนเซอร์มีระยะทางน้อยกว่า 10 เมตร ซึ่งจากข้อมูลในตารางที่ 5.2 พบว่าการสูญเสียตามเส้นทางที่คลื่นเดินทางเท่ากับ 65 dB ทำให้มีกำลังที่เครื่องรับมีขนาด  $-53$  dBm ซึ่งสูงกว่า  $-80$  dBm ถึง 27 dB นับว่ามี Margin สูงมาก แม้ว่าแบบจำลอง Rician ที่มี  $K=14.25$  มีค่าแปรปรวน 0.0188 ก็ยังสามารถสื่อสารกันได้ดี



รูปที่ 6.13 รูปถ่ายของโนคแม่และโนคลูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

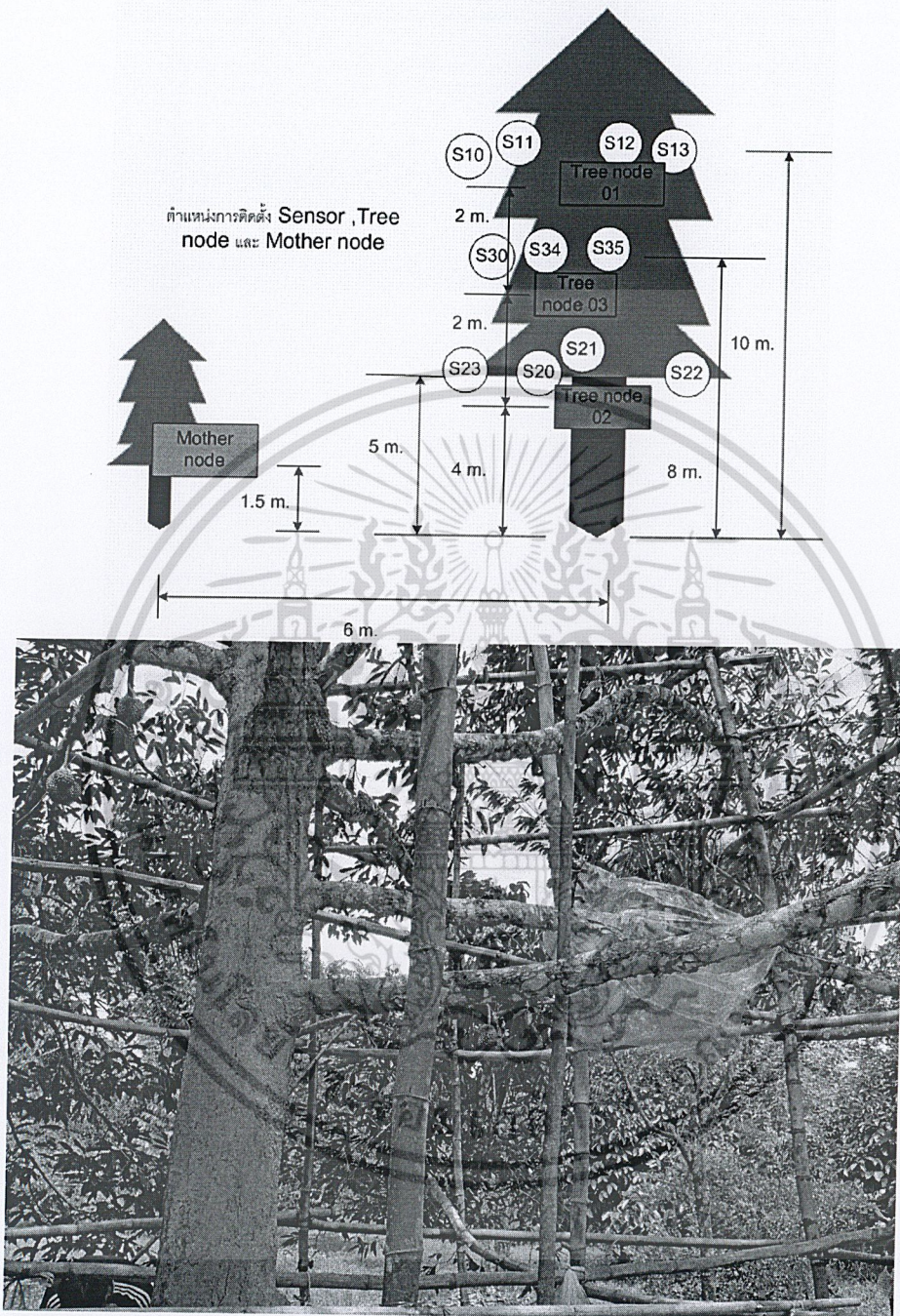


รูปที่ 6.14 ฝักรูมิและภาพถ่ายการทดลองที่จันทบุรี

เราได้จัดการทดลองภาคสนามที่ศูนย์วิจัยพืชสวน จังหวัดจันทบุรี ในเดือนพฤษภาคม 2552 โดยมีโนดประจำต้นจำนวน 3 โนด แต่ละต้นมี 3-4 โนด มีฝักรูมิและภาพถ่ายดังแสดงในรูปที่ 6.14 เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวมีฝนตกมากทุกวัน วันละหลายครั้ง ความชื้นจากน้ำฝนทำให้การวัดผิดพลาดและสร้างความเสียหายแก่แหล่งจ่ายพลังงานของระบบ จึงไม่สามารถเก็บข้อมูลได้

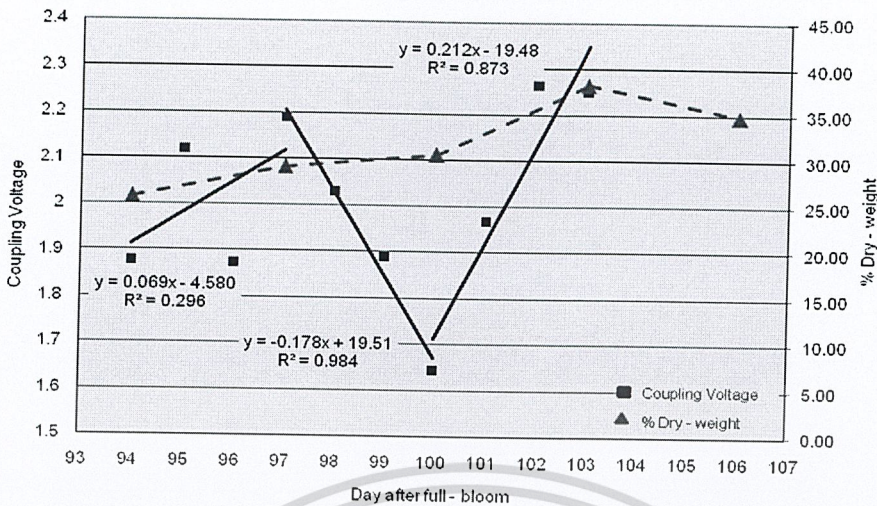
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ Sensor Network ที่สวนทุเรียน จังหวัดนครศรีธรรมราช



รูปที่ 6.15 ฟังภูมิและภาพถ่ายการทดลองที่นครศรีธรรมราช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.16 การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณไมโครเวฟตามวันหลังดอกบาน เทียบกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง

หลังจากที่แก้ไขแหล่งจ่ายพลังงานแล้ว ได้จัดการทดลองอีกครั้งที่อำเภอชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช มีจำนวนโนดทั้งสิ้น 11 โนด เนื่องจากในสวนที่ทดลองมีทุเรียนขนาดใหญ่ต้นเดียว ดังแสดงในรูปที่ 6.15 จึงติดตั้ง 3 โนดบนต้นทุเรียนนี้ โดยแต่ละโนดมี 3-4 โนดเซนเซอร์ จากการทดลองพบว่าความชื้นจากฝ่นและน้ำค้างมีผลต่อการเก็บข้อมูลเป็นอย่างมาก แม้ว่าเก็บข้อมูลตลอด 24 ชั่วโมง แต่พบว่าข้อมูลในช่วงเวลา 10-14 นาฬิกามีความน่าเชื่อถือ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่น้ำค้างแห้งหมดแล้ว ประกอบกับมีปริมาณฝ่นน้อยเนื่องจากฝ่นมักจะตกในช่วงบ่าย จึงได้นำข้อมูลในช่วงเวลาดังกล่าวมาเฉลี่ยและแสดงผลระดับสัญญาณต่อวันหลังดอกบานในรูปที่ 6.16 ที่แสดงให้เห็นว่าระดับสัญญาณไมโครเวฟมีการเพิ่มขึ้นในช่วงวันหลังดอกบานที่ 94 ถึง 97 จากนั้นสัญญาณจะลดลงมาต่ำสุดในวันหลังดอกบานที่ 100 และเพิ่มขึ้นอีกครั้ง การเปลี่ยนแปลงนี้มีธรรมชาติสอดคล้องกับการทดลองโดยใช้เซนเซอร์ที่เก็บข้อมูลด้วยคนที่แสดงในบทที่ 4 และเมื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามวันหลังดอกบานที่เพิ่มขึ้น พบว่าวันที่ 101 เป็นวันที่เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งมากกว่า 32% ซึ่งเป็นวันที่ทุเรียนมีระดับความแก่ 80% ดังนั้นจึงทำให้ทราบได้ว่าวันที่สัญญาณมีระดับต่ำที่สุดจะมีระดับความแก่ใกล้เคียง 80% ทำให้ใช้ระดับสัญญาณนี้เตือนชาวสวนให้เก็บทุเรียนก่อนที่มันจะมีความแก่ 80% ได้

## สรุป

ในงานวิจัยนี้คณะนักวิจัยได้ดำเนินการศึกษาและพัฒนาเซนเซอร์ไมโครเวฟเพื่อตรวจสอบระดับความแก่ของผลไม้ ซึ่งในที่นี้จำกัดอยู่ที่ทุเรียนซึ่งเป็นผลไม้ส่งออกที่มีมูลค่าสูง เซนเซอร์ที่ใช้เป็นสายอากาศไมโครสตริปสองตัววางข้างกันและแต่ละอยู่กับผลทุเรียน สัญญาณที่ส่งจากสายอากาศตัวหนึ่งผ่านผลทุเรียนไปยังสายอากาศอีกตัวหนึ่งที่ใช้รับสัญญาณ มีความแรงแปรผันตามระดับความแก่ของทุเรียน จากการศึกษาพบว่าเมื่อเวลาที่เปลี่ยนไปตามวันหลังดอกบานที่เพิ่มขึ้น ปริมาณแป้งในเนื้อทุเรียนจะเพิ่มจนสูงที่สุดที่วันหนึ่ง จากนั้นจะลดลง ในขณะที่ปริมาณน้ำตาลมีการเปลี่ยนแปลงที่สวนทางกัน แต่ปริมาณแป้งสูงกว่าปริมาณน้ำตาลอย่างเห็นได้ชัด ผลลัพธ์ดังกล่าวเป็นเหตุให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียนมีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นในลักษณะที่สวนทางกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแป้ง และความแรงของสัญญาณที่รับได้ก็จะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแป้งในเนื้อทุเรียน จากผลการทดลองกับทุเรียนในสวนที่อำเภอชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช ในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนสิงหาคม ของปี 2551 และ 2552 มีผลทำนองเดียวกันที่สนับสนุนสมมุติฐานข้างต้นเป็นอย่างดี

คณะนักวิจัยได้พัฒนาเซนเซอร์ดังกล่าวให้สามารถเก็บข้อมูลโดยอัตโนมัติและมีต้นทุนต่ำโดยได้ใช้วงจรที่หาได้ในท้องตลาดมาทำเป็นระบบโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายทำงานที่ความถี่ 2.4 GHz เพื่อเก็บผลแล้วเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งที่ใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินความแก่ของทุเรียน พบว่าทำงานได้ดี

ก่อนที่จะได้ระบบโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่กล่าวมาข้างต้น คณะนักวิจัยได้ศึกษาการกระจายคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 และ 5.8 GHz ในสวนทุเรียน โดยได้วัดสัญญาณวิทยุและทำแบบจำลองช่องสัญญาณดังกล่าว เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการกระจายคลื่นในสวนทุเรียนซึ่งยังไม่มีผู้ใดทำมาก่อน แล้วนำข้อมูลดังกล่าวมาออกแบบระบบสื่อสารที่มีเสถียรภาพ และได้พัฒนาโปรโตคอลเพื่อควบคุมการสื่อสารระหว่างเซนเซอร์ที่ติดกับผลทุเรียนมายังโนดแม่ที่ใช้เชื่อมต่อข้อมูลผ่านระบบ GPRS มายังห้องปฏิบัติการ และแสดงผลเป็นกราฟเพื่อทำนายระดับความแก่ของทุเรียน

ประโยชน์จากการวิจัยนี้จะทำให้มีเครื่องมือที่ช่วยในการเตือนชาวสวนให้เก็บทุเรียนในช่วงเวลาที่เหมาะสม ที่จะทำให้มูลค่าสูงสำหรับการส่งออก

สิ่งที่ต้องปรับปรุงแก้ไขคือทำให้ระบบคงทนต่อสภาพการใช้งานที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นอย่างมากในแต่ละช่วงเวลาของแต่ละวัน โดยเฉพาะปริมาณฝนในช่วงฤดูที่ฝนตกชุก

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักบริการส่งออก 1 กรมส่งเสริมการส่งออก 2552 [Online]  
<http://www.depthai.go.th/dep/doc/52/52003624.doc>
- [2] สำนักส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตร [Online]  
[http://www.agriman.doae.go.th/home/km/km52\\_agriman.html](http://www.agriman.doae.go.th/home/km/km52_agriman.html)
- [3] ทิทัมพร นาทวรทัต ความถ่วงจำเพาะและการสูญเสียน้ำหนักของทุเรียนพันธุ์ชะนี หมอนทอง และ ก้านยาวที่เก็บเกี่ยวในอายุต่างๆ กัน ปัญหาพิเศษ ปริญญาตรี ภาควิชาพืชสวน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 2530
- [4] A. Mizrach, S. Gan-Mor, N. Galili, and G. Rosenhouse, "Non-destructive impact tests of fruit," Presented at the 1990 International Summer Meeting, Hyatt Regency Columbus, Columbus OH, American Society of Agricultural Engineers, 2950 Niles Rd., St. Joseph, MI 49085-9659 USA., Paper No. 906042, June 24-27, 1990.
- [5] M. Delwiche and Y. Sarig, "A probe impact sensor for fruit firmness measurement," Transactions of the ASAE 34(1): 187-192, 1991.
- [6] J.A. Abbott and D.R. Massie, "Nondestructive firmness measurement of apples," Presented at the 1993 International Summer Meeting, Spokane Center, Spokane WA, American Society of Agricultural Engineers, 2950 Niles Rd., St. Joseph, MI 49085-9659 USA., Paper No. 936025, June 20-23, 1993.
- [7] P.R. Armstrong and G.K. Brown, "Apple firmness sorting using a nondestructive acoustic technique," Presented at the 1991 International Summer Meeting, Albuquerque Convention Center, Albuquerque, NM, American Society of Agricultural Engineers, 2950 Niles Rd., St. Joseph, MI 49085-9659 USA., Paper No. 916044, June 23-26, 1991.
- [8] W.K. Bilanski, C.L. Pen, and D.R. Fuzzen, "Apple bruise detection using optical reflectance parameters," Canadian agricultural engineering. 26(2): 111-114, 1984.
- [9] A. Mizrach, U. Flitsanov, and Y. Fuchs, "Utilization of an ultrasonic nondestructive method for measuring maturity of mango fruit," Presented at 1996 ASAE Annual International Meeting, Phoenix Civic Plaza, Phoenix, AZ, American Society of Agricultural Engineers, 2950 Niles Rd., St. Joseph, MI 49085-9659 USA., Paper No. 966012, July 14-18, 1996.
- [10] T.C. Pearson, M.A. Doster, and T.J. Michailides, "Automated detection of pistachio defects by machine vision," Transactions of the ASAE. 17(5): 729-732, 2001.

- [11] T. Yantarasi, S. Kawano, J. Sornsrivichai, and P. Chen, "Nondestructive NIR technique for sugar determination in intact mango," Proceedings of 5<sup>th</sup> International Symposium on Fruit, Nut and Vegetable Production Engineering. University of California, Davis, CA., 1997.
- [12] G.K. Brown, L.J. Segerlind, and R. Summitt, "Near-infrared reflectance of bruised apples," Transactions of the ASAE. 17(1): 17-19, 1974.
- [13] C.V. Greensill and D.S. Newman, "An experimental comparison of simple NIR spectrometers for fruit grading applications," Applied Engineering in Agriculture. 17(1): 69-76, 2001.
- [14] J. Lammertyn, B. Nicolai, K. Ooms, V. De Smedt, and J. De Baerdemaeker, "Non-destructive measurement of acidity, soluble solids, and firmness of Jonagold apples using NIR-spectroscopy," Transactions of the ASAE. 41(4): 1089-1094, 1998.
- [15] J. Varith, G.M. Hyde, A.L. Baritelle, J.K. Fellman, and T. Sattabongkot, "Non-contact bruise detection in apples by thermal imaging," Innovative Food Science and Emerging Technologies. 4: 211-218, 2003.
- [16] ธงชัย ยันตรศรี จินดา ศรศรีวิชัย จำนงค์ อุทัยบุตร กอบเกียรติ แสงนิล สมบูรณ์ อนันตลาโกชัย สมโภชน์ โกมลฉณี Zaman Alikhani กัลย์ กัลยาณมิตร เขมฐ์ ศิวะสมบูรณ์ วิไลวรรณ ยอดศรี สุขวัฒน์ จันทพร รณิก การตรวจสอบคุณภาพของผลไม้โดยไม่ทำลายผล โครงการนำร่อง Phase ที่ 2: การประเมินความแก่อ่อนของทุเรียนและคุณภาพภายในมังคุดโดย X-ray Computed Tomography และ NMR imaging. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) กรุงเทพฯ 2543
- [17] S.I. Cho and C.H. Chung, "Moisture and oil content measurements of red pepper powder using 10-MHz pulsed NMR," Transactions of the ASAE. 44(2): 377-381, 2001.
- [18] B.L. Upchurch, E.W. Tollner, Y.C. Hung, and S.E. Prussia, "Characterization of X-ray absorption in watercore apples," Presented at the 1989 International Summer Meeting, Quebec Municipal Convention Centre, Cuebec, PQ, Canada American Society of Agricultural Engineers, 2950 Niles Rd., St. Joseph, MI 49085-9659 USA., Paper No. 916044, June 25-28, 1989.
- [19] S. Kim and T. Schatzki, "Detection of pinholes in almonds through X-ray imaging," Transactions of the ASAE. 44(4) 997-1003, 2001.
- [20] S. Tersasaki, N. Wada, N. Sakurai, N. Muramatsu, R. Yamamoto, and D.J. Nevins, "Nondestructive measurement of kiwifruit ripeness using a laser doppler vibrometer," Transactions of the ASAE. 44(1): 81-87, 2001.
- [21] S.O. Nelson, W.R. Forbus Jr., and K.C. Lawrence, "Assessment of microwave permittivity for sensing peach maturity," Transactions of the ASAE. 38(2): 579-585.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] Chaltarangsin & Siripharich, 1990.
- [23] รัชฎา การพัฒนาเครื่องมือวัดความแข็งของก้านทุเรียน 2533
- [24] กัลย์ กัลยาณมิตร การใช้เทคนิค x-ray ตรวจสอบความแก่ของผลทุเรียน วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2540
- [25] K.Kalayanamitra, "Evaluation and classification of durian fruit maturity and its relationship with chemical constituents," Thai Journal of Agricultural Science, 38(1-2), pp.45-54, 2005.
- [26] H. L. Bertoni, "Radio propagation for modern wireless systems," Prentice Hall PTR, 2000.
- [27] S. R. Saunders, "Antennas and propagation for wireless communication systems," John Wiley & Sons Ltd, 1999.
- [28] J. Buckley, K. Aherne, B. O' Flynn, J. Barton, A. Murphy, and C. O'Mathuna, "Antenna performance measurements using wireless sensor networks," 2006 Electronic Components and Technology Conference, Electronic Components and Technology Conference, 2006. Proceedings. 56<sup>th</sup>, 6 pp, May 2006.
- [29] M. M. Carvalho and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "Modeling Single-Hop Wireless Networks under Rician Fading Channels," Wireless Communications and Networking Conference, 2004, vol. 1, pp. 219 – 224, March 2004.
- [30] Y. Ziade, H. Roussel, and W. Tabbara, "A theoretical model of propagation in forest compared with experimental results," Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. Proceedings. 2005 IEEE International, vol. 2, pp. 1357 – 1360, July 2005.
- [31] C. Xiao, Y.R. Zheng, and N.C. Beaulieu, "Statistical simulation models for Rayleigh and Rician fading," Communications, 2003. ICC '03. IEEE International Conference, vol. 5, pp. 3524 – 3529, May 2003.
- [32] T.B. Welch, J.R. Wood, R.W. McParlin, L.K. Schulze, T.P. Flaherty, S.G. CarloneHanson, R.J. Cahill, and R.A. Foran, "Very near ground RF propagation measurements for wireless systems," Vehicular Technology Conference Proceedings, 2000. VTC 2000-Spring Tokyo. 2000 IEEE 51st, vol. 3, pp. 2556 – 2558, May 2000.
- [33] B. Sklar, "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems .I. Characterization," Communications Magazine IEEE, vol. 35, pp. 90 – 100, July 1997.
- [34] G.G. Joshi, C.B. Dietrich, C.R. Anderson, W.G. Newhall, W.A. Davis, J. Isaacs, and G. Barnett, "Near-ground channel measurements over line-of-sight and forested paths," Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings, pp. 589 – 596, Dec. 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้