



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสร้างแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กสำหรับการแข่งขัน : ภาครับ

CanSat Design for Competition : Ground Station

ประเภททุน เงินรายได้ รหัสโครงการ 2561-02-01-016

นายพีระเมศร์ โชติกวิกิจญาดา

นายวิษณุ สุวัฒน์

นายสุภาชัย เชียงฉิน

นายสุวิจักขณ์ อภิสกุลโรจน์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้คณะฯ ประจำปีงบประมาณ 2561

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสร้างแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กสำหรับการแข่งขัน : ภาครัฐ

CanSat Design for Competition : Ground Station

ประเภททุน เงินรายได้ รหัสโครงการ 2561-02-01-016

นายพีระเมศร์ โชติกวิกิจญาดา

นายวิษณุ สุวัฒน์

นายสุภาชัย เชียงจิน

นายสุวิจักขณ์ อภิสกุลโรจน์

b00264376  
RC00023

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้คณะฯ ประจำปีงบประมาณ 2561

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การสร้างแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กสำหรับใช้ในการแข่งขัน : ภาครับ  
 แหล่งเงิน สำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
 ประจำปีงบประมาณ 2561 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท  
 ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ต.ค. 60 ถึง 30 ก.ย. 61  
 ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด  
 ดร.พีระเมศร์ โชติควีกิจญาดา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาโทรคมนาคม

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ถูกจัดทำโดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะใช้ในการเข้าร่วมการแข่งขัน CANSAT ในปี 2018 ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการออกแบบและสร้างแบบจำลองของดาวเทียมขนาดเล็กในส่วนของสถานีภาคพื้นดิน โดยมีขอบเขตในการรับผิดชอบเป็น 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ โปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลข้อมูล และ ระบบของสายอากาศที่ใช้ในการติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก โดยที่โปรแกรมที่ถูกออกแบบมานั้นสามารถที่จะแสดงผลข้อมูลที่เป็นตัวเลขที่ซับซ้อนให้อยู่ในรูปแบบของกราฟ, ตำแหน่งที่แสดงอยู่บน GOOGLE MAP, ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของวัตถุ และยังสามารถบันทึกข้อมูลเก็บไว้ให้อยู่ในรูปแบบของ EXCEL ในส่วนของระบบของสายอากาศที่ใช้ในการติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กนั้นยังสามารถแบ่งออกได้อีกเป็น 2 ส่วนคือ 1.สายอากาศ ซึ่งสายอากาศที่เราทำการออกแบบและสร้างนั้นอยู่ในย่านความถี่กลางที่ 2.45 GHZ เป็นสายอากาศชนิด แผ่นพิมพ์โครงสร้างแบบ 2 ชั้น ที่มีคุณลักษณะที่ดีในด้านของน้ำหนักที่เบารวมทั้งขนาดที่พกพาได้ง่ายและยังมีอัตราขยายที่เหมาะสมในการใช้งานอีกด้วย และส่วนที่ 2 คือระบบที่ใช้ในการติดตามดาวเทียมขนาดเล็กเป็นระบบที่ช่วยในการปรับทิศทางของสายอากาศให้ชี้ไปยังเป้าหมายโดยอัตโนมัติ

คำสำคัญ : สถานีภาคพื้นดิน, ระบบติดตามดาวเทียม

**Research Title:** CanSat Design for Competition : Ground Station

**Researcher:** Dr.Peeramed Chodkaveekityada

**Faculty:** Engineering

**Department:** Telecommunication

## ABSTRACT

The purpose of thesis is to develop a CanSat to attend the 2018 CanSat competition. Specifically, this thesis is about the design and implementation of a PC-based ground station for CANSAT. The scope of work of the ground station can be divided into two main parts: the graphical user interface and the system of antenna used for tracking the CanSat. The software for the ground station operation was designed to process complex numerical data and display them in the form of graph, as positions on google map, and as 3D motion as well as recording them in Excel format. The tracking antenna system can be divided into 2 parts: an antenna with suitable gain made of a stack of microstrip operating at 2.45 GHz which is compact and portable and a tracking platform that tracks the CanSat and move the antenna into the corresponding direction.

**Keywords :** Ground station, Tracking system

### กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับเงินสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปี  
งบประมาณ พ.ศ. 2561

คณะผู้วิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

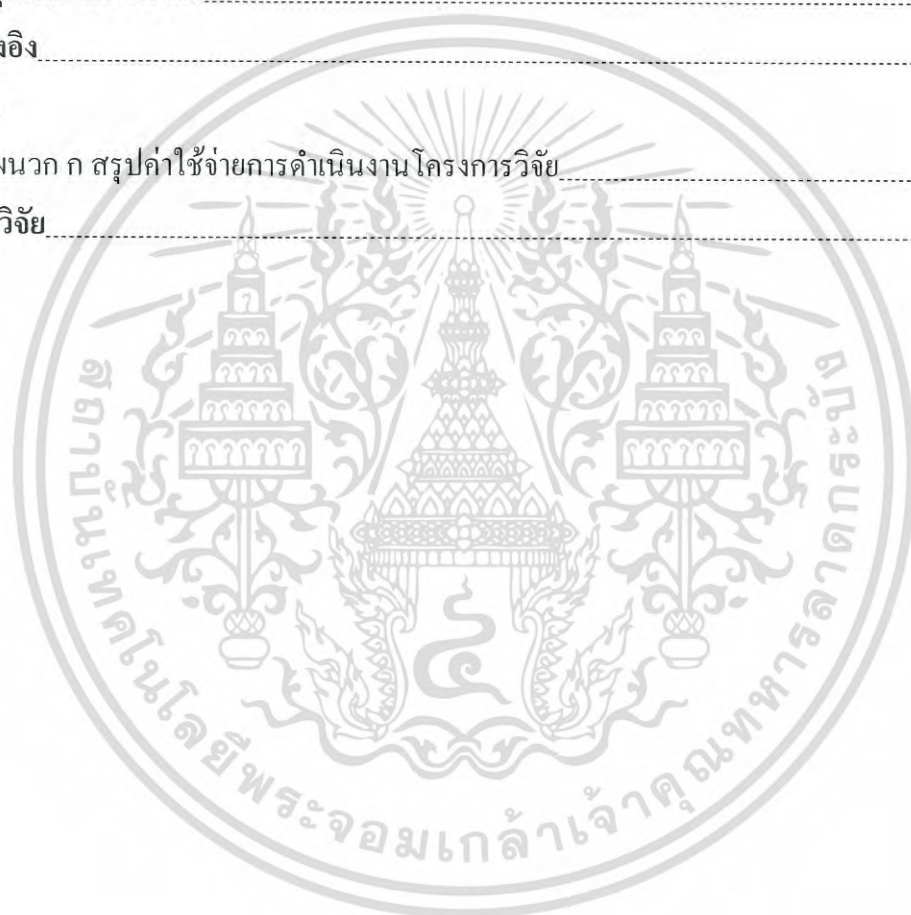
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>4</b>
2.1 แบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กสำหรับการแข่งขัน.....	4
2.2 รายละเอียดการแข่งขัน.....	7
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานและการประยุกต์ใช้งานสายอากาศ.....	8
2.4 หลักการการทำงานของสเต็ปเปอร์มอเตอร์.....	14
2.5 หลักการทำงานของจอยสติ๊กแบบแอนะล็อก.....	18
2.6 ทฤษฎีและหลักการของ Zigbee.....	20
<b>บทที่ 3 การออกแบบและการจัดทำารวิจัย</b> .....	<b>26</b>
3.1 การออกแบบ.....	27
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	56
3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง.....	64
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย</b> .....	<b>65</b>
4.1 ผลการทดสอบการทำงานของสายอากาศ.....	65
4.2 ผลการทดสอบการทำงานของระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก.....	68
4.3 ผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรม.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	73
5.1 สรุปผล.....	73
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย.....	74
เอกสารอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงาน โครงการวิจัย.....	79
ประวัตินักวิจัย.....	80



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อบังคับพื้นฐานในส่วนของภาครับ	7
2.2 ย่านความถี่และความยาวคลื่น	9
2.3 ลำดับการป้องกันกระแสแบบเฟสเดียว	16
2.4 ลำดับการป้องกันกระแสแบบสองเฟส	16
2.5 ลำดับการป้องกันกระแสแบบครึ่งเฟส	17
3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศที่ได้หลังจากปรับแต่งสายอากาศ	30
3.2 ขนาดและน้ำหนักของ โครงสร้างของระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก	33
3.3 คุณลักษณะของ Stepper Motor NEMA 17	57
3.4 คุณลักษณะของ Stepper Motor NEMA 23	58
3.5 คุณสมบัติต่างๆของ TB6600 Stepper Motor Driver	60
3.6 คุณสมบัติของอุปกรณ์ HVGA LCD TFT Non-Touch Screen	61
3.7 คุณสมบัติของบอร์ด Arduino Mega 2560	62
3.8 คุณสมบัติของ Xbee Pro 60 mW U.FL CONNECTION - SERIES 1	63
4.1 เปรียบเทียบค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากแบบจำลองและจากการสร้าง	67
4.2 ค่าตำแหน่ง GPS จากโปรแกรมแสดงผลเทียบกับโทรศัพท์	72

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แผนภาพการทำงาน โดยรวมของแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก	2
1.2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของภาครับ	3
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความยาวคลื่น	9
2.2 สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบ Unipolar	15
2.3 สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบ Bipolar	15
2.4 การควบคุมการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์	18
2.5 หลักการภายในจอยสติ๊กแบบแอนะล็อก	19
2.6 การกำหนดค่าความต้านทานจากตำแหน่งของสติ๊ก	19
2.7 องค์ประกอบของ Zigbee Protocol Stack	20
2.8 รายละเอียดของ Physical Layer ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4	21
2.9 Topology ในการใช้งาน Zigbee Network	22
2.10 Uart Data Packet ของข้อมูล 0X1F	23
2.11 รูปแบบของ AT Command	24
2.12 รูปแบบของ API Frame	24
3.1 บล็อกไดอะแกรมภาพรวมการทำงาน	26
3.2 โครงสร้างสายอากาศ Stack Microstrip	27
3.3 ของการปรับระยะห่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น	28
3.4 ผลการปรับขนาดความกว้างพื้นที่ระนาบกราวด์ Lg บนแผ่น Ground Plane	29
3.5 ผลของการปรับระยะห่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น	29
3.6 ผลการปรับค่า VSWR	30
3.7 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ YZ	31
3.8 บล็อกไดอะแกรมระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก	31
3.9 โครงสร้างของระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก	32
3.10 อลูมิเนียมโปรไฟล์	33
3.11 Stepper Motor NEMA 17	35
3.12 ประสิทธิภาพของ Stepper Motor NEMA 17 เมื่อใช้งานต่อเนื่องเทียบกันแต่ละแรงดันไฟฟ้า	35

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.13 Stepper Motor NEMA 23 .....	36
3.14 ประสิทธิภาพของ Stepper Motor NEMA 23 เมื่อใช้งานต่อเนื่องเทียบกันแต่ละ แรงดันไฟฟ้า .....	36
3.15 การคำนวณค่าของมุมจากโปรแกรม Simulator .....	38
3.16 หลักการในการหามุมในแนวแกนตั้ง .....	39
3.17 อุปกรณ์ HVGA LCD TFT Non-Touch Screen, Arduino Mega-2560 Shield .....	40
3.18 TB6600 Stepper Motor Driver .....	40
3.19 จอยสติ๊กแบบแอนะล็อก .....	41
3.20 การเชื่อมต่อสายของจอยสติ๊กแบบแอนะล็อกกับอุปกรณ์อื่น .....	41
3.21 โพล์ชาร์ตการทำงานของระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก .....	42
3.22 ความสามารถของโปรแกรม LabVIEW .....	43
3.23 รูปแบบของข้อมูลที่ทำกรรับจากแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก .....	43
3.24 โพล์ชาร์ตการแยกข้อมูล .....	44
3.25 ส่วนประกอบต่างๆของหน้าจอแสดงผล .....	45
3.26 โปรแกรมที่ทำการออกแบบ .....	47
3.27 โปรแกรมที่ทำงานในส่วนของการรับข้อมูล .....	47
3.28 โปรแกรมที่ทำงานในส่วนของการตาราง .....	48
3.29 โปรแกรมที่ทำงานในส่วนของการแยกข้อมูลและแสดงผลกราฟ .....	48
3.30 โปรแกรมที่ทำงานในส่วนของการแสดงผล GPS .....	49
3.31 Visa Resource Name .....	49
3.32 Visa Configure Serial Port .....	50
3.33 Visa Flush I/O Buffer .....	50
3.34 Table .....	50
3.35 Array Size .....	50
3.36 Index Array .....	51
3.37 Wait (ms) .....	51
3.38 Read Buffer .....	51

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.39 Case Structure.....	52
3.40 Fract/Exp String To Number.....	52
3.41 Match Pattern.....	52
3.42 Build Array.....	53
3.43 Get Date/Time In Seconds.....	53
3.44 Get Date/Time String.....	53
3.45 Build Waveform.....	54
3.46 Insert Into Array.....	54
3.47 Waveform Chart.....	54
3.48 Number To Decimal String.....	54
3.49 Invoke Node.....	55
3.50 Close Reference.....	55
3.51 Visa Close.....	55
3.52 While Loop.....	56
3.53 สายอากาศ Stack Microstrip.....	56
3.54 เครื่องสเปคตรัมอนาไลเซอร์.....	57
3.55 ประสิทธิภาพของ Stepper Motor NEMA 17 เมื่อใช้งานต่อเนื่องเทียบกับแต่ละแรงดันไฟฟ้า.....	58
3.56 ประสิทธิภาพของ Stepper Motor NEMA 23 เมื่อใช้งานต่อเนื่องเทียบกับแต่ละแรงดันไฟฟ้า.....	59
3.57 TB6600 Stepper Motor Driver.....	59
3.58 อุปกรณ์ HVGA LCD TFT Non-Touch Screen, Arduino Mega-2560 Shield.....	60
3.59 บอร์ด Arduino Mega 2560.....	61
3.60 Xbee Pro 60mW U.FL Connection - Series 1 (802.15.4).....	62
3.61 Xbee USB Dongle.....	63
3.62 ออสซิลโลสโคป.....	64
4.1 สายอากาศสร้างลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR4.....	65
4.2 ผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (RETURN LOSS) ช่วงแถบความถี่ 2.38-2.56 GHZ.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.3 กราฟการสูญเสียย้อนกลับ (RETURN LOSS) ช่วงความถี่ 2.38-2.56 GHZ.....	66
4.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นพิมพ์โครงสร้างสองชั้น.....	66
4.5 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (RETURN LOSS) ที่ความถี่กลาง 2.45 GHZ.....	67
4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นพิมพ์โครงสร้างสองชั้น.....	67
4.7 ทดสอบการหมุนของมอเตอร์.....	68
4.8 ทดสอบการหมุนของมอเตอร์.....	68
4.9 บล็อกไดอะแกรมที่ออกแบบ.....	69
4.10 หน้าจอแสดงผล.....	69
4.11 ส่วนประกอบต่างๆของหน้าจอแสดงผล.....	70
4.12 รูปแบบของข้อมูลที่ทำกรรับจากแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก.....	70
4.13 ค่าสัญญาณบิตข้อมูลเมื่อดูจากเครื่องออสซิลโลสโคป.....	71
4.14 เปรียบเทียบตำแหน่ง GPS จากโปรแกรมแสดงผลกับโทรศัพท์.....	71

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนั้นเทคโนโลยีทางด้านดาวเทียมเข้ามามีบทบาทกับชีวิตประจำวันของเราเป็นอย่างมากไม่ว่าจะเป็น การสื่อสาร, สื่อโทรทัศน์, การทหาร, กรมอุตุนิยมวิทยาและการสำรวจทรัพยากรธรรมชาติ ทั้งหมดล้วนแล้วเป็นสิ่งจำเป็น แต่เนื่องจากขนาดที่ใหญ่ทำให้ระบบมีความซับซ้อนรวมถึงต้นทุนที่สูงทำให้เป็นเรื่องยากที่จะนำอุปกรณ์ดาวเทียมมาศึกษาค้นคว้า จึงได้มีการสร้างแบบจำลองของดาวเทียมขึ้นมาเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการสร้างดาวเทียมขนาดใหญ่ขึ้นและง่ายต่อการนำไปศึกษาหาความรู้อีกด้วย ซึ่งเราจะใช้ชื่อในการเรียกอุปกรณ์นี้ว่า แบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก (CanSat)

แบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก (CanSat) หรือถูกเรียกอีกในชื่อหนึ่งว่า ดาวเทียมกระป๋อง เป็นเทคโนโลยีอย่างหนึ่งที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการจำลองการทำงานของดาวเทียมขนาดใหญ่ ทำให้มีขนาดเล็กและราคาถูกกว่าดาวเทียมขนาดใหญ่เป็นอย่างมากแต่เนื่องจากขนาดเล็กทำให้ความสูงที่ทำการปล่อยออกไปจะมีความสูงไม่เกิน 4 กิโลเมตรจากระดับพื้นดินซึ่งไม่ได้ถูกนำมาไปปล่อยเข้าสู่วงโคจรในอวกาศจริงๆ ภายในของดาวเทียมกระป๋องจะถูกติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ทำให้ดาวเทียมกระป๋องนั้นสามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดค่าของสภาพอากาศไม่ว่าจะเป็น อุณหภูมิ, ความดันและความเร็วของลม และยังมีระบบที่ทำให้เราทราบตำแหน่งของดาวเทียมกระป๋องได้อีกด้วย

วัตถุประสงค์หลักของการวิจัยนี้ถูกจัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการแข่งขัน ในปี 2018 และจะมีการจัดขึ้นทุกๆปี ซึ่งการแข่งขันถูกจัดทำขึ้นสำหรับให้ผู้ที่ความสนใจทางด้านของดาวเทียมได้ทำการออกแบบและสร้างแบบจำลองดาวเทียมขึ้นมาแข่งขันกัน โดยจะมีกฎกติกาและภารกิจ แตกต่างกันไปในแต่ละปีทำให้มีความท้าทายมากยิ่งขึ้น สำหรับเป้าหมายของการแข่งขันนั้นเป็นการเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองดาวเทียมขึ้นมาเพื่อก้าวสำคัญที่สามารถนำความรู้ที่มีไปต่อยอดได้ในอนาคตซึ่งเป็นพื้นฐานในการสร้างเทคโนโลยีที่สูงขึ้นเพื่อปล่อยสู่ชั้นอวกาศได้จริง

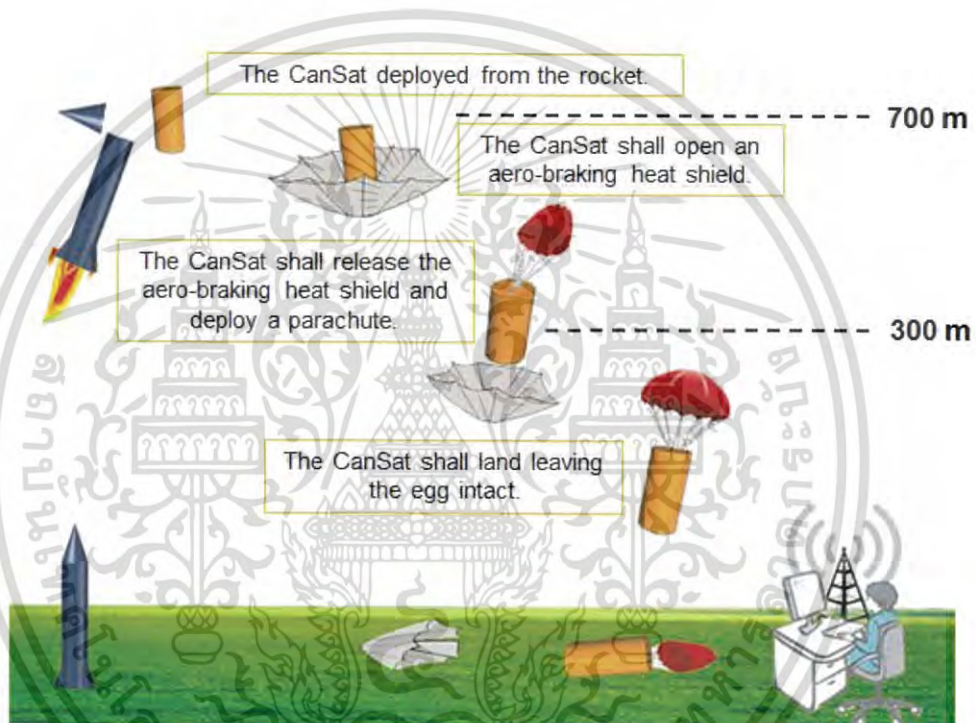
### 1.2 วัตถุประสงค์

- (1). ออกแบบและสร้างสถานีภาครับของแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กตามภารกิจการแข่งขันประจำปี 2018
- (2). ออกแบบและสร้างสายอากาศที่สามารถใช้ในการรับข้อมูลจากแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก
- (3). ออกแบบระบบของสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- (1). โปรแกรมของภาครับสามารถรับข้อมูลจากแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กตรงตามกฎกติกาการแข่งขันที่ได้กำหนดไว้
- (2). สายอากาศรูปแบบ Stack microstrip สามารถใช้งานได้จริงในย่านความถี่ 2.4 GHz โดยมีอัตราขยายประมาณ 6 dB ขึ้นไป
- (3). โครงสร้างของระบบของสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กสามารถรับน้ำหนักของสายอากาศได้

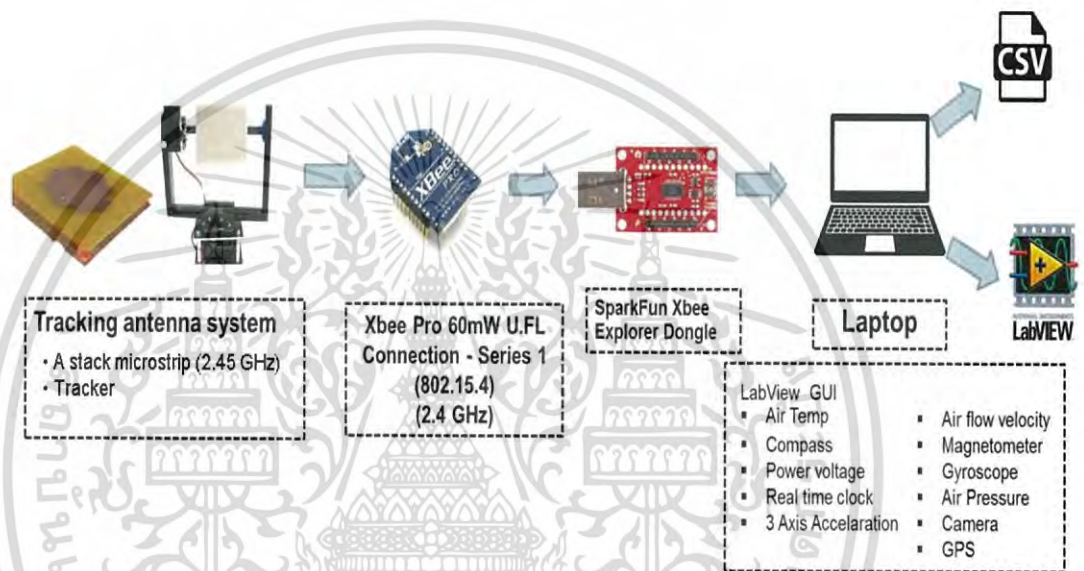


ภาพที่ 1.1 แผนภาพการทำงาน โดยรวมของแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก (CanSat)

จากภาพที่ 1.1 เป็นแผนภาพการทำงาน โดยรวมของขั้นตอนการปล่อยแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กตามกติกาการแข่งขันในปี 2018 โดยเริ่มจากการปล่อยจรวดออกสู่ชั้นบรรยากาศจากนั้นทำการปล่อยแบบจำลองของดาวเทียมขนาดเล็กออกจากจรวด ในขณะที่ปล่อยนั้นแบบจำลองของดาวเทียมขนาดเล็กจะเริ่มทำการส่งข้อมูลสภาพอากาศ ณ ขณะนั้นมายังสถานีภาคพื้นดินหรือภาครับ โดยในส่วนของภาครับก็จะนำข้อมูลที่ถูส่งมานั้นมาประมวลผลผ่านโปรแกรมที่ได้ทำการออกแบบไว้และแสดงผลออกมาผ่านจอมอนิเตอร์ ซึ่งข้อมูลที่ส่งมาจากแบบจำลองของดาวเทียมขนาดเล็กจะถูกส่งมาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กตกลงสู่พื้นดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการวิจัยนี้จัดทำในส่วนของภาครับซึ่งจะมีขั้นตอนการทำงานเป็นดังนี้ รับข้อมูลมาจากแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กผ่านสายอากาศ Stack microstrip โดยใช้โมดูล Xbee pro series 1 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างแบบจำลองขนาดเล็กกับภาครับ จากนั้นจะทำการส่งค่าที่ได้ออกมาประมวลผลผ่าน โปรแกรม LabVIEW และนำมาแสดงผลผ่านจอมอนิเตอร์ ซึ่งรูปแบบที่แสดงออกมานั้นจะขึ้นอยู่กับกฎระเบียบข้อบังคับของการแข่งขัน โดยจะมีบล็อกไดอะแกรมดังภาพที่ 1.2



ภาพที่ 1.2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของภาครับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

CanSat [1] คือดาวเทียมขนาดเล็กเท่าขนาดกระป๋องเครื่องดื่ม ที่จำลองการทำงานเหมือนดาวเทียมจริง โดยติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ไว้ภายในกระป๋องเครื่องดื่มหรือวัสดุรูปทรงขนาดเท่ากระป๋องเครื่องดื่ม

การปล่อย CanSat จะใช้จรวดยิงขึ้นไปบนท้องฟ้า หรือใช้ Drone หรือ บอลลูนอัดแก๊สปล่อยลงมาจากที่สูง ในระดับหลายร้อยเมตร ตัว CanSat เมื่อถูกปล่อยออกมาจากอุปกรณ์ขนส่ง ก็จะกางร่มชูชีพโดยอัตโนมัติ และระบบต่างๆ ภายในอุปกรณ์ CanSat ก็จะเริ่มทำงาน ซึ่งได้แก่ บันทึกภาพถ่ายหรือวิดีโอ ระบุตำแหน่งพิกัดของตัว CanSat วัดอุณหภูมิและความดันอากาศ สามารถรับส่งข้อมูลได้ทันทีผ่านผ่านอุปกรณ์ไร้สายส่งสู่อุปกรณ์รับสัญญาณภาคพื้นดิน

สถานีภาคพื้นดินหรือสถานีภาครับคือส่วนที่ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณจากอุปกรณ์ CanSat แล้วจากนั้นจะทำการประมวลผลข้อมูลที่ได้รับจากตัวอุปกรณ์ CanSat เนื่องจากข้อมูลของทาง CanSat ที่ถูกส่งมานั้นมีความซับซ้อนยากที่จะอ่านข้อมูลเพื่อให้สะดวกในการอ่านข้อมูล จึงได้นำโปรแกรมเข้ามาช่วยในสถานีภาคพื้นดิน โดยอุปกรณ์ในส่วนภาคพื้นดินจะประกอบไปด้วย โมดูลที่ใช้ในการรับข้อมูล, สายอากาศ, ระบบสายอากาศสำหรับติดตาม CanSat , และ โน้ตบุ๊คที่ใช้ในการแสดงโปรแกรม

การสื่อสารผ่านดาวเทียมนับว่าเป็นวิธีการส่งข้อมูลข่าวสารในปัจจุบันที่นิยมกันมาก ซึ่งอำนวยความสะดวกในการใช้งานได้อย่างกว้างขวาง และรวดเร็วเป็นการสื่อสารที่วิวัฒนาการมาจากการสื่อสารแบบไมโครเวฟ ในช่วงแรกๆ ดาวเทียมได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นมาเพื่อใช้ในการค้นหาและพัฒนาการใช้ทางด้านการพยากรณ์อากาศ การค้นหาทรัพยากรธรณี และการสื่อสารคือ ดาวเทียมสื่อสาร ที่ใช้ในวงการระบบโทรทัศน ดาวเทียมสื่อสารที่ถูกส่งไปครั้งแรกในปี พ.ศ. 2508 โดยองค์การโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunications Satellite Organization) หรือเรียกย่อว่า INTELSAT

#### 2.1 แบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กสำหรับการแข่งขัน (CANSAT)

##### 2.1.1 ระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม (Satellite Communication System) [2]

ดาวเทียมสื่อสารมีต้นกำเนิดมาจากความคิดของนักเขียนนิยายวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ชื่อ อาร์เธอร์ ซี. คลาร์ก (Arthur C. Clarke) ซึ่งเขียนบทความเรื่อง “Extra Terrestrial Relays ” ลงในนิตยสาร Wireless World เมื่อ พฤษภาคม ค.ศ.1945 โดย อาร์เธอร์ ซี.คลาร์ก ได้เสนอแนวความคิดในการติดต่อสื่อสารรอบโลก โดยใช้สถานีถ่ายทอดสัญญาณในอวกาศที่ความสูงระยะประมาณ 42,000 กิโลเมตร จากจุดศูนย์กลางโลก โดยมีความเร็วเท่ากับความเร็วที่โลกหมุนรอบตัวเอง 1 รอบ และใช้เพียง 3 สถานีก็จะครอบคลุมพื้นที่รอบโลกทั้งหมด ซึ่งตรงกับหลักการของดาวเทียมวงโคจรค้างฟ้า (GEO Stationary Orbit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.2 องค์ประกอบระบบสื่อสารดาวเทียม (Satellite System)

ในระบบการสื่อสารดาวเทียมจะมีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ดาวเทียมอยู่ในอวกาศระบบควบคุมและสั่งการ สถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน โดยมีการทำงานง่ายๆ ดังนี้ สถานีภาคพื้นดินจะส่งสัญญาณขาขึ้น (Uplink) กำลังส่งสูงผ่านจานสายอากาศไปยังจานสายอากาศและเครื่องบนดาวเทียม ทำการขยายสัญญาณ, แปลงความถี่ แล้วขยายให้กำลังสูงส่งผ่านจานสายอากาศเป็นสัญญาณขาลง (Downlink) มายังจานสายอากาศรับสถานีภาคพื้นดิน สถานีรับจะทำการขยายสัญญาณแล้วดำเนินการวิธีนำข้อมูลต่างๆ ไปใช้งาน

1) สถานีภาคพื้นดิน (Earth Station) ประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือระบบจานสายอากาศ, ระบบการส่ง, ระบบการรับ และอุปกรณ์ช่องสัญญาณ โดยมีภาคย่อยที่สำคัญ คือ

1. จานสายอากาศ (Antenna) ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นสัญญาณขาขึ้นไปยังดาวเทียม และทำหน้าที่รับคลื่นสัญญาณขาลงมาเข้าเครื่องรับจานสายอากาศที่ดีต้องมีคุณสมบัติ อัตราขยายกำลังสูง, ลำคลื่น (Beamwidth) แคบ, ลำคลื่นข้าง (Sidelobe) ต่ำ, ค่า Noise Temperature ต่ำ และมีความเที่ยงตรงสูง สามารถปรับทิศทางไปยังตำแหน่งดาวเทียมได้ตามต้องการ ปกตินิยมใช้สายอากาศแบบพาราโบลอยด์เป็นตัวสะท้อนสัญญาณ (Reflector) เพื่อให้รวมลำคลื่นได้แคบ ขนาดของจานสายอากาศโดยทั่วไปขึ้นกับความถี่ใช้งาน ความถี่ยิ่งสูงขนาดจานสายอากาศยิ่งเล็ก เช่น จานสายอากาศย่านความถี่ Ku-band จะเล็กกว่าย่านความถี่ C-band นอกจากนี้ยังขึ้นกับอัตราขยายกำลัง (Gain) ของสายอากาศ ถ้าต้องการอัตราขยายกำลังขยายสูง จานสายอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้สามารถติดตามตำแหน่งดาวเทียมได้แม่นยำ จะต้องมียุทธศาสตร์ควบคุมการหันของจานสายอากาศทั้งทางมุมทิศ (Azimuth) และทางมุมสูง (Elevation) อย่างดี ค่า G/T หรือ Gain ต่อ Thermal noise จะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของจานสายอากาศ

2. ภาคขยายกำลังสูง (High Power Amplifier:HPA) ทำหน้าที่ขยายกำลังให้สูงก่อนส่งกำลังออกอากาศ อาจใช้หลอด Klystron, TWT (Travelling Wave Tube) หรือ Solid State เป็นภาคขยายกำลังก็ได้โดยหลอด Klystron จะให้กำลังขยายค่อนข้างสูงแต่ค่อนข้างยุ่งยากในการใช้งานแบบ Solid State ที่เรียกว่า SSPA (Solid State Power Amplifier) ให้กำลังขยายไม่สูงหนักแต่สะดวกในการใช้งาน ส่วนภาคขยายปานกลางและมีใช้งานมาพอสมควร

3. ภาคขยายสัญญาณรบกวนต่ำ (Low Noise Amplifier: LNA) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณกำลังต่ำมากๆ ที่เครื่องรับได้เพื่อให้มีกำลังพอที่จะนำมาใช้งาน โดยให้มีสัญญาณรบกวนต่ำที่สุดซึ่งจะดูคุณสมบัติได้จากค่า Noise Temperature

4. ภาคแปลงความถี่ขาขึ้น (Up Converter) และภาคแปลงความถี่ขาลง (Down Converter) ภาคแปลงความถี่ขาขึ้น ทำหน้าที่แปลงความถี่ IF ให้เป็นความถี่ RF ก่อนส่งอากาศ และภาคแปลงความถี่ IF เพื่อให้สะดวกในการขยายสัญญาณ

2) ดาวเทียม [3] เป็นเครื่องมือทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อน มีส่วนประกอบหลายๆ อย่างประกอบเข้าด้วยกัน และสามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติ สามารถโคจรรอบโลกด้วยความเร็วที่สูงพอที่จะหนีจากแรงดึงดูดของโลกได้ การสร้างดาวเทียมนั้นมีความพยายามออกแบบให้ชิ้นส่วนต่างๆ ทำงานได้อย่างประสิทธิภาพมากที่สุด ดาวเทียมประกอบด้วยส่วนประกอบเป็นจำนวนมาก แต่ละส่วนจะมีระบบควบคุมการทำงานแยกย่อยกันไป และมีอุปกรณ์เพื่อควบคุมให้ระบบต่างๆ ทำงานร่วมกัน โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่ของดาวเทียมประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ระบบควบคุมตำแหน่งและวงโคจรดาวเทียมปกติจะประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ดังนี้ได้แก่ มอเตอร์จรวดที่คอยทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนวงโคจรดาวเทียมให้อยู่ในวงโคจรถูกต้องเมื่อเกิดการคลาดเคลื่อน (Beam) มายังตำแหน่งบนพื้นโลกอย่างถูกต้องระบบการควบคุมตำแหน่งอาจใช้ตัวดาวเทียมหมุน ที่เรียกว่า spinners หรือ ใช้ Momentum wheels ช่วยวิธีหลังนี้นิยมใช้ในปัจจุบัน เพราะทำให้ลดขนาดแผงโซลาร์เซลล์ลงได้ถึง 1/3 เท่า ส่วนระบบควบคุมวงโคจรนั้นเราใช้ Gas Jet ควบคุมวงโคจรให้อยู่ในระนาบเส้นศูนย์สูตร

2. ระบบตรวจจับและสั่งการดาวเทียม (Telemetry, Tracking and Command:TT&C) ระบบนี้มีทั้งส่วนที่อยู่บนดาวเทียมและบนพื้นดินทำงานสัมพันธ์กัน โดย Telemetry จะส่งข้อมูลได้จากการตรวจจับ (Sensor) สัญญาณควบคุมต่างๆ บนดาวเทียม แล้วส่งกลับมายังสถานีภาคพื้นดิน ระบบ Tracking บนภาคพื้นดินจะติดตามดาวเทียมและรับสัญญาณจากระบบ Telemetry ส่งให้ระบบ Command นำเอาสัญญาณไปประมวลในระบบคอมพิวเตอร์เป็นสัญญาณสั่งการส่งไปยังดาวเทียม เพื่อปรับแก้ตำแหน่งวงโคจรและระบบควบคุมต่างๆ ในตัวดาวเทียมให้ถูกต้อง

3. ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ดาวเทียมทุกแบบได้รับพลังงานมาจากแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cells) เพื่อนำไปใช้ในระบบสื่อสารของดาวเทียม โดยเฉพาะภาคส่งพลังงานที่เหลือจะนำไปใช้ในส่วนอื่นๆ ซึ่งเรียกว่า Housekeeping เพื่อสนับสนุนดาวเทียมให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

4. ระบบสื่อสารดาวเทียม เป็นส่วนประกอบหลักของดาวเทียมสื่อสารระบบอื่นเป็นเพียงส่วนสนับสนุนระบบนี้จะประกอบด้วยจานสายอากาศที่คอยรับส่งสัญญาณแบนด์กว้าง, ภาครับ-ส่ง และขยายกำลังของสัญญาณ ที่เรียกว่า Transponder ซึ่งเป็นหน่วยรับ-ส่งสัญญาณแต่ละช่องในตัวดาวเทียม

5. ระบบสายอากาศ ระบบนี้อาจถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของระบบสื่อสารดาวเทียม โดยแยกออกมาจากทรานสปอนเดอร์ (Transponder) ปัจจุบันดาวเทียมมีระบบจานสายอากาศที่ซับซ้อนเพื่อให้สามารถแยกลำคลื่น (beam) ส่งมาครอบคลุมพื้นโลกในรูปแบบต่างๆ ได้ตามต้องการ

## 2.2 รายละเอียดการแข่งขัน Cansat Competition 2018

การวิจัยเรื่องนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการแข่งขัน CanSat Competition 2018 [4] ที่จะจัดขึ้นทุกๆปี โดยการแข่งขันทันนี้ถูกจัดขึ้นโดยหน่วยงาน American Astronautical Society (AAS) และ American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) ซึ่งการแข่งขันนี้คือการแข่งขันการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่มีการทำงานเลียนแบบดาวเทียม (CanSat) โดยต้องออกแบบและสร้างให้เหมาะสมตามกฎกติกาการแข่งขัน และในแต่ละปีก็จะมีมีการเพิ่มภารกิจต่างๆเพื่อให้มีความท้าทายแก่ผู้แข่งขัน โดยจะมีการออกข้อบังคับที่ใช้สำหรับการแข่งขันดังนี้

ภารกิจประจำปี 2018 [5] คือจำลอง Space probe (CanSat) เพื่อเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ โดย Probe จะต้องบรรจุไข่ไก่ขนาดใหญ่ โดยจะต้องรักษาไข่ไก่ให้ไข่ไก่แตกระหว่างการร่อนลงสู่พื้นดิน ซึ่งลำดับการดำเนินงานต้องเป็นดังนี้ [6]

- 1) Probe (CanSat) จะถูกปล่อยที่ระดับความสูง 670 เมตร ถึง 725 เมตร และจากนั้นก็จะถูกปล่อยออกจากจรวด (Rocket) โดยจะต้องไม่ถูกการควบคุมทิศทางในการปล่อย
- 2) ในขณะที่ปล่อย Probe จะเปิด aero-braking heat shield ทันที และร่อนลงด้วยอัตราความเร็ว 50 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะต้องรักษาความเสถียรภาพให้มั่นคง
- 3) ที่ระดับความสูง 300 เมตร Probe (CanSat) จะปล่อย aero-braking heat shield ทิ้งไป พร้อมกับปล่อยร่มชูชีพและลดความเร็วในการร่อนลงให้เหลือ 5 เมตรต่อวินาที
- 4) ขณะที่ร่อนลงสู่พื้นดิน Probe (CanSat) จะต้องปกป้องไข่ไก่เพื่อไม่ให้ไข่แตกซึ่งรายละเอียดข้อบังคับการแข่งขันพื้นฐานในส่วนของภาครับ จะแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อบังคับพื้นฐานในส่วนของภาครับ

ข้อที่	ข้อกำหนด
1	XBEE ที่ใช้สำหรับการส่ง telemetry ต้องมีความถี่ที่ 2.4 GHz ทั้ง Series 1 และ Series2 หรือที่ความถี่ 900 MHz
2	XBEE ต้องมี NETID/PANID ซึ่งตั้งตามหมายเลขของแต่ละทีม
3	XBEE ห้ามใช้โหมดบรอดแคสต์
4	แต่ละทีมต้องพัฒนาสถานีภาคพื้นดินของตัวเอง
5	Telemetry ทั้งหมดจะต้องแสดงแบบเรียลไทม์ขณะที่ร่อนลงสู่พื้นดิน
6	Telemetry ทั้งหมดจะต้องแสดงผลในหน่วยทางวิศวกรรม เช่น เมตร, เมตรต่อวินาที และ องศาเซลเซียส เป็นต้น
7	ไม่อนุญาตให้ใช้เลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8	สถานีภาคพื้นดินจะต้องมีคอมพิวเตอร์แล็ปท็อปที่มีการใช้งานแบตเตอรี่อย่างน้อย 2 ชั่วโมง XBEE และสายอากาศ
9	สถานีภาคพื้นดินต้องเป็นแบบพกพาเพื่อให้ทีมสามารถวางตำแหน่งไว้ที่สถานีปฏิบัติงานภาคพื้นดิน โดยจะไม่มีไฟ AC อยู่ที่บริเวณที่ทำการปฏิบัติงานของสถานีภาคพื้นดิน

## 2.3 ทฤษฎีพื้นฐานและการประยุกต์ใช้งานสายอากาศ [7]

### 2.3.1 หน้าที่และความหมายของสายอากาศ

สายอากาศ อุปกรณ์สำหรับรับและส่งคลื่นความถี่วิทยุ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และในทางกลับกัน ก็เปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานไฟฟ้าเช่นกัน สายอากาศมีหลายขนาดและรูปแบบขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น สายอากาศสำหรับเครื่องรับโทรทัศน์ในบ้านส่วนใหญ่เป็นสายอากาศชนิด ยากิ-อูตะ มักติดตั้งไว้บนหลังคาทำด้วยอะลูมิเนียมเพราะน้ำหนักเบาและทนต่อสภาพอากาศได้ดีกว่าโลหะทั่วไป สายอากาศของไม้คัลลอย เป็นเพียงสายไฟสั้น ๆ หรือสายอากาศของโทรศัพท์มือถือเป็นเพียงจุดเชื่อมต่อเล็ก ๆ เท่านั้น คำว่าสายอากาศเป็นศัพท์เฉพาะด้านไฟฟ้า และ อิเล็กทรอนิกส์ บัญญัติขึ้นจากคำศัพท์ในภาษาอังกฤษ "Antenna" หรือ "Aerial" ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์อาจเขียนอักษรย่อ Ant. อย่างไรก็ตามบุคคลทั่วไปนิยมเรียกว่า เสาอากาศ อาจจะเป็นเพราะเดิมใช้เสาสูงๆสำหรับติดตั้งสายอากาศนั่นเอง

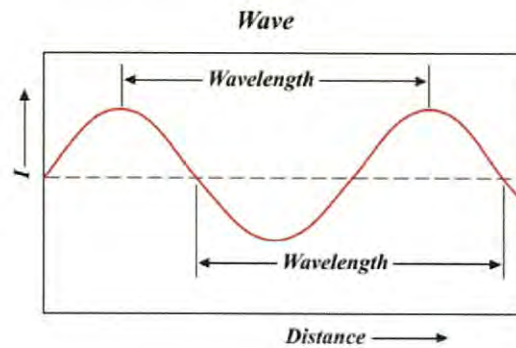
สายอากาศแบ่งตามรูปแบบการรับ-ส่งคลื่นได้ดังนี้

- (1) สายอากาศแบบรอบตัว สามารถรับ-ส่งคลื่นได้ดีในทุกทิศทางเฉลี่ยกันไปโดยรอบ
- (2) สายอากาศแบบกึ่งรอบตัว สามารถรับ-ส่งคลื่นได้ดีเกือบรอบตัวแต่มีอัตราขยายสูงกว่าแบบรอบตัว
- (3) สายอากาศแบบทิศทางเดียว สามารถรับ-ส่งคลื่นได้ดีในทิศทางที่กำหนดและจะมีอัตราขยาย (Gain)

สูงกว่าประเภทอื่น

### 2.3.2 ความถี่และความยาวคลื่น

โดยทั่วไปนิยมแบ่งคลื่นวิทยุออกเป็นย่านความถี่ต่าง ๆ โดยมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hertz) ใน ประวัติศาสตร์การวิทยุแบ่งคลื่นวิทยุตามความยาวคลื่น (Wavelength) ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความยาวคลื่นดังแสดงในภาพที่ 2.1 [8] และมีย่านความถี่และความยาวคลื่นแสดงดังตารางที่ 2.2



ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความยาวคลื่น

ตารางที่ 2.2 ย่านความถี่และความยาวคลื่น

ย่านความถี่	ความถี่	ความยาวคลื่น
Very Low Frequency (VLF)	ต่ำกว่า 30 kHz	ยาวกว่า 10 km
Low Frequency (LF)	30-300 kHz	10-1 km
Medium Frequency (MF)	300-3000 kHz	1000-100 m
High Frequency (HF)	3-30 MHz	100-10 m
Very High Frequency (VHF)	30-300 MHz	10-1 m
Ultra High Frequency (UHF)	300-3000 MHz	100-10 cm
Super High Frequency (SHF)	3-30 GHz	10-1 cm
Extremely High Frequency (EHF)	30-300 GHz	mm

### 2.3.3 คุณสมบัติและพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ

สายอากาศชนิดต่าง ๆ ที่มีการใช้งานอยู่ทั่วไปมีคุณสมบัติและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องพิจารณาประกอบการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศเพื่อช่วยในการตัดสินใจและประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานต่าง ๆ มากมาย โดยมีส่วนสำคัญ ดังนี้

#### 2.3.3.1 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage standing Wave Ratio)

อัตราส่วนระหว่างแรงดันค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดในคลื่นนิ่งเรียกว่า อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) ดังสมการที่ (2.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2.1)$$

$\Gamma$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน (Voltage Reflection Coefficients) สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน ยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนผลต่างและ ผลรวมระหว่างโหลดกับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ ดังสมการที่ (2.2)

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.2)$$

$\Gamma$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน (Voltage Reflection Coefficients)

$V_r$  คือ แรงดันสะท้อนกลับ

$V_i$  คือ แรงดันตกกระทบ

$Z_L$  คือ โหลดอิมพีแดนซ์

$Z_0$  คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

ในกรณีที่ต่อไว้ด้วยแมตซ์ชิงโหลดนั้นค่า VSWR เป็น 1 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด

### 2.3.3.2 การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแสดงค่ากำลังที่สูญเสียที่โหลด เมื่อ อิมพีแดนซ์ของสายส่งและสายอากาศไม่แมตซ์กัน การสูญเสียย้อนกลับมีความสัมพันธ์กับ VSWR ซึ่งเป็น การแสดงการแมตซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งกับสายอากาศตามสมการ โดยการสูญเสียย้อนกลับสามารถ หาได้จากสมการที่ (2.3)

$$S_{11} = -20 \log_{10} |\Gamma| \text{ (dB)} \quad (2.3)$$

สำหรับการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่สมบูรณ์ระหว่างสายส่งและสายอากาศ เมื่อ  $\Gamma = 0$  ค่าความสูญเสียย้อนกลับเป็นอนันต์ แสดงว่าไม่มีกำลังงานสะท้อนกลับ ในทำนองเดียวกันเมื่อ  $\Gamma = 1$  ค่าความสูญเสียย้อนกลับจะเป็น 0 dB ซึ่งแสดงว่ากำลังงานสะท้อนกลับหมด

### 2.3.3.3 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency)

ประสิทธิภาพของสายอากาศเป็นพารามิเตอร์ที่รวมประสิทธิภาพการสูญเสียที่ สายอากาศและใน โครงสร้างของสายอากาศการสูญเสียต่าง ๆ หาได้จากการสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่แมตช์กันระหว่างสายส่งกับ สายอากาศการสูญเสียจากตัวนำและฉนวน โดยประสิทธิภาพรวมของสายอากาศสามารถเขียนเป็นสมการที่ (2.4)

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (2.4)$$

$e_t$  คือ ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ

$e_r$  คือ  $(1 - |\Gamma|^2)$  ประสิทธิภาพการสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่แมตช์

$e_c$  คือ ประสิทธิภาพของตัวนำ

$e_d$  คือ ประสิทธิภาพของฉนวน (dielectric) และ โดยทั่วไป  $e_c$  จะรวมเป็นตัวเดียวกัน

$$e_{cd} = e_c e_d = \frac{R_R}{R_R + R_L} \quad (2.5)$$

$R_R$  คือ ความต้านทานจากการแผ่พลังงานคลื่นออกไป

$R_L$  คือ ความต้านทานที่โหลด

### 2.3.3.4 สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ไดเรคตีวิตีเป็นการบอกความสามารถเชิงทิศทางของสายอากาศ เป็นอัตราส่วนระหว่าง ความเข้ม ของการแผ่พลังงานในทิศทางที่สนใจกับความเข้มของการแผ่พลังงาน โดยเฉลี่ย เมื่อมีการแผ่ พลังงานออกไป รอบ ทิศทางอย่างเท่าเทียมกัน โดยไม่คิดกำลังงานส่วนที่สูญเสียไปดังสมการที่ (2.6) และ สมการที่ (2.7)

$$D = \frac{U}{U_i} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.6)$$

$D$  คือ สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ

$U$  คือ ความเข้มของการแผ่กำลังงาน

$U_i$  คือ ความเข้มของการแผ่กำลังงานเฉลี่ย

$P_{rad}$  คือ กำลังงานที่สายอากาศแผ่ออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปถ้าไม่กำหนดทิศทางใช้สภาพเจาะจงทิศทางในทิศทางที่สายอากาศแผ่พลังงานได้ดีที่สุด

$$D_0 = \frac{U_{\max}}{U_i} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}} \quad (2.7)$$

### 2.3.3.5 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

อัตราขยายของสายอากาศเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากโคเรคทีวิตี โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่โคเรคทีวิตีแสดงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น การคิดอัตราขยายของสายอากาศ วัดเทียบกับสายอากาศอ้างอิง โดยอัตราขยายของสายอากาศส่ง คือกำลังส่งของอัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามตามทิศทางที่มีการแผ่กระจายคลื่นมากที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มสนามที่จุดเดียวกันของสายอากาศอ้างอิง หรือแสดงในรูปของอัตราส่วนของกำลังงานที่ต้องใช้ในการส่ง ของสายอากาศทั้งสอง เพื่อให้เกิดความเข้มสนามขนาดเท่ากัน (ณ จุดเดียวกัน) ในทิศทางที่มีการแผ่กระจายคลื่นมากที่สุด หรืออัตราขยายของสายอากาศรับ คือ อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มการแผ่พลังงานของสายอากาศทดสอบกับสายอากาศอ้างอิง ณ จุดตั้งสายอากาศที่เดียวกัน

การใช้สายอากาศอ้างอิงมักเป็นแบบไดโพลขนาด  $\lambda/2$  หรือแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) ซึ่งมีลักษณะพิเศษ คือ กระจายคลื่นได้รอบตัวทุกทิศในปริมาณที่เท่ากัน

อัตราขยายกำลัง (Power Gain) ของสายอากาศ ในทิศทางที่กำหนดให้ นั้นมีค่าเท่ากับ An คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ในทิศทางนั้น ต่อ (หาร) กำลังงานสุทธิที่ สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่งเมื่อไม่กำหนดทิศทางไว้โดยทั่วไปคิดอัตราขยายกำลังในทิศทางที่มีการแผ่กระจายคลื่นแรงที่สุดตามสมการที่ (2.8)

$$\text{Gain} = \frac{4\pi U(\theta, f)}{P_{\text{in}}} \quad (2.8)$$

อัตราขยายสัมพัทธ์ เป็นอัตราส่วนของอัตราขยายกำลังในทิศทางที่กำหนดให้ ต่ออัตราขยายกำลังของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น โดยกำลังงานที่เอนเข้าสายอากาศทั้งสอง นั้นต้องเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบเป็นสายอากาศไดโพล สายอากาศปากแตร หรือสายอากาศอื่น ๆ ซึ่งคำนวณอัตราขยายได้ง่ายหรือรู้ค่าอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบ เป็นไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้นจึงได้เป็นสมการที่ (2.9)

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta, f)}{P_{in}} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $P_{in}$  คือ กำลังงานที่ป้อนให้กับไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด ( $p_{rad}$ ) สัมพันธ์กับกำลังงานที่เอนให้สายอากาศ ( $p_{in}$ ) ดังสมการที่ (2.10)

$$p_{rad} = e_t P_{in} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $e_t$  คือประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย) ทำให้สมการที่ (2.9) และ (2.10) มีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ (2.11)

$$G_g(\theta, f) = \frac{[4\pi U(\theta, f)]}{P_{rad}} \quad (2.11)$$

และมีความสัมพันธ์กับอัตราขยายไดเรกทิฟ ตามสมการที่ (2.12)

$$G_g(\theta, f) = e_t D_g \quad (2.12)$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าสูงสุดของอัตราขยายจะสัมพันธ์กับไดเรกทิวิตี แสดงดัง สมการที่ (2.13)

$$\begin{aligned} G_0 &= G_g(\theta, f)|_{max} \\ &= e_t D_g(\theta, f)|_{max} \\ &= e_t D_0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

ในทางปฏิบัติเมื่อกล่าวถึงอัตราขยายถึง อัตราขยายกำลังที่มีค่าสูงสุด แสดงดังสมการที่ (2.14)

$$G_0(\text{dB}) = 10 \log_{10} [e_t D_0] \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.6 อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance)

พิจารณาสายอากาศเสมือนเป็นชิ้นส่วนหนึ่งในวงจรไฟฟ้า เมื่อต่อแหล่งกำเนิด สัญญาณเพื่อ {เอนาA เล็งงานให้กับสายอากาศ พลังงานจะไหลเข้าสู่สายอากาศที่ละน้อยเนื่องจากการต้าน การไหลของพลังงานที่เรียกว่า อิมพีแดนซ์หรือความต้านทานเชิงซ้อนเกิดขึ้น อิมพีแดนซ์ดังกล่าวจะปรากฏที่ ขั้วของสายอากาศ เรียกว่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า ( $Z_{in}$ ) ดังสมการที่ (2.15)

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad (2.15)$$

$X_{in}$  คือความต้านทานเชิงจินตภาพที่ทำให้เกิดการสะสมของพลังงานในบริเวณสนาม ใกล้สายอากาศ โดยไม่แพร่กระจายออกไป และ  $R_{in}$  ประกอบด้วยสองส่วนคือ  $R_r$  หมายถึงความต้านทานพลังงานคลื่นที่แผ่ออกไปโดยสายอากาศ และ  $R_l$  หมายถึงความต้านทานที่ไหลลุด ซึ่งรวมถึงความต้านทาน จากการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความร้อน สาร โดริเล็กตริก และตัวนำ

### 2.3.3.7 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศเป็นช่วงของความถี่ที่สามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่งช่วงความถี่ ถูกกำหนด โดย VSWR ประมาณ 2 หรือพิจารณาจากการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ที่ระดับ -10 dB ดังสมการที่ (2.16)

$$BW_{\text{narrowband}} (\%) = \frac{f_u - f_l}{f_c} \times 100 \quad (2.16)$$

BW คือ แบนด์วิดท์ของสายอากาศ

$f_u$  คือ ขอบความถี่สูงของย่านความถี่

$f_l$  คือ ขอบความถี่ต่ำของย่านความถี่

$f_c$  คือ ความถี่กลางของย่านความถี่

## 2.4 หลักการทำงานของสเต็ปเปอร์มอเตอร์

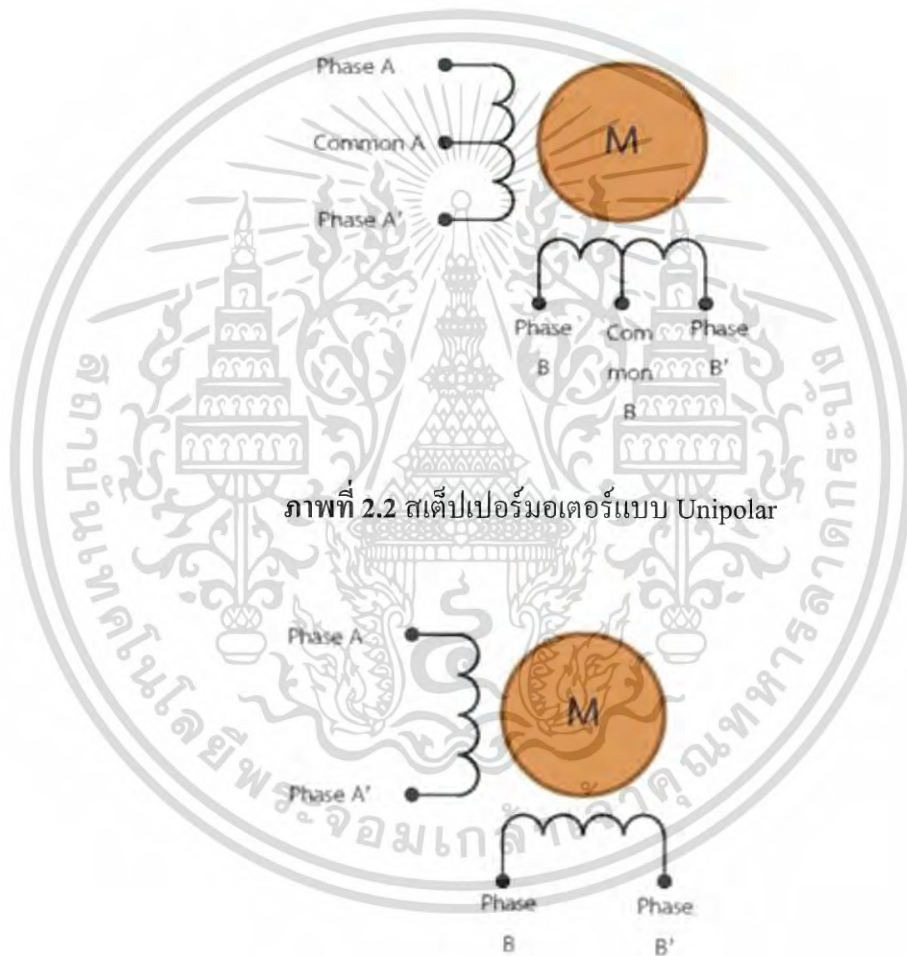
### 2.4.1 ข้อมูลของสเต็ปเปอร์มอเตอร์และหลักการทำงานของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ [9]

สเต็ปเปอร์มอเตอร์ คือ มอเตอร์ที่มีการหมุนเป็นขั้นๆ โดยแกนของมอเตอร์จะหมุนด้วยมุมค่าคงที่เมื่อมี สัญญาณ Pulse มากระตุ้น เช่น 0.9, 1.8, 5, 7.5, 15 หรือ 45 องศาต่อสเต็ป เนื่องจากการควบคุมสเต็ปเปอร์มอเตอร์ สามารถใช้สัญญาณดิจิทัลควบคุมได้โดยตรง และสามารถบังคับทิศทางและความเร็วของแกนหมุน สเต็ปเปอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ โดยมีข้อดี ดังนี้ หมุนได้ครบ 360 องศา ต่อเนื่อง, การควบคุมตำแหน่งไม่ต้องอาศัยตัวตรวจจับการหมุน, ไม่ต้องใช้แปรงถ่านดังนั้นจึงทำให้ไม่มีส่วนที่สึกหรอและปัญหาจากประกายไฟ และการควบคุมโดยทางวงจรถิศจิตอลหรือไมโครคอนโทรลเลอร์ทำได้ง่ายและสะดวก

โดยทั่วไป สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Two-phase Stepper Motor) สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ Unipolar และ Bipolar ดังภาพที่ 2.2 และรูป 2.3 ตามลำดับ ผู้ใช้สามารถสังเกตข้อแตกต่างได้จากจำนวนสายไฟ กล่าวคือ แบบ Unipolar จะมีสายไฟต่อ 5 (Common A และ Common B เชื่อมด้วยกัน) หรือ 6 เส้น และแบบ Bipolar จะมีสายไฟต่อ 4 เส้น เท่านั้น



ภาพที่ 2.2 สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบ Unipolar

ภาพที่ 2.3 สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบ bipolar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบ Unipolar สามารถทำได้โดย ควบคุมกระแสไฟที่จ่ายให้กับขดลวดในแต่ละเฟส อย่างเป็นลำดับที่แน่นอน โดยถ้าหากเราต้องการให้กระแสไหลในเฟสใดๆ ก็จะทำให้สถานะของเฟสนั้นๆเป็นสถานะลอจิก “1” การควบคุมการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์สามารถทำได้ 3 วิธีดังนี้

1. การควบคุมการหมุนแบบเฟสเดียว (Single Phase) หรือ Wave Drive เป็นการป้อนกระแสไฟให้กับขดลวดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ทีละขด โดยจะป้อนกระแสเรียงตามลำดับกันไปตามตาราง 2.3 (ตัวเลข 1 หมายถึง มีการจ่ายแรงดันให้กับ ขดลวด 0 คือไม่จ่ายแรงดันให้กับขดลวด) ดังนั้นกระแสที่ไหลในขดลวดจะทำการไหลในทิศทางเดียวกันทุกขด ลักษณะเช่นนี้จึงทำให้แรงขับของสเต็ปเปอร์มอเตอร์มีน้อย จึงไม่เป็นที่นิยมใช้

ตาราง 2.3 ลำดับการป้อนกระแสแบบเฟสเดียว

Step	Phase A	Phase B	Phase A'	Phase B'
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1
5	Back to step 1			

2. การควบคุมการหมุนแบบสองเฟส (Two Phase) หรือ Full Step Drive เป็นการป้อนกระแสไฟให้กับขดลวดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ทั้ง 2 ขด พร้อมๆ กันไป และป้อนกระแสเรียงตามลำดับกันไป ตามตาราง 2.4 ดังนั้นจึงมีกระแสไหลในขดลวดของมอเตอร์มากขึ้น และจะทำให้มอเตอร์มีแรงบิดมากขึ้น

ตาราง 2.4 ลำดับการป้อนกระแสแบบสองเฟส

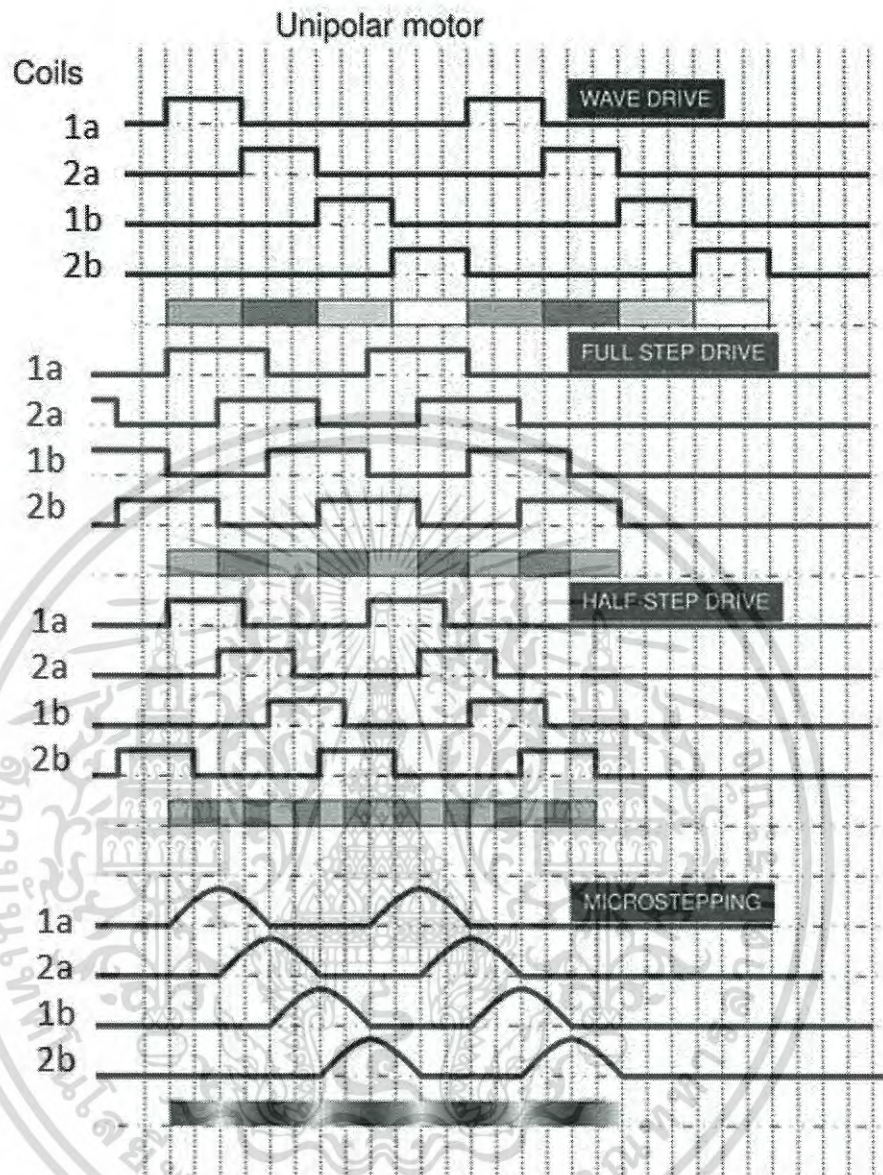
Step	Phase A	Phase B	Phase A'	Phase B'
1	1	1	0	0
2	0	1	1	0
3	0	0	1	1
4	1	0	0	1
5	Back to step 1			

3.การควบคุมการหมุนแบบครึ่งเฟส (Half Step) เป็นการป้อนกระแสแบบ Two Phase และ Single Phase สลับกันไป ตามตาราง 2.5 ซึ่งเป็นการเพิ่มความละเอียดของตำแหน่งในการหมุน

ตาราง 2.5 ลำดับการป้อนกระแสแบบครึ่งเฟส

Step	Phase A	Phase B	Phase A'	Phase B'
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1
9	Back to Step 1			

ซึ่งมอเตอร์ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ 1. rotor ซึ่งเป็นส่วนที่หมุนหรือเคลื่อนที่ได้ 2. คือ stator ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ สำหรับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ก็เช่นเดียวกันที่ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนนี้ โดยที่ส่วนที่เป็น stator ของสเต็ปเปอร์มอเตอร์นี้จะเป็นส่วนซึ่งมีขดลวดพันล้อมอยู่บนแกนเหล็ก เมื่อเราจ่ายไฟเข้าที่ขดลวดที่พันอยู่บน stator ที่ขด 1 ก่อน ก็จะทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กขึ้นที่ตำแหน่ง 1 นี้ และผลักให้ rotor เกิดการเคลื่อนที่ได้ การเคลื่อนที่นี้เรียกว่ามันเคลื่อนที่ไป 1 step ซึ่งการที่มันจะเคลื่อนที่ไปเป็นมุมเท่าไรก็ขึ้นอยู่กับ spec ของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ตัวนั้นว่ามันสามารถที่จะหมุนได้ step ละกี่องศา และต่อไปถ้าเราหยุดจ่ายไฟเข้าที่ขดลวด 1 และไปจ่ายไฟเข้าที่ขดลวด 2 แทนก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่บริเวณ 2 บน stator และก็จะทำให้สนามแม่เหล็กนี้ผลัก rotor ให้เคลื่อนที่ต่อไปได้ และถ้าเราหยุดจ่ายกระแสเข้าที่ 2 และไปจ่ายเข้าที่ขด 3 แทนก็จะทำให้สนามแม่เหล็กมาเกิดที่บริเวณ 3 และผลักให้ rotor เคลื่อนที่ต่อไปได้ โดยที่จะแสดงดังภาพที่ 2.4[10] ซึ่งเป็นภาพแสดงการควบคุมการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ และความเร็วการหมุนของแกนสเต็ปเปอร์มอเตอร์จะขึ้นอยู่กับการหน่วงเวลา (Time Delay) ในแต่ละลำดับ ถ้า Time Delay มีค่าน้อยแกนจะหมุนเร็วขึ้น ถ้า Time Delay มีค่ามาก แกนจะหมุนช้าและหมุนไม่สม่ำเสมอ



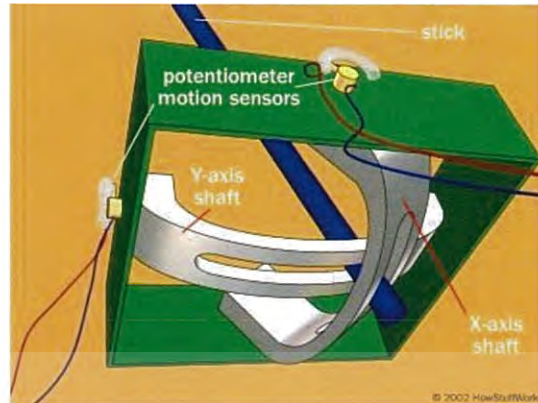
ภาพที่ 2.4 การควบคุมการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ [10]

## 2.5 หลักการทำงานของจอยสติ๊กแบบแอนะล็อก

### 2.5.1 ทฤษฎีและหลักการทำงานของจอยสติ๊กแบบแอนะล็อก [11]

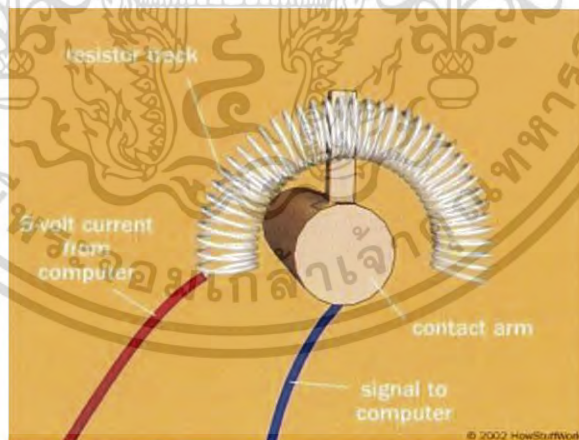
ในการที่จะสื่อสารรูปแบบการเคลื่อนไหวอย่างสมบูรณ์ จอยสติ๊กจะต้องประมวลตำแหน่งของ สติ๊กหรือแกนแท่งในสองทาง คือ X-axis (จากซ้ายไปขวา) และ Y-axis (จากบนลงล่าง) ดังแสดงในภาพที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.5 หลักการภายในจอยสติ๊กแบบแอนะล็อก [11]

จอยสติ๊กที่ได้รับการออกแบบอย่างมีมาตรฐาน มือจับจะทำหน้าที่ขยับต่อเหล็กที่วางอยู่บนด้ามเพลลาที่ถูกเจาะและสามารถหมุนรอบได้ การเอียงสติ๊กไปข้างหน้าและข้างหลังจะไปหมุนทิศทางของ Y-axis จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง ถ้าเอียงสติ๊กจากซ้ายไปขวา จะทำให้เพลลาของ X-axis shaft หมุน แต่ถ้าขยับสติ๊กตามแนวขวาง มันจะไปหมุนเพลลาทั้งสองข้าง ในการกำหนดตำแหน่งของสติ๊ก ระบบควบคุมจอยสติ๊กจะตรวจจับตำแหน่งเพลลาทั้งสองด้านได้อย่างง่ายดาย the conventional analog design จอยสติ๊ก จะทำเช่นนี้กับเครื่องวัดระดับไฟฟ้าสองตัว หรือกับเครื่องต้านทานกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การกำหนดค่าความต้านทานจากตำแหน่งของสติ๊ก [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 ทฤษฎีและหลักการของ Zigbee

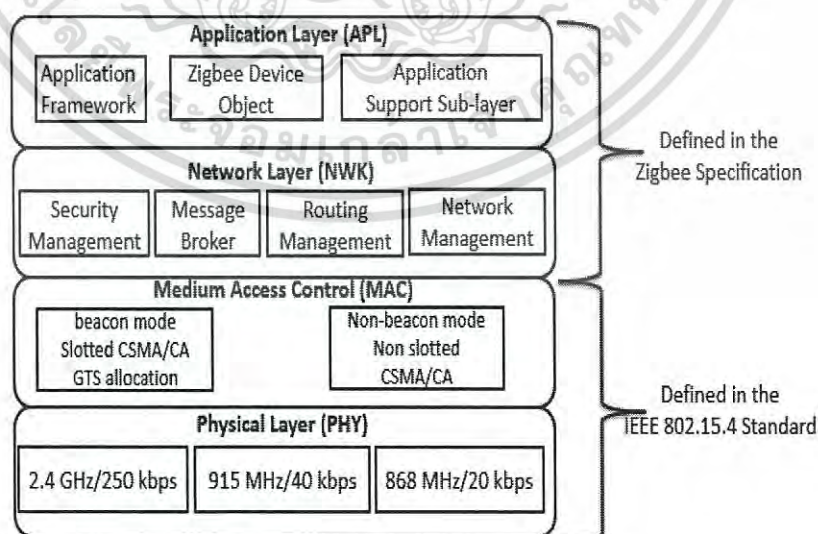
### 2.6.1 คุณสมบัติของ Zigbee [12]

เป็นมาตรฐานของอุปกรณ์ไร้สาย ถูกกำหนดโดยกลุ่ม Zigbee Alliance ซึ่งเริ่ม ก่อตั้งขึ้นเมื่อปี 2002 เพื่อใช้ควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ แบบไร้สายซึ่งมีความเร็วสูงไม่มากนัก เช่น สวิตช์เปิดปิดแสงสว่าง ระบบควบคุมอุณหภูมิห้อง รวมไปถึงใช้ในการรับค่าจาก Sensor ต่างๆ เป็นต้น โดย Zigbee ถูกออกแบบโดยมุ่งให้มีคุณลักษณะดังนี้

1. เป็นเครือข่ายไร้สายในระยะใกล้
2. ราคาประหยัด อุปกรณ์ที่ใช้มีราคาถูก เสียค่าติดตั้งและดูแลน้อย เนื่องจากแบตเตอรี่ที่ใช้เป็นแบบ primary cell ซึ่งมีราคาถูกและอายุการใช้งานนาน ไม่ใช่แบตเตอรี่ที่สามารถนำมาชาร์จเพื่อใช้งานใหม่ได้
3. ติดตั้งง่าย สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย
4. สามารถรับส่งข้อมูลได้โดยเชื่อมั่นในความถูกต้องได้
5. ประหยัดพลังงานโดยพลังงานในการทำงานต่ำ โดยมาตรฐานซิกบีตาม IEEE 802.15.4 กำหนดให้มีโหมดของการใช้พลังงาน 2 สถานะ คือ สถานะที่มีการรับและส่งของข้อมูล ซึ่งเรียกว่า Active และอีกสถานะ คือ สถานะที่ไม่มีการทำงานช่วงหนึ่ง หรือเรียกว่า Sleep

### 2.6.2 Zigbee Protocol Stack

Zigbee Protocol Stack นั้นถูกออกแบบขึ้นให้ทำงานตาม Zigbee Specification ซึ่งถูกกำหนดจาก Zigbee Alliance โดย Zigbee Specification ฉบับแรกถูกกำหนดขึ้นเมื่อปี 2004 และได้รับการปรับปรุงเรื่อยมาสำหรับรูปแบบของ Zigbee Protocol Stack นั้นมีรูปแบบดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 องค์ประกอบของ Zigbee Protocol Stack [13]

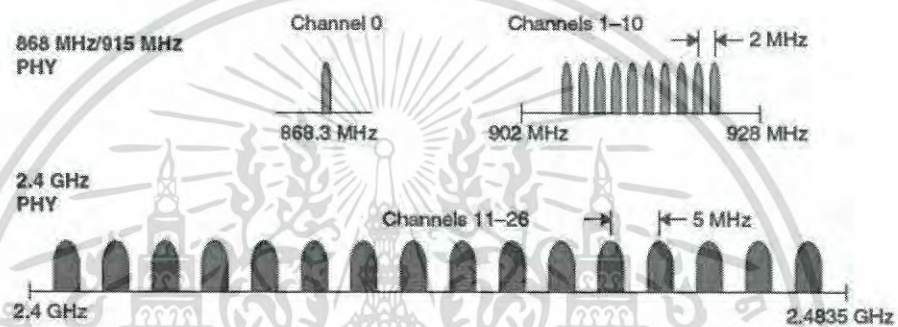
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 2.7 แสดงองค์ประกอบของ Zigbee Protocol Stack โดยประกอบด้วย Application Layer และ Zigbee Network Layer ซึ่งสร้างขึ้นตาม Zigbee Specification และ MAC Layer กับ Physical Layer ซึ่งเป็นมาตรฐานเดียวกันกับ IEEE 802.15.4

### 2.6.3 Zigbee Protocol Stack: Physical Layer

ในระดับ Physical Layer ของ Zigbee นั้นเป็นมาตรฐานเดียวกันกับ IEEE 802.15.4 ซึ่งมีรายละเอียดดังภาพที่

2.8



ภาพที่ 2.8 รายละเอียดของ Physical Layer ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 [14]

จากภาพที่ 2.8 [14] แสดงคลื่นความถี่ที่ Zigbee ใช้นั้นเป็นคลื่นความถี่ในช่วง Industrial Sciences Medicine Band (ISM) 3 ช่วงคลื่น คือ 868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz ด้วยวิธีการส่งแบบ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) ทำให้มีคุณสมบัติทนทานต่อ Noise เหมาะสำหรับสถานที่ที่มีความถี่รบกวนสูง โดยแต่ละช่วงจะได้อัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล ดังนี้

1. ความถี่ 868 MHz Modulation แบบ Binary Phase-shift Keying อัตรารับส่งข้อมูล 20 kb/s
2. ความถี่ 915 MHz Modulation แบบ Binary Phase-shift Keying อัตรารับส่งข้อมูล 40 kb/s
3. ความถี่ 2.4 GHz Modulation แบบ Quadrature Phase-shift Keying อัตรารับส่งข้อมูล 250 kb/s

### 2.6.4 Zigbee Protocol Stack: MAC Layer

#### 2.6.4.1 Device Class

อุปกรณ์ Zigbee แบ่ง Device Class ไว้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

- 1) Full Function Device (FFD) ซึ่งมีคุณสมบัติคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. สามารถทำการ Routing เพื่อหาเส้นทางสำหรับส่งข้อมูลได้ใช้งานได้ในทุกรูปแบบ Topology
2. ติดต่อกับอุปกรณ์ Zigbee โหนดอื่นได้ทั้งประเภท FFD และ RFD
3. สามารถเป็น PAN Coordinator ซึ่งเป็นศูนย์กลางของเครือข่ายไร้สาย Zigbee โดยจะทำหน้าที่จัดตั้ง Zigbee Network ขึ้นมาพร้อมทั้งเก็บสารสนเทศของ Zigbee Network นั้น เช่น Key ที่ใช้ในการเข้ารหัสข้อมูลภายใน Zigbee Network นี้เป็นต้น โดยในหนึ่ง Zigbee Network จะมี Coordinator นี้เพียงหนึ่งโหนดเท่านั้น

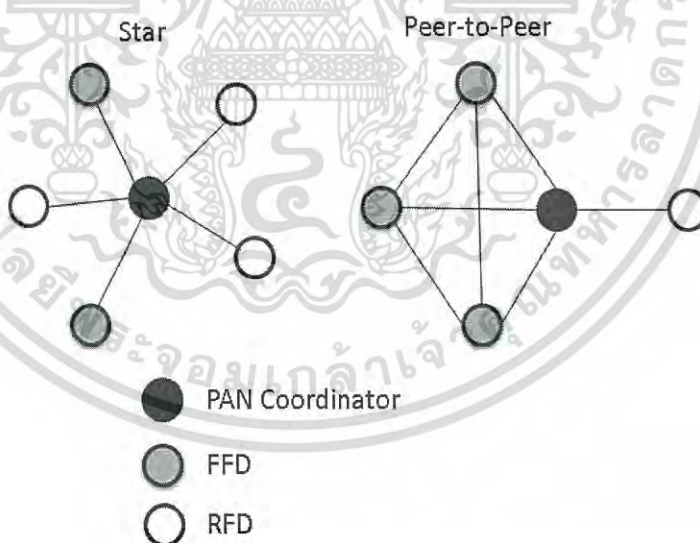
#### 2) Reduced Function Device (RFD)

1. ไม่สามารถหาเส้นทางให้ Zigbee Packet ได้จึงใช้งานได้แบบเฉพาะ Peer-to-Peer Topology เท่านั้น

2. เป็น PAN Coordinator ไม่ได้
3. เป็นได้เฉพาะ End Node ใน Zigbee Network

#### 2.6.4.2 Topology

ในการทำงานแบบเครือข่ายของ Zigbee รูปแบบของ Topology ที่ใช้เป็นมาตรฐานในการทำงานของ Zigbee Network ตามมาตรฐาน 802.15.4 คือ Star Topology และ Peer-to-Peer Topology แสดงได้ดังภาพที่ 2.9



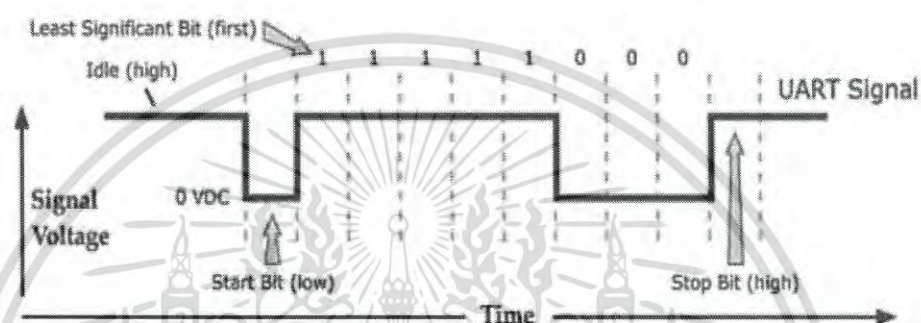
ภาพที่ 2.9 ภาพ Topology ในการใช้งาน Zigbee Network [15]

จากการที่ Zigbee รองรับ Topology ที่หลากหลายนี้เองทำให้เหมาะสมและยืดหยุ่นในการนำไปใช้งานเป็นเครือข่ายระยะใกล้ในการส่งข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.5 การส่งข้อมูลแบบ Serial ด้วย Zigbee Module

Zigbee Module ที่เลือกใช้นี้สามารถทำหน้าที่เป็น DCE (Data Communication Equipment) คือ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สื่อสาร ซึ่งอาจจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณ หรือเป็นตัวส่งต่อสัญญาณ เพื่อให้ DTE (Data Terminating Equipment) ที่เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณ หรือ รับ/ส่งสัญญาณ (อุปกรณ์ ต้นทาง หรือ ปลายทาง) ทั้งสองฝั่งสามารถ ติดต่อกันได้ เสมือนกับว่า DTE ทั้งสองฝั่งติดต่อกันด้วยสาย Serial โดยตรงนั่นเอง ดังภาพที่ 2.10

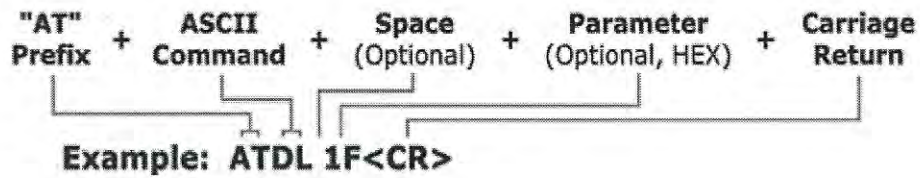


ภาพที่ 2.10 UART Data Packet ของข้อมูล 0x1F (Decimal Number “31”) [16]

จากภาพที่ 2.10 แสดง UART Data Packet ที่ถูกส่งเข้ามายัง UART Module เริ่มต้นที่ สัญญาณ Idle มีค่าเป็น High จากนั้นจะเป็น Start Bit จำนวน 1 Bit ตามด้วยข้อมูล จำนวน 8 Bit ปิดท้ายด้วย Stop Bit จำนวน 1 Bit ซึ่งเป็นรูปแบบที่ได้กำหนดไว้ในการส่งข้อมูลคือ 8-N-1 คือ 8 Bit Data – Non Parity Bit – 1 Stop Bit ข้อมูลที่แสดงในตัวอย่าง เป็นข้อมูลที่ถูกส่งเข้ามาใน UART Module โดยมีค่าในระบบเลขฐานสิบคือ 31 เมื่อเขียนในรูปเลขฐานสองคือ 0001 1111 ซึ่งตรงตามรูปแบบที่แสดงในตัวอย่างที่ส่งแบบ Least Significant Bit

Zigbee Module ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีโหมดการทำงานสองโหมด คือ Transparent Mode และ API Mode ซึ่งสองโหมดนั้นจะมีรูปแบบการส่งข้อมูลและคำสั่งที่ใช้ติดต่อกับ Zigbee Module ต่างกันออกไป

ใน Transparent Mode นั้น Zigbee Module จะทำหน้าที่เป็น Serial Line Replacement นั่นคือ มีรูปแบบการใช้งานเหมือนกับการเชื่อมต่อด้วยสาย Serial ธรรมดา โดยใน Transparent Mode นี้เราสามารถสั่งงาน Zigbee Module ด้วย AT Command ผ่านทาง โปรแกรม Terminal ต่างๆ ได้ ซึ่ง AT Command มีรูปแบบดังนี้



ภาพที่ 2.11 รูปแบบของ AT Command [17]

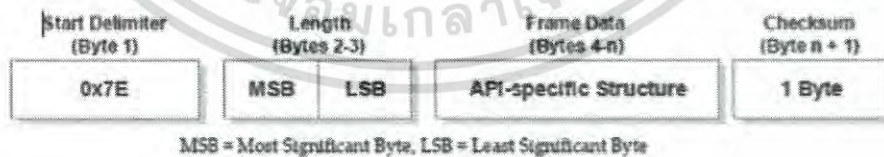
จากภาพที่ 2.11 เป็นตัวอย่างการใช้งาน AT Command ซึ่งเป็นการเซตค่าของ Address ของ Zigbee Module ปลายทางที่ต้องการติดต่อด้วย ในส่วน Low Address ที่เป็น 1F

ตัวอย่างของ AT Command อื่นที่สามารถเลือกใช้ได้ เช่น

(1) ATRR X โดย X เป็นมีค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 6 ซึ่งคำสั่งนี้จะเป็นการกำหนดจำนวน ครั้งของ Xbee Retry ที่ต้องการให้ทำการลองส่งใหม่เมื่อเกิดการส่งผิดพลาดขึ้นที่ชั้น MAC Layer โดย Xbee Retry 1 ครั้งนั้น จะสั่งให้ทำการส่งข้อมูลใหม่ในชั้น MAC Layer 3 ครั้ง

(2) ATND เป็นการสั่งให้ทำการค้นหา Zigbee Module ซึ่งอยู่ภายในระยะที่ สามารถรับส่งข้อมูลกันได้ โดยจะแสดงรายละเอียดเช่น Address แบบ 16 Bits เลข Serial Number ของ Zigbee Module นั้นระดับของสัญญาณที่ติดต่อกับ Node นั้นได้ เป็นต้น

(3) ATAP X โดย X มีค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 2 คำสั่งนี้จะเป็นการสั่งให้ Zigbee ทำการ เปิด/ปิดการใช้ API Mode สำหรับ API Mode (Application Programming Interface Mode) ทั้งข้อมูลและคำสั่ง จะอยู่ในรูปแบบ Frame-Based ทั้งหมด โดย API Frame จะมีรูปแบบดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 รูปแบบของ API Frame. [18]

Byte 1 เป็น Start Delimiter บอกการเริ่มต้นของ Frame มีค่าเป็น 0x7E เสมอ Byte 2 ถึง 3 เป็นจำนวน Byte ของส่วน Frame Data Byte 4 ถึง n เป็นส่วนคำสั่งและพารามิเตอร์ หรือเป็นข้อมูล Byte n+1 ใช้เป็น checksum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง ของ API Frame คำสั่ง ATND สำหรับค้นหาโหนดซึ่งอยู่ภายในรัศมี เมื่ออยู่ในรูปแบบ API Command จะมีรูปแบบ 0x7E 0x00 0x04 0x08 0x00 0x4E 0x44 0x64

โดยมีความหมายคือ

0x7E	เป็น Start Delimiter
0x04	เป็น Length
0x08	เป็นการระบุว่าเป็น AT Command
0x01	เป็นการระบุว่าเป็นคำสั่งชนิดที่จะมีผลการทำงานตอบกลับมา
0x4E 0x44	เป็นคำสั่ง ND ในรูปแบบ Hexadecimal
0x64	เป็น Checksum

### 2.6.6 Zigbee Security

การรักษาความปลอดภัยของ Zigbee นั้นจะใช้การเข้ารหัสแบบ 128-bit AES เป็นหลักโดยจะมีศูนย์กลางในการรักษาความปลอดภัยของ Zigbee Network อยู่ที่ Coordinator Node โดยเป็น Trust Center ซึ่งทำหน้าที่จัดการด้านความปลอดภัยในด้านต่างๆ ดังนี้

Trust Manager คือ ตรวจสอบว่าอุปกรณ์ที่ร้องขอเข้าใน Zigbee Network นั้นมีสิทธิใน การเข้าใช้เครือข่ายหรือไม่

Network Manager คือ แจกจ่าย Network Key ให้สมาชิกใน Zigbee Network เพื่อให้ ทุก Node มี Key ร่วมกัน ซึ่งทำให้การเข้ารหัสเป็นแบบ Group Encryption คือ ทุก Node

Configuration Manager คือการสร้างความปลอดภัยในการส่งข้อมูลในรูปแบบระหว่าง Node ต่อ Node ใน Network โดยการใช้ Link Key

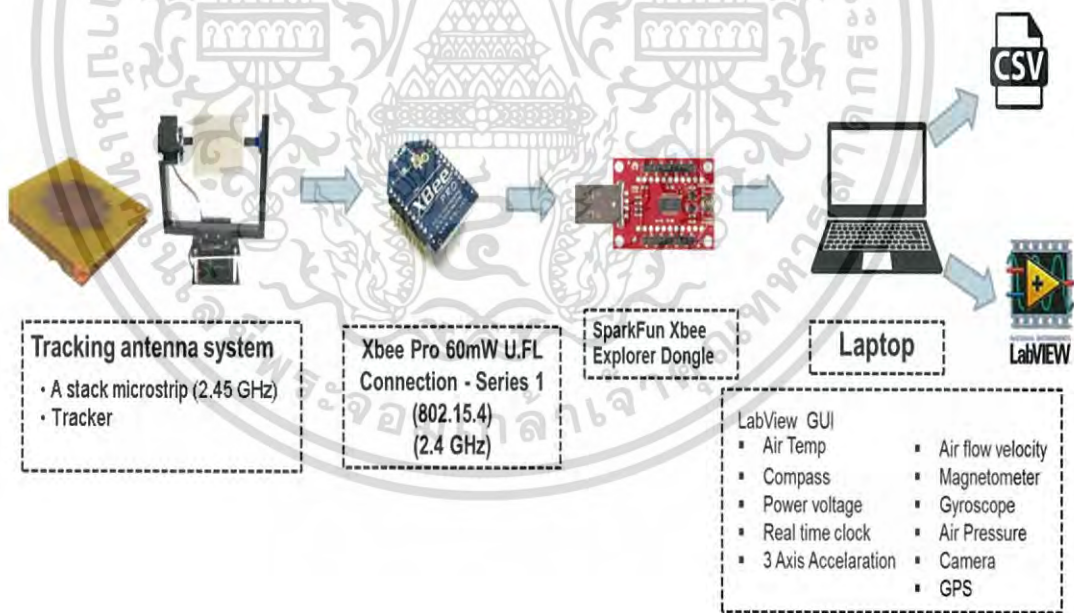
สำหรับ Key ที่ใช้ในระบบ Zigbee นั้น มี 3 ประเภทได้แก่ Master Key Network Key และ Link Key ซึ่งมีวิธีใช้แตกต่างกันออกไป ดังนี้

- (1) Master Keys เป็น Key ร่วมเพื่อใช้สร้าง Link Keys ที่จะใช้เข้ารหัสระหว่าง Zigbee 2 Nodes
- (2) Network Keys เป็น Key ที่ใช้เข้ารหัสข้อมูลในระดับ Network Layer ของ Zigbee Network โดย Zigbee ทุก Node จะใช้ Key เดียวกัน จุดประสงค์ของ Network Keys เพื่อใช้ ปกป้องความลับของ Zigbee Network จากภายนอก
- (3) Link Keys เป็น key ที่ใช้ในการเข้ารหัสเพื่อส่งข้อมูล โดยจะใช้ในการรักษาความลับของ การส่งข้อมูลระหว่าง Node 2 Node ซึ่งอยู่ภายในเครือข่าย Zigbee Network เดียวกัน

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้นำเสนอในส่วนของภาคพื้นดินหรือภาครับ โดยมีหน้าที่รับข้อมูลจากภาคส่งโดยใช้สายอากาศ Stack microstrip ที่ทำขึ้นเองในการรับข้อมูล ซึ่งสายอากาศที่ทำขึ้นเองนั้นจะถูกติดตั้งอยู่บนระบบติดตามดาวเทียม ขนาดขนาดเล็กเพื่อช่วยในเรื่องของความสะดวกสบายและกำลังในการรับข้อมูลสูงที่สุด โดยสายอากาศจะถูกใช้กับ โมดูล xbee ที่เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สื่อสารระหว่างอุปกรณ์ภาคส่งและสถานีภาคพื้นดิน จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งต่อไปให้คอมพิวเตอร์เพื่อนำค่าที่ได้ไปประมวลผลผ่าน โปรแกรม LabVIEW ที่ทำการออกแบบไว้ ค่าที่ถูกรประมวลผลนั้นจะถูกไปแสดงในแต่ละส่วนต่าง ๆ ภายในโปรแกรมเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งข้อมูลเหล่านั้นจะถูกแสดงรูปแบบของกราฟ รวมไปถึงมีการระบุตำแหน่งของ CanSat โดยใช้ข้อมูลจาก GPS ข้อมูลทั้งหมดที่กล่าวมานั้นจะแสดงผลอยู่บนหน้าจอคอมพิวเตอร์เพียงอย่างเดียว โดยมีบล็อกไดอะแกรมภาพรวมการทำงานแสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมภาพรวมการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 การออกแบบ

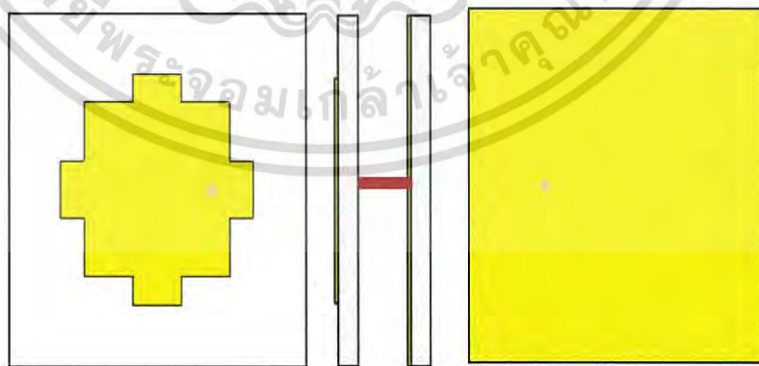
การออกแบบเป็นการแสดงขั้นตอนกระบวนการคิดในวางแผนหรือจำลองรูปแบบ โครงสร้าง หรือการทำงาน ก่อนที่จะลงมือทำจริงซึ่งในส่วนของกรวิจัยนี้การออกแบบจะถูกแบ่งออกเป็นทั้งหมด 3 ส่วนซึ่งได้แก่

- 1). การออกแบบและสร้างสายอากาศ
- 2). การออกแบบระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก
- 3). การออกแบบโปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลข้อมูลด้วยโปรแกรม LabVIEW

#### 3.1.1 การออกแบบและสร้างสายอากาศ

##### 3.1.1.1 ข้อมูลเบื้องต้น (Introduction) [19]

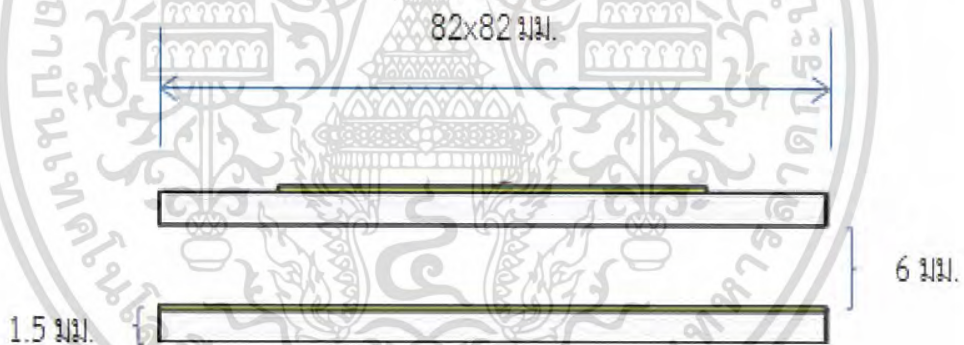
โครงสร้างของสายอากาศ Stack microstrip ที่นำเสนอนี้ สร้างจากแผ่นพิมพ์ชนิด FR4 มีค่าค่าคงที่ของฉนวน (dielectric's relative permittivity)  $\epsilon_r = 4.3$  มีค่าความหนาของวัสดุฉนวนรอง  $h = 1.5$  มม. และค่า การสูญเสียแทนเจนต์ (Loss Tangent,  $\tan \delta$ ) = 0.02 มี จำนวน 2 ชั้นด้วยกันประกอบด้วย ชั้นล่างสุดจนถึงชั้นบนสุด ดังนี้คือ ชั้น Ground plane, และชั้น Microstrip line, ซึ่งทั้งสองชั้นมีขนาดเท่ากันหมดคือ 82x82 มม. ดังภาพที่ 3.2 มีระยะห่างระหว่างชั้น Ground plane กับชั้น Microstrip line เท่ากับ 7.5 มม. มีการป้อนสัญญาณทางเข้าที่หัว SMA ที่ชั้น Ground Plane เชื่อมต่อไปชั้น Microstrip line มีค่าอิมพีแดนซ์ทาง อินพุต 50 โอห์ม สำหรับรายละเอียดในแต่ละชั้นมีดังนี้ ชั้น Ground plane เป็นแผ่นวงจรพิมพ์หน้าเดียว ที่มีลายทองแดงเต็มแผ่น ส่วนชั้น Microstrip line มีลายทองแดงที่หน้าแผ่นวงจรพิมพ์ ลักษณะคล้ายกับเครื่องหมายบวกประกบกับรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่อยู่ตรงกลางแผ่น Microstrip line ผลของการตัดมุมที่ตัวแพตช์ จะช่วยให้การแพร่กำลังงานในแนว โพลาไรซ์แบบชี้ทิศทางทำได้ดีขึ้นอีกด้วย โดยจะมีความยาวและระยะห่างที่เท่ากันทุกมุมด้าน



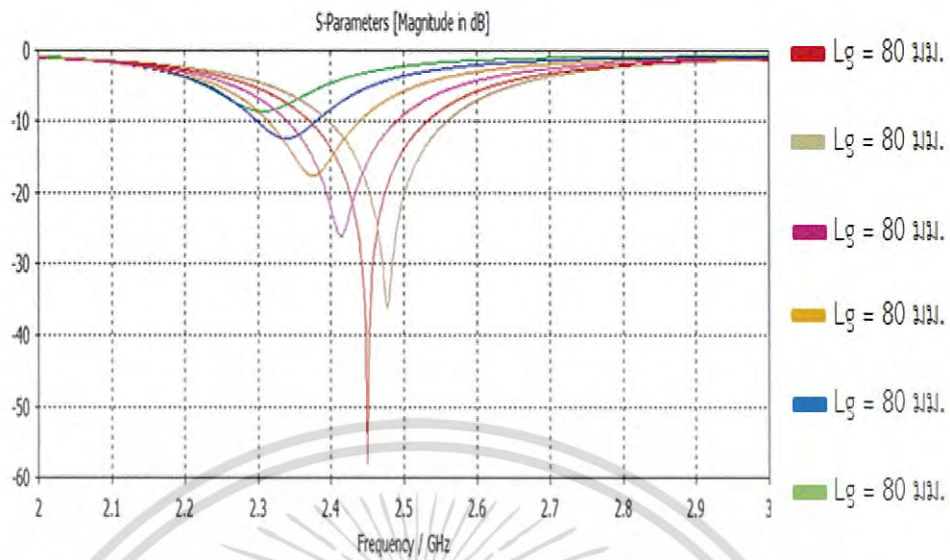
ภาพที่ 3.2 โครงสร้างสายอากาศ Stack microstrip (ด้านหน้า-ด้านข้าง-ด้านหลัง)

### 3.1.1.2 ผลการจำลองการทำงานสายอากาศ [19]

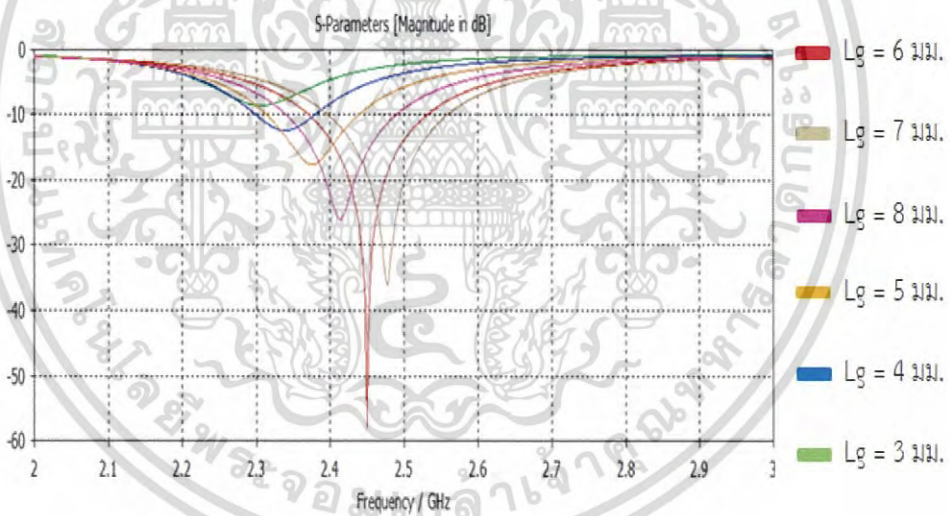
เมื่อนำโครงสร้างของสายอากาศมาทำการออกแบบและจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานสายอากาศ พบว่า ผลการปรับขนาดความกว้างพื้นที่ระนาบกราวด์  $L_g$  บนแผ่น Ground plane ตั้งแต่ 50-100 มม. ผลของการปรับ  $L_g$  ที่ 50 มม. จะมีผลต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) หรือ [S11] น้อยกว่ามากกว่า -10 dB ซึ่งในระดับนี้สายอากาศไม่สามารถทำงานได้ การปรับ  $L_g$  ที่ 60-100 มม. จะมีผลต่อค่า S-Parameter [S11] ที่ดีขึ้น เมื่อทำการพิจารณาแล้วพบว่าค่าที่ดีที่สุดคือค่า  $L_g=80$  มม. ซึ่งสายอากาศที่ทำการออกแบบเสร็จแล้วจะมีขนาดด้านต่างๆตามภาพที่ 3.3 ซึ่งมีค่าในช่วงแบนด์-วิดท์ 2.37-2.53 GHz ที่ -57.97 dB ทำให้แรงดันของคลื่นที่สะท้อนกลับออกมามีค่าน้อยกว่าแรงดันที่ป้อนเข้าไปโดยปกติคือต้องน้อยกว่า -10 dB ดังแสดงในภาพที่ 3.4 และผลการปรับระยะห่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น  $L_d$  ตั้งแต่ 3-8 มม. ผลของการปรับระยะห่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นมากขึ้น จะมีผลให้ค่าอัตราขยายของสายอากาศมากขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าอัตราขยายของสายอากาศพบว่าค่าที่ดีที่สุดคือค่า  $L_d = 6$  มม. ซึ่งส่งผลให้ค่าอัตราขยายของสายอากาศในช่วงแบนด์วิดท์ 2.45 GHz ดีที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 3.5 และปรับขนาดของลายทองแดงที่อยู่บนแผ่นพิมพ์ชั้นบน หรือ Microstrip line มีลักษณะแบ่งออกเป็นสองลักษณะคล้ายกับเครื่องหมายบวก  $D_p$  ประกอบกับรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส  $D_s$  โดยแต่ละลักษณะทุกมุมด้านจะมีขนาดเท่ากัน



ภาพที่ 3.3 ผลของการปรับระยะห่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น

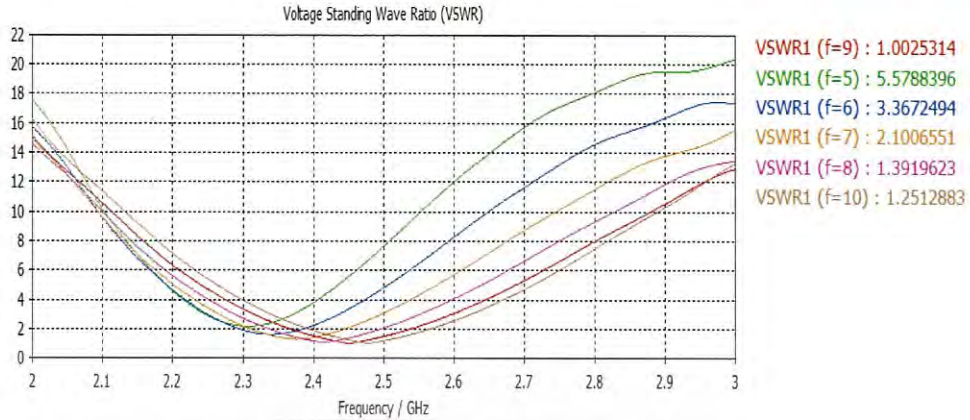


ภาพที่ 3.4 ผลการปรับขนาดความกว้างพื้นที่ระนาบกราวด์  $L_g$  บนแผ่น Ground plane



ภาพที่ 3.5 ผลของการปรับระยะห่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.6 ผลการปรับค่า VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)

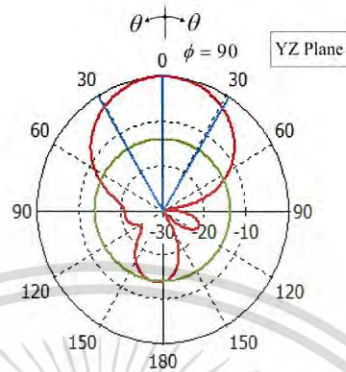
ค่า VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) เป็นอัตราส่วนความสูญเสียระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกไปและได้มีการสะท้อนกลับมา ซึ่งเกิดจากสาเหตุหลายประการ เช่นเกิดจากสายนำสัญญาณ ขั้วต่อต่างๆ ค่า SWRจะเป็นตัวบอกว่า สายอากาศแมตช์กับสายนำสัญญาณได้ดีเพียงใด ตามมาตรฐานของญี่ปุ่นนั้นจะให้ไม่เกิน 1:1.7 ส่วนของอเมริกาจะให้ไม่เกิน 1:2 จากภาพที่ 3.6 จากการปรับค่าพารามิเตอร์และพิจารณาค่าต่างๆแล้วพบว่า VSWR ที่ได้จากการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมมีอัตราส่วนอยู่ที่ 1:1.0025 ซึ่งแมตช์กับสายอากาศที่ใช้ในย่านความถี่กลาง 2.45 GHz

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศที่ได้หลังจากปรับแต่งสายอากาศ

พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
$L_g$	82
$L_d$	6
$D_p$	20
$D_s$	6.58

หลังจากที่ได้ทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จนให้ได้คุณสมบัติทางสายอากาศที่มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) น้อยกว่า -10 dB และค่าอัตราส่วนแกน (AR) น้อยกว่า 3 dB ตลอดช่วงแถบความถี่พิจารณา 2.37-2.53 GHz ซึ่งผลสรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้หลังจากผ่านการปรับแต่งสายอากาศจนได้ค่าที่ดีที่สุดแล้ว ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ภาพที่ 3.7 แสดงผลการจำลองแบบรูปการแผ่กำลังงานในระนาบ YZ (YZ-Plane) ซึ่งผล

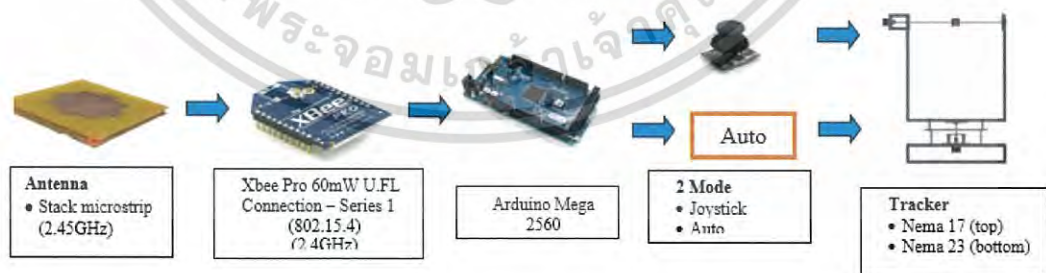
การจำลองการทำงานสายอากาศที่นำเสนอ พบว่าสายอากาศมีทิศทางการแผ่กำลังงานในทิศทางเดียวและมีอัตราการขยายของสายอากาศที่ 8.31 dBi



ภาพที่ 3.7 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบ YZ (YZ-Plane)

### 3.1.2 การออกแบบระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก

ระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กเป็นระบบที่ทำหน้าที่ช่วยให้สายอากาศทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเนื่องจากสายอากาศที่สร้างขึ้นนั้นมีลักษณะการแผ่กระจายคลื่นเป็นแบบ unidirectional ซึ่งระบบติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กจะมีหน้าที่ตั้งทิศทางของสายอากาศไปยังเป้าหมายได้แม่นยำรวมถึงช่วยในเรื่องการอำนวยความสะดวกสบายให้กับผู้ใช้โดยที่ระบบจะใช้ค่าที่ได้จาก GPS และความสูงเพื่อคำนวณหามุมในแนวแกนตั้งกับมุมในแนวระดับ พร้อมทั้งแสดงผลของข้อมูลผ่านจาก LCD ได้อีกด้วย ดังแสดงในภาพที่ 3.8

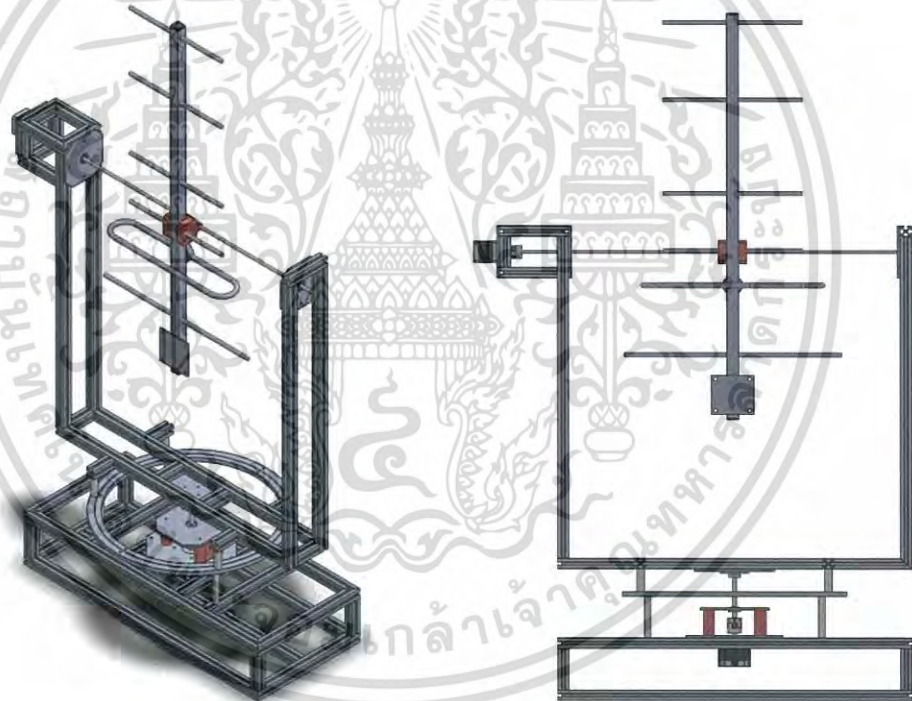


ภาพที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2.1 การออกแบบโครงสร้างด้วยโปรแกรม Solidwork

เนื่องจากต้องการให้โครงสร้างของระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กสามารถประยุกต์ใช้ได้กับหลากหลายสายอากาศจึงออกแบบให้ตัวโครงสร้างนั้นมีความกว้างและความยาวรองรับสายอากาศที่มีอยู่ทั้งหมดโดยจะมีสายอากาศที่ใหญ่ที่สุดคือ สายอากาศขยาก็-อูตะ ที่มีความถี่กลางที่ 433 MHz (ที่อยู่ในภาพที่ 3.9) และเพื่อให้สามารถหมุนเพื่อติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กทั้งแนวแกนตั้งและแนวแกนนอนนั้น การออกแบบจึงมีมอเตอร์สำหรับหมุนแต่ละแนวแกนอย่างละ 1 ตัวจึงมีมอเตอร์ที่ใช้ทั้งหมด 2 ตัว โดยตัวแรกคือ Stepper Motor NEMA 17 [20] (ตัวที่อยู่ด้านบน) จะนำไปใช้ในการหมุนตามแนวแกนตั้งและตัวที่สองคือ Stepper Motor NEMA 23 [20] (ตัวที่อยู่ด้านล่าง) จะนำไปใช้ในการหมุนตามแนวแกนนอน โดยจะมีโครงสร้างที่ออกแบบได้แสดงดังภาพที่ 3.9 โดยจะมีขนาดและน้ำหนักเมื่อไม่ได้คิดรวมกับสายอากาศแสดงดังตามตารางที่ 3.2



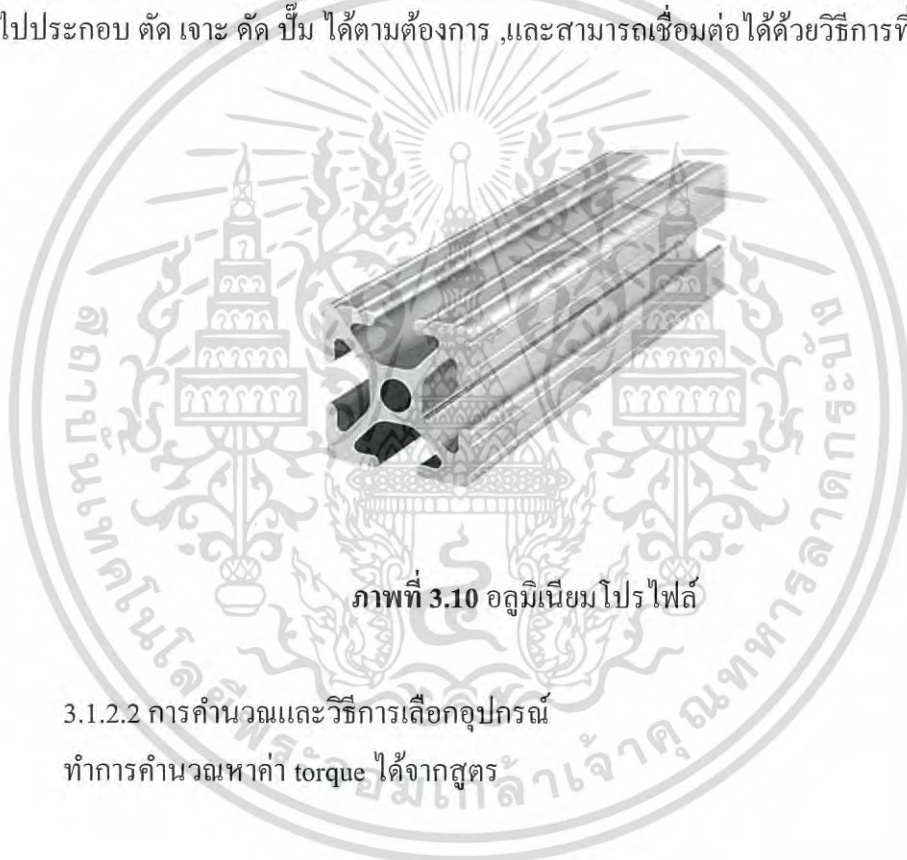
ภาพที่ 3.9 โครงสร้างของระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ขนาดและน้ำหนักโครงสร้างของระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก

ความกว้าง	ความยาว	น้ำหนัก (โดยประมาณ)
77.43 cm	91.70 cm	4.7 kg

ซึ่งโครงสร้างที่ทำการออกแบบนั้นทางผู้จัดทำได้ตัดสินใจเลือกใช้อลูมิเนียมโปรไฟล์ (Aluminium Profile) [21] ที่มีลักษณะแสดงดังภาพที่ 3.10 เป็นวัสดุในการสร้างโครงสร้างหลักเนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีกว่าโลหะทั่วไปคือ เบาแต่แข็งแรง ,ทนทานต่อการสึกกร่อน , ไม่เป็นสนิม ,มีความสามารถในการรับแรงกดได้สูง ,สามารถถอดประกอบและต่อเติมภายหลังได้สะดวก ,ไม่เป็นพิษและไม่ติดไฟ ,สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆได้มากมาย, สามารถนำไปประกอบ ตัด เจาะ คัด บีม ได้ตามต้องการ ,และสามารถเชื่อมต่อได้ด้วยวิธีการที่หลากหลาย



ภาพที่ 3.10 อลูมิเนียมโปรไฟล์

#### 3.1.2.2 การคำนวณและวิธีการเลือกอุปกรณ์

ทำการคำนวณหาค่า torque ได้จากสูตร

$$\text{Torque} = F \times R \quad (\text{N.cm}) \quad (3.1)$$

โดยที่ F คือ แรงในหน่วยนิวตัน (N) และ R คือ ระยะจากจุด center (cm)

โดยการใช้สูตรนี้นั้นจะแบ่งเป็น 2 ส่วน โดยจุด center อยู่ที่ center ของแกนเพลลาของ Stepper Motor NEMA 23 (ตัวที่อยู่ด้านล่าง) แบ่งคำนวณทีละฝั่ง ในด้านฝั่งซ้ายนั้นจะมี

โครงซี่กซ้าย	1.2	kg
สายอากาศ	0.65	kg
Stepper Motor NEMA 17 with gear bore	1.5	kg
อื่นๆ	0.5	kg
สุทธิ	3.85	kg

ดังนั้นจะได้  $F = 38.5 \text{ N}$  และในการหาค่า  $R$  นั้นต้องมีระยะจาก center ของเพลา ระยะนี้เกิดจากจุด centroid ของซี่กซ้ายโดยประมาณไว้ที่  $40 \text{ cm}$  สรุปคือจะได้ค่า torque ซี่กซ้ายจากการคำนวณเท่ากับ  $38.5 \times 40$  เท่ากับ  $1540 \text{ N.cm}$  ในฝั่งทางด้านขวานั้นก็ใช้หลักการเดียวกันโดยจะมี

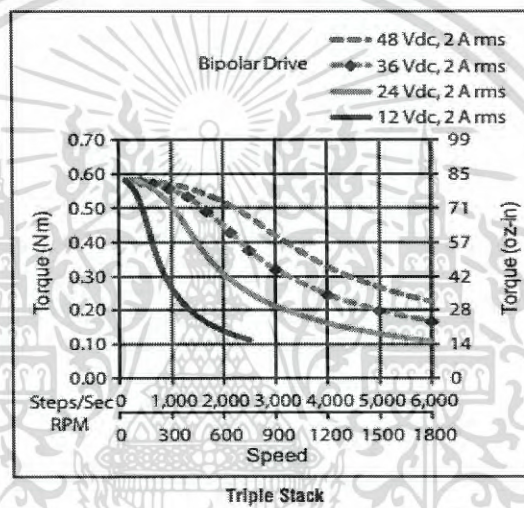
โครงซี่กขวา	1	kg
สายอากาศ	0.65	kg
อื่นๆ	0.5	kg
สุทธิ	2.15	kg

ดังนั้นจะได้  $F = 21.5 \text{ N}$  และในการหาค่า  $R$  นั้นต้องมีระยะจาก center ของเพลา ระยะนี้เกิดจากจุด centroid ของซี่กขวาโดยประมาณไว้ที่  $20 \text{ cm}$  สรุปคือจะได้ค่า torque ซี่กขวาจากการคำนวณเท่ากับ  $21.5 \times 20$  เท่ากับ  $430 \text{ N.cm}$  เมื่อทำการรวมทั้งสองฝั่งจะได้ค่า torque สุทธิเท่ากับ  $1970 \text{ N.cm}$  และเนื่องจากถ้ากระแสเพิ่มขึ้นเนื่องจาก โหลด ความสามารถในการรับกระแสของอุปกรณ์ก็ต้องมากขึ้นด้วยจึงต้องเพื่อสเปคของ motor ไว้ประมาณ 2 เท่าของโหลดแนวแกน ดังนั้นก็จะได้ค่า torque คือ 2 เท่าของโหลดแนวแกนคือจะประมาณ  $4000 \text{ N.cm}$  แล้วถ้าการ ออกแบบนั้นเราต้องการความเร็วอยู่ที่  $10 \text{ rpm}$  จึงได้ทำการออกแบบการทดเฟืองของมอเตอร์อยู่ที่  $1 : 30$  ซึ่งหมายความว่าความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จะอยู่ที่  $300 \text{ rpm}$  และเมื่อเทียบจากกราฟในภาพที่ 13 แล้วจะเห็นได้ว่าค่า torque ที่ได้อยู่ที่  $1.75 \text{ N.m}$  ซึ่งจากการคำนวณนั้นค่า torque ของเรา อยู่ที่  $4000 \text{ N.cm}$  หรือ  $40 \text{ N.m}$  และทำการทดเฟืองไปอีก  $1 : 30$  จะทำให้ได้ค่า torque สุทธิอยู่ที่  $1.33 \text{ N.m}$  ซึ่งไม่เกินจากค่าที่ได้จากกราฟจึงหมายความว่ามอเตอร์ที่เราทำการเลือกนั้นสามารถรองรับ torque ที่เราออกแบบไว้ได้

โดยมอเตอร์ตัวแรกที่เราเลือกใช้คือ Stepper Motor NEMA 17 (ตัวที่อยู่ด้านบนของภาพที่ 3.9) จะนำไปใช้ในการหมุนตามแนวแกนตั้ง โดยจะมีรูปร่างดังภาพที่ 3.11 โดยจะมี ประสิทธิภาพของ Stepper Motor NEMA 17 เมื่อใช้งานต่อเนื่องเทียบกันแต่ละแรงดันไฟฟ้าแสดงดังในภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.11 Stepper Motor NEMA 17 [20]

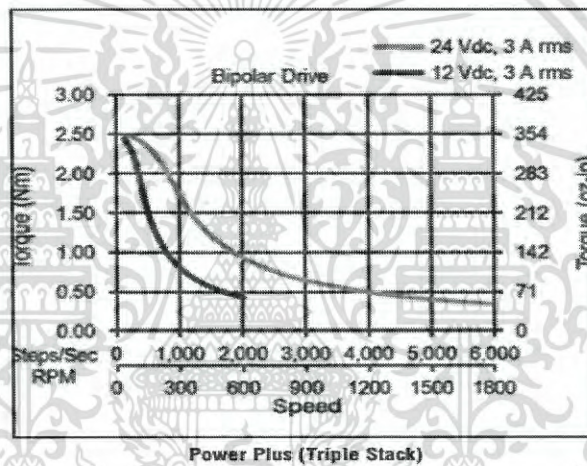


ภาพที่ 3.12 ประสิทธิภาพของ Stepper Motor NEMA 17 เมื่อใช้งานต่อเนื่องเทียบกันแต่ละแรงดันไฟฟ้า [20]

ส่วนมอเตอร์ตัวที่สองนั้นคือ Stepper Motor NEMA 23 (ตัวที่อยู่ด้านล่างของภาพที่ 3.9) จะนำไปใช้ในการหมุนตามแนวแกนนอนจะมีรูปร่างดังภาพที่ 3.13 โดยจะมี ประสิทธิภาพของ Stepper Motor NEMA 23 เมื่อใช้งานต่อเนื่องเทียบกันแต่ละแรงดันไฟฟ้าแสดงดังในภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.13 Stepper Motor NEMA 23 [20]



ภาพที่ 3.14 ประสิทธิภาพของ Stepper Motor NEMA 23 เมื่อใช้งานต่อเนื่องเทียบกับแต่ละแรงดันไฟฟ้า [20]

### 3.1.2.3 การคำนวณมุมในการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์

#### 1) วิธีการในการคำนวณมุมในแนวแกนนอน

ในการควบคุมมอเตอร์ที่ใช้ในการติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กนั้น ใช้วิธีการหามุมที่จะมาสั่งให้มอเตอร์หมุนตามแนวแกนนอนจากค่า GPS Latitude และ GPS Longitude ซึ่งเป็นข้อมูลที่จะได้มาจากฝั่งส่ง โดยใช้หลักการในการคิดหาค่ามุมมองเสาที่จะควบคุมให้มอเตอร์หมุนตามสมการที่ 3.2 ถึง 3.4 [22]

$$\beta = \arctan2(X, Y) \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X = \cos(B) \times \sin(C-D) \quad (3.3)$$

$$Y = (\cos(A) \times \sin(B)) - (\sin(A) \times \cos(B) \times \cos(D-C)) \quad (3.4)$$

- โดย  $\beta$  คือมุมในแนวระนาบระหว่างตำแหน่งอ้างอิงกับตำแหน่งที่ต้องการจะชี้ไป
- A คือ Latitude ของตำแหน่งอ้างอิง
- B คือ Latitude ของตำแหน่งที่ต้องการจะชี้ไป
- C คือ Longitude ของตำแหน่งอ้างอิง
- D คือ Longitude ของตำแหน่งที่ต้องการจะชี้ไป

ตัวอย่างการคำนวณ ให้ตำแหน่งอ้างอิงคือ latitude = 8.847099 , longitude = -9.730721 ตำแหน่งที่ต้องการชี้ latitude = 8.847139 longitude = -9.730673 จะได้

$$X = \cos(8.847139) \times \sin(-9.730673 - (-9.730721))$$

$$X = 8.277905 \times 10^{-7}$$

$$Y = (\cos(8.847099) \times \sin(8.847139)) - (\sin(8.847099) \times \cos(8.847139) \times \cos(-9.730673 - (-9.730721)))$$

$$Y = 6.981317 \times 10^{-7}$$

$$\beta = \arctan2(8.27 \times 10^{-7}, 6.98 \times 10^{-7})$$

$$\beta = 49.8568$$

จากนั้นทำการใช้โปรแกรม simulator ในการคำนวณหาค่าของมุมในแนวแกนนอน ดังภาพที่ 3.15 ผลที่ได้คือค่าของมุมที่ได้นั้นมีค่าเท่ากัน



ภาพที่ 3.15 การคำนวณค่าของมุมจากโปรแกรม simulator

## 2) วิธีการในการคำนวณมุมในแนวแกนตั้ง

การควบคุมมอเตอร์ให้หมุนในแนวแกนตั้งนั้นจะใช้ค่าความสูงและระยะห่างระหว่างสองตำแหน่งในการคำนวณหามุมที่จะคอนโทรลให้มอเตอร์หมุนดังแสดงในภาพที่ 3.16 ซึ่งค่าความสูงจะเป็นข้อมูลที่ได้มาจากฝั่งส่งและค่าระยะห่างระหว่างสองตำแหน่งมาจากการคำนวณจากสมการที่ 3.5 ถึง 3.7 [23]

$$a = \left( \sin\left(\frac{dlat}{2}\right) \right)^2 + \cos(lat1) \times \cos(lat2) \times \left( \sin\left(\frac{dlon}{2}\right) \right)^2 \quad (3.5)$$

$$c = 2 \times \arctan2\left(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}\right)^2 \quad (3.6)$$

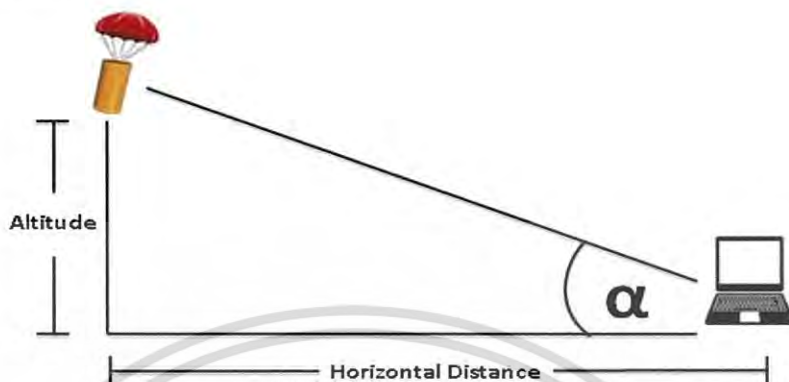
$$d = R \times c \quad (3.7)$$

โดย

- lon 1 = Latitude ตำแหน่งที่ 1
- lon 2 = Latitude ตำแหน่งที่ 2
- lat 1 = Longitude ตำแหน่งที่ 1
- lat 2 = Longitude ตำแหน่งที่ 2
- dlon = lon2-lon1
- dlat = lat2- lat1
- R = รัศมีของโลก (6373 km)
- d = ระยะห่างระหว่างสองตำแหน่ง (km)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากได้ค่าความสูงและระยะห่างระหว่างสองตำแหน่งมาแล้วก็จะทำการหาค่ามุมที่จะสั่งให้หมุนตามแนวแกนตั้งได้จากภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.16 หลักการในการหามุมในแนวแกนตั้ง

ซึ่งจากภาพที่ 3.16 จะสามารถหาค่ามุมในแนวแกนตั้งได้โดยใช้สมการที่ 3.8

$$\alpha = \tan^{-1}(A/D) \quad (3.8)$$

โดย A (Altitude) คือ ความสูง (m)

D (Horizontal Distance) คือ ระยะห่างระหว่างสองตำแหน่ง (m)

$\alpha$  คือ มุมในแนวแกนตั้ง (องศา)

#### 3.1.2.4 การเชื่อมต่อระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก

ในส่วนของระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กจะมีส่วนแสดงผลของจอ TFT LCD เพิ่มเข้ามาเพื่อแสดงค่า GPS Latitude GPS Longitude และ GPS Altitude เพื่อใช้ในการระบุพิกัดตำแหน่งและเพื่อนำเอาค่ามาใช้ในการติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก โดยหน้าจอแสดงผลที่เลือกใช้นั้นคือ 3.2" HVGA LCD TFT Non-Touch Screen, Arduino MEGA-2560 Shield [24] ซึ่งเป็นหน้าจอ LCD ที่ความละเอียดอยู่ที่ 490 x 320 และมีทั้งหมด 262K สี โดยอุปกรณ์มีลักษณะเป็นภาพที่ 3.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.17 อุปกรณ์ HVGA LCD TFT Non-Touch Screen, Arduino MEGA-2560 Shield

โดยในการใช้งานจริงนั้นเราจำเป็นต้องใช้สเต็ปเปอร์มอเตอร์คู่กับตัวขับเคลื่อนที่เป็นตัวกลางระหว่างมอเตอร์และตัวคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ในการควบคุมมอเตอร์ให้หมุนไปตามขนาดและทิศทางที่เราได้ทำการป้อนให้ไป ซึ่งตัวขับเคลื่อนที่เลือกใช้คือ TB6600 Stepper Motor Driver [25] ที่แสดงดังภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 TB6600 Stepper Motor Driver

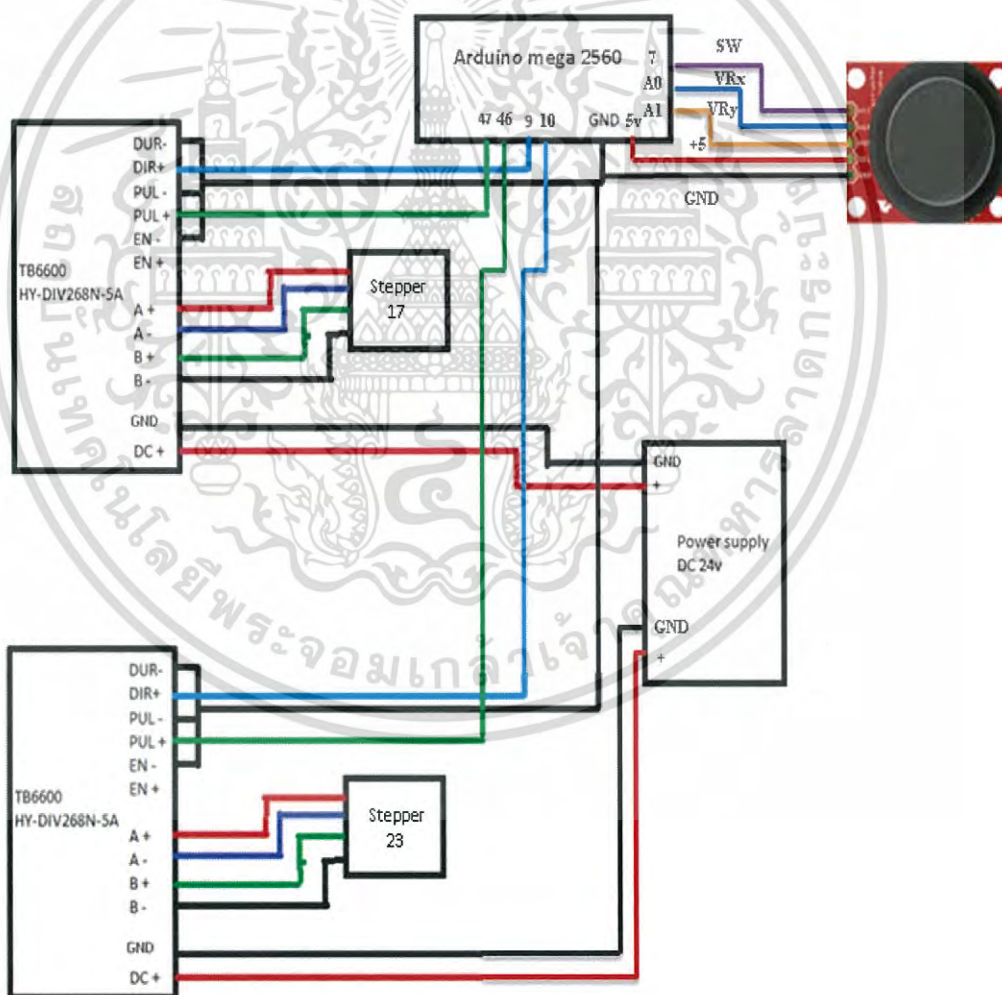
และเนื่องจากในสภาพการทำงานจริงของระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กนั้นอาจเกิดปัญหาเนื่องจากรับข้อมูลไม่ได้หรือค่าข้อมูลที่ได้อาจมีความผิดพลาดอันเนื่องมาจากระยะทางที่ไกลๆ หรือมีสิ่งบดบังสัญญาณ ซึ่งจะส่งผลให้ในการติดตามทิศทางของแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กมีความผิดพลาดได้ ดังนั้นทางผู้จัดทำจึงได้จัดทำฟังก์ชันการทำงานของระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งรูปแบบคือ การบังคับทิศทางด้วยจอยสติ๊ก โดยจอยสติ๊กที่เลือกใช้นั้นเป็นจอยสติ๊กแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอนะล็อก [26] โดยจะมีลักษณะรูปร่างแสดงดังภาพที่ 3.19 รวมถึงแผนภาพแสดงการเชื่อมต่อจอยสติ๊กกับระบบ โดยรวมทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 3.20 และ โพล์ชาร์ตแสดงดังภาพที่ 3.21

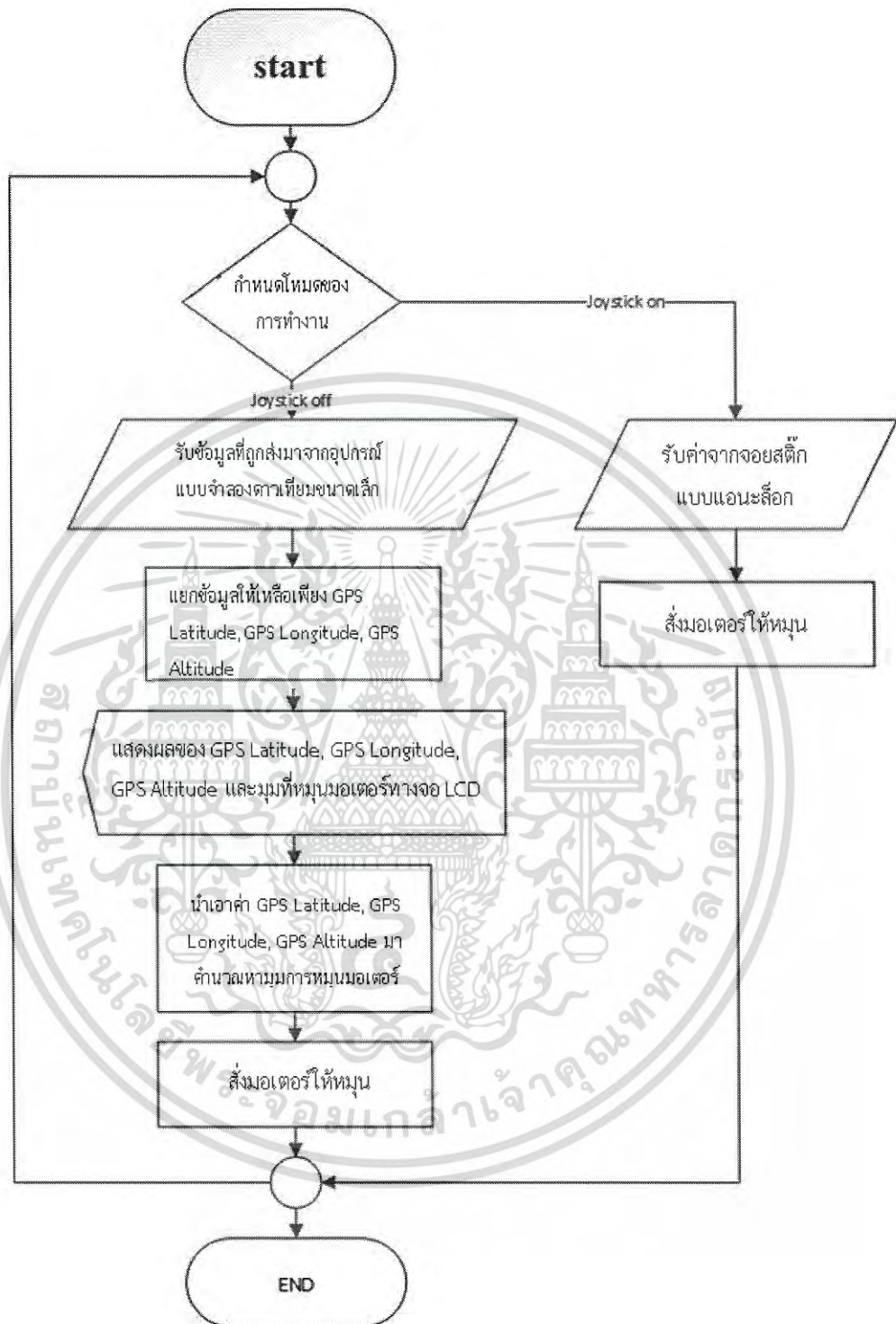


ภาพที่ 3.19 จอยสติ๊กแบบแอนะล็อก



ภาพที่ 3.20 การเชื่อมต่อสายของจอยสติ๊กแบบแอนะล็อกกับอุปกรณ์อื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

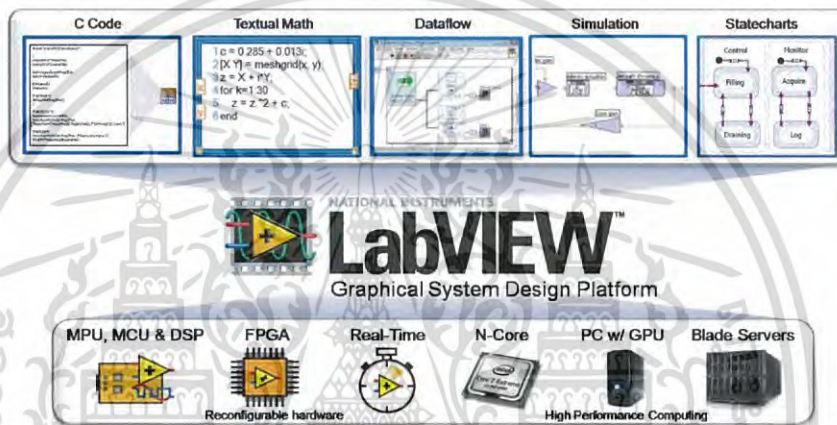


ภาพที่ 3.21 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 การออกแบบโปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลข้อมูลด้วยโปรแกรม LabVIEW

LabVIEW [27] เป็นซอฟต์แวร์ระบบวิศวกรรมที่ถูกใช้ในการทดสอบการวัดและการควบคุม โดยสามารถเข้าถึงข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับฮาร์ดแวร์และข้อมูลได้อย่างรวดเร็วซึ่งการออกแบบโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม LabVIEW จะช่วยลดความยุ่งยากในการผสมรวมฮาร์ดแวร์สำหรับงานด้านวิศวกรรมเพื่อให้มีวิธีการที่สอดคล้องกันในการรับข้อมูลจาก NI และฮาร์ดแวร์ของ บริษัท อื่นๆ และ LabVIEW ยังช่วยลดความซับซ้อนของการเขียนโปรแกรมเพื่อให้สามารถมุ่งเน้นไปที่ปัญหาคำนวณเฉพาะ โดย LabVIEW มีความสามารถมากมายโดยแสดงได้ดัง ภาพที่ 3.22 และยังช่วยให้สามารถเห็นผลทันทีด้วยการสร้างหน้าจออินเทอร์เฟซของ โปรแกรมได้อย่างสะดวก



ภาพที่ 3.22 ความสามารถของโปรแกรม LabVIEW

#### 3.1.3.1 รูปแบบข้อมูล

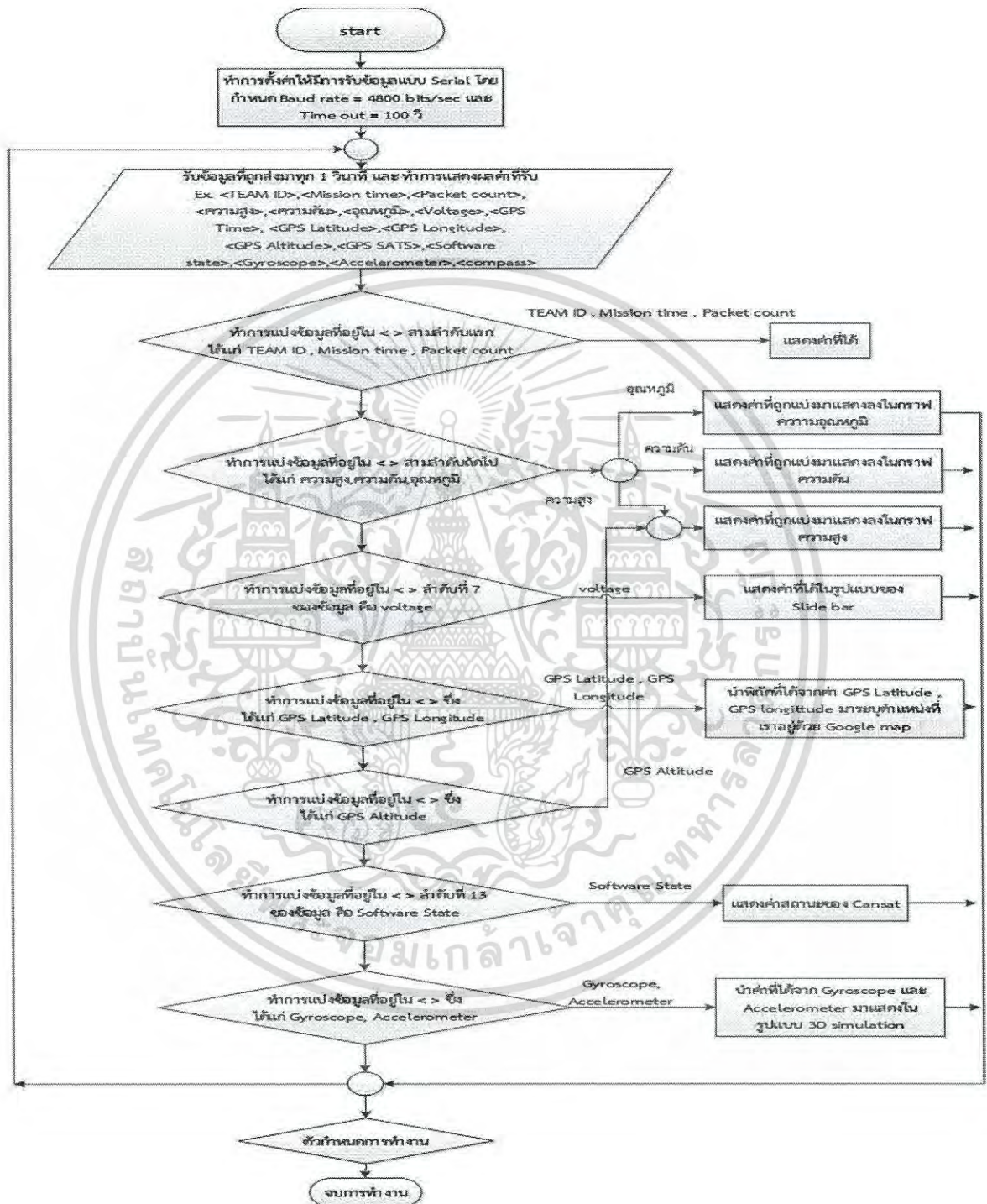
รูปแบบของข้อมูลที่ทำกรรับจากแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กนั้นจะมีรูปแบบอ้างอิงตามข้อกำหนดเป็นรูปแบบของการแข่งขัน CanSat Competition ประจำปี 2018 ซึ่งรูปแบบของข้อมูลนั้นจะแสดงดังภาพที่ 3.23

```
<TEAM ID>,<MISSION TIME>,<PACKET COUNT>,<ALTITUDE>,<PRESSURE>,<TEMP>,<VOLTAGE>,<GPS TIME>,<GPS LATITUDE>,<GPS LONGITUDE>,<GPS ALTITUDE>,<GPS SATS>,<TILT X>,<TILT Y>,<TILT Z>,<SOFTWARE STATE>,<[BONUS STATUS]>,<GPS SPEED>,<GYRO X>,< GYRO Y >,< GYRO Z >,< MAG >
```

ภาพที่ 3.23 รูปแบบของข้อมูลที่ทำกรรับจากแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.2 โพลีชาร์ตการแลกเปลี่ยนข้อมูล



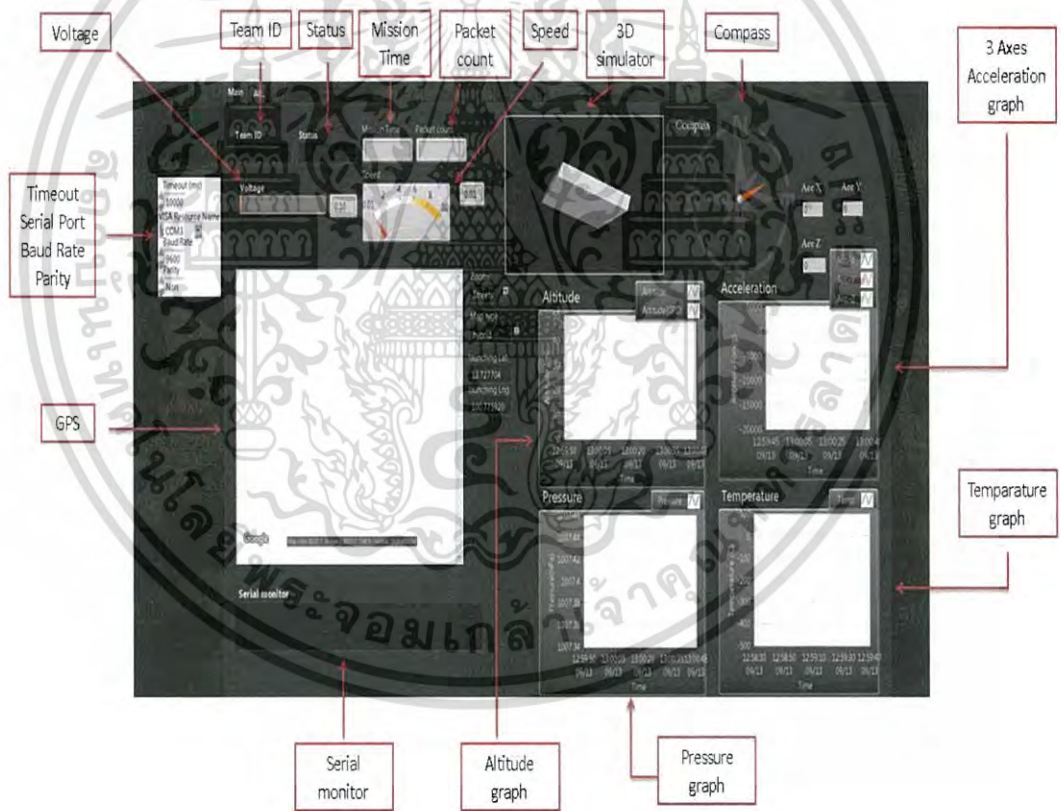
ภาพที่ 3.24 โพลีชาร์ตการแลกเปลี่ยนข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบโปรแกรมนี้มีหลักการในการทำงานคือรับข้อมูลจากฝั่งส่งที่มีการแยกค่าข้อมูลของแต่ละตัวด้วยตัวคั่นที่ได้ตั้งไว้ จากนั้นทำการแยกข้อมูลแต่ละตัวไปทำการพล็อตออกเป็นกราฟของแต่ละค่า นำค่าละติจูด, ลองจิจูด ไปทำการแสดงตำแหน่งในหน้าจอแสดงตำแหน่ง GPS โดยจะแสดงหลักการทำงานเป็นโพลีชาร์ตแสดงดังภาพที่ 3.24

### 3.1.3.3 โปรแกรมออกแบบหน้าต่างแสดงผล

เขียนโปรแกรม LabVIEW เพื่อออกแบบหน้าต่างแสดงผล [28] ให้สามารถรับข้อมูลจากแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กแล้วนำมาแสดงผลในหน้าจอแสดงผลของโปรแกรมที่ใช้หลักการของโพลีชาร์ตในภาพที่ 3.24 ในการแยกข้อมูลแต่ละส่วนไปแสดงผล โดยหน้าจอที่ทำการออกแบบเสร็จแล้วจะเป็นไปตามภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.25 ส่วนประกอบต่างๆของหน้าจอแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 3.25 นั้นแสดงส่วนประกอบต่างๆของหน้าจอแสดงผลโดยจะประกอบไปด้วยการแสดงผลหลักๆ 6 แบบ คือ

1) แบบกล่องข้อความ จะประกอบไปด้วย

1. Team ID คือ หมายเลขลำดับของทีมซึ่งจะได้จากแข่งขัน
2. Status คือ สเตตัสของสถานการณ์ทำงานของแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก
3. Mission Time คือ เวลาที่จับตั้งแต่แบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กเริ่มทำงาน
4. Packet Count คือ ลำดับของ packet นั้นๆ
5. Serial monitor คือ ข้อความที่รับได้ทั้งหมด

2) แบบกราฟแสดงผล จะประกอบไปด้วย

1. Altitude Graph คือ กราฟความสูง
2. 3 Axes Acceleration Graph คือ กราฟความเร่งสามแกน
3. Pressure Graph คือ กราฟความดัน
4. Temperature Graph คือ กราฟอุณหภูมิ

3) แบบหน้าจอแสดงผล GPS คือ หน้าจอแสดงพิกัดตำแหน่งของแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก โดยใช้ค่า GPS Latitude และ GPS Longitude ในการแสดงตำแหน่ง

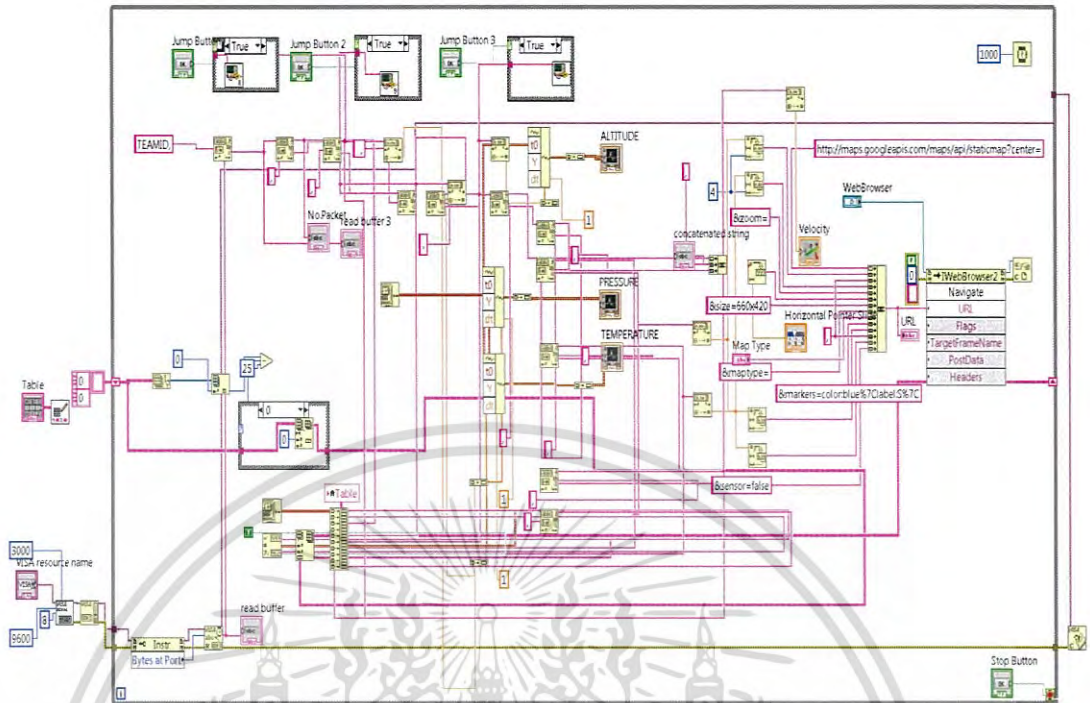
4) แบบหน้าจอ 3D simulator คือ หน้าจอแสดงลักษณะการหมุนของแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก โดยใช้ค่าจากเซนเซอร์ 3 Axes Acceleration ในการแสดงเป็นรูปแบบจำลอง 3D

5) แบบเข็มทิศ คือ ทิศทางของแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก โดยใช้ค่าจากเซนเซอร์ Magnetometer ในการชี้ทิศทาง

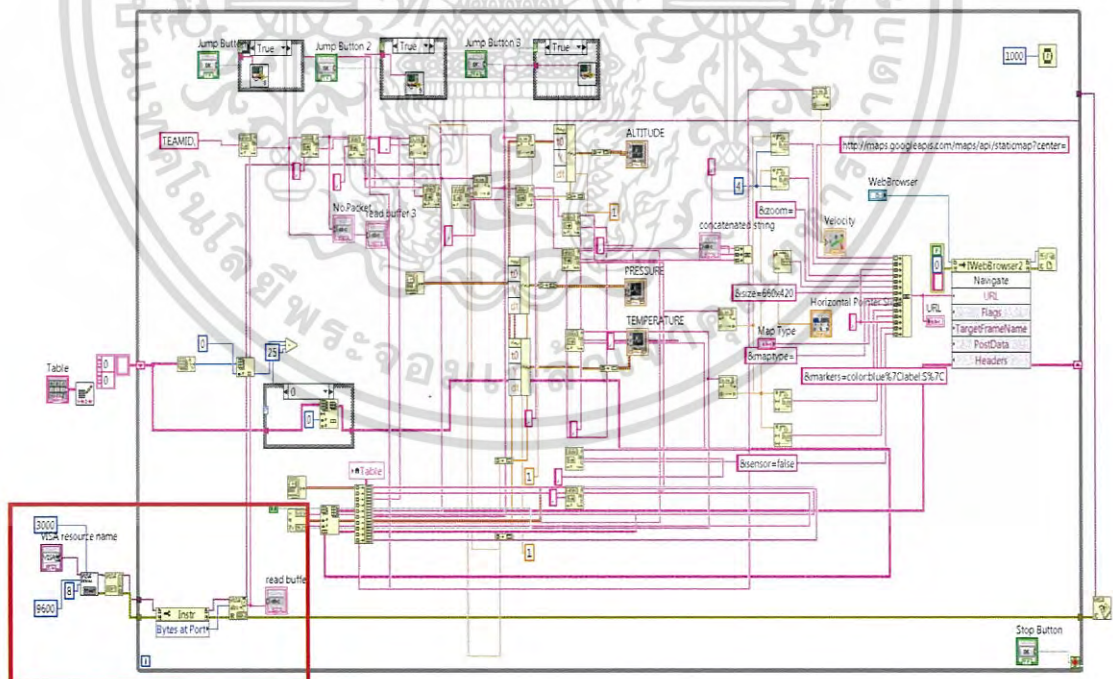
6) แบบ meter แสดงผล จะประกอบไปด้วย

1. Voltage คือ แสดง voltage ที่เหลือของถ่านในแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก
2. Speed คือ ความเร็วของแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก

ในการออกแบบโปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลข้อมูลนั้นจะเขียนโดยใช้งาน โปรแกรม LabVIEW ซึ่งจะมีหน้าตาในการออกแบบดังภาพที่ 3.26

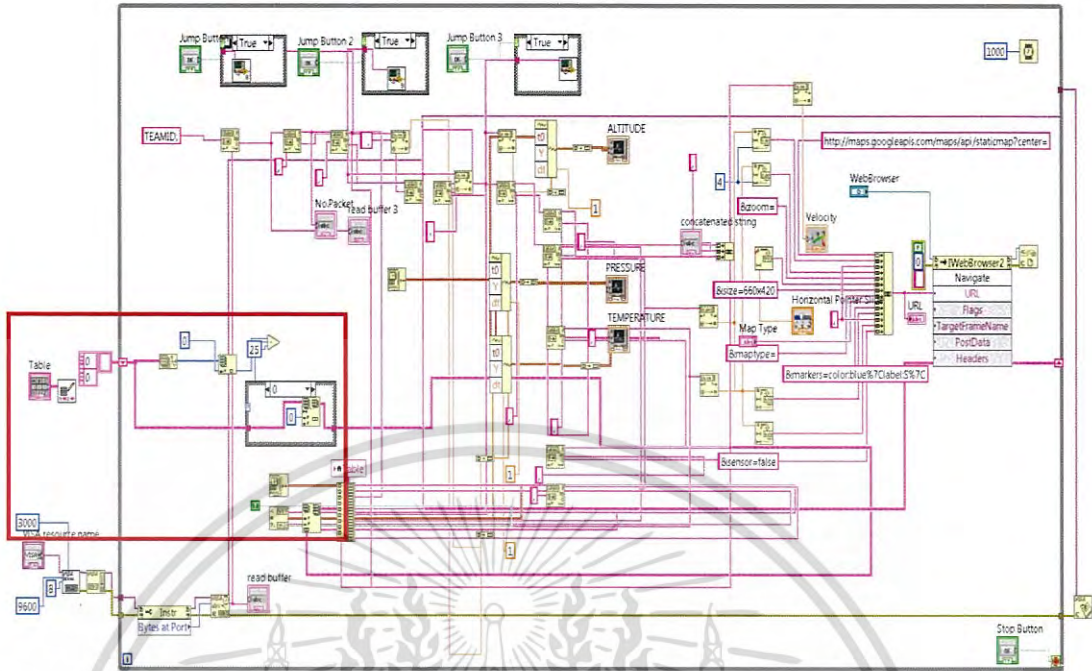


ภาพที่ 3.26 โปรแกรมที่ทำการออกแบบ

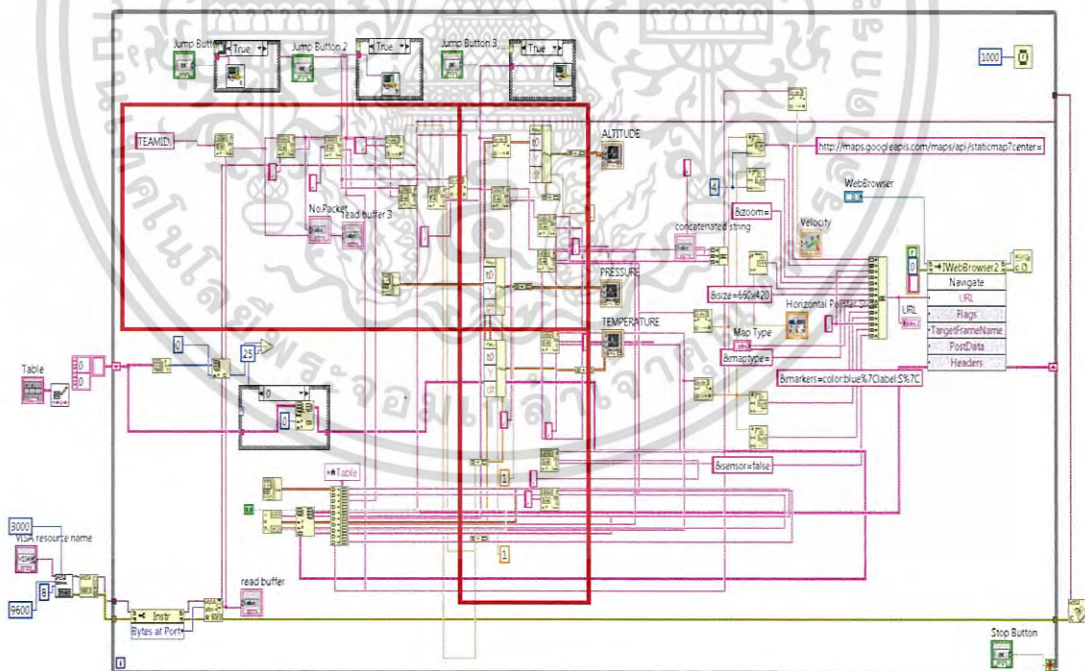


ภาพที่ 3.27 โปรแกรมที่ทำงานในส่วนของการรับข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

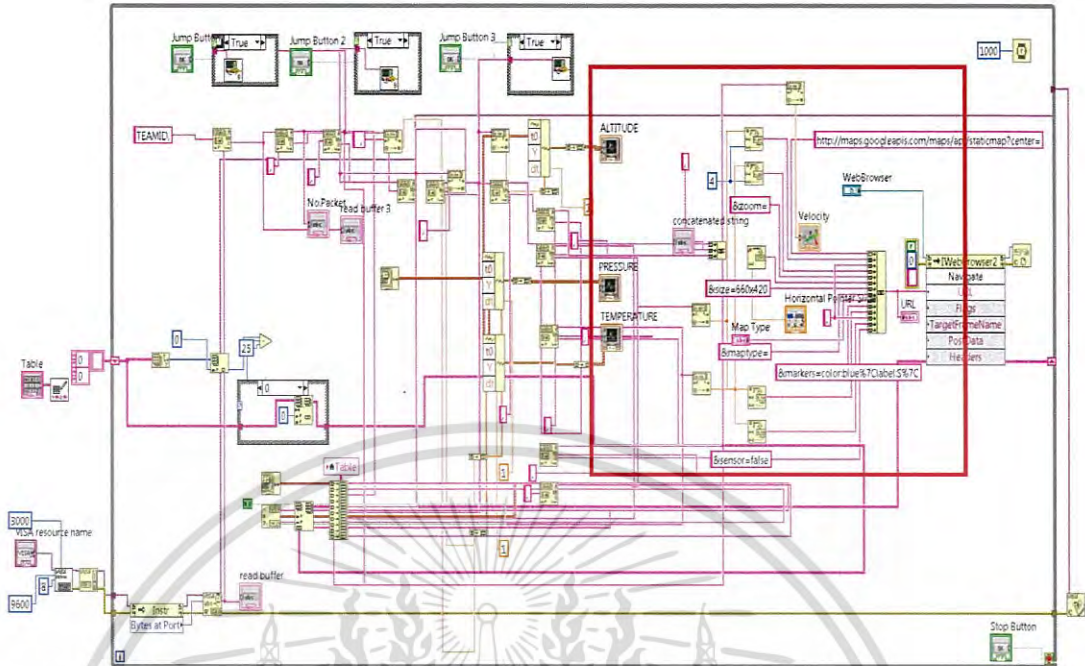


ภาพที่ 3.28 โปรแกรมที่ทำงานในส่วนของตาราง



ภาพที่ 3.29 โปรแกรมที่ทำงานในส่วนของการแยกข้อมูลและแสดงผลกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.30 โปรแกรมที่ทำงานในส่วนของการแสดงผล GPS

โดยจากภาพที่ 3.27 ในกรอบสี่เหลี่ยมจะเป็นส่วนของโปรแกรมที่ทำหน้าที่ในการรับข้อมูลจากฝั่งส่งแล้วแสดงในหน้าจอแสดงผลว่าข้อความที่รับมานั้นคืออะไรบ้าง จากภาพที่ 3.28 ในกรอบสี่เหลี่ยมจะเป็นส่วนของโปรแกรมที่ทำหน้าที่ของการใส่ค่าข้อมูลที่ได้รับมาได้ลงในตารางในหน้าจอแสดงผล จากภาพที่ 3.29 ในกรอบสี่เหลี่ยมจะเป็นส่วนของโปรแกรมที่ทำหน้าที่ในการแยกข้อมูลจากฝั่งส่งที่ได้รับแยกออกจากกันด้วยเครื่องหมาย >, < จากนั้นก็นำค่าไปพลอตกราฟในหน้าจอแสดงผล และจากภาพที่ 3.30 ในกรอบสี่เหลี่ยมจะเป็นส่วนของโปรแกรมที่ทำหน้าที่ในส่วนของการแสดงผลตำแหน่งพิกัด GPS โดยรับค่าละติจูดและลองจิจูด ไปใส่ใน URL ของ google map แล้วทำการแสดงตำแหน่งที่หน้าจอแสดงผล

โดยอุปกรณ์แต่ละตัวที่ใช้ในการออกแบบจะประกอบไปด้วย

- 1) VISA resource name เป็นตัวกำหนดพอร์ตของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ แสดงดังภาพที่ 3.31

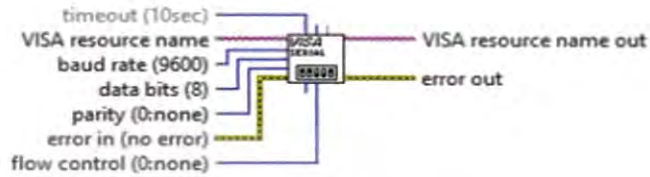
VISA resource name



ภาพที่ 3.31 VISA resource name

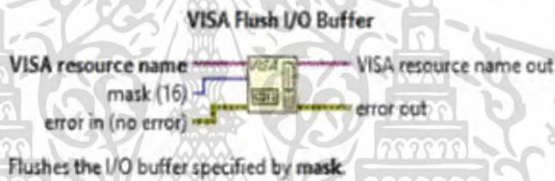
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) VISA Configure Serial Port เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการส่งแบบ serial โดยเริ่มจากเชื่อมต่อสายจากพอร์ต VISA resource name เพื่อกำหนดอุปกรณ์ที่จะเชื่อมต่อ แสดงดังภาพที่ 3.32



ภาพที่ 3.32 VISA Configure Serial Port

3) VISA Flush I/O Buffer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการล้าง Buffer แสดงดังภาพที่ 3.33



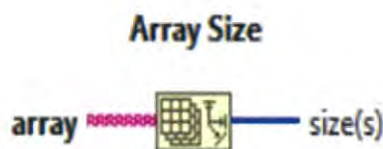
ภาพที่ 3.33 VISA Flush I/O Buffer

4) Table เป็นเครื่องมือตารางที่ใช้สำหรับเก็บค่า แสดงดังภาพที่ 3.34



ภาพที่ 3.34 Table

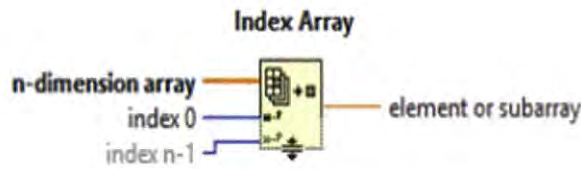
5) Array size ทำหน้าที่หาค่าขนาดของ array แสดงดังภาพที่ 3.35



ภาพที่ 3.35 Array size

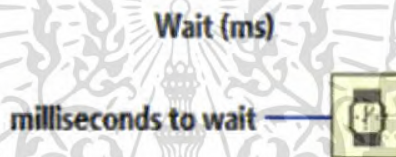
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) Index Array ทำหน้าที่แปลงมิติของarray แบ่งเป็นส่วนย่อยๆ แสดงดังภาพที่ 3.36



ภาพที่ 3.36 Index Array

7) Wait (ms) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดค่าหน่วยเวลาโดยค่าที่ใส่เข้าไปนั้นจะมีหน่วยเป็น milliseconds แสดงดังภาพที่ 3.37



ภาพที่ 3.37 Wait (ms)

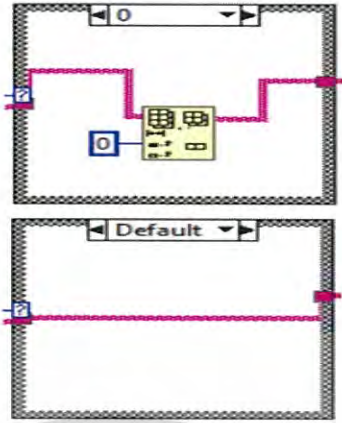
8) read buffer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการอ่านค่าข้อมูลที่ได้รับ แสดงดังภาพที่ 3.38



ภาพที่ 3.38 read buffer

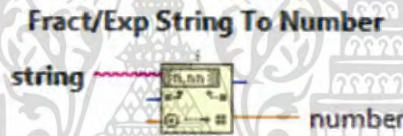
9) Case Structure เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดเงื่อนไขที่เราต้องการ โดยเงื่อนไขนั้นจะขึ้นอยู่กับ input หาก input ไหนตรงกับเงื่อนไขก็จะทำตามรูปแบบที่กำหนดไว้โดยแสดงดังภาพที่ 3.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



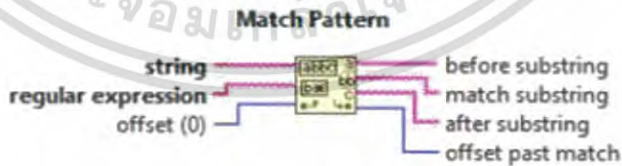
ภาพที่ 3.39 Case Structure

10) Fract/Exp String To Number เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนค่า string ให้กลายเป็นตัวเลขเพื่อนำเอาค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณ แสดงดังภาพที่ 3.40



ภาพที่ 3.40 Fract/Exp String To Number

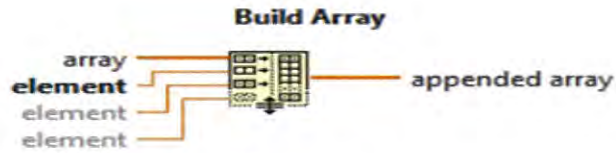
11) Match Pattern เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกข้อมูลที่ส่งมาผ่านพอร์ต String โดยการกำหนดตัวอักษรหรือเครื่องหมายที่ใช้ในการแยกผ่านพอร์ต regular expression โดยได้ใช้เป็นเครื่องหมาย , ในการแยกข้อมูล โดย แสดงดังภาพที่ 3.41



ภาพที่ 3.41 Match Pattern

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12) Build Array เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการรวม Array แต่ละ element เข้าด้วยกัน โดยแต่ละ element ต้องมีขนาดเท่ากัน แสดงดังภาพที่ 3.42



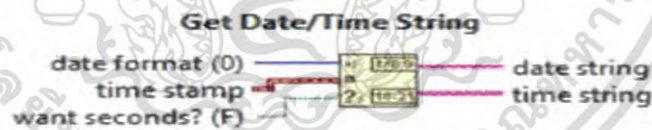
ภาพที่ 3.42 Build Array

13) Get Date/Time In Seconds เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างข้อมูลที่เป็นวันและเวลาปัจจุบัน แสดงดังภาพที่ 3.43



ภาพที่ 3.43 Get Date/Time In Seconds

14) Get Date/Time String เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกวันและเวลาออกมาเป็นข้อมูลชนิด String แสดงดังภาพที่ 3.44



ภาพที่ 3.44 Get Date/Time String

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

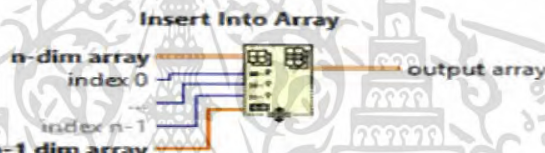
15) Build Waveform เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดแกน โดย  $t_0$  พอร์ตเป็นการกำหนดแกน x และ  $y$  พอร์ต กำหนดแกน y โดยที่พอร์ต dt จะกำหนดเวลาแกน y โดยที่พอร์ต dt จะกำหนดเวลาที่ใช้ในการแสดงค่า แสดงดังภาพที่ 3.45

**Build Waveform**



ภาพที่ 3.45 Build Waveform

16) Insert Into Array เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการรวม Array เข้าด้วยกัน แสดงดังภาพที่ 3.46



ภาพที่ 3.46 Insert Into Array

17) Waveform Chart เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแสดงข้อมูลออกมาเป็นกราฟแสดงดังภาพที่ 3.47

**Waveform Chart**



ภาพที่ 3.47 Waveform Chart

18) Number To Decimal String เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงตัวเลขให้กลายเป็นข้อมูลทศนิยมแบบ string แสดงดังภาพที่ 3.48

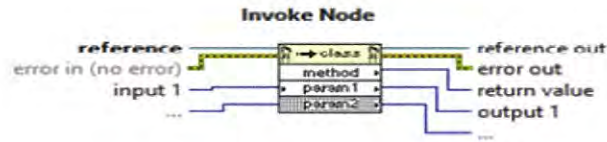
**Number To Decimal String**



ภาพที่ 3.48 Number To Decimal String

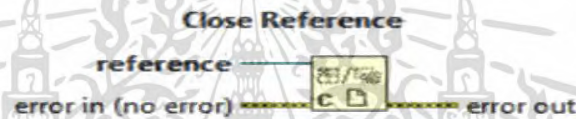
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19) Invoke Node เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเรียกใช้วิธีการหรือการกระทำจาก reference ส่วนมากวิธีการจะมีพารามิเตอร์ที่มีความเกี่ยวข้องกัน แสดงดังภาพที่ 3.49



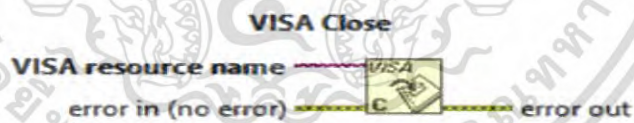
ภาพที่ 3.49 Invoke Node

20) Close Reference เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปิดการทำงานของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับตัว reference แสดงดังภาพที่ 3.50



ภาพที่ 3.50 Close Reference

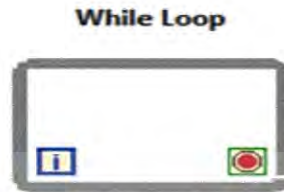
21) VISA Close เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปิดการทำงานของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับตัว VISA resource name แสดงดังภาพที่ 3.51



ภาพที่ 3.51 VISA Close

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

22) While Loop เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดการทำงาน โดยจะทำงานจนกว่าค่าผลลัพธ์ที่ได้จะ false หรือทำการกำหนดเองโดยใช้ตัว control แสดงดังภาพที่ 3.52



ภาพที่ 3.52 While Loop

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1 สายอากาศ stack microstrip

สายอากาศที่นำค่าจากการคำนวณไปทำการออกแบบด้วยโปรแกรมและนำค่าจากการจำลองค่าความยาวและระยะห่างแต่ละพารามิเตอร์ในโปรแกรมมาทำการสร้างเป็นสายอากาศขึ้นมาโดยแสดงดังภาพที่ 3.53



ภาพที่ 3.53 สายอากาศ stack microstrip

#### 3.2.2 เครื่องสเปกตรัมอนาลิเซอร์ (Spectrum Analyzer)

สเปกตรัมอนาลิเซอร์ หรือ Spectrum Analyzer [29] เป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการวัดสัญญาณในย่านความถี่สูงมากๆ เช่นความถี่จากเสาอากาศมักใช้ในงานสื่อสารแบบไร้สาย สเปกตรัมอนาลิเซอร์สามารถวัดและแสดงค่าในรูปแบบความถี่(Frequency domain) และแอมพลิจูดของสัญญาณได้โดยใช้ในการวัดค่าคุณสมบัติที่จำเป็นของสายอากาศเพื่อดูประสิทธิภาพ มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 3.54



ภาพที่ 3.54 เครื่องสเปกตรัมอนาลิเซอร์ [29]

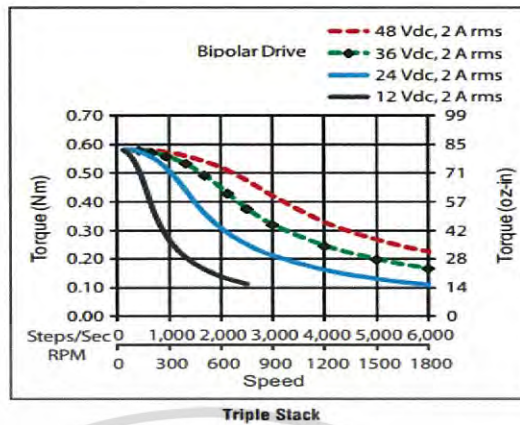
### 3.2.3 Stepper Motor NEMA 17

มอเตอร์ตัวแรกที่เลือกใช้คือ Stepper Motor NEMA 17 [20] (ตัวที่อยู่ด้านบนของภาพที่ 3.39) จะนำไปใช้ในการหมุนตามแนวแกนตั้ง และมีคุณสมบัติต่างๆแสดงดังตารางที่ 3.3 โดยจะมีประสิทธิภาพของ Stepper Motor NEMA 17 เมื่อใช้งานต่อเนื่องเทียบกับแต่ละแรงดันไฟฟ้าแสดงในภาพที่ 3.55

ตารางที่ 3.3 คุณลักษณะของ Stepper Motor NEMA 17

Description	Length	Mounted	Mounted	Detent Torque		Rotor Inertia		Motor Weight		
		Rated Current	Holding Torque	mNm	oz-in	g cm <sup>2</sup>	oz-in <sup>2</sup>	Kg	lbs	
(Stack)	“L” Max	Amps	Nm Typ.	oz-in Typ.	mNm	oz-in	g cm <sup>2</sup>	oz-in <sup>2</sup>	Kg	lbs
Triple	62.8 mm (2.47 in)	2	0.83	120	30	4.2	123	0.67	0.6	1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.55 ประสิทธิภาพของ Stepper Motor NEMA 17 เมื่อใช้งานต่อเนื่องเทียบแต่ละแรงดันไฟฟ้า [20]

### 3.2.4 Stepper Motor NEMA 23

มอเตอร์ตัวที่สองนั้น Stepper Motor NEMA 23 [20] (ตัวที่อยู่ด้านล่างของภาพที่ 3.39) จะนำไปใช้ในการหมุนตามแนวแกนนอน และมีคุณสมบัติต่างๆแสดงในตารางที่ 3.4 โดยจะมีประสิทธิภาพของ Stepper Motor NEMA 23 เมื่อใช้งานต่อเนื่องเทียบกันแต่ละแรงดันไฟฟ้าแสดงดังในภาพที่ 3.56

ตารางที่ 3.4 คุณลักษณะของ Stepper Motor NEMA 23

Description	Length	Mounted	Mounted	Detent Torque		Rotor Inertia		Motor Weight	
		Rated Current	Holding Torque	mNm	oz-in	g cm <sup>2</sup>	oz-in <sup>2</sup>	kg	lbs
(Stack)	“L” Max	Amps	Nm z-in Typ. Typ.						
Power Plus	77.0 mm (3.03 in)	3	3.30 470	150	21	390	2.1	1.1	2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TB6600 Stepper Motor Driver มีคุณสมบัติต่างๆดังแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติต่างๆของ TB6600 Stepper Motor Driver

คุณสมบัติ	ค่าของคุณสมบัติ
Input Current	0-5 A
Output Current	0.5 - 4.0A
Control Signal	3.3 - 24V
คุณสมบัติ	ค่าของคุณสมบัติ
Power (MAX)	160 W
Micro Step	1, 2/A, 2/B, 4, 8, 16, 32
Weight	0.2 kg

3.2.6 3.2” HVGA LCD TFT Non-Touch Screen, Arduino MEGA-2560 Shield

HVGA LCD TFT Non-Touch Screen, Arduino MEGA-2560 Shield [24] เป็นหน้าจอ LCD ที่ความละเอียดอยู่ที่ 490 x 320 และมีทั้งหมด 262K สี โดยอุปกรณ์มีลักษณะดังภาพที่ 3.58 และมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.6



ภาพที่ 3.58 อุปกรณ์ HVGA LCD TFT Non-Touch Screen, Arduino MEGA-2560 Shield [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของอุปกรณ์ HVGA LCD TFT Non-Touch Screen, Arduino MEGA-2560 Shield

คุณสมบัติ	ค่าของคุณสมบัติ
เลขของอุปกรณ์ IC	ILI9481
ขนาดของจอแสดงผล	3.2 นิ้ว
ชนิดของ Backlight	Highlighting White 6 LED
ความละเอียดของหน้าจอ	480 * 320 Pixel (HVGA)
ปริมาณการใช้กระแสไฟ	80~110 mA
ชนิดของหน้าจอแสดงผล	TFT (IPS Whole Perspective)
แรงดันที่ใช้งาน	5V / 3.3V
ขนาดของอุปกรณ์	Size : 89.92(W) * 54.25(L) (mm)

อุปกรณ์ที่นำมาเชื่อมต่อกับจอ HVGA LCD TFT Non-Touch Screen ได้แก่ Arduino Mega 2560 ทำให้ไม่ต้องต่อกับบอร์ดนี้เพราะเนื่องจากตัวอุปกรณ์ มี HVGA LCD TFT Non-Touch Screen มี shield ที่ติดมากับอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับต่อกับบอร์ด Arduino MEGA-2560 ได้โดยตรงทำให้สะดวกในการเชื่อมต่อกับ บอร์ด Arduino MEGA-2560

### 3.2.7 Arduino Mega 2560



ภาพที่ 3.59 บอร์ด Arduino Mega 2560 [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Arduino Mega 2560 [30] บอร์ดในตระกูลของ Arduino ซึ่งจะมีคุณสมบัติต่างๆ เพิ่มขึ้นจาก Arduino Uno R3 โดยจะใช้ชิพ ATmega2560 ที่มีหน่วยความจำแฟลช 256 KB แรม 8 KB และใช้ไฟเลี้ยงอยู่ที่ 7 ถึง 12 V แรงดันของระบบอยู่ที่ 5 V มี Digital Input / Output มากถึง 54 ขา (เป็น PWM ได้ 14 ขา) มี Analog Input 16 ขา Serial UART 4 ชุด I2C 1 ชุด SPI 1 ชุด เขียนโปรแกรมบน Arduino IDE และยังสามารถโปรแกรมข้อมูลสู่บอร์ดผ่านสาย USB ได้อีกด้วย โดยมีคุณสมบัติโดยย่อตามตารางที่ 3.7 และมีลักษณะแสดงดังภาพที่ 3.59

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติของบอร์ด Arduino Mega 2560

คุณสมบัติ	ค่าของคุณสมบัติ
Microcontroller chip	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage	7-12V
Digital I/O Pins	54
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
Flash Memory	256 KB โดยที่อีก 8 KB ใช้สำหรับ bootloader
Clock Speed	16 MHz

### 3.2.8 Xbee Pro 60mW U.FL Connection - Series 1 [31]

Xbee เป็นอุปกรณ์ที่มี Microcontroller และ RF IC อยู่ภายใน ทำหน้าที่เป็น อุปกรณ์ transceiver (อุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณ) แบบ Half Duplex ย่านความถี่ 2.4 GHz ตามมาตรฐาน โปรโตคอล ZigBee / IEEE 802.15 ใช้พลังงานต่ำ มี interface ที่ใช้รับและส่งข้อมูลกับ Xbee เป็น UART (TTL) โดยตัว Xbee ที่เลือกใช้คือ Xbee Pro 60mW U.FL Connection - Series 1 (802.15.4) โดยจะมีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.8 และมีลักษณะแสดงดังภาพที่ 3.60



ภาพที่ 3.60 Xbee Pro 60mW U.FL Connection - Series 1 (802.15.4) [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.8 คุณสมบัติของ Xbee Pro 60mW U.FL Connection - Series 1

คุณสมบัติ	ค่าของคุณสมบัติ
Operating Voltage	3.3 v
Current rate	215mA
Max data rate	250kbps
Power output	60mW
Max transmission range	1 mile (1500m)
Pins	6 10-bit ADC input pins and 8 digital IO pins

### 3.2.9 Xbee USB Dongle

Xbee usb dongle [32] ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่าง xbee กับ คอมพิวเตอร์แสดงดังรูป ที่ 3.61



ภาพที่ 3.61 xbee usb dongle [32]

### 3.2.10 ออสซิลโลสโคป

ออสซิลโลสโคป (Cathode ray oscilloscope ; CRO ) ที่แสดงดังภาพที่ 3.62 หมายถึงออสซิลโลสโคปใช้หลอดรังสีแคโทด สโคปเป็นเครื่องมือวัดทาง อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในการวัดแสดงรูปคลื่นสัญญาณต่างๆ ออกมาเป็นภาพ ปราบกฏบนจอหลอดภาพให้เห็นได้ เช่น การวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า(ที่เป็นไฟ AC หรือ DC) การวัดความถี่ของ สัญญาณ การวัดเฟสของสัญญาณ และรวมถึงการวัดสัญญาณพัลส์การอ่านค่าแอมพลิจูดของสัญญาณจะเป็น พีค-ทู-พีค หรือค่าพีคและค่าเวลาเป็นวินาที



ภาพที่ 3.62 ออสซิลโลสโคป [33]

### 3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง

ในการเก็บบันทึกผลการทดลองนั้นจะแบ่งการทดลองเป็นสามส่วนดังนี้

#### 3.3.1 การทดสอบการทำงานของสายอากาศ

การทดสอบการทำงานของสายอากาศนั้นจะทำการทดสอบโดยใช้เครื่องสเปคตรัมอ-นาไลเซอร์ ซึ่งเป็นการวัดค่าคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศว่ามีค่าเท่าไร โดยประกอบด้วย ค่าS11, ค่าVSWR, รูปแบบแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น

#### 3.3.2 การทดสอบการทำงานของระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก

การทดสอบการทำงานของระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กนั้นทำได้โดยการป้อนข้อมูลให้มอเตอร์หมุนแล้วทดสอบว่ามอเตอร์นั้นหมุนไปเท่าไร โดยเปรียบเทียบกับกระดาษที่ทำการเขียนแกนของมุมลงไป

#### 3.3.3 การทดสอบโปรแกรม

การทดสอบการทำงานในส่วนของโปรแกรมนั้นทำได้โดยการรับค่าที่ส่งมาจากฝั่งส่งแล้วทำการแสดงผลที่หน้าจอแสดงผลเพื่อดูว่าการทำงานของโปรแกรมแสดงค่าออกมาได้อย่างที่ควรจะเป็นหรือไม่ จากนั้นก็ทำการทดสอบที่ระยะห่างต่างๆ เพื่อดูประสิทธิภาพเรื่องระยะทางในการรับ-ส่งข้อมูล

## บทที่ 4

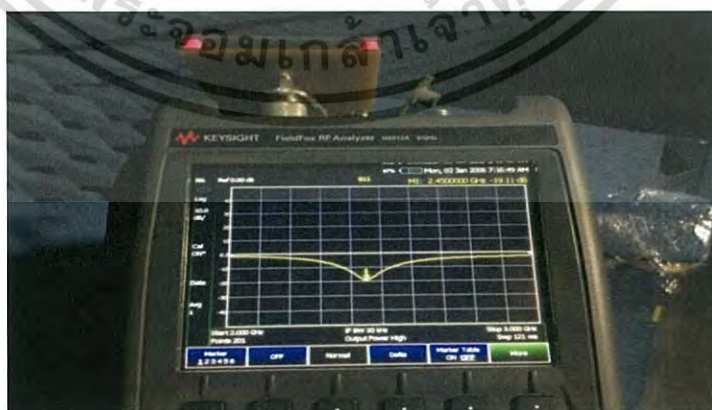
### ผลการวิจัย

#### 4.1 ผลการทดสอบการทำงานของสายอากาศ

เมื่อนำสายอากาศไปทำการสร้างลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 สายอากาศจะมีขนาด 82×82 มม. จากนั้นได้ทำการบัดกรีหัวต่อ SMA 50 โอห์ม แสดงดังภาพที่ 4.1 จากนั้นนำสายอากาศไปทำการวัดทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ของสาย อากาศที่ความถี่ 2.45 GHz ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายงาน Field Fox RF Analyzer รุ่น N9912A ผลที่ได้จะแสดงดังภาพที่ 4.2 และผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ช่วงแถบความถี่ 2.38-2.56 GHz ซึ่งมีค่าน้อยกว่า -10 dB แสดงดังภาพที่ 4.3 ทำให้เราทราบว่าความถี่ที่วัดได้ครอบคลุมอยู่ในย่านการใช้งานที่ WLAN 2.45 GHz

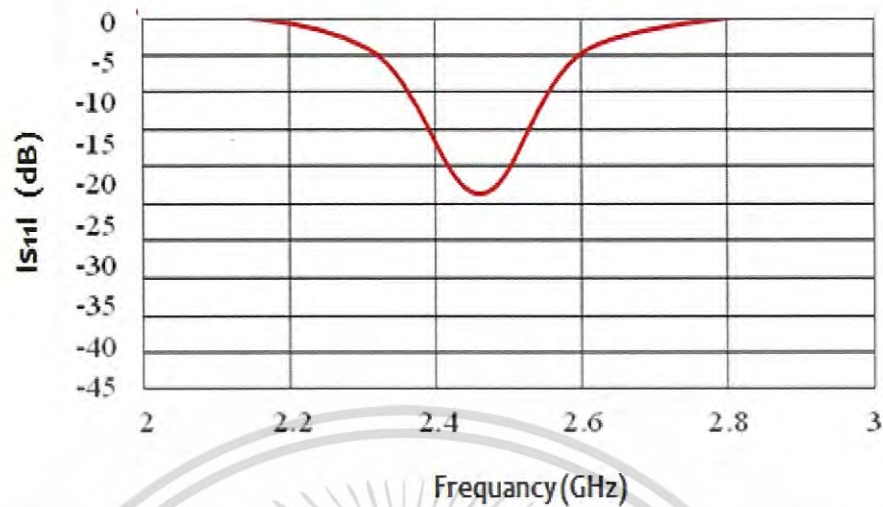


ภาพที่ 4.1 สายอากาศสร้างลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR4

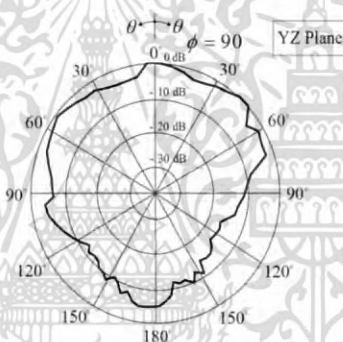


ภาพที่ 4.2 ผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ(Return Loss) ช่วงแถบความถี่ 2.38-2.56 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.3 กราฟการสูญเสียย้อนกลับ(Return Loss) ช่วงแถบความถี่ 2.38-2.56 GHz



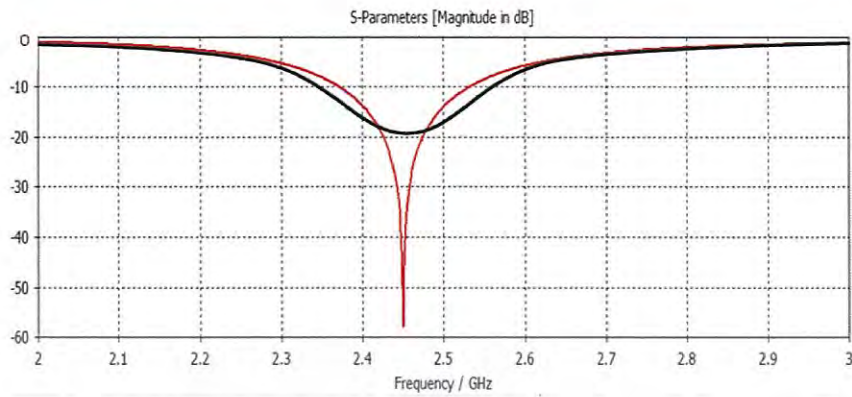
ภาพที่ 4.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นพิมพ์โครงสร้างสองชั้น

จากภาพที่ 4.4 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นพิมพ์โครงสร้างสองชั้นตลอดช่วงความถี่ 2.38-2.56 GHz ในระนาบ y-z plane ที่ความถี่กลาง 2.45 GHz สายอากาศที่สร้างขึ้นนี้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทางเดียวและมีอัตราขยายของสายอากาศที่ 6.5 dBi

#### 4.1.1 เปรียบเทียบผลการจำลองด้วยโปรแกรมกับการสร้างจากแบบจำลอง

หลังจากสร้างและทดสอบสายอากาศค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ของสายอากาศในช่วงความถี่ 2.38 - 2.53 GHz นำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรม แสดงดังภาพที่ 4.5 และเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นพิมพ์โครงสร้างสองชั้นที่ความถี่กลาง 2.45 GHz แสดงดังภาพที่ 4.6 และเปรียบเทียบอัตรการขยายของสายอากาศที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ที่ความถี่กลาง 2.45 GHz



ภาพที่ 4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นพิมพ์โครงสร้างสองชั้น (ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากแบบจำลอง (ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการสร้าง

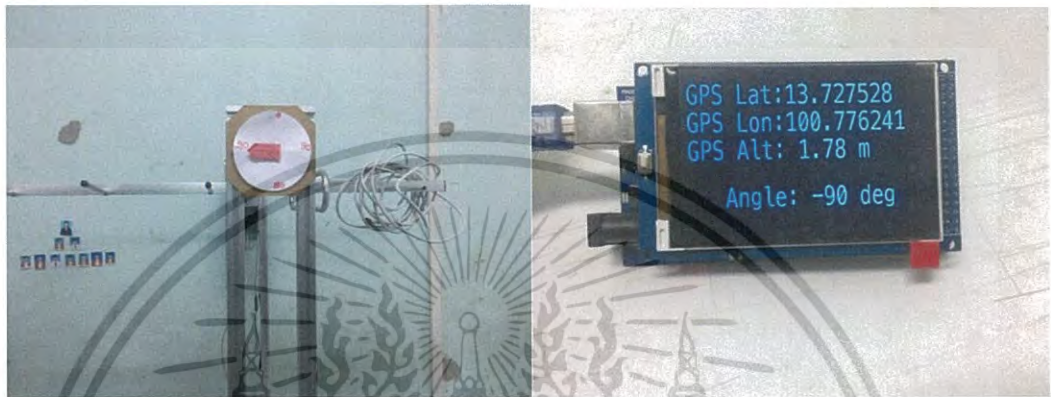
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากแบบจำลองและจากการสร้าง

ความถี่ (GHz)	อัตราขยายของสายอากาศ (dBi)	
	ผลจากแบบจำลอง	ผลจากการวัดค่า
2.45	8.31	6.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 ผลการทดสอบการทำงานของระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก

จากภาพที่ 4.7 และภาพที่ 4.8 คือการป้อนข้อมูลใส่มอเตอร์ให้หมุนไป 90 องศา ในด้านทวนเข็มนาฬิกาและ หมุนไป 90 องศาในด้านตามเข็มนาฬิกา ตามลำดับ พร้อมกับแสดงผลข้อมูลผ่านทางจอ LCD แล้วทดสอบดูว่า มอเตอร์นั้นหมุนไปเท่าไรโดยการเทียบกับกระดาษที่ทำการเขียนแกนของมุมลงไป



ภาพที่ 4.7 ทดสอบการหมุนของมอเตอร์



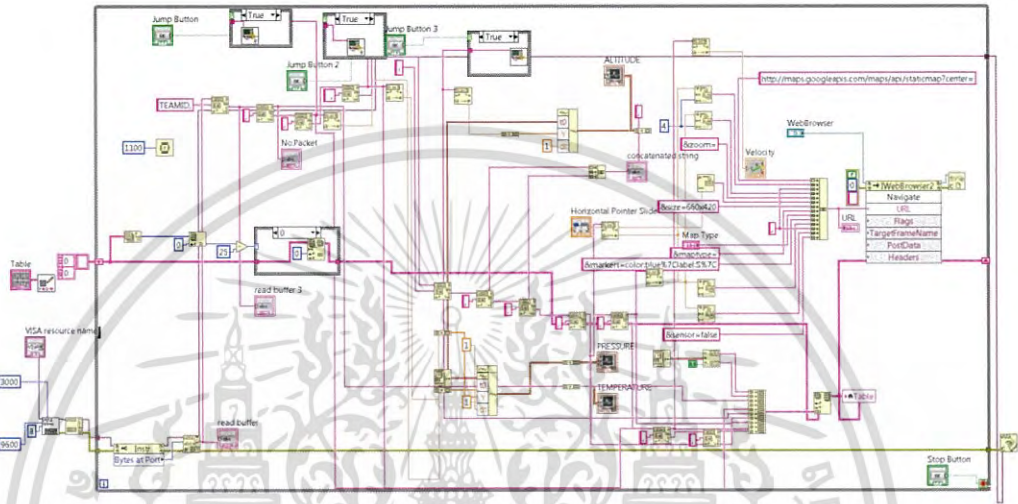
ภาพที่ 4.8 ทดสอบการหมุนของมอเตอร์

ผลที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์คือมอเตอร์หมุนไปตามองศาที่ได้ทำการโปรแกรมไว้แต่จะมีผิดพลาด เล็กน้อยประมาณ  $\pm 2$  องศา เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้นั้นใช้งานร่วมกับตัวทคมอเตอร์ซึ่งทำให้มุมของการหมุนมอเตอร์ เวลาขบกับตัวทคมอเตอร์นั้นเหลื่อมล้ำกันไปทีละเล็กละน้อยเมื่อผ่านการใช้งานไปสักระยะหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรม

ในการทดสอบการทำงานของโปรแกรมนั้นทำได้โดยการรับค่าจากภาคส่งแล้วทำการแสดงผลในหน้าจอแสดงผล โดยจะมีบล็อกไดอะแกรมของโปรแกรมที่ทำการออกแบบดัง ภาพที่ 4.9 และหน้าจอแสดงผลดังแสดงในภาพที่ 4.10 โดยจะแสดงส่วนประกอบของหน้าจอแสดงผลดังภาพที่ 4.11

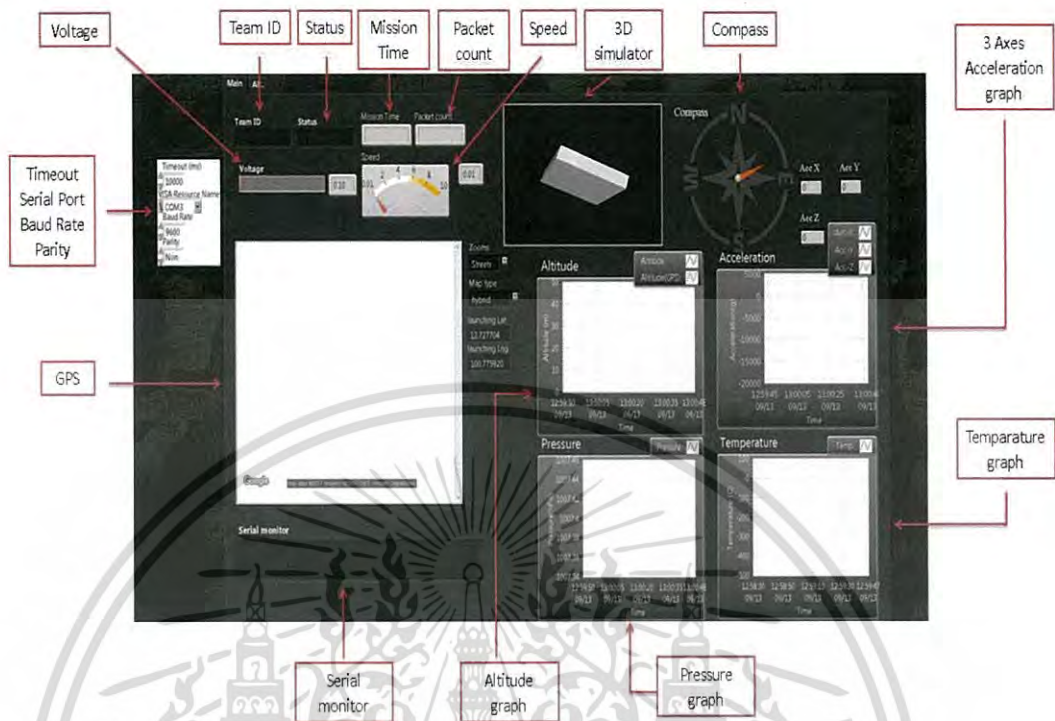


ภาพที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมที่ออกแบบ



ภาพที่ 4.10 หน้าจอแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



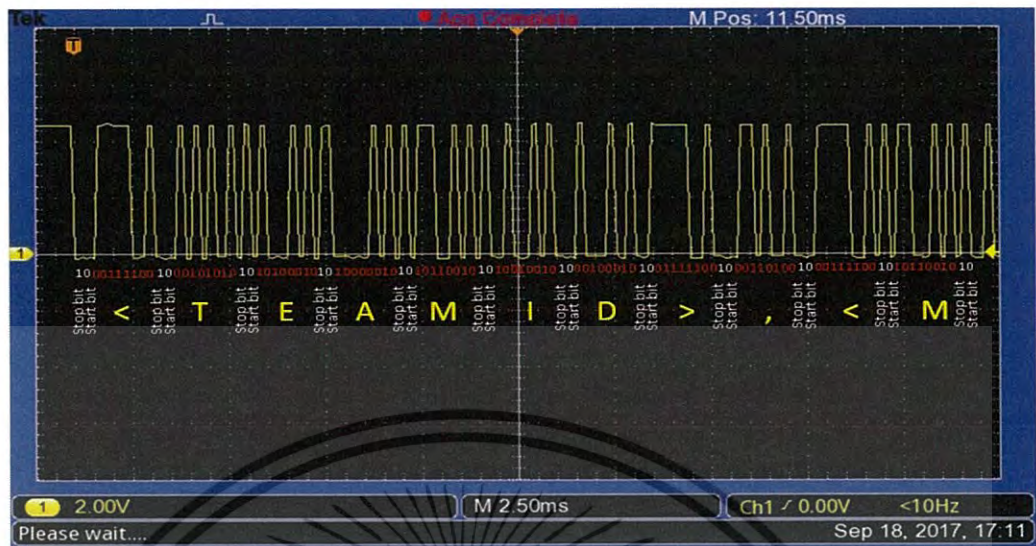
ภาพที่ 4.11 ส่วนประกอบต่างๆของหน้าจอแสดงผล

โดยข้อมูลที่รับจากภาคส่งนั้นจะมีรูปแบบแสดงดังภาพที่ 4.12 ซึ่งเป็นรูปแบบที่บังคับเพื่อใช้ในการแข่งขันและจากนั้นทำการทดลองจับบิตของข้อมูลที่รับได้จากแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กโดยใช้อุปกรณ์ Oscilloscope เพื่อตรวจสอบว่าบิตข้อมูลที่รับได้นั้นตรงกับข้อมูลที่ส่งมาหรือไม่ซึ่งแสดงบิตข้อมูลที่จับได้ในภาพที่ 4.13 โดยผลลัพธ์ที่ได้คือบิตข้อมูลที่ได้มีการเรียงลำดับตามรูปแบบข้อมูลตามข้อที่ 4.12

```
<TEAM ID>,<MISSION TIME>,<PACKET COUNT>,<ALTITUDE>,<PRESSURE>,<TEMP>,<VOLTAGE>,<GPS TIME>,<GPS LATITUDE>,<GPS LONGITUDE>,<GPS ALTITUDE>,<GPS SATS>,<TILT X>,<TILT Y>,<TILT Z>,<SOFTWARE STATE>,<[BONUS STATUS]>,<GPS SPEED>,<GYRO X>,< GYRO Y >,< GYRO Z >,< MAG >
```

ภาพที่ 4.12 รูปแบบของข้อมูลที่ทำการรับจากแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.13 ค่าสัญญาณบิตข้อมูลเมื่อดูจากเครื่องออสซิลโลสโคป

โดยจากภาพที่ 4.13 คือค่าสัญญาณบิตข้อมูลที่วัดจากเครื่องออสซิลโลสโคป ที่ส่งแบบ UART ซึ่งจะต้องทำการกลับบิตก่อนที่จะเทียบกับข้อมูล โดยจะแสดงข้อมูลเริ่มจากบิตสตอป บิตสตาร์ท ตามด้วยข้อมูลและจะกั้นทุกไบต์ด้วยบิตสตอป บิตสตาร์ท เป็นอย่างนี้ทุกไบต์จนถึงข้อมูลตัวสุดท้าย



ภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบตำแหน่ง GPS จากโปรแกรมแสดงผลกับโทรศัพท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.14 คือการทดสอบการรับค่า GPS Latitude และ GPS Longitude มาเพื่อแสดงพิกัดตำแหน่งของแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กในหน้าจอแสดงผล โดยผลที่ได้นั้นคือรูปทางซ้ายมือในภาพที่ 4.14 และนำมาทำการเปรียบเทียบกับตำแหน่งพิกัดที่แสดงผลจากโทรศัพท์ที่ได้ตั้งรูปขวามือของภาพที่ 4.14 ผลลัพธ์ที่ได้นั้นคือตำแหน่งของทั้ง 2 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยแต่ละค่าที่ทำการทดสอบนั้นแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าตำแหน่ง GPS จากโปรแกรมแสดงผลเทียบกับ โทรศัพท์

ตำแหน่ง GPS จาก โปรแกรมแสดงผล		ตำแหน่ง GPS จาก โทรศัพท์	
GPS Latitude	GPS Longitude	GPS Latitude	GPS Longitude
13.727327	100.776963	13.727328	100.776967
13.727320	100.776956	13.727330	100.776965
13.727340	100.776982	13.727330	100.776966
13.727334	100.776978	13.727335	100.776962
13.727338	100.776980	13.727334	100.776970

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

จากการการวิจัยเรื่อง การสร้างแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กสำหรับการแข่งขัน (2): ภาครับ ซึ่งแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วนหลักๆคือ ส่วนของการทำสายอากาศ ส่วนของโปรแกรม และส่วนของการออกแบบและสร้างระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก โดยได้ทำการศึกษาหลักการต่างๆเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำโครงการซึ่งสามารถสรุปผลการดำเนินงาน ได้ดังนี้

- 1) สามารถทำการสร้างสายอากาศ Stack microstrip ที่ความถี่กลาง 2.45 GHz ซึ่งนำมาใช้งานกับ xbee ได้
- 2) สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อเก็บค่าสภาพอากาศ (ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และความสูงจากระดับน้ำทะเลกลางโดยคำนวณจากความดัน) เก็บค่าจาก GPS ที่ระบุถึงตำแหน่ง (ได้แก่ เวลา, ละติจูด, ลองจิจูด, ความสูง และ เลขดาวเทียม) ค่าจากความเร่ง 9 แกน (ได้แก่ accelerometers, gyroscope และ magnetometer) ค่าระดับแรงดันจากแบตเตอรี่ และค่าการนับเวลาภารกิจเป็นวินาทีโดยใช้ Real time clock
- 3) สามารถเขียนโปรแกรมนำข้อมูลที่รับได้มาแยกแยะแสดงผลออกเป็นแบบกล่องข้อความ (ได้แก่ Team ID, Status, Mission Time, Packet Count และ Serial Monitor) แบบกราฟแสดงผล (ได้แก่ Altitude Graph, 3 Axes Acceleration Graph, Pressure Graph และ Temperature Graph) แบบหน้าจอแสดงผล GPS แบบหน้าจอ 3D simulator แบบเข็มทิศ และแบบ meter (ได้แก่ Voltage และ Speed)
- 4) สามารถออกแบบและสร้างระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็ก
- 5) สามารถสร้างระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กให้มีการทำงานเป็นสองโหมดคือ โหมดติดตามแบบอัตโนมัติ และโหมดบังคับ manual ด้วยจอยสติ๊ก

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- สายอากาศ Stack microstrip ที่สร้างขึ้นมามีกำลังขยายน้อย ทำให้การรับข้อมูลในทางภาครับสำหรับระยะทางที่ไกลจากแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กที่มากกว่า 500 เมตร มีปัญหาการรับข้อมูลไม่ได้บ้าง
- เนื่องจากความถี่ที่เลือกในย่านความถี่ 2.4 GHz เป็นสัญญาณความถี่สูงทำให้ระยะทางที่ใช้ในการส่งได้ไม่ไกลเท่ากับความถี่ต่ำ จึงเป็นเหตุให้ต้องสร้างสายอากาศที่มีอัตราขยายที่สูง
- การทำงานของระบบสายอากาศสำหรับติดตามแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กในโหมดติดตามแบบอัตโนมัตินั้นยังมีการตอบสนองช้ากว่าที่ควร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6  
สรุปผลผลิตงานวิจัย

ปริญญานิพนธ์ ระดับปริญญาตรี เรื่อง การสร้างแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กสำหรับการแข่งขัน :  
ภาครับ

นักศึกษาระดับปริญญาตรี 3 คน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ดาราศาสตร์ศึกษา (Astronomy Education). “CANSAT คืออะไร?”  
<http://www.astroeducation.com/what-is-cansat>.
- [2] Yothin Boonnarat. “ระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม (Satellite Communication System).” <http://rsu-itm640.blogspot.com/2010/08/satellite-communication-system.html>.
- [3] Phakpoom Laotrakul. “ดาวเทียม (Satellites).”  
<http://www.gistda.or.th/main/th/node/962>.
- [4] CanSat Competition. “Introduction.”  
<http://www.cansatcompetition.com/index.html>.
- [5] CanSat Competition. “Mission.”  
<http://cansatcompetition.com/mission.html>.
- [6] CanSat Competition. “Mission guide.”  
[http://www.cansatcompetition.com/docs/mission\\_guide\\_2018\\_r20171020\\_r1.4.pdf](http://www.cansatcompetition.com/docs/mission_guide_2018_r20171020_r1.4.pdf).
- [7] สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. “ทฤษฎีพื้นฐานและการประยุกต์ใช้งานสายอากาศ.”  
[http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/144454/b6c19ab11332f5d090bc4e08e75b00e2?Resolve\\_DOI=10.14457/KU.res.2012.22](http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/144454/b6c19ab11332f5d090bc4e08e75b00e2?Resolve_DOI=10.14457/KU.res.2012.22).
- [8] วิกีพีเดีย. “ความยาวคลื่น.”  
<https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%A7%E0%B8%84%E0%B8%A5%E0%B8%B7%E0%B9%88%E0%B8%99>.
- [9] Artificial motion. “STEPPING MOTOR.”  
[https://www.nectec.or.th/schoolnet/library/webcontest2003/100team/dlnes137/am/step\\_motor.html](https://www.nectec.or.th/schoolnet/library/webcontest2003/100team/dlnes137/am/step_motor.html)
- [10] Arduitrronics. “Arduino and Motor Control.”  
<https://www.arduitronics.com/article/25/arduino-and-motor-control-part-3-stepper-motor>
- [11] วิชาการ.คอม. “จอยสติคแบบอนาล็อก.”  
<http://www.vcharkam.com/blog/41099/13064>
- [12] พูนศักดิ์ พรเพิ่มพูน. “ระบบไร้สายโดยใช้ Zigbee เพื่อควบคุมและติดตามสถานะเครื่องจักรและเซ็นเซอร์ในโรงงานผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และระบบสารสนเทศ คณะสถิติประยุกต์, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์, 2556.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] researchgate. "IEEE820.15.4/ZigBee protocol stack architecture."  
[https://www.researchgate.net/figure/226297449\\_fig2\\_Fig-22-IEEE820154ZigBee-protocol-stack-architecture](https://www.researchgate.net/figure/226297449_fig2_Fig-22-IEEE820154ZigBee-protocol-stack-architecture).
- [14] Internetworking ICT KKU , Sec 3. "ย่านความถี่ใช้งานตามมาตรฐาน."  
<https://sites.google.com/site/322462wirelesspan/wireless-personal-area-network/thechnoloyi-thi-keiywkhxng-kab-wireless-pan/zigbee>.
- [15] Wikipedia. "IEEE 802.15.4."  
[https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.15.4](https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15.4).
- [16] Wikimedia commons. "UART XBee Data Format."  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:UART\\_XBee\\_Data\\_format.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:UART_XBee_Data_format.jpg).
- [17] Digi International. "AT commands."  
<http://docs.digi.com/display/RFKitsCommon/Command+mode>.
- [18] Digi International. "API frames."  
<http://docs.digi.com/display/XCTU/Concepts+and+terminology>.
- [19] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. "สายอากาศไมโครสตริปแบบชั้นที่มีโพลาไรซ์วงกลม สำหรับเครือข่าย 2.4 GHz." /www.ectihailand.org/assets/papers/1660\_pub\_49.pdf.
- [20] pbcllinear. "Stepper Motor NEMA 17, Stepper Motor NEMA 23."  
<http://www.pbcllinear.com/Download/DataSheet/Stepper-Motor-Support-Documnet.pdf>.
- [21] NMEC. "Aluminium profile."  
<http://www.nmec.co.th/aluminium-profile>.
- [22] iGiSMAP. "Formula to Find Bearing or Heading angle between two points: Latitude Longitude." <http://www.igismap.com/formula-to-find-bearing-or-heading-angle-between-two-points-latitude-longitude>.
- [23] Andrew Hedges. "Finding distances based on Latitude and Longitude."  
<https://andrew.hedges.name/experiments/haversine>.
- [24] QQonlineTrading. "3.2" HVGA LCD TFT Non-Touch Screen, Arduino MEGA-2560 Shield Compatible." <http://qqtrading.com.my/32-inch-lcd-tft-screen-for-arduino-mega-2560-shield-compatible>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[25] Dfrobot. “TB6600 Stepper Motor Driver SKU: DRI0043.”

[https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/TB6600\\_Stepper\\_Motor\\_Driver\\_SKU:\\_DRI0043](https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/TB6600_Stepper_Motor_Driver_SKU:_DRI0043).

[26] Art of Circuits. “Dual Axis XY Joystick Module.”

<http://artofcircuits.com/product/dual-axis-xy-joystick-module>.

[27] LCDTVTHAILAND. “LabVIEW คืออะไร? ประโยชน์และการใช้งาน LabView.”

<https://www.lcdtvthailand.com/webboard/index.php?topic=392759.0>

[28] National Instruments. “3D Picture Control.”

<https://forums.ni.com/t5/UAV-Interest-Group/3D-Picture-Control-to-show-orientation-Roll-Pitch-and-Yaw/gmp/3531888>.

[29] RIGOL. “Spectrum Analyzers.”

<http://www.rigol.eu/products/spectrum-analyzers/>

[30] ThaiEasyElec. “Arduino Mega 2560.”

<http://www.thaieasyelec.com/products/development-boards/arduino-mega-2560-detail.html>.

[31] sparkfun. “XBee Pro 60mW U.FL Connection - Series 1 (802.15.4).”

<https://www.sparkfun.com/products/8710>.

[32] sparkfun. “SparkFun XBee Explorer Dongle.”

<https://www.sparkfun.com/products/11697>.

[33] ฟิสิกส์ราชวมงคล. “ออสซิลโลสโคป.”

<http://www.rmutphysics.com/charud/virtualexperiment/labphysics2/meter>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาเลขที่ 2561-02-01-016

การสร้างแบบจำลองดาวเทียมขนาดเล็กสำหรับการแข่งขัน : ภาครัฐ  
CanSat Design for Competition : Ground Station

รายงานสรุปการเงินรอบ 12 เดือน

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัย ผู้รับทุน ดร. พีระเมศรี โชติทวีกิจญาดา  
รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 15 ต.ค. 60 ถึงวันที่ 30 ก.ย. 61

สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณ	ค่าใช้จ่าย	ค่าใช้จ่าย	รวมค่าใช้จ่าย	คงเหลือ (หรือเกิน)
	รวมทั้งโครงการ	จากรายงานครั้ง ก่อน	งวดปัจจุบัน	สะสมถึง ปัจจุบัน	
งบดำเนินงาน					
ค่าตอบแทน					
ค่าใช้สอย					0
ค่าวัสดุ	50,000		50,000	50,000	0
รวม	50,000		50,000	50,000	0

จำนวนเงินที่ได้รับและจำนวนเงินที่ใช้จ่าย

งวดเงินที่ได้รับ	จำนวนเงินที่ได้รับ(บาท)	เมื่อ (ระบุวัน เดือน ปี)
งวดที่ 1	50,000	20 ก.ค. 61
รวม	50,000	①

งวดที่	จำนวนเงินที่ใช้จ่าย (บาท)	
งวดที่ 1	50,000	
รวม	50,000	②

จำนวนเงินคงเหลือ ① - ② ..... 0 ..... บาท

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงิน โครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

## ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นาย พิระเมษฐ์ โชติกวีกิจญาดา

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

## ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
Ph.D.	Aerospace Engineering	Tokyo Metropolitan University	2559
วศ.ม.	วิศวกรรมโทรคมนาคม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2555
วศ.บ.	วิศวกรรมโทรคมนาคม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2553

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ ระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม

## ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2555	โครงการวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์ระยะสั้น ด้วยวงจรแบบอโต้ไดน์	สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) กระทรวงกลาโหม
2556	Asian Human Resource Fund	Tokyo Government

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ (ปี 2012 – ปัจจุบัน)

- [1] P. Chodkaveekityada and H. Fukuchi, “ Prediction Model of Time Diversity Using Rain Radar Data,” International journal of satellite communication and networking, 2016, DOI: 10.1002/sat. 1182.
- [2] P. Chodkaveekityada and H. Fukuchi, “ Time Diversity Evaluation for Attenuation Mitigation Method Using Attenuation Data in Thailand and Japan,” International journal of satellite communication and networking, 2016, DOI: 10.1002/sat. 1184.
- [3] P. Chodkaveekityada and H. Fukuchi, “ Evaluation of Adaptive Satellite Power Control Method Using Rain Radar Data,” IEICE Transaction on Communication, Vol. E99-B, No. 11, Nov 2016.
- [4] P. Chodkaveekityada and H. Fukuchi, “Effect of Raindrop Size Distribution and Rain Rate Inhomogeneity on the Relationship between Attenuation and Depolarization,” International journal of satellite communication and networking, 2016.
- [5] P. Chodkaveekityada and H. Fukuchi, “Differences in the Dynamic Properties of Rain Fade between Temperate and Tropical Regions,” Advances in Space Research, 2016, DOI: 10.1016/j.asr.2016.11.038.

ผลงานตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ (ปี 2012 – ปัจจุบัน)

- [1] P. Chodkaveekityada and H. Fukuchi, “On-board Adaptive Attenuation Compensation Technique for Future Satellite Communication,” International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Kaohsiung, Taiwan, December 2 – 5, 2014.
- [2] H. Fukuchi and P. Chodkaveekityada, “Spatial Correlation Property Derived from Radar Rain Map and Site-Diversity Effect Evaluation,” International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Kaohsiung, Taiwan, December 2 – 5, 2014.
- [3] P. Chodkaveekityada and H. Fukuchi, “Improvement of Depolarization Formula Using Gamma Raindrop Size Distribution Up to 1 0 0 GHz,” Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Bali Island, Indonesia, June 30 – July 3, 2015.

- [4] H. Fukuchi and P. Chodkaveekityada, "Propagation Impairments Along Satellite-To-Earth Path and Their Mitigation Technologies," Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Bali Island, Indonesia, June 30 – July 3, 2015.
- [5] P. Chodkaveekityada, H. Fukuchi, T. Limpiti and P. Supnithi, "Time Diversity Evaluation for Attenuation Mitigation Method Using Attenuation Data in Thailand and Japan," International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Kobe-Hyogo, Japan, July 4 – 10, 2015.
- [6] P. Chodkaveekityada, Y. Inose and H. Fukuchi, "Modeling of Site Diversity Gain Using Rain Radar Data in Japan," 33rd AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), Gold Coast, Australia, September 7 – 10, 2015.
- [7] P. Chodkaveekityada and H. Fukuchi, "Combination Benefits of Short-Time Diversity and Adaptive Satellite Power Control," International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Hobart, Tasmania, Australia, November 9 – 12, 2015.
- [8] P. Chodkaveekityada and H. Fukuchi, "Variation of Boost Constants Effects for Adaptive Satellite Power Control," 10th International Conference on Information, Communication and Signal Processing (ICICS), Singapore, December 2 – 4, 2015.
- [9] P. Chodkaveekityada and H. Fukuchi, "Spatial Correlation Property Using Rain Gauge Network in Thailand to Improve Site Diversity Effect," International Conference on Electrical Engineering/ Electronic, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand, June 28 – July 1, 2016.
- [10] P. Chodkaveekityada and H. Fukuchi, "Fade Slope Comparison between Thailand and Japan for Ka band Rain Attenuation," International Technical Conference on Circuits/ Systems, Computer and Communication (ITC-CSCC), Okinawa, Japan, July 10 – 13, 2016.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้