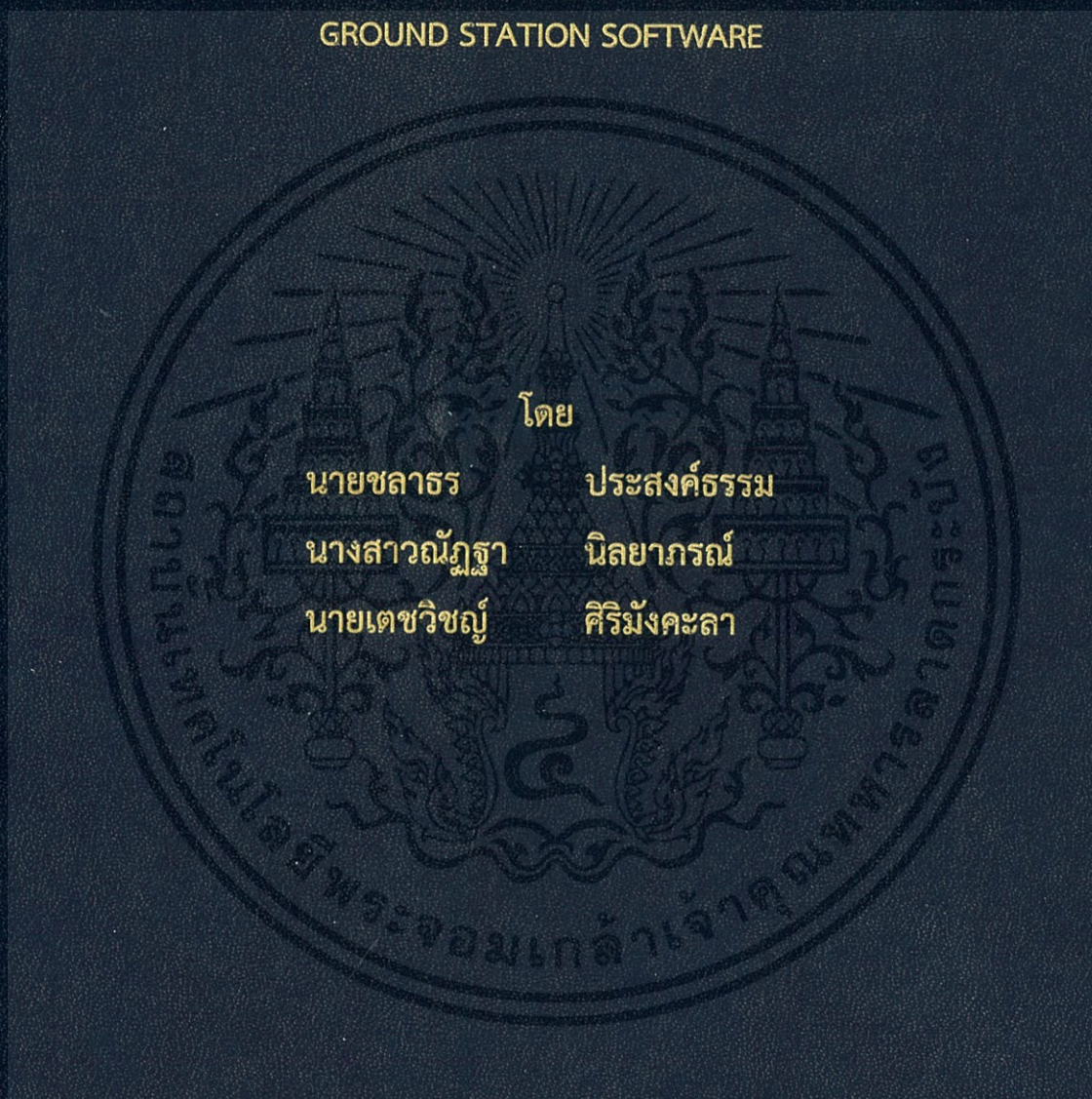


การพัฒนาแบบจำลองทางวิศวกรรมดาวเทียม CUBESAT ขนาด 1U
เวอร์ชัน 3: ระบบถ่ายภาพ การทดลองเข้ารหัสลับ การควบคุมการทรงตัว
และซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดิน

DEVELOPMENT OF 1U-CUBESAT ENGINEERING MODEL VERSION 3:
IMAGE CAPTURING SYSTEM, ENCRYPTION, STABILIZATION AND
GROUND STATION SOFTWARE



โดย

นายชลาธร ประสงค์ธรรม

นางสาวณัฏฐา นิลยาภรณ์

นายเตชวิษฐ์ ศิริมังคะลา

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การพัฒนาแบบจำลองทางวิศวกรรมดาวเทียม CUBESAT ขนาด 1U
เวอร์ชัน 3: ระบบถ่ายภาพ การทดลองเข้ารหัสลับ การควบคุมการทรงตัว
และซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดิน

DEVELOPMENT OF 1U-CUBESAT ENGINEERING MODEL VERSION 3:
IMAGE CAPTURING SYSTEM, ENCRYPTION, STABILIZATION AND
GROUND STATION SOFTWARE

โดย

นายชลาธร	ประสงค์ธรรม	58010262
นางสาวณัฐฐา	นิลยาภรณ์	58010357
นายเตชวิษฐ์	ศิริมังคะลา	58010449

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ดร. ศรวัฒน์ ชิวปรีชา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผศ. อัครพล ตีร์รัตน์

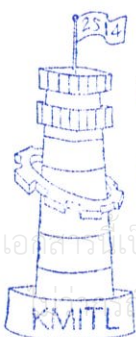
ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561



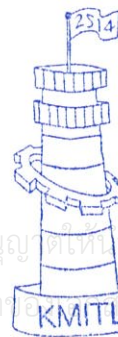
ผ่านการตรวจรับเล่มแล้ว

(*[Signature]*)

อาจารย์ที่ปรึกษา

๘ พ.ย. 62

วิศวกรรมโทรคมนาคม
Telecommunications Engineering



ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

(*[Signature]*)

กรรมการผู้ตรวจชิ้นงาน

23 พ.ย. 62

วิศวกรรมโทรคมนาคม
Telecommunications Engineering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สงวนลิขสิทธิ์... ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้า...
KMITL

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาแบบจำลองทางวิศวกรรมดาวเทียม CUBESAT ขนาด 1U เวอร์ชัน 3:
ระบบถ่ายภาพ การทดลองเข้ารหัสลับ การควบคุมการทรงตัว และซอฟต์แวร์สถานี
ภาคพื้นดิน

DEVELOPMENT OF 1U-CUBESAT ENGINEERING MODEL VERSION 3: IMAGE
CAPTURING SYSTEM, ENCRYPTION, STABILIZATION AND GROUND STATION
SOFTWARE

ผู้จัดทำ

- | | | |
|----------------|--------------|----------|
| 1. นายชลาธร | ประสงค์ธรรม | 58010262 |
| 2. นางสาวณัฐธา | นิลยาภรณ์ | 58010357 |
| 3. นายเตชวิษย์ | ศิริมั่งคะลา | 58010449 |


.....
(ผศ. ดร. ศรวัดน์ ชิวปรีชา)

อาจารย์ที่ปรึกษา


.....
(ผศ. อัครพล ตริรัตน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีอาจสำเร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และความร่วมมือจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลที่ทางคณะผู้จัดทำจำต้องกล่าวถึงเป็นอันดับแรก เนื่องจากเป็นบุคคลสำคัญที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จได้ คือ ผศ. ดร. ศรวัฒน์ ชิวปรีชา และ ผศ. อัครพล ตรีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษา และให้คำแนะนำ ช่วยในการวางแผนและดำเนินงานมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณชาย ทองใบ ผู้ดูแลศูนย์การเรียนรู้ ศาสตร์พระราชาคืนป่าสัก จังหวัดลพบุรี ซึ่งเป็นผู้อำนวยความสะดวกในการเก็บกู้แบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียม KMITL CubeSat EM-3

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานและรุ่นพี่ในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และถ่ายทอดวิชาความรู้ด้านเทคโนโลยีให้แก่ข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ ต้องกราบขอบคุณบุคคลที่สำคัญยิ่ง ที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ได้ ก็คือ บิดามารดา ที่เป็นผู้ให้กำเนิดและเลี้ยงดูข้าพเจ้าเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และเอาใจใส่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านเป็นอย่างดี

นายชลาธร ประสงค์ธรรม

นางสาวณัฏฐา นิลยาภรณ์

นายเตชวิชญ์ ศิริมังคะลา

ผู้จัดทำ

การพัฒนาแบบจำลองทางวิศวกรรมดาวเทียม CUBESAT
 ขนาด 1U เวอร์ชัน 3: ระบบถ่ายภาพ การทดลองเข้ารหัสลับ
 การควบคุมการทรงตัว และซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดิน
 DEVELOPMENT OF 1U-CUBESAT ENGINEERING
 MODEL VERSION 3: IMAGE CAPTURING SYSTEM,
 ENCRYPTION, STABILIZATION AND GROUND
 STATION SOFTWARE

โดย นายชลาธร ประสงค์ธรรม 58010262
 นางสาวณัฏฐา นิลยาภรณ์ 58010357
 นายเตวิชญ์ ศิริมังคะลา 58010449

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ศรวัฒน์ ชิวปรีชา
 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.อัครพล ตวีรัตน์

บทคัดย่อ

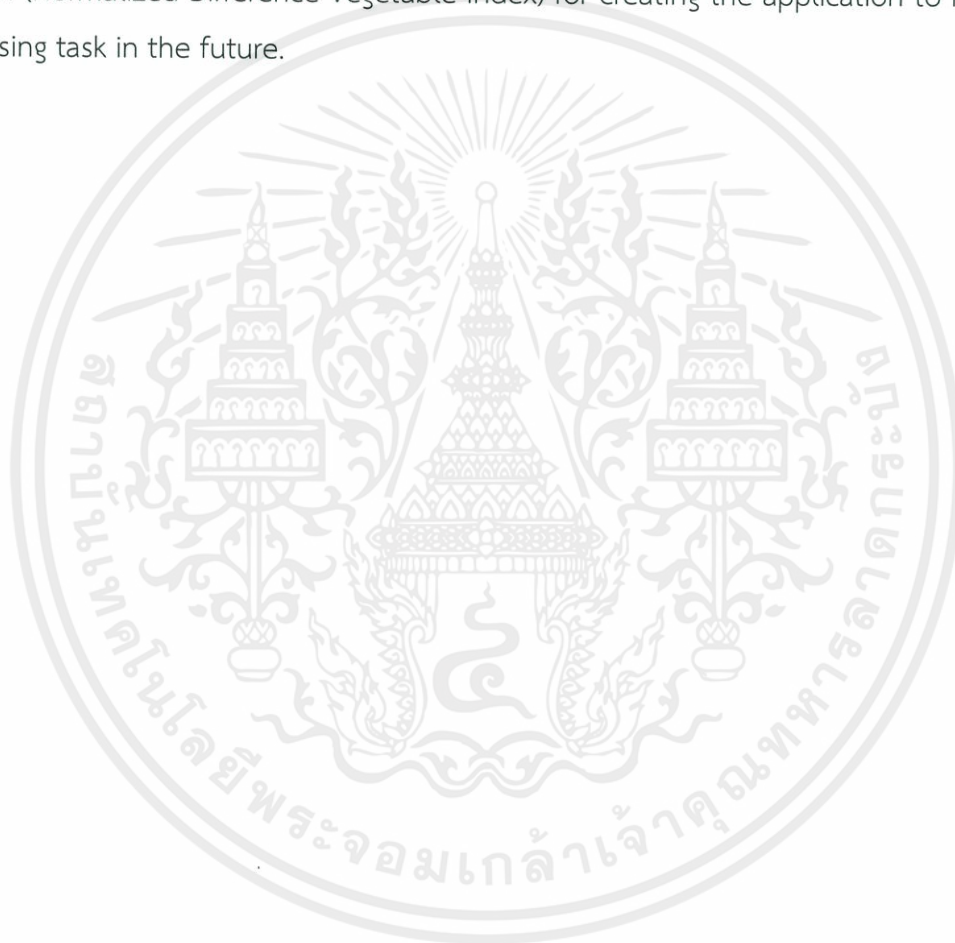
ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบ์แซทซึ่งเป็นดาวเทียมขนาดเล็กขนาด 1U รุ่นที่ 3 หรือ KMITL CubeSat EM - 3 เพื่อเป็นการสร้างองค์ความรู้และแนวทางการพัฒนาไปสู่ KMITL CubeSat ในอนาคต โดยได้มีความรับผิดชอบในการออกแบบทำงานของส่วนจากระบบควบคุมการถ่ายภาพ การทดลองเข้ารหัสลับ - ถอดรหัสลับ การควบคุมตำแหน่งของดาวเทียมและซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินในส่วนจากระบบถ่ายภาพนั้นได้ทำการพัฒนาบอร์ด Payload JPEG Camera พร้อมทั้งระบบเลนส์และตัวกรองรวมไปถึงระบบควบคุมการถ่ายภาพของดาวเทียมคิวบ์แซทรวมทั้งนำเสนองานด้านการ Interpolate ภาพโดยที่ยังคงรักษารายละเอียดและความคมชัดของภาพบนพื้นฐานของการดำเนินการใน Wavelet domain สำหรับในส่วนการทำงานของการทดลองเข้ารหัสลับนั้น

จะมีการติดตั้งชุดอัลกอริทึมโปรแกรมที่ทำหน้าที่เป็น Encryptor และ Decryptor ไว้บนดาวเทียม ซึ่งจะเป็นการประมวลผลบนพื้นฐานของความเป็น Lightweight Engine ซึ่งเป็นการประมวลผลที่ไม่ซับซ้อนและในส่วนของ การออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งการถ่ายภาพของดาวเทียมนั้น เป็นขั้นตอนที่มุ่งเน้นให้ทิศทางของกล้องถ่ายภาพนั้นชี้เข้าสู่ผิวโลกเพื่อการถ่ายภาพที่ชัดเจน โดยจะแบ่งการพิจารณาเป็น 2 ส่วนได้แก่แนวทางการออกแบบระบบรูปแบบที่ใช้พลังงานและรูปแบบที่ไม่ใช้พลังงานเพื่อสร้างเป็นแนวคิดตัวเลือกสู่การพัฒนาในอนาคต สำหรับซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินนั้นจะเป็นส่วนที่ได้มีการพัฒนาให้มีส่วนการทำงานต่างๆ ได้แก่ส่วนการทำงานเชิงซอฟต์แวร์ในด้านการประมวลผลด้านการรักษารายละเอียดภาพและความคมชัดของภาพถ่ายตามหลักการที่กล่าวไว้ข้างต้นและงานด้านถอดรหัสลับ - เข้ารหัสลับ รวมไปถึงด้านการประมวลผลรูปภาพที่ได้จากกล้อง Multi-Spectral Camera เพื่อเป็นการศึกษาขั้นเบื้องต้นในการวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณหรือ Normalized Difference Vegetable Index (NDVI) อันเป็นการสร้างแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์และประยุกต์ในการใช้งานด้านการรับรู้ระยะไกล (Remote Sensing)

ABSTRACT

This thesis proposes a design and development of a 1U-CubeSat engineering model (KMITL CubeSat EM – 3) for building a knowledge body and improvement guideline for the full project “KMITL CubeSat”. In this engineering model, the payload systems that are being implemented are the image capturing system, encryption system and satellite stabilization system along with the ground station software development. The image capturing system has an objective in JPEG camera payload improvement including the lens system and filters yielding to the on-board image capturing system on the CubeSat and image interpolation system for resolution enhancement base on Wavelet domain processing. The data encryption system will responsible in implementing the encryptor and decryptor unit on the CubeSat with embedded algorithm working based on a Lightweight Engine as a non-complex processing technique. For the attitude control unit will emphasize on making the camera facing perpendicularly to the Earth’s surface for image capturing reason which will be considered through 2 approach; the active

attitude control system, an energy consuming alternative and the passive attitude control system, contrarily, a non-energy consuming option. The model and idea of design the system will be the base notion in developing the complete attitude control unit in the future. The ground station software will cover all the analytic and processing tasks especially the methodology in gaining the resolution resolved image including the processing of multi spectral camera image in order to study the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) for creating the application to remote sensing task in the future.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	V
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	XVII
บทที่ 1	
บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์	3
บทที่ 2	
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ดาวเทียมคิวบ์แซท (CubeSat)	5
2.2 ระบบการทำงานของบอร์ด JPEG CAMERA	10
2.3 วิธีการในการขยายภาพโดยที่ยังรักษารายละเอียดและความคมชัดของภาพบนพื้นฐานของการดำเนินการใน Wavelet Domian	23
2.4 การเข้ารหัสลับ - ถอดรหัสลับแบบเคออดิกบนพื้นฐานของวงจรรองสัญญาณดิจิทัล	34
2.5 การออกแบบซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดิน	42
2.6 ระบบควบคุมตำแหน่งการถ่ายภาพ (Attitude Control Unit)	45
2.7 การวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณ (NDVI) เพื่อรองรับการทำงาน Remote Sensing	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3	
การออกแบบและการจัดทำปฏิญญานิพนธ์	
3.1 การออกแบบและสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบแซท	64
3.2 การออกแบบและพัฒนาบอร์ด JPEG Camera เพื่อควบคุมการถ่ายภาพของดาวเทียมคิวบแซท	83
3.3 การออกแบบระบบการขยายภาพโดยที่ยังคงรักษารายละเอียดและความคมชัดของภาพบนพื้นฐานของการดำเนินการใน Wavelet Domain	87
3.4 การออกแบบการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับข้อความแบบเคออดิกบนพื้นฐานของวงจรรองสัญญาณดิจิทัล	89
3.5 การออกแบบซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดิน	91
3.6 การออกแบบการควบคุมตำแหน่งการถ่ายภาพของดาวเทียมคิวบแซท	94
3.7 ศึกษาการหาค่าดัชนีพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index) และการประยุกต์ใช้งานเพื่อเชื่อมโยงเข้ากับงาน Smart/Precision Agriculture	101
3.8 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	109
3.9 การจัดเก็บผลการทดลอง	114
บทที่ 4	
ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลองและการทดสอบระบบควบคุมการถ่ายภาพของบอร์ด JPEG Camera	117
4.2 ผลการทดสอบการขยายภาพโดยที่ยังคงรักษารายละเอียดและความคมชัดของภาพผ่านการดำเนินการบน Wavelet Domain	125
4.3 ผลการทดสอบการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับแบบเคออดิกของข้อมูลประเภทข้อความ บนพื้นฐานของวงจรรองสัญญาณดิจิทัล	133

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลการทดสอบระบบควบคุมตำแหน่งการถ่ายรูปแบบอวกาศ (Attitude Control System) เพื่อเตรียมการพัฒนาแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซทในอนาคต	137
4.5 ผลการทดสอบวิเคราะห์หาค่าดัชนีพืชพรรณ (NDVI) เพื่อเตรียมการพัฒนาแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซทในอนาคต	145
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	154
5.2 ข้อเสนอแนะ	155
บรรณานุกรม	156
ภาคผนวก	160

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างดาวเทียมคิวบ์แซทขนาด 1 U 2U 3U 6U และ 12 U ตามลำดับ	5
2.2 ดาวเทียมแนคแซท	6
2.3 ต้นแบบของแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 1	7
2.4 แบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 1	8
2.5 ต้นแบบของแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM-2	9
2.6 แบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM-2	10
2.7 เลนส์ซูมกำลังขยาย 8 เท่า	11
2.8 JPEG Color Camera 2M Pixel Serial UART Interface (TTL)	12
2.9 ขนาดของ SD Card ประเภทต่างๆ	15
2.10 กลุ่มความเร็วของไมโครเอสดีการ์ด	15
2.11 โครงสร้างภายในของไมโครเอสดีการ์ด	16
2.12 โมดูล Micro SD Card Adapter	17
2.13 โครงสร้างภายในของ Micro SD Card Adapter	17
2.14 ชิพ ATmega328P AU	18
2.15 Arduino NANO	19
2.16 ขาของ Arduino NANO	19
2.17 โมดูล USB 2.0 to TTL UART 6 PIN Module Serial Converter	19
2.18 ตัวอย่างส่วนหัวและส่วนของกลุ่มเครื่องหมายของไฟล์ JPEG	22
2.19 ตัวอย่างส่วนหางของไฟล์ JPEG	22
2.20 เทคนิคการขยายภาพด้วยวิธี Nearest Neighbor	23
2.21 พื้นฐานการดำเนินงานด้วยเทคนิคการขยายภาพแบบ Bilinear Interpolation	24
2.22 เทคนิคการขยายภาพด้วยวิธี Bilinear Interpolation	24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 พื้นฐานการดำเนินงานด้วยเทคนิคการขยายภาพแบบ Bicubic Interpolation	25
2.24 เทคนิคการขยายภาพด้วยวิธี Bicubic Interpolation	26
2.25 การวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต	27
2.26 การแยกองค์ประกอบด้วยเวฟเล็ต	29
2.27 การสร้างกลับจากองค์ประกอบด้วยเวฟเล็ต	29
2.28 Dual-tree เริงซ้อน	30
2.29 ผลตอบสนองเชิงมุมของตัวกรองเริงซ้อนจากการแปลงเวฟเล็ตเริงซ้อน	32
2.30 แผนภาพแสดงการทำงานของเทคนิคในการรักษาความละเอียดของภาพที่ขยายแล้วด้วยวิธีการ DWT	33
2.31 แผนภาพแสดงการทำงานของเทคนิคในการรักษาความละเอียดของภาพที่ขยายแล้วด้วยวิธีการ DT-CWT	34
2.32 โครงสร้างของวงจรเข้ารหัสแบบ IIR 2 nd order filter	36
2.33 ขอบเขตสามเหลี่ยมเสถียรภาพ	37
2.34 คุณลักษณะของฟังก์ชัน $f(\bullet)$	38
2.35 โครงสร้างของวงจรถอดรหัสแบบ FIR 2 nd order filter	39
2.36 ATmega2560	40
2.37 บอร์ด Arduino ชนิดต่างๆ	41
2.38 ส่วนการเขียนโปรแกรมของ Arduino	42
2.39 ตัวอย่าง Front Panel ของโปรแกรม LabVIEW	43
2.40 ตัวอย่าง Block Diagram ของ LabVIEW	44
2.41 ตัวอย่าง Terminal, Node, Function และ Wire ใน Block Diagram	44

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.42 การรักษาสมดุลของดาวเทียมคิวบ์แซท	45
2.43 แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet)	46
2.44 แม่เหล็กชนิดเฟอร์ไรท์	47
2.45 แม่เหล็กชนิดนีโอไดเมียม	47
2.46 แม่เหล็กชนิดซามาเรียมโคบอลต์	48
2.47 แม่เหล็กชนิดอัลนิโก	48
2.48 แม่เหล็กถาวรแบบ (ก) และ (ข) ขั้วต่างกันจะดูดกัน ส่วน (ค) และ (ง) ขั้วเหมือนกันจะผลักกัน	49
2.49 การแบ่งระดับของ L-shell ของแบบจำลองไดโพลสนามแม่เหล็กโลก	49
2.50 ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการสร้างทอร์กแม่เหล็ก	51
2.51 อุปกรณ์สร้างแรงปฏิกิริยาจากล้อ	51
2.52 ตัวอย่างขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า	52
2.53 แรงแม่เหล็กที่กระทำต่อประจุที่เคลื่อนที่ในลวดนำกระแส	52
2.54 วงจรกระแสจากเส้นลวดนำไฟฟ้าในรูปสี่เหลี่ยม	53
2.55 ทิศทางของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อโครงลวดนำไฟฟ้า	54
2.56 วงโคจรแบบโพล่าออบิทเป็นวงกลม	56
2.57 วงโคจรแบบอินโคลออบิทแบบวงกลมและวงรี	56
2.58 วงโคจรแบบเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าโลกหมุนหรือวงโคจรค้างฟ้า	57
2.59 กระบวนการและองค์ประกอบการรับรู้จากระยะไกล	58
2.60 ดาวเทียม LANDSAT 8	60
2.61 ค่าการสะท้อนบนพื้นผิวในช่วงคลื่น	61
3.1 ต้นแบบของแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 1	64
3.2 แบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 1	64
3.3 ลายวงจรของส่วนอุปกรณ์เซนเซอร์ (Layer 1)	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.4	ลายวงจรของส่วนประมวลผล (Layer 2)	65
3.5	ลายวงจรส่วนแบตเตอรี่ และกล้องถ่ายภาพ (Layer 3)	66
3.6	ต้นแบบของแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 2	67
3.7	แบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 2	68
3.8	ลายวงจรส่วนสื่อสาร (Layer 1 ด้านบน)	69
3.9	ลายวงจรส่วนสื่อสาร (Layer 1 ด้านล่าง)	69
3.10	ลายวงจรส่วนประมวลผล และจัดการข้อมูล (Layer 2 ด้านบน)	70
3.11	ลายวงจรส่วนประมวลผล และจัดการข้อมูล (Layer 2 ด้านล่าง)	70
3.12	ลายวงจรส่วนแบตเตอรี่ เซนเซอร์ และกล้องถ่ายภาพ (Layer 3 ด้านบน)	71
3.13	ลายวงจรส่วนแบตเตอรี่ เซนเซอร์ และกล้องถ่ายภาพ (Layer 3 ด้านล่าง)	71
3.14	ต้นแบบของแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 3	73
3.15	แบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 3	73
3.16	ลายวงจรส่วนสายอากาศของ EM - 3 (ด้านบน)	75
3.17	ลายวงจรส่วนสายอากาศของ EM - 3 (ด้านล่าง)	75
3.18	ลายวงจรส่วนควบคุมการถ่ายภาพ (ด้านบน)	76
3.19	ลายวงจรส่วนควบคุมการถ่ายภาพ (ด้านล่าง)	76
3.20	ส่วนประมวลผลและจัดการข้อมูล (ด้านบน)	77
3.21	ส่วนประมวลผลและจัดการข้อมูล (ด้านล่าง)	77
3.22	ส่วนแจกจ่ายพลังงาน (ด้านบน)	78
3.23	ส่วนแจกจ่ายพลังงาน (ด้านล่าง)	78
3.24	ส่วนควบคุมการสื่อสารกับสถานีภาคพื้นดิน (ด้านบน)	79
3.25	ส่วนควบคุมการสื่อสารกับสถานีภาคพื้นดิน (ด้านล่าง)	79
3.26	แผนผังการทำงานของดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 3	81
3.27	Schematic ในการสร้างวงจรเพื่อการ Bootloader Burning	83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.28 Schematic ที่ใช้ในการอัปโหลดชุดคำสั่งลงบนหน่วยประมวลผล	84
3.29 Schematic การเชื่อมต่อโมดูลต่างๆ บนบอร์ด JPEG Camera	85
3.30 ภาพถ่ายจากบอร์ด JPEG Camera ก่อนการทำงานร่วมกับเลนส์สำเร็จรูป	86
3.31 ภาพถ่ายจากบอร์ด JPEG Camera ผ่านเลนส์สำเร็จรูป ที่กำลังขยาย 8 เท่า	86
3.32 แผนภาพแสดงการทำงานของเทคนิคในการรักษาความละเอียด ของภาพที่ขยายแล้วด้วยวิธีการ DT-CWT	87
3.33 รูปต้นฉบับแบบ Grayscale ขนาด 256 X 256 ที่ใช้ในการทดสอบการ Interpolate	88
3.34 รูปภาพที่ผ่านการขยายและรักษารายละเอียดของภาพด้วยวิธี Dual-Tree Complex Wavelet Transform ขนาด 512 X 512	88
3.35 บล็อกไดอะแกรมการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับ	89
3.36 หน้าต่างการทำงานของซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินโหมดที่ 1	91
3.37 หน้าต่างการทำงานของซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินโหมดที่ 2	92
3.38 หน้าต่างการทำงานของซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินโหมดที่ 3	93
3.39 หน้าต่างการทำงานของซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินโหมดที่ 4	94
3.40 Schematic แสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์หน่วยควบคุมการทรงตัวของ ดาวเทียม	96
3.41 ขนาดบริเวณด้านหน้าของโครง	97
3.42 ขนาดบริเวณด้านข้างของโครง	97
3.43 โครงที่พันขดลวดทองแดงจำนวน 300 รอบ	99
3.44 รูปแบบการวางตัวและทิศทางของสนามแม่เหล็กโลกกับวงโคจรของ ดาวเทียม	100
3.45 ทิศทางของแม่เหล็กที่ควรติดบนตัวดาวเทียมคิวบแซท	100

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.46	พื้นที่บริเวณจังหวัดกรุงเทพมหานคร จากดาวเทียม LANDSAT 8	102
3.47	พื้นที่บริเวณจังหวัดเชียงใหม่ จากดาวเทียม LANDSAT 8	102
3.48	ภาพช่องสัญญาณที่ 4 (RED) ของ LANDSAT 8 ในพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรี	104
3.49	ภาพช่องสัญญาณที่ 5 (NIR) ของ LANDSAT 8 ในพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรี	105
3.50	ภาพช่องสัญญาณที่ 4 (RED) ของ LANDSAT 8 ในพื้นที่จังหวัดนครพนม	106
3.51	ภาพช่องสัญญาณที่ 5 (NIR) ของ LANDSAT 8 ในพื้นที่จังหวัดนครพนม	106
3.52	ปฏิทินการปลูกข้าว พืชน้ำมัน พืชไร่	108
3.53	หน่วยประมวลผล ATmega328P AU	109
3.54	JPEG Camera Module 2M pixel	109
3.55	Micro SD Card Adapter	110
3.56	เลนส์ขยาย	110
3.57	โปรแกรม MATLAB	111
3.58	โปรแกรม LabVIEW	111
3.59	โปรแกรม Arduino	112
3.60	Arduino NANO	112
3.61	โมดูล USB2.0 to TTL UART 6 PIN	113
3.62	เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้ารุ่น DSOX1102G	113
3.63	ไอซี L293D	114
4.1	บอร์ด JPEG Camera ที่ใช้หน่วยประมวลผลบนบอร์ด	118
4.2	บอร์ด JPEG Camera ที่ใช้ Arduino NANO	118
4.3	คำสั่งพื้นฐานของการเลือกขนาดรูปภาพกับชุดคำสั่งของ JPEG Camera	119
4.4	ผลการวัดสัญญาณชุดคำสั่งของ JPEG Camera	119
	ในการส่งถ่ายภาพขนาด 320X240 โดยใช้ฮอสซิลโลสโคป	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ผลการวัดสัญญาณชุดคำสั่งของ JPEG Camera ในการส่งถ่ายภาพขนาด 640X480 โดยใช้ฮาร์ดแวร์โคโปก	120
4.6 ผลการวัดสัญญาณชุดคำสั่งของ JPEG Camera ในการส่งถ่ายภาพขนาด 800X600 โดยใช้ฮาร์ดแวร์โคโปก	120
4.7 ผลการวัดสัญญาณการตอบกลับ (ACK) ของ JPEG Camera ในการส่งถ่ายภาพทุกขนาดโดยใช้ฮาร์ดแวร์โคโปก	121
4.8 หน้าต่างโหมดการทำงานที่ 1 เมื่อบอร์ด JPEG Camera ถ่ายภาพ	121
4.9 รูปถ่ายที่ได้จากการส่งถ่ายภาพที่ความละเอียด 640 X 480 และ อัตราการบีบอัด 10% (Case 1)	122
4.10 ภาพถ่ายจากบอร์ด JPEG Camera ก่อนการทำงานร่วมกับเลนส์สำเร็จรูป	123
4.11 ภาพถ่ายจากบอร์ด JPEG Camera ผ่านเลนส์สำเร็จรูปที่กำลังขยาย 8 เท่า	123
4.12 หน้าต่างที่แสดงผลข้อมูลรูปภาพที่ผ่านการส่งถ่ายข้อมูลและรับค่าทางอากาศ	124
4.13 รูปภาพตัวอย่างที่ได้นำมาทำการทดสอบความสามารถในการขยายด้วยวิธี Nearest Neighbor, Bilinear และ Bicubic Interpolation	126
4.14 ผลลัพธ์รูปภาพตัวอย่างที่ได้นำมาทำการทดสอบความสามารถในการขยายด้วยวิธี Nearest Neighbor	127
4.15 ผลลัพธ์รูปภาพตัวอย่างที่ได้นำมาทำการทดสอบความสามารถในการขยายด้วยวิธี Bilinear Interpolation	128
4.16 ผลลัพธ์รูปภาพตัวอย่างที่ได้นำมาทำการทดสอบความสามารถในการขยายด้วยวิธี Bicubic Interpolation	129
4.17 รูปต้นฉบับแบบ Grayscale ขนาด 800 X 640 ที่ใช้ในการทดสอบการ Interpolate	131

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ผลลัพธ์รูปภาพตัวอย่างที่ได้นำมาทำการทดสอบความสามารถในการขยายด้วยวิธี (ก) Nearest Neighbor, (ข) Bilinear และ (ค) Bicubic Interpolation	131
4.19 รูปภาพที่ผ่านการขยายและรักษารายละเอียดของภาพด้วยวิธี Dual-Tree Complex Wavelet Transform	132
4.20 การเปรียบเทียบของค้ประกอบเชิงพิกเซลของรูปภาพต้นฉบับ (ซ้าย) และรูปภาพที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความคมชัด (ขวา) เมื่อทำการขยายภาพที่จุดเดียวกัน	133
4.21 ผลลัพธ์จากการเข้ารหัสลับข้อความ “KMITL CUBESAT EM-3”	133
4.22 ผลลัพธ์จากการเข้ารหัสลับข้อความ “TELECOMMUNICATION”	134
4.23 ผลลัพธ์จากการเข้ารหัสลับข้อความ “Telecom never walk alone”	135
4.24 หน้าต่างที่แสดงผลข้อมูลที่ผ่านระบบการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับทางอากาศ	136
4.25 หน้าต่างที่แสดงผลข้อมูลที่ผ่านระบบการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับทางอากาศเมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถอดรหัสไม่ถูกต้อง	137
4.26 วงจรควบคุมตำแหน่งการถ่ายรูปบนอวกาศโดยหลักการทอร์คแม่เหล็ก	138
4.27 ผลลัพธ์หน้าจอออสซิลโลสโคปเมื่อป้อน “+” จ่ายไฟค่าบวกเข้าสู่ขดลวด	138
4.28 ผลลัพธ์หน้าจอออสซิลโลสโคปเมื่อป้อน “0” ไม่จ่ายไฟเข้าสู่ขดลวด	139
4.29 ผลลัพธ์หน้าจอออสซิลโลสโคปเมื่อป้อน “-” จ่ายไฟค่าลบเข้าสู่ขดลวด	139
4.30 ทิศทางของแบบจำลองก่อนการทดสอบระบบควบคุมตำแหน่งการถ่ายรูปพร้อมทิศทางการหมุนที่ควรจะเป็น	141
4.31 ผลการทดสอบระบบควบคุมตำแหน่งการถ่ายรูป	141

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 แบบจำลองการติดตั้งตำแหน่งขดลวดเพื่อใช้ควบคุมตำแหน่งดาวเทียมคิวบ์แซทในสภาวะอวกาศ	142
4.33 ตำแหน่งและการวางตัวของทิศทางขั้วแม่เหล็กที่ควรจะเป็น	143
4.34 ความเป็นไปได้ในการวางตัวของดาวเทียมเมื่ออยู่ในชั้นอวกาศกรณีแม่เหล็กถาวร	144
4.35 ผล NDVI ของจังหวัดสุพรรณบุรี ในวันที่ 12 กรกฎาคม 2557	145
4.36 ผล NDVI ของจังหวัดสุพรรณบุรี ในวันที่ 13 สิงหาคม 2557	146
4.37 ผล NDVI ของจังหวัดสุพรรณบุรี ในวันที่ 14 กันยายน 2557	146
4.38 ผล NDVI ของจังหวัดสุพรรณบุรี ในวันที่ 16 ตุลาคม 2557	147
4.39 ผล NDVI ของจังหวัดนครพนม ในวันที่ 20 เมษายน 2561	148
4.40 ผล NDVI ของจังหวัดนครพนม ในวันที่ 13 ตุลาคม 2561	148
4.41 ตัวอย่างพื้นที่ของจังหวัดกรุงเทพมหานคร	150
4.42 ค่า NDVI ของพื้นที่ตัวอย่างของจังหวัดกรุงเทพมหานคร	150
4.43 ค่า NDVI ของบริเวณตัวอย่างจุดบนตัวอย่างพื้นที่กรุงเทพมหานคร	151
4.44 ตัวอย่างพื้นที่ของจังหวัดเชียงใหม่	152
4.45 ค่า NDVI ของพื้นที่ตัวอย่างของจังหวัดเชียงใหม่	152
4.46 ค่า NDVI ของบริเวณตัวอย่างจุดบนตัวอย่างพื้นที่เชียงใหม่	153

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบองค์ประกอบระหว่างแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 1 และ EM - 2	9
2.2 รูปแบบเฟรมของคำสั่งพื้นฐานที่ใช้ติดต่อกับ JPEG Camera UART Interface (TTL)	13
2.3 รายละเอียดเครื่องหมายของโครงสร้างไฟล์ JPEG	21
2.4 ข้อสังเกตของภาพจาก Multispectral Camera ของ LANDSAT 8	60
2.5 ค่า Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	62
3.1 เปรียบเทียบองค์ประกอบระหว่างแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM-1 และ EM-2	67
3.2 ส่วนประกอบบน ดาวเทียมคิวบ์แซท EM-2	68
3.3 ส่วนประกอบบน ดาวเทียมคิวบ์แซท EM-3	74
3.4 เปรียบเทียบคุณลักษณะของแบบจำลองทางวิศวกรรมของ ดาวเทียมคิวบ์แซท	82
3.5 ค่า PSNR ของรูปผลลัพธ์หลังจากผ่านกระบวนการ Bicubic Interpolation และ DT-CWT ด้วย $\alpha = 2$ ขยายจากภาพขนาด 256 X 256 เป็น 512 X 512	89
3.6 คุณสมบัติของขดลวดแม่เหล็กที่ใช้ในดาวเทียมคิวบ์แซทแต่ละดวง	95
3.7 การทำงานของวงจรควบคุมการทำงานของดาวเทียม แบ่งตามรูปแบบการป้อนค่า	96

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่า PSNR ของรูปผลลัพธ์ตัวอย่างหลังจากผ่านกระบวนการ Nearest Neighbor, Bilinear, Bicubic Interpolation และ DT-CWT ด้วย $\alpha = 4$	130
4.2 ค่า PSNR ของรูปผลลัพธ์หลังจากผ่านกระบวนการ Nearest Neighbor, Bilinear, Bicubic Interpolation และ DT-CWT ด้วย $\alpha = 4$	132
4.3 ผลลัพธ์การถอดรหัสลับของข้อมูลประเภทข้อความด้วยค่าของกุญแจรหัสลับต่างๆ	134
4.4 ผลลัพธ์การถอดรหัสลับของข้อมูลประเภทข้อความด้วยค่าของกุญแจรหัสลับต่างๆ สำหรับข้อความ “TELECOMMUNICATION”	134
4.5 ผลลัพธ์การถอดรหัสลับของข้อมูลประเภทข้อความด้วยค่าของกุญแจรหัสลับต่างๆ สำหรับข้อความ “telecom never walk alone”	135
4.6 ผลการทำงานของวงจรควบคุมการทำงานของดาวเทียมแบ่งตามรูปแบบการป้อนค่า	140

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนั้นเทคโนโลยีอวกาศได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากยุคสมัยที่วิทยาการยังไม่เอื้ออำนวยต่อการดำเนินงานในด้านการศึกษาและพัฒนาอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามหนึ่งในสิ่งที่สามารถเป็นตัวช่วยในการเสริมสร้างองค์ความรู้ทางเทคโนโลยีอวกาศให้เกิดขึ้นรวมทั้งก่อให้เกิดความก้าวหน้าทางด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยีในด้านดังกล่าวนี้คือดาวเทียมขนาดเล็กซึ่งถือเป็นสิ่งที่มีบทบาทอย่างมากในวงการการศึกษาดังกล่าว หนึ่งในประเภทของดาวเทียมขนาดเล็กที่ทางคณะผู้จัดทำได้เล็งเห็นความสนใจนั้นคือ ดาวเทียมคิวบแซท ซึ่งเป็นที่นิยมในบรรดานักวิจัยเป็นอย่างมากในด้านของการศึกษารวมไปถึงการพัฒนาองค์ความรู้ของนักวิจัย เนื่องจากเป็นดาวเทียมที่สามารถสร้างได้ด้วยกำลังการผลิตที่ต่ำ จึงเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับกลุ่มประเทศด้อยพัฒนาที่มีความสามารถในการสนับสนุนและผลักดันงานวิจัยด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยีอวกาศให้สามารถสร้างได้บนพื้นฐานการใช้งบประมาณของตนเองโดยไม่ต้องเกิดการซื้อดาวเทียมจากประเทศที่มีบทบาทและกำลังการผลิตรายใหญ่ของโลกเช่น สหรัฐอเมริกา หรือ จีน เป็นต้น

ดาวเทียมคิวบแซทเป็นดาวเทียมที่ต้องได้รับการออกแบบและสร้างในการประสานการทำงานที่เหมาะสมต่อการทำงานที่ระยะไกล และต้องอาศัยการวิจัยที่มากระดับหนึ่ง เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในอวกาศ อย่างไรก็ตามในการส่งดาวเทียมดาวเทียมคิวบแซทออกสู่อวกาศนั้นจำเป็นต้องมีการทดสอบดาวเทียมด้วยวิธีที่เหมาะสม โดยต้องมีสภาวะใกล้เคียงสภาวะในอวกาศ หนึ่งในวิธีที่สามารถใช้ทดสอบได้นั้น คือการผูกดาวเทียมคิวบแซทกับบอลูนขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถนำดาวเทียมคิวบแซทขึ้นไปได้ที่ความสูงได้สูงสุดประมาณ 25 กิโลเมตร โดย ณ ระดับความสูงดังกล่าวจะสามารถสร้างสภาวะให้มีลักษณะคล้ายอวกาศได้ทั้งอุณหภูมิและความกดอากาศ ส่งผลให้สามารถจำลองการสื่อสารข้อมูลระหว่างสถานีภาคพื้นดินและตัวดาวเทียมได้เสมือนจริงด้วยค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมด้วยการพิจารณาในแง่ของปฏิบัติการที่เป็นเพียงการทดสอบเท่านั้น

ในการปล่อยดาวเทียมคิวบแซทเพื่อการศึกษาขั้นต้นด้วยวิธีการดังกล่าวนี้จำเป็นต้องมีการมอบหมายภารกิจเพื่อกำหนดขอบเขตการทำงานของดาวเทียมคิวบแซทที่ต้องการจะทดสอบในแต่ละครั้ง สำหรับการออกแบบและสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบแซทในครั้งนี้ ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการออกแบบและเตรียมการทดสอบของส่วนการทำงานทั้งหมด 3 ระบบของ

ดาวเทียมคิวบ์แซท ได้แก่ ระบบส่วนการควบคุมการถ่ายภาพดาวเทียมพร้อมทั้งระบบเลนส์และการจัดการปรับแต่งคุณภาพเชิงรายละเอียดของภาพถ่ายที่ได้จากดาวเทียม ระบบการเข้ารหัส – ถอดรหัสข้อมูลด้วยการประมวลผลบนพื้นฐานของความเป็น Lightweight Engine เพื่อลดความซับซ้อนกับกำลังที่ต้องใช้ในการประมวลผล และระบบควบคุมการทรงตัวของดาวเทียมคิวบ์แซทแบบง่ายด้วย Magnetic Torque รวมไปถึงการศึกษาเพื่อพัฒนาต่อยอดเพื่อพัฒนาองค์ความรู้ด้านการศึกษาและวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณ หรือค่า NDVI จากกล้อง Multispectral Camera ในการประยุกต์ใช้งานดังกล่าวเพื่อการเชื่อมโยงเข้ากับงานวิจัยด้านการเกษตรแม่นยำหรือ Smart and Precision Agriculture นอกจากนี้จะมีการพัฒนาซอฟต์แวร์ของสถานีภาคพื้นดินในการสร้างการเข้าถึงข้อมูลที่ได้รับจากการทดสอบดาวเทียมเพื่อประโยชน์ด้านการวิเคราะห์ ศึกษาและพัฒนาต่อยอดแบบจำลองเชิงวิศวกรรมรุ่นต่อไปของดาวเทียมคิวบ์แซทในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อพัฒนาบอร์ด Payload JPEG Camera พร้อมทั้งระบบเลนส์และตัวกรองรวมไปถึงระบบควบคุมการถ่ายภาพของดาวเทียม CubeSat รวมทั้งนำเสนองานด้านการ Interpolate ภาพโดยที่ยังคงรักษารายละเอียดและความคมชัดของภาพบนพื้นฐานของการดำเนินการใน Wavelet-domain
- 2) เพื่อศึกษาและออกแบบระบบควบคุมการทรงตัวของดาวเทียมแบบง่ายในขณะถ่ายภาพ เพื่อให้ตำแหน่งของกล้องที่ติดอยู่บนดาวเทียมเหมาะสมต่อการถ่ายภาพพื้นโลก
- 3) เพื่อทดลองการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับของข้อมูลร่วมกับระบบการสื่อสารข้อมูลของดาวเทียม
- 4) เพื่อทดลองนำภาพที่ได้จาก Multi-Spectral Camera มาวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณหรือ NDVI (Normalized Difference Vegetable Index) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลผลิตทางการเกษตร (Yield of Crops) อันเป็นแนวทางการประยุกต์ใช้งานดาวเทียมสำรวจทรัพยากร

1.3 ขอบเขตของปฏิญญานิพนธ์

- 1) ปฏิญญานิพนธ์ที่จะจัดทำเป็นการพัฒนาหน่วยงานด้านการถ่ายภาพและการประมวลผลภาพดิจิทัลสำหรับดาวเทียม CubeSat
- 2) ในการควบคุมการทรงตัวของดาวเทียมจะใช้หลักการ Magnetic Torque หรือ แม่เหล็กถาวร โดยจะรับผิดชอบในด้านของการออกแบบระบบควบคุมการทรงตัวของดาวเทียมขณะถ่ายภาพ เพื่อให้ตำแหน่งดาวเทียมเหมาะสมกับการถ่ายภาพพื้นโลก
- 3) สำหรับการทำงานในส่วนของการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับของดาวเทียมจะมีการติดตั้ง Encryptor และ Decryptor ไว้ที่หน่วยประมวลผลของดาวเทียม เพื่อทดสอบความสามารถในการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับของข้อมูล
- 4) การพัฒนาโปรแกรมด้านการ Interpolate ภาพจะดำเนินการกับภาพที่ได้จากต้นแบบดาวเทียม CubeSat ที่พัฒนาขึ้น และรูปภาพที่ได้จาก Multi-spectral Camera
- 5) ทำการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผลภาพจากกล้อง Multi-spectral camera และวิเคราะห์หาค่าดัชนีพืชพรรณหรือ NDVI (Normalized Difference Vegetable Index) เพื่อเป็นการสร้างแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์และประยุกต์ในการใช้งานด้านการรับรู้ระยะไกล (Remote Sensing)
- 6) ส่วนของซอฟต์แวร์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานภาคพื้นดินจะถูกนำไปพัฒนาร่วมกัน เป็นระบบซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดิน

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ดาวเทียมคิวบ์แซท (CubeSat) เป็นจุดเริ่มต้นในการศึกษาและสร้างองค์ความรู้ทางด้านเทคโนโลยีดาวเทียมเพื่อสร้างดาวเทียมได้เองภายในประเทศ โดยเฉพาะในงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์และการศึกษา ซึ่งการสร้างดาวเทียมได้ด้วยตนเองสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้อย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การซื้อดาวเทียมจากต่างประเทศ การสร้างดาวเทียมคิวบ์แซทมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการสร้างดาวเทียมขนาดใหญ่ในด้านการใช้งบประมาณการสร้างที่ต่ำ และใช้เวลาในการสร้างที่ไม่นาน ในปัจจุบันมีการพัฒนาและทดลองดาวเทียมคิวบ์แซทจำนวนมากในประเทศไทย อาทิเช่น KMITL CubeSat ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) และ KNACKSAT ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (มจพ.) ซึ่ง KNACKSAT ได้ทำการปล่อยเข้าสู่ชั้นบรรยากาศโลกในวันที่ 4 ธันวาคม 2561 ถือเป็นดาวเทียมฝีมือคนไทยดวงแรก และ KMITL CubeSat นั้นได้มีการสร้างและพัฒนาจาก KMITL CubeSat EM – 1 เป็น KMITL CubeSat EM – 2 ซึ่งยังมีข้อจำกัดต่างๆ เช่น ภาพที่ได้มีความคมชัดน้อยไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่อได้ ไม่ได้แบ่งชั้นระบบการงานชัดเจน คณะผู้จัดทำจึงได้ทำการเพิ่มระบบเลนส์ เพื่อเพิ่มอัตราการขยายของภาพ การรับส่งข้อมูลประเภทข้อความผ่านกระบวนการเข้ารหัสลับ - ถอดรหัสลับ เพื่อการสื่อสารของข้อความและได้เพิ่มระบบการทำงานส่วนกลาง ซึ่งระบบที่กล่าวมานั้นเป็นเพียงส่วนหนึ่งที่จะนำมาพัฒนาไปสู่ KMITL CubeSat EM – 3 ที่สมบูรณ์ พร้อมทำงานในอวกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งที่จะพัฒนาแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 3 ไปสู่การทำงานในอวกาศได้จริง คณะผู้จัดทำได้ทำส่วนการสร้างและพัฒนาบอร์ด JPEG Camera เพื่อควบคุมการถ่ายภาพบนดาวเทียม รวมถึงการทำงานของบอร์ดจัดการข้อมูลกลางบางส่วนสำหรับกระบวนการเข้ารหัสลับ - ถอดรหัสลับ ซึ่งมีรายละเอียดหลายส่วน อาทิเช่น ระบบการทำงานบอร์ด JPEG Camera, การพัฒนาวิธีการสำหรับการขยายภาพโดยที่ยังคงรักษารายละเอียดและความคมชัดของภาพ, กระบวนการเข้ารหัสลับ - ถอดรหัสลับแบบเคออดิกบนพื้นฐานวงจรกรองดิจิทัลบนสถานีภาคพื้นดินและหน่วยประมวลผลบนดาวเทียม, การออกแบบซอฟต์แวร์ภาคพื้นดิน, การควบคุมตำแหน่งการถ่ายภาพ และการวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index; NDVI) เพื่อรองรับการทำงาน Remote Sensing

2.1 ดาวเทียมคิวบ์แซท (CubeSat)

ดาวเทียมคิวบ์แซท (CubeSat) เริ่มสร้างขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1999 ที่ California Polytechnic State University และ Stanford University โดยมีวัตถุประสงค์เริ่มแรกคือเพื่อการฝึกทักษะ และให้ความรู้ในการ Design, Manufacture และ Testing กับดาวเทียมจริง แต่ราคาถูก เพื่อให้ผู้ที่สร้างดาวเทียมมีความชำนาญเพิ่มมากขึ้น เพราะการที่จะได้โอกาสทำงานกับดาวเทียมขนาดใหญ่จะเป็นไปได้ยากกว่าเพราะราคาของดาวเทียมดวงใหญ่นั้นสูง

คิวบ์แซทมีขนาดเริ่มต้นมาตรฐานที่ 10 ซม. x 10 ซม. x 10 ซม. ซึ่งจะเรียกว่า 1 U และน้ำหนักจำกัดอยู่ที่ 1 กิโลกรัม และคิวแซทสามารถพัฒนาทำเป็น 2 U, 3 U, 6 U หรือ 12U ได้ด้วย แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่ง 12 U จะมีน้ำหนักประมาณ 15.6 กิโลกรัม เหตุผลที่คิวบ์แซทมีขนาดเล็กก็เพื่อให้ตัวของคิวบ์แซทสามารถเข้าไปอยู่ในระบบจัดเก็บและส่งดาวเทียมในจรวดส่งดาวเทียมได้อย่างลงตัวและง่ายตาย เพื่อถูกส่งไปพร้อมกับดาวเทียมขนาดใหญ่ที่เป็นภารกิจหลัก ส่วนคิวบ์แซทจะเป็นภารกิจรอง เพื่อความปลอดภัยให้กับดาวเทียมดวงใหญ่ ดาวเทียมในภารกิจรองต้องอยู่ในตำแหน่งและพื้นที่ที่จำกัดในระหว่างการส่งขึ้นสู่อวกาศ [1]

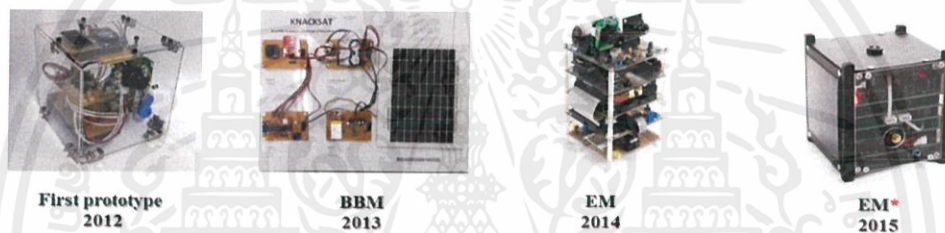


รูปที่ 2.1 โครงสร้างดาวเทียมคิวบ์แซทขนาด 1 U 2U 3U 6U และ 12 U ตามลำดับ

แบ่งกลุ่มดาวเทียมคิวบ์แซทออกเป็น 2 กลุ่มหลักๆ ตามวัตถุประสงค์ของการสร้าง คือ เพื่อทดสอบเทคโนโลยีใหม่ๆ บนอวกาศ และเพื่อเพิ่มความรู้ความเข้าใจและประสบการณ์ให้กับผู้สร้างดาวเทียม

2.1.1 ดาวเทียมแนคแซท (KNACKSAT)

ดาวเทียมแนคแซท (KNACKSAT) ย่อมาจาก King Mongkut's University of Technology North Bangkok Academic Challenge of Knowledge เป็นดาวเทียมรูปแบบคิวบ์แซท (CubeSat) แสดงดังรูปที่ 2.2 มีขนาด 10x10x10 ลูกบาศก์เซนติเมตร น้ำหนักประมาณ 1 กิโลกรัม และใช้คลื่นความถี่วิทยุสมัครเล่นในการสื่อสาร ดาวเทียมแนคแซทได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมเพื่อประโยชน์สาธารณะ สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ภายใต้ชื่อโครงการ “KNACKSAT” โครงการออกแบบและจัดส่งดาวเทียมขนาดเล็กเพื่อการศึกษา [2]



รูปที่ 2.2 ดาวเทียมแนคแซท

2.1.1.1 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) เพื่อเพิ่มศักยภาพและประสบการณ์การสร้างดาวเทียมจริงให้กับบุคลากร (อาจารย์ นักวิจัย และนักศึกษา) ของประเทศไทย
- 2) เป็นรากฐานในการออกแบบและสร้างดาวเทียมที่มีขนาดใหญ่ขึ้นต่อไปภายในประเทศ ซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งในเชิงเศรษฐกิจและความมั่นคง
- 3) เป็นการกระตุ้นความสนใจในวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีให้กับเยาวชน ที่จะเป็นกำลังหลักในการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศต่อไปในอนาคต

2.1.1.2 พันธกิจหลักในอวกาศ

- 1) การถ่ายภาพโลกจากอวกาศ (ความละเอียด 1 – 2 กิโลเมตรต่อพิกเซล)
- 2) ทดสอบการทำงานของระบบต่างๆ ที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นในอวกาศ

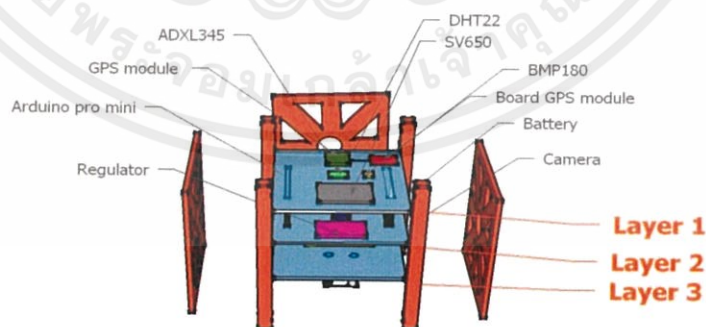
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ดาวเทียม KMITL CubeSat

ดาวเทียม KMITL CubeSat EM – 1 และ EM – 2 เป็นดาวเทียมคิวบ์แซทที่มีขนาด 10x10x10 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนดาวเทียมคิวบ์แซทจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับภารกิจที่กำหนด ซึ่งในแบบจำลองทั้ง 2 รุ่นนี้ประกอบไปด้วย กล้องถ่ายภาพ และเซนเซอร์ตรวจวัด ได้แก่ อุณหภูมิภายในคิวบ์แซท ความกดอากาศ ความเร็ว 3 แกน และพิกัดทางภูมิศาสตร์วัตถุประสงค์ของการติดตั้งเซนเซอร์วัดดังกล่าวคือ เพื่อเก็บและส่งข้อมูลไปยังสถานีภาคพื้นดิน โดยการทดสอบฟังก์ชันการทำงานและการติดต่อสื่อสารของแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซทดำเนินการด้วยการติดตั้งและปล่อยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ (ใกล้เคียงอวกาศ) ด้วยบอลูนความสูงที่ระดับความสูงประมาณ 25 กิโลเมตร และมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลโดยการเข้ารหัสช่องสัญญาณด้วยรหัสคอนวอลูชัน โดยยึดอัตรารหัสตามมาตรฐานการเข้ารหัสช่องสัญญาณสำหรับการสื่อสารดาวเทียมของหน่วยงานคณะกรรมการที่ปรึกษาระบบจัดการข้อมูลในอวกาศ (The Consultative Committee for Space Data Systems: CCSDS) ซึ่งมีอัตรารหัสเท่ากับ 1/2 และ Constraint length (K) เท่ากับ 7 นอกจากนี้ เป็นการทดลองศึกษากลไกการรักษาสมดุลของดาวเทียมคิวบ์แซท เพื่อทำภารกิจถ่ายภาพ โดยใช้กลไกการรักษาสมดุลของดาวเทียมคิวบ์แซทในการควบคุมทิศทางการถ่ายภาพ [3]

2.1.2.1 แบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 1

แบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 1 ที่ได้ ออกแบบนั้นจะประกอบไปด้วย 3 Layer โดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 ต้นแบบของแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 1



รูปที่ 2.4 แบบจำลองดาวเทียมคิวบแซท EM - 1

จากรูปที่ 2.3 Layer 1 คือ ส่วนสื่อสาร และเซนเซอร์, Layer 2 คือ ส่วนประมวลผล และจัดการข้อมูล และ Layer 3 คือ ส่วนแบตเตอรี่ และกล้องถ่ายภาพ

แบบจำลองดาวเทียมคิวบแซท EM - 1 ถูกสร้างขึ้นตั้งแต่ปีการศึกษาที่ 1/2559 และได้ทำการทดสอบการปล่อยแบบจำลองดาวเทียมคิวบแซทขึ้นสู่อวกาศโลก ในวันศุกร์ ที่ 2 ธันวาคม 2559 และได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาหลังจากการทดสอบปล่อยครั้งที่ 1 ซึ่งพบปัญหาดังนี้

1. ความไม่เสถียรภาพของอุปกรณ์ประมวลผล (MCU)
2. ไอซีแปลงแรงดันกระแสไฟลงเป็นแบบสวิตซ์ซึ่ง ทำให้เกิดการกระเพื่อม (Ripple) บนสัญญาณไฟ
3. สายอากาศมีขนาดเล็กกว่า 1/4 ของความยาวคลื่น ทำให้อัตราขยายต่ำ
4. ไม่มีระบบบันทึกข้อมูลบนแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบแซท
5. เวลาประจุไฟแบตเตอรี่ต้องถอดแบตเตอรี่ออกมา
6. กล้องถ่ายภาพไม่มีตัวกรองแสงอินฟราเรด ทำให้ภาพเป็นสีออกขาวดำ และใช้เลนส์ปกติทำให้มุมมองภาพแคบ

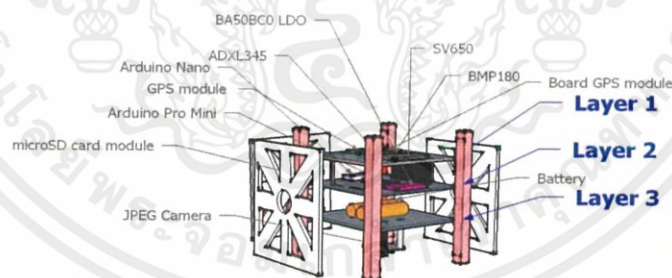
จากปัญหาดังกล่าวทำให้เกิดการปรับปรุงและพัฒนาแบบจำลองดาวเทียมคิวบแซท EM - 2 โดยมีความแตกต่างกับแบบจำลองดาวเทียมคิวบแซท EM - 1 แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบองค์ประกอบระหว่างแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 1 และ EM - 2

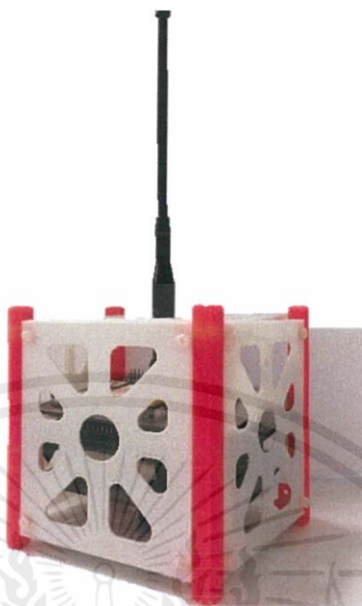
Part	EM-1	EM-2
Microcontroller	Arduino Nano	Arduino Nano & Pro mini
IC Regulator	LM2596	BA50BC0
Whip Antenna (Gain)	0 dBi	2.15 dBi
Data Log	N/A	✓
Battery Charge Port	N/A	✓
IR Cut in JPEG Camera	N/A	✓

2.1.2.2 แบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 2

แบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 2 ถูกสร้างขึ้นและทำการทดลองในระหว่างปีการศึกษาที่ 2/2559 และได้ทำการทดสอบการปล่อยแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซทขึ้นสู่อวกาศโลก ในวันพฤหัสบดีที่ 30 มีนาคม 2560 โดยแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 2 ที่ได้ออกแบบนั้นจะประกอบไปด้วย 3 ชั้น มีรายละเอียดดังรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ต้นแบบของแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 2



รูปที่ 2.6 แบบจำลองดาวเทียมคิวบแซท EM - 2

จากรูปที่ 2.5 Layer 1 คือ ส่วนสื่อสาร, Layer 2 คือ ส่วนประมวลผลและจัดการข้อมูล และ Layer 3 คือ ส่วนแบตเตอรี่ เซนเซอร์ และกล้องถ่ายภาพ

2.2 ระบบการทำงานของบอร์ด JPEG Camera

ระบบการทำงานของบอร์ด JPEG Camera ประกอบด้วย ระบบเลนส์ การควบคุมการถ่ายภาพ และการส่งไฟล์ภาพ JPEG

2.2.1 ระบบเลนส์ และ IR Cut Filter

2.2.1.1 ระบบเลนส์

การถ่ายภาพบนอวกาศนั้น ภาพที่ได้จะมีความละเอียดน้อย ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานในอวกาศ จึงใช้เลนส์มุมกว้างขยาย 8 เท่า เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ยาว 7 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 2.7 เพื่อเพิ่มอัตราการขยายของภาพ โดยการคำนวณอัตราการขยายของเลนส์นั้น ใช้สมการที่ (2.1)

$$M = \frac{I}{O} = \frac{S'}{S} \quad (2.1)$$

โดย M คือ อัตราการขยาย
 I คือ ขนาดของภาพ
 O คือ ขนาดของวัตถุ
 S' คือ ระยะภาพ
 S คือ ระยะวัตถุ



รูปที่ 2.7 เลนส์ซูมกำลังขยาย 8 เท่า

2.2.1.2 IR Cut Filter หรือ Infrared Cut-Off Filter

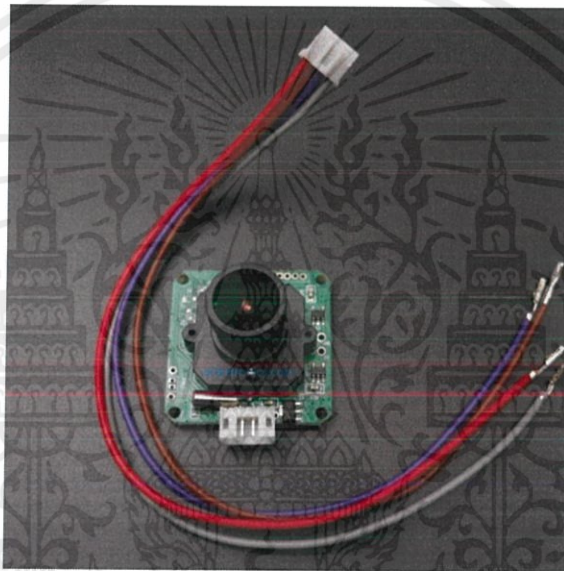
เป็นตัวกรองอินฟราเรด ซึ่งใช้บัง CCD (Charge Coupled Device) ซึ่งเป็นเซนเซอร์ที่ทำงานโดยแต่ละพิกเซลจะทำหน้าที่รับแสงเพื่อกันและตัดแสงในย่านอินฟราเรด ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยสายตาของมนุษย์ออก ทำให้ได้ภาพที่คมชัดและสมดุลขึ้น

2.2.2 การควบคุมการถ่ายภาพ

ในการออกแบบและสร้างบอร์ด JPEG Camera เพื่อควบคุมการถ่ายภาพบนดาวเทียมคิวบแซท มีส่วนประกอบหลายส่วน อาทิเช่น JPEG Camera, MicroSD Card และ MicroSD Card Adapter เป็นต้น

2.2.2.1 JPEG Camera Module

JPEG Camera Module ที่ใช้ คือ กล้อง JPEG Color Camera 2M Pixel Serial UART Interface (TTL) ควบคุมผ่านทาง UART (TTL) ความละเอียดสูงสุด 2 ล้านพิกเซล จากการทำงานของโมดูล ซึ่งรับ - ส่งข้อมูลผ่านทาง Serial interface ทำให้สามารถนำไปใช้งานในด้านต่างๆ ได้อย่างสะดวก เช่น การนำไปต่อใช้งานกับ Microcontroller UART หรือใช้งานกับ PC เป็นต้น และเลนส์ของกล้อง คือ CL4022IR (F 3.6 mm F/No 2.2) กับ IR Cut Filter [4] ตัวกล้อง JPEG Color Camera 2M Pixel Serial UART Interface (TTL) แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 JPEG Color Camera 2M Pixel Serial UART Interface (TTL)

การเชื่อมต่อกับเข้ากับคอมพิวเตอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ มีรูปแบบการสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับโมดูล JPEG Camera ในการสื่อสารจะใช้รูปแบบเฟรมข้อมูลดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 รูปแบบเฟรมของคำสั่งพื้นฐานที่ใช้ติดต่อกับ JPEG Camera UART Interface (TTL)

Main Command	Transmitted Data	Data Frame Segmentation			Acknowledgement Data	Data Frame Segmentation		
		START	COMMAND	BODY		START	COMMAND	BODY
Reset	56 00 26 00	56 00	26	00	76 00 26 00	26	00	
Take Picture	56 00 36 01 00	56 00	36	01 00	76 00 36 00 00	36	00 00	
Read JPEG File Size	56 00 34 01 00	56 00	34	01 00	76 00 34 00 04 00 00 XH XL	34	00 04 00 00 XH XL	
Read JPEG File Content	56 00 32 0C 0A 00 MH ML 00 00 KH KL XX XX	56 00	32	0C 0A 00 MH ML 00 00 KH KL XX XX	76 00 32 00 00 DATA 76 00 32 00 00	32	00 00 DATA 76 00 32 00 00	
Stop Taking Picture	56 00 36 01 03	56 00	36	01 03	76 00 36 00 00	36	00 00	
Image Size	160x120	56 00	54	01 22	76 00 54 00 00	54	00	
	320x240	56 00		01 11				
	640x480	56 00		01 00				
	800x600	56 00		01 1D				
	1024x768	56 00		01 1C				
	1280x960	56 00		01 1B				
1600x1200	56 00	01 21						
Baud Rate	9600	56 00	24	03 01 AE	76 00 24 00 00	24	00 00	
	38400	56 00		03 01 22				
	57600	56 00		03 01 1C				
	115200	56 00		03 01 0D				
	128000	56 00		03 01 AE				
256000	56 00	03 01 56						

เมื่อทำการส่งคำสั่ง Read JPEG file size ไปยัง JPEG Camera Module ทางฝั่ง Module จะตอบกลับมา XH และ XL คือขนาดของรูปภาพที่ถูกถ่ายได้ ซึ่ง XH คือไบต์สูง (MSB) และ XL คือไบต์ต่ำ (LSB)

เมื่อทำการส่งคำสั่ง Read JPEG file content ไปยัง JPEG Camera Module โดยคำสั่งที่ส่งไป MH และ ML คือ Address เริ่มต้นที่ต้องการจะอ่าน โดยค่าเริ่มต้นคือ 00 00 ในกรณีที่มีการอ่านข้อมูลจาก Buffer ของ Module ทั้งหมดภายในครั้งเดียว แต่ในกรณีที่ต้องแบ่งข้อมูลทั้งหมดออกเป็นแพ็คเกจ จะกำหนด MH คือไบต์สูง (MSB) และ ML คือไบต์ต่ำ (LSB) ต่อมาคือ KH และ KL คือ ความยาวของรูปภาพที่ต้องการจะอ่าน ถ้าต้องการจะอ่านข้อมูลทั้งหมดภายในครั้งเดียวก็กำหนดค่า KH และ KL ให้เท่ากับ XH และ XL ที่ได้จากการตอบกลับจากคำสั่ง Read JPEG file size แต่ในกรณีที่ต้องการแบ่งข้อมูลทั้งหมดออกเป็นแพ็คเกจ จะกำหนด KH คือไบต์สูง (MSB) และ KL คือไบต์ต่ำ (LSB) และจากการตอบกลับของคำสั่ง Read JPEG file content โดย DATA คือข้อมูลรูปภาพ ซึ่งจะขึ้นต้น 0xFF 0xD8 และจะลงท้ายด้วย 0xFF 0xD9 DATA ที่ตอบกลับมาจะมีค่าเท่ากับการกำหนด KH และ KL ของคำสั่ง Read JPEG file content

การเชื่อมต่อของ JPEG Color Camera 2M Pixel Serial UART Interface (TTL) ทางกายภาพ มีทั้งหมด 4 ขา ได้แก่ ขา VCC คือแหล่งจ่ายไฟ (+5V) ขา TxD คือขาส่งข้อมูล RxD คือขารับข้อมูล และขา GND คือสายดิน [4]

2.2.2.2 Micro SD Card

เอสดีการ์ด หรือ Secure Digital Card คือ อุปกรณ์ในการจัดเก็บข้อมูลแบบ Nand Flash Memory ที่นำไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายชนิด เช่น กล้องดิจิทัล โทรศัพท์มือถือ หรือแท็บเล็ต เอสดีการ์ดประกอบด้วยตระกูลการ์ด 4 ตระกูลใน 3 ขนาด การ์ด 4 ตระกูลนี้ได้แก่ การ์ดความจุมาตรฐานดั้งเดิม (SDSC) การ์ดความจุสูง (SDHC) การ์ดความจุขยาย (SDXC) และเอสดีไอโอ (SDIO) ซึ่งรวมฟังก์ชันอินพุต/เอาต์พุตสำหรับหน่วยความจำด้วย โดยการ์ด 3 ขนาด ได้แก่ขนาดดั้งเดิม ขนาดมินิ และขนาดไมโครการ์ด ซึ่งสามารถเสียบเข้ากับตัวรับต่อ และสามารถทำงานในอุปกรณ์ที่สร้างสำหรับการ์ดขนาดใหญ่กว่าได้ [5]

ในปัจจุบันไมโครเอสดีการ์ดเป็นที่นิยม เพราะกลุ่มสมาร์ตโฟน แท็บเล็ต กล้องแอดซันแคม และเครื่องเล่นเพลงระบบดิจิทัล นั้นถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กและบาง ซึ่งไมโครเอสดีการ์ดมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับการ์ดขนาดอื่นๆ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ขนาดของ SD Card ประเภทต่างๆ

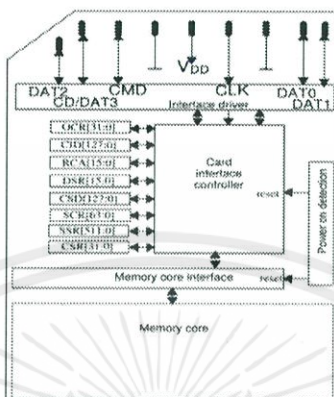
1) ความจุข้อมูลของไมโครเอสดีการ์ด ในปัจจุบัน ไมโครเอสดีการ์ดความจุสูงแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ SDHC (SD High Capacity) ซึ่งมีความจุอยู่ระหว่าง 2GB – 32GB และ SDXC (SD Extended Capacity) ซึ่งมีความจุอยู่ระหว่าง 32GB – 2TB ตามมาตรฐาน

2) ความเร็วของไมโครเอสดีการ์ด ความเร็วในการอ่านหรือบันทึกข้อมูลเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ใช้แบ่งคุณภาพและราคาของไมโครเอสดีการ์ด ซึ่งความเร็วของไมโครเอสดีการ์ด แสดงดังรูปที่ 2.10

	Mark	Minimum Serial Data	SD Bus Mode	Application
UHS Speed Class	3	30MB/s	UHS-II	4K2K Video Recording
	1	10MB/s	UHS-I	Full HD Video Recording HD Still Image Continuous Shooting
Speed Class	CLASS 10	10MB/s	High Speed	HD and Full HD Video Recording
	CLASS 6	6MB/s		
	CLASS 4	4MB/s	Normal Speed	Standard Video Recording
	CLASS 2	2MB/s		

รูปที่ 2.10 กลุ่มความเร็วของไมโครเอสดีการ์ด

3) โครงสร้างของไมโครเอสทีการ์ดโครงสร้างภายในของการ์ด แบ่งเป็น Interface Driver, Card Interface controller และ Memory Core แสดงดังรูปที่ 2.11

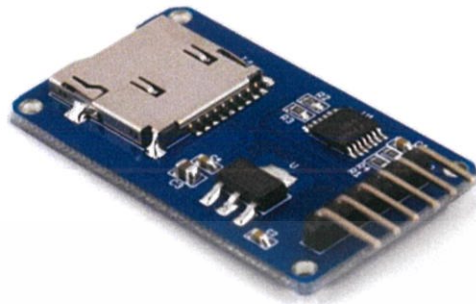


รูปที่ 2.11 โครงสร้างภายในของไมโครเอสทีการ์ด

ส่วนการควบคุมการอินเทอร์เฟส (Interface Driver) จะเชื่อมต่อกับขาอินเทอร์เฟสภายนอก ซึ่งจะกำหนดโหมดการทำงานที่เหมาะสมและเลือกค่าแรงดันและพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ต้องการ สำหรับการเชื่อมต่อทางกายภาพ และส่วนตัวควบคุมการเชื่อมต่อการ์ด (Card Interface Controller) จะประมวลผลคำสั่งของผู้เขียนหรือผู้อ่าน ลงในแกนหน่วยความจำ และส่วนแกนหน่วยความจำ คือตำแหน่งที่เก็บข้อมูล ซึ่งส่วนมากจะเป็นหน่วยความจำประเภท Nand Flash [6]

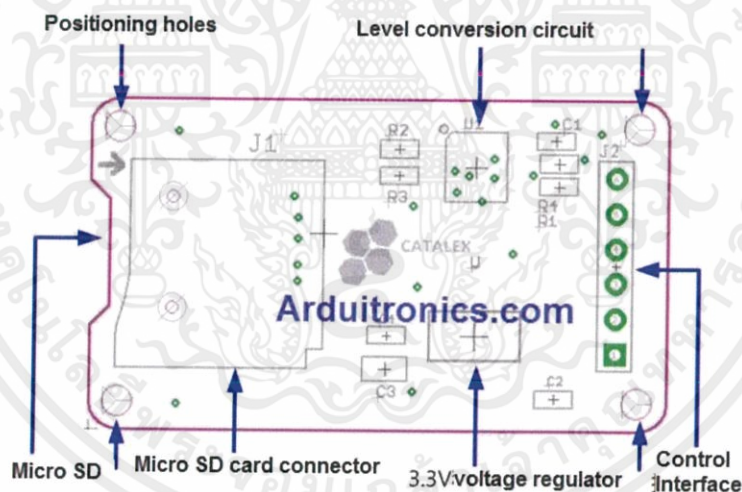
2.2.2.3 Micro SD Card Adapter

โมดูลสำหรับการบันทึกข้อมูลลง Micro SD Card เป็นอุปกรณ์สำหรับเพิ่มความสามารถในการบันทึกข้อมูลต่างๆ จากบอร์ด Arduino ลงบนตัว Micro SD Card โดยสื่อสารผ่าน SPI Protocol ขนาดเล็กพร้อมใช้งาน แสดงดังรูปที่ 2.12 และมีวงจรถูกออกแบบมาให้สามารถใช้งานได้ในช่วง 4.5 V – 5.5 V และสามารถใช้งานกับไมโครเอสทีการ์ด (Micro SD Card) และไมโครเอสดีเอชซีการ์ด (Micro SDHC Card) ได้ [7]



รูปที่ 2.12 โมดูล Micro SD Card Adapter

โครงสร้างภายในของ Micro SD Card Adapter ประกอบด้วย ส่วนต่างๆ เช่น ส่วนควบคุมการเชื่อมต่อ (Control Interface) วงจรเรกูเลต 3.3 V (3.3 Voltage Regulator Circuit) วงจรแปลงระดับ (Level Conversion Circuit) ช่องใส่ไมโครเอสดีการ์ด (Micro SD Card Connector) และรูยึดบอร์ด (Positioning Holes) แสดงดังรูปที่ 2.13 [7]



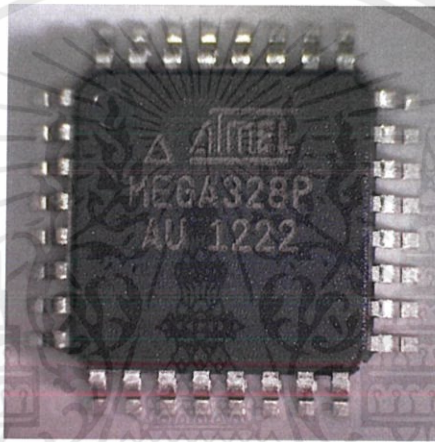
รูปที่ 2.13 โครงสร้างภายในของ Micro SD Card Adapter

2.2.2.4 ATmega328P AU

ATmega328P AU เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้พลังงานต่ำ โดยมีแกนควบคุมคือ AVR มีหน่วยความจำ 32 KB และเมื่อ ATmega328P ปิดเครื่องจะสามารถเก็บรักษาข้อมูลได้ โดย AVR มีโครงสร้างแบบ RISC มีความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

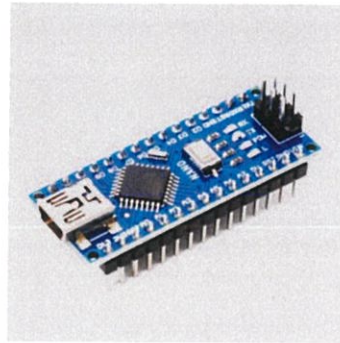
ในการประมวลผล 1 คำสั่งต่อ 1 สัญญาณนาฬิกา และสามารถรีเซ็ตโดยใช้พลังงานของ ATmega328P มีจำนวนตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลไปเป็นอนาล็อก (Digital to Analog Converters) 8 ตัว สายอินพุตและเอาต์พุต 23 เส้น มีการเชื่อมต่อของ ATmega328P 3 แบบ คือ I2C , SPI และ USART และมีโหมดประหยัดไฟ 6 โหมด คือ โหมดไม่ทำงาน (Idle) ลดสัญญาณรบกวน (ADC Noise Reduction) ประหยัดพลังงาน (Power Save) ปิดเครื่อง (Shut Down) พร้อมใช้ง่าย (Standby) และพร้อมใช้งานอย่างต่อเนื่อง (Standby Expansion) โดยชิป ATmega328P AU [8] แสดงดังรูปที่ 2.14



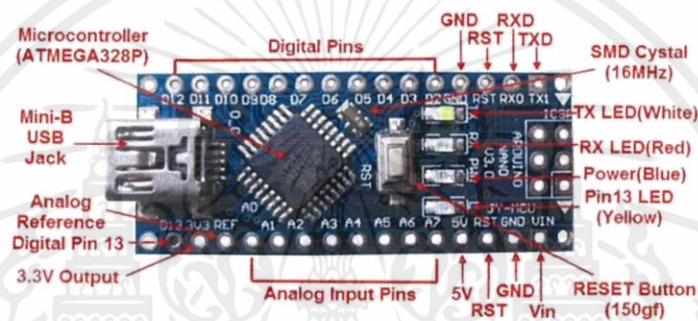
รูปที่ 2.14 ชิป ATmega328P AU

2.2.2.5 Arduino NANO

เป็นบอร์ดราคาประหยัด และขนาดเล็กเพียง 1.8 x 4.8 เซนติเมตร ใช้ชิพยี่ห้อ ATmega328 เหมือนกับรุ่น UNO แต่มีจำนวนอินพุตและเอาต์พุตน้อยกว่า เพราะต้องการให้มีขนาดเล็ก และสามารถเขียนโปรแกรมได้โดยตรงผ่าน USB port แสดงดังรูปที่ 2.15 และมีขาของ Arduino NANO ดังรูปที่ 2.16 [9]



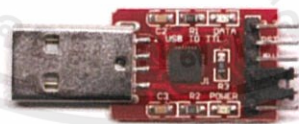
รูปที่ 2.15 Arduino NANO



รูปที่ 2.16 ขาของ Arduino NANO

2.2.2.6 USB 2.0 to TTL UART 6 PIN Module Serial Converter

เป็นตัวแปลงสัญญาณการเชื่อมต่อแบบ Serial จากอุปกรณ์ที่แรงดันระดับ TTL (3.3 V หรือ 5 V) ไปเป็นแรงดัน USB มาตรฐานเพื่อเชื่อมต่อเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ [10] โดยไม่ต้องใช้วงจรอื่น ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 โมดูล USB 2.0 to TTL UART 6 PIN Module Serial Converter

ขาของ USB 2.0 to TTL UART 6 PIN Module Serial Converter มีทั้งหมด 6 ขา ได้แก่ ขาไฟ 3.3 V ขา RESET (only for programming) ขาไฟ 5 V ขา TxD (Transmit Data), ขา RxD (Receive Data) และขา GND (Ground)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ไฟล์ JPEG

JPEG (Joint Photographic Experts Group) คือรูปแบบการบีบอัดเพิ่มภาพแบบสูญเสีย โดยเสียความละเอียดน้อยที่สุด รูปแบบเพิ่มสำหรับวิธีการนี้ได้แก่ .jpeg, .jpg, .jpe, .jif และ .jfi รูปแบบเพิ่ม JPEG เป็นรูปแบบเพิ่มที่ใช้กันในการจัดเก็บและแลกเปลี่ยนรูปภาพบนเวปไซต์ไวต์เว็บมากที่สุด โดยเฉพาะภาพถ่าย เนื่องจากสามารถเก็บความละเอียดสูงได้โดยใช้ขนาดไฟล์ที่เล็ก สามารถเก็บภาพสีได้หลากหลายระดับความแม่นยำของสี (Bit Depth) ความสามารถในการย่อขนาดไฟล์ของเพิ่ม JPEG นั้นเกิดจากการใช้เทคนิคการย่อขนาดภาพแบบการบีบอัดคงข้อมูลหลัก (Lossy Compression) หรือการบีบอัดแบบมีความสูญเสียทำให้ไม่นิยมใช้กับภาพที่เป็นลายเส้นหรือไอคอนต่างๆ เนื่องจากจะไม่ได้ประสิทธิภาพเท่าการเก็บในรูปแบบอื่น อย่าง PNG หรือ GIF

การบีบอัดของ JPEG นั้นจะใช้เทคนิคที่เรียกว่า DCT (Discrete Cosine Transform) ซึ่งเป็นการแปลงค่าความสว่างของภาพให้อยู่ในรูปเชิงความถี่ (Frequency Domain) ทำให้สามารถเลือกแทนค่าของสัมประสิทธิ์หรือในที่นี้คือแอมพลิจูดของค่าความถี่ต่างๆ โดยอาศัยตัวแปรที่มีนัยสำคัญที่ต่างกัน การที่สามารถลดนัยสำคัญของค่าตัวเลขลงไปได้ทำให้สามารถลดขนาดของหน่วยความจำหรือขนาดไฟล์ที่ใช้เก็บตามไปได้ [11]

2.2.3.1 โครงสร้างไฟล์ JPEG (JPEG File Layout)

โครงสร้างของไฟล์ JPEG จะถูกแบ่งโดยเครื่องหมาย (Marker) ซึ่งแต่ละเครื่องหมายจะนำหน้าด้วย 0xff เสมอ ซึ่งเครื่องหมายจำแนกออกเป็น 8 ส่วน แสดงดังตารางที่ 2.3 [12]

ตารางที่ 2.3 รายละเอียดเครื่องหมายของโครงสร้างไฟล์ JPEG

ชื่อเครื่องหมาย	ตัวบ่งชี้เครื่องหมาย	รายละเอียด
SOI	0xD8	บอกการเริ่มต้นของไฟล์ภาพ
APP0	0xE0	ส่วนของแอปพลิเคชัน JFIF ความยาวของ APP0 ตัวบ่งชี้ เวอร์ชัน หน่วยของความหนาแน่นของ X และ Y ความหนาแน่น X ความหนาแน่น Y
APPn	0xE1-0xEF	ส่วนของแอปพลิเคชันอื่นๆ ความยาว APPn ข้อมูลเฉพาะของ APPn นั้นๆ
DQT	0xDB	ตารางการแบ่งนัย (Quantization Table) ความยาวตารางการแบ่งนัย หมายเลขตารางการแบ่งนัย
SOF0	0xC0	บอกการเริ่มต้นของเฟรม ความยาวของเฟรม ความแม่นยำ (บิตต่อจุดภาพต่อองค์ประกอบสี) ความสูงของภาพ ความกว้างของภาพจำนวนองค์ประกอบสี
DHT	0xC4	ตารางฮัฟฟ์แมน ความยาวตารางฮัฟฟ์แมน ประเภท AC หรือ DC ดัชนี ตารางบิตตารางค่า
SOS	0xDA	บอกการเริ่มต้นการสแกน ความยาวการสแกน จำนวนองค์ประกอบสีข้อมูลภาพที่บีบอัด
EOI	0xD9	บอกการจบของไฟล์ภาพ

2.2.3.2 รูปแบบไฟล์ JPEG (JPEG File Format)

รูปแบบไฟล์ JPEG นั้นแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ [12]

1) ส่วนหัว (Header) คือ 0xFF และ 0xD8 ซึ่งคือเครื่องหมาย SOI (Start of Image) บ่งบอกการเริ่มต้นของไฟล์ JPEG

2) ส่วนของกลุ่มเครื่องหมาย (Segments or Markers) เช่น APP0, DQT, DHT, SOF และ SOS เป็นต้น ซึ่ง APP0 จะต่อหลังจากเครื่องหมาย SOI ทันที และข้อมูลภาพ (Data) จะต่อหลังจากเครื่องหมาย SOS ทันที

3) ส่วนหาง (Trailer) คือ 0xFF และ 0xD9 ซึ่งคือเครื่องหมาย EOI (End of Image) บ่งบอกการจบลงของไฟล์ JPEG

ตัวอย่างส่วนหัวและส่วนของกลุ่มเครื่องหมายของไฟล์ JPEG นั้นจะแสดงดังรูปที่ 2.18 [13] กรอบสีแดงคือ SOI อยู่ในส่วนหัว กรอบสีเขียวคือ APP0 อยู่ในส่วนของกลุ่มของเครื่องหมาย และกรอบสีเขียวคือ DQT อยู่ในส่วนของกลุ่มเครื่องหมาย

Offset	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	ASCII
00000000	FF	D8	E0	00	10	4A	46	49	46	00	01	01	01	00	48		яЩа..JFIF.....H
00000010	00	48	00	00	FF	DB	00	43	00	01	01	01	01	01	01	01	.Н..яН.С.....
00000020	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
00000030	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
00000040	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
00000050	01	01	01	01	01	01	01	01	01	FF	DB	00	43	01	01	01яН.С...
00000060	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
00000070	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
00000080	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01

รูปที่ 2.18 ตัวอย่างส่วนหัวและส่วนของกลุ่มเครื่องหมายของไฟล์ JPEG

ตัวอย่างส่วนหางของไฟล์ JPEG นั้นแสดงดังรูปที่ 2.19 [13] เส้นสีแดงคือ EOI บ่งบอกการจบลงของไฟล์ JPEG

00000520	3C	76	40	40	45	39	17	27	4D	C7	0E	9B	68	AA	A0	01	<v@@E9.'M3.>he .
00000530	FF	00	6A	47	B8	CC	C4	9E	9A	6E	D2	BF	FF	D9			я.jGEMДннTиЩ

รูปที่ 2.19 ตัวอย่างส่วนหางของไฟล์ JPEG

2.3 วิธีการในการขยายภาพโดยที่ยังคงรักษารายละเอียดและความคมชัดของภาพบนพื้นฐานของการดำเนินการใน Wavelet Domain

2.3.1 เทคนิคการทำขยายภาพดิจิทัล Image Interpolation

เทคนิคการ Image Interpolation นั้นกล่าวได้ว่าเป็นการเปลี่ยนจุดพิกเซล (Pixel) ที่พิกัด X, Y ใดๆ ของภาพต้นฉบับไปยังพิกัดใหม่ของภาพดั่งสมการที่ (2.2) และ (2.3)

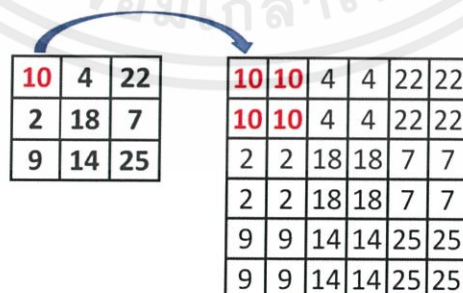
$$X_1 = aX \quad (2.2)$$

$$Y_1 = bY \quad (2.3)$$

โดย X_1 และ Y_1 คือพิกัดใหม่ของจุดพิกเซลในภาพหลังผ่านกระบวนการประมวลผลภาพ X และ Y คือพิกัดเดิมของจุดพิกเซลในภาพ a และ b คือค่าสเกลาร์หรือค่าคงที่ใดๆ ที่นำไปคูณกับพิกัดตามแนวแกน X และ Y

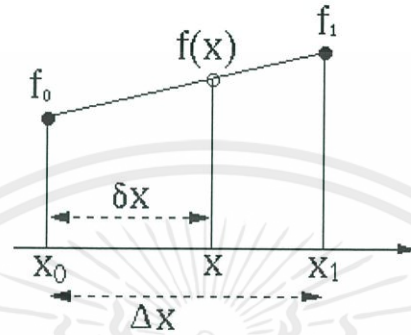
จากนั้นจึงทำการแทรกจุดพิกเซลของภาพที่เหลือเข้าไปยังภาพเอาต์พุตโดยอาศัยเทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการประมาณค่าตามความสัมพันธ์ระหว่างจุดภาพเดิมที่อยู่ใกล้เคียงกัน เพื่อสร้างจุดพิกเซลขึ้นมาในภาพผลลัพธ์ โดยในซอฟต์แวร์ทั่วไปจะใช้การ Interpolate อยู่ 3 เทคนิคได้แก่ Nearest neighbor, Bilinear และ Bicubic มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1.1 Nearest neighbor คือพิกเซลในภาพใหม่นั้นจะมีค่าเท่ากับจุดภาพที่อยู่ในพิกัดที่ใกล้ที่สุดดังรูปที่ 2.20 เป็นเทคนิคการปรับขนาดภาพที่ง่ายและรวดเร็วที่สุด แต่ภาพที่ได้นั้นจะไม่มีคุณภาพที่ดีพอเมื่อเทียบกับเทคนิค Bilinear หรือ Bicubic มักนิยมในงานขยายภาพที่มีรายละเอียดน้อยเช่น QR code เป็นต้น



รูปที่ 2.20 เทคนิคการขยายภาพด้วยวิธี Nearest neighbor

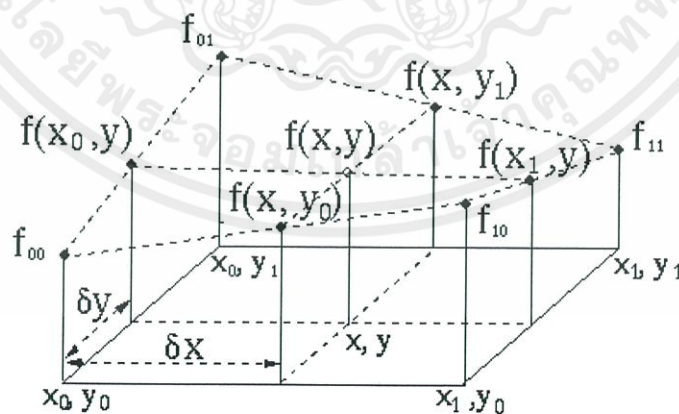
2.3.1.2 Bilinear interpolation คือจุดพิเศษของภาพใหม่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักระหว่างจุดภาพที่ใกล้ที่สุด 4 จุด หรือสามารถใช้วิธีการ Linear Interpolation เพื่อหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักในแนวแกนหนึ่งก่อนแล้วค่อยทำการ Interpolation ด้วยลักษณะเดิมในอีกแนวแกนหนึ่ง โดยการคำนวณ Linear interpolation ทำได้ดังนี้ [14]



รูปที่ 2.21 พื้นฐานการดำเนินงานด้วยเทคนิคการขยายภาพแบบ Bilinear Interpolation

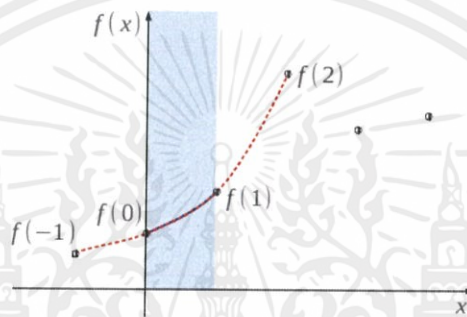
จากรูปที่ 2.21 f_0 และ f_1 แทนค่าของจุดภาพเก่า $f(X)$ แทนจุดภาพใหม่ที่เราต้องการทราบค่า X_1 และ X_0 แทนพิกัดในแนวแกน x ของจุดภาพเก่าทั้งสอง และ x แทนพิกัดในแนวแกน x ของจุดภาพใหม่ โดยสามารถหา $f(X)$ ได้ตั้งสมการที่ (2.4) ทำเช่นนี้สำหรับทั้งระนาบของภาพดังรูปที่ 2.22 จะได้เป็นภาพผลลัพธ์

$$f(X) = \frac{f_1 - f_0}{X_1 - X_0} (X - X_0) + f_0 \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.22 เทคนิคการขยายภาพด้วยวิธี Bilinear interpolation

2.3.1.3 Bicubic interpolation คือจุดพิกเซลของภาพใหม่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้พหุนามลากรางจ์ การประมาณจะใช้ทั้งความสัมพันธ์เฉพาะค่าที่ตำแหน่งใกล้ที่สุดและตำแหน่งที่ใกล้ถัดไป มาใช้ในการคำนวณ โดยลำดับของพหุนามนั้นขึ้นกับจำนวนจุดที่นำมาใช้หาความสำคัญ ทำให้ค่าที่ได้นั้นมีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่มีต่อเนื่องมากกว่าแบบ Bilinear ซึ่งเป็นเส้นตรง มักถูกนำมาใช้มากกว่าการขยายภาพแบบ Nearest neighbor และ Bilinear interpolation โดยการคำนวณ Cubic interpolation จะใช้จุดพิกเซลของภาพเก่านำมาใช้คำนวณในแนวแกนเดียวกัน 4 จุด [15]



รูปที่ 2.23 พื้นฐานการดำเนินงานด้วยเทคนิคการขยายภาพแบบ Bicubic Interpolation

จากรูปที่ 2.23 $f(-1)$, $f(0)$, $f(1)$ และ $f(2)$ จะแทนจุดพิกเซลของภาพเก่าโดยจะจัดให้อยู่ในรูปดังสมการที่ (2.5)

$$f(X) = \sum_{i=0}^3 a_i X^i = a_3 X^3 + a_2 X^2 + a_1 X^1 + a_0 \quad (2.5)$$

เมื่อ $f(X)$ คือค่าของจุดพิกเซลของภาพ ณ ตำแหน่งบนแกน X ดังสมการที่ (2.6) ถึง (2.9)

$$f(-1) = a_3(-1)^3 + a_2(-1)^2 + a_1(-1)^1 + a_0 \quad (2.6)$$

$$f(0) = a_3(0)^3 + a_2(0)^2 + a_1(0)^1 + a_0 \quad (2.7)$$

$$f(1) = a_3(1)^3 + a_2(1)^2 + a_1(1)^1 + a_0 \quad (2.8)$$

$$f(2) = a_3(2)^3 + a_2(2)^2 + a_1(2)^1 + a_0 \quad (2.9)$$

และ

$$y = [f(-1) \quad f(0) \quad f(1) \quad f(2)]^T \quad (2.10)$$

$$B = \begin{bmatrix} (-1)^3 & (-1)^2 & (-1)^1 & (-1)^0 \\ 0^3 & 0^2 & 0^1 & 0^0 \\ 1^3 & 1^2 & 1^1 & 1^0 \\ 2^3 & 2^2 & 2^1 & 2^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 8 & 4 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$a = [a_3 \ a_2 \ a_1 \ a_0]^T \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.10) ถึง (2.12) สามารถเขียนเป็นสมการที่ (2.13) ได้ว่า

$$y = Ba \quad (2.13)$$

ดังนั้นค่าของจุดพิกเซลในภาพ ณ ตำแหน่งใดๆ จะได้ตามสมการที่ (2.14)

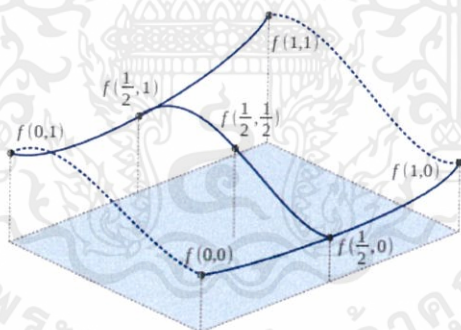
ดังนี้

$$f(X) = ba = bB^{-1}y \quad (2.14)$$

เมื่อ

$$b = [X^3 \ X^2 \ X^1 \ X^0]^T$$

ได้เป็นภาพผลลัพธ์ที่สมบูรณ์จากการขยายภาพด้วยวิธี Bicubic Interpolation มีแบบจำลองตามรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 เทคนิคการขยายภาพด้วยวิธี Bicubic Interpolation

2.3.1.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาประสิทธิภาพและคุณภาพของผลลัพธ์ จากงานประมวลผลภาพที่ใช้ ในการขยายภาพนั้น จะใช้วิธีการหาค่า Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) ซึ่งทำได้โดยการนำภาพต้นฉบับทำการย่อขนาดให้เล็กลง แล้วนำภาพขนาดย่อดังกล่าวมาผ่านกระบวนการ Interpolation เพื่อให้ภาพมีขนาดเท่าภาพต้นฉบับ แล้วจึงทำ

การหาค่า PSNR ระหว่างภาพทั้งสอง โดยค่า PSNR นั้นสามารถหาได้โดยใช้ค่า Mean Square Error (MSE) ตามสมการที่ (2.15) ดังนี้

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2 \quad (2.15)$$

โดย m และ n คือความกว้างและความยาวของภาพตามลำดับ

$I(i, j)$ แทนภาพต้นฉบับ

$K(i, j)$ แทนภาพที่ทำการขยาย

และเมื่อทราบถึงค่าของ MSE จึงสามารถนำไปคำนวณค่า PSNR (ในหน่วย dB) ในลำดับต่อไปดังสมการที่ (2.16)

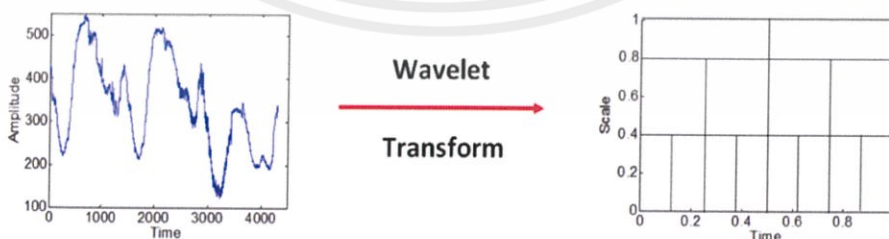
$$PSNR = 20 \cdot \log_{10}(MAX_I) - 10 \cdot \log_{10}(MSE) \quad (2.16)$$

โดย MAX_I คือค่าความเข้มของพิกเซลในรูปภาพผลลัพธ์ที่มีค่ามากที่สุด

โดยหากการขยายภาพนั้นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพค่าของ PSNR จะมีค่ามาก ยิ่งไปกว่านั้นสำหรับในกรณีที่คุณภาพของภาพในเชิงรายละเอียดนั้นมีความใกล้เคียงกับต้นฉบับมากเพียงใด จะส่งผลให้ค่า PSNR ยิ่งมีค่าเข้าใกล้ค่านั้นดี [16]

2.3.2 การวิเคราะห์เวฟเล็ต

การวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตได้รับการพัฒนาเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาที่ไม่สามารถดำเนินการได้ในการแปลงฟูริเยร์ และการแปลงฟูริเยร์ ในช่วงเวลาอันสั้น โดยสามารถปรับช่วงเวลาและความถี่ให้เหมาะสมตามความต้องการได้ หากขยายช่วงเวลาของฟังก์ชันหน้าต่างให้ยาวขึ้นส่งผลให้ข้อมูลช่วงความถี่ต่ำมีความเที่ยงตรงและหากลดช่วงเวลาของฟังก์ชันหน้าต่างให้น้อยลงส่งผลให้ข้อมูลช่วงความถี่สูงมีความเที่ยงตรงเช่นกัน ดังแสดงรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 การวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต

การวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตจะแสดงข้อมูลเชิงเวลาและขนาด สามารถใช้วิเคราะห์สัญญาณแบบเฉพาะที่ได้โดยเวฟเล็ตมีลักษณะพิเศษที่สำคัญคือ สมาชิกของฟังก์ชันเวฟเล็ตเป็นสัญญาณที่เกิดจากต้นแบบอันเดียวกัน และต้นแบบดังกล่าวนี้เรียกว่า เวฟเล็ตแม่ (mother wavelet) ซึ่งคลื่นเวฟเล็ตในแต่ละกลุ่มเกิดจากการปรับสเกลที่แสดงการยืดและหดของเวฟเล็ตแม่ และการเลื่อนตำแหน่งที่แสดงบนแกนเวลา ดังสมการที่ (2.17)

$$\Psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.17)$$

สัญญาณที่ผ่านกระบวนการแปลงเวฟเล็ตจะมีการแตกสัญญาณในรูปของเวฟเล็ตแม่โดยมีการปรับสเกลและตำแหน่งที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบการแปลงเวฟเล็ตทั่วไปได้ 2 ประเภทคือ การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform) และการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform) [17]

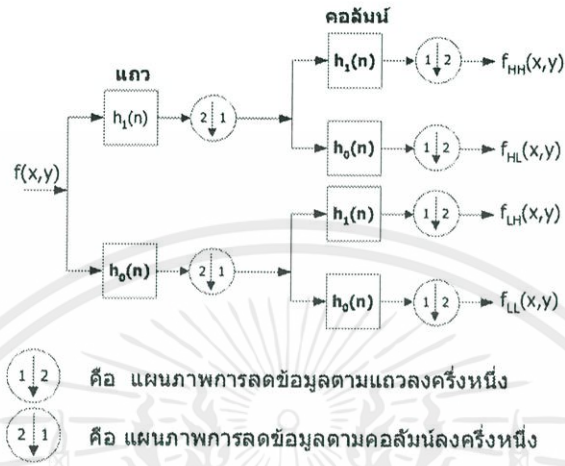
2.3.3 เทคนิควิธีการในการรักษาความคมชัดและรายละเอียดของภาพที่ทำการขยายบนพื้นฐานการดำเนินการใน Wavelet Domain

รูปแบบวิธีการในการเพิ่มความคมชัดและรายละเอียดของภาพที่ถูกขยายผ่านการดำเนินการใน Wavelet Domain นั้นมีหลากหลายแนวคิดหรืออัลกอริทึม อย่างไรก็ตามการดำเนินการในโดเมนดังกล่าวจำเป็นต้องผ่านขั้นตอนการแปลงชุดข้อมูลจาก Spatial Domain อาศัยเทคนิคการแปลงเชิง Wavelet ซึ่งมีหลายรูปแบบด้วยกัน โดยรูปแบบของการแปลงที่คณะผู้จัดทำได้ศึกษาคือเทคนิค Discrete Wavelet Transform (DWT) และเทคนิค Complex Wavelet Transform (CWT)

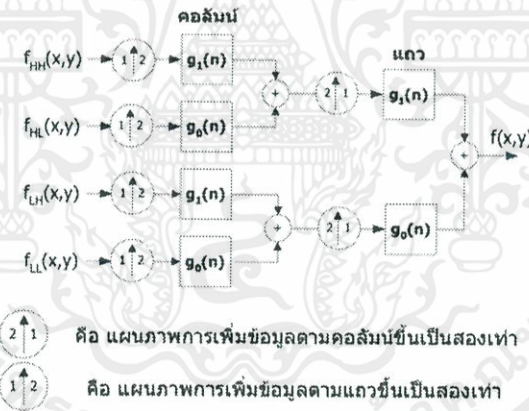
2.3.3.1 การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform: DWT)

การแปลงเวฟเล็ตของข้อมูลภาพ เป็นการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องแบบ 2 มิติ ใช้หลักการแยกองค์ประกอบเป็นแบนด์ย่อย (Subband Decomposition) โดยมีวิธีแยกองค์ประกอบด้วยเวฟเล็ต (Wavelet Decomposition) ดังรูปที่ 2.26 กำหนดให้ $f(x, y)$ คือภาพต้นแบบ $f_{LL}(x, y)$, $f_{LH}(x, y)$, $f_{HL}(x, y)$ และ $f_{HH}(x, y)$ คือสัมประสิทธิ์เวฟเล็ต $h_0(n)$ และ $h_1(n)$ คือสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ตของการแยกองค์ประกอบ (ตัวฟิลเตอร์ที่กรองความถี่ต่ำและสูงตามลำดับ) และมีวิธีสร้างกลับจากองค์ประกอบด้วยเวฟเล็ต (Wavelet

Reconstruction) เป็นดังรูปที่ 2.27 กำหนดให้ $g_0(n)$ และ $g_1(n)$ คือสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ตของการสร้างกลับจากองค์ประกอบ (ตัวฟิลเตอร์ที่กรองความถี่ต่ำและสูงตามลำดับ) [18]



รูปที่ 2.26 การแยกองค์ประกอบด้วยเวฟเล็ต



รูปที่ 2.27 การสร้างกลับจากองค์ประกอบด้วยเวฟเล็ต

2.3.3.2 การแปลงเวฟเล็ตเชิงซ้อน (Complex Wavelet Transform: CWT)

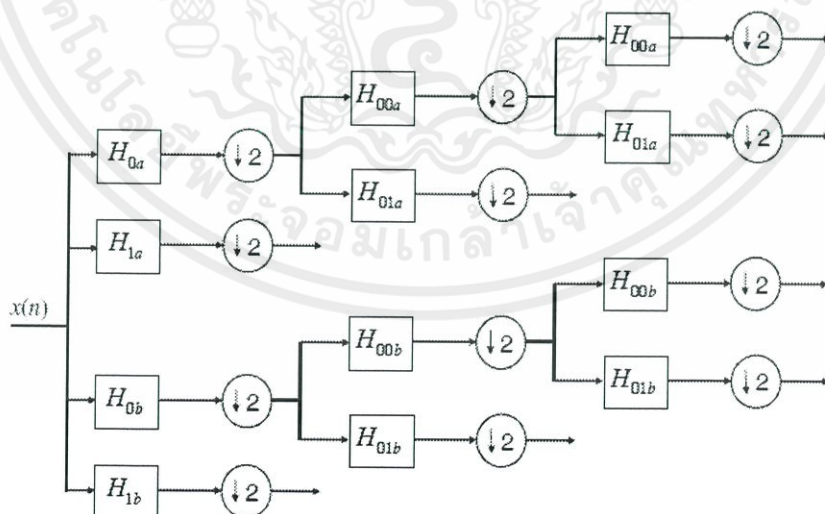
การแปลงเวฟเล็ตเชิงซ้อนหรือ Complex Wavelet Transform (CWT) นั้นเป็นกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งสัญญาณและรูปภาพที่มีคุณสมบัติในเรื่องของการกู้คืน (Reconstruction) ลักษณะของสัญญาณหรือรูปภาพที่ดี เพียงแต่อาจไม่เป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายนักในการประมวลผลรูปภาพเชิงดิจิทัลเนื่องจากความยุ่งยากและซับซ้อนของ

การออกแบบและสร้างตัวกรองเชิงซ้อนที่จำเป็นต่อระบบ ในการลดปัญหาเรื่องของการความซับซ้อนในการออกแบบระบบที่มีความเป็นเชิงซ้อนดังกล่าวจึงได้มีการนำเสนอแนวคิดเรื่องของการประยุกต์ใช้ CWT ในรูปแบบของ dual-tree ซึ่งใช้แขนงการประมวลผลผ่านตัวกรองเชิงซ้อนจำนวนจริงจำนวน 2 แขนงในการคำนวณส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตขึ้นมา จากรูปที่ 2.28 แสดงถึงแขนงในการแปลงเวฟเล็ตสำหรับสัญญาณ 1 มิติ โดยผลที่ได้ นั่นคือความสามารถในการลดองค์ประกอบการซ้อนกันของสเปกตรัม (Aliasing) จึงส่งผลให้ระบบมีความไม่แปรเปลี่ยนต่อการเลื่อนสัญญาณในโดเมนเวลา (Shift Invariance) อย่างไรก็ตามปัญหาที่เกิดขึ้นจากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยหรือ Discrete Wavelet Transform (DWT) มีดังนี้

1) ความแปรเปลี่ยนต่อการเลื่อนสัญญาณ เกิดจากการลดจำนวนหน่วยสัญญาณ (Downsampling) ที่ระดับต่างๆ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างสิ้นเชิงถึงแม้ว่าสัญญาณที่เข้าของระบบมีการเลื่อนไปเล็กน้อยก็ตาม

2) ไม่มีความหลากหลายเชิงทิศทาง (Directional Selectivity) เนื่องจากตัวกรองของ DWT นั้นถูกสร้างบนพื้นฐานของจำนวนจริง จึงไม่สามารถกำหนดผลลัพธ์ในแนวทแยงได้

จากปัญหาข้างต้นจึงมีการนำหลักการของ DWT นั้นมาประยุกต์สร้างเป็นการแปลงเวฟเล็ตเต็มหน่วยแบบเชิงซ้อนหรือ Complex Discrete Wavelet Transform (CDWT) ในการลดและป้องกันปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าว



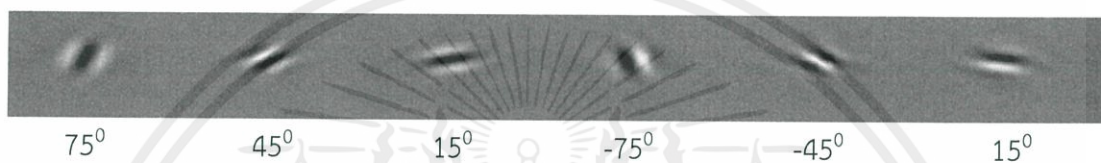
รูปที่ 2.28 Dual-tree เชิงซ้อน

หลักการของการแปลงเวฟเล็ดเต็มหน่วยแบบเชิงซ้อนและการนำ Dual Tree มาใช้งาน ระบบของการแปลงเวฟเล็ดเชิงซ้อน (CWT) ในรูปแบบของ dual-tree นั้นจะประกอบด้วยชุดตัวกรองเวฟเล็ด 2 ชุดที่ต่อขนานกันด้วยค่าหน่วยเวลาที่ต่างกันซึ่งจะลดการเกิดขึ้นของปรากฏการณ์การซ้อนกันของสเปกตรัม (Aliasing) ที่เกิดจากการลดจำนวนหน่วยสัญญาณ (Downsampling) สำหรับระบบของการแปลงเวฟเล็ดเต็มหน่วยแบบเชิงซ้อน (CDWT) ของสัญญาณใดๆ นั้นจะใช้การแปลงของเวฟเล็ดเต็มหน่วย (DWT) มาใช้ในการออกแบบและสร้างจำนวน 2 ชุดในรูปแบบที่ต่อขนานกันดังรูปที่ 2.28 โดยผลของการแปลงจะให้สัมประสิทธิ์มากกว่าการแปลง DWT รูปแบบธรรมดาจำนวน 2 เท่า กล่าวคือสำหรับสัญญาณใดๆ จำนวน N จุด ระบบดังกล่าวจะให้ผลลัพธ์เป็นสัมประสิทธิ์เวฟเล็ดจำนวน $2N$ โดยการใส่ใจในรายละเอียดของการออกแบบตัวกรองที่แต่ละแขนงนั้นจะให้ผลของการแปลงที่สำคัญในเรื่องของระบบแบบ dual-tree ดังนั้นในแขนงแรกนั้นจะกำหนดให้ผลของการแปลงเหมือนกับเป็นส่วนจำนวนจริงของการแปลงเวฟเล็ดเชิงซ้อน และในอีกแขนงหนึ่งนั้นจะกำหนดให้เป็นส่วนจำนวนจินตภาพของการแปลงเวฟเล็ดเชิงซ้อน ในการออกแบบด้วยแนวคิดดังกล่าวผลที่ได้คือระบบที่มีความใกล้เคียงกับระบบ Shift Invariant ซึ่งเป็นหนึ่งในปัญหาที่พบเจอได้ในการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยปกติ

เมื่อนำหลักการในการออกแบบและสร้างตัวกรองบนพื้นฐานของความเป็น Shift Invariant มาวางรูปแบบของระบบในลักษณะที่มีการนำชุดตัวกรอง 2 ชุด ทำการต่อขนานกันและนำเอาต์พุตของแต่ละชุดตัวกรองมารวมกัน ดังรูปที่ 2.28 เมื่อ a คือชุดตัวกรองดั้งเดิมและ b คือชุดตัวกรองเพิ่มเติมและตัวกรองแบบต่ำผ่านหรือ Low-pass filter จะถูกกำหนดตัวตัวแปร $H_0(z)$ และตัวกรองแบบสูงผ่านหรือ High-pass filter จะถูกกำหนดด้วยตัวแปร $H_1(z)$

ในการนำรูปแบบกระบวนการประมวลผลของระบบในลักษณะของ dual-tree มาประยุกต์ใช้ในสัญญาณที่มากกว่า 1 มิติ ชุดตัวกรองนั้นจะถูกใช้ในการแปลงอย่างอิสระต่อกัน สำหรับการแปลงเวฟเล็ดเชิงซ้อนของสัญญาณรูปภาพซึ่งเป็น 2 มิติ ชุดระบบ dual-tree ทั้ง 2 แขนงนั้นจะนำไปใช้ในการคำนวณทั้งข้อมูลแถวและข้อมูลหลักของรูปภาพ ซึ่งผลที่ได้คือช่วงสัญญาณย่อยเชิงซ้อน (Complex Subband) ของข้อมูลสัญญาณความถี่สูงจำนวน 6 ช่วงและช่วงสัญญาณย่อยเชิงซ้อนของข้อมูลสัญญาณความถี่ต่ำจำนวน 2 ช่วงสำหรับแต่ละขั้นของการแปลงเวฟเล็ดเชิงซ้อน โดยจะให้ความแตกต่างกับกรณีของการแปลงสัญญาณ 2 มิติบนพื้นฐานของความเป็นจำนวนจริง (Real 2D Transform) ซึ่งจะให้ผลเป็นช่วงสัญญาณย่อยเชิงจำนวนจริง

(Real Subband) ของข้อมูลสัญญาณความถี่สูงจำนวน 3 ช่วงและช่วงสัญญาณย่อยเชิงจำนวนจริงของข้อมูลสัญญาณความถี่ต่ำจำนวน 1 ช่วง จากการวิเคราะห์ ณ จุดนี้จะเห็นได้ว่าการแปลงเวฟเลตเชิงซ้อนจะให้ผลในรูปแบบของอัตราส่วนความจำเป็นของสัมประสิทธิ์ที่ 4: 1 หรือ 2^m : 1 เมื่อ m คือจำนวนมิติของสัญญาณข้อมูล ในลักษณะข้อมูลเชิงมุม ผลขององค์ประกอบความถี่สูงสำหรับการแปลงสัญญาณ 2 มิติบนพื้นฐานของความเป็นจำนวนจริง (Real 2D Transform) จะมีค่าผลลัพธ์เชิงมุม 3 ค่าได้แก่ 0° , 45° และ 90° ในขณะที่ค่าผลลัพธ์เชิงมุมขององค์ประกอบความถี่สูงจากการแปลงเวฟเลตเชิงซ้อนจะมีถึง 6 ค่าได้แก่ $\pm 15^\circ$, $\pm 45^\circ$ และ $\pm 75^\circ$ ดังรูปที่ 2.29

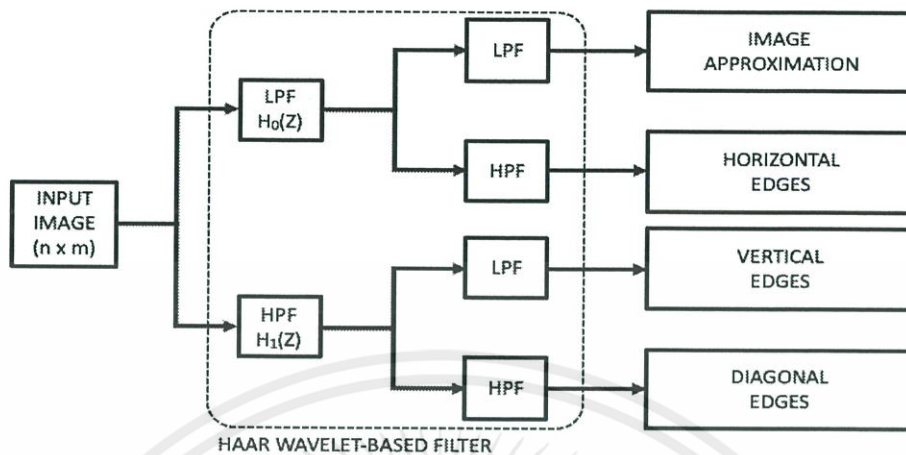


รูปที่ 2.29 ผลตอบสนองเชิงมุมของตัวกรองเชิงซ้อนจากการแปลงเวฟเลตเชิงซ้อน

รายละเอียดของการประยุกต์ใช้งานหลักการของการแปลงเวฟเลตเชิงซ้อนในลักษณะของ dual-tree ข้างต้นนั้นจะถูกนำไปขยายความในเชิงรายละเอียดในหัวข้อของการรักษารายละเอียดและความคมชัดของภาพบนพื้นฐานของการดำเนินงานในโดเมนเวฟเลตต่อไปในปริภูมิตฤษฎีฉบับนี้ [19]

ในการแปลงค่าชุดข้อมูลโดยใช้เทคนิค DWT นั้นผลลัพธ์ที่ได้คือรูปภาพย่อยขนาดครึ่งหนึ่งประกอบขึ้นจากชุดค่าสัมประสิทธิ์เวฟเลตจำนวนจริงในช่วงแบนด์ความถี่สูง 3 ชุด (HH, HL, LH) และในช่วงแบนด์ความถี่ต่ำ 1 ชุด (LL)

เทคนิคในการรักษาความคมชัดและรายละเอียดของภาพบน Wavelet Domain โดยเทคนิค DWT ดังรูปที่ 2.30 นั้นจะทำการขยายรูปภาพในแบนด์ความถี่สูงและภาพต้นฉบับด้วยวิธีการ Bicubic Interpolation ด้วยค่า Interpolation factor (α) เป็น α และ $\alpha/2$ ตามลำดับและในขั้นสุดท้ายทำการรวมรูปภาพองค์ประกอบความถี่สูงทั้ง 6 ชุดและรูปต้นฉบับความละเอียดต่ำที่ผ่านกระบวนการ Interpolation แล้วเข้าด้วยกันได้เป็นรูปที่มีการรักษาความละเอียดของภาพต้นฉบับหลังจากการขยาย [20]

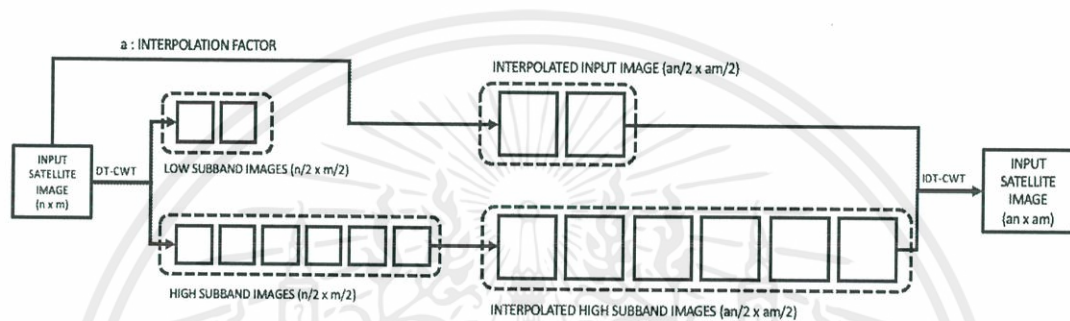


รูปที่ 2.30 แผนภาพแสดงการทำงานของเทคนิคในการรักษาความละเอียดของภาพที่ขยายแล้วด้วยวิธีการ DWT

สำหรับในกรณีของการแปลงค่าชุดข้อมูลโดยใช้เทคนิค CWT นั้นผลลัพธ์ที่ได้คือรูปภาพย่อยขนาดครึ่งหนึ่งประกอบขึ้นจากชุดค่าสัมประสิทธิ์เชิงซ้อนของรูปภาพองค์ประกอบความถี่ต่ำ 2 ชุดและชุดค่าสัมประสิทธิ์เชิงซ้อนของรูปภาพองค์ประกอบความถี่สูง 6 ชุด ซึ่ง ณ จุดนี้จะสังเกตเห็นว่าการแปลงรูปภาพต้นฉบับด้วยวิธี CWT นั้นจะให้ภาพย่อยในแบนด์ความถี่สูงที่จำนวนมากกว่ากรณีการแปลงด้วย DWT นั้นหมายความว่า การรักษาความคมชัดหรือองค์ประกอบเชิงขอบ (Edge Component) นั้นสามารถทำได้ดีกว่า นอกจากนี้จากคุณสมบัติความเป็น Discrete Pixel ของผลลัพธ์ที่ได้จากเทคนิค DWT จะส่งผลให้ระบบนั้นเป็นระบบ Shift-varying กล่าวคือผลลัพธ์ของค่าหลังจากการ Interpolation จะมีค่าที่ต่างไปจากเดิมเมื่อทำการเลื่อนพิกเซลของภาพต้นฉบับ อย่างไรก็ตามจากผลการวิจัยที่คณะผู้จัดทำได้ศึกษามาส่งผลให้ทางคณะผู้จัดทำเลือกใช้วิธีการรักษาความคมชัดโดยใช้เทคนิค DT-CWT ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เทคนิคในการรักษาความคมชัดและรายละเอียดของภาพบน Wavelet Domain ที่ทางคณะผู้จัดทำได้ศึกษานั้นคือเทคนิค Dual-tree Complex Wavelet Transform หรือ DT-CWT ในการแบ่งย่อยรูปต้นฉบับความละเอียดต่ำออกเป็นช่วงความถี่ย่อยๆ จากนั้นทำการขยายรูปภาพองค์ประกอบความถี่สูงทั้ง 6 ชุดและรูปต้นฉบับความละเอียดต่ำด้วยวิธีการ Bicubic Interpolation ด้วยค่า Interpolation factor (α) เป็น α และ $\alpha/2$ ตามลำดับเช่นกัน และในขั้นสุดท้ายทำการรวมรูปภาพองค์ประกอบความถี่สูงทั้ง 6 ชุดและรูปต้นฉบับความละเอียดต่ำที่ผ่าน

กระบวนการ Interpolation แล้วเข้าด้วยกันโดยการแทนค่าของรูปภาพต้นฉบับที่ทำการ Interpolate เข้าไปในส่วนของชุดค่าสัมประสิทธิ์เชิงซ้อนของรูปภาพองค์ประกอบความถี่ต่ำ และใช้การแปลงย้อนกลับของ Inverse Dual-tree Complex Wavelet Transform แล้วผลลัพธ์ที่ได้คือรูปภาพความละเอียดที่สูงขึ้นด้วยขนาดที่ใหญ่ขึ้นและวัดผลประสิทธิภาพของเทคนิคดังกล่าวด้วยค่า Peak Signal-to-Noise Ration หรือ PSNR กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.31 [21]



รูปที่ 2.31 แผนภาพแสดงการทำงานของเทคนิคในการรักษาความละเอียดของภาพที่ขยายแล้วด้วยวิธีการ DT-CWT

2.4 การเข้ารหัสลับ - การถอดรหัสลับแบบเคออดิกบนพื้นฐานของวงจกรองสัญญาณดิจิทัล

การเข้ารหัสลับ - ถอดรหัสลับข้อความใช้การเข้ารหัสลับแบบเคออดิก (Chaotic Cryptography) เพราะเป็นการเข้ารหัสแบบ Light Weight Engine มีการประมวลผลที่ไม่ซับซ้อน จึงเลือกใช้เพื่อสร้างชุดคำสั่งการเข้ารหัสลับ - ถอดรหัสลับ ในซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดิน (Software Ground Station) และนำไปฝังที่หน่วยประมวลผลของบอร์ดจัดการข้อมูลกลาง (OBDD) บนแบบจำลองวิศวกรรมดาวเทียม EM - 3 ซึ่งสถานีภาคพื้นดินและดาวเทียมคิวบแซทจะสามารถเข้ารหัสลับและถอดรหัสลับข้อมูลประเภทข้อความได้

2.4.1 ทฤษฎีเคออส (Chaos Theory)

ทฤษฎีเคออสเป็นทฤษฎีที่อธิบายถึงลักษณะพฤติกรรมของระบบพลวัต (ระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป) โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของระบบที่เรียกว่าเคออสติกนี้จะมีลักษณะที่ปั่นป่วนจนดูเหมือนสุ่มหรือไร้ระเบียบ (Random/Stochastic) แต่ระบบเคออสติกนี้เป็นระบบที่มีระเบียบ (Deterministic) ซึ่งในทางคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ให้คำจำกัดความของระบบเคออสติกว่าเป็นระบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear System) ประเภทหนึ่งที่มีความไวต่อค่าเงื่อนไขเริ่มต้นสูง เปรียบได้ประโยคที่ว่า “เต็ดดอกไม้สะเทือกถึงดวงดาว” หรือ “ผีเสื้อขยับปีกทำให้เกิดพายุ” (จาก “Butterfly Effect”) จึงมีคนจำนวนไม่น้อยที่ตีค่าพุดนี้ในลักษณะของขนาดความรุนแรงของผลลัพธ์เท่านั้น ซึ่งในความจริงแล้วระบบเคออสติกไม่จำเป็นต้องแตกต่างกันในแง่ขนาดของผลลัพธ์เสมอไป แต่อาจจะแตกต่างกันในแง่ของพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงก็ได้ ตัวอย่างเช่น ถ้ามีระบบอยู่สองระบบแล้วกำหนดให้ค่าเงื่อนไขเริ่มต้นต่างกันเพียงเล็กน้อย การเปลี่ยนแปลงของระบบทั้งสองนั้นจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันมากในขณะเริ่มต้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปการเปลี่ยนแปลงนั้นแทบจะเรียกได้ว่าไม่มีอะไรที่เหมือนกันเลย [22]

2.4.1.1 คุณลักษณะของเคออส

1) มีคุณสมบัติแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non - linearity) ระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้นผลลัพธ์ของระบบทั้งหมดจะไม่เท่ากับผลรวมของผลลัพธ์ของระบบย่อยๆ รวมกัน แต่จะมีข้อระวังก็คือ การที่กล่าววาระบบเคออสติกทุกระบบจะต้องเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้นไม่ได้หมายความว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นทุกระบบจะเป็นระบบเคออสติกเสมอไป

2) ไม่ใช่ระบบที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม คือมีสมการอธิบาย (Deterministic) คือเป็นระบบที่สามารถกำหนดได้หรือกล่าวอีกแบบหนึ่งก็คือในระบบเคออสติกนั้นพฤติกรรมทั้งหลายจะเกิดขึ้นภายใต้กฎเกณฑ์ที่แน่นอน ดังนั้นเหตุการณ์ที่ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าได้อย่างเช่น การทอดลูกเต๋า จึงไม่ใช่ความเป็นเคออสแต่เป็นการสุ่ม เพื่อป้องกันการเข้าใจผิดว่าระบบเคออสติกเป็นระบบแบบสุ่มจึงมีการเรียกระบบเคออสติกว่า Deterministic Chaotic

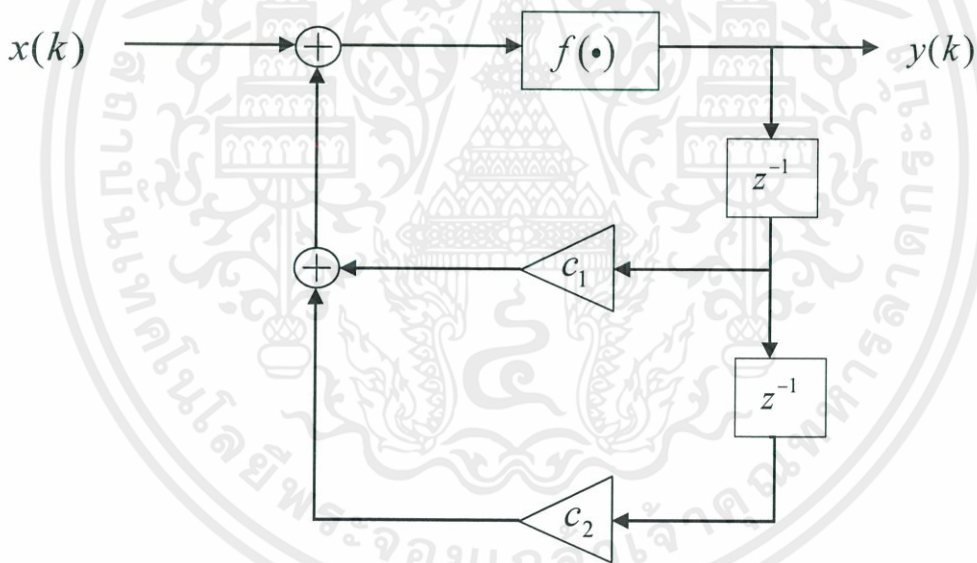
3) ไวต่อค่าเงื่อนไขเริ่มต้น (Sensitivity to initial conditions) ฟังก์ชันการเริ่มต้นที่เงื่อนไขต่างกันเพียงเล็กน้อยก็อาจจะทำให้ผลลัพธ์ของระบบในตอนสุดท้ายต่างกันอย่างมาก ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ระบบเคออสติกมีความไวต่อเงื่อนไขเริ่มต้นนั้นก็เพราะว่าความแตกต่างของผลลัพธ์จะถูกขยายให้เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วในระดับยกกำลัง (Exponential) ของเวลา

4) ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าในระยะยาวได้ (Long-term prediction is impossible) เป็นผลสืบเนื่องจากความไวต่อค่าเงื่อนไขเริ่มต้น เพราะการที่ระบบไวต่อค่าเงื่อนไขเริ่มต้นนั้นจะทำให้เราไม่สามารถรู้ว่าจะระบบที่เราสนใจอยู่นั้นจะเป็นอย่างไรในระยะยาว แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติข้อนี้ไม่ได้หมายความว่าการทำงานระยะสั้น (Short-term prediction) ของระบบแบบเคออดิกจะเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ [22]

2.4.2 ออกแบบวงจรเข้ารหัสลับ – วงจรถอดรหัสลับเคออดิก

2.4.2.1 การทำงานของวงจรเข้ารหัสแบบวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลอันดับสอง (2^{nd} order filter)

วงจรการเข้ารหัสเป็นแบบวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลอันดับสองชนิดอิมพัลส์ไม่จำกัด (Infinite Impulse Response Second Order Filter : IIR 2^{nd} order filter) โดยมีโครงสร้างแบบโดยตรง (Direct form) [22] ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 โครงสร้างของวงจรเข้ารหัสแบบ IIR 2^{nd} order filter

ซึ่งหากยังไม่พิจารณาถึงฟังก์ชัน $f(\bullet)$ สามารถเขียนเป็นสมการสืบเนื่อง (Difference equation) ในรูปแบบของสมการป้อนกลับ (Recursive equation) ดังสมการที่ (2.18)

$$y(k) = x(k) + c_1 y(k-1) + c_2 y(k-2) \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.18) สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ได้ดังสมการที่ (2.19)

$$Y(z) = X(z) + c_1 Y(z) z^{-1} + c_2 Y(z) z^{-2}$$

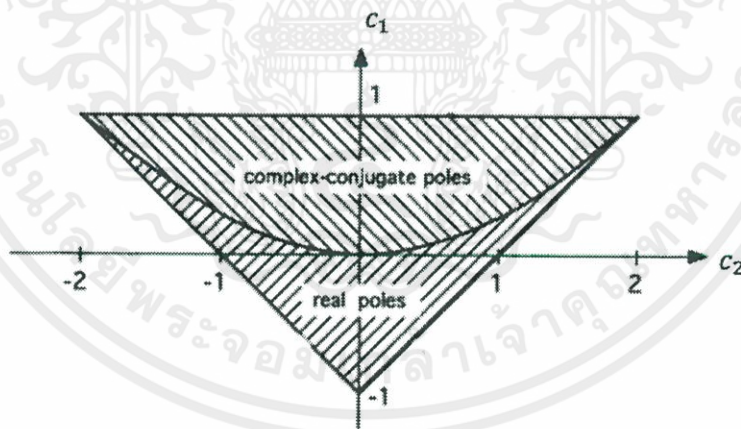
$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{(1 - c_1 z^{-1} - c_2 z^{-2})} \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.19) จะเห็นได้ว่ามีตำแหน่งของโพล (Pole) อยู่ 2 ตัวซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2.20) และ (2.21)

$$p_1 = \frac{c_1 + \sqrt{c_1^2 + 4c_2}}{2} \quad (2.20)$$

$$p_2 = \frac{c_1 - \sqrt{c_1^2 + 4c_2}}{2} \quad (2.21)$$

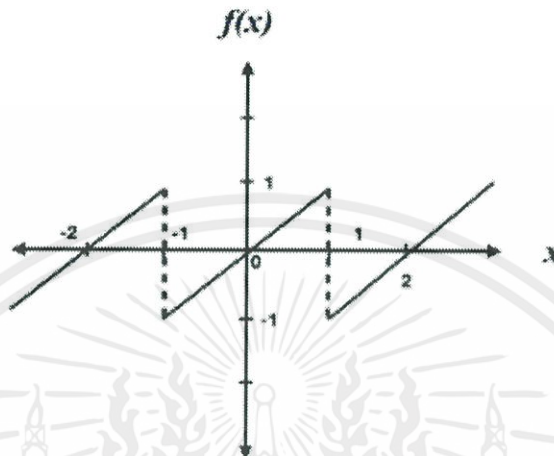
จากเงื่อนไขของการทำให้ระบบไม่เสถียรภาพ จะต้องมามีค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณดิจิทัลอย่างน้อย 1 ตัว อยู่ภายนอกขอบเขตพื้นที่สามเหลี่ยมเสถียรภาพ ดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 ขอบเขตสามเหลี่ยมเสถียรภาพ

เมื่อกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์อย่างน้อยหนึ่งตัวอยู่นอกขอบเขตพื้นที่สามเหลี่ยมเสถียรภาพแล้วจะทำให้วงจรเข้ารหัสซึ่งเป็นแบบอิมพัลส์ไม่จำกัดเกิดตำแหน่งของโพลอยู่นอกขอบเขตพื้นที่วงกลมหนึ่งหน่วย (Unit circle) ซึ่งทำให้วงจรไม่มีความเสถียรภาพ

ทำให้ค่าที่ได้จากวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากนั้นจะใช้ฟังก์ชัน $f(\bullet)$ เพื่อทำให้เกิดการล้น โดยฟังก์ชัน $f(\bullet)$ จะมีคุณลักษณะ (Characteristic) ดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 คุณลักษณะของฟังก์ชัน $f(\bullet)$

การจำลองการทำงานเพื่อจำลองการล้นของข้อมูล โดยฟังก์ชันของ $f(\bullet)$ จะมีสมการดังสมการที่ (2.22)

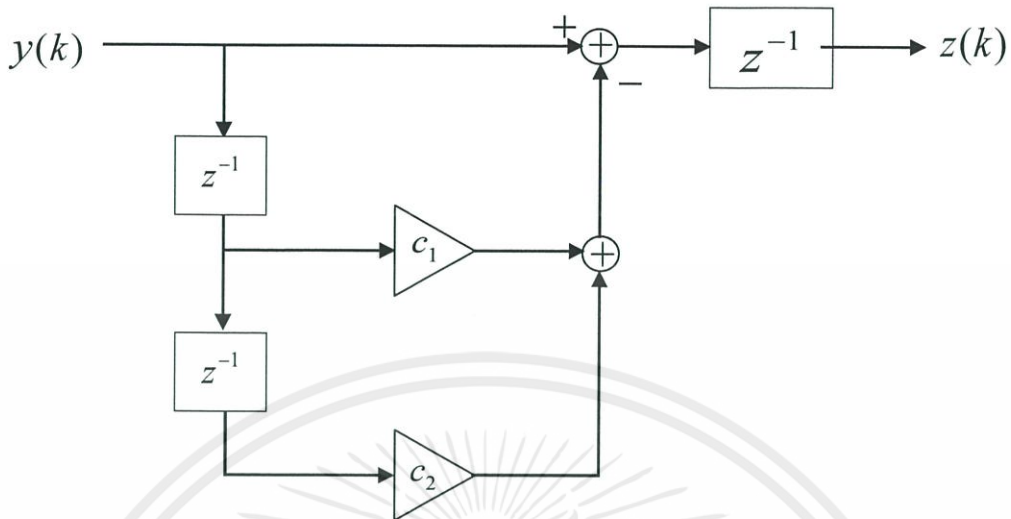
$$f(x) = [(x+1) \bmod 2] - 1 \quad (2.22)$$

ดังนั้น สมการผลต่างสี่บเนืองของวงจรถ่ายรหัสเมื่อพิจารณาถึงฟังก์ชัน $f(\bullet)$ แสดงดังสมการที่ (2.23)

$$y(k) = f\{x(k) + c_1 y(k-1) + c_2 y(k-2)\} \quad (2.23)$$

2.4.2.2 การทำงานของวงจรถ่ายรหัสแบบวงจรถ่ายรหัสสัญญาณดิจิทัลอันดับสอง (2^{nd} order filter)

วงจรถ่ายรหัสเป็นแบบวงจรถ่ายรหัสสัญญาณดิจิทัลอันดับสองชนิดอิมพัลส์จำกัด (Finite Impulse Response Second Order Filter : FIR 2^{nd} order filter) จะมีโครงสร้างที่เป็นส่วนกลับ (Inverse) ของวงจรถ่ายรหัสแบบ IIR 2^{nd} order filter [22] ดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 โครงสร้างของวงจรกรองหีสแบบ FIR 2nd order filter

ซึ่งหากยังไม่พิจารณาถึงฟังก์ชัน $f(\bullet)$ สามารถเขียนเป็นสมการสืบเนื่อง (Difference equation) ได้ดังสมการที่ (2.24)

$$z(k) = y(k) - c_1 y(k-1) - c_2 y(k-2) \quad (2.24)$$

จากสมการที่ (2.24) สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ได้ดังสมการที่ (2.25)

$$\begin{aligned} Z(z) &= Y(z) - c_1 Y(z)z^{-1} - c_2 Y(z)z^{-2} \\ H(z) &= \frac{Z(z)}{Y(z)} = 1 - c_1 z^{-1} - c_2 z^{-2} \end{aligned} \quad (2.25)$$

จากสมการที่ (2.24) จะเห็นได้ว่าไม่มีโครงสร้างแบบสมการย้อนกลับ ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลชนิดอิมพัลส์จำกัด [22] และจากสมการที่ (2.25) ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองหีสจะมีตำแหน่งซีโร (Zero) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2.26) และ (2.27)

$$z_1 = \frac{c_1 + \sqrt{c_1^2 + 4c_2}}{2} \quad (2.26)$$

$$z_2 = \frac{c_1 - \sqrt{c_1^2 + 4c_2}}{2} \quad (2.27)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรถอดรหัสจะต้องใช้ค่าเดียวกันกับวงจรถอดรหัส จึงจะสามารถหักล้างกันได้ คือ ตำแหน่งโพลของวงจรถอดรหัสจะมีค่าเท่ากับตำแหน่งซีโรของวงจรถอดรหัส ดังนั้นจึงทำให้ตำแหน่งของโพลและซีโรของวงจรถอดรหัสทั้งสองจะหักล้างกัน จึงส่งผลให้การเข้ารหัสและถอดรหัสจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมือนกันทั้งวงจรถอดรหัสและวงจรถอดรหัส [22]

2.4.3 บอร์ดจัดการข้อมูลกลาง (OBDM)

ในบอร์ดจัดการข้อมูลกลางหรือ On – Board Data Handling เป็นบอร์ดที่ทำงานหลากหลาย และเป็นบอร์ดที่ใช้ทำการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับ ทำให้ต้องมีหน่วยประมวลผลที่มีประสิทธิภาพสูง คือ ATmega2560 และกระบวนการการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับ ข้อมูลประเภทข้อความนั้นจะสร้างชุดคำสั่งโดยใช้โปรแกรมอาตูดุโน จากนั้นนำไปฝังที่บอร์ดจัดการข้อมูลกลาง เพื่อให้แบบจำลองวิศวกรรมดาวเทียมควิ็บแซทสามารถเข้ารหัสลับและถอดรหัสลับได้บนภาคพื้นดินและอวกาศ

2.4.3.1 ATmega2560

ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ CMOS ขนาด 8 บิต แบบพลังงานต่ำ ใช้สถาปัตยกรรม RISC มีหน่วยความจำขนาด 256 KB, SRAM 8KB, EEPROM 4KB และสายอินพุต/เอาต์พุตมีทั้งหมด 86 ขา อุปกรณ์นี้มีอัตราการรับส่งข้อมูล 16 MIPS ที่ 16 MHz และทำงานระหว่าง 4.5 – 5.5 โวลต์ อุปกรณ์นี้จะลดการใช้พลังงานและความเร็วในการประมวลผล [23] แสดงดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 ATmega2560

2.4.3.2 โปรแกรมอาดูโน (Arduino)

Arduino คือ Open Source Platform สำหรับการสร้างต้นแบบทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีจุดมุ่งหมายให้ Arduino Platform เป็น Platform ที่ง่ายต่อการใช้งาน โดยประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์ (Hardware) และส่วนที่เป็นซอฟต์แวร์ (Software) [24]

1) ส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์ (Hardware) เป็นบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) เป็นชิ้นส่วนหลัก ถูกนำมาประกอบร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เป็นบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน หรือเรียกว่าบอร์ด Arduino โดยบอร์ดมีความแตกต่างกันในเรื่องขนาดของบอร์ด หรือคุณสมบัติ เช่น จำนวนของขารับส่งสัญญาณ แรงดันไฟที่ใช้ และประสิทธิภาพของ MCU เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 บอร์ด Arduino ชนิดต่างๆ

2) ส่วนที่เป็นซอฟต์แวร์ (Software) เป็นระบบการการเขียนโปรแกรม หรือ IDE (Integrated Development Environment) ซึ่งจะช่วยการฝังคำสั่งลงในบอร์ด Arduino ชนิดต่างๆ และสามารถเพิ่มไลบรารี (Library) เพิ่มจากออนไลน์ ซึ่งทำให้เขียนโปรแกรมกับคอนโทรลเลอร์ชนิดอื่นๆ ได้ และภาษาที่ใช้สำหรับการเขียนโปรแกรมควบคุม Arduino IDE คือ ภาษา C/C+ เป็นเครื่องมือสำหรับเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Arduino คอมไพล์โปรแกรม (Compile) และอัปโหลดโปรแกรมลงบอร์ด (Upload) โดยแสดงดังรูปที่ 2.38

```

JPEG-ZMP_V1
#include <SoftwareSerial.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

#define SD_CS 10
#define Tx 5
#define Rx 4
SoftwareSerial tran(Rx,Tx);
void sendphoto(String);

SoftwareSerial JPG(7, 6); //Tx 7, Rx 6
int a = 0x0000; //Read Starting address
int i = 0;
int j = 0;
int k = 0;
int count = 0;
uint8_t MH, ML;
boolean EndFlag = 0;
char input;
String Status = "ok" ;
byte incomingbyte;
int picCnt = 0;

void SendResetCmd()
{
  JPG.write((byte)0x56);
  JPG.write((byte)0x00);
  JPG.write((byte)0x26);
  JPG.write((byte)0x00);
}

void SendTakePhotoCmd()

```

รูปที่ 2.38 ส่วนการเขียนโปรแกรมของ Arduino

2.5 การออกแบบซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดิน

การออกแบบและสร้างซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินในส่วนของการติดต่อสื่อสารกับดาวเทียมคิวบ์แซทในภารกิจการควบคุมการถ่ายภาพ และการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับบนสถานีภาคพื้นดินนั้นใช้โปรแกรม LabVIEW

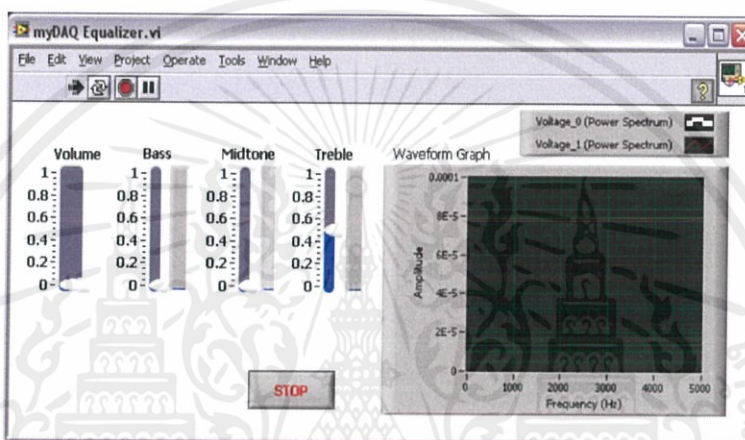
2.5.1 โปรแกรม Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW)

เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างเพื่อนำมาใช้ในด้านการจัดการวัดและเครื่องมือวัดสำหรับงานทางวิศวกรรม ซึ่งเป็นโปรแกรมประเภท GUI (Graphic User Interface) คือ ผู้ใช้พัฒนาโปรแกรมไม่จำเป็นต้องเขียน code หรือ คำสั่งใดๆ ซึ่งภาษาที่ใช้ในโปรแกรมคือภาษา G (Graphical Language) หรือภาษารูปภาพที่จะแทนการเขียนโปรแกรมเป็นภาษาพื้นฐาน เช่น C, BASIC หรือ FORTRAN ด้วยรูปภาพหรือสัญลักษณ์ทั้งหมด โดยจะช่วยอำนวยความสะดวกและสามารถลดเวลาในการเขียนโปรแกรมลงไปได้มาก โดยเฉพาะในงานเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกเช่น Port หรือ Card ต่างๆ รวมถึงการจัดวางตำแหน่งในหน่วยความจำ เพื่อที่จะสามารถรวบรวมข้อมูลมาใช้ในการคำนวณและเก็บข้อมูลให้ได้ประโยชน์สูงสุด [25]

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดย LabVIEW จะเรียกว่า Virtual Instrument (VI) ซึ่ง VI จะประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วนคือ

2.5.1.1 Front Panel

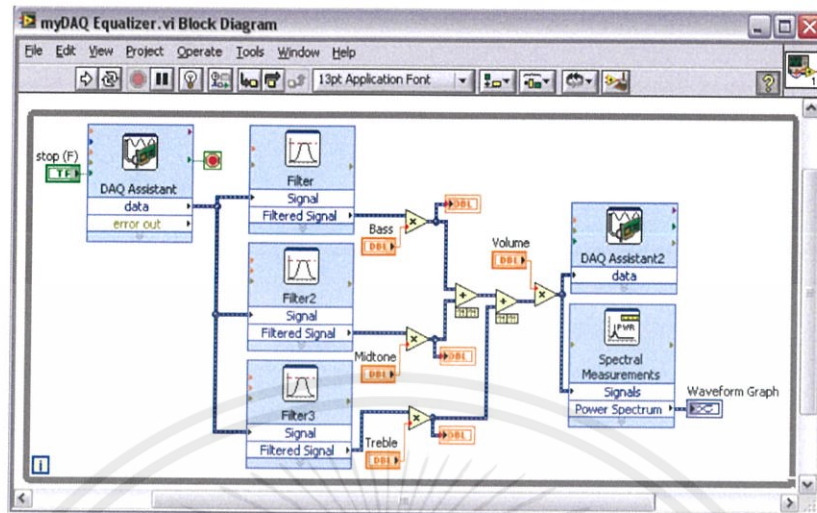
เป็นส่วนที่ใช้สื่อสารระหว่างผู้ใช้กับโปรแกรม (User Interface) มีลักษณะเหมือนหน้าต่างของเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้งานได้การวัดทั่วไป จึงเปรียบเสมือนเป็น GUI ของโปรแกรมหรือ VI ซึ่งตัวอย่าง Front Panel มีลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.39 ตัวอย่าง Front Panel ของโปรแกรม LabVIEW

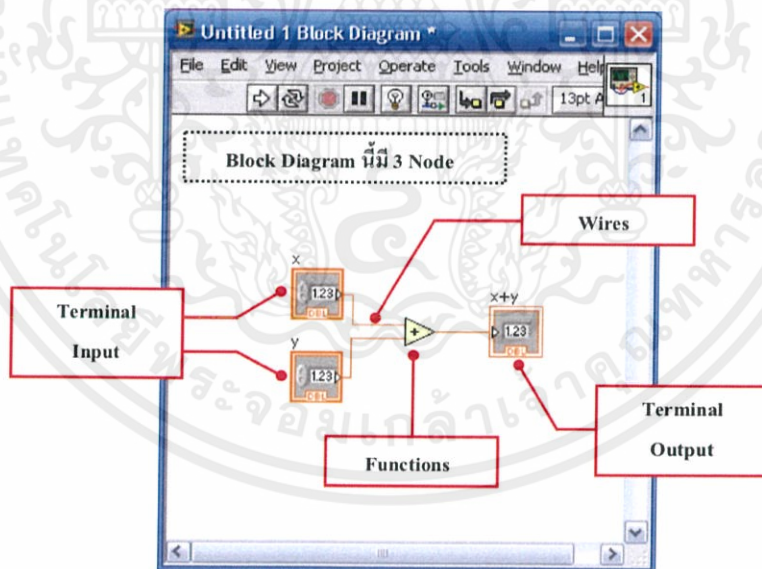
2.5.1.2 Block Diagram

เป็นเสมือนกับคำสั่งในโปรแกรม (Source Code) ที่พัฒนาขึ้นโดย LabVIEW ซึ่งอยู่ในรูปภาษา G โดย LabVIEW มีการตรวจสอบข้อผิดพลาดของโปรแกรมตลอดเวลา เมื่อเกิดข้อผิดพลาดโปรแกรมจะไม่สามารถทำงานได้โดยผู้ใช้งานสามารถดูรายละเอียดข้อผิดพลาด เพื่อให้เกิดความสะดวกต่อการเขียนโปรแกรมและตัวอย่างของ Block Diagram จะแสดงในรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.40 ตัวอย่าง Block Diagram ของ LabVIEW

สำหรับ Block Diagram จะมีส่วนที่ทำหน้าที่ส่งผ่านข้อมูล (Data Flow) และกำหนดวิธีการประมวลผลข้อมูล มี 4 ส่วนดังนี้ และแสดงอยู่ในรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.41 ตัวอย่าง Terminal, Node, Function และ Wire ใน Block Diagram

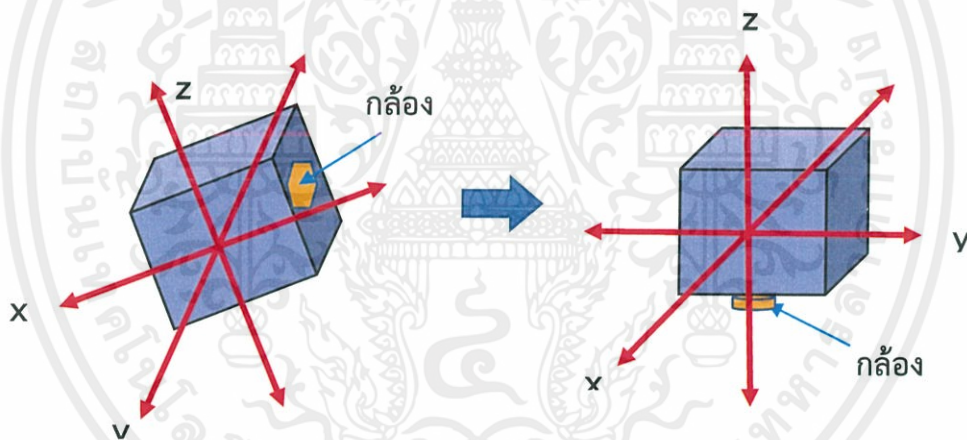
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.3 Icon และ Connector

เสมือนเป็นโปรแกรมย่อย (Procedure) ประเภทซับรูทีน (Subroutine) ในโปรแกรมทั่วไป ซึ่ง Icon จะหมายถึง Block Diagram ที่มีการย่อส่วนข้อมูลเข้าและออกผ่านทาง Connector ซึ่งใน LabVIEW จะเรียก Subroutine นี้ว่า subVI

2.6 ระบบควบคุมตำแหน่งการถ่ายภาพ (Altitude Control Unit)

การควบคุมตำแหน่งการถ่ายภาพ คือ การทำให้ดาวเทียมคิวบ์แซทที่เคลื่อนที่บนท้องฟ้าหรือในอวกาศอย่างอิสระจนหลุดไปจากแนวแกนพลิกกลับเข้ามาในแนวแกน มีจุดประสงค์เพื่อการถ่ายภาพ โดยเมื่อต้องการถ่ายภาพจะทำการควบคุมตำแหน่งของกล้องบนดาวเทียมคิวบ์แซทหันไปทางพื้นโลก เพื่อถ่ายภาพพื้นโลกตามต้องการ แสดงดังรูปที่ 2.42

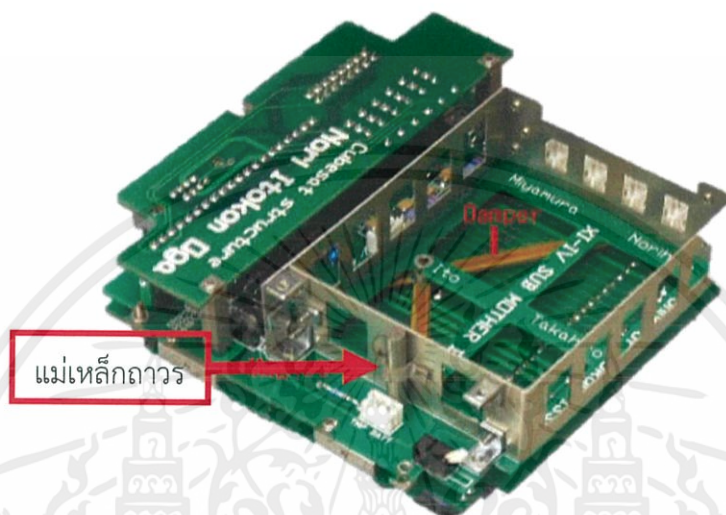


รูปที่ 2.42 การรักษาสมุมของดาวเทียมคิวบ์แซท

รูปแบบการรักษาสมุมของดาวเทียมคิวบ์แซท ขณะที่ดาวเทียมคิวบ์แซทปฏิบัติภารกิจอยู่ในอวกาศ มี 2 แบบ ได้แก่

2.6.1 การรักษาสมดุลแบบไม่ใช้พลังงาน (Passive Altitude Control)

เหมาะสำหรับดาวเทียมคิวบแซทขนาด 1U ถึง 3U เนื่องจากมีน้ำหนักเบา และมีพลังงานต่ำ เช่น แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) ดังรูปที่ 2.43 [26]



รูปที่ 2.43 แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet)

2.6.1.1 แม่เหล็กถาวร สามารถแบ่งได้หลายชนิด โดยแบ่งตามวัสดุที่ใช้ทำ
ได้ดังนี้

1) แม่เหล็กชนิดเฟอร์ไรท์ (Ferrite magnet) หรือชนิดเซรามิก (Ceramic Magnet) แม่เหล็กชนิดเฟอร์ไรท์ ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ แสดงดังรูปที่ 2.44 จะผลิตจากส่วนผสมของไอออนอ็อกไซด์และสโตรเทียม (Strontium) หรือแบเรียม (Barium) เป็นแม่เหล็กที่ราคาต่ำกว่าชนิดอื่นๆ มีน้ำหนักเบา แม่เหล็กชนิดนี้ให้ระดับพลังงานต่ำและเปราะง่าย แต่สามารถใช้งานได้ถึงจุดที่อุณหภูมิสัมพัทธ์สูงๆ ให้ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กสูงกว่าแบบอัลนิโค แต่อ่อนกว่านีโอดีเมียมและแบบโซมาเรียมโคบอลต์ และต้านทานการกัดกร่อนดี ใช้งานในช่วงอุณหภูมิ -40 ถึง 250 องศาเซลเซียส แม่เหล็กชนิดนี้ประยุกต์ใช้งานกับระบบรถยนต์ มอเตอร์อุตสาหกรรมและมอเตอร์ในเครื่องใช้ต่างๆ และในลำโพง เป็นต้น [27]



รูปที่ 2.44 แม่เหล็กชนิดเฟอร์ไรท์

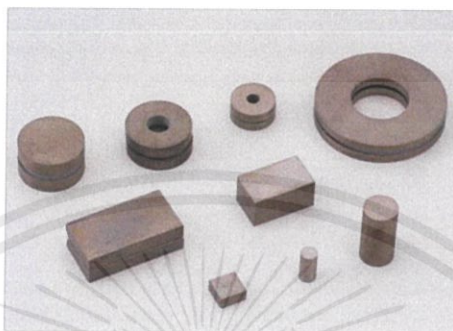
2) แม่เหล็กนีโอไดเมียม (Neodymium Magnet) ประกอบด้วยแร่ธาตุ 3 ชนิด คือ นีโอไดเมียม (Neodymium) เหล็ก (Iron) และ โบรอน (Boron) รวมกันเป็น NdFeB มีลักษณะวาวหายาก เมื่อสัมผัสกับอากาศสีจะหมองเพราะเกิดสนิม เป็นแม่เหล็กถาวรที่มีกำลังมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 2.45 แม่เหล็กที่ผลิตจากนีโอไดเมียมจะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กต่อผิวสูงที่สุด ต้องระมัดระวังในการใช้งาน สามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 60 ถึง 180 องศาเซลเซียส หากได้รับอุณหภูมิที่สูงกว่านี้อาจเกิดสนิมและทำให้แม่เหล็กสูญเสียอำนาจแม่เหล็ก แม่เหล็กชนิดนี้ใช้งานในมอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องมือวัดและมิเตอร์ ระบบเสียงในงานอุตสาหกรรม อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และผลิตภัณฑ์ที่ใช้เพื่อรักษาสุขภาพ เป็นต้น [27]



รูปที่ 2.45 แม่เหล็กชนิดนีโอไดเมียม

3) แม่เหล็กชนิดซามาเรียมโคบอลต์ (Samarium Cobalt Magnet) แม่เหล็กซามาเรียมโคบอลต์มีส่วนประกอบของโคบอลต์และซามาเรียมซึ่งเป็นแร่ธาตุที่หายากเช่นเดียวกับแม่เหล็กนีโอไดเมียม แสดงดังรูปที่ 2.46 ซึ่งแม่เหล็กซามาเรียมโคบอลต์มีคุณสมบัติเฉพาะของแม่เหล็กที่เหนือกว่าแม่เหล็กนีโอไดเมียมคือ สามารถทนต่ออุณหภูมิที่สูงได้ดีกว่าแม่เหล็กนีโอไดเมียม ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และเป็นสนิมได้ยากกว่า อย่างไรก็ตาม

แม่เหล็กขามาเรียมโคบอลต์ก็ยังมีข้อเสียคือเป็นแม่เหล็กที่มีความแข็งแต่เปราะ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องระมัดระวังในการใช้งาน มีการนำมาใช้งานในด้านต่างๆ เช่น เซนเซอร์ อุปกรณ์เครื่องมือแพทย์ เป็นต้น [27]



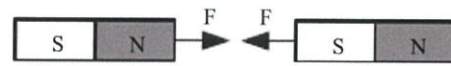
รูปที่ 2.46 แม่เหล็กชนิดขามาเรียมโคบอลต์

4) แม่เหล็กชนิดอัลนิโก (Alnico Magnet) เป็นแม่เหล็กที่ถูกผลิตเพื่อให้สามารถทำงานกับอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า ให้ความเสถียรภาพต่อการปฏิบัติที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้อย่างยอดเยี่ยม แต่ระดับพลังงานจะต่ำกว่าชนิดอื่นๆ มีราคาปานกลาง มีความแข็งแต่เปราะ และอาจมีการสูญเสียอำนาจแม่เหล็กไปบางส่วนเมื่ออยู่ใกล้กับโลหะชนิดอื่น แม่เหล็กชนิดนี้ใช้งานในเครื่องจักรกลหมุน อุปกรณ์สื่อสาร มิเตอร์ เครื่องมือวัดต่างๆ เป็นต้น แสดงในรูปที่ 2.47 [27]



รูปที่ 2.47 แม่เหล็กชนิดอัลนิโก

2.6.1.2 ธรรมชาติของแม่เหล็กถาวร ขั้วแม่เหล็กจะอยู่กันเป็นคู่เสมอ คือ ขั้วเหนือกับขั้วใต้ ส่วนแรงกระทำระหว่างขั้วแม่เหล็กจะดูดกันเมื่อมีขั้วต่างกัน ผลักกันเมื่อมีขั้วเหมือนกัน แสดงดังรูปที่ 2.48 [27]



(ก)



(ข)



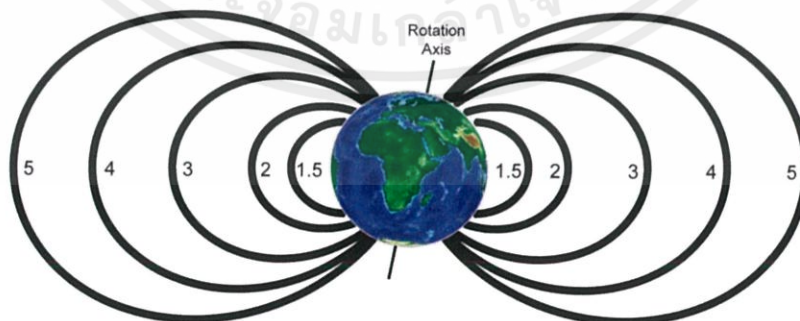
(ค)



(ง)

รูปที่ 2.48 แม่เหล็กถาวรแบบ (ก) และ (ข) ขั้วต่างกันจะดูดกัน ส่วน (ค) และ (ง) ขั้วเหมือนกันจะผลักกัน

2.6.1.3 แบบจำลองไดโพลของสนามแม่เหล็กโลกเป็นการประมาณค่าของสนามแม่เหล็กโลกที่ระดับ L-shell มีค่าไม่เกิน 3 อันเนื่องมาจากผลของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ (Interplanetary Magnetic Field) และกระแสลมสุริยะในระดับ L-shell ที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 2.49 [28]



รูปที่ 2.49 การแบ่งระดับของ L-shell ของแบบจำลองไดโพลสนามแม่เหล็กโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามค่าของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux) อันเกิดจากสนามแม่เหล็กโลกตามแบบจำลองไดโพลนั้นสามารถคำนวณได้จากค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กตามแนวรัศมีโลก (B_r) และตามแนวอาซิมุท (B_θ) ได้ตามสมการที่ (2.28) และ (2.29) ตามลำดับ

$$B_r = -2B_0 \left(\frac{R_E}{r} \right)^3 \cos \theta \quad (2.28)$$

$$B_\theta = -B_0 \left(\frac{R_E}{r} \right)^3 \sin \theta \quad (2.29)$$

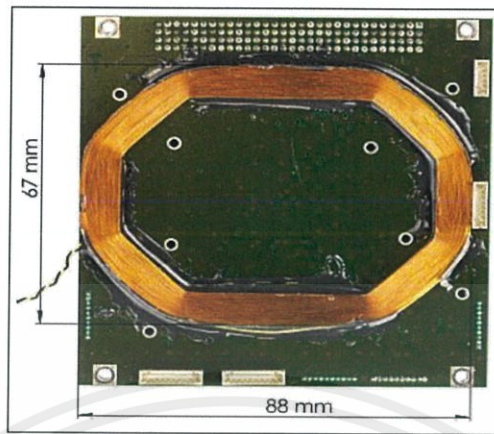
และจะได้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสุทธิได้ดังสมการที่ (2.30)

$$|B| = B_0 \left(\frac{R_E}{r} \right)^3 \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta} \quad (2.30)$$

เมื่อ B_0 คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ผิวโลก มีค่า 3.12×10^{-5} เทสลา
 R_E คือ รัศมีของโลก มีค่า 6,370 กิโลเมตร
 r คือ ระยะตำแหน่งจากจุดศูนย์กลางโลก (กิโลเมตร)
 θ คือ ค่ามุมอาซิมุทวัดจากตำแหน่งทิศเหนือ (องศา)

2.6.2 การรักษาสมดุลแบบใช้พลังงาน (Active Altitude Control)

เหมาะสำหรับดาวเทียมคิวบ์แซทขนาด 3U ขึ้นไป เนื่องจากมีน้ำหนักมาก และมีพลังงานสูง เช่น ทอร์คแม่เหล็ก (Magnetic Torque) จากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Coil) และแรงปฏิกิริยาจากล้อ (Reaction Wheel) ดังรูปที่ 2.50 และ 2.51 ตามลำดับ [26]

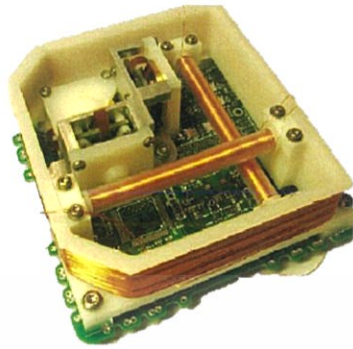


รูปที่ 2.50 ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการสร้างทอร์กแม่เหล็ก



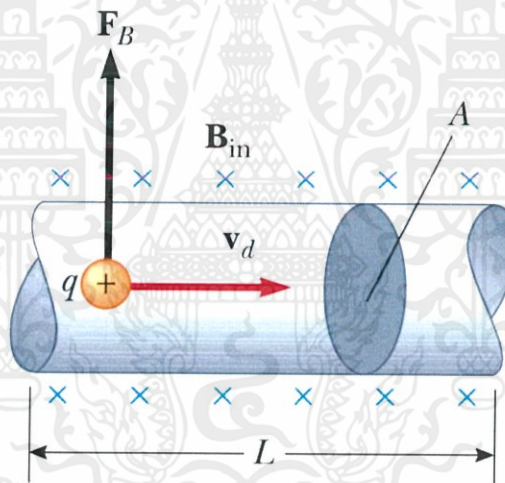
รูปที่ 2.51 อุปกรณ์สร้างแรงปฏิกิริยาจากล้อ

2.6.2.1 ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างหนึ่งที่ขดเป็นรูปเกลียว ก้นหอยหรือเกลียวสปริง โดยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าถูกใช้ในวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งจะมีปฏิสัมพันธ์กับ สนามแม่เหล็กในอุปกรณ์ เช่น ตัวเหนี่ยวนำ แม่เหล็กไฟฟ้า หม้อแปลง และขดลวดเซ็นเซอร์ กระแสไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก หรือตรงกันข้าม สนามแม่เหล็กภายนอกที่แปร ตามเวลาผ่านด้านในของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กในตัวนำ กระแสไหลในตัวนำใดๆ จะสร้าง สนามแม่เหล็กวงกลมรอบตัวนำตามกฎของแอมแปร์ ประโยชน์ของการใช้รูปทรงแบบขดม้วน คือ สามารถเพิ่มความแรงของสนามแม่เหล็ก โดยจำนวนรอบของขดลวดจะแปรผันตรงตามความแรงของ สนามแม่เหล็ก ในทางกลับกัน การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กภายนอกทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าใน ตัวนำ ตามกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ แรงดันไฟฟ้าที่ลูกเหนี่ยวนำสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้ โดยการ พันลวดให้เป็นขดเนื่องจากเส้นสนามแม่เหล็กจะตัดกับเส้นลวดหลายครั้ง ดังรูปที่ 2.52



รูปที่ 2.52 ตัวอย่างขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

2.6.2.2 สมการของแรงแม่เหล็กที่กระทำบนลวดนำกระแส ซึ่งแรงแม่เหล็กที่กระทำบนลวดนำกระแสเป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อประจุที่เคลื่อนที่ในลวดนำกระแส ดังรูปที่ 2.53



รูปที่ 2.53 แรงแม่เหล็กที่กระทำต่อประจุที่เคลื่อนที่ในลวดนำกระแส

โดยที่แรงรวมจะเท่ากับผลคูณของจำนวนประจุกับแรงกระทำต่อหนึ่งหน่วยประจุตั้งสมการที่ (2.31) และ (2.32) ตามลำดับ

$$\vec{F} = q\vec{v}_d \times \vec{B} \quad (2.31)$$

$$\vec{F} = (q\vec{v}_d \times \vec{B})nAL \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.54 จะหาค่าทอร์กได้ดังนี้

1) ด้าน (1) และ (3) ของวงจรรขนานกับสนามแม่เหล็กจึงไม่เกิดแรงแม่เหล็กกระทำต่อโครงลวดด้านดังกล่าว

2) ด้าน (2) และ (4) ซึ่งตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงคู่ควบดังสมการที่ (2.34)

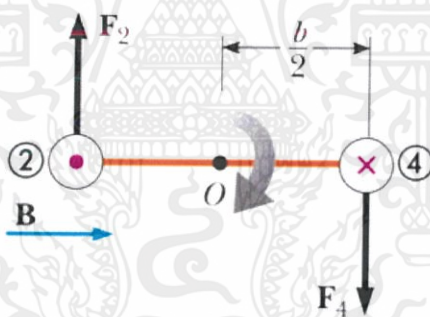
$$F_2 = F_4 = IaB \quad (2.34)$$

โดย I คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้เส้นลวด

a คือ ความยาวของขดลวด

B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก

ในที่นี้ทำการพิจารณาในด้านขนานเส้นลวดดังรูปที่ 2.55 เนื่องจากแรง F_2 และ F_4 มีทิศทางตรงกันข้ามและไม่อยู่ในแนวเดียวกัน จึงทำให้เกิดทอร์ก ซึ่งทำให้เกิดการหมุนรอบจุด O โดยค่าสูงสุดของทอร์กที่กระทำต่อวงจรร เป็นดังสมการที่ (2.35) [29]



รูปที่ 2.55 ทิศทางของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อโครงลวดนำไฟฟ้า

$$\tau_{max} = F_2 \frac{b}{2} + F_4 \frac{b}{2} = (IaB) \frac{b}{2} + (IaB) \frac{b}{2}$$

$$\tau_{max} = IabB$$

$$\tau_{max} = IAB, \quad (A = ab) \quad (2.35)$$

และในกรณีที่ระนาบของวงจรมองขนานกับสนามแม่เหล็กจะได้ตั้งสมการที่ (2.36)

$$\tau = IA \times B \quad (2.36)$$

2.6.2.4 สมการคำนวณหาจำนวนรอบในการพันขดลวดและทอร์กแม่เหล็ก

1) สมการคำนวณหาจำนวนรอบในการพันขดลวด ตามสมการที่

(2.37)

$$\bar{M} = NIA n \quad (2.37)$$

โดย

\bar{M} คือ โมเมนต์แม่เหล็ก ($A.m^2$)

N คือ จำนวนรอบในการพันขดลวด (รอบ)

i คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด

A คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด

n คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วย

2) สมการคำนวณหาทอร์กแม่เหล็ก ตามสมการที่ (2.38)

$$\tau = \bar{M} \times \bar{B} \quad (2.38)$$

โดย

τ คือ ทอร์กแม่เหล็ก ($N.m$)

\bar{M} คือ โมเมนต์แม่เหล็ก

\bar{B} คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

2.6.3 วงโคจรของดาวเทียม

การโคจรของดาวเทียมนั้นมีพื้นฐานมาจากหลักการเคลื่อนที่ของวัตถุที่มีความเร็วสูง ที่กล่าวว่าถ้าวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ประมาณ 8 กิโลเมตรต่อวินาที วัตถุจะไม่ตกลงสู่พื้นโลกและสามารถเคลื่อนที่รอบโลกได้ซึ่งดาวเทียมเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงโดยหนีแรงดึงดูดของโลกก็จะทำให้ดาวเทียมสามารถโคจรรอบโลกได้ ซึ่งวงโคจรของดาวเทียมสามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้ [30]

2.6.3.1 วงโคจรแบบสัมพันธ์กับดวงอาทิตย์ (Sun-Synchronous Orbit)

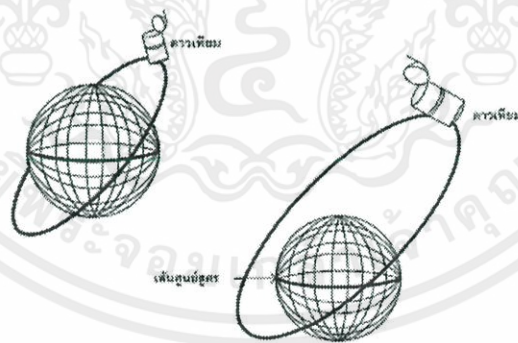
วงโคจรแบบสัมพันธ์กับดวงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะดังนี้

1) โพล่าออบิท (Polar Orbit) เป็นวงโคจรที่มีลักษณะเป็นวงกลม โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวขั้วโลก ซึ่งวงโคจรจะมีระยะความสูง 500 - 1,000 กิโลเมตร จากพื้นโลก ดังรูปที่ 2.56



รูปที่ 2.56 วงโคจรแบบโพล่าออบิทเป็นวงกลม

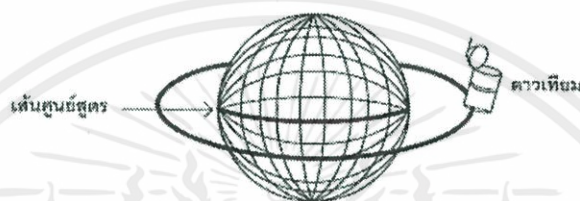
2) อินไคลออบิท (Inclined Orbit) เป็นวงโคจรที่มีลักษณะเป็นทั้งวงกลมและวงรี ซึ่งขึ้นอยู่กับความเอียงหรือมุมที่ทำกับระนาบศูนย์สูตร ซึ่งวงโคจรนี้จะมีระยะความสูง 5,000-13,000 กิโลเมตรจากพื้นโลก ดังรูปที่ 2.57



รูปที่ 2.57 วงโคจรแบบอินไคลออบิทแบบวงกลมและวงรี

2.6.3.2 วงโคจรแบบเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าโลกหมุน (Equatorial Orbit)

เป็นวงโคจรรูปวงกลมหมุนตามแนวระนาบกับเส้นศูนย์สูตร โดยเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วที่โลกหมุนรอบตัวเอง ซึ่งจะใช้เวลาในการโคจร 24 ชั่วโมงต่อรอบ ทำให้เหมือนกับว่าดาวเทียมลอยนิ่งอยู่กับที่จึงเรียกวงโคจรนี้ว่า วงโคจรค้างฟ้า ระยะความสูงของตัวดาวเทียมจากพื้นโลกมีค่าประมาณ 35,800 กิโลเมตร ดังรูปที่ 2.58



รูปที่ 2.58 วงโคจรแบบเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าโลกหมุนหรือวงโคจรค้างฟ้า

ดาวเทียมจะโคจรรอบโลกตามแนวการหมุนของโลกหรือในแนวเส้นศูนย์สูตร ซึ่งวงโคจรของดาวเทียม เมื่อแบ่งตามระยะความสูงจากพื้นโลกสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระยะ ดังนี้

1) วงโคจรระยะต่ำ (Low Earth Orbit) วงโคจรนี้อยู่สูงจากพื้นโลกไม่เกิน 1,000 กิโลเมตร ดาวเทียมที่มีวงโคจรลักษณะนี้ส่วนใหญ่จะใช้ในการสำรวจสภาวะแวดล้อมและสังเกตการณ์ ซึ่งไม่สามารถใช้งานครอบคลุมบริเวณใดบริเวณหนึ่งได้ตลอดเวลา

2) วงโคจรระยะปานกลาง (Medium Earth Orbit) วงโคจรนี้อยู่สูงจากพื้นโลกตั้งแต่ 1,000 กิโลเมตร ขึ้นไป ส่วนใหญ่จะใช้ในด้านอุตุนิยมวิทยาและใช้เพื่อติดต่อสื่อสารในบางพื้นที่

3) วงโคจรประจำที่ (Geostationary Earth Orbit) วงโคจรนี้จะอยู่สูงจากพื้นโลกประมาณ 35,800 กิโลเมตร ซึ่งเป็นเส้นทางโคจรอยู่ในแนวเส้นศูนย์สูตรดาวเทียมที่มีวงโคจรลักษณะนี้ส่วนใหญ่ใช้เพื่อการสื่อสาร

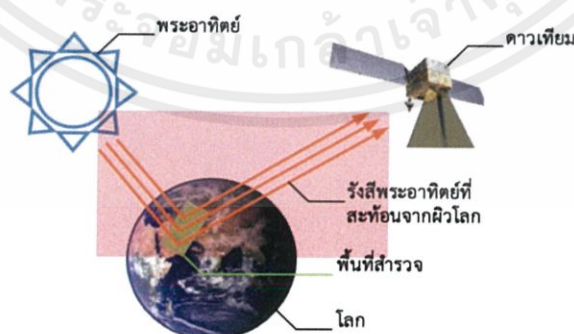
2.7 การวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณเพื่อรองรับการทำงาน Remote Sensing

การวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณหรือ Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) เพื่อรองรับการทำงาน Remote Sensing โดยประมวลผลจากภาพที่ถ่ายจาก Multispectral Camera ซึ่ง Multispectral Camera มีราคาสูงคณะผู้จัดทำจึงใช้ภาพจากดาวเทียม LANDSAT 8 ในการประมวลผลแทน ซึ่งในปัจจุบันได้มีการใช้ Multispectral Camera ร่วมกับดาวเทียมคิวบ์แซทขนาด 3 U ขึ้นไปและอากาศยานไร้คนขับหรือโดรนในการทำประยุกต์ใช้ในงาน Agriculture เพื่อเป็น Smart Farming

2.7.1 ภาพถ่ายมัลติสเปกตรัม (Multispectral Image)

2.7.1.1 การรับรู้ระยะไกลช่วงคลื่นแสง (Optical Remote Sensing)

การรับรู้ระยะไกลช่วงคลื่นแสงเป็นหนึ่งในรูปแบบของเทคโนโลยีการรับรู้ระยะไกล โดยมีหลักการ คือ แหล่งกำเนิดแสง เช่น พระอาทิตย์ เป็นต้น ทำการแผ่รังสีลงมาผ่านชั้นบรรยากาศ และส่งลงมาที่พื้นผิวโลกแล้วจึงสะท้อนขึ้นไปที่เซนเซอร์ของดาวเทียมเพื่อทำการบันทึกข้อมูล แสดงดังรูปที่ 2.59 ดังนั้นหลักการที่สำคัญของกระบวนการนี้ คือ การบันทึกค่าสะท้อนแสงของวัตถุหรือพื้นที่ที่สนใจเท่านั้นเอง ยานความยาวคลื่นของการรับรู้ระยะไกลช่วงคลื่นแสงประกอบด้วย ยานคลื่นแสง ยานคลื่นอินฟราเรดใกล้ และยานคลื่นอินฟราเรดคลื่นสั้น โดยเซนเซอร์ของแต่ละยานความยาวคลื่นจะทำหน้าที่เหมือนกัน คือ ทำการบันทึกค่ารังสีที่สะท้อนมาจากวัตถุ โดยวัตถุแต่ละชนิดจะมีคุณลักษณะที่ต่างกัน ทำให้ค่าสเปกตรัมในแต่ละความยาวคลื่นมีการดูดซับและสะท้อนที่ต่างกัน ส่งผลให้วัตถุแต่ละชนิดมีค่าสเปกตรัมการสะท้อนแสงที่แตกต่างกันจากหลักการดังกล่าวจึงทำให้สามารถแยกความแตกต่างของวัตถุแต่ละชนิดออกจากกันได้ [31]



รูปที่ 2.59 กระบวนการและองค์ประกอบการรับรู้จากระยะไกล

2.7.1.2 พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Irradiation)

พลังงานจากแสงอาทิตย์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการรับรู้ระยะไกลช่วงคลื่นแสง เนื่องจากการรับรู้ระยะไกลช่วงคลื่นแสงจะใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดแสง เพื่อทำส่งผ่านชั้นบรรยากาศแล้ว จึงทำการสะท้อนจากพื้นที่ที่สนใจเข้าเซนเซอร์ของดาวเทียม โดยลักษณะของสเปกตรัมพลังงานแสงอาทิตย์เหนือชั้นบรรยากาศสามารถวิเคราะห์จากวัตถุดำ (Back Body) [31]

2.7.1.3 ค่าลายเซ็นเชิงคลื่น (Spectral Reflectance Signature)

เมื่อพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านชั้นบรรยากาศมาตกกระทบกับวัตถุบนพื้นผิวโลก พลังงานดังกล่าวจะเกิดการตอบสนองได้ 3 รูปแบบหลัก คือ การสะท้อน (Reflection) การดูดซับ (Absorption) และการส่งผ่าน (Transmission) วัตถุต่างชนิดกันจะมีการตอบสนองของการสะท้อน การดูดซับ และการส่งผ่าน ของแต่ละความยาวคลื่นที่ไม่เหมือนกัน ดังนั้นวัตถุแต่ละชนิดจึงมีค่าสเปกตรัมการสะท้อนที่เป็นเอกลักษณ์ไม่เหมือนกัน [31]

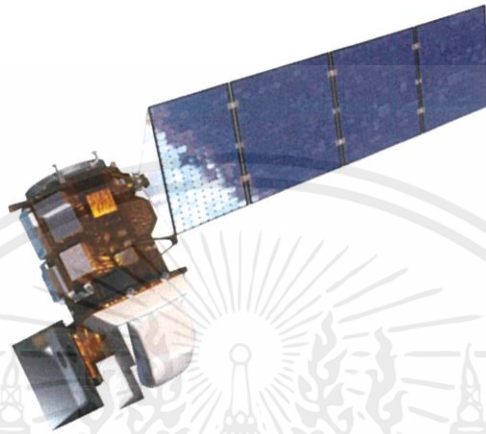
2.7.1.4 ข้อมูลภาพหลายชั้น (Multilayer Image)

ชนิดของข้อมูลภาพดิจิทัลจากการบันทึกค่าจากพื้นโลกจะมีหลายชนิด โดยแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่ต่างกัน ทำให้ผู้วิเคราะห์สามารถเข้าถึงข้อมูลที่ต่างกัน โดยข้อมูลแต่ละชนิด เมื่อนำมาวิเคราะห์รวมกันที่พื้นที่เดียวกัน ข้อมูลดังกล่าวจึงมีลักษณะเป็นชั้นข้อมูลหลายชั้น ซึ่งจะเรียกว่าข้อมูลภาพหลายชั้น โดยข้อมูลภาพหลายชั้นจะมาจากหลายเซนเซอร์ของดาวเทียมเพียงดวงเดียวหรือมาจากหลายเซนเซอร์ของดาวเทียมหลายดวง [31]

2.7.2 LANDSAT 8

ดาวเทียม LANDSAT 8 เป็นดาวเทียมสำรวจทรัพยากรธรรมชาติของประเทศสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 2.60 ได้รับการพัฒนาโดยความร่วมมือ ระหว่างองค์การ NASA และ USGS (U.S. Geological Survey) ถูกส่งขึ้นสู่วงโคจรวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2556 โคจรซ้ำตำแหน่งเดิมทุกๆ 16 วัน ความกว้างของแนวถ่ายภาพ 185 กิโลเมตร เริ่มปฏิบัติการวันที่ 30 พฤษภาคม 2556 ภายใต้การบริหารจัดการของ USGS โคจรสูงเหนือพื้นโลก 705 กิโลเมตร ติดตั้งระบบเซนเซอร์แบบ Multispectral ได้แก่ Operational Land Imager (OLI) ประกอบด้วย 9 ช่องสัญญาณ มีความละเอียดภาพ 30 เมตร ยกเว้นช่องสัญญาณที่ 8 มีความละเอียดภาพ 15 เมตร

และ Thermal Infrared Sensor (TIRS) ประกอบด้วย 2 ช่องสัญญาณ มีความละเอียดภาพ 100 เมตร ดังนั้น ภาพจาก Multispectral Camera ของ LANDSAT 8 ประกอบด้วย 11 ช่องสัญญาณ [32] แสดงดังตารางที่ 2.4



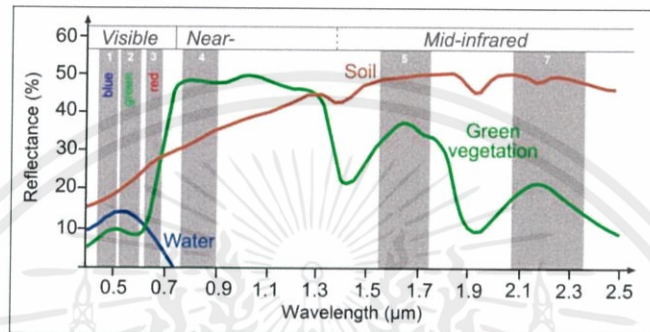
รูปที่ 2.60 ดาวเทียม LANDSAT 8

ตารางที่ 2.4 ช่องสัญญาณของภาพจาก Multispectral Camera ของ LANDSAT 8

ช่องสัญญาณ	ความยาวคลื่น (ไมโครเมตร)	รายละเอียดภาพ Resolution (เมตร)
1	0.43 - 0.45 (Coastal Aerosol)	30
2	0.45 - 0.51 (Blue)	30
3	0.53 - 0.59 (Green)	30
4	0.64 - 0.67 (Red)	30
5	0.85 - 0.88 (Near Infrared: NIR)	30
6	1.57 - 1.65 (SWIR 1)	30
7	2.11 - 2.29 (SWIR 2)	30
8	0.50 - 0.68 (Panchromatic)	15
9	1.36 - 1.38 (Cirrus)	30
10	10.60 - 11.19 (Thermal Infrared - TIRS 1)	100
11	11.50 - 12.51 (Thermal Infrared - TIRS 2)	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องสัญญาณทั้ง 11 ช่อง จะมีการดูดซับและการสะท้อนที่แตกต่างกัน ส่งผลให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ซึ่งรวมทั้งการประยุกต์เพื่อการประเมินภาวะความแห้งแล้งในระดับพื้นที่และระดับประเทศ แยกลักษณะพื้นที่ และนำไปใช้คำนวณหาค่าดัชนีพืชพรรณชนิดต่างๆ ได้ เช่น Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) เป็นต้น ซึ่งกราฟการสะท้อนของช่วงคลื่นแสดงดังรูปที่ 2.61 [33]



รูปที่ 2.61 ค่าการสะท้อนบนพื้นผิวในช่วงคลื่น

2.7.3 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

ค่าดัชนีพืชพรรณ (Vegetation Index) คือ ค่าที่บอกถึงสัดส่วนของพืชพรรณที่ปกคลุมพื้นผิว โดยคำนวณจากการนำช่วงคลื่นที่เกี่ยวข้องกับพืชพรรณมาทำสัดส่วนซึ่งกันและกัน วิธีที่นิยมใช้งานกันมากเรียกว่า Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) เป็นการนำค่าความแตกต่างของการสะท้อนของพื้นผิวระหว่างช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรด (*NIR*) กับช่วงคลื่นที่ตามองเห็นสีแดง (*RED*) มาทำสัดส่วนกับค่าผลบวกของทั้งสองช่วงคลื่นเพื่อปรับให้เป็นลักษณะการกระจายแบบปกติ [34] ดังสมการที่ (2.39)

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2.39)$$

โดยที่ NIR = การสะท้อนในช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรด (%)

RED = การสะท้อนในช่วงคลื่นตามองเห็นสีแดง (%)

สมการดังกล่าว ทำให้ค่า NDVI มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 โดยค่า 0 หมายถึงไม่มีพืชพรรณใบเขียวอยู่ในพื้นที่สำรวจ ในขณะที่ค่า 0.8 – 0.9 หมายถึง มีพืชมักมีพืชพรรณใบเขียวหนาแน่นมากในพื้นที่ดังกล่าว กรณีพื้นผิวมีพืชพรรณปกคลุมจะมีค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรด (*NIR*) สูงกว่าช่วงคลื่นตามองเห็นสีแดง (*RED*) ทำให้ NDVI มีค่าเป็นบวก

และในขณะที่พื้นผิวที่เป็นดินมีค่าการสะท้อนระหว่างสองช่วงคลื่นใกล้เคียงกัน ทำให้ค่า NDVI ใกล้เคียงกับ 0 ส่วนกรณีพื้นผิวที่เป็นน้ำจะมีค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรด (*NIR*) ต่ำกว่าช่วงคลื่นตามองเห็นสีแดง (*RED*) ทำให้ค่า NDVI มีค่าติดลบ [34] ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่า Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

ค่า NDVI	ความหมาย
$0.500 \leq \text{NDVI} \leq 1$	พืชพรรณปกคลุมหนาแน่น
$0.140 \leq \text{NDVI} < 0.500$	พืชพรรณปกคลุมปานกลาง
$0.090 \leq \text{NDVI} < 0.140$	พืชพรรณปกคลุมน้อย
$0.025 \leq \text{NDVI} < 0.090$	พื้นดิน สิ่งปลูกสร้าง
$0.002 \leq \text{NDVI} < 0.025$	เมฆ
$-0.046 \leq \text{NDVI} < 0.002$	น้ำแข็งและหิมะ
$-1 \leq \text{NDVI} < -0.046$	พื้นน้ำ

ประโยชน์ที่สำคัญของค่าดัชนีพืชพรรณ ได้แก่ ศึกษาการกระจายตัวและความสมบูรณ์ของพืชพรรณโดยรวม จำแนกลักษณะของพื้นที่ จำแนกประเภทของพืชพรรณ รวมถึงไปถึงการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของปริมาณพืชพรรณ ศึกษาภาวะความแห้งแล้งและความสมบูรณ์ของพื้นที่ในช่วงเวลา และใช้ในการคำนวณค่ามวลชีวภาพสัมพัทธ์ (Relative Biomass)

บทที่ 3

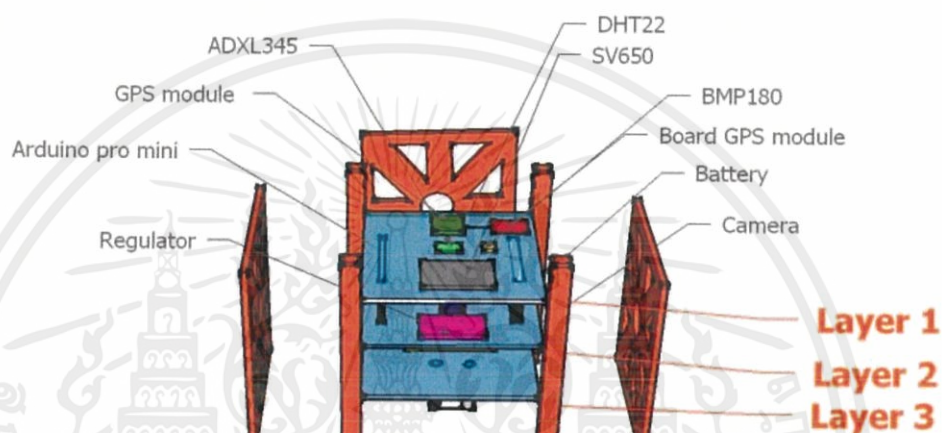
การออกแบบและการจัดทำปริญญาานิพนธ์

ในการพัฒนาแบบจำลองทางวิศวกรรมดาวเทียมคิวบ์แซท KMITL CubeSat EM - 3 เพื่อไปสู่การทำงานบนอวกาศได้จริง ประกอบด้วยหน่วยการทำงานบนดาวเทียมคิวบ์แซททั้งหมด 4 หน่วย ได้แก่ หน่วยดูแลการสื่อสาร หน่วยจัดการข้อมูลกลาง หน่วยแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า และหน่วยการถ่ายภาพ ซึ่งคณะผู้จัดทำได้ทำหน่วยการทำงานทั้งหมด 2 หน่วย ได้แก่ หน่วยการถ่ายภาพ และหน่วยจัดการข้อมูลกลางบางส่วน โดยหน้าที่ที่รับผิดชอบ คือ การสร้างและการพัฒนาบอร์ด JPEG Camera, การขยายภาพโดยที่ยังรักษารายละเอียดและความคมชัดของภาพบนพื้นฐานของการดำเนินการใน Wavelet Domain, กระบวนการเข้ารหัสลับและถอดรหัสลับแบบเคออดิกบนพื้นฐานของวงจรรองสัญญาณดิจิทัล ซึ่งกระบวนการนี้ดำเนินการบนหน่วยประมวลผลของบอร์ดจัดการข้อมูลส่วนกลางและในสถานีภาคพื้นดิน, การออกแบบซอฟต์แวร์ของสถานีภาคพื้นดิน, การควบคุมตำแหน่งการถ่ายภาพ และการวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณ (NDVI) เพื่อรองรับการทำงาน Remote Sensing ซึ่งเป็นการเตรียมองค์ความรู้เพื่อเป็นส่วนหนึ่งการพัฒนาดาวเทียม KMITL CubeSat ในอนาคตต่อไป

3.1 การออกแบบและสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบแซท

3.1.1 การออกแบบตัวแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบแซท EM-1

แบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบแซท EM - 1 ที่ได้ออกแบบนั้น จะประกอบไปด้วย 3 Layer โดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ต้นแบบของแบบจำลองดาวเทียมคิวบแซท EM-1

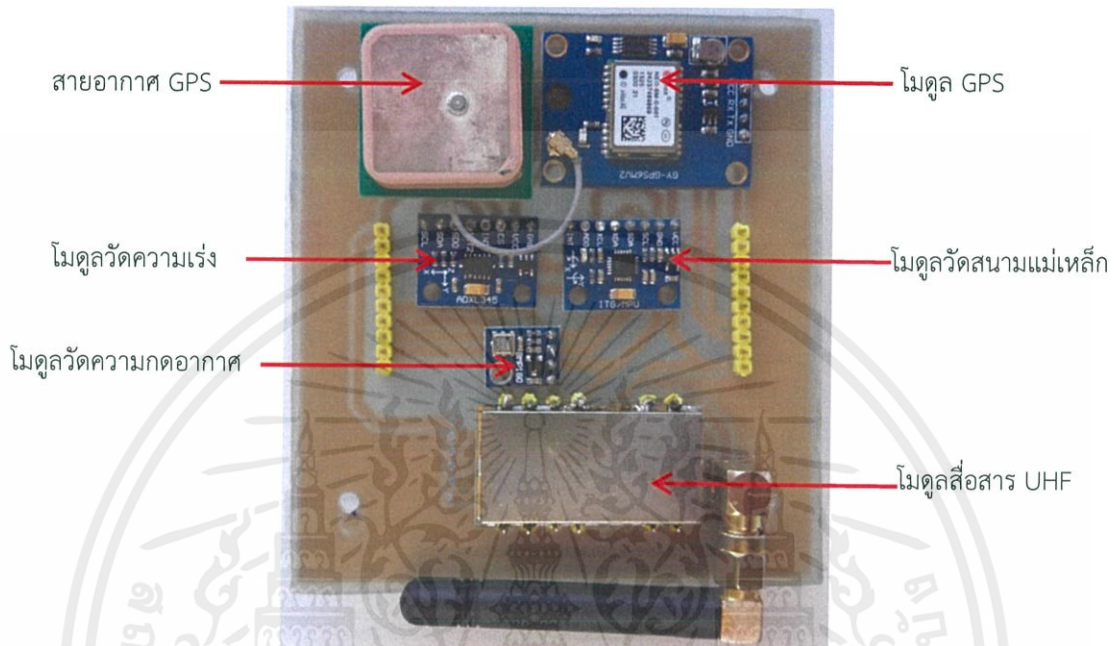


รูปที่ 3.2 แบบจำลองดาวเทียมคิวบแซท EM-1

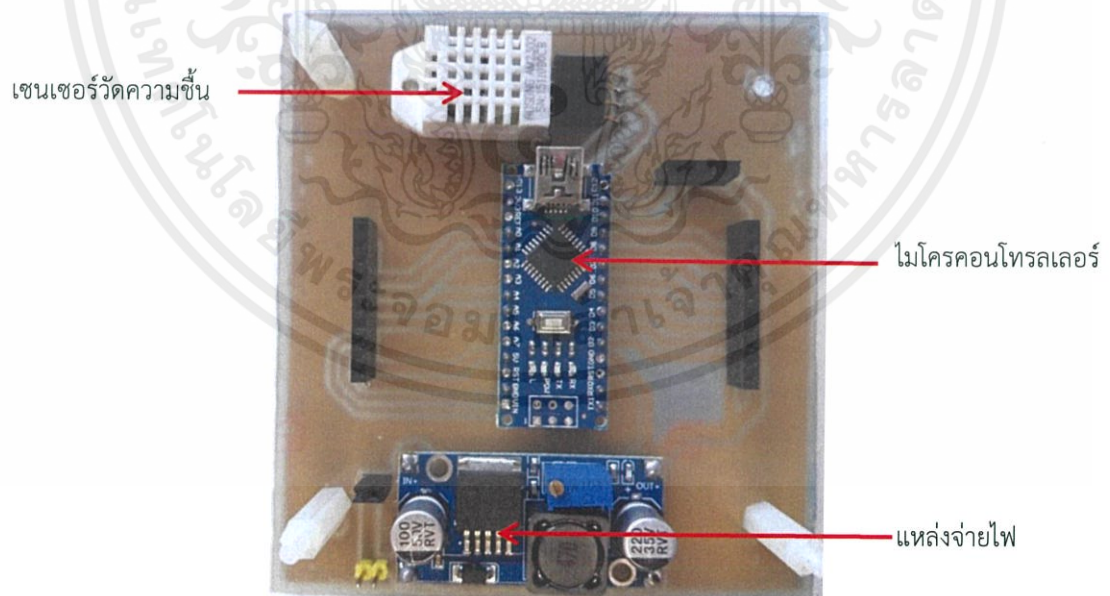
จากรูปที่ 3.1 Layer 1 คือ ส่วนสื่อสาร และเซนเซอร์, Layer 2 คือ ส่วนประมวลผล และจัดการข้อมูล และ Layer 3 คือ ส่วนแบตเตอรี่ และกล้องถ่ายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.1 การออกแบบลายวงจรในแต่ละ Layer สำหรับแบบจำลองดาวเทียมคิวิบแซท EM-1 นั้นจะแสดงดังรูปที่ 3.3, รูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5

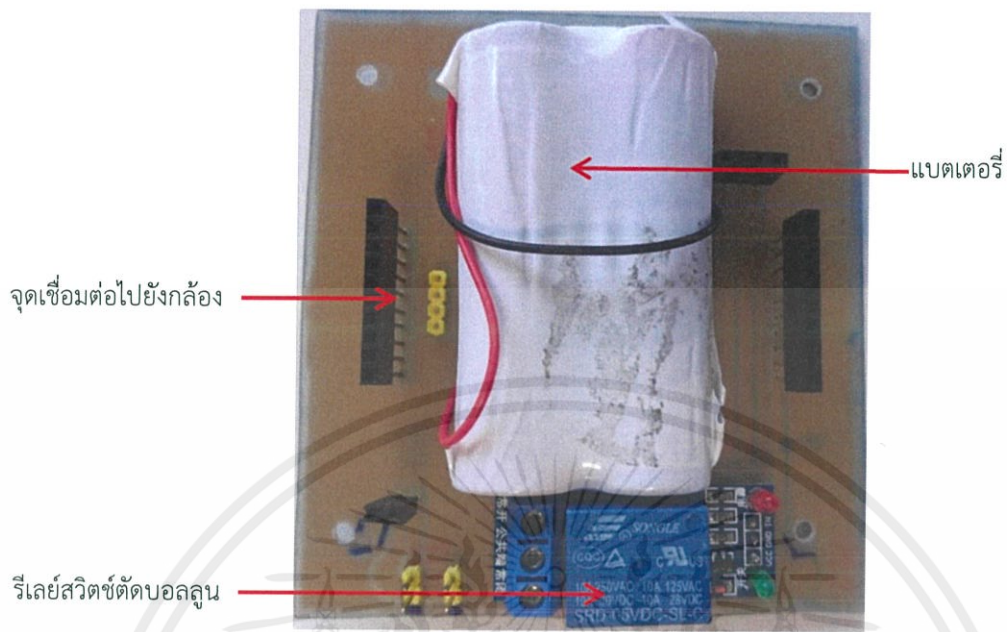


รูปที่ 3.3 ลายวงจรของส่วนอุปกรณ์เซนเซอร์ (Layer 1)



รูปที่ 3.4 ลายวงจรของส่วนประมวลผล (Layer 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ลายวงจรส่วนแบตเตอรี่ และกล้องถ่ายภาพ (Layer 3)

แบบจำลองดาวเทียมคิวบแซท EM-1 ถูกสร้างขึ้นตั้งแต่ปีการศึกษาที่ 1/2559 และได้ทำการทดสอบการปล่อยแบบจำลองดาวเทียมคิวบแซทขึ้นสู่อวกาศโลก ในวันศุกร์ ที่ 2 ธันวาคม 2559 และได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาหลังจากการทดสอบปล่อยครั้งที่ 1 ซึ่งพบปัญหาดังนี้

- 1) ความไม่เสถียรภาพของอุปกรณ์ประมวลผล (MCU)
- 2) ไอซีแปลงแรงดันกระแสไฟลงเป็นแบบสวิตซ์ซึ่งทำให้เกิดการกระเพื่อม (Ripple) บนสัญญาณไฟ
- 3) สายอากาศมีขนาดเล็กกว่า 1/4 ของความยาวคลื่น ทำให้อัตราขยายต่ำ
- 4) ไม่มีระบบบันทึกข้อมูลบนแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบแซท
- 5) เวลาประจุไฟแบตเตอรี่ต้องถอดแบตเตอรี่ออกมา
- 6) กล้องถ่ายภาพไม่มีตัวกรองแสงอินฟราเรด ทำให้ภาพเป็นสีออกขาวดำ และใช้เลนส์ปกติทำให้มุมมองภาพแคบ

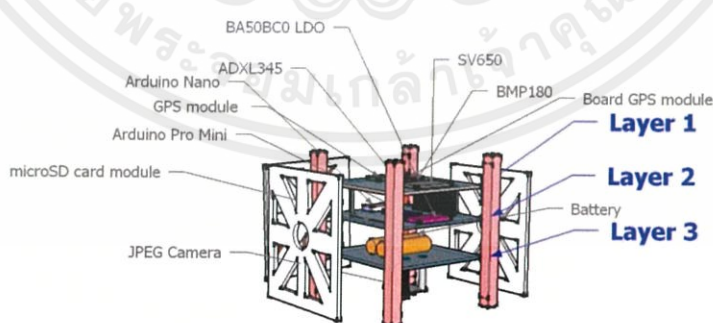
จากปัญหาดังกล่าวทำให้เกิดการปรับปรุงและพัฒนาแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 2 โดยมีความแตกต่างกับแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 1 แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบองค์ประกอบระหว่างแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM-1 และ EM-2

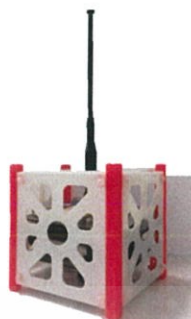
Part	EM-1	EM-2
Microcontroller	Arduino Nano	Arduino Nano & Pro mini
IC Regulator	LM2596	BA50BC0
Whip Antenna (Gain)	0 dBi	2.15 dBi
Data Log	N/A	✓
Battery Charge Port	N/A	✓
IR Cut in JPEG Camera	N/A	✓

3.1.2 การออกแบบตัวแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบ์แซท EM-2

แบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 2 ถูกสร้างขึ้นและทำการทดลองในระหว่างปีการศึกษาที่ 2/2559 และได้ทำการทดสอบการปล่อยแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซทขึ้นสู่อวกาศโลก ในวันพฤหัสบดี ที่ 30 มีนาคม 2560 โดยแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 2 ที่ได้ออกแบบนั้นจะประกอบไปด้วย 3 ชั้น มีรายละเอียดดังรูปที่ 3.6 และ 3.7 และตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.6 ต้นแบบของแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 2



รูปที่ 3.7 แบบจำลองดาวเทียมคิวบแซท EM - 2

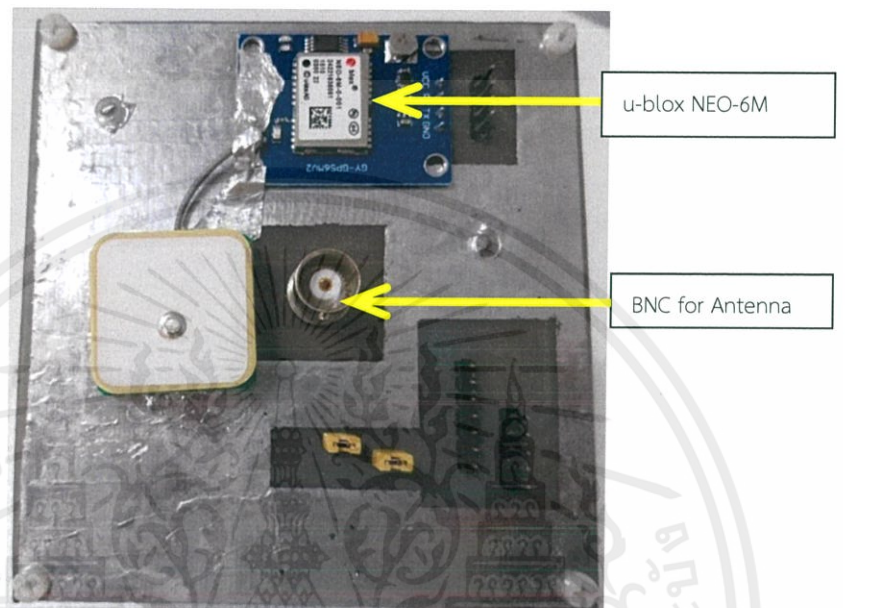
จากรูปที่ 3.6 Layer 1 คือ ส่วนสื่อสาร, Layer 2 คือ ส่วนประมวลผลและจัดการข้อมูล และ Layer 3 คือ ส่วนแบตเตอรี่ เซนเซอร์ และกล้องถ่ายภาพ

ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบบน ดาวเทียมคิวบแซท EM - 2

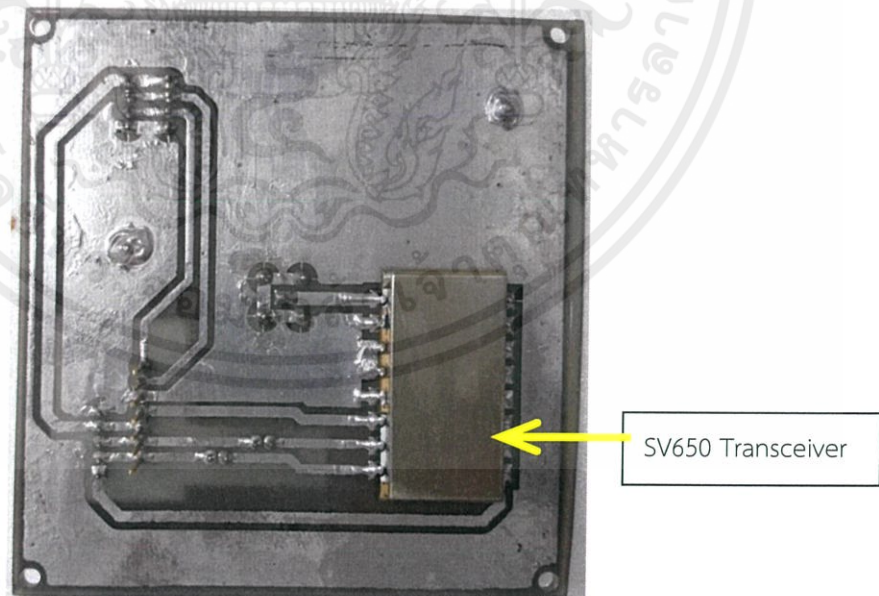
ส่วนประกอบ	คำอธิบาย
Layer 1	
- SV650 Transceiver	โมดูลสื่อสารความถี่ 444 เมกกะเฮิร์ตซ์ กำลังส่ง 27 dBm บริโภคกำลังงานสูงสุด 1.5 วัตต์
- u-blox NEO-6M	โมดูลจีพีเอส สำหรับระบุตำแหน่ง
- Whip antenna	สายอากาศโมโนโพล แบบขั้ว BNC ความถี่ 430 ถึง 470 เมกกะเฮิร์ตซ์ อัตราขยาย 2 dBi
Layer 2	
- Arduino Nano	ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับประมวลผลและจัดการกับอุปกรณ์
- Arduino Pro mini	ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับควบคุมหน่วยความจำเก็บข้อมูล
- microSD card	โมดูลสำหรับบันทึกข้อมูลลง microSD
Layer 3	
- Battery Li-ion	แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ความจุ 3200 มิลลิแอมป์
- BA50BC0 LDO	ไอซีแปลงแรงดันลงเหลือ 5V แบบ Linear 2 ชุด
- JPEG Camera	กล้องถ่ายภาพ ให้ภาพออกมาเป็นไฟล์ JPEG
- BMP180	เซนเซอร์วัดความกดอากาศ สำหรับใช้หาความสูงจากความดัน
- ADXL345	เซนเซอร์วัดการทรงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.1 การออกแบบลายวงจรในแต่ละ Layer สำหรับแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM-2 นั้นจะแสดงดังรูปที่ 3.8, รูปที่ 3.9, รูปที่ 3.10, รูปที่ 3.11, รูปที่ 3.12 และรูปที่ 3.13

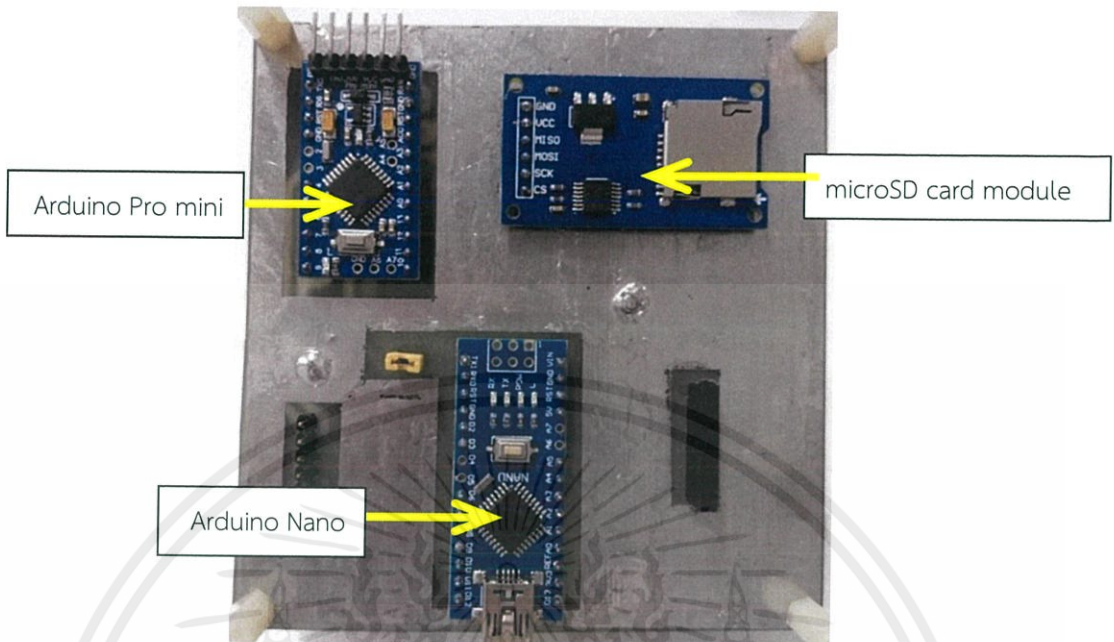


รูปที่ 3.8 ลายวงจรส่วนสื่อสาร (Layer 1 ด้านบน)

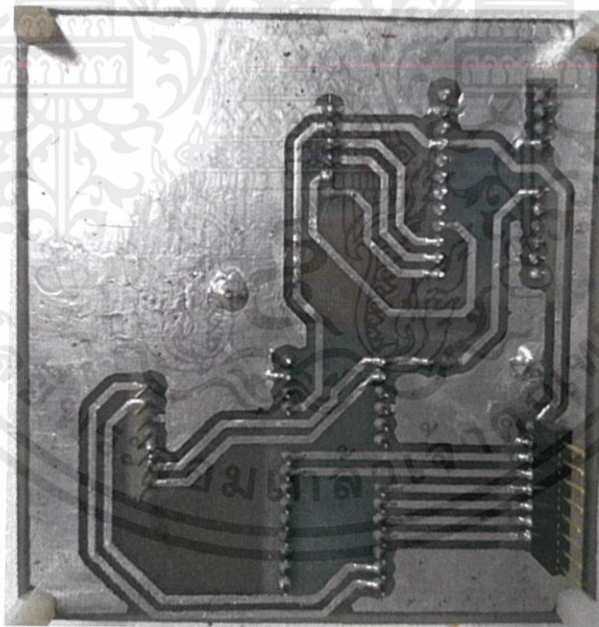


รูปที่ 3.9 ลายวงจรส่วนสื่อสาร (Layer 1 ด้านล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

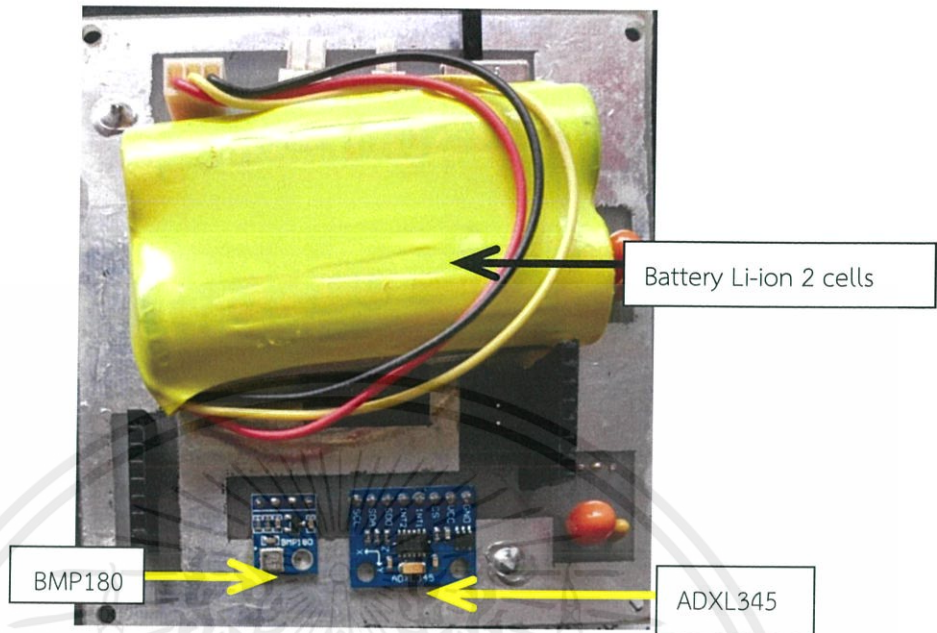


รูปที่ 3.10 ลายวงจรส่วนประมวลผล และจัดการข้อมูล (Layer 2 ด้านบน)

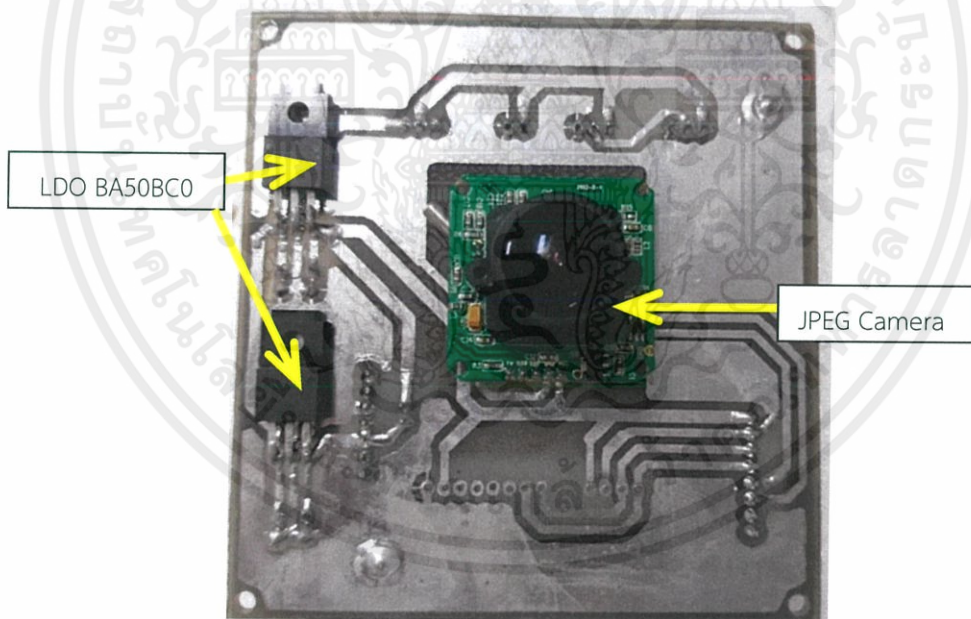


รูปที่ 3.11 ลายวงจรส่วนประมวลผล และจัดการข้อมูล (Layer 2 ด้านล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ลายวงจรส่วนแบตเตอรี่ เซนเซอร์ และกล้องถ่ายภาพ (Layer 3 ด้านบน)



รูปที่ 3.13 ลายวงจรส่วนแบตเตอรี่ เซนเซอร์ และกล้องถ่ายภาพ (Layer 3 ด้านล่าง)

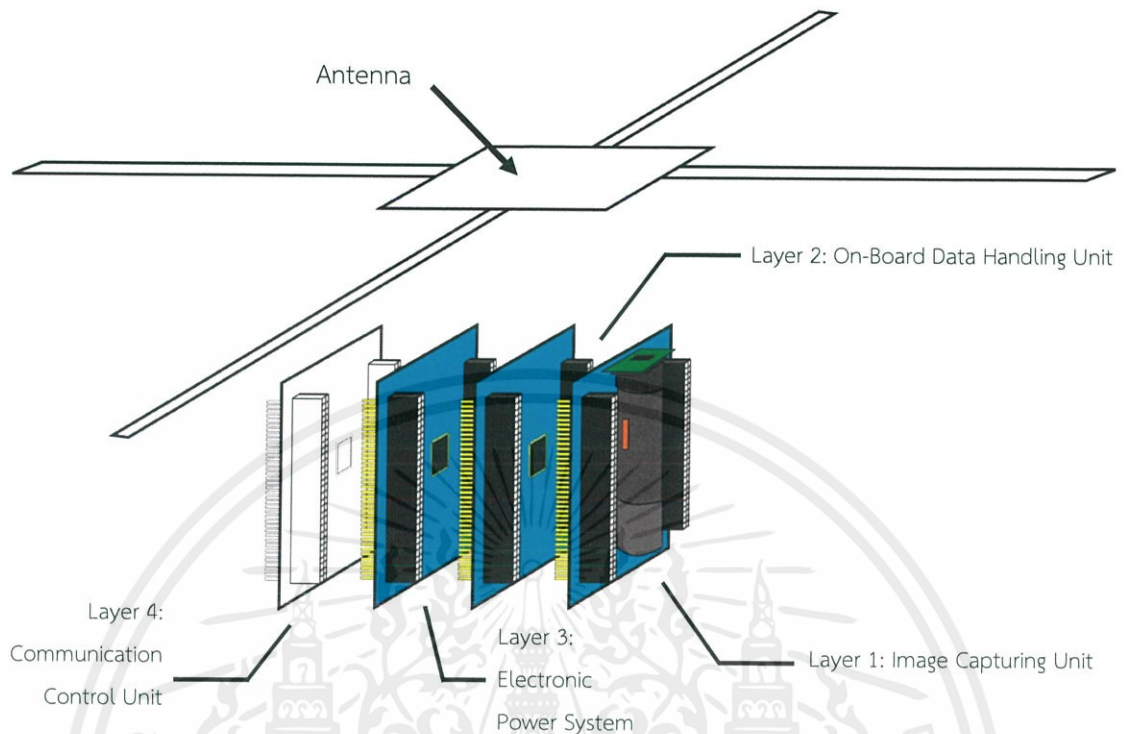
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางวิศวกรรมดาวเทียมคิวบ์แซท KMITL CubeSat EM – 2 นั้นมีหน้าที่หลักเพียงการถ่ายรูปบนตัวดาวเทียมคิวบ์แซทผ่านคำสั่งที่ส่งขึ้นไปจากซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินและส่งข้อมูลภาพกลับลงมาและการส่งค่าของเซนเซอร์ต่างๆ เช่น เซนเซอร์วัดความเร่งทั้ง 3 แกนเพื่อทดสอบการทรงตัวของดาวเทียมคิวบ์แซท เซนเซอร์วัดระดับความสูง เป็นต้น ในขณะที่เดียวกันยังไม่มีการออกแบบและสร้างระบบรักษาอุณหภูมิและการจ่ายไฟอย่างมีแบบแผนที่ดี รวมไปถึงการแบ่งแยกหน้าที่ของแต่ละหน่วยงานที่ไม่ชัดเจน นอกจากนี้ผลของภาพที่ถ่ายได้นั้นมีขนาดเล็กและรายละเอียดต่ำ ไม่มีการสร้างระบบเพิ่มความคมชัดและรักษารายละเอียดของรูปภาพที่ซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดิน

จากข้อบกพร่องและการเสนอแนะข้างต้นในการออกแบบและสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบ์แซท KMITL CubeSat EM – 2 นั้นจึงได้นำข้อมูลข้างต้นนำมาเป็นต้นแบบและแนวคิดในการออกแบบและสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรมดาวเทียมคิวบ์แซท KMITL CubeSat EM – 3 โดยมีรายละเอียดการออกแบบและการทำงานดังหัวข้อยกถัดมา

3.1.3 การออกแบบตัวแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 3

แบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 3 ถูกสร้างขึ้นและทำการทดลองในระหว่างปีการศึกษาที่ 1/2561 และได้ทำการทดสอบการปล่อยแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซทขึ้นสู่อวกาศโลก ในวันพฤหัสบดี ที่ 1 ธันวาคม 2561 โดยแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 3 ที่ได้ออกแบบนั้นจะประกอบไปด้วย 4 ชั้น มีรายละเอียดดังรูปที่ 3.14 และ 3.15 และตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.14 ต้นแบบของแบบจำลองดาวเทียมคิวบแซท EM-3



รูปที่ 3.15 แบบจำลองดาวเทียมคิวบแซท EM-3

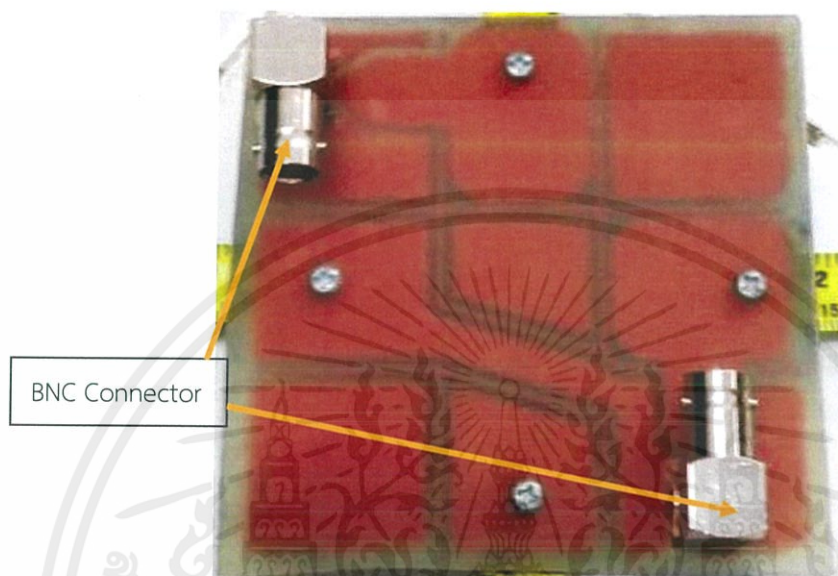
จากรูปที่ 3.14 Layer 1 คือ ส่วนควบคุมการถ่ายภาพ, Layer 2 คือ ส่วนประมวลผลและจัดการข้อมูล, Layer 3 คือ ส่วนแจกจ่ายพลังงาน และ Layer 4 คือ ส่วนควบคุมการสื่อสารกับสถานีภาคพื้นดิน

ตารางที่ 3.3 ส่วนประกอบบน ดาวเทียมคิวบแซท EM - 3

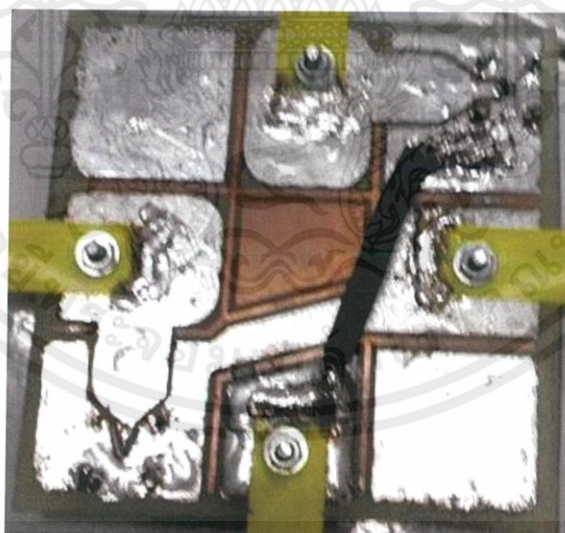
ส่วนประกอบ	คำอธิบาย
Antenna	
- BNC Connector	หัวต่อ BNC สำหรับการเชื่อมต่อการส่งข้อมูล
Layer 1	
- Arduino Nano	ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับประมวลผลและจัดการกับอุปกรณ์
- microSD card	โมดูลสำหรับบันทึกข้อมูลลง microSD
- JPEG Camera	กล้องถ่ายภาพ ให้ภาพออกมาเป็นไฟล์ JPEG
- Extension Lens	เลนส์ต่อขยายเพื่อเพิ่มกำลังขยายของกล้องขนาด 8x
Layer 2	
- Battery Li-ion	แบตเตอรี่แบบเตอรีลีเทียมไอออน ความจุ 3200 มิลลิแอมป์
- microSD card	โมดูลสำหรับบันทึกข้อมูลลง microSD
- ADXL345	เซนเซอร์วัดการทรงตัว
- u-blox NEO-6M	โมดูลจีพีเอส สำหรับระบุตำแหน่ง
- CJMCU - 175	โมดูลสำหรับวัดอุณหภูมิบนบอร์ด
Layer 3	
- INA226	ไอซีวัดกระแส 3 ชุด
- BA50BC0 LDO	ไอซีแปลงแรงดันลงเหลือ 5V แบบ Linear 3 ชุด
- KIA287R05	ไอซี Regulator ขนาด 2 แอมแปร์
- RD3H200SNTL1	Power MOSFET
Layer 4	
- LoRa6100AES	ใช้ในการ Modulate ข้อมูลฝั่ง UHF
- SA818-VHF	ใช้ในการ Modulate ข้อมูลฝั่ง VHF
- Arduino Nano	ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับประมวลผลและจัดการกับอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.1 การออกแบบลายวงจรในแต่ละ Layer สำหรับแบบจำลองดาวเทียมคิวบแซท EM-3 นั้นจะแสดงดังรูปที่ 3.16, รูปที่ 3.17, รูปที่ 3.18, รูปที่ 3.19, รูปที่ 3.20, รูปที่ 3.21, รูปที่ 3.22, รูปที่ 3.23, รูปที่ 3.24 และรูปที่ 3.25

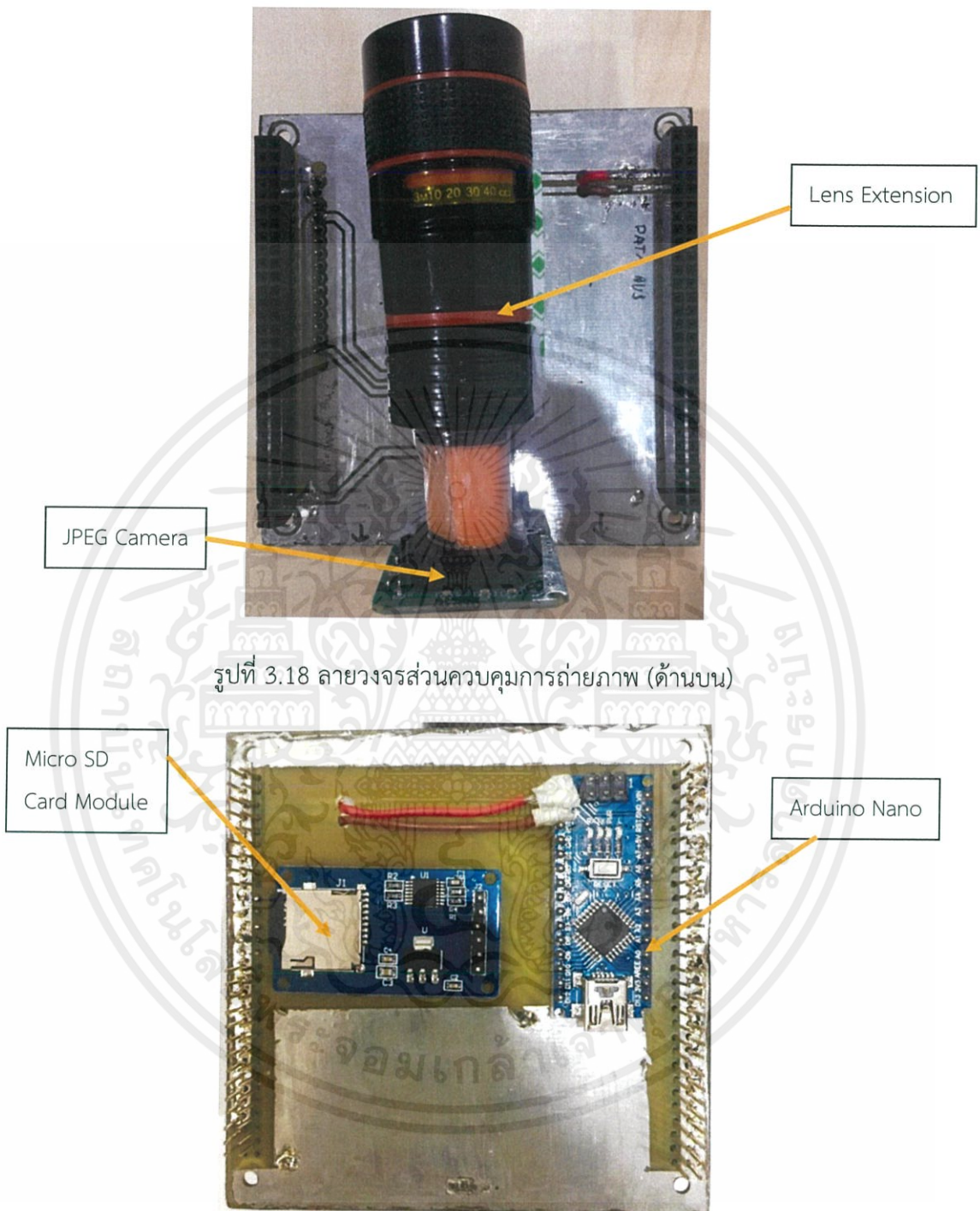


รูปที่ 3.16 ลายวงจรส่วนสายอากาศของ EM-3 (ด้านบน)



รูปที่ 3.17 ลายวงจรส่วนสายอากาศของ EM-3 (ด้านล่าง)

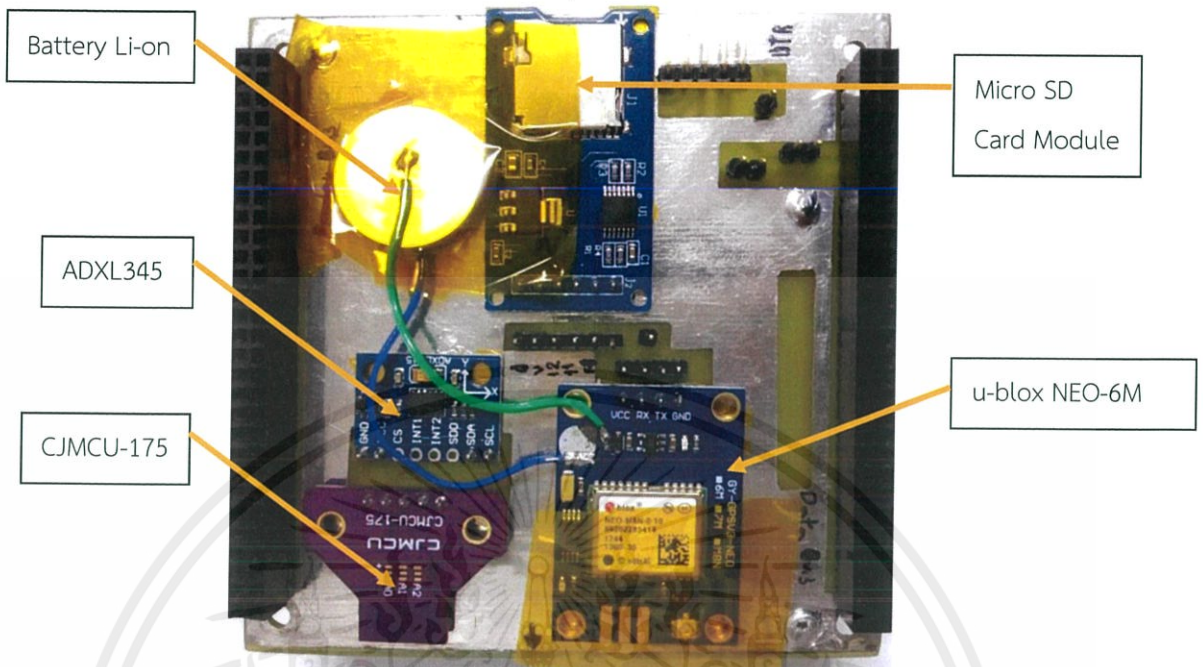
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



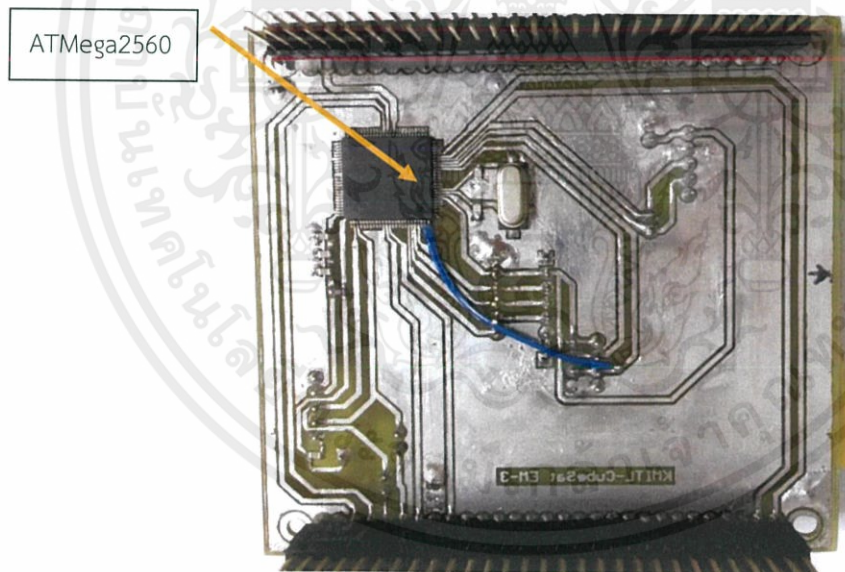
รูปที่ 3.18 ลายวงจรส่วนควบคุมการถ่ายภาพ (ด้านบน)

รูปที่ 3.19 ลายวงจรส่วนควบคุมการถ่ายภาพ (ด้านล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

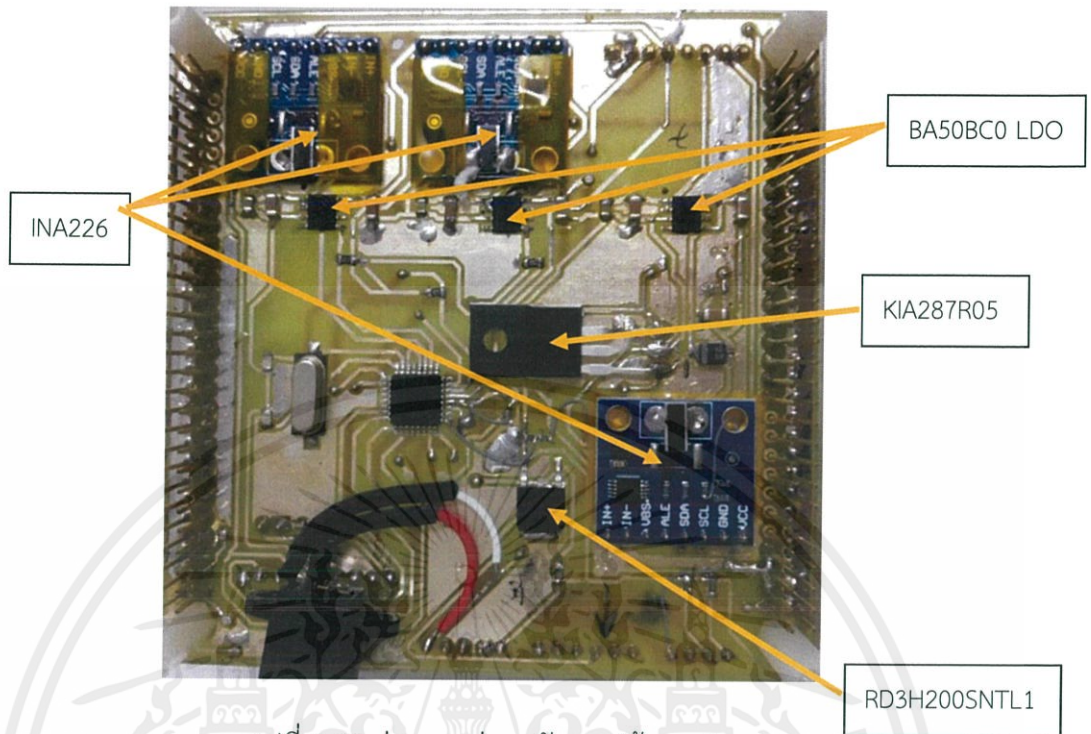


รูปที่ 3.20 ส่วนประมวลผลและจัดการข้อมูล (ด้านบน)

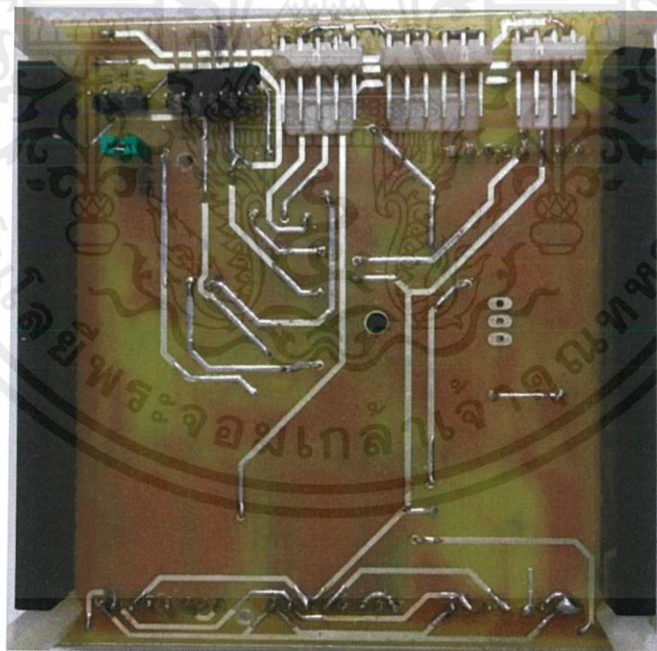


รูปที่ 3.21 ส่วนประมวลผลและจัดการข้อมูล (ด้านล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

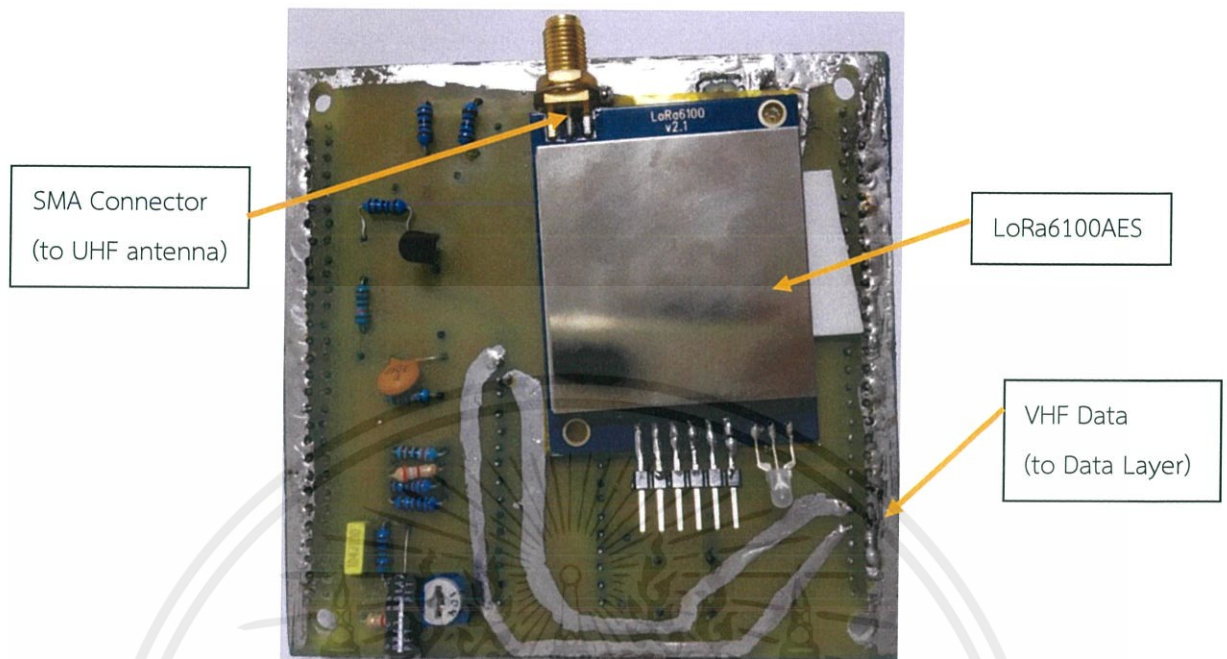


รูปที่ 3.22 ส่วนแจกจ่ายพลังงาน (ด้านบน)

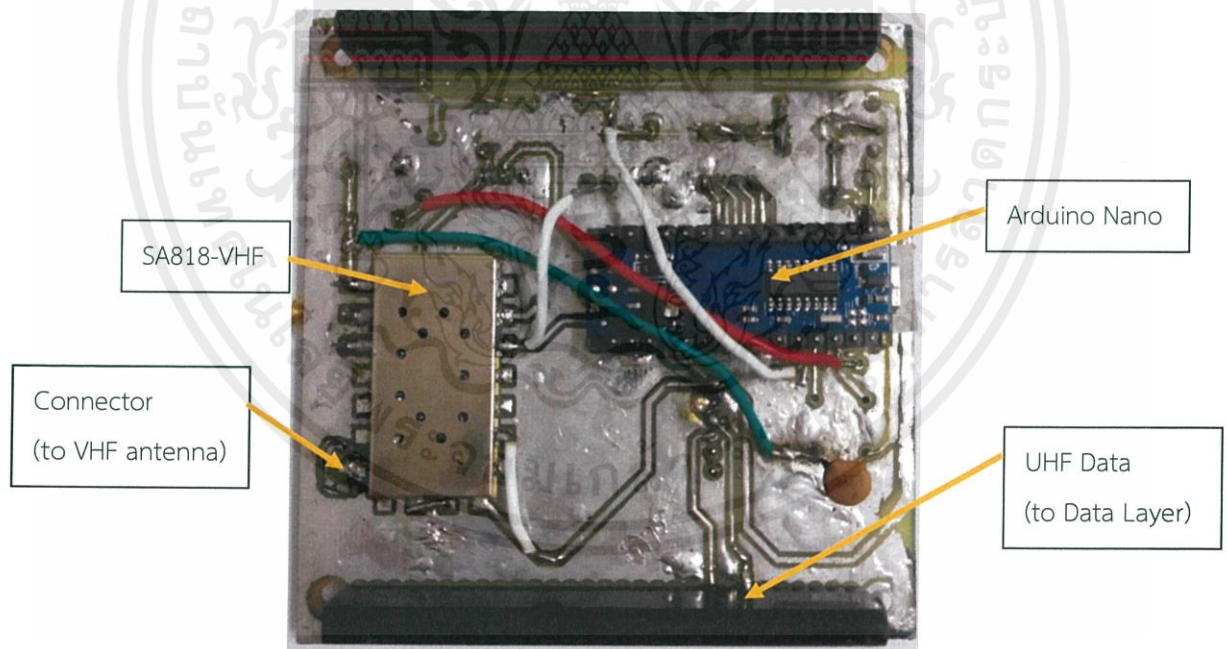


รูปที่ 3.23 ส่วนแจกจ่ายพลังงาน (ด้านล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 ส่วนควบคุมการสื่อสารกับสถานีภาคพื้นดิน (ด้านบน)



รูปที่ 3.25 ส่วนควบคุมการสื่อสารกับสถานีภาคพื้นดิน (ด้านล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 การทำงานของดาวเทียมคิวบแซทแบบจำลองทางวิศวกรรม EM - 3

เมื่อคิวบแซทถูกเปิดการใช้งานหรือมีการจ่ายไฟ หน่วย On-Board Data Handling จะทำหน้าที่รอรับคำสั่งจากซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินเพื่อรอการทำงานว่าผู้ใช้งานต้องการสั่งการให้ดาวเทียมคิวบแซททำงานใด และมีการรายงานค่าสถานะของตัวดาวเทียม ณ ขณะใดๆ ส่งกลับมายังที่สถานีภาคพื้นดิน

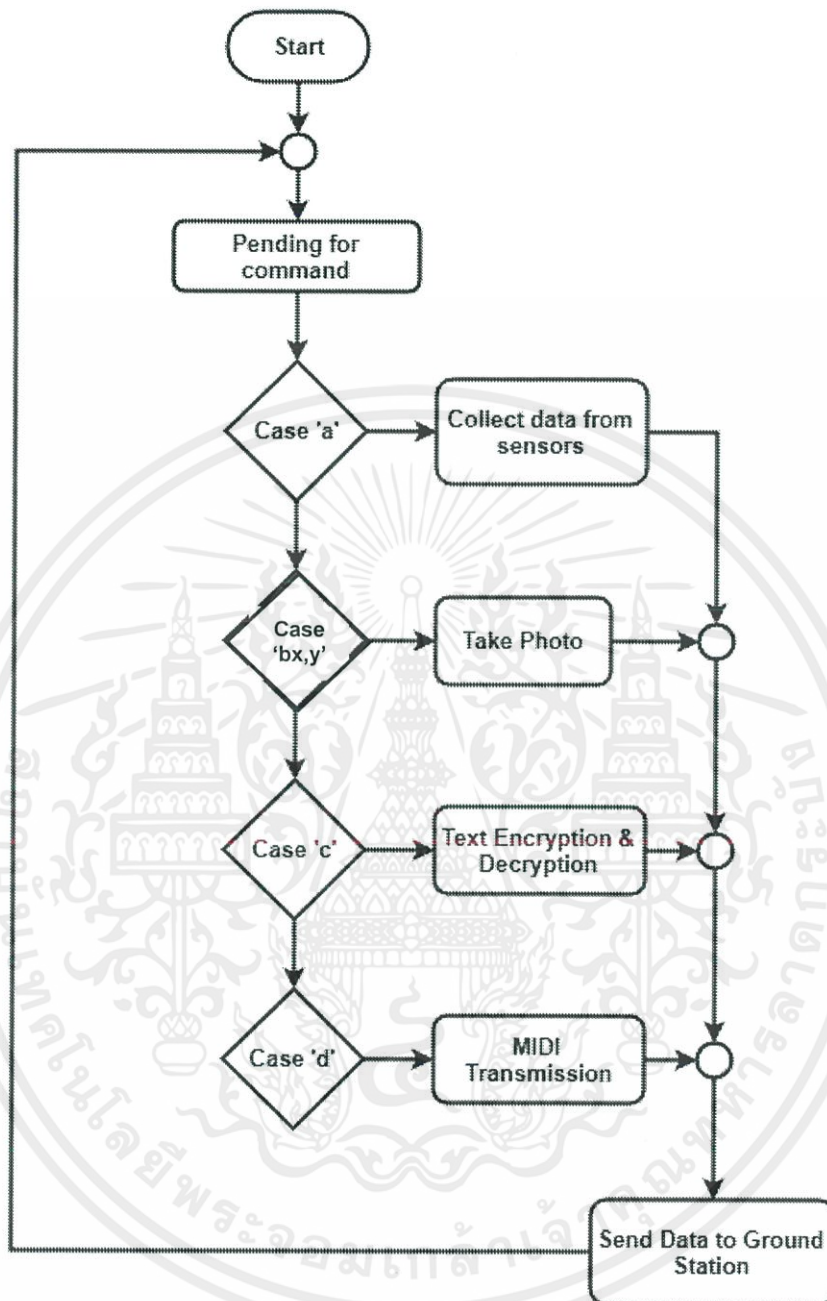
การทำงานของดาวเทียมคิวบแซท EM - 3 นั้นจะแบ่งออกเป็น 4 โหมดการทำงานซึ่งโหมดการทำงานเหล่านี้จะสอดคล้องกับการออกแบบซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินซึ่งจะกล่าวต่อไปในปฏิญญาพันธฉบับนี้ โดยมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3.26 และคำอธิบายดังนี้

3.1.4.1 การทำงานแรกจะเป็นการส่งค่าเซนเซอร์ต่างๆ และพิกัดทางภูมิศาสตร์โดยดาวเทียมคิวบแซทจะส่งค่าดังกล่าวลงมาเมื่อมีการส่งคำสั่งกรณี 'a' ขึ้นไป

3.1.4.2 การทำงานที่สองเป็นการเรียกใช้ระบบถ่ายภาพด้วยค่าความละเอียดและอัตราส่วนการบีบอัดของภาพแบบเลือกใช้ได้จากซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินสำหรับค่าความละเอียดของภาพถ่ายที่สามารถเลือกใช้ได้ ได้แก่ 320×240 , 640×480 และ 800×600 และให้เป็นกรณีถ่ายภาพกรณี 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ส่วนระดับการบีบอัดภาพสามารถเลือกใช้ได้ 3 ระดับเช่นกัน ได้แก่ กรณีที่ 1 คือบีบอัดน้อยที่สุด, กรณีที่ 2 คือบีบอัดปานกลาง และกรณีที่ 3 คือบีบอัดมากที่สุด โดยดาวเทียมคิวบแซทจะทำการถ่ายภาพเมื่อมีการส่งคำสั่ง 'bx,y' ขึ้นไปจากภาคพื้นดินเมื่อ x คือกรณีความละเอียดของภาพและ y คือกรณีการบีบอัด

3.1.4.3 การทำงานที่สามเป็นการทดลองระบบการเข้ารหัสลับและถอดรหัสลับของข้อมูลประเภทข้อความโดยดาวเทียมจะทำงานเมื่อซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินส่งคำสั่ง 'c' แล้วตามด้วยข้อความที่ต้องการจะเข้ารหัสลับ ดาวเทียมคิวบแซทจะทำการถอดรหัสลับและเข้ารหัสลับด้วยสัมประสิทธิ์การเข้ารหัสอีกชุดหนึ่ง แล้วส่งข้อความที่เข้ารหัสนั้นกลับมายังซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินเพื่อทำการถอดรหัสด้วยชุดสัมประสิทธิ์ชุดเดียวกัน

3.1.4.4 การทำงานที่สี่เป็นการกระจายเสียงข้อมูลประเภทเสียงในรูปแบบเพลงโดยที่ซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินนั้นผู้ใช้จะสามารถเลือกได้ 7 เพลงที่ต้องการจะให้ดาวเทียมคิวบแซททำการกระจายเสียงกลับลงมา โดยดาวเทียมจะทำงานลักษณะดังกล่าวเมื่อมีการส่งคำสั่งการ 'd' ตามด้วยหมายเลขเพลง 1 ถึง 7 ขึ้นไป



รูปที่ 3.26 แผนผังการทำงานของดาวเทียมคิวบแซท EM – 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 เปรียบเทียบการออกแบบตัวแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบ์

แพท EM-1, EM-2, และ EM-3

เมื่อนำแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบ์แพท EM - 1, EM - 2, และ EM - 3 ส่วนการทำงานต่างๆ มาเปรียบเทียบกับทั้งหมด สามารถจัดทำได้ดังตารางที่ 3.4

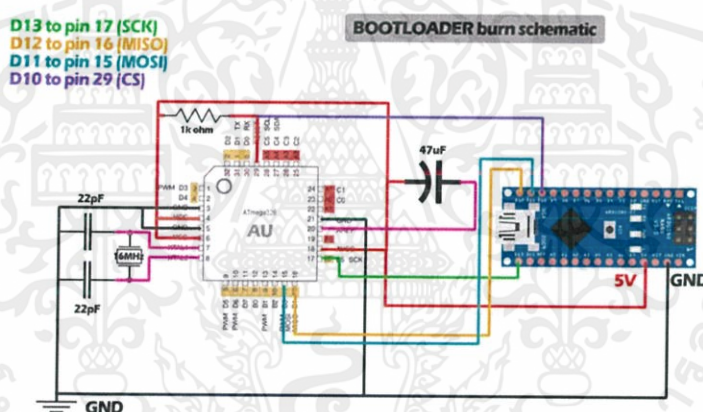
ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบคุณลักษณะของแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบ์แพท

รายการ	EM-1	EM-2	EM-3
รูปแบบการรับ-ส่ง	Half-duplex	Half-duplex	Full-duplex
ย่านความถี่	UHF	UHF	VHF และ UHF
โมดูลสื่อสาร	SV650	SV650	SA818 และ LoRA6100AES
รูปแบบสายอากาศ	Omni antenna	Omni antenna	Dipole antenna
กำลังส่งสูงสุด	27 dBm	27 dBm	29.5 และ 30 dBm
ค่า Sensitivity	-121 dBm	-121 dBm	-124 และ -139 dBm
Built-in IR Cut JPEG Camera	N/A	N/A	✓
Cryptography Unit	N/A	N/A	✓
Battery Health Monitoring	N/A	N/A	✓
Software	N/A	N/A	✓
MIDI Transmission Unit	N/A	N/A	✓

3.2 การออกแบบและพัฒนาบอร์ด JPEG Camera เพื่อควบคุมการถ่ายภาพของดาวเทียมคิวบ์แซท

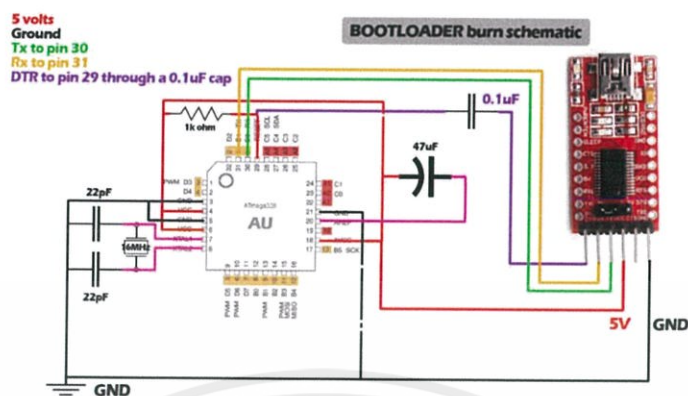
3.2.1 พัฒนาหน่วยการทำงาน (Module) ด้านการถ่ายภาพเพื่อให้สามารถทำงานร่วมกับหน่วยประมวลผลขนาดเล็ก ATmega328P AU ในรูปแบบการฝังตัว

หน่วยประมวลผล ATmega328P AU ซึ่งเป็นหน่วยประมวลผลที่มีขนาดเล็ก มีพอร์ตเชื่อมต่อเพียงพอสื่อการต่อกับโมดูล JPEG Camera และโมดูล Micro SD Card ซึ่งออกแบบให้อ่านชุดคำสั่งจากโปรแกรม Arduino ซึ่งต้องมีการเบิร์น Bootloader เพื่อให้หน่วยประมวลผลนั้นสามารถเข้าใจชุดคำสั่งจากโปรแกรม Arduino ได้โดยทำการเบิร์น Bootloader โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีขา SCK, MOSI, MISO และ CS โดยคณะผู้จัดทำได้ทำการวาดลายวงจรตามแผนผัง (Schematic) ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 Schematic ในการสร้างวงจรเพื่อการ Bootloader Burning

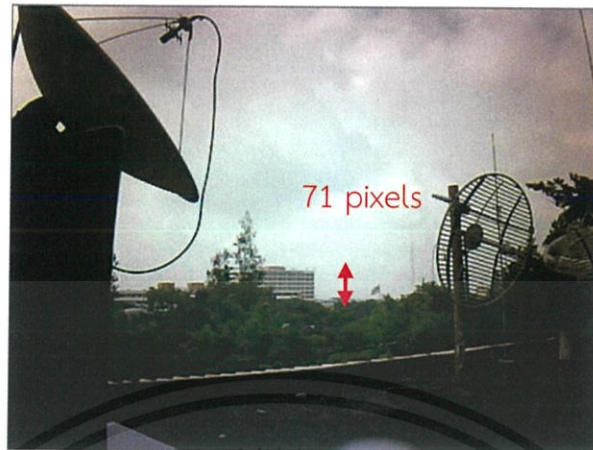
เมื่อทำการเบิร์น Bootloader เสร็จสิ้น ขั้นตอนต่อไปคือการอัปโหลดชุดคำสั่งจากโปรแกรม Arduino ลงในหน่วยประมวลผลขนาดเล็ก ATmega328P AU เพื่อให้หน่วยประมวลผลขนาดเล็กดังกล่าวเรียนรู้ระบบการทำงานของโปรแกรม Arduino เพื่อสร้างเป็นระบบฝังตัวสำหรับการถ่ายภาพขนาดเล็กต่อไป โดยใช้โมดูล Serial TTL ที่มีขา DTR ในการอัปโหลดชุดคำสั่ง โดยมีลายวงจรตามแผนผัง (Schematic) ดังรูปที่ 3.28



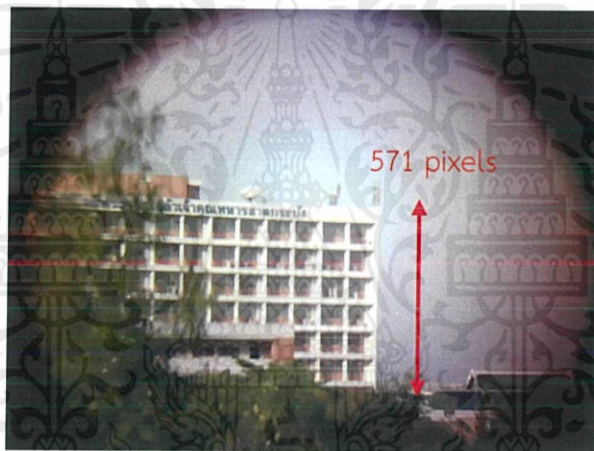
รูปที่ 3.28 Schematic ที่ใช้ในการอัปเดตคำสั่งลงบนหน่วยประมวลผล

3.2.2 ออกแบบลายวงจร JPEG Camera

ในบอร์ด JPEG Camera มีหน้าที่หลักในการถ่ายรูป จากนั้นเก็บรูปไว้ในหน่วยความจำ (MicroSD Card) และทำการส่งรูปถ่ายไปยังบอร์ดข้อมูลโดยผ่านหน่วยประมวลผลขนาดเล็ก เพื่อนำภาพไปใช้ประโยชน์ต่อไป ดังนั้นบนบอร์ด JPEG Camera มีส่วนประกอบหลักๆ ที่เชื่อมต่อกัน คือ โมดูล JPEG Camera โมดูลหน่วยความจำ (MicroSD Card) และ ATmega328P AU ซึ่งคณะผู้จัดทำทำการออกแบบลายวงจรตามแผนผัง (Schematic) ดังรูปที่ 3.29



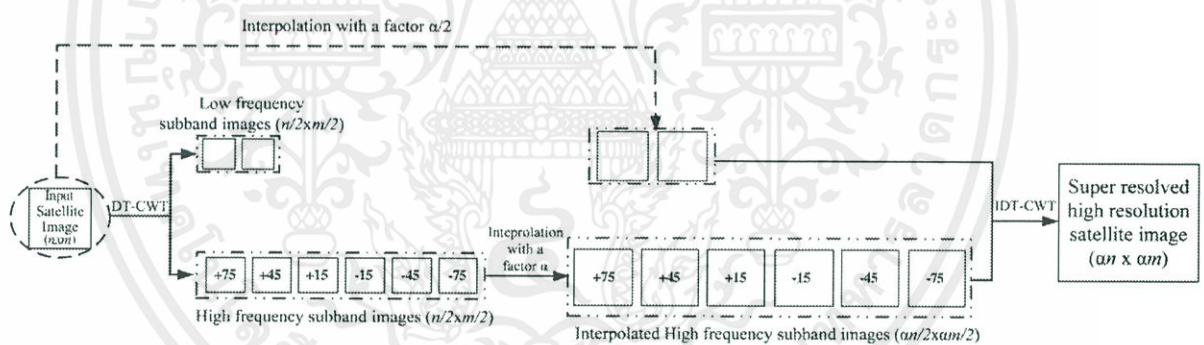
รูปที่ 3.30 ภาพถ่ายจากบอร์ด JPEG Camera ก่อนการทำงานร่วมกับเลนส์สำเร็จรูป



รูปที่ 3.31 ภาพถ่ายจากบอร์ด JPEG Camera ผ่านเลนส์สำเร็จรูปที่กำลังขยาย 8 เท่า

3.3 การออกแบบระบบการขยายภาพโดยที่ยังคงรักษารายละเอียดและความคมชัดของภาพบนพื้นฐานของการดำเนินการใน Wavelet Domain

เทคนิคในการรักษาความคมชัดและรายละเอียดของภาพบน Wavelet Domain ที่ทางคณะผู้จัดทำได้ศึกษามานั้นคือเทคนิค Dual-tree Complex Wavelet Transform หรือ DT-CWT ในการแบ่งย่อยรูปต้นฉบับความละเอียดต่ำออกเป็นช่วงความถี่ย่อยๆ จากนั้นทำการขยายรูปภาพองค์ประกอบความถี่สูงทั้ง 6 ชุดและรูปต้นฉบับความละเอียดต่ำด้วยวิธีการ Bicubic Interpolation ด้วยค่า Interpolation factor (α) เป็น α และ $\alpha/2$ ตามลำดับเช่นกัน และในขั้นสุดท้ายทำการรวมรูปภาพองค์ประกอบความถี่สูงทั้ง 6 ชุดและรูปต้นฉบับความละเอียดต่ำที่ผ่านกระบวนการ Interpolation แล้วเข้าด้วยกันโดยการแทนค่าของรูปภาพต้นฉบับที่ทำการ Interpolate เข้าไปในส่วนของชุดค่าสัมประสิทธิ์เชิงซ้อนของรูปภาพองค์ประกอบความถี่ต่ำ และใช้การแปลงย้อนกลับของ Inverse Dual-tree Complex Wavelet Transform แล้วผลลัพธ์ที่ได้คือรูปภาพความละเอียดที่สูงขึ้นด้วยขนาดที่ใหญ่ขึ้นและวัดผลประสิทธิภาพของเทคนิคดังกล่าวด้วยค่า Peak Signal-to-Noise Ration หรือ PSNR กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 แผนภาพแสดงการทำงานของเทคนิคในการรักษาความละเอียดของภาพที่ขยายแล้วด้วยวิธีการ DT-CWT

ทางคณะผู้จัดทำได้ทดสอบประสิทธิภาพและผลลัพธ์ของระบบดังกล่าวโดยการนำรูปต้นฉบับดังรูปที่ 3.33 ไปผ่านกระบวนการเพิ่มความละเอียดและขยายรูปด้วยวิธีการ Dual-tree Complex Wavelet Transform และผลที่ได้มีความคมชัดมากกว่ารูปภาพที่ผ่านการเพิ่มขนาดเพียงอย่างเดียวด้วยวิธี Interpolation จากหัวข้อการศึกษาก่อนหน้านี้ได้เห็นได้ชัด ดังรูปที่ 3.34 ซึ่งเป็นรูปภาพที่ผ่านการขยายและรักษารายละเอียดของภาพโดยใช้วิธี Dual-tree Complex

Wavelet Transform ด้วยค่า $\alpha = 2$ ที่ให้ค่า PSNR = 26.5980 ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการขยายรูปด้วยวิธี Interpolation ดังตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.33 รูปต้นฉบับแบบ Grayscale ขนาด 256 x 256 ที่ใช้ในการทดสอบการ Interpolate



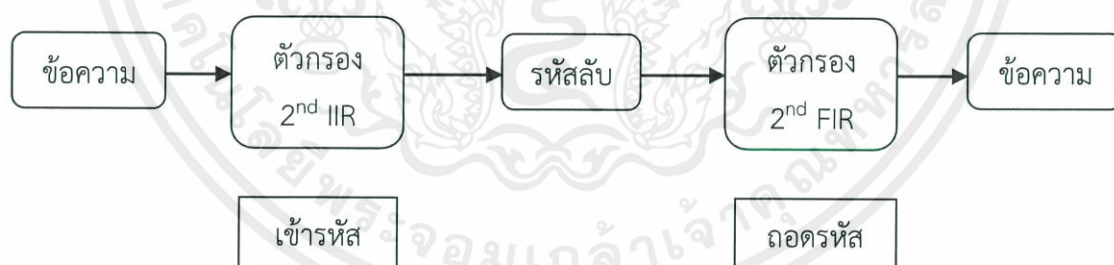
รูปที่ 3.34 รูปภาพที่ผ่านการขยายและรักษารายละเอียดของภาพด้วยวิธี Dual-tree Complex Wavelet Transform ขนาด 512 x 512

ตารางที่ 3.5 ค่า PSNR ของรูปผลลัพธ์หลังจากผ่านกระบวนการ Bicubic Interpolation และ DT-CWT ด้วย $\alpha = 2$ ขยายจากภาพขนาด 256×256 เป็น 512×512

เทคนิคการขยาย	ค่า PSNR (dB)
Nearest neighbor	23.6763
Bilinear Interpolation	24.0639
Bicubic Interpolation	25.2846
DT-CWT	26.5980

3.4 การออกแบบการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับข้อความแบบเคออดิกบนพื้นฐานของวงจรรองสัญญาณดิจิทัล

การเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับข้อความ ใช้การเข้ารหัสลับเคออส (Chaotic Cryptography) เป็นการเข้ารหัสแบบ Light Weight Engine มีการประมวลผลที่ไม่ซับซ้อน แต่เพียงพอต่อการเข้ารหัสลับกับข้อความหรือตัวอักษร โดยมีบล็อกไดอะแกรมในการทำงาน ดังรูปที่ 3.35 ซึ่งอาศัยการเกิดปรากฏการณ์เคออสในวงจรรองสัญญาณดิจิทัลมาเป็นกลไกหลักในการทำงาน ซึ่งการเกิดปรากฏการณ์เคออสในวงจรรองสัญญาณดิจิทัลต้องอยู่ในเงื่อนไขระบบเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non - linearity) และระบบเป็นแบบไม่เสถียร (Unstable)



รูปที่ 3.35 บล็อกไดอะแกรมการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับ

ในการเข้ารหัสลับนั้นจะเป็นการเข้ารหัสโดยใช้ตัวกรอง 2^{nd} order IIR และถอดรหัสด้วยตัวกรอง 2^{nd} order FIR ที่เป็นส่วนกลับของตัวกรอง 2^{nd} order IIR ในขั้นตอนเข้ารหัส โดยกฎเกณฑ์ที่ใช้ในการเข้ารหัสและถอดรหัสมีดังนี้

3.4.1 สัมประสิทธิ์ของตัวกรอง C_1 และ C_2

จากเงื่อนไขของการทำให้ระบบไม่เสถียรภาพ จะต้องมามีค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณดิจิทัลอย่างน้อย 1 ตัว อยู่ภายนอกขอบเขตพื้นที่สามเหลี่ยมเสถียรภาพ ทำให้วงจรถ่ายรหัสซึ่งเป็นแบบอิมพัลส์ไม่จำกัดเกิดตำแหน่งของโพลอยู่ภายนอกขอบเขตพื้นที่วงกลมหนึ่งหน่วย (Unit circle) และวงจรถ่ายรหัสกลับจะต้องใช้ค่าสัมประสิทธิ์เดียวกันกับวงจรถ่ายรหัสกลับ จึงจะสามารถถอดรหัสออกมาได้ตรงกับข้อความตั้งต้นที่ส่ง

3.4.2 ค่าเริ่มต้นของระบบ $y[-1]$ และ $y[-2]$

ค่าเริ่มต้นของระบบก็ถือเป็นกุญแจเช่นเดียวกัน โดยถ้าค่าเริ่มต้นของวงจรถ่ายรหัสกลับและวงจรถ่ายรหัสกลับไม่ตรงกันจะทำให้ข้อมูลคลาดเคลื่อนได้ โดยค่าเริ่มต้นเราสามารถออกแบบเป็นค่าที่อยู่ในช่วง -1 ถึง 1

ในการจำลองการทำงานผู้จัดทำได้ทดลองส่งข้อความว่า “Hello” ขั้นตอนแรกจะแปลงข้อความดังกล่าวเป็นเลขฐานสิบเพื่อเป็นอินพุตในการเข้ารหัส โดยจะแปลงข้อความเป็นเลข ASCII ก่อนจากนั้นแปลงเลข ASCII เป็นเลขฐานสอง (Binary) โดยกำหนดรูปแบบตัวเลขคือ $x.xxx \text{ xxxx}$ เมื่อ x คือจำนวนเต็ม เพื่อทำให้เกิดการล้น (Overflow) แล้วจึงแปลงเป็นเลขฐานสิบ ซึ่งมีเงื่อนไขให้อินพุตมีขนาดน้อยกว่า 1 ($|x(k)| < 1$) เนื่องจากวงจรถ่ายรหัสเป็นแบบวงจรรองสัญญาณดิจิทัลอันดับสองชนิดอิมพัลส์ไม่จำกัด (Infinite Impulse Response Second Order Filter : IIR 2nd order filter) จะได้ผลลัพธ์ที่เป็นเลขฐานสิบ แล้วจึงแปลงย้อนกลับมาเป็นข้อความ ซึ่งข้อความดังกล่าวจะเป็นข้อความที่เข้ารหัสแล้ว (Cipher Text) เมื่อทางฝั่งรับได้รับข้อมูลจากฝั่งส่งซึ่งส่งข้อมูลที่เข้ารหัสแล้ว (Cipher Text) จากนั้นแปลงเป็น ASCII และ Binary ตามลำดับ และแปลงเป็นเลขฐานสิบ เข้าเป็นอินพุตผ่านวงจรถ่ายรหัสเป็นแบบวงจรรองสัญญาณดิจิทัลอันดับสองชนิดอิมพัลส์จำกัด (Finite Impulse Response Second Order Filter: FIR 2nd order filter)

3.5 การออกแบบซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดิน

ในการออกแบบซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินนั้นทางคณะผู้จัดทำได้รับความรับผิดชอบทั้งหมดในการออกแบบและสร้างระบบของซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินเพื่อให้สอดคล้องกับส่วนการทำงานทั้ง 4 ส่วนของดาวเทียมคิวบแซท ดังที่ได้อธิบายโครงสร้างการทำงานและการส่งคืนค่ากลับของดาวเทียมคิวบแซทมายังซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินในรูปที่ 3.26 จึงได้แบ่งโหมดการทำงานของซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินเป็น 4 โหมด เพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน

3.5.1 โหมดการทำงานที่ 1

สำหรับโหมดการทำงานที่ 1 เป็นโหมดการทำงานที่ใช้เพื่อแสดงค่าข้อมูลต่างๆ จากส่วนประมวลผลและจัดการข้อมูล (OBDH) และส่วนแจกจ่ายพลังงาน (EPS) ซึ่งได้แก่ ตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์, ความเร่งทั้ง 3 แกน, ระดับความสูงรวมไปถึงสถานะของแบตเตอรี่และหน่วยให้ความร้อน (Heater) โดยมีการแสดงค่าต่างๆ ทั้งในรูปแบบตัวเลข, กราฟและแผนที่ดังรูปที่ 3.36



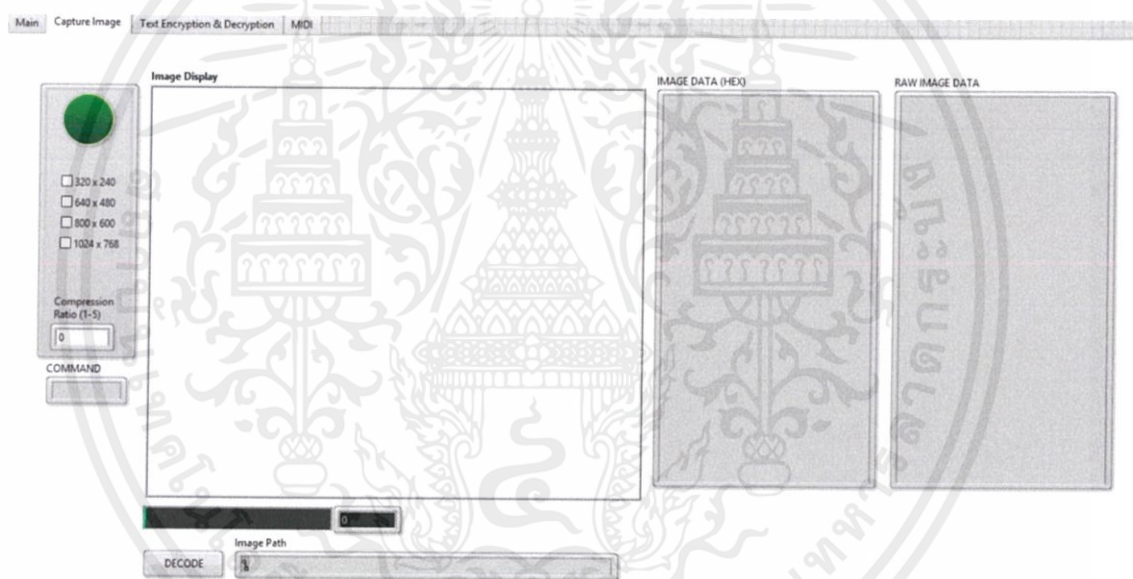
รูปที่ 3.36 หน้าต่างการทำงานของซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินโหมดที่ 1

3.5.2 โหมดการทำงานที่ 2

สำหรับโหมดที่สองจะเป็นโหมดที่เกี่ยวข้องกับภาพถ่ายทางอากาศโดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการสั่งการถ่ายภาพ และส่วนของการแสดงผลภาพถ่ายทางอากาศ แสดงดังรูปที่ 3.37

3.5.2.1 ส่วนของการสั่งถ่ายภาพ เป็นส่วนของการตั้งค่าเลือกขนาดของรูปภาพที่จะถ่าย และอัตราส่วนการอัดภาพ และปุ่มถ่ายภาพเพื่อส่งคำสั่งในการถ่ายไปที่บอร์ดกล้องบนดาวเทียมคิวบ์แซท

3.5.2.2 ส่วนของการแสดงผลภาพถ่ายทางอากาศ เป็นส่วนที่ข้อมูลต่างๆ ของรูปภาพจะแสดงผลที่ช่อง Image Display Image Data (Hex) และ RAW Image Data



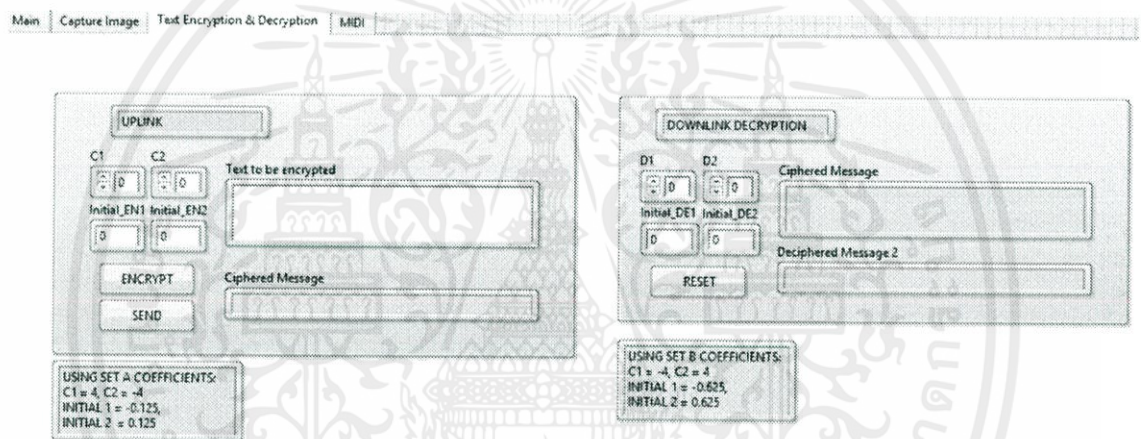
รูปที่ 3.37 หน้าต่างการทำงานของซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินโหมดที่ 2

3.5.3 โหมดการทำงานที่ 3

สำหรับโหมดการทำงานที่ 3 จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ฝั่งที่ส่งข้อมูลไปที่ดาวเทียมคิวบ์แซท (Uplink) และฝั่งที่รับข้อมูลจากดาวเทียมคิวบ์แซท (Downlink) แสดงดังรูปที่ 3.38

3.5.2.1 ฝั่งส่งข้อมูลไปที่ดาวเทียมคิวิบ์แซท (Uplink) เป็นส่วนของการเข้ารหัสลับของข้อความที่ป้อนเข้ามาที่ช่อง Text to be encrypted โดยปุ่ม ENCRYPT และส่งข้อความที่เข้ารหัส (Cipher) ซึ่งจะแสดงในช่อง Ciphertext Message ไปที่ดาวเทียมคิวิบ์แซท โดยปุ่ม SEND ซึ่งในส่วนนี้จะมีการตั้งค่าโดยการใส่ค่าสัมประสิทธิ์และค่าเริ่มต้นของชุดแรก

3.5.2.2 ฝั่งที่รับข้อมูลจากดาวเทียมคิวิบ์แซท (Downlink) เป็นส่วนของการรับข้อมูลจากดาวเทียมแล้วถอดรหัสด้วยสัมประสิทธิ์ชุดสอง จะมีช่อง Ciphertext Message แสดงข้อมูลที่เข้ารหัสลับจากดาวเทียมและช่อง Deciphered Message 2 แสดงข้อความที่ถูกถอดรหัสลับแล้วและมีปุ่ม Reset เพื่อเตรียมพร้อมการส่งข้อมูลใหม่ ซึ่งในส่วนนี้จะมีการตั้งค่าโดยการใส่ค่าสัมประสิทธิ์และค่าเริ่มต้นของชุดที่สอง

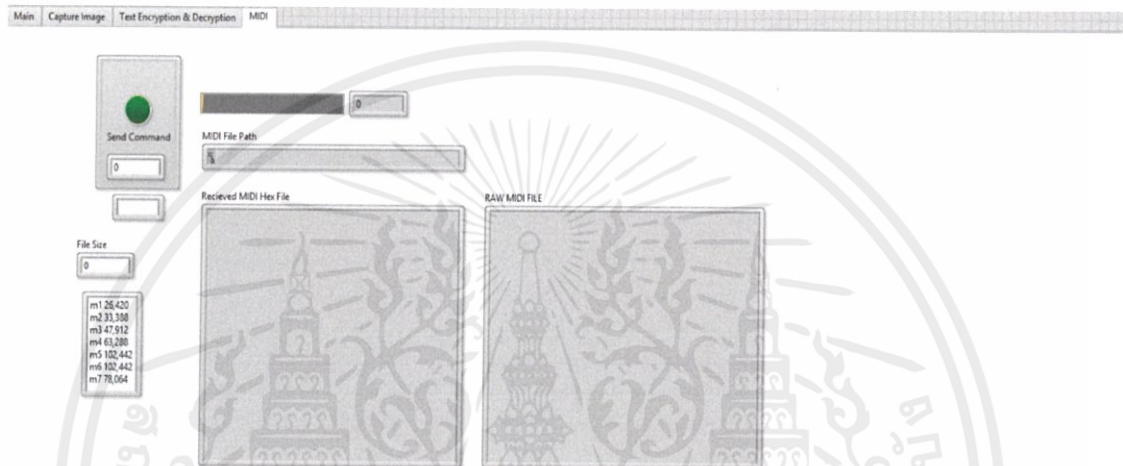


รูปที่ 3.38 หน้าต่างการทำงานของซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินโหมดที่ 3

ในการทำงานโหมดนี้จะมีชุดค่าสัมประสิทธิ์สองชุด ชุดแรก c_1 และ c_2 มีค่าเท่ากับ 4 และ -4 ตามลำดับ และค่าเริ่มต้น $y[-1]$ และ $y[-2]$ เท่ากับ -0.125 และ 0.125 ตามลำดับ และชุดที่สอง c_1 และ c_2 มีค่าเท่ากับ -4 และ 4 ตามลำดับ และค่าเริ่มต้น $y[-1]$ และ $y[-2]$ เท่ากับ -0.25 และ 0.25 ตามลำดับ ซึ่งชุดแรกจะใช้ในการเข้ารหัสลับที่ภาคพื้นดินและถอดรหัสลับที่ดาวเทียมคิวิบ์แซท และชุดสองจะใช้ในการเข้ารหัสลับที่ดาวเทียมคิวิบ์แซทและถอดรหัสลับที่ภาคพื้นดิน

3.5.4 โหมดการทำงานที่ 4

สำหรับโหมดการทำงานที่ 4 นั้นจะเป็นการแสดงผลการทำงานของดาวเทียมคิวิซ์แซทในด้านของการกระจายเสียงข้อมูลในรูปแบบเสียงเพลง โดยในซอฟต์แวร์นั้นจะเป็นการกรอกตัวเลข 1 ถึง 7 เพื่อเลือกเพลงที่ต้องการให้ดาวเทียมคิวิซ์แซทส่งกลับลงมา โดยมีหน้าต่างแสดงผลการใช้งานดังรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.39 หน้าต่างการทำงานของซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินโหมดที่ 4

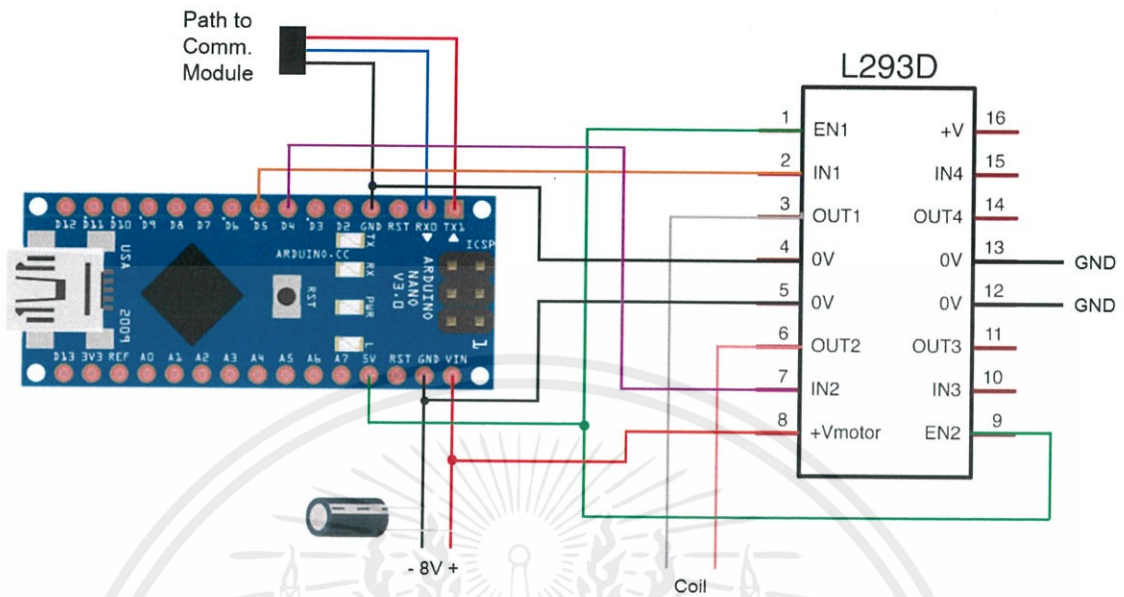
3.6 การออกแบบการควบคุมตำแหน่งการถ่ายภาพของดาวเทียมคิวิซ์แซท

ในการออกแบบการควบคุมตำแหน่งการถ่ายภาพของดาวเทียมคิวิซ์แซท ทางคณะผู้จัดทำได้วางแนวทางการออกแบบระบบไว้ 2 แนวทางได้แก่ การออกแบบโดยอาศัยหลักการทอร์คแม่เหล็ก (Magnetic Torque) จากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Coil) และการออกแบบโดยอาศัยความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กโลกและแม่เหล็กถาวร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมตำแหน่งของกล้องถ่ายรูปให้มีทิศทางชี้เข้าโลก โดยทำการออกแบบโดยอ้างอิงจากดาวเทียมคิวิซ์แซทดวงอื่นๆ ที่ได้ใช้หลักการนี้ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของขดลวดแม่เหล็กที่ใช้ในดาวเทียมคิวบ์แซทแต่ละดวง

Mission	Type	Magnetic Moment (A·m ²)	Power (mW)	Mass (g)	Size	Notes
AAUSat	Air Core		122	20	8cmx9cm	X-Sec A=10mm ² , C=356mm, R=100 ohms, Vbus=10V
AAUSat-3	Iron Core	0.03	6.8	19	200	-
CanX 2	3 Air Cores	0.1	40	100	XXX	5-35°C, built own winder
COMPASS-1	Air Core	0.085	26	19.2	400 turns	-
U Toronto GNB	Air Core	0.19	26	104	210 turns	-
GNB (2)	XXX	0.19	21	108	235 turns	-
Illinois, ION	Air Core	0.149	100	XXX	1500 turns	1.32e-8 m ² X-sectional area, f Belden heavy armored poly-thermaleze 38 AWG
Illinois, TinySat	PCB Traced	XXX	114mA	XXX	120 loops	R=96.3Ω, 0.0007 in wire
CalPoly PolySat	PCB Traced	-	300mA	-	54 turns	0.1503 m ²
Cute 1.7	3 Air Core	0.15	91	5	58.5 x 78.3 mm	2U Cubesat, 1 coil, 13mA drive current
SwissCube	3 Air Core	0.0285	-	-	-	Bdot and LQR
ISIS	Alloy Core	0.2	200	30	7 cm x 1 cm	-35 to 75°C, 1200
CubeTorquer	Iron Core	0.2	209	22	6 cm x 1 cm	Supra50 core, 1200 Euro

จากตารางที่ 3.6 ทำให้ทราบว่าโมเมนต์แม่เหล็ก (Magnetic Moment \vec{M}) ค่าที่มากที่สุดที่ดาวเทียมคิวบ์แซทสามารถสร้างได้มีค่าเท่ากับ $0.2 \text{ A}\cdot\text{m}^2$ โดยที่ความสูงจากพื้นดิน 400 กิโลเมตร ซึ่งเป็นระดับความสูงของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ (Thermosphere) โดยจะส่งดาวเทียมคิวบ์แซทขึ้นไปโคจรรอบโลกที่ชั้นบรรยากาศนี้ มีค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโลก (Magnetic field \vec{B}) เท่ากับ $2.5 \times 10^{-5} \text{ T}$ ดังนั้นในการออกแบบนี้จะอ้างอิงค่าโมเมนต์แม่เหล็กค่าที่มากที่สุด คือ $0.2 \text{ A}\cdot\text{m}^2$ และค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกที่ความสูงจากพื้นดิน 400 กิโลเมตร คือ $2.5 \times 10^{-5} \text{ T}$ โดยในการออกแบบระบบควบคุมทอร์กแม่เหล็กดังกล่าว คณะผู้จัดทำได้อาศัยหลักการของวงจร H-Bridge ผ่านไอซี L293D และเขียนโปรแกรมควบคุมด้วย Arduino ผ่านการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 3.40 ในการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขดลวดและนำไปสร้างเป็นวงจรต่อไป



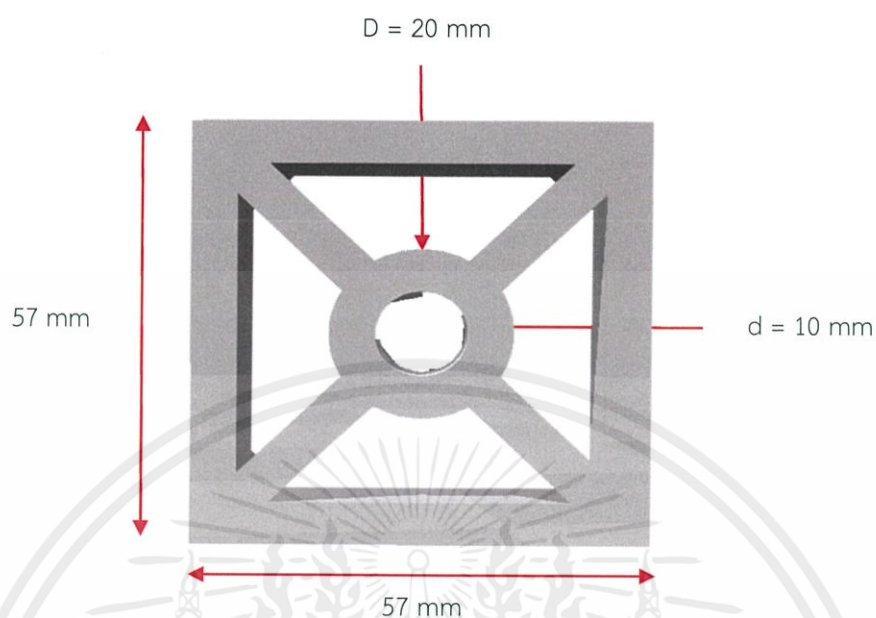
รูปที่ 3.40 Schematic แสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์หน่วยควบคุมการทรงตัวของดาวเทียม

รูปแบบการทำงานของโปรแกรม Arduino ที่ได้ออกแบบไว้จะมีรูปแบบการทำงานเมื่อป้อนค่าต่างๆ ดังตารางที่ 3.7

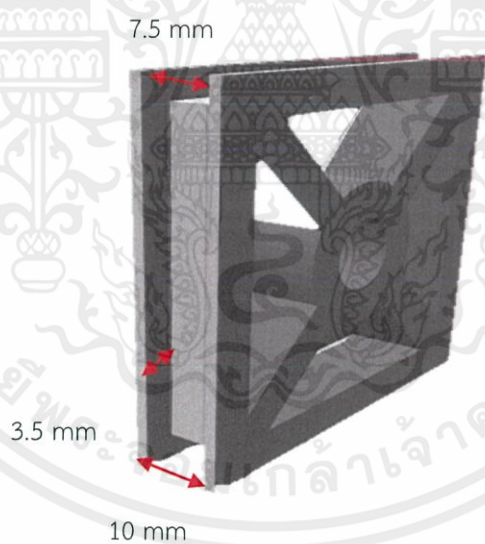
ตารางที่ 3.7 การทำงานของวงจรควบคุมการทำงานของดาวเทียมแบ่งตามรูปแบบการป้อนค่า

Input ของโปรแกรม (ป้อนผ่าน Keyboard)	การทำงานของวงจร
“+”	จ่ายไฟทิศตามเข็มนาฬิกาให้ขดลวด
“0”	หยุดจ่ายไฟให้ขดลวด
“-”	จ่ายไฟทิศทวนเข็มนาฬิกาให้ขดลวด

ในการทดลองศึกษาการรักษาสมดุลของดาวเทียมคิ่วบแซทโดยการให้หลักการของโมเมนต์แม่เหล็ก เริ่มจากการสร้างโครงเพื่อใช้ในการพันขดลวดทองแดงซึ่งมีขนาดแสดงดังรูปที่ 3.41 และรูปที่ 3.42



รูปที่ 3.41 ขนาดบริเวณด้านหน้าของโครง



รูปที่ 3.42 ขนาดบริเวณด้านข้างของโครง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การคำนวณหาจำนวนรอบในการพันขดลวดรอบโครง

จาก $\bar{M} = NiAn$ (3.2)

โดยที่ \bar{M} คือ โมเมนต์แม่เหล็ก มีค่าเท่ากับ $0.2 \text{ A} \cdot \text{m}^2$
 N คือ จำนวนรอบของการพันขดลวดรอบโครง (รอบ)
 i คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด มีค่าเท่ากับ 0.3 A
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด มีค่าเท่ากับ $0.05 \times 0.05 \text{ m}^2$
 n คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วย

แทนค่า $0.2 = N(0.3)(0.05 \times 0.05)$

$$N = \frac{0.2}{7.5 \times 10^{-4}}$$

$$N = 266.667 \text{ รอบ}$$

ดังนั้น จะได้จำนวนรอบในการพันขดลวดรอบโครง (N) เท่ากับ 266.667 รอบ ซึ่งในทางปฏิบัติจะใช้จำนวนรอบเท่ากับ 300 รอบ

2) การคำนวณหาทอร์กแม่เหล็ก

จาก $\vec{\tau} = \vec{M} \times \vec{B}$ (3.3)

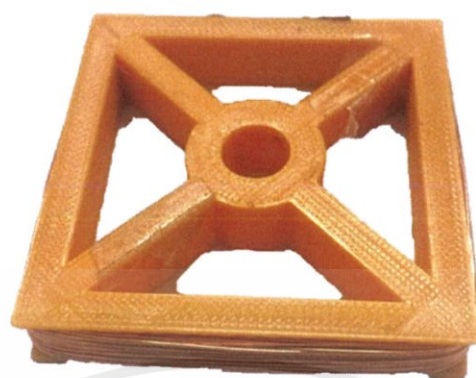
โดยที่ $\vec{\tau}$ คือ ทอร์กแม่เหล็ก ($N \cdot m$)
 \vec{M} คือ โมเมนต์แม่เหล็ก มีค่าเท่ากับ $0.2 \text{ A} \cdot \text{m}^2$
 \vec{B} คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีค่าเท่ากับ $2.5 \times 10^{-5} \text{ T}$

แทนค่า $\vec{\tau} = (0.2)(2.5 \times 10^{-5})$

$$\vec{\tau} = 5 \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m}$$

จะได้ ทอร์กแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ $5 \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m}$

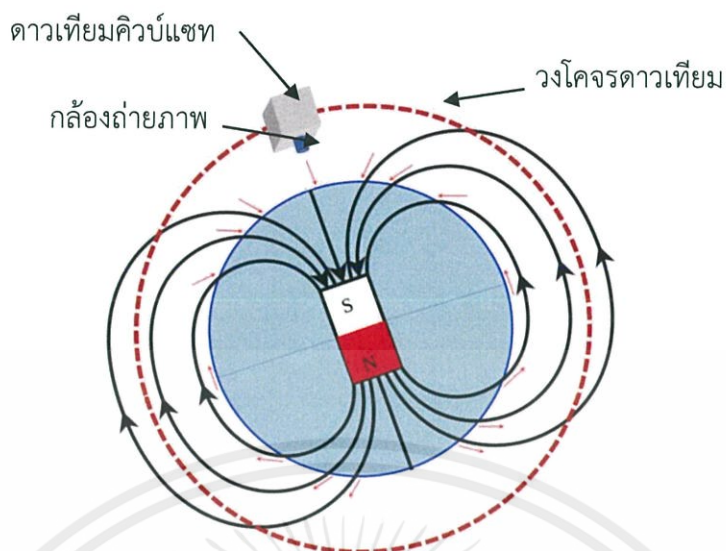
หลังจากที่ทำการสร้างโครงและคำนวณหาจำนวนรอบในการพันขดลวดรอบโครงเรียบร้อยแล้ว นำลวดทองแดงเบอร์ 32 AWG มาพันรอบโครงจำนวน 300 รอบ โดยใช้เครื่องพันขดลวด แสดงดังรูปที่ 3.43



รูปที่ 3.43 โครงที่พันขดลวดทองแดงจำนวน 300 รอบ

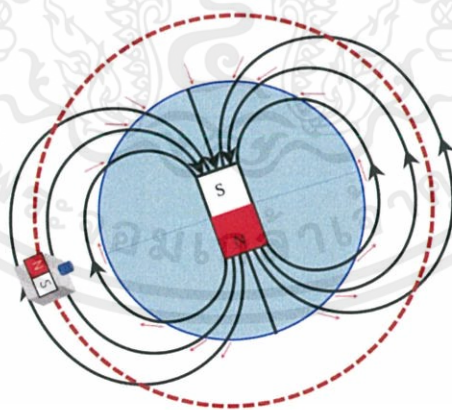
อย่างไรก็ตามวิธีการบนหลักของทอร์กแม่เหล็กนั้น หากพิจารณาเชิงความสอดคล้องกับรูปแบบของภารกิจของดาวเทียมคิวบ์แซท EM - 3 อันได้แก่ การสื่อสารและการถ่ายภาพ ไม่ได้เน้นย้ำไปในรูปแบบของดาวเทียมที่จำเป็นต้องมีความเป็นระบบเชิงกลมากเท่าใดนัก ทางคณะผู้จัดทำจึงมุ่งเน้นไปที่ประเด็นเรื่องการให้ทิศทางของกล้องหันไปที่ผิวโลกตลอดเวลา จึงนำแม่เหล็กถาวร มาใช้ในการวิเคราะห์ในเชิงความเป็นไปได้ว่าหากคณะผู้จัดทำได้ทำการติดแม่เหล็กถาวรที่ด้านใดด้านหนึ่งของดาวเทียมคิวบ์แซทจะให้ผลเป็นไปตามที่หวังไว้ดังกล่าวพิจารณาได้ดังนี้

ดาวเทียมคิวบ์แซทนั้นเป็นดาวเทียมประเภทวงโคจรต่ำหรือ Low Earth Orbit อยู่สูงจากพื้นโลกไม่เกิน 1000 กิโลเมตร เอื้อต่อการถ่ายภาพพื้นโลก นิยมใช้วงโคจรขั้วโลก (Polar Orbit) ดาวเทียมจะโคจรในแนวเหนือ-ใต้ ขณะที่โลกหมุนรอบตัวเอง ดาวเทียมจึงเคลื่อนที่ผ่านเกือบทุกส่วนของพื้นผิวโลก แสดงแนวโคจรได้ตามรูปที่ 3.44 ด้วยเส้นประสีแดง



รูปที่ 3.44 รูปแบบการวางตัวและทิศทางของสนามแม่เหล็กโลกกับวงโคจรของดาวเทียม

ในเรื่องของการติดตั้งแม่เหล็กถาวรบนดาวเทียมคิวบแซทเพื่อให้ตอบสนองวัตถุประสงค์ของภารกิจหลักในเรื่องของการถ่ายภาพนั้น จะต้องติดตั้งแม่เหล็กบนตัวดาวเทียมมีทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กโลกบนด้านที่มีกล้องติดอยู่ดังรูปที่ 3.45 เพื่อให้ทิศทางของกล้องหันเข้าสู่พื้นโลก โดยในเรื่องของการออกแบบตำแหน่งในการติดตั้งแม่เหล็กถาวรบนดาวเทียมนั้นจะต้องอยู่บนการพิจารณาตำแหน่งต่างๆ ของดาวเทียมในการโคจรรอบโลก ใดๆ ใดๆ ต่อไป



รูปที่ 3.45 ทิศทางของแม่เหล็กที่ควรติดบนตัวดาวเทียมคิวบแซท

3.7 ศึกษาการหาค่าดัชนีพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index) และการประยุกต์ใช้งานเพื่อเชื่อมโยงเข้ากับงาน Smart/Precision Agriculture

3.7.1 การวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณ (NDVI) เพื่อวัตถุประสงค์ทางการเกษตร

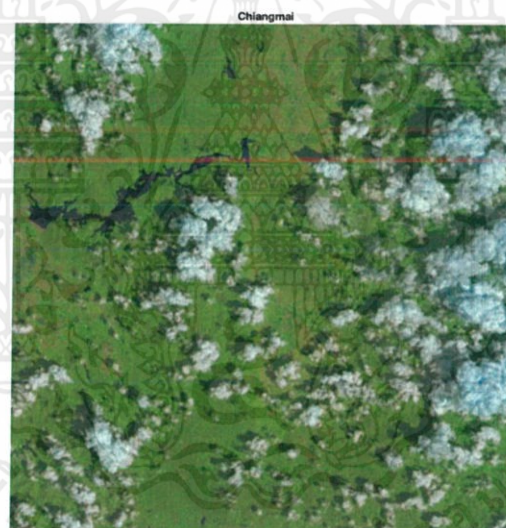
ในขั้นตอนนี้ คณะผู้จัดทำทำการทดลอง 2 การทดลอง ซึ่งเลือกภาพจาก Multispectral Camera ของดาวเทียม LANDSAT 8 มาคำนวณหาค่าดัชนีพืชพรรณ โดยทำการทดลองที่ 1 คือ เลือกภาพตัวอย่างบริเวณเดียวกัน ในพื้นที่อำเภอสองพี่น้อง จังหวัดสุพรรณบุรี ในช่วงเดือนกรกฎาคม สิงหาคม กันยายน และตุลาคม และการทดลองที่ 2 คือ เลือกภาพตัวอย่างบริเวณเดียวกัน ในพื้นที่จังหวัดนครพนม ในช่วงเดือนเมษายน และเดือนตุลาคม ซึ่งทั้ง 2 การทดลองจะนำภาพดังกล่าวมาเปรียบเทียบค่าดัชนีพืชพรรณในแต่ละเดือน เพื่อวิเคราะห์สัดส่วนของพืชพรรณที่ปกคลุมพื้นที่ตัวอย่างนั้น ซึ่งสามารถประยุกต์ในการประเมินการเกษตรได้ เช่น การประเมินการเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตร การประเมินพื้นที่การเกษตรเป็นต้น ซึ่งขั้นตอนนี้จัดทำเพื่อสร้างองค์ความรู้ในการต่อยอดของปริญญาโทรุ่นต่อไป

3.7.2 การวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณ (NDVI) เพื่อจำแนกประเภทของพื้นที่

ในขั้นตอนนี้ คณะผู้จัดทำได้เลือกในขั้นตอนนี้ คณะผู้จัดทำนำภาพจาก Multispectral Camera ของดาวเทียม LANDSAT 8 มาคำนวณหาค่าดัชนีพืชพรรณ โดยทำการทดลองนี้ เลือกภาพตัวอย่างบริเวณจังหวัดกรุงเทพมหานคร และจังหวัดเชียงใหม่ ดังรูปที่ 3.46 และ รูปที่ 3.47 ตามลำดับ เพื่อวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณเพื่อจำแนกประเภทของพื้นที่ เช่น พื้นที่พืชพรรณปกคลุมหนาแน่น แม่น้ำ เขื่อน เหม และพื้นที่ปกคลุมด้วยสิ่งปลูกสร้าง เป็นต้น



รูปที่ 3.46 พื้นที่บริเวณจังหวัดกรุงเทพมหานคร จากดาวเทียม LANDSAT 8



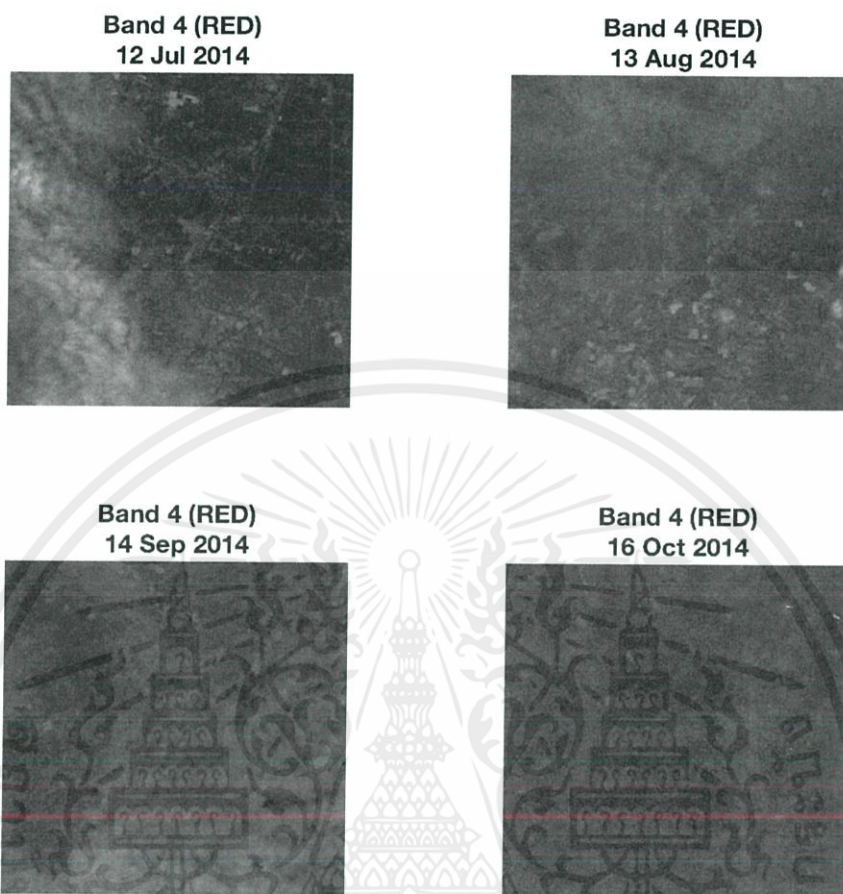
รูปที่ 3.47 พื้นที่บริเวณจังหวัดเชียงใหม่ จากดาวเทียม LANDSAT 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

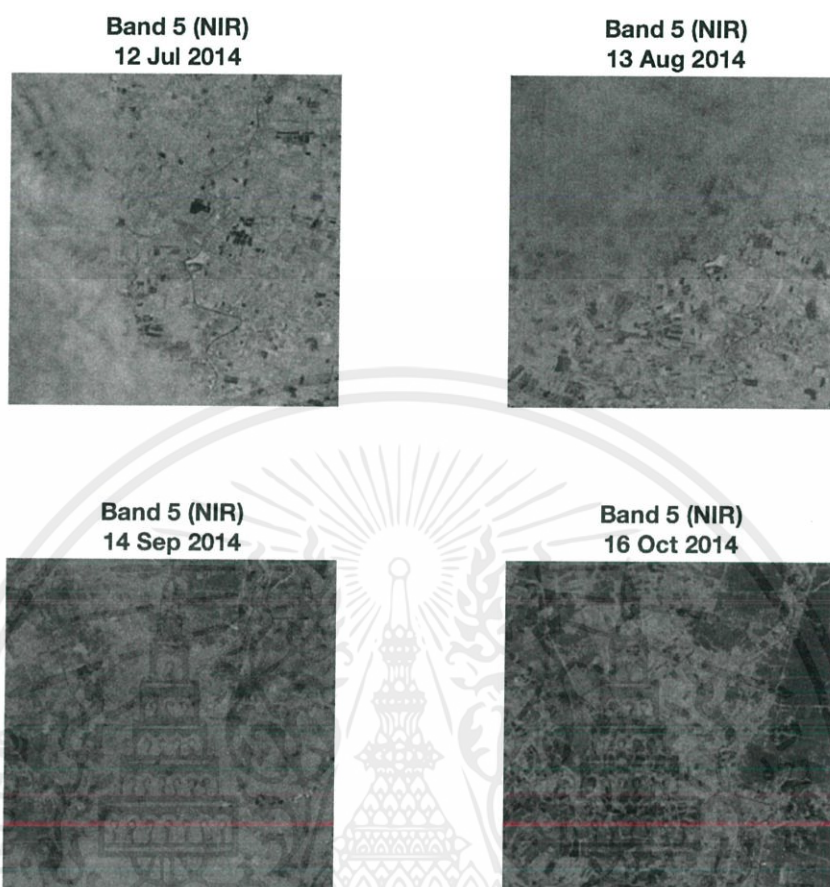
3.7.3 ศึกษาคุณลักษณะภาพจาก Multispectral Camera จากดาวเทียม LANDSAT 8

ภาพจาก Multispectral Camera จากดาวเทียม มีหลักการในการถ่ายภาพ คือ แหล่งกำเนิดแสงคือดวงอาทิตย์ทำการแผ่รังสีลงผ่านชั้นบรรยากาศ และส่งลงมาบนพื้นโลกแล้วจึงสะท้อนขึ้นไปที่เซนเซอร์ของดาวเทียม เพื่อทำการบันทึกข้อมูล ซึ่งหลักการที่สำคัญคือการบันทึกค่าการสะท้อนแสงของวัตถุหรือพื้นที่ โดยเซนเซอร์ของดาวเทียมจะทำหน้าที่บันทึกค่ารังสีที่สะท้อนมาจากวัตถุ โดยวัตถุแต่ละชนิดจะมีคุณลักษณะที่ต่างกัน ทำให้ค่าสเปกตรัมในแต่ละความยาวคลื่นมีการดูดซับและสะท้อนที่ต่างกัน ส่งผลให้วัตถุแต่ละชนิดมีค่าสเปกตรัมการสะท้อนแสงที่ต่างกัน จากหลักการดังกล่าวจึงทำให้สามารถแยกความแตกต่างของวัตถุแต่ละชนิดออกจากกันได้ [31] ซึ่งดาวเทียม LANDSAT 8 ติดตั้งระบบเซนเซอร์แบบ Multispectral ได้แก่ Operational Land Imager (OLI) ประกอบด้วย 9 ช่องสัญญาณ มีความละเอียดภาพ 30 เมตร ยกเว้นช่องสัญญาณที่ 8 มีความละเอียดภาพ 15 เมตร และ Thermal Infrared Sensor (TIRS) ประกอบด้วย 2 ช่องสัญญาณ มีความละเอียดภาพ 100 เมตร ดังนั้น ภาพจาก Multispectral Camera ของ LANDSAT 8 ประกอบด้วย 11 ช่องสัญญาณ ซึ่งจะมีการดูดซับและการสะท้อนที่แตกต่างกัน ส่งผลให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ซึ่งรวมทั้งการประยุกต์เพื่อการประเมินภาวะความแห้งแล้งในระดับพื้นที่และระดับประเทศ โดยช่องสัญญาณที่ 4 และ 5 ของดาวเทียม LANDSAT 8 จะสามารถนำไปใช้คำนวณหาค่าดัชนีพืชพรรณ หรือ Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ได้

ในหัวข้อ 3.7.1 เลือกรูปภาพจาก LANDSAT 8 โดยเป็นตัวอย่างบริเวณเดียวกัน ในพื้นที่อำเภอสองพี่น้อง จังหวัดสุพรรณบุรี ในช่วงเดือนกรกฎาคม สิงหาคม กันยายน และตุลาคม ที่คณะผู้จัดทำเลือกมาใช้ในการทดลองในการวิเคราะห์หาค่าดัชนีพืชพรรณ (NDVI) โดยใช้ภาพช่องสัญญาณที่ 4 (RED) และ 5 (NIR) ของดาวเทียม LANDSAT 8 แสดงอยู่ในรูปที่ 3.48 และรูปที่ 3.49 ตามลำดับ



รูปที่ 3.48 ภาพช่องสัญญาณที่ 4 (RED) ของ LANDSAT 8 ในพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรี



รูปที่ 3.49 ภาพช่องสัญญาณที่ 5 (NIR) ของ LANDSAT 8 ในพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรี

ภาพจาก LANDSAT 8 ซึ่งเลือกภาพตัวอย่างบริเวณเดียวกัน ในพื้นที่จังหวัดนครพนม ในช่วงเดือนเมษายน และตุลาคม ที่คณะผู้จัดทำเลือกมาใช้ในการทดลองในการวิเคราะห์หาค่าดัชนีพืชพรรณ (NDVI) โดยจะใช้ภาพช่องสัญญาณที่ 4 (RED) และ 5 (NIR) ของดาวเทียม LANDSAT 8 เท่านั้น แสดงอยู่ในรูปที่ 3.50 และรูปที่ 3.51 ตามลำดับ

Band 4 (RED)
20 April 2018

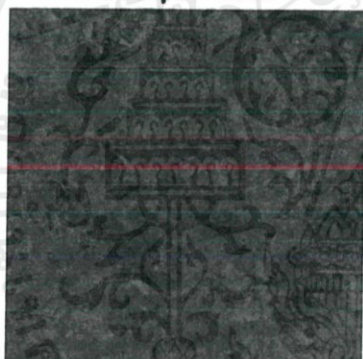


Band 4 (RED)
13 October 2018

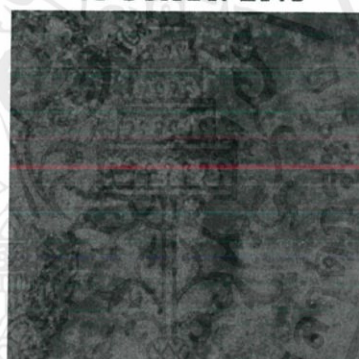


รูปที่ 3.50 ภาพช่องสัญญาณที่ 4 (RED) ของ LANDSAT 8 ในพื้นที่จังหวัดนครพนม

Band 5 (NIR)
20 April 2018



Band 5 (NIR)
13 October 2018



รูปที่ 3.51 ภาพช่องสัญญาณที่ 5 (NIR) ของ LANDSAT 8 ในพื้นที่จังหวัดนครพนม

ในหัวข้อที่ 3.7.2 ทำลักษณะเดียวกันคือ เลือกภาพจากดาวเทียม LANDSAT 8 บริเวณที่ต้องการ โดยใช้ภาพช่องสัญญาณที่ 4 (RED) และ 5 (NIR) เพื่อวิเคราะห์หาค่า NDVI

3.7.4 การหาค่าดัชนีพืชพรรณหรือ Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

ค่าดัชนีพืชพรรณ (Vegetation Index) คือ ค่าที่บอกถึงสัดส่วนของพืชพรรณที่ปกคลุมพื้นผิว โดยคำนวณจากการนำช่วงคลื่นที่เกี่ยวข้องกับพืชพรรณมาทำสัดส่วนซึ่งกันและกัน วิธีที่นิยมใช้งานกันมาก เรียกว่า Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) เป็นการนำค่าความแตกต่างของการสะท้อนของพื้นผิวระหว่างช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรด (*NIR*) กับช่วงคลื่นที่ตามองเห็นสีแดง (*RED*) มาทำสัดส่วนกับค่าผลบวกของทั้งสองช่วงคลื่นเพื่อปรับให้เป็นลักษณะการกระจายแบบปกติ [34] ดังสมการที่ (3.1)

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3.1)$$

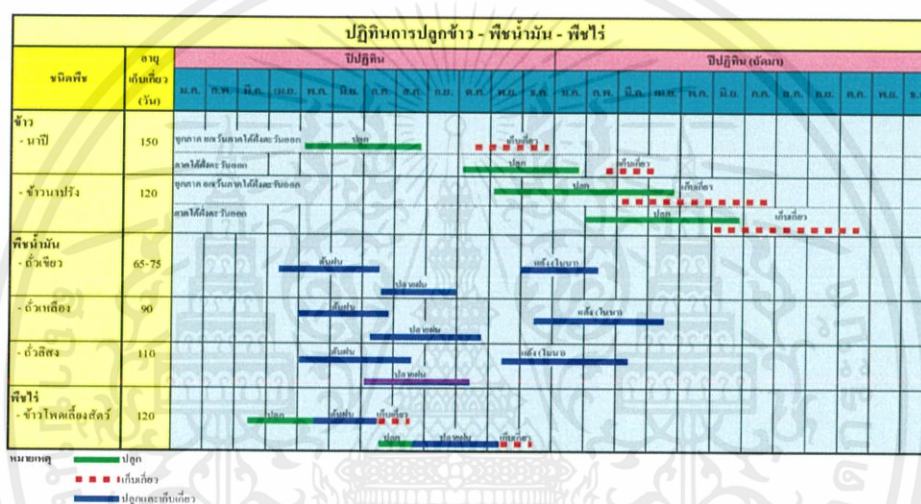
โดยที่ *NIR* = การสะท้อนในช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรด (%)

RED = การสะท้อนในช่วงคลื่นตามองเห็นสีแดง (%)

สมการดังกล่าว ทำให้ค่า NDVI มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 โดยค่า 0 หมายถึงไม่มีพืชพรรณใบเขียวอยู่ในพื้นที่สำรวจ ในขณะที่ค่า 0.8 – 0.9 หมายถึง มีพืชมกพืชพรรณใบเขียวหนาแน่นมากในพื้นที่ดังกล่าว กรณีพื้นผิวมีพืชพรรณปกคลุมจะมีค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรด (*NIR*) สูงกว่าช่วงคลื่นตามองเห็นสีแดง (*RED*) ทำให้ NDVI มีค่าเป็นบวก และในขณะที่พื้นผิวที่เป็นดินมีค่าการสะท้อนระหว่างสองช่วงคลื่นใกล้เคียงกัน ทำให้ค่า NDVI ใกล้เคียงกับ 0 ส่วนกรณีพื้นผิวที่เป็นน้ำจะมีค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรด (*NIR*) ต่ำกว่าช่วงคลื่นตามองเห็นสีแดง (*RED*) ทำให้ค่า NDVI มีค่าติดลบ [34] ดังตารางที่ 2.5

3.7.5 การเปรียบเทียบค่าดัชนีพืชพรรณ หรือ Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ของพื้นที่

ในหัวข้อที่ 3.7.1 การทดลองที่ 1 คณะผู้จัดทำเลือกพื้นที่ตัวอย่างในจังหวัดสุพรรณบุรี เนื่องจากเป็นจังหวัดที่มีผลผลิตข้าวมากที่สุดในประเทศไทย อ้างอิงจากกรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ [35] จึงเลือกภาพจาก LANDSAT 8 ที่ครอบคลุมอำเภอสองพี่น้อง จังหวัดสุพรรณบุรี ในช่วงเดือนกรกฎาคม สิงหาคม กันยายน และ ตุลาคม ซึ่งเป็นเดือนที่มีการเพาะปลูกและเก็บเกี่ยวข้าวนาปีตามปฏิทินการปลูกข้าว ดังรูปที่ 3.52 [36]



รูปที่ 3.52 ปฏิทินการปลูกข้าว พืชน้ำมัน พืชไร่

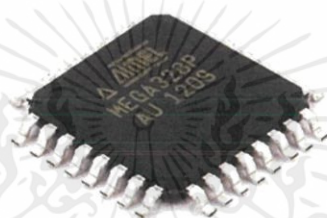
ในการทดลองที่ 2 คณะผู้จัดทำเลือกพื้นที่ตัวอย่างในจังหวัดนครพนม เนื่องจากเป็นจังหวัดหนึ่งที่ประสบภัยแล้งในประเทศไทยทุกปี จึงเลือกภาพจาก LANDSAT 8 ที่ครอบคลุมจังหวัดนครพนม ในช่วงเดือนเมษายน และเดือนตุลาคม ซึ่งเป็นช่วงฤดูร้อนและฤดูฝนของประเทศไทย [37] ตามลำดับ

เมื่อทำการบันทึกภาพ LANDSAT 8 ตามที่ต้องการแล้ว จึงนำมาคำนวณหาค่า Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ในบริเวณพื้นที่ตัวอย่างเดียวกัน โดยอาศัยโปรแกรม MATLAB แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของ NDVI ของพื้นที่แต่ละเดือนดังกล่าว มาเปรียบเทียบกัน

ในหัวข้อที่ 3.7.2 คณะผู้จัดทำได้เลือกพื้นที่ตัวอย่างในจังหวัด กรุงเทพมหานคร และจังหวัดเชียงใหม่ ที่ปกคลุมด้วยพื้นที่ที่หลากหลาย จากนั้นนำมาวิเคราะห์ ค่า NDVI แล้วเปรียบเทียบจากตารางค่า NDVI ดังตารางที่ 2.5 เพื่อจำแนกประเภทพื้นที่ต่างๆ

3.8 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.8.1 หน่วยประมวลผล ATmega328P AU ใช้ในการควบคุมการถ่ายรูปและ บันทึกภาพลงในหน่วยความจำ รวมถึงส่งข้อมูลไปยังบอร์ดอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 3.53



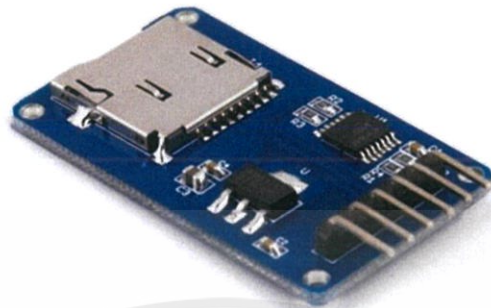
รูปที่ 3.53 หน่วยประมวลผล Atmega328P AU

3.8.2 JPEG Camera Module 2M pixel ใช้ในการถ่ายภาพและบีบอัดข้อมูลภาพ เป็นข้อมูล JPEG ส่งมาให้กับหน่วยประมวลผล Atmega328P AU แสดงดังรูปที่ 3.54



รูปที่ 3.54 JPEG Camera Module 2M pixel

3.8.3 Micro SD Card Adapter ใช้ในการเก็บไฟล์ภาพที่ถ่ายบนดาวเทียมลงบน Micro SD Card แสดงดังรูปที่ 3.55



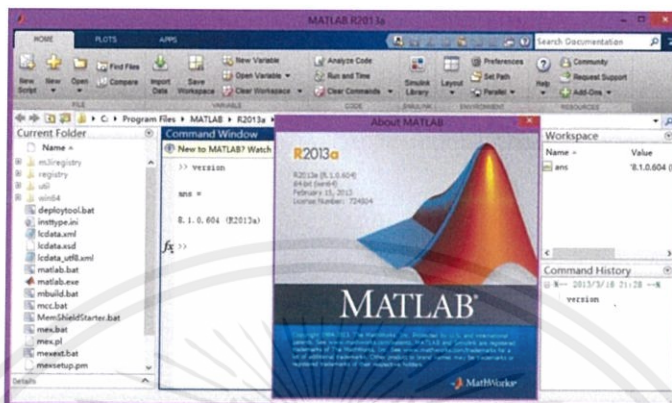
รูปที่ 3.55 Micro SD Card Adapter

3.8.4 เลนส์ขยาย ส่วนที่ใช้ในการเพิ่มอัตราขยายให้กับกล้อง JPEG Camera แสดง
ดังรูปที่ 3.56



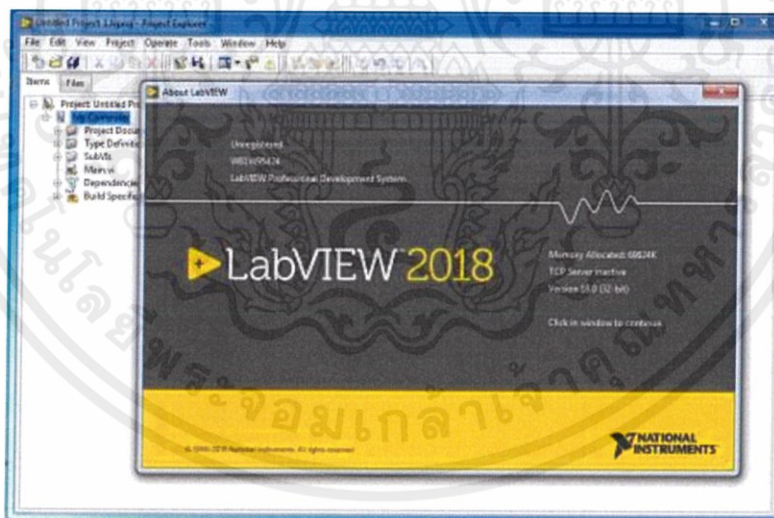
รูปที่ 3.56 เลนส์ขยาย

3.8.5 โปรแกรม MATLAB โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและจำลองการทำงานต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.57



รูปที่ 3.57 โปรแกรม MATLAB

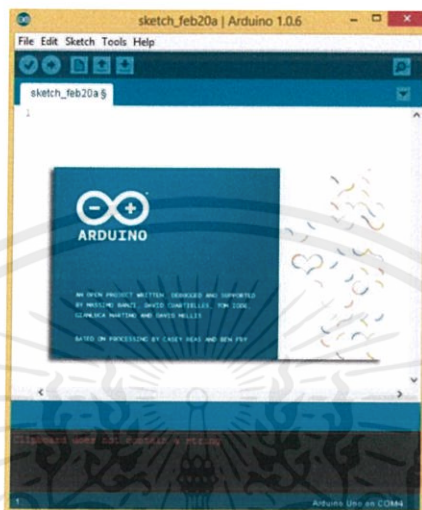
3.8.6 โปรแกรม LabVIEW ใช้ในการสร้างซอฟต์แวร์สำหรับ Ground Station ในการส่งถ่ายรูป รับข้อมูลภาพ interpolate ภาพ รวมถึงการรับข้อความเข้ารหัสจากดาวเทียม มาเพื่อถอดรหัสและแสดงผล แสดงดังรูปที่ 3.58



รูปที่ 3.58 โปรแกรม LabVIEW

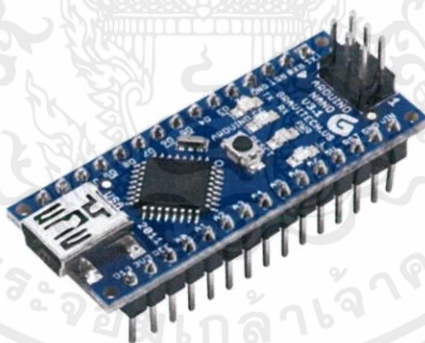
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.7 โปรแกรม Arduino ใช้ในการเขียนชุดคำสั่งเพื่อควบคุมหน่วยประมวลผล Atmega328P AU ในการส่งถ่ายภาพ ส่งข้อมูล รวมถึงการสร้างชุดคำสั่งการเข้ารหัสข้อความบนบอร์ดข้อมูล แสดงดังรูปที่ 3.59



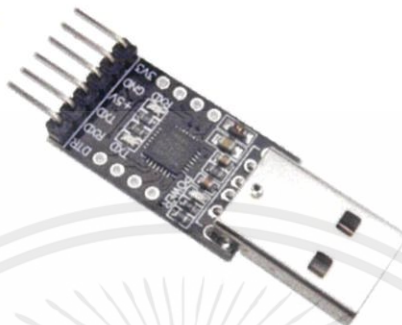
รูปที่ 3.59 โปรแกรม Arduino

3.8.8 Arduino NANO ใช้ในการเบิร์น Bootloader เพื่อให้หน่วยประมวลผล Atmega328P AU สามารถเข้าใจชุดคำสั่งที่เขียนจากโปรแกรม Arduino ได้ แสดงดังรูปที่ 3.60



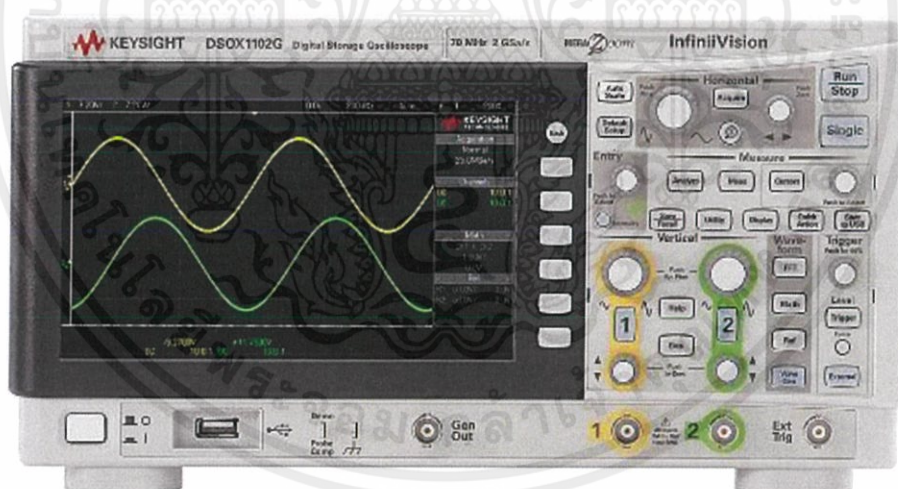
รูปที่ 3.60 Arduino NANO

3.8.9 โมดูล USB2.0 to TTL UART 6 PIN ใช้ในการอัปโหลดชุดคำสั่งจากโปรแกรม Arduino ลงบนหน่วยประมวลผล Atmega328P AU แสดงดังรูปที่ 3.61



รูปที่ 3.61 โมดูล USB2.0 to TTL UART 6 PIN

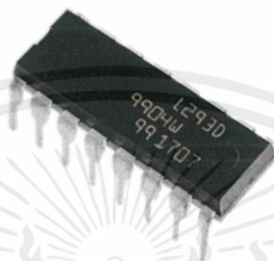
3.8.10 เครื่องออสซิลโลสโคปวัดลำดับข้อมูลอนุกรม ประเภท UART รุ่น DSOX1102G ของ Keysight Technology ใช้ในการวัดและบันทึกผลการทำงานของบอร์ด JPEG camera แสดงดังรูปที่ 3.62



รูปที่ 3.62 เครื่องวัดสัญญาณบิตไฟฟ้ารุ่น DSOX1102G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.11 ไอซี L293D เป็นอุปกรณ์ในการสร้างวงจร H-Bridge เพื่อการควบคุมชุดของอุปกรณ์ใดๆ เช่น มอเตอร์ขับเคลื่อนหรือการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขดลวด โดยสามารถออกแบบวงจรให้ควบคุมได้ 2 ชุด โดยได้ใช้ในการออกแบบวงจรควบคุมตำแหน่งถ่ายภาพของดาวเทียม แสดงดังรูปที่ 3.63



รูปที่ 3.63 ไอซี L293D

3.9 การจัดเก็บผลการทดลอง

3.9.1 การจัดเก็บผลการทดลองสำหรับการทดสอบระบบควบคุมการถ่ายภาพของดาวเทียมคิวบแซท

ในการทำงานของหน่วย Payload JPEG Camera จะต้องมีการส่งไบต์คำสั่งในรูปแบบของเลขฐานสิบหกจากหน่วยสั่งการทำงาน กล่าวคือ การทดสอบว่าชุดไบต์คำสั่งนั้นสามารถส่งไปยังบอร์ดกล้องได้จริงนั้นจึงมีความสำคัญ การจัดเก็บผลการทดลองด้วยกระบวนการวิเคราะห์ผลดังกล่าว ทางคณะผู้จัดทำได้เลือกใช้เครื่องวัดสัญญาณบิตไฟฟ้ารุ่น DSOX1102G ของ Keysight Technology ในการวัดและบันทึกผลว่าบอร์ด JPEG camera นั้นมีการส่งชุดไบต์ตอบกลับ (ACK) ตรงตามข้อมูลชุดคำสั่ง (Command) ที่ได้ระบุไว้ในเอกสารข้อมูลของบอร์ด JPEG camera

นอกจากการวัดผลการทำงานเชิงวิศวกรรมของบอร์ด JPEG camera ในระบบควบคุมการถ่ายภาพของดาวเทียมคิวบแซทแล้วนั้น การวัดผลผ่านการรับรู้ของมนุษย์ถือเป็นอีกข้อวัดผลที่ควรมี โดยทางคณะผู้จัดทำจะทำการส่งถ่ายภาพโดยใช้คำสั่งควบคุมบอร์ด JPEG camera แล้วทำการดูผลที่ได้จากการถ่ายภาพนั้นซึ่งอยู่ในรูปแบบของรูปภาพ ผ่านหน้าต่างของซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินที่ได้ออกแบบและสร้างไว้เพื่อเป็นการทดสอบการทำงานของ

ซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินไปด้วยในขณะเดียวกันทั้งในกรณีที่ใช้ JPEG Camera เพียงอย่างเดียวและในกรณีที่ถ่ายรูปผ่านเลนส์เพื่อเพิ่มกำลังขยายด้วย

3.9.2 การจัดเก็บผลการทดลองสำหรับการทดสอบระบบการรักษารายละเอียดและความคมชัดของภาพถ่ายผ่านการดำเนินการบน Wavelet Domain

จากที่ได้กล่าวไว้ว่าภาพถ่ายที่ได้จาก JPEG Camera นั้นมีความละเอียดของภาพที่ค่อนข้างจำกัดส่งผลให้ขอบเขตในการนำรูปภาพที่ได้รับนั้นไปใช้งานไม่ว่าในเชิงวิเคราะห์หรือเชิงการรับรู้ของมนุษย์นั้นถูกจำกัดไปด้วย โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการนำไปใช้ประโยชน์ที่ต้องผ่านกระบวนการขยายภาพจึงได้นำหลักการเกี่ยวกับการรักษารายละเอียดและความคมชัดของรูปภาพโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการ Interpolate บนพื้นฐานของการดำเนินการบน Wavelet Domain ผ่านแนวคิดการประมวลผล Dual-Tree Complex Wavelet Transform ดังที่ได้อธิบายหลักการไว้

การจัดเก็บผลการทดลองสำหรับหัวข้อดังกล่าวจึงว่าด้วยเรื่องการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพของระบบการประมวลผลเชิงรูปภาพนั้นคือค่า Peak Signal-to-Noise Ratio หรือ PSNR ของรูปภาพก่อนและหลังการผ่านระบบ

3.9.3 การจัดเก็บผลการทดลองสำหรับการศึกษาและวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณหรือ Normalized Difference Vegetable Index (NDVI) จาก Multispectral Camera

ในการทดลองส่วนหัวข้อนี้อาจจัดทำขึ้นมาเพื่อเป็นการสร้างองค์ความรู้ในด้านของการวิเคราะห์ค่า NDVI สำหรับการเตรียมการวางและออกแบบแนวคิดสำหรับแบบจำลองเชิงวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบแซทรุ่นต่อไปในอนาคต เนื่องจากภาพที่อำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ค่า NDVI นั้นต้องได้มาจาก Multispectral Camera ซึ่งมีราคาสูง ทางคณะผู้จัดทำจึงได้เลือกใช้ภาพจากดาวเทียม LANDSAT 8 ในการสร้างการทดลองแทน

การจัดเก็บผลการทดลองสำหรับเรื่องของค่าดัชนีพืชพรรณนั้นจะเป็นการวิเคราะห์การแปรเปลี่ยนของค่า NDVI ผ่านโปรแกรม MATLAB จากรูปถ่ายบริเวณพื้นที่หนึ่งๆ ของ Multispectral Camera โดยจะทำการจัดเก็บผลเป็นค่าเฉลี่ยของ NDVI ที่เปลี่ยนไป และจัดเก็บผลค่า NDVI เชิงตำแหน่ง

3.9.4 การจัดเก็บผลการทดลองสำหรับการทดสอบระบบการเข้ารหัส - ถอดรหัส ข้อมูลของดาวเทียมคิวบ์แซท

การจัดเก็บผลการทดลองของระบบสำหรับหัวข้อดังกล่าวนี้จะอยู่ในรูปแบบของการวัดประสิทธิภาพในการทำงานของชุดโปรแกรมที่ได้สร้างขึ้นผ่านกระบวนการ Chaotic Cryptography โดยถือเป็นระบบที่สร้างวิธีการเข้ารหัสบนพื้นฐานของความเป็น Lightweight Engine โดยแนวทางการวัดผลนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือการทดสอบความแม่นยำของชุดโปรแกรมพื้นฐานผ่านการทำงานบนโปรแกรม MATLAB โดยใช้ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในรูปแบบข้อความและข้อมูลเสียงเพลง ในการทดสอบรูปแบบต่อมาจะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบเข้ารหัสลับ - ถอดรหัสลับดังกล่าวบนรูปแบบของการจัดการลำดับการเข้ารหัสลับ - ถอดรหัสลับข้อมูลที่คล้ายกับการสื่อสารระหว่างดาวเทียมคิวบ์แซทกับสถานีภาคพื้นดิน

การจัดการข้อมูลในรูปแบบหลังนั้นจะเป็นการเข้ารหัสข้อมูลประเภทข้อความด้วยชุดสัมประสิทธิ์การเข้ารหัสชุด A บนซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดิน จากนั้นจะถูกส่งไปยังดาวเทียมคิวบ์แซท (หรือหน่วยการประมวลผลอีกเครื่องหนึ่งสำหรับการทดสอบบนพื้นดิน) และถอดรหัสด้วยสัมประสิทธิ์ชุดเดียวกันบนดาวเทียมคิวบ์แซท หลังจากนั้นหน่วยการประมวลผลบนดาวเทียมคิวบ์แซทจะเข้ารหัสด้วยสัมประสิทธิ์ชุด B แล้วส่งกลับลงมายังภาคพื้นดินเพื่อทำการถอดรหัสด้วยชุดสัมประสิทธิ์ชุด B เช่นกัน

3.9.5 การจัดเก็บผลการทดลองการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งการถ่ายภาพของดาวเทียม

สำหรับการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งการถ่ายภาพของดาวเทียมนั้น จะอยู่บนพื้นฐานของการพิจารณาความเหมาะสมของรูปแบบการใช้ประโยชน์จากแม่เหล็กอันได้แก่ระบบที่ใช้พลังงานและไม่ใช้พลังงาน สำหรับระบบที่ใช้พลังงานนั้นจะถูกใช้งานผ่านขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งก่อให้เกิดทอร์กแม่เหล็ก ดังนั้นการจัดเก็บผลการทดลองจะเป็นการนำขดลวดเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าไปทำการทดสอบความสามารถในการก่อให้เกิดทอร์กต่อแบบจำลองดาวเทียมในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเสมือน สำหรับระบบที่ไม่ใช้พลังงานนั้นจะใช้งานผ่านการติดแม่เหล็กถาวรไปที่ตัวดาวเทียมและพิจารณาถึงผลความเป็นไปได้เมื่อทำการติดตั้งแม่เหล็กในด้านและด้วยขั้วแม่เหล็กที่เหมาะสมอันจะเป็นพื้นฐานในการสร้างแนวคิดเพื่อออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งของดาวเทียมต่อไปในอนาคต

บทที่ 4

ผลการทดลอง

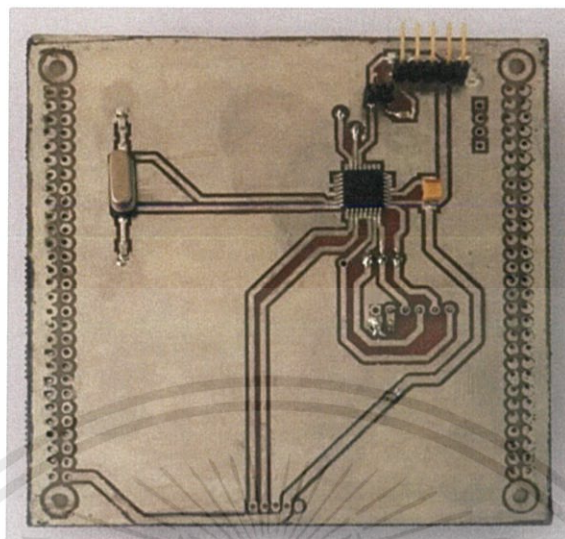
ผลการทดสอบส่วนการทำงานของการทำงานของการพัฒนาไปสู่แบบจำลองดาวเทียมคิวบแซท EM – 3 ที่สามารถใช้งานในอวกาศได้สมบูรณ์นั้น แบ่งออกเป็น 5 ส่วน คือ ผลการสร้างและการสื่อสารกับบอร์ด JPEG Camera, ผลทดสอบการขยายภาพโดยที่ยังรักษารายละเอียดและความคมชัดของภาพ, ผลการทดสอบการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับผ่านกระบวนการเคออดิกสำหรับข้อมูลประเภทข้อความ, ผลการทดสอบการควบคุมตำแหน่งการถ่ายรูปบนอวกาศโดยอาศัยหลักการทอร์คแม่เหล็ก รวมไปถึงการใช้แม่เหล็กถาวรและผลการทดสอบวิเคราะห์หาค่าดัชนีพืชพรรณ (NDVI) ทั้งนี้เพื่อเป็นการสร้างองค์ความรู้เพื่อต่อยอดพัฒนาแบบจำลองดาวเทียมคิวบแซทรุ่นต่อไปในอนาคตให้สามารถใช้งานในอวกาศได้จริง

4.1 ผลการออกแบบและการทดสอบระบบควบคุมการถ่ายภาพของบอร์ด JPEG Camera

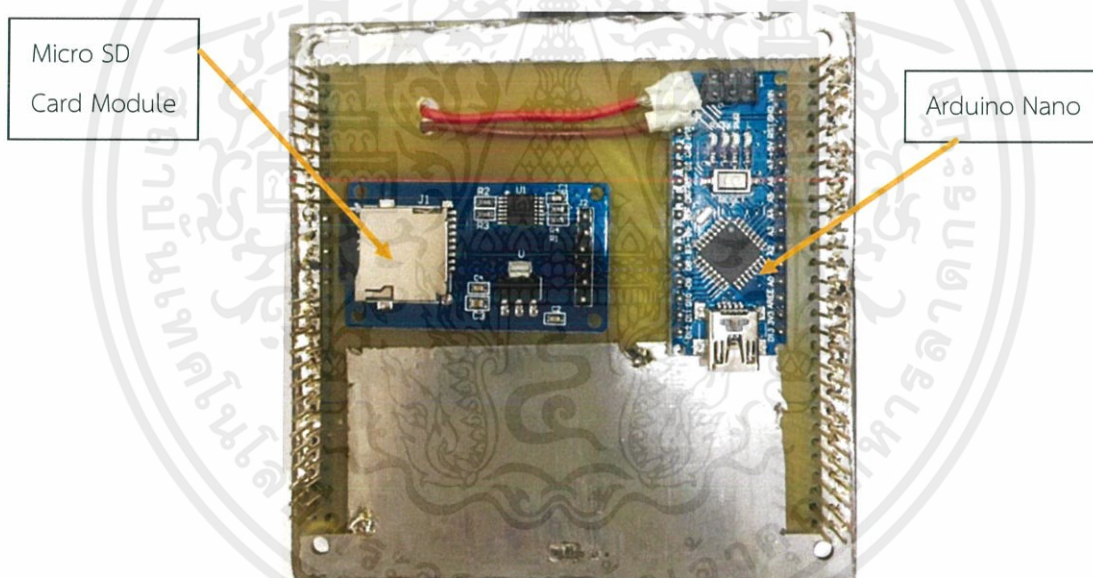
บอร์ด JPEG Camera เป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาไปสู่ดาวเทียมคิวบแซท EM – 3 โดยบอร์ด JPEG Camera จะสามารถรับคำสั่งการถ่ายภาพ และส่งข้อมูลภาพไปยังซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินได้

4.1.1 ผลการสร้างออกแบบบอร์ด JPEG Camera โดยใช้หน่วยประมวลผลขนาดเล็ก

คณะผู้จัดทำได้ออกแบบให้บอร์ด JPEG Camera ใช้หน่วยประมวลผลบนบอร์ดแทนการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สำเร็จรูปที่มีขนาดใหญ่ เพื่อลดน้ำหนักและพื้นที่สำหรับบอร์ด JPEG Camera ดังรูปที่ 4.1 โดยบอร์ด JPEG Camera ที่ใช้ Arduino Nano ซึ่งมีขนาดใหญ่แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 บอร์ด JPEG Camera ที่ใช้หน่วยประมวลผลบนบอร์ด



รูปที่ 4.2 บอร์ด JPEG Camera ที่ใช้ Arduino Nano

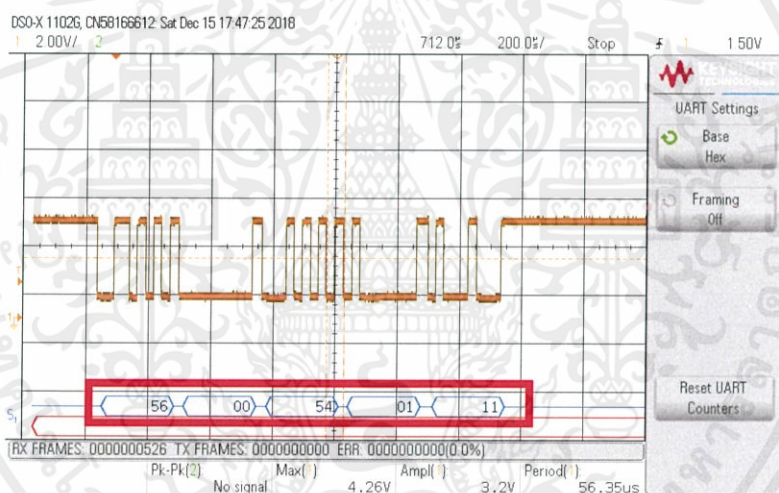
4.1.2 ผลการทดสอบการสั่งการและการควบคุมบอร์ด JPEG Camera

ผลการทดสอบการสื่อสารของบอร์ด JPEG Camera ในการสั่งถ่ายภาพขนาดต่างๆ ผ่านซอฟต์แวร์ที่ใช้เป็นพื้นฐานในการสร้างซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดิน โดยการใช้ออสซิลโลสโคปวัดลำดับข้อมูลอนุกรมประเภท UART รุ่น DSOX1102G ของ Keysight

Technology วัตสัญญาณที่ขา UART ของ JPEG Camera แล้วทำการเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งจากตารางที่ 2.2 ได้ผลดังรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.7

Image Size	160x120	56 00 54 01 22
	320x240	56 00 54 01 11
	640x480	56 00 54 01 00
	800x600	56 00 54 01 1D
	1024x768	56 00 54 01 1C
	1280x960	56 00 54 01 1B
	1600x1200	56 00 54 01 21

รูปที่ 4.3 คำสั่งพื้นฐานของการเลือกขนาดรูปภาพกับชุดคำสั่งของ JPEG Camera

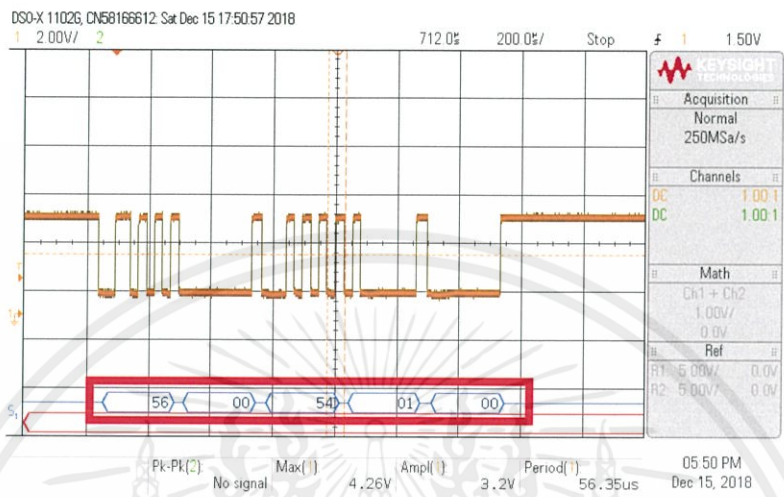


รูปที่ 4.4 ผลการวัดสัญญาณชุดคำสั่งของ JPEG Camera

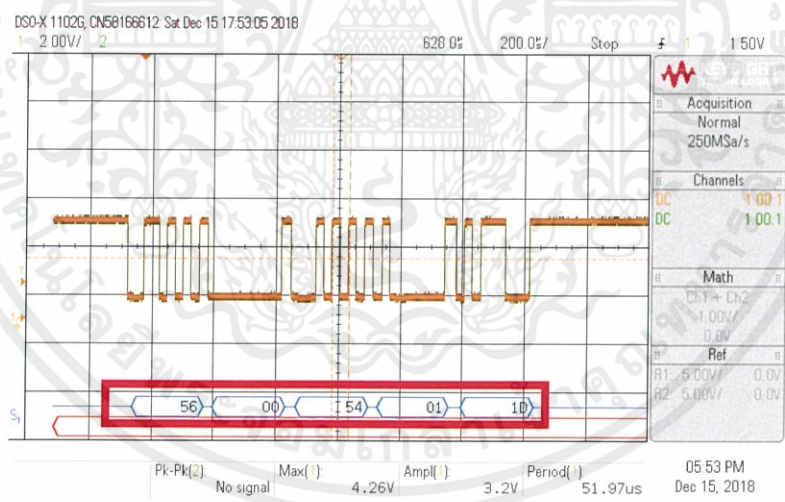
ในการสั่งถ่ายภาพขนาด 320x240 โดยใช้ฮอสซิลโลสโคป

สัญญาณไฟฟ้า (เส้นสีส้ม) ที่แสดงในรูปที่ 4.4 นั้นจะอยู่ในรูปข้อมูลประเภท บิตหรือค่าเลขฐานสอง ซึ่งจะนับจากฝั่งขวาสุดแทนบิตที่มีค่านัยสำคัญมากที่สุดหรือ Most Significant Bit (MSB) และบิตฝั่งซ้ายสุดจะแทนบิตที่มีค่านัยสำคัญน้อยที่สุดหรือ Least Significant Bit (LSB) โดยจะแบ่งช่วงการแปลงเป็นเลขฐานสิบหกทีละ 4 บิตทำเช่นนี้ตลอดช่วงสัญญาณแล้วผลลัพธ์ที่ได้นั้นจะมีค่าเป็นไปตามค่าของเลขฐานสิบหกที่ปรากฏอยู่ด้านล่าง

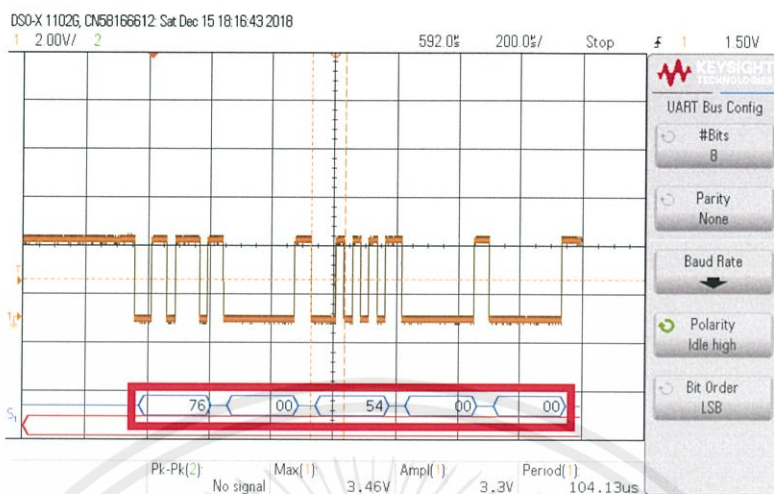
ของรูปที่ 4.4 (ในกรอบสีแดง) ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถนำไปตรวจสอบกับ Datasheet ของระเบียบการสั่งการของ JPEG Camera ดังรูปที่ 4.3 ตามกรณีของขนาดรูปภาพที่ส่งถ่ายกรณีต่างๆ



รูปที่ 4.5 ผลการวัดสัญญาณชุดคำสั่งของ JPEG Camera ในการสั่งถ่ายภาพขนาด 640x480 โดยใช้ฮอสซิลโลสโคป



รูปที่ 4.6 ผลการวัดสัญญาณชุดคำสั่งของ JPEG Camera ในการสั่งถ่ายภาพขนาด 800x600 โดยใช้ฮอสซิลโลสโคป



รูปที่ 4.7 ผลการวัดสัญญาณการตอบกลับ (ACK) ของ JPEG Camera ในการสั่งถ่ายภาพทุกขนาดโดยใช้ข้อซิลโลสโคป

ในการทดสอบการสั่งการและควบคุมบอร์ด JPEG Camera บนซอฟต์แวร์ภาคพื้นดินนั้นได้ทดสอบการส่งคำสั่งการผ่าน LabVIEW โหมดการทำงานที่ 1 เพื่อให้บอร์ด JPEG Camera ถ่ายรูปตามที่ต้องการ แสดงดังรูปที่ 4.8 และได้ภาพถ่ายดังรูปที่ 4.9 โดยในกรณีนี้คือต้องการถ่ายภาพขนาด 640 x 480 และอัตราการบีบอัด 10% (Case 1)



รูปที่ 4.8 หน้าต่างโหมดการทำงานที่ 1 เมื่อบอร์ด JPEG Camera ถ่ายภาพ

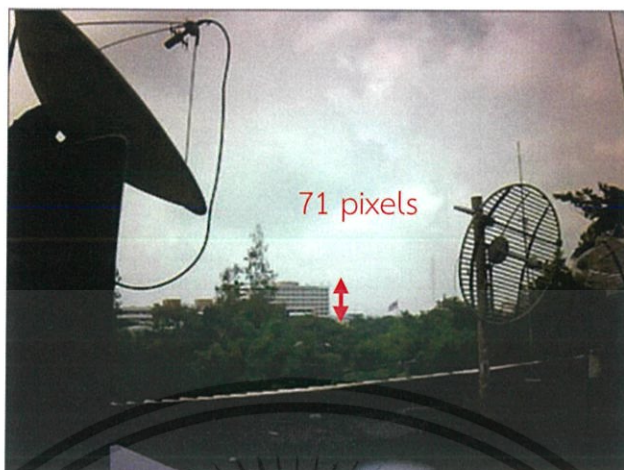


รูปที่ 4.9 รูปถ่ายที่ได้จากการส่งถ่ายภาพที่ความละเอียด 640 x 480 และ อัตราการบีบอัด 10% (Case 1)

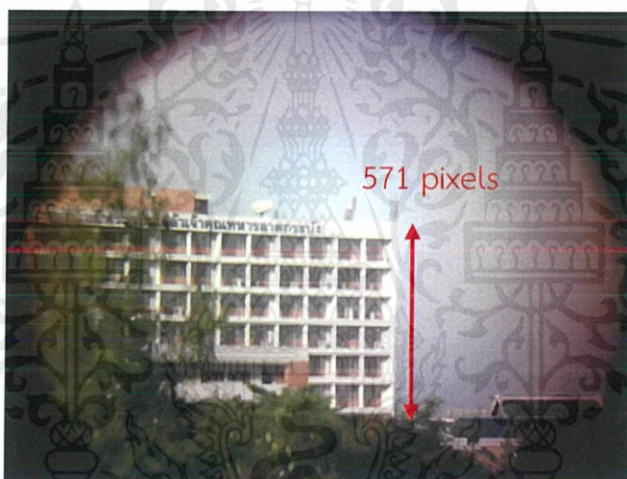
4.1.3 ผลการทดสอบการเพิ่มกำลังขยายของภาพที่ได้จากบอร์ด JPEG Camera

การเพิ่มกำลังขยายของภาพโดยอาศัยเลนส์สำเร็จรูปกำลังขยาย 8 เท่า โดยมีจุดประสงค์เพื่อต้องการให้ภาพที่ได้จากบอร์ด JPEG Camera นั้น มีกำลังขยายสูงเพื่อสอดคล้องกับเป้าหมายในการใช้งานด้านการถ่ายภาพดาวเทียม นอกจากนี้จำเป็นต้องจำกัดขนาดและความยาวของเลนส์สำเร็จรูปดังกล่าวเพื่อให้มีพื้นที่การแทรกสอดหน่วยถ่ายภาพบน CubeSat เพียงพอต่อขนาดของดาวเทียมซึ่งมีขนาด 10 ซม. x 10 ซม. x 10 ซม. โดยผลที่ได้จากการถ่ายภาพก่อนและหลังการใช้งานถ่ายภาพร่วมกับเลนส์ดังกล่าวเป็นไปตามรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ซึ่งพบว่าเมื่อนับจำนวนพิกเซลของวัตถุในรูป (ในกรณีนี้คืออาคาร 6 ชั้น) พบว่าหลังจากติดเลนส์เพื่อเพิ่มกำลังขยายแล้ว มีจำนวนพิกเซลเพิ่มขึ้นมา 8 เท่า ดังนี้

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{571}{71} = 8.04 \approx 8$$



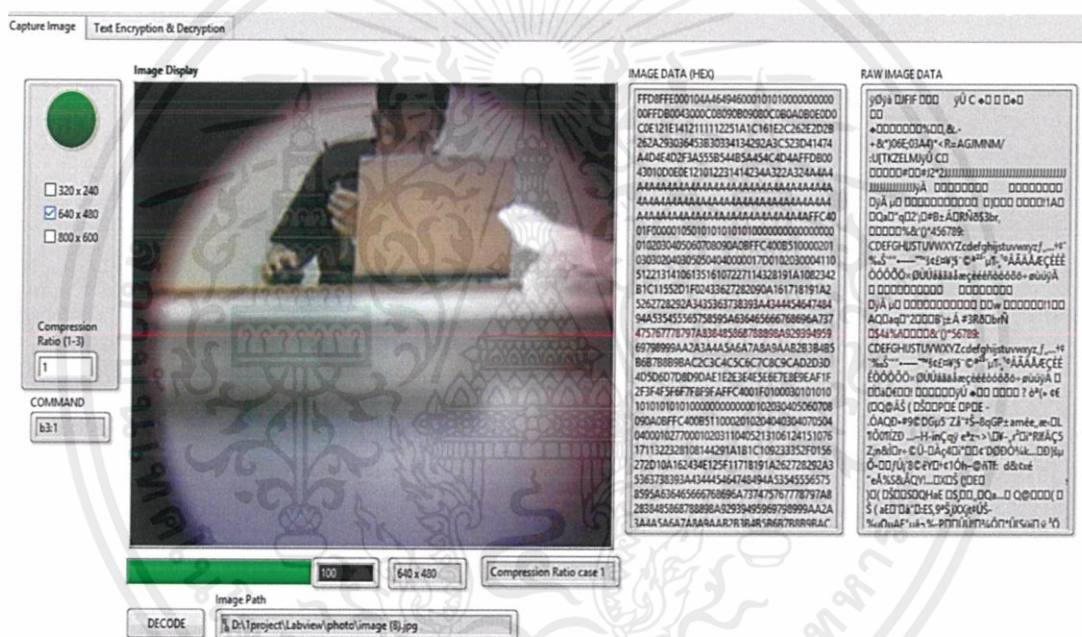
รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายจากบอร์ด JPEG Camera ก่อนการทำงานร่วมกับเลนส์สำเร็จรูป



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายจากบอร์ด JPEG Camera ผ่านเลนส์สำเร็จรูปที่กำลังขยาย 8 เท่า

4.1.4 ผลการทดลองส่งคำสั่งถ่ายภาพและรับข้อมูลภาพถ่ายระหว่างซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินและบอร์ด JPEG Camera

สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองโดยส่งคำสั่งการถ่ายภาพตามรูปแบบที่ได้ระบุไว้ในหัวข้อ 3.1.4 โดยใช้เสาอากาศย่าน UHF ร่วมกับโมดูล LoRa6100AES ผ่านการใช้งานบนซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินที่ได้ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรม LabVIEW พบว่าซอฟต์แวร์สามารถส่งคำสั่งถ่ายรูปลูกออกไปยังเสาอากาศและรับข้อมูลภาพทั้งในรูปแบบเลขฐานสิบหกและอักขระ ASCII มาแสดงผลบนซอฟต์แวร์พร้อมทั้งถอดรหัสข้อมูลดังกล่าวได้เป็นไฟล์ภาพนามสกุล .JPG ได้ตามที่คาดการณ์ไว้และบันทึกรูปภาพลงฐานข้อมูลอย่างอัตโนมัติดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 หน้าต่างที่แสดงผลข้อมูลรูปภาพที่ผ่านการส่งถ่ายข้อมูลและรับค่าทางอากาศ

4.2 ผลการทดสอบการขยายภาพโดยที่ยังคงรักษารายละเอียดและความคมชัดของภาพผ่านการดำเนินการบน Wavelet Domain

จากที่คณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษากรรมวิธีในการรักษารายละเอียดและความคมชัดของรูปภาพในเทคนิคการประมวลผลของ Dual-tree Complex Wavelet Transform เพื่อนำรูปถ่ายจากกล้อง JPEG Camera มาทำการขยายและยังคงรักษาความคมชัดของรูปถ่ายนั้นอยู่เพื่อประยุกต์ใช้และเตรียมการสำหรับการประมวลผลของรูปถ่ายจากดาวเทียมที่สถานีภาคพื้นดิน

สาเหตุที่นำเทคนิคการประมวลผลแบบ Dual-tree Complex Wavelet Transform เนื่องจากเป็นการประมวลผล Interpolation บนโดเมนเวฟเล็ตซึ่งเป็นรูปแบบการประมวลผลที่ลดผลกระทบจาก Interpolation ในโดเมนพื้นที่หรือ Spatial Domain ในแง่ของการมีคุณสมบัติความเป็นตัวกรองความถี่ต่ำผ่านหรือ Low Pass Filter ไม่ว่าจะเป็นเทคนิค Interpolation ในรูปแบบของ Nearest Neighbor, Bilinear หรือ Bicubic Interpolation ก็ตาม โดยได้ทำการทดลองขยายรูปภาพด้วย 3 วิธีดังกล่าวกับรูปภาพจำนวน 4 รูปดังรูปที่ 4.13 (ก), รูปที่ 4.13 (ข), รูปที่ 4.13 (ค) และ รูปที่ 4.13 (ง)

ในขั้นตอนการพิจารณานั้นได้ทำการย่อรูปทั้ง 4 รูปลง 4 เท่า แล้วทำการขยายด้วยค่า Interpolation Factor หรือ α มีค่าเท่ากับ 4 ผ่านขั้นตอน Nearest Neighbor, Bilinear และ Bicubic Interpolation ซึ่งได้ผลลัพธ์ของรูปภาพดังรูปที่ 4.14, รูปที่ 4.15 และ รูปที่ 4.16 ตามลำดับ จากนั้นจะนำรูปภาพทั้ง 4 รูปไปผ่านขั้นตอนการขยายและรักษาความคมชัดด้วยเทคนิค Dual-tree Complex Wavelet Transform เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ ได้ผลเป็นรูปที่ 4.17 แล้วตรวจสอบประสิทธิภาพของผลลัพธ์สำหรับแต่ละวิธีการที่ได้ผ่านค่า Peak Signal to Noise Ratio หรือ PSNR ได้ผลดังตารางที่ 4.1



(ก)



(ข)

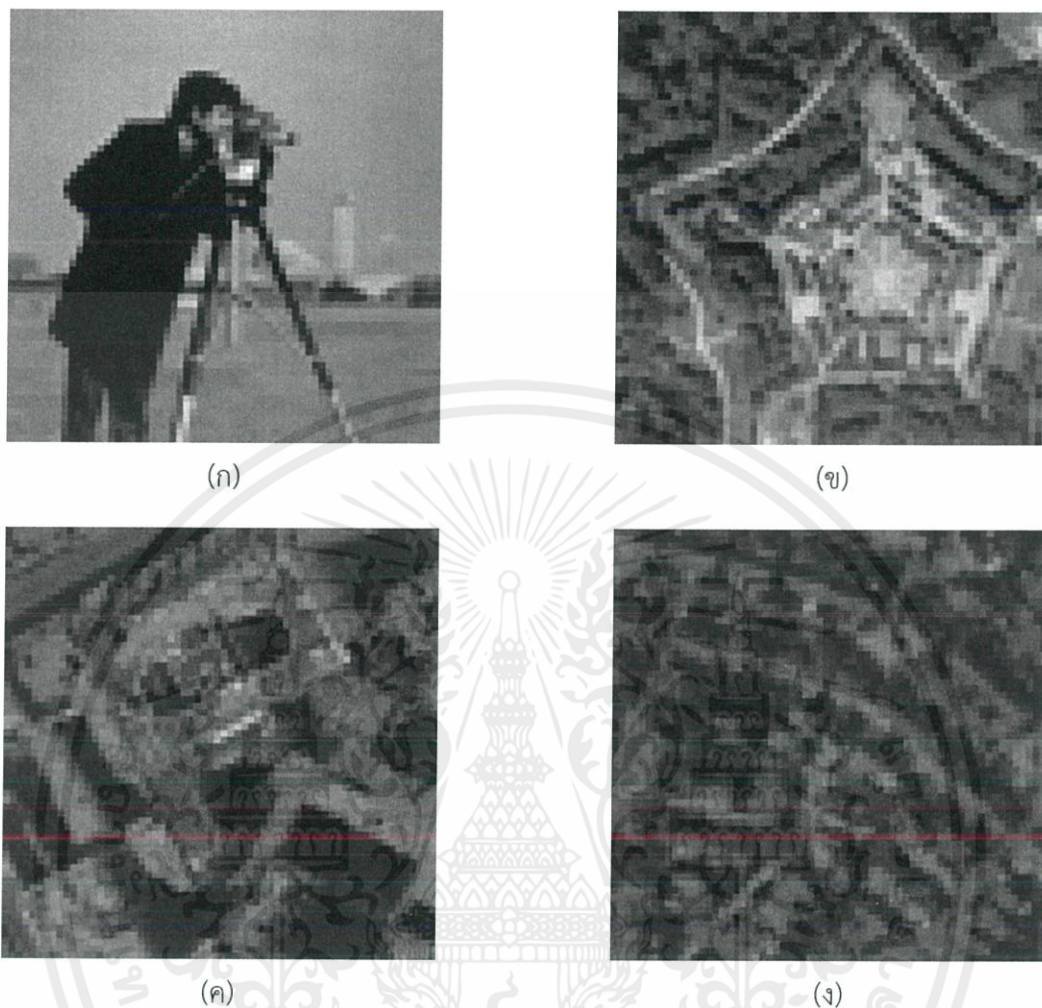


(ค)

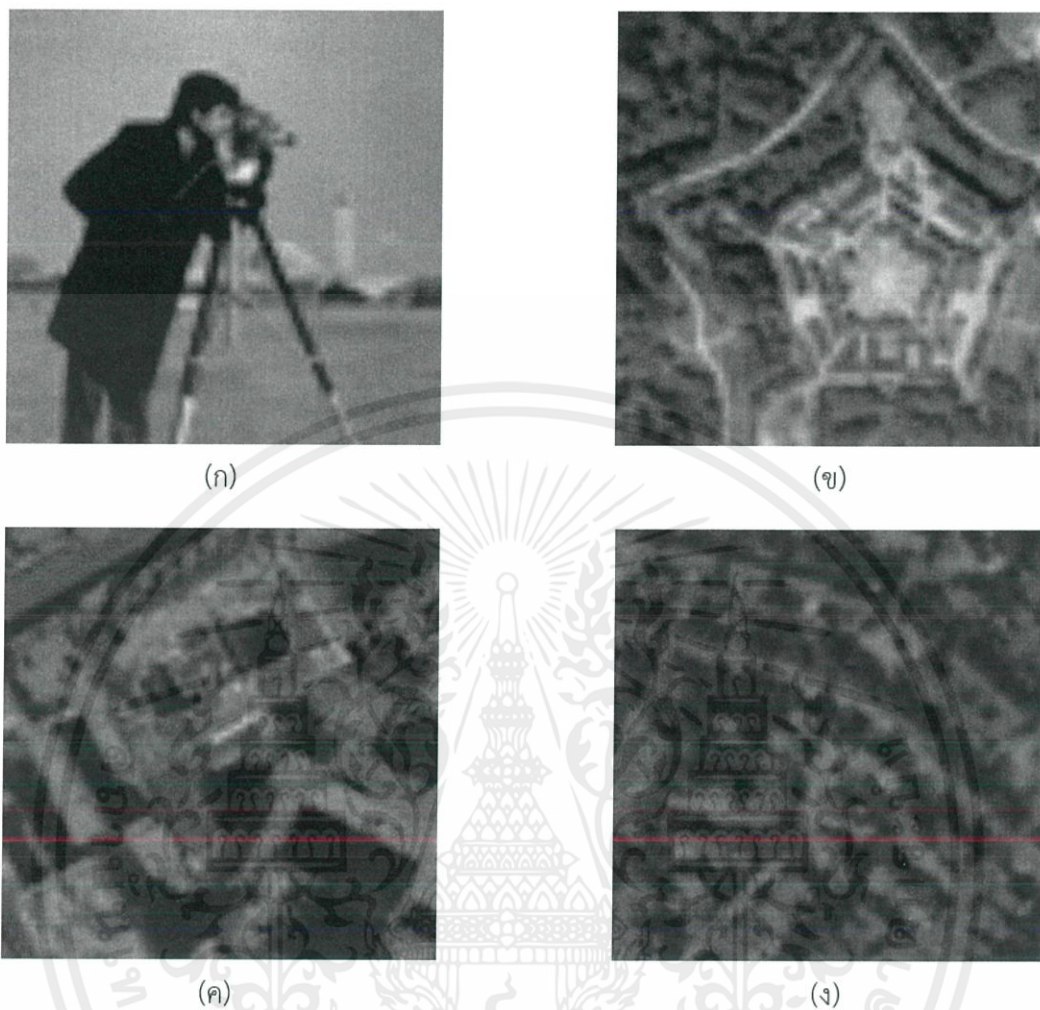


(ง)

รูปที่ 4.13 รูปภาพตัวอย่างที่ได้นำมาทำการทดสอบความสามารถในการขยายด้วยวิธี Nearest Neighbor, Bilinear และ Bicubic Interpolation



รูปที่ 4.14 ผลลัพธ์รูปภาพตัวอย่างที่ได้นำมาทำการทดสอบความสามารถในการขยายด้วยวิธี Nearest Neighbor



รูปที่ 4.15 ผลลัพธ์รูปภาพตัวอย่างที่ได้นำมาทำการทดสอบความสามารถในการขยายด้วยวิธี
Bilinear Interpolation



รูปที่ 4.16 ผลลัพธ์รูปภาพตัวอย่างที่ได้นำมาทำการทดสอบความสามารถในการขยายด้วยวิธี
Bicubic Interpolation

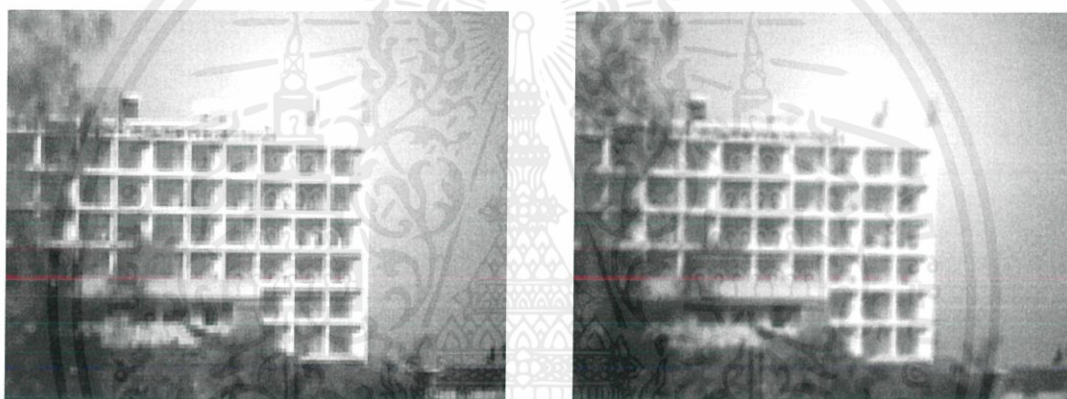
ตารางที่ 4.1 ค่า PSNR ของรูปผลลัพธ์ตัวอย่างหลังจากผ่านกระบวนการ Nearest Neighbor, Bilinear, Bicubic Interpolation และ DT-CWT ด้วย $\alpha = 4$

	PSNR (dB)			
	(ก)	(ข)	(ค)	(ง)
Nearest Neighbor Interpolation	21.6528	22.3718	22.3017	24.7447
Bilinear Interpolation	22.2529	23.2358	22.7620	25.3572
Bicubic Interpolation	22.6797	24.3442	23.3333	25.9670
DT-CWT	28.3777	26.3453	28.7943	31.0037

จากการเปรียบเทียบรูปภาพที่ผ่านกระบวนการ Nearest Neighbor, Bilinear และ Bicubic Interpolation กับ Dual-tree Complex Wavelet Transform ดังรูปที่ 4.13, รูปที่ 4.14, รูปที่ 4.15 และ รูปที่ 4.16 ตามลำดับจะสังเกตได้ว่ารูปภาพที่ผ่านกระบวนการ Interpolation บน Spatial Domain นั้นจะถูกผลกระทบจากความเป็นตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน หรือ Low Pass Filter อยู่ ส่งผลให้เกิดความเบลอของรูปภาพเมื่อผ่านกระบวนการดังกล่าว แต่รูปภาพที่ผ่านการดำเนินการบน Wavelet Domain จะยังคงมีความคมชัดมากกว่ากรณีข้างต้น โดยเฉพาะที่องค์ประกอบเชิงขอบหรือ Edge Component และเมื่อพิจารณาตารางที่ 4.1 สามารถสังเกตได้ว่าค่าของ PSNR ของกลุ่มรูปภาพตัวอย่างมีค่าที่สูงที่สุดเมื่อผ่านกระบวนการ Dual-tree Complex Wavelet Transform ด้วย จึงได้นำรูปถ่ายจากกล้อง JPEG Camera ที่ความละเอียด 800×640 อัตราการบีบอัด 10% ดังรูปที่ 4.17 ไปผ่านกระบวนการ Interpolation บน Spatial Domain ทั้ง 3 วิธีดังที่ได้กล่าวไป ได้แก่ Nearest Neighbor, Bilinear และ Bicubic Interpolation โดยได้ผลที่ได้ดังรูปที่ 4.18 (ก), รูปที่ 4.18 (ข) และ รูปที่ 4.18 (ค) ตามลำดับและในขณะเดียวกัน ได้นำไปผ่านกระบวนการเพิ่มความละเอียดและขยายรูปด้วยวิธีการ Dual-tree Complex Wavelet Transform ด้วยวิธีการพิจารณาเดียวกันกับข้างต้น คือทำการย่อรูปลง 4 เท่า และขยายรูปดังกล่าวกลับไปทีขนาดเดิมด้วยค่า Interpolation Factor หรือ α มีค่าเท่ากับ 4 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.19 โดยผลที่ได้มีความคมชัดมากกว่ารูปภาพที่ผ่านการเพิ่มขนาดเพียงอย่างเดียวด้วยวิธี Interpolation และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความสามารถผ่านค่า Peak Signal to Noise Ratio หรือ PSNR เช่นเดิม ผลที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.17 รูปต้นฉบับแบบ Grayscale ขนาด 800 x 640 ที่ใช้ในการทดสอบการ Interpolate



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 4.18 ผลลัพธ์รูปภาพตัวอย่างที่ได้นำมาทำการทดสอบความสามารถในการขยายด้วยวิธี

(ก) Nearest Neighbor, (ข) Bilinear และ (ค) Bicubic Interpolation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

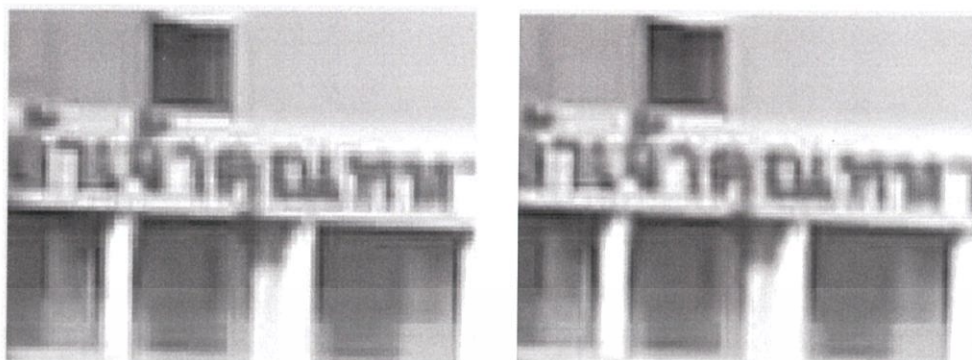


รูปที่ 4.19 รูปภาพที่ผ่านการขยายและรักษารายละเอียดของภาพด้วยวิธี Dual-tree Complex Wavelet Transform

หากเปรียบเทียบประสิทธิภาพของภาพผลลัพธ์ระหว่างกรณีของการขยายภาพด้วยวิธี Nearest Neighbor Interpolation, Bilinear Interpolation และ Bicubic Interpolation จากหัวข้อ 2.4.1 กับกรณีการขยายและรักษารายละเอียดของภาพด้วยวิธี Dual-tree Complex Wavelet Transform โดยอาศัยค่า Peak Signal-to-Noise Ratio หรือ PSNR พบว่าค่าของ PSNR หลังจากกระบวนการ DT-CWT มีค่า PSNR สูงที่สุดดังตารางที่ 4.2 จึงอาจสรุปได้ว่าการรักษาความคมชัดและรายละเอียดของภาพถ่ายความละเอียดต่ำสามารถใช้เทคนิค DT-CWT เพื่อประสิทธิภาพสูงสุดดังที่ได้ศึกษามา และเมื่อทำการเปรียบเทียบพิกเซลของรูปภาพต้นฉบับในรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.19 เมื่อทำการขยายภาพไปที่จุดเดียวกันก็สามารถสังเกตเห็นได้ว่ารายละเอียดเชิงพิกเซลนั้นมีการเน้นรายละเอียดเชิงขอบมากขึ้นดังรูปที่ 4.20

ตารางที่ 4.2 ค่า PSNR ของรูปผลลัพธ์หลังจากผ่านกระบวนการ Nearest Neighbor, Bilinear, Bicubic Interpolation และ DT-CWT ด้วย $\alpha = 4$

เทคนิคการขยาย	ค่า PSNR (dB)
Nearest neighbor	29.6334
Bilinear Interpolation	31.1536
Bicubic Interpolation	32.2367
DT-CWT	40.3116



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบองค์ประกอบเชิงพิกเซลของรูปภาพต้นฉบับ (ซ้าย) และรูปภาพที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความคมชัด (ขวา) เมื่อทำการขยายภาพที่จุดเดียวกัน

4.3 ผลการทดสอบการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับแบบเคออดิกของข้อมูลประเภทข้อความ บนพื้นฐานของวงจรรองสัญญาณดิจิทัล

ผลการทดสอบการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับด้วยกระบวนการประมวลผลด้วยรูปแบบการเข้ารหัสเคออดิกของข้อมูลประเภทข้อความบนพื้นฐานวงจรรองสัญญาณดิจิทัล แบ่งผลการทดลองเป็น 2 อย่างคือ ผลการทดสอบการเข้ารหัสลับ-ถอดรหัสลับโดยจำลองในโปรแกรม MATLAB และผลการเข้ารหัสลับ-ถอดรหัสลับระหว่างซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินและหน่วยประมวลผลของบอร์ดจัดการข้อมูลกลาง (OBDM) ซึ่งจะเป็นส่วนหนึ่งบนแบบจำลองวิศวกรรมดาวเทียม EM – 3 ในอนาคต

4.3.1 ผลลัพธ์การทดสอบการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับแบบเคออดิกโดยจำลองในโปรแกรม MATLAB

จากการทดสอบครั้งที่ 1 ของการเข้ารหัสลับกับข้อความ “KMITL CUBESAT EM-3” โดยใช้สัมประสิทธิ์ $c_1=-4$, $c_2=1$ และค่าเริ่มต้น $initial_A = -0.625$, $initial_B = 0.625$ ได้ข้อความหลังเข้ารหัส ดังรูปที่ 4.21 และได้ผลการเข้ารหัสลับ ดังตารางที่ 4.3

```
Message is :
KMITL CUBESAT EM-3
Cipher is :
[ `e %G^ _h <0Ay
```

รูปที่ 4.21 ผลลัพธ์จากการเข้ารหัสลับข้อความ “KMITL CUBESAT EM-3”

ตารางที่ 4.3 ผลลัพธ์การถอดรหัสลับของข้อมูลประเภทข้อความด้วยค่าของกุญแจรหัสลับต่างๆ

ครั้งที่	c_1	c_2	ข้อความที่ถอดรหัสได้
1	-4	1	KMITL CUBESAT EM-3
2	-3	1	□ _{r,tç} -ä4ôYTä□)
3	-4	2	ú□nÃl»«0úçBâl l°
4	-3	2	kÂÝã#□é□ÖäúläÜ\ó°

จากการทดสอบครั้งที่ 2 ของการเข้ารหัสลับกับข้อความ “TELECOMMUNICATION” โดยใช้สัมประสิทธิ์ $c_1=-4$, $c_2=1$ และค่าเริ่มต้น initial_A=-0.625, initial_B=0.625 ได้ข้อความหลังเข้ารหัส ดังรูปที่ 4.22 และได้ผลการเข้ารหัสลับ ดังตารางที่ 4.4

Message is :
TELECOMMUNICATION
Cipher is :
de :w- :} v;gh ^

รูปที่ 4.22 ผลลัพธ์จากการเข้ารหัสลับข้อความ “TELECOMMUNICATION”

ตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์การถอดรหัสลับของข้อมูลประเภทข้อความด้วยค่าของกุญแจรหัสลับต่างๆ สำหรับข้อความ “TELECOMMUNICATION”

ครั้งที่	c_1	c_2	ข้อความที่ถอดรหัสได้
1	-4	1	TELECOMMUNICATION
2	-3	1	Yz"*j-LKGzuj
3	-4	2	\$u #>^la [k\è
4	-3	2	TY) g (lR\$Ax-+<3

จากการทดสอบครั้งที่ 3 ของการเข้ารหัสลับกับข้อความ “Telecom never walk alone” โดยใช้สัมประสิทธิ์ $c_1=-4$, $c_2=1$ และค่าเริ่มต้น $initial_A=-0.625$, $initial_B=0.625$ ได้ข้อความหลังเข้ารหัส ดังรูปที่ 4.23 และได้ผลการเข้ารหัสลับ ดังตารางที่ 4.5

Message is :
Telecom never walk alone
Cipher is :
d <z7
pm**x/. ITe+Y(% L

รูปที่ 4.23 ผลลัพธ์จากการเข้ารหัสลับข้อความ “Telecom never walk alone”

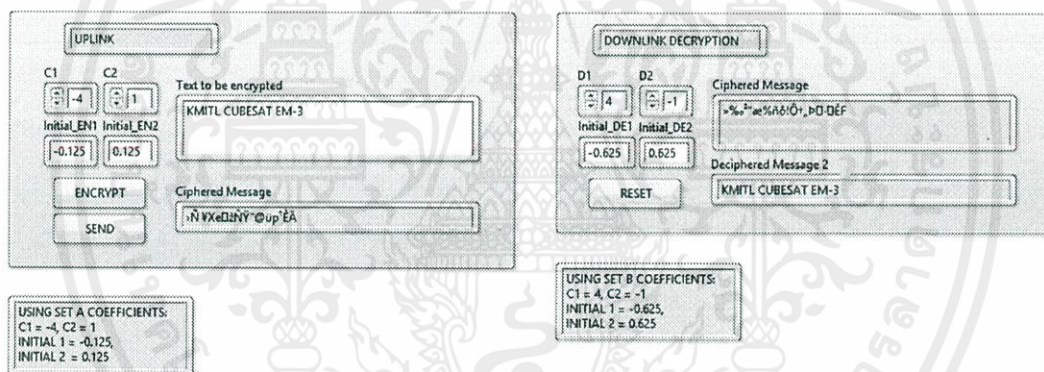
ตารางที่ 4.5 ผลลัพธ์การถอดรหัสลับของข้อมูลประเภทข้อความด้วยค่าของกุญแจรหัสลับต่างๆ สำหรับข้อความ “Telecom never walk alone”

ครั้งที่	c_1	c_2	ข้อความที่ถอดรหัสได้
1	-4	1	Telecom never walk alone
2	-3	1	\$g)i8`0;LmCr'DJk^
3	-4	2	`u6~xL;zqJJ#,6Glb
4	-3	2	TQ\$->)#N"CKC2O2]k"F[

จากผลการทดลองการถอดรหัสลับข้อมูลประเภทข้อความพบว่าเมื่อใช้สัมประสิทธิ์ที่มีค่าถูกต้องจะส่งผลให้สามารถถอดรหัสลับข้อความได้ แต่หากทำการเปลี่ยนค่าของสัมประสิทธิ์ที่ไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมก็จะส่งผลให้ไม่สามารถถอดรหัสลับข้อความได้ โดยข้อความดังกล่าวจะอยู่ในรูปของอักขระ ASCII ที่ไม่สามารถเข้าใจได้ อย่างไรก็ตามหากพิจารณาการใช้การเข้ารหัสเคออดิกกับข้อมูลประเภทข้อความนั้นสามารถสรุปได้ว่าผลลัพธ์การทดลองนั้นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

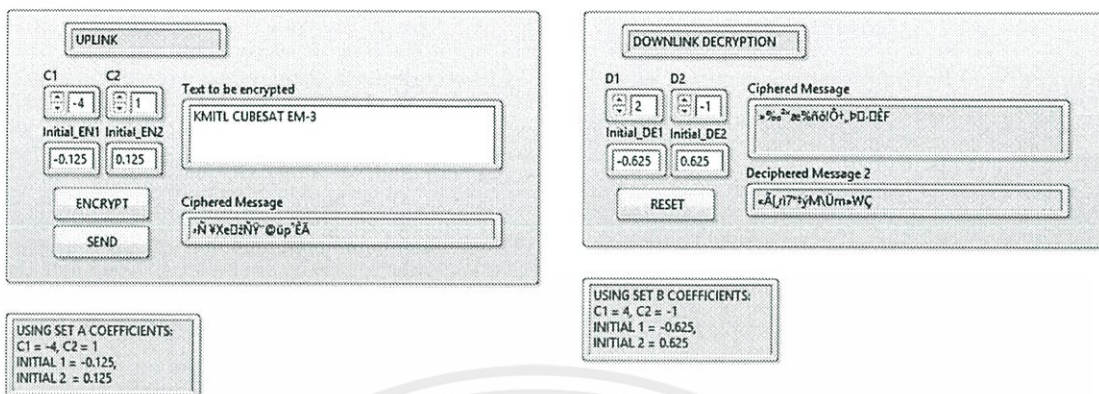
4.3.2 ผลลัพธ์การทดสอบการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับแบบเคออดิก ระหว่างซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินและหน่วยประมวลผลของบอร์ดจัดการข้อมูลกลาง (OBDH)

สำหรับการทดลองในการส่งข้อความเข้ารหัสลับ - ถอดรหัสลับ ระหว่างซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินและหน่วยประมวลผลของบอร์ดจัดการข้อมูลกลาง โดยการใช้งานบนซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินที่ได้ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรม LabVIEW ด้วยรูปแบบการส่งข้อมูลที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.1.4 พบว่าซอฟต์แวร์ที่ได้ออกแบบไว้สามารถส่งข้อความที่ผ่านการเข้ารหัสลับด้วยสัมประสิทธิ์ชุด A และสามารถรับข้อความจากฝั่งเสมีอนดาวเทียมคิวบ์แซทหรือหน่วยประมวลผลของบอร์ดจัดการข้อมูลกลาง ที่เข้ารหัสด้วยสัมประสิทธิ์ชุด B และทำการถอดรหัสลับพร้อมแสดงผลข้อความที่ได้ส่งออกไปได้อย่างอัตโนมัติตามที่คาดการณ์ไว้ คือข้อความที่ผู้ใช้กรอกในบริเวณใช้งาน “Text to be encrypted” นั้นตรงกับผลลัพธ์ของระบบซึ่งจะแสดงในบริเวณใช้งาน “Deciphered Message” โดยมีผลดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 หน้าต่างที่แสดงผลข้อมูลผ่านระบบการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับทางอากาศ

เมื่อทดลองในลักษณะเดียวกัน แต่เปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการถอดรหัสเพื่อดูผลของข้อความที่ได้ว่าสามารถคาดเดาข้อความต้นฉบับได้หรือไม่ ผลคือข้อความฝั่งถอดรหัสลับนั้นให้ผลลัพธ์ในลักษณะที่ไม่สามารถอ่านเข้าใจได้ดังรูปที่ 4.25



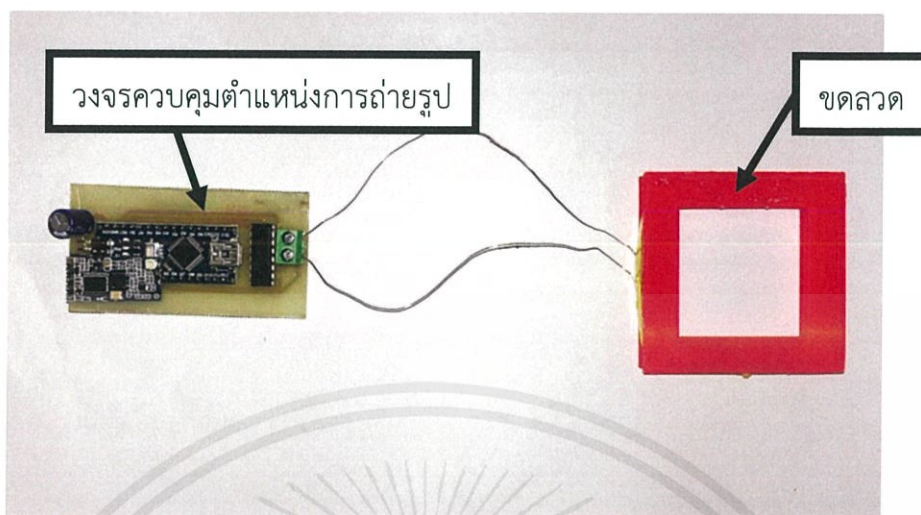
รูปที่ 4.25 หน้าต่างที่แสดงผลข้อมูลที่ผ่านมาในระบบการเข้ารหัสลับ – ถอดรหัสลับทางอากาศ
เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถอดรหัสไม่ถูกต้อง

4.4 ผลการทดสอบระบบควบคุมตำแหน่งการถ่ายภาพนอวกาศ (Attitude Control System) เพื่อเตรียมการพัฒนาแบบจำลองดาวเทียมคิวบแซทในอวกาศ

ในการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งการถ่ายภาพนอวกาศ ทางคณะผู้จัดทำได้วางแนวทางการออกแบบไว้ 2 แนวทางดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 นั่นคือการออกแบบโดยอาศัยหลักการทอร์คแม่เหล็ก (Magnetic Torque) จากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Coil) และการออกแบบโดยอาศัยความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กโลกและแม่เหล็กถาวร โดยมีผลดังนี้

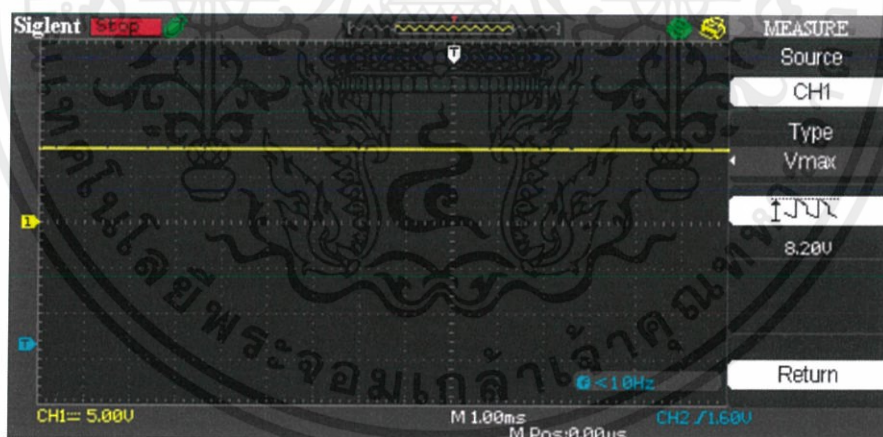
4.4.1 ผลการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งการถ่ายภาพนอวกาศโดยอาศัยหลักการทอร์คแม่เหล็ก

ในการออกแบบระบบด้วยหลักการดังกล่าวคณะผู้จัดทำได้ประยุกต์ใช้หลักการวงจร H-Bridge ในการสร้างระบบผ่านไอซี L293D และเขียนโปรแกรมควบคุมด้วย Arduino ผ่านการเชื่อมต่ออุปกรณ์ ดังรูปที่ 3.40 ในการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขดลวดและนำไปออกแบบผ่านโปรแกรม Altium และสร้างเป็นวงจรได้ดังรูปที่ 4.26

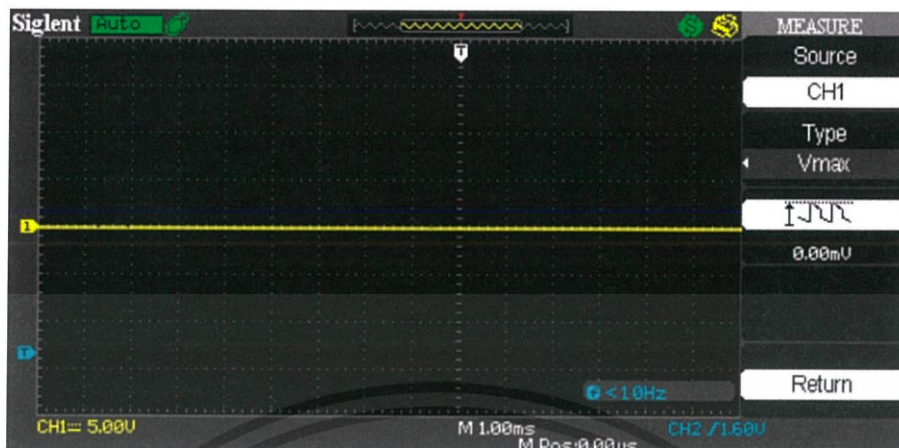


รูปที่ 4.26 วงจรควบคุมตำแหน่งการถ่ายรูปบนอวกาศโดยหลักการทอร์คแม่เหล็ก

จากนั้นได้ทำการทดลองความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าของขดลวด ผ่านการออกแบบโปรแกรมด้วย Arduino โดยใช้ออสซิลโลสโคปและหวังผลการทำงานตามที่วางรูปแบบไว้ดังตารางที่ 3.7 หัวข้อที่ 3.6 และเมื่อทำการป้อนค่า “+”, “0” และ “-” จะได้ผลดังรูปที่ 4.27, รูปที่ 4.28 และ รูปที่ 4.29 ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 ผลลัพธ์หน้าจอออสซิลโลสโคปเมื่อป้อน “+” จ่ายไฟค่าบวกเข้าสู่ขดลวด



รูปที่ 4.28 ผลลัพธ์หน้าจอออสซิลโลสโคปเมื่อป้อน “0” ไม่จ่ายไฟเข้าสู่ขดลวด



รูปที่ 4.29 ผลลัพธ์หน้าจอออสซิลโลสโคปเมื่อป้อน “-” จ่ายไฟค่าลบเข้าสู่ขดลวด

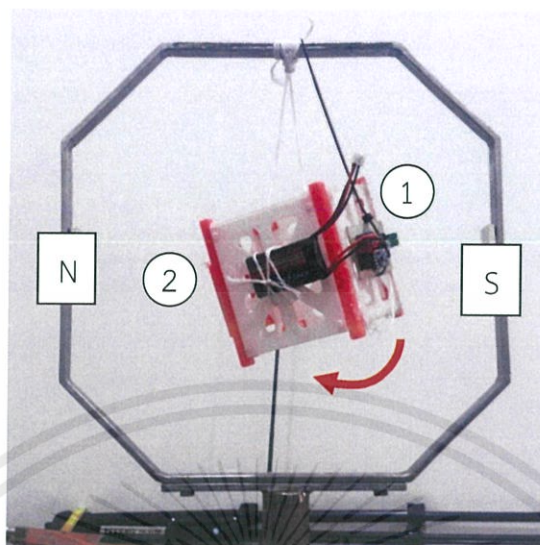
จากรูปที่ 4.27, รูปที่ 4.28 และ รูปที่ 4.29 นั้นสามารถสรุปผลได้ตาม ตารางที่ 4.6 ดังนี้

ตารางที่ 4.6 ผลการทำงานของวงจรควบคุมการทำงานของดาวเทียมแบ่งตามรูปแบบการป้อนค่า

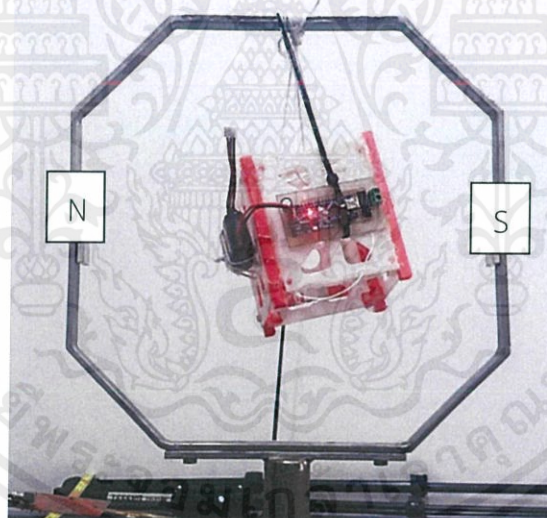
Input ของโปรแกรม (ป้อนผ่าน Keyboard)	การทำงานของวงจร	ผลจากออสซิลโลสโคป
“+”	จ่ายไฟทิศตามเข็มนาฬิกา ให้ขดลวด	ศักย์ไฟฟ้าค่าบวก
“0”	หยุดจ่ายไฟให้ขดลวด	ศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์
“-”	จ่ายไฟทิศทวนเข็ม นาฬิกาให้ขดลวด	ศักย์ไฟฟ้าค่าลบ

โดยจากตารางที่ 4.6 สามารถสรุปได้ว่าผลจากออสซิลโลสโคปนั้นสอดคล้องกับการทำงานของวงจรในการจ่ายกระแสไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อผู้ใช้ป้อน “+” สู่อุปกรณ์ จะเกิดศักย์ไฟฟ้าค่าบวกคร่อมปลายขดลวดในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ส่งผลให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเช่นกัน และในทางตรงกันข้ามสำหรับกรณีที่ผู้ใช้ป้อน “-” สู่อุปกรณ์ จะเกิดศักย์ไฟฟ้าค่าลบคร่อมปลายขดลวดในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ส่งผลให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และสำหรับกรณีที่ผู้ใช้ป้อน “0” สู่อุปกรณ์ จะไม่เกิดศักย์ไฟฟ้าค่าบวกคร่อมปลายขดลวด ส่งผลให้ไม่เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด

จากนั้นทำการทดลองโดยป้อน “+” เข้าสู่โปรแกรมควบคุมวงจรผ่าน Arduino วงจรจะทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดที่มีรอบการพันจำนวน 300 รอบ และนำโครงที่พันด้วยขดลวดทองแดงติดที่จุดกึ่งกลางของดาวเทียมคิวิบ์แซทแล้วนำดาวเทียมคิวิบ์แซทไปติดตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชุดจำลองสนามแม่เหล็กโลก ซึ่งใช้แม่เหล็กถาวรในการสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก โดยเส้นแรงแม่เหล็กจะมีทิศพุ่งออกจากขั้วเหนือไปขั้วใต้ตามรูปที่ 4.30 และ รูปที่ 4.31 โดยการเคลื่อนที่ของแบบจำลองควรเป็นไปตามที่แสดงไว้ด้วยลูกศรคือจากตำแหน่งหมายเลข 1 ไปยังตำแหน่งหมายเลข 2 ในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 ทิศทางของแบบจำลองก่อนการทดสอบระบบควบคุมตำแหน่งการถ่ายรูปพร้อม
ทิศทางการหมุนที่ควรจะเป็น

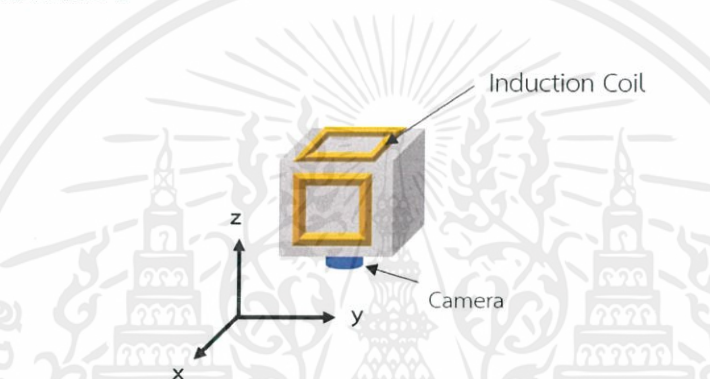


รูปที่ 4.31 ผลการทดสอบระบบควบคุมตำแหน่งการถ่ายรูป

จากรูปที่ 4.31 จะเห็นว่าโครงที่พันด้วยขดลวดทองแดง ซึ่งติดตั้งภายในดาวเทียมคิวบ์แซทเกิดการหมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา หรือจากตำแหน่งหมายเลข 1 ไปยังตำแหน่งหมายเลข 2 แสดงว่ามีกระแสไฟฟ้าไหลบนขดลวดทองแดงในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ส่งผลให้เกิดแรงลัพท์ หรือสนามแม่เหล็กในทิศทางพุ่งออกจากโครงที่พันด้วยขดลวดทองแดง

ซึ่งเป็นไปตามกฎมือขวา และเนื่องจากสนามแม่เหล็กจากสนามแม่เหล็กโลกจำลอง มีขนาดมากกว่าสนามแม่เหล็กที่สร้างจากโครงที่พันด้วยขดลวดทองแดง ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างจากโครงที่พันด้วยขดลวดทองแดงจะเรียงตัวตามเส้นแรงแม่เหล็กจากสนามแม่เหล็กโลกจำลอง ทำให้เกิดการหมุนไปในทิศตามเข็มนาฬิกา

โดยในทางปฏิบัตินั้นจะขยายการทำงานของวงจรให้ครอบคลุมทิศการหมุนของดาวเทียมทั้งหมด 3 แกน กล่าวคือจะทำการติดตั้งขดลวดเหนี่ยวนำทอร์คแม่เหล็กจำนวน 2 ด้านบนดาวเทียมคิวบ์แซทคือตามแนวแกน x และ z ดังรูปที่ 4.32 เพื่อให้สามารถควบคุมกล้องได้ทั้งในแนวแกน x และ z



รูปที่ 4.32 แบบจำลองการติดตั้งตำแหน่งขดลวดเพื่อใช้ควบคุมตำแหน่งดาวเทียมคิวบ์แซทในสภาวะอวกาศ

อย่างไรก็ตามดาวเทียมคิวบ์แซทนั้นมีหน่วยการทำงานที่ต้องอาศัยพลังงานอีกหลายส่วน ดังนั้นหากมีตัวเลือกในแง่ของการประหยัดพลังงานในหน่วยการทำงานบางหน่วย เช่น หน่วยควบคุมตำแหน่งการถ่ายรูปตั้งข้างต้นจึงเป็นสิ่งที่ควรพิจารณา นำไปสู่การนำหลักการของแม่เหล็กถาวรมาใช้ซึ่งเป็นการควบคุมตำแหน่งการถ่ายรูปแบบไม่ใช้พลังงาน

4.4.2 ผลการออกแบบแนวคิดระบบควบคุมตำแหน่งการถ่ายรูปบนอวกาศโดยอาศัยหลักการของแม่เหล็กถาวร

ในการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งการถ่ายรูปโดยใช้แม่เหล็กถาวรนั้น จำต้องคำนึงถึงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กโลก รวมไปถึงวงโคจรของดาวเทียมที่จะส่งผลต่อตำแหน่งการติดตั้งแม่เหล็กถาวรบนดาวเทียมคิวบ์แซท

ดาวเทียมคิวบ์แซทนั้นถือเป็นดาวเทียมที่ใช้วงโคจรระยะต่ำ (Low Earth Orbit) วงโคจรนี้อยู่สูงจากพื้นโลกไม่เกิน 1,000 กิโลเมตร เนื่องจากเหมาะสำหรับการถ่ายภาพแต่

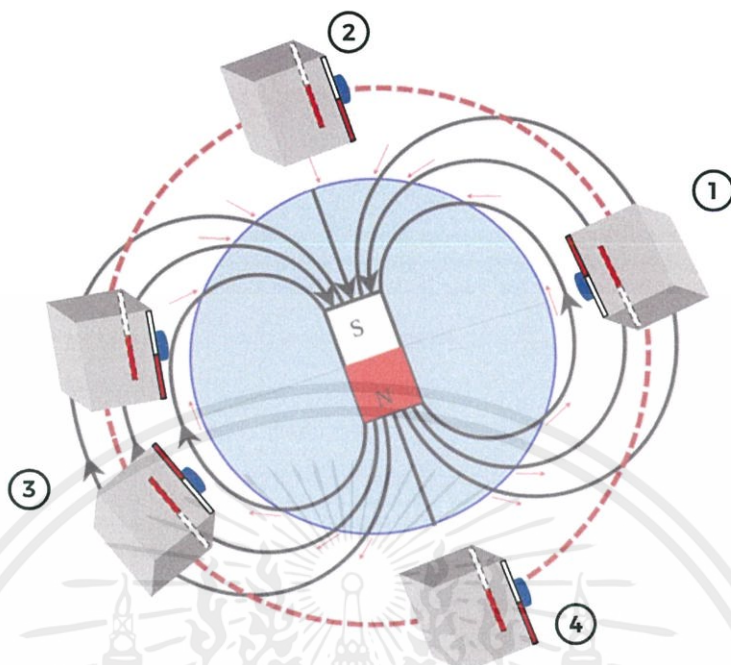
เนื่องจากวงโคจรประเภทนี้อยู่ใกล้พื้นผิวโลกมาก ภาพถ่ายที่ได้จึงครอบคลุมพื้นที่ที่เป็นบริเวณแคบ และไม่สามารถครอบคลุมบริเวณใดบริเวณหนึ่งได้นาน เนื่องจากดาวเทียมต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ดาวเทียมวงโคจรต่ำจึงนิยมใช้วงโคจรขั้วโลก (Polar Orbit) หรือใกล้ขั้วโลก (Near Polar Orbit) ดาวเทียมจะโคจรในแนวเหนือ-ใต้ ขณะที่โลกหมุนรอบตัวเอง ดาวเทียมจึงเคลื่อนที่ผ่านเกือบทุกส่วนของพื้นผิวโลก

นอกจากนี้จุดประสงค์ของระบบควบคุมตำแหน่งดาวเทียมนั้น จำต้องให้ทิศทางของกล้องนั้นชี้เข้าไปยังผิวโลก ดังนั้นทิศทางการวางตัวของแม่เหล็กบนดาวเทียมคิวบแซท นั้นจึงต้องตั้งฉากกับทิศทางของกล้องดังรูปที่ 4.33 เพื่อให้แนวแม่เหล็กของดาวเทียมขนานกับแนวแม่เหล็กโลก



รูปที่ 4.33 ตำแหน่งและการวางตัวของทิศทางขั้วแม่เหล็กที่ควรจะเป็น

จากรูปที่ 4.33 จะสามารถโยงไปถึงความเป็นไปได้ในการวางตัวดาวเทียมในชั้นอวกาศได้ดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 ความเป็นไปได้ในการวางตัวของดาวเทียมเมื่ออยู่ในชั้นอวกาศกรณีแม่เหล็กถาวร

จากรูปที่ 4.34 ทิศทางของกล่องนั้นจะชี้เข้าสู่ผิวโลกเมื่อขั้วของแม่เหล็กบนดาวเทียมและขั้วแม่เหล็กของโลกนั้นตรงกันข้ามกันเมื่อเคลื่อนที่เข้าใกล้เส้นศูนย์สูตร ดังตำแหน่งที่ 1 และ 3 ในรูปที่ 4.34 อย่างไรก็ตามแบบจำลองดังกล่าวนี้มีข้อจำกัดในการถ่ายภาพคือเมื่อดาวเทียมเคลื่อนที่ผ่านขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้นั้น ทิศทางของกล่องบนดาวเทียม จะไม่สามารถหันเข้าสู่ผิวโลกได้เนื่องจากขั้วแม่เหล็กบนดาวเทียมและของโลกนั้นไม่สอดคล้องกัน ดังตำแหน่งที่ 2 และ 4 ในรูปที่ 4.34

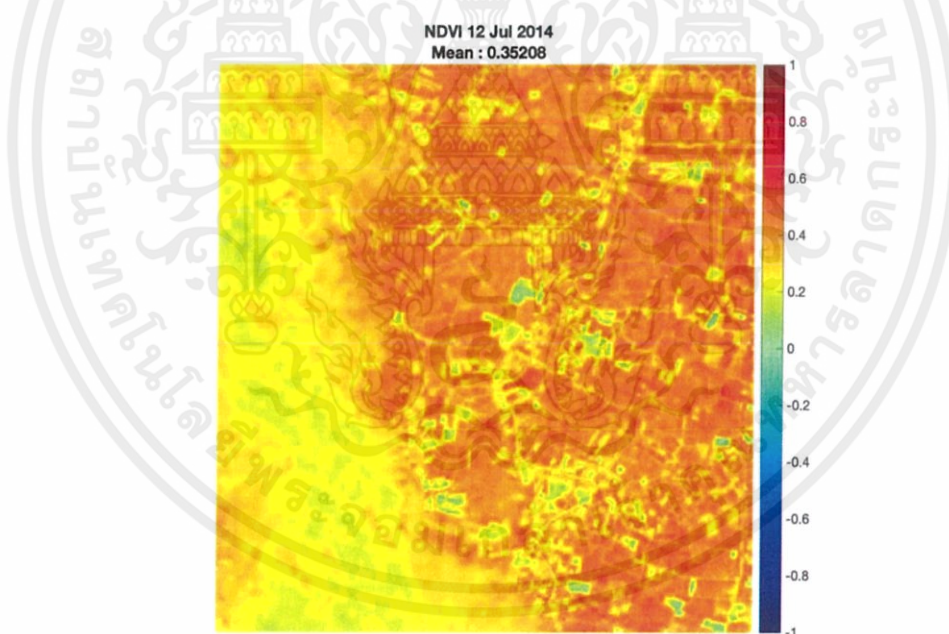
อย่างไรก็ตามชนิดและขนาดของแม่เหล็กที่ติดตั้งบนดาวเทียมนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงระดับความสูงของวงโคจรที่ให้ดาวเทียมควิเบรซ่านั้นคงอยู่ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความก่อกวนแม่เหล็กต่างๆ ที่เกิดขึ้นในชั้นอวกาศแนวคิดนี้จึงเป็นเพียงแบบจำลองของระบบควบคุมความสูงของดาวเทียมควิเบรซหัตว์สำเร็จในอนาคตต่อไป

4.5 ผลการทดสอบวิเคราะห์หาค่าดัชนีพืชพรรณ (NDVI) เพื่อเตรียมการพัฒนาแบบจำลองดาวเทียมคิวบแซทในอนาคต

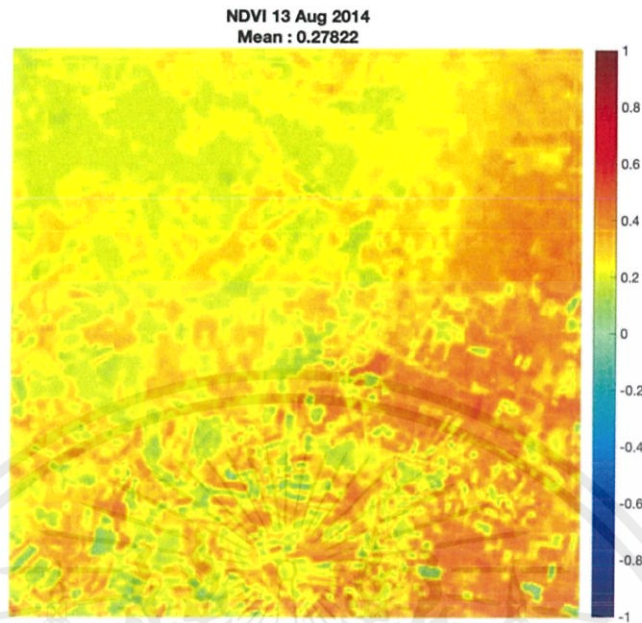
4.5.1 ผลการทดสอบวิเคราะห์หาค่าดัชนีพืชพรรณ (NDVI) เพื่อวัตถุประสงค์ทางการเกษตร

4.5.1.1 ผลการทดสอบวิเคราะห์หาค่าดัชนีพืชพรรณ (NDVI) ในบริเวณพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรีในเดือนกรกฎาคม สิงหาคม กันยายน และตุลาคม

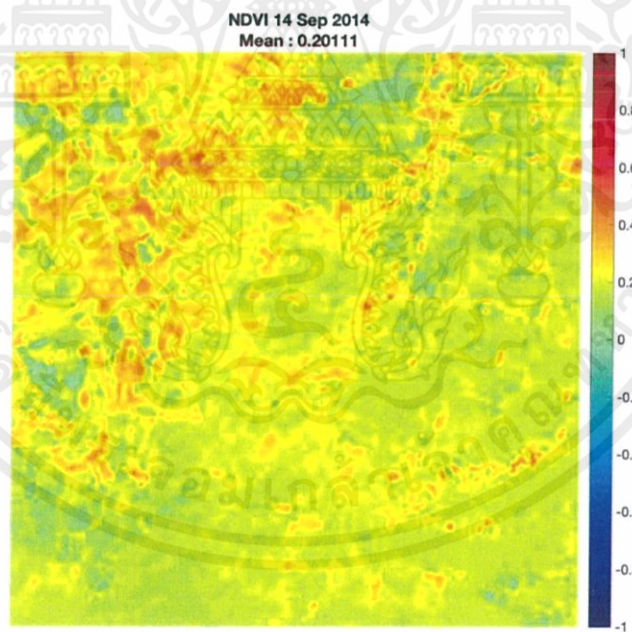
เมื่อทำการบันทึกภาพ LANDSAT 8 บริเวณพื้นที่ตัวอย่างจังหวัดสุพรรณบุรีมาทั้งหมด 4 เดือน จึงนำมาคำนวณหาค่า Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ในบริเวณพื้นที่ตัวอย่างเดียวกัน โดยอาศัยโปรแกรม MATLAB แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของ NDVI ของพื้นที่ของเดือนกรกฎาคม สิงหาคม กันยายน และตุลาคม ซึ่งผลแสดงออกดังรูปที่ 4.35, รูปที่ 4.36, รูปที่ 4.37 และ รูปที่ 4.38 ตามลำดับ



รูปที่ 4.35 ผล NDVI ของจังหวัดสุพรรณบุรี ในวันที่ 12 กรกฎาคม 2557

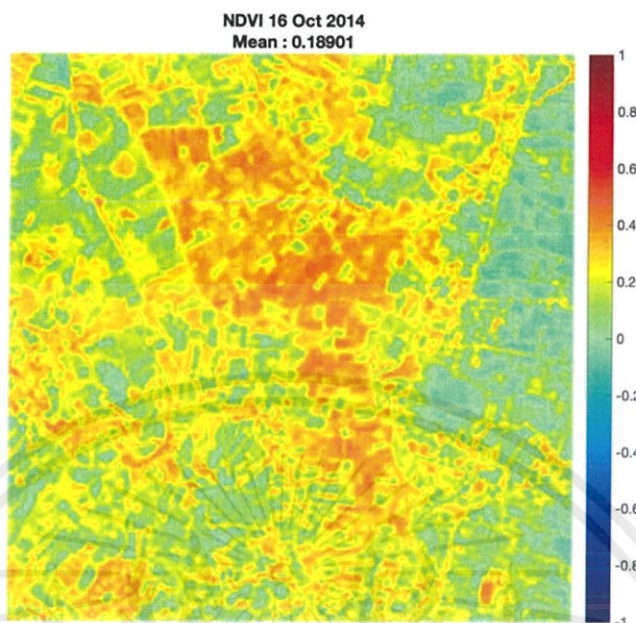


รูปที่ 4.36 ผล NDVI ของจังหวัดสุพรรณบุรี ในวันที่ 13 สิงหาคม 2557



รูปที่ 4.37 ผล NDVI ของจังหวัดสุพรรณบุรี ในวันที่ 14 กันยายน 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



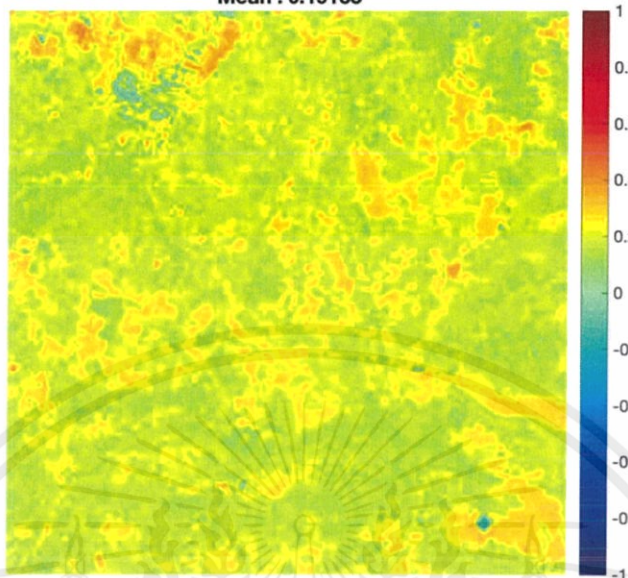
รูปที่ 4.38 ผล NDVI ของจังหวัดสุพรรณบุรี ในวันที่ 16 ตุลาคม 2557

ผลการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ย NDVI ของพื้นที่ตัวอย่าง ในอำเภอสองพี่น้อง จังหวัดสุพรรณบุรี ของเดือนกรกฎาคม สิงหาคม กันยายน และตุลาคม ได้ค่าเฉลี่ย NDVI เท่ากับ 0.35208, 0.27822, 0.20111 และ 0.18901 ตามลำดับ ผลดังกล่าวเป็นไปตามปฏิทินการปลูกข้าวนาปี ซึ่งเดือนกรกฎาคม และสิงหาคม เป็นช่วงของการปลูกข้าว ข้าวจะอยู่ในระยะที่ 3 และ 4 ต้นข้าวจะเป็นสีเขียวและเริ่มแตกกอ และเริ่มสร้างช่อดอกหรือตั้งท้องตามลำดับ เดือนกันยายน และตุลาคม เป็นช่วงของการเก็บเกี่ยวข้าว ซึ่งข้าวจะอยู่ในระยะที่ 5 และ 6 ต้นข้าวออกรวงและเมล็ดมีการเปลี่ยนแปลงจากการเป็นน้ำนมจนเป็นแป้งแข็งพร้อมเก็บเกี่ยวและต้นข้าวจะเป็นสีเหลืองทอง [38] ตามลำดับ จึงทำให้ค่าเฉลี่ย NDVI ของเดือนกันยายน และตุลาคม มีค่าน้อยกว่าเดือนกรกฎาคม และสิงหาคม

4.5.1.2 ผลการทดสอบวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณ (NDVI) ในบริเวณพื้นที่จังหวัดนครพนมในเดือนเมษายน และเดือนตุลาคม

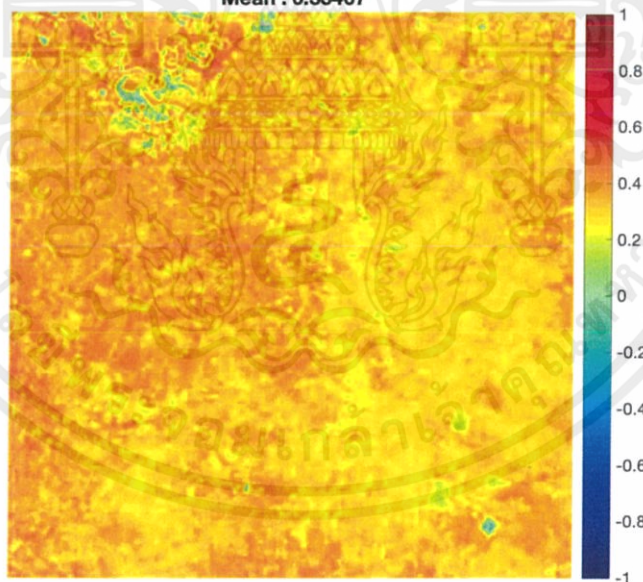
เมื่อทำการบันทึกภาพ LANDSAT 8 บริเวณพื้นที่ตัวอย่างจังหวัดนครพนมมาทั้งหมด 2 เดือน จึงนำมาคำนวณหาค่า Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ในบริเวณพื้นที่ตัวอย่างเดียวกัน โดยอาศัยโปรแกรม MATLAB แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของ NDVI ของพื้นที่ของเมษายน และตุลาคม ซึ่งผลแสดงออกดังรูปที่ 4.39 และรูปที่ 4.40 ตามลำดับ

NDVI 20 April 2018
Mean : 0.19135



รูปที่ 4.39 ผล NDVI ของจังหวัดนครพนม ในวันที่ 20 เมษายน 2561

NDVI 13 October 2018
Mean : 0.33407



รูปที่ 4.40 ผล NDVI ของจังหวัดนครพนม ในวันที่ 13 ตุลาคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ย NDVI ของพื้นที่ตัวอย่าง ในจังหวัดนครพนมของเดือนเมษายน และตุลาคม ได้ค่าเฉลี่ย NDVI เท่ากับ 0.19135 และ 0.33407 ตามลำดับ ผลดังกล่าวเป็นไปตามฤดูกาลของประเทศไทย ซึ่งเดือนเมษายน อยู่ในช่วงฤดูหนาว ถึงฤดูร้อน ซึ่งเป็นช่วงที่ประเทศไทยเริ่มประกาศภัยแล้ง [39] และเดือนตุลาคม อยู่ในช่วงของฤดูฝน ซึ่งค่าเฉลี่ย NDVI นั้นเป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ คือ ค่าเฉลี่ย NDVI ของเดือนเมษายนน้อยกว่าของเดือนตุลาคม

จากรูปที่ 3.35, รูปที่ 3.36, รูปที่ 3.37, รูปที่ 3.38, รูปที่ 3.39 และรูปที่ 3.40 หากพิจารณาถึงความสอดคล้องกันระหว่างสภาวะความสมบูรณ์ของพื้นที่ใดๆ ช่วงเดือนใดๆ กับความหมายเชิงสีที่ปรากฏในผลของการวิเคราะห์ค่า NDVI จะได้ว่าสำหรับช่วงเดือนที่เป็นฤดูฝนดังในรูปที่ 3.35 ซึ่งควรเป็นเดือนที่มีปริมาณน้ำมากส่งผลดีต่อผลิตผลทางการเกษตร สีที่ปรากฏในการวิเคราะห์ค่า NDVI มีสีเป็นสีแดงส่วนใหญ่ซึ่งเป็นโทนสีที่บ่งบอกถึงความเป็นพืชพรรณ และในรูปที่ 3.36, รูปที่ 3.37 และรูปที่ 3.38 ได้แสดงช่วงเดือนที่มีการออกห่างจากความเป็นฤดูฝนมากขึ้นส่งผลให้สีที่ปรากฏในการวิเคราะห์ค่า NDVI มีส่วนที่เป็นสีแดงน้อยลงและมีโทนสีในช่วงสีเหลืองถึงสีเขียวมากขึ้นซึ่งตามหลักการของค่า NDVI แล้ว โทนสีดังกล่าวจะแสดงถึงความเป็นพืชพรรณที่น้อยลง และในทำนองเดียวกันสำหรับรูปที่ 3.39 และรูปที่ 3.40 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างเดือนเมษายนและเดือนตุลาคมซึ่งเป็นช่วงเดือนที่เป็นช่วงกลางฤดูร้อนและฤดูฝนตามลำดับ ช่วงเดือนที่เป็นฤดูร้อนซึ่งผลของสีที่ปรากฏในการวิเคราะห์ค่า NDVI จะมีสีโทนเหลืองถึงเขียวเป็นส่วนใหญ่แสดงถึงปริมาณพื้นที่ที่มีความเป็นพืชน้อยกว่าช่วงเดือนที่เป็นฤดูฝนโดยผลของสีที่แสดงในรูปที่เป็นการวิเคราะห์ค่า NDVI จะมีบริเวณที่มีสีแดงเป็นบริเวณค่อนข้างกว้างนั้นหมายถึงบริเวณพืชนั้นมีความอุดมสมบูรณ์กว่าเมื่อเทียบกับช่วงเดือนที่เป็นฤดูร้อน

4.5.2 ผลการทดสอบวิเคราะห์หาค่าดัชนีพืชพรรณ (NDVI) เพื่อวิเคราะห์ประเภทของพื้นที่ที่ปกคลุม

การทดสอบตัวอย่างที่ 1 เมื่อทำการบันทึกภาพจาก LANDSAT 8 บริเวณตัวอย่างพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร ดังรูปที่ 4.41 นำมาคำนวณหาค่า Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) โดยอาศัยโปรแกรม MATLAB จากนั้นเปรียบเทียบค่า NDVI ว่าค่าที่ได้ตรงกับพื้นที่ประเภทใด ดังตารางที่ 2.5 ภาพตัวอย่างจังหวัดกรุงเทพมหานครที่ผ่านการวิเคราะห์ค่า NDVI และค่า NDVI บริเวณสีที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.42 และ รูปที่ 4.43 ตามลำดับ

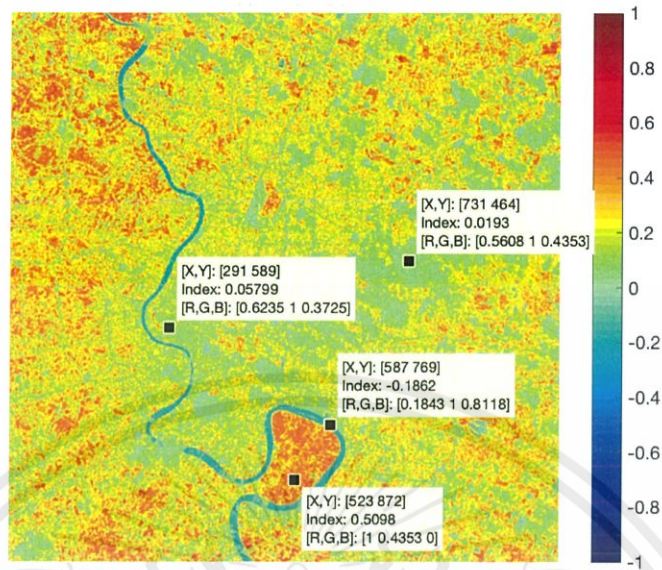


รูปที่ 4.41 ตัวอย่างพื้นที่ของจังหวัดกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 4.42 ค่า NDVI ของพื้นที่ตัวอย่างของจังหวัดกรุงเทพมหานคร

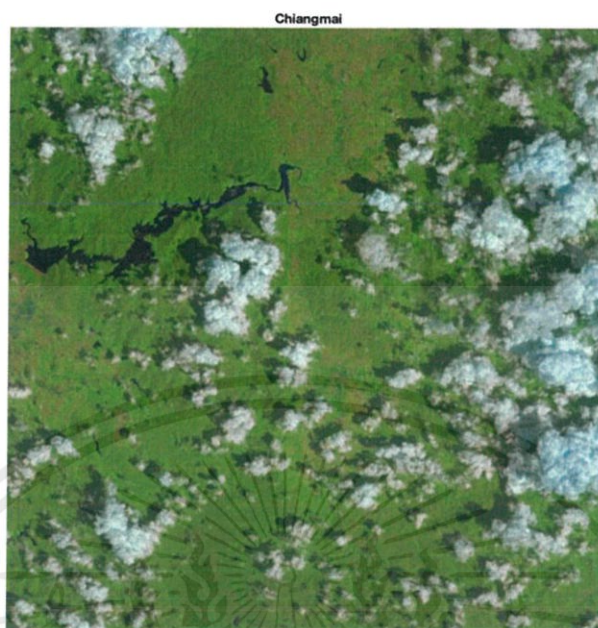
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



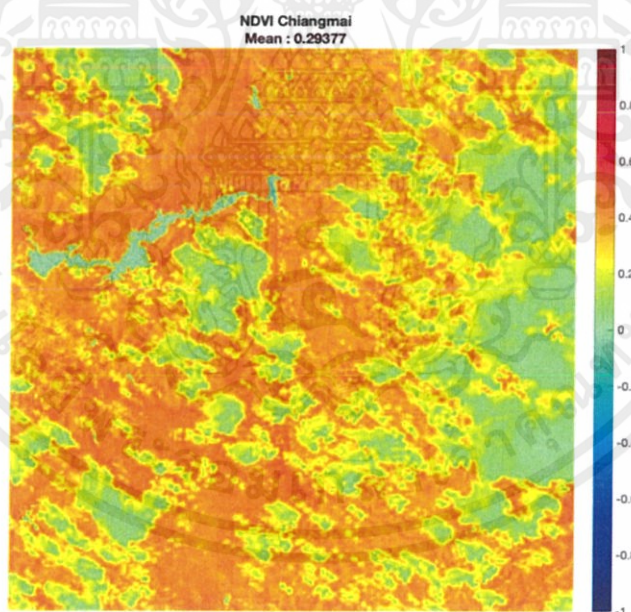
รูปที่ 4.43 ค่า NDVI ของบริเวณตัวอย่างจุดบนตัวอย่างพื้นที่กรุงเทพมหานคร

จากรูปที่ 4.43 ส่วนที่เป็นสีฟ้ามี NDVI เท่ากับ -0.1862 จากตารางค่า NDVI ดังตารางที่ 2.5 สามารถระบุได้ว่าลักษณะพื้นที่บริเวณสีฟ้าคือน้ำ ซึ่งตรงกับรูปที่ 4.41 ที่เป็นส่วนของแม่น้ำเจ้าพระยา ส่วนสีเหลืองในรูปที่ 4.43 มีค่า NDVI เท่ากับ 0.05799 จากตารางที่ 2.5 สามารถระบุได้ว่าลักษณะพื้นที่นั้นปกคลุมด้วยสิ่งปลูกสร้าง ส่วนสีเขียวในรูปที่ 4.43 มีค่า NDVI เท่ากับ 0.0193 จากตารางที่ 2.5 สามารถระบุได้ว่าลักษณะพื้นที่นั้นคือเมฆ และส่วนที่เป็นสีส้มในรูปที่ 4.43 มีค่า NDVI เท่ากับ 0.5098 จากตารางที่ 2.5 สามารถระบุได้ว่าลักษณะพื้นที่นั้นมีพืชปกคลุมหนาแน่น ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ ค่า NDVI ที่วิเคราะห์ได้นั้นตรงตามทฤษฎีและตรงตามรูปต้นฉบับ

การทดสอบตัวอย่างที่ 2 เมื่อทำการบันทึกภาพจาก LANDSAT 8 บริเวณตัวอย่างพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ดังรูปที่ 4.44 นำมาคำนวณหาค่า Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) โดยอาศัยโปรแกรม MATLAB จากนั้นเปรียบเทียบค่า NDVI ว่าค่าที่ได้ตรงกับพื้นที่ประเภทใด ดังตารางที่ 2.5 ภาพตัวอย่างจังหวัดเชียงใหม่ที่ผ่านการวิเคราะห์ค่า NDVI และค่า NDVI บริเวณสีที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.45 และ รูปที่ 4.46 ตามลำดับ

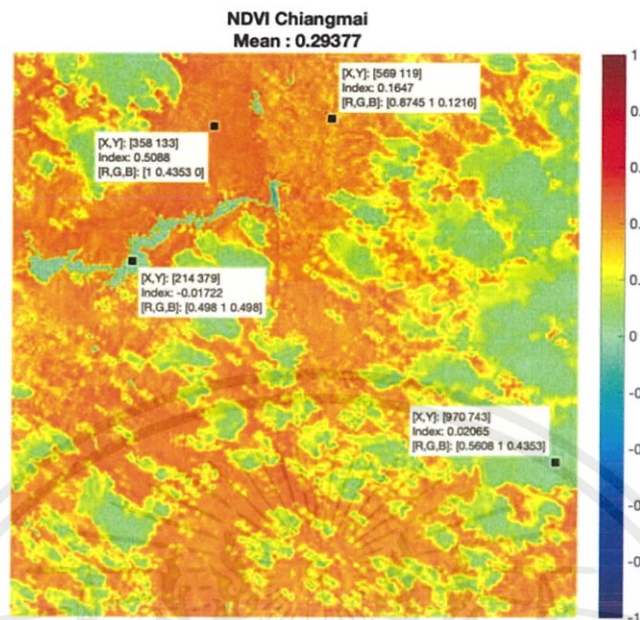


รูปที่ 4.44 ตัวอย่างพื้นที่ของจังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 4.45 ค่า NDVI ของพื้นที่ตัวอย่างของจังหวัดเชียงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 ค่า NDVI ของบริเวณตัวอย่างจุดบนตัวอย่างพื้นที่เชียงใหม่

จากรูปที่ 4.46 ส่วนที่เป็นสีฟ้ามี NDVI เท่ากับ -0.01722 จากตารางแสดงค่า NDVI ดังตารางที่ 2.5 สามารถระบุได้ว่าลักษณะพื้นที่บริเวณสีฟ้าคือน้ำ ซึ่งตรงกับรูปที่ 4.45 ที่เป็นส่วนของอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชล ส่วนสีเขียวในรูปที่ 4.46 มีค่า NDVI เท่ากับ 0.02065 จากตารางที่ 2.5 สามารถระบุได้ว่าลักษณะพื้นที่นั้นคือเมฆ ส่วนที่เป็นสีส้มอ่อนในรูปที่ 4.46 มีค่า NDVI เท่ากับ 0.1647 จากตารางที่ 2.5 สามารถระบุได้ว่าลักษณะพื้นที่นั้นมีพืชปกคลุมปานกลาง และส่วนที่เป็นสีส้มในรูปที่ 4.46 มีค่า NDVI มีเท่ากับ 0.5088 จากตารางที่ 2.5 สามารถระบุได้ว่าลักษณะพื้นที่นั้นมีพืชปกคลุมหนาแน่น ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ ค่า NDVI ที่วิเคราะห์ได้นั้นตรงตามทฤษฎีและตรงตามรูปต้นฉบับ

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ดาวเทียมคิวบ์แซทเป็นดาวเทียมที่มีความนิยมอย่างหลากหลายในงานด้านการวิจัยและพัฒนาองค์ความรู้ของนักวิจัยทางเทคโนโลยีอวกาศให้เกิดขึ้น ก่อให้เกิดความก้าวหน้าทางด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยีในด้านดังกล่าวและสามารถนำไปสู่การสร้างนวัตกรรมที่มีประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้งานได้ในอนาคต นอกจากนี้ดาวเทียมคิวบ์แซทยังถือเป็นจุดเริ่มต้นในการศึกษาและสร้างองค์ความรู้ทางด้านเทคโนโลยีดาวเทียมเนื่องจากเป็นดาวเทียมที่สามารถสร้างได้ด้วยกำลังการผลิตและงบประมาณที่ต่ำและใช้เวลาและแรงงานในปริมาณที่น้อยกว่าดาวเทียมปกติทั่วไป โดยมีภารกิจที่หลากหลาย อาทิเช่น การถ่ายภาพ การสื่อสาร การทดสอบประสิทธิภาพและความสามารถในการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ในอวกาศ เป็นต้น

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสนอส่วนการทำงานและองค์ความรู้อันเป็นส่วนหนึ่งของเส้นทางสู่การพัฒนา KMITL CubeSat เพื่อสามารถใช้งานบนอวกาศได้ในอนาคต โดยหน่วยการทำงานหลักๆ ที่อยู่ภายใต้ความรับผิดชอบของคณะผู้จัดทำทั้งหมด 2 หน่วย คือบอร์ด JPEG Camera และการทำงานบางส่วนของบอร์ดจัดการข้อมูลกลาง (On-Board Data Handling หรือ OBDH) เพื่อให้ส่วนการทำงานและองค์ความรู้ดำเนินงานได้บนแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซทในอนาคต โดยส่วนการทำงานในปริญญานิพนธ์นี้ประกอบด้วย การพัฒนาบอร์ด JPEG Camera ซึ่งใช้หน่วยประมวลผลขนาดเล็กแทนไมโครคอนโทรลเลอร์สำเร็จ เพื่อลดน้ำหนักและพื้นที่บนแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซท โดยภาพถ่ายที่ได้จากกล้อง JPEG นั้น ผ่านการดำเนินงานบนโดเมนของเวฟเล็ต (Wavelet Domain) ด้วยหลักการของ Dual-tree Complex Wavelet Transform ซึ่งการทำงานนี้จะดำเนินอยู่ที่สถานีภาคพื้นดิน สำหรับส่วนการทำงานถัดมาคือการส่งถ่ายข้อมูลประเภทข้อความผ่านกระบวนการเข้ารหัสลับ - ถอดรหัสลับในรูปแบบของการเข้ารหัสเคออสติก (Chaotic Encryption) บนพื้นฐานของความเป็นการประมวลผลอย่างง่ายในลักษณะของ Lightweight Engine ซึ่งส่วนการทำงานนี้ดำเนินอยู่ส่วนการประมวลผลของบอร์ดจัดการข้อมูลกลางบนส่วนอวกาศและสถานีภาคพื้นดิน ซึ่งสถานีภาคพื้นดินทำการออกแบบไว้ด้วยโปรแกรม LabVIEW นอกจากนี้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแนวความคิดการแก้ไขปัญหาการถ่ายภาพของดาวเทียมคิวบ์แซทในสภาวะไร้น้ำหนักในอวกาศนั้นจะมีการเคลื่อนที่อย่างอิสระ ส่งผลให้การถ่ายภาพนั้น

อาจได้ผลไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ผ่านระบบการควบคุมตำแหน่งการถ่ายภาพหรือ Attitude Control Unit โดยใช้แนวคิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) อันเป็นการไม่ใช้พลังงาน ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานภายในตัวดาวเทียมคิวบ์แซท จึงสามารถแจกจ่ายพลังงานให้หน่วยการทำงานอื่นๆ ที่มีความจำเป็นภายในตัวดาวเทียมได้มากขึ้น อีกทั้งได้นำเสนอแนวทางการพัฒนาและสร้างองค์ความรู้ในการออกแบบและสร้างแบบจำลองเชิงวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบ์แซท ในด้านการเกษตรแม่นยำหรือ Smart and Precision Agriculture ผ่านการศึกษาและวิเคราะห์การหาค่าดัชนีพืชพรรณหรือ Normalized Difference Vegetable Index หรือ NDVI โดยอาศัยภาพถ่ายที่ได้จาก Multispectral Camera ของดาวเทียม LandSat 8 ในลักษณะของการพิจารณาผลผลิตทางการเกษตร โดยในอนาคตนั้นสามารถประยุกต์การใช้งานและจัดหา Multispectral Camera ขนาดที่เหมาะสมกับดาวเทียมคิวบ์แซทขนาด 3 U ซึ่งเป็นขนาดของดาวเทียม KMITL CubeSat อันสมบูรณ์ต่อไป จึงถือเป็นจุดเริ่มต้นในการประยุกต์ใช้งานดาวเทียมคิวบ์แซทให้อยู่ในลักษณะของดาวเทียมสำรวจทรัพยากร

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบและสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบ์แซทนั้น จำเป็นต้องประกอบด้วยการทำงานจำนวนมากหลายหน่วยการทำงานและจะต้องมีการลำดับขั้นตอนและการจัดการระเบียบของข้อมูลทั้งหมดภายในคิวบ์แซทที่ดี โดยสำหรับแบบจำลองคิวบ์แซท EM - 3 นั้นได้แบ่งโหมดการทำงานออกเป็น 4 โหมดอันได้แก่โหมดการรายงานข้อมูลทั่วไปที่อยู่ภายในและภายนอกคิวบ์แซท ณ สภาวะใดๆ โหมดการส่งคำสั่งถ่ายภาพและรับข้อมูลภาพ, โหมดการเข้ารหัสลับ - ถอดรหัสลับข้อความ และโหมดการส่งคำสั่งเลือกข้อมูลเสียงเพลง ซึ่งจะเห็นได้ว่าจำนวนของเฟรมข้อมูลที่เกิดขึ้นในระบบการสื่อสารระหว่างดาวเทียมคิวบ์แซทและสถานีภาคพื้นดินนั้นมีค่อนข้างมาก โดยในการทำงานจริงของคิวบ์แซท EM - 3 ในวันปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศนั้นพบว่าแบบจำลองคิวบ์แซทรุ่นนี้ได้เกิดความล้มเหลวในการจัดการข้อมูลที่รวมระบบการทำงาน สำหรับเรื่องของการรับค่าจากซอฟต์แวร์สถานีภาคพื้นดินและส่งค่าข้อมูลตามที่ภาคพื้นดินต้องการกลับมา ดังนั้นช่วงเวลาในการทดสอบการทำงานของระบบภายในแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซทก่อนการปล่อยจริงจึงเป็นเรื่องที่สำคัญและควรพิจารณาไว้ขณะออกแบบและสร้างแบบจำลองดาวเทียมคิวบ์แซทต่อไปในอนาคต

บรรณานุกรม

- [1] อาณาจักรภูมิสารสนเทศ อาณาเขตแห่งการเรียนรู้ “ดาวเทียมจิ๋ว#1 มา รู้จักกับ Cubesat”
<http://learn.gistda.or.th/article/บทความทั่วไป/ดาวเทียมดวงจิ๋ว-episode1-มา รู้จัก/>
- [2] KNACKSAT “History (ความเป็นมา)” <http://www.knacksat.space/history>
- [3] นายธีระเดช กุศลธรรมรัตน์ นายธวานนท์ เทพสิทธิ นายภีมวิษญ์ สุทธิกาญจน์ “การออกแบบและสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบ์แซทและการเข้ารหัสช่องสัญญาณ” หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ปีการศึกษา 2559
- [4] Sparkfun. “JPEG CAMERA-2M” https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/LightImaging/JPEG_Camera_2M_Manual.pdf
- [5] มนตรี คงมหาพฤกษ์ “มาทำความรู้จัก “microSD card” กันเถอะ”
<https://www.gm2000magazine.com/microsd-card-buyer-guide/>
- [6] Vishnu M Aiea. “Interfacing Catalex Micro SD Card Module with Arduino”
<http://www.vishnumaiea.in/projects/hardware/interfacing-catalex-microsd-card-module>.
- [7] Arduinoall “โมดูล Micro SD Card Module microSD Card Adapter (Catalex)”
<https://www.arduinoall.com/product/557/โมดูล-micro-sd-card-micro-sd-card-module-microsd-card-adapter-catalex>
- [8] Atmel “ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P” <https://www.mouser.com/datasheet/2/268/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48P-1315288.pdf>
- [9] Robotinc “เริ่มต้นใช้งาน ARDUINO NANO V3.0” <http://www.robotinc.asia/Arduino/ArduinoNANO.html>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] ซินเนอร์จี อิเล็กทรอนิกส์ “*USB to TTL Serial Converter Module User’s Manual*”
<https://www.synes.co.th/media/wysiwyg/Product/Interface/USB/Thai-USB-to-Serial.pdf>
- [11] ITU “*INFORMATION TECHNOLOGY DIGITAL COMPRESSION AND CODING OF CONTINUOUS – TONE STILL IMAGES REQUIREMENTS AND GUIDELINES*”
<https://www.w3.org/Graphics/JPEG/itu-t81.pdf>
- [12] DCube Software Technologies “*JPEG File Layout and Format*”
<http://vip.sugovica.hu/Sardi/kepnezo/JPEG%20File%20Layout%20and%20Format.htm>
- [13] LSoft Technologies Inc “*JPG Signature Format: Documentation & Recovery Example*” <https://www.file-recovery.com/jpg-signature-format.htm>
- [14] Ruye Wang. “*2-D Interpolation.*” <http://fourier.eng.hmc.edu/e176/lectures/ch7/node7.html>.
- [15] Electrical and Computer Engineering McMaster University. “*Bicubic Interpolation.*” http://www.ece.mcmaster.ca/~xwu/interp_1.pdf
- [16] “*Peak signal-to-noise ratio.*” (n.d.). Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Peak_signal-to-noise_ratio.
- [17] ศรัญญา ชัยวิสูตร “*การตรวจจับจุดยอดคลื่นไฟฟ้าหัวใจโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต*”
 วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ
 วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2556
- [18] ณัฐนันท์ ทัดพิทักษ์กุล กิตติ อรรถกิจมงคล สรวุฒิ สุจริตจร “*การบีบอัดภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนโดยใช้การแปลงเวฟเลตแบบดิสครีท*”
 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [19] MUSOKO VICTOR, PROCHA`ZKA ALES` “*COMPLEX WAVELET TRANSFORM IN SIGNAL AND IMAGE ANALYSIS*” Department of Computing and Control Engineering, Institute of Chemical Technology

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] Garg, A., Naidu, S.V., Yahia, H. and Singh, D. “Wavelet Based Resolution Enhancement for Low Resolution Satellite Images.” <https://hal.inria.fr/hal-01070357/document>
- [21] Demirel, H and Anbarjafari, G. (2010). Satellite Image Resolution Enhancement Using Complex Wavelet Transform. In. IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, VOL. 7, NO. 1 (p.123-126). Eastern Mediterranean University: IEEE
- [22] ศรวัฒน์ ชิวปรีชา. “การเข้ารหัส - ถอดรหัสลับแบบ Chaotic สำหรับความปลอดภัยในการสื่อสารโดยอาศัยปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้นในวงจรกรองสัญญาณดิจิทัล: การออกแบบและการสร้าง.” คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2554
- [23] Microchip Technology Inc. “ATmega2560” <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega2560>
- [24] Thai Arduino Club “Arduino คืออะไร” <https://thaiarduino.club/what-is-arduino/>
- [25] Sarawut Khumthong “อะไรคือ แลปวิว LABVIEW” <http://scada2easy.blogspot.com/2015/11/labview-programming.html>
- [26] Duncan Miller. “Design optimization of the CADRE Magnetorquers.” 2013.
- [27] พจนานุกรมธรรมณี “บทที่ 7 แม่เหล็กถาวรและแม่เหล็กไฟฟ้า” <https://www.scribd.com/document/250704603/บทที่-7-แม่-เหล็ก-ถาวร-และ-แม่-เหล็ก-ไฟฟ้า>
- [28] “Dipole model of the Earth’s magnetic field” https://en.wikipedia.org/wiki/Dipole_model_of_the_Earth%27s_magnetic_field#cite_note-walt-1
- [29] สันติ แม่นศิริ. “สนามแม่เหล็กไฟฟ้า - กฎของบีโอดต์ - ซาวาร์ต และกฎของแอมแปร์.” http://science.sut.ac.th/physics/courses/105102/54-T1/note/54_04_102.pdf
- [30] นายศุภฤกษ์ มณีลาภ “วงโคจรดาวเทียม” <https://sites.google.com/site/suparek1997/home/1-2-wng-khocr-khxng-dawtheiym>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [31] Education & Training Center. “ภาพถ่ายมัลติสเปกตรัม (Multispectral Image).”
http://etc.csrs.ku.ac.th/pluginfile.php/823/mod_resource/content/1/Multispectral.pdf
- [32] สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ “ดาวเทียม LANDSAT-8”
<https://www.gistda.or.th/main/th/node/93>
- [33] Tek Bahadur Kshetri “NDVI, NDBI & NDWI Calculation Using Landsat 7, 8”
<https://www.linkedin.com/pulse/ndvi-ndbi-ndwi-calculation-using-landsat-7-8-tek-bahadur-kshetri>
- [34] สารสนเทศอุตุนิยมวิทยาเกษตร. “ค่าดัชนีพืชพรรณ (Vegetation Index).”
<http://www.arcims.tmd.go.th/DailyDATA/drought%20index/documents/ดรรชนีความแห้งแล้งNDVI.pdf>
- [35] “จังหวัดที่มีผลผลิตข้าวมากที่สุด 10 ลำดับ พ.ศ.2552 - 2554.” (n.d.). Retrieved from
<http://service.nso.go.th/nso/nsopublish/TopTen/10/T1005/th/th.htm>.
- [36] กรมส่งเสริมการเกษตร “ปฏิทินการปลูกข้าว” http://www.servicelink.doae.go.th/webpage/book%20PDF/rice/tmie_rice.pdf
- [37] กรมอุตุนิยมวิทยา. “ฤดูกาลของประเทศไทย.” <https://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=53>
- [38] สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. “ลักษณะของข้าวที่สำคัญทางการเกษตร.”
<http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=3&chap=1&page=t3-1-infodetail05.html>
- [39] กรมอุตุนิยมวิทยา. “ภัยแล้ง (Drought).” <https://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=71>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบปล่อยแบบจำลองดาวเทียมคิวบแซท EM-3 ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ

วันเสาร์ที่ 1 ธันวาคม 2561 เวลา 13.00 - 19.00 น.

สถานที่ วัดขุนอินทประมูล ต.อินทประมูล อ.โพธิ์ทอง จ.อ่างทอง (14.637167,100.424833)

1. การพยากรณ์สภาพอากาศในการทดสอบครั้งที่ 1

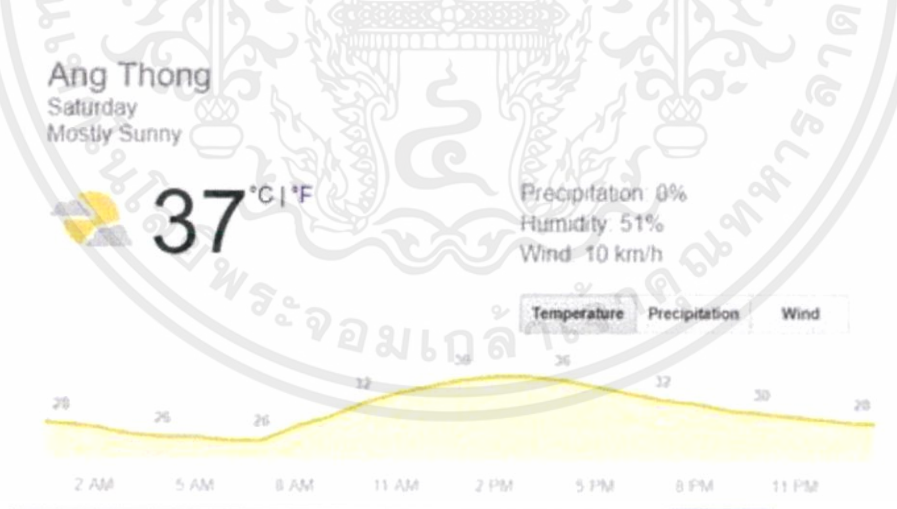
วันเสาร์ที่ 1 ธันวาคม 2561

ระยะเวลาระหว่าง 13.00 ถึง 19.00 น.

สถานที่ วัดขุนอินทประมูล ต.อินทประมูล อ.โพธิ์ทอง จ.อ่างทอง (14.637167,100.424833)

พยากรณ์สภาพอากาศได้ผลดังนี้คือ

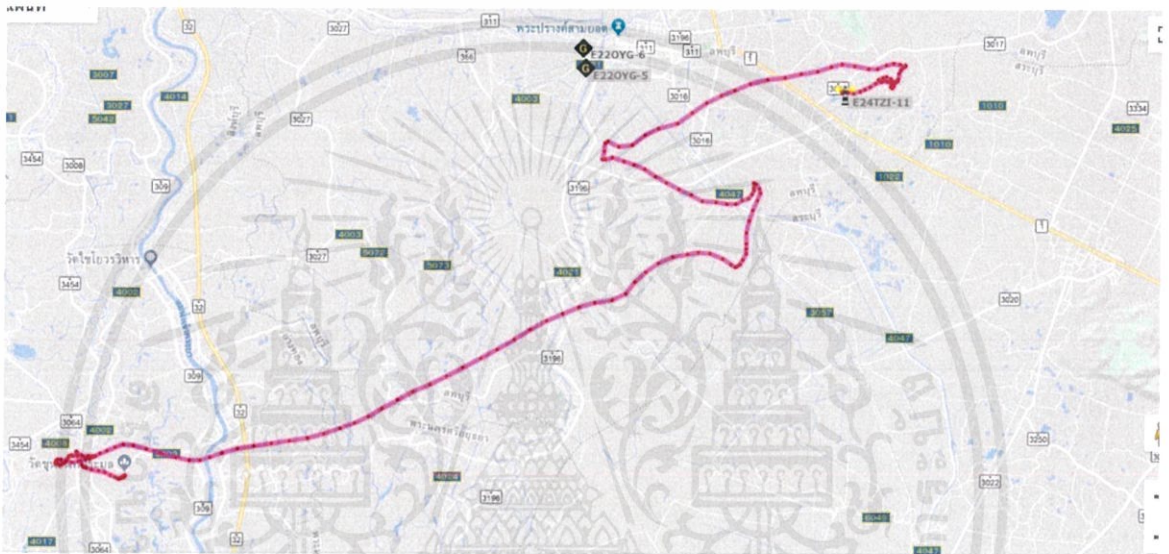
- 1) อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 23 ถึง 37 องศาเซลเซียส
- 2) ความชื้นสัมพัทธ์ 51 เปอร์เซ็นต์
- 3) โอกาสที่ฝนจะตก 0 เปอร์เซ็นต์พื้นที่จังหวัดอ่างทอง
- 4) ความเร็วลม 10 เมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ ก.1 การพยากรณ์สภาพอากาศโดยฐานข้อมูลออนไลน์ก่อนทำการส่งบอลูน

2. การพยากรณ์เส้นทางการเคลื่อนผ่านของบอลูนในการทดสอบครั้งที่ 1

จากการพยากรณ์เส้นทางการเคลื่อนผ่านของจะพบว่าบอลูนจะลอยขึ้นสู่ท้องฟ้าด้วยความเร็ว 3 เมตรต่อวินาที จนถึงที่ระดับความสูง 25 กิโลเมตรจากพื้นดินบอลูนจะแตก จากนั้นจะพยุงตัวด้วยร่มชูชีพจนตกสู่พื้นดินที่พิกัด ละติจูดที่ 14.4711 ลองจิจูดที่ 100.4196 ซึ่งระยะทางการเคลื่อนผ่านของบอลูนรวม 50 กิโลเมตร และใช้เวลาทั้งสิ้น 2 ชั่วโมง 28 นาที แสดงดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 การพยากรณ์เส้นทางที่บอลูนเคลื่อนผ่านและตกสู่พื้นดิน

3. การเตรียมการทดสอบแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบแซทในการทดสอบครั้งที่ 1



รูปที่ ก.3 การเตรียมการส่งแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบแซท

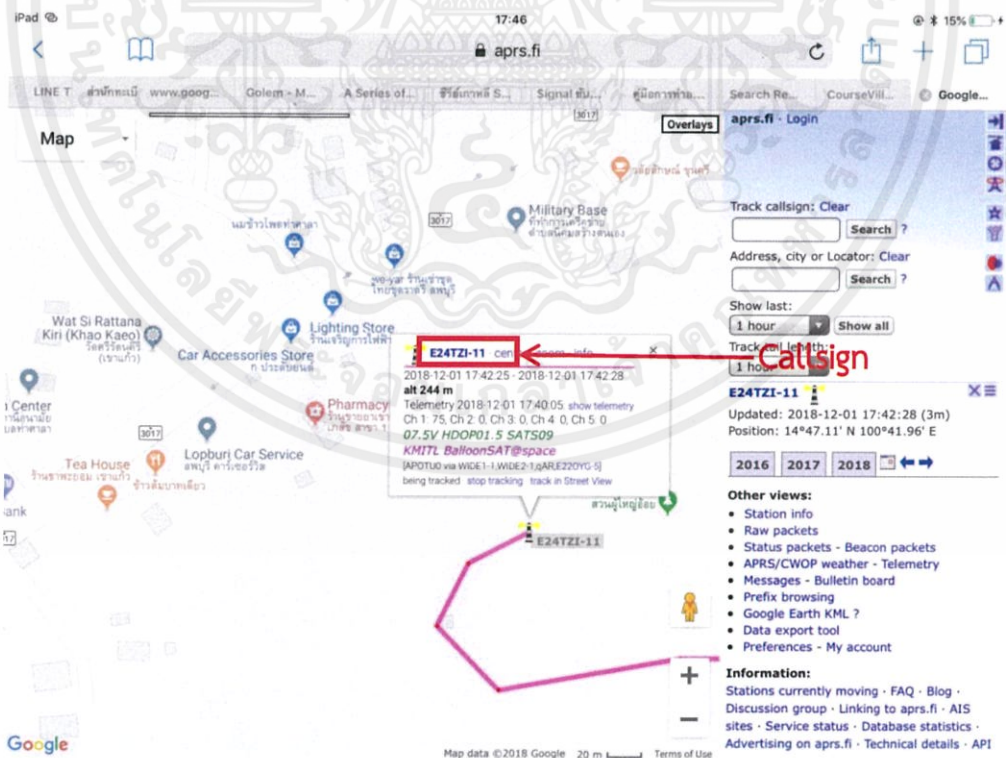
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การส่งแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบแซทขึ้นสู่อวกาศ ใช้บอลูนขนาด 300 กรัม บรรจุแก๊สฮีเลียม 3 คิวบิกเมตร ทำให้เกิดแรงยก 2 กิโลกรัมซึ่งสามารถยกวัตถุน้ำหนัก 1 ถึง 1.2 กิโลกรัม ปล่อยให้ลอยสู่อวกาศได้ประมาณ 20 กิโลเมตร



รูปที่ ก.4 การบรรจุแก๊สฮีเลียมสู่บอลูน

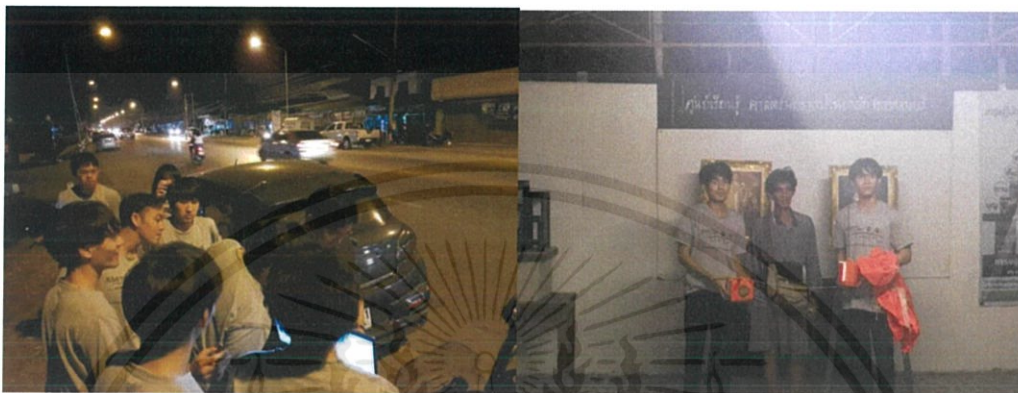
4. การเก็บกู้แบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบแซทในการทดสอบครั้งที่ 1



รูปที่ ก.5 การติดตามแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบแซทด้วย APRS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตามเก็บกู้ดาวเทียม ขอขอบพระคุณ นายชาญ ทองใบ ผู้ดูแลศูนย์การเรียนรู้ศาสตร์ พระราชาคืนป่าสัก จังหวัดลพบุรี ที่อนุญาตและช่วยเหลือภารกิจการเก็บกู้ดาวเทียมคิวบแซท ในครั้งนี้จากจุดปล่อยประมาณ 50 กิโลเมตร



รูปที่ ก.6 การเก็บกู้แบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบแซท



รูปที่ ก.7 ดาวเทียมคิวบแซทที่เก็บกู้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ภาพถ่ายทางอากาศจากกล้องออฟไลน์



รูปที่ ก.8 ภาพถ่ายทางอากาศจากกล้องออฟไลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขออนุญาตปล่อยบอลลูก

การจะนำบอลลูกหรือวัตถุใดๆ ขึ้นไปสู่อากาศจะต้องได้รับอนุญาตจากผู้อำนวยการเขต สำหรับกรุงเทพมหานคร หรือนายอำเภอแห่งท้องที่สำหรับจังหวัด ซึ่งรับผิดชอบในเขตพื้นที่ที่จะปล่อย โดยพื้นที่ที่คณะเราไปทำการปล่อยบอลลูก คือวัดขุนอินทประมูล ต.อินทประมูล อ.โพธิ์ทอง จ.อ่างทอง ซึ่งอยู่ในพื้นที่ความรับผิดชอบของที่ว่ากรมอำเภอโพธิ์ทอง โดยการขออนุญาตจะต้องเข้าไปเขียนคำขอที่ว่ากรมอำเภอโพธิ์ทองด้วยตนเอง ซึ่งจะใช้เวลาในการดำเนินการประมาณ 1 วันในเวลาราชการ แสดงใบอนุญาตการปล่อยบอลลูกดังรูปที่ ก.9

ใบอนุญาต

ให้จุดและปล่อยหรือกระทำการอย่างใดเพื่อให้งาน หจก. โกลบอล โกลโม่ โกลพ่น หรือวัตถุขึ้นสู่
ที่อาศัยถาวร ขึ้นสู่อากาศ ตามคำสั่งหัวหน้าคณะรักษาความสงบแห่งชาติที่ ๒๗/๒๕๕๘ เรื่อง มาตรการ
ป้องกันและแก้ไขปัญหาความเดือดร้อนจากการจุดและปล่อยบั้งไฟ หจก. โกลบอล โกลโม่ โกลพ่น หรือ
วัตถุขึ้นสู่ที่อาศัยถาวร วันที่ ๓๐ มิถุนายน พุทธศักราช ๒๕๕๘

(๑) ใบอนุญาตเลขที่	๔ / ๒๕๖๑
(๒) สถานที่ออกใบอนุญาต	ที่ว่าการอำเภอโพธิ์ทอง
(๓) วัน เดือน ปี ที่ออก	๒๒ พฤศจิกายน ๒๕๖๑
(๔) ชื่อ อายุ ผู้รับใบอนุญาต	นายวิวัฒน์ สุทธิกาญจน์ อายุ ๒๓ ปี
(๕) เลขประจำตัวประชาชน	๓ - ๓ ๕ ๐ ๔ - ๐ ๐ ๓ ๖ ๗ - ๔ ๖ - ๒
(๖) คู่มือสำเนาบัตรประชาชน	เลขที่ ๑๐๐/๕ หมู่ที่ ๕ ตำบลบางวัดพัฒนา
ตำบล อำเภอ จังหวัด	ตำบลบางวัดพัฒนา จังหวัดนนทบุรี
(๗) ชนิด	บอลลูก
(๘) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง น้ำหนัก	๓.๕ เมตร น้ำหนัก ๓๐๐ กรัม/ลูก
(๙) จำนวน	๓ ลูก
(๑๐) ใ้มาโดย	จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
(๑๑) นำไปจุดและปล่อย ในวันที่	๓ ธันวาคม ๒๕๖๑
(๑๒) เวลา	๐๙.๐๐ - ๑๒.๐๐ น.
(๑๓) สถานที่พื้นที่	ณ บริเวณวัดขุนอินทประมูล หมู่ที่ ๓ ต. อินทประมูล อ. โพธิ์ทอง จ. อ่างทอง

ใบอนุญาตนี้ให้ใช้ได้
ปล่อยบอล ลูกขึ้นสู่อากาศในวันและสถานที่ ที่กำหนด
พร้อมปฏิบัติตามเงื่อนไข

รูปที่ ก.9 ใบอนุญาตสำหรับการปล่อยบอลลูก

เมื่อได้รับใบอนุญาตจากที่ว่ากรมอำเภอแล้ว จะต้องนำไปใช้ประกอบกับแบบฟอร์มการแจ้งข่าวเกี่ยวกับความปลอดภัยในการเดินอากาศ (NOTAM) ดังแสดงในรูปที่ ก.10 เพื่อแจ้งต่อ NOTAM Office สำนักงานการบินพลเรือน เพื่อออกประกาศนักบินให้ระวังพื้นที่ที่ทำการปล่อยบอลลูก โดยใช้เวลาในการดำเนินการ 1 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบฟอร์มแจ้งข่าวเกี่ยวกับความปลอดภัยในการเดินอากาศ
 Report to Aeronotical N. 1.2

CAAT The Civil Aviation Authority of Thailand (สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย)
 Civil Aviation Authority of Thailand

แบบฟอร์มการแจ้งข่าวเกี่ยวกับความปลอดภัยในการเดินอากาศ

1. วันที่และเวลาของการออกข้อมูล วันที่ 26 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2561 เวลา 12.15 น.
 1.1 ในเวลาทำการ (08.30 - 16.30 น.)
 มีมติ ฝ่ายบริการจราจรการบิน กองข้อมูลจราจรการบิน สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย
 โทรศัพท์ 0 2568 8830, 063 205 8831 โทรสาร 0 2576 1903 E-mail: notam@caat.or.th

1.2 นอกเวลาทำการและวันหยุดราชการ
 มีมติ ศูนย์บริการข้อมูลและสารสนเทศการเดินอากาศ บริษัท วิทยุการบินแห่งประเทศไทย จำกัด
 โทรศัพท์ 0 2287 8202, 0 2287 8204 โทรสาร 0 2287 8205, 0 2287 4695 และ
 มีมติ ฝ่ายบริการจราจรการบิน กองข้อมูลจราจรการบิน สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย

2. หน่วยกำเนิด (Originator's Indicator) ท่าอากาศยาน (V I _ _)
 ศูนย์ควบคุมจราจรทางอากาศ
 อื่นๆ (โปรดระบุ) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3. วัตถุประสงค์ในการแจ้งออกประกาศ ออกประกาศใหม่
 ออกประกาศแทน
 ออกประกาศยกเลิก
(Series and number/year of NOTAM to be replaced)
(Series and number/year of NOTAM to be cancelled)

4. การแก้ไข/การระงับ การไม่ออกข้อมูลขึ้นหรือระงับออก

(กรณี มีสี(A)หรือสีแดง กรุณาระบุจำนวนชุดสี) จำนวน 1 ชุด

5. บริเวณ/สถานที่ที่รับผิดชอบ (ชื่อ ตำบล ตำบล) กรุงเทพมหานคร กรุงเทพมหานคร 2003 ส.บินปฐม
 ส.บินสอง ข.อำเภอ 14120

6. จุดคิด เริ่มวิ่ง (Include) 15.642106 เติมน้ำ (Longitude) 100.427150
(XX° XX' XX. XX" N หรือ XX. XXXXXX) (XXX° XX' XX. XX" E หรือ XXX. XXXXXX)


7. ความสูง 100,000 ฟุต 62 NM

9. ระยะเวลาดำเนินการ เริ่มต้น วันที่ 1 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2561 เวลาท้องถิ่น 0800 น.
 สิ้นสุด วันที่ 1 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2561 เวลาท้องถิ่น 1200 น.

10. ชื่อผู้ประสานงาน ศ.ดร.ศรวิทย์ ชีวินวิธา โทร. 081-176-6372
 ตำแหน่ง อำนวยการควบคุมจราจรบิน หน่วยงาน ฝ่ายบริการจราจรบินพลเรือน

11. กรณีฉุกเฉินติดต่อ ศ.ดร.ศรวิทย์ ชีวินวิธา โทร. 081-176-6372

12. รายละเอียดเพิ่มเติม โปรดดูตรวจอากาศได้ความสูงตั้งแต่ 0 - 50 ฟุตเมตร เหนือระดับพื้นทะเล โดยใช้เวลา
 ประมาณ 90 นาที จากชั้นบินของเครื่องบิน และการตรวจสอบข้อมูลโดยอัตโนมัติประมาณ 90 นาที

ลงชื่อ 
 (ผู้อำนวยการศูนย์ควบคุมจราจรบิน)
 ตำแหน่ง อำนวยการควบคุมจราจรบิน
 โทร 081-176-6372

รูปที่ ก.10 แบบฟอร์มการแจ้งข่าวเกี่ยวกับความปลอดภัยในการเดินอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้