

การประยุกต์ใช้ระบบกลไฟฟ้าคุณภาพ  
เพื่อพัฒนามาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่

นายชิตตุงศ์ ชัยสุขนิพัทธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

APPLICATION OF MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEM (MEMS)  
FOR DEVELOPMENT OF IN-PLACE INCLINOMETER

MR.CHITTANUPONG CHAISUKNIPHAT

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์ใช้ระบบกลไฟฟ้าจุลภาคเพื่อ  
พัฒนามาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่

โดย

นายชิตตฤพงษ์ ชัยสุชนิพัทธ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. จีรวัดร บุญญะฐิติ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เทพรักษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. จีรวัดร บุญญะฐิติ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรัช ก้องกิจกุล)

ชิตณุพงศ์ ชัยสุขนิพัทธ์ : การประยุกต์ใช้ระบบกลไฟฟ้าจุลภาคเพื่อพัฒนามาตรวัดการเคลื่อนตัว  
แนวราบในที่. (APPLICATION OF MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEM (MEMS) FOR  
DEVELOPMENT OF IN-PLACE INCLINOMETER)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ร.ศ.ดร.สิริวัตร บุญญะฐิติ, 76 หน้า

มาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบถูกใช้ในงานวิศวกรรมปฐพีเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ  
ของระบบค้ำยัน กำแพงกันดิน ลาดดิน และพื้นที่เสี่ยงต่อการเคลื่อนตัว การตรวจวัดในปัจจุบันทำโดย  
การหย่อนหัวอ่านลงในท่อทาง และบันทึกความเอียงแต่ละช่วงขณะที่หัวอ่านถูกดึงขึ้น วัตถุประสงค์  
ของการวิจัยนี้คือการพัฒนาระบบของมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง  
และอัตโนมัติโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่หาซื้อได้ภายในประเทศ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนด้านการตรวจวัด  
และเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของอุตสาหกรรมก่อสร้างภายในประเทศ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอ การออกแบบและพัฒนาต้นแบบมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ (In-  
Place Inclinator) โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของระบบ ซึ่งประกอบไปด้วย  
เซนเซอร์วัดความเร่งสามแกน (Tri axial accelerometer) เพื่อตรวจวัดการเอียงและเซนเซอร์เข็มทิศ  
(Compass Sensor) เพื่อตรวจสอบการบิดของท่อทาง เซนเซอร์ทั้งสองแบบถูกติดตั้งในหัวอ่านที่ทำ  
จากท่ออะลูมิเนียมขนาด 1 นิ้ว ซึ่งมีลวดด้านข้าง 2 ชุด ติดตั้งอยู่ห่างกัน 50 เซนติเมตร และถูกออกแบบให้  
สามารถเคลื่อนที่ได้ภายในท่อทางเหมือนกับมาตรวัดการเคลื่อนตัวแบบมาตรฐาน (Inclinometer)  
ซอฟต์แวร์ที่ผู้วิจัยพัฒนาให้กับระบบมาตรวัดจะอ่านและบันทึกผลสำรวจเป็นมุมเอียงและมุมบิดของท่อ  
นำทาง เพื่อสร้างกราฟการเบี่ยงเบนแนวราบสำหรับใช้เปรียบเทียบกับผลสำรวจจากมาตรวัดแบบ  
มาตรฐานโดยในงานวิจัยนี้ใช้มาตรวัดรุ่น OS242SV3000 ของบริษัท SIGEO มาตรวัดฯที่ผู้วิจัยพัฒนา  
สามารถตรวจวัดการบิดของท่อทางได้ และให้ผลตรวจวัดการเคลื่อนตัวสอดคล้องกับค่าจากมาตรวัดฯ  
แบบเดิม แต่มีความผิดพลาดเกินกว่าทฤษฎี ซึ่งหากจะนำมาตรวัดฯไปใช้งานต้องเพิ่มประสิทธิภาพมาตร  
วัดฯด้วยการเปลี่ยนเซนเซอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ให้มีความละเอียดมากขึ้นเช่นใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์  
ที่มีส่วนแปลงผล ADC แบบ 16 บิต นอกจากนี้ยังพบว่าจะต้องปรับปรุงกระบวนการผลิตมาตรวัดฯให้  
ทนทานต่อสภาวะแวดล้อมภายนอก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการป้องกันน้ำที่ค้างอยู่ในท่อทางไม่ให้ซึมเข้า  
ไปในหัวอ่าน

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อ.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2554.....

## 5170708721 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : ACCELEROMETER / MICROCONTROLLER / AUTOMATION /  
INCLINOMETER

CHITTANUPONG CHAISUKNIPHAT : APPLICATION OF MICRO ELECTRO  
MECHANICAL SYSTEM (MEMS) FOR DEVELOPMENT OF IN-PLACE  
INCLINOMETER. ADVISOR: ASSOC.PROF. TIRAWAT BOONYATEE, 76 pp.

Inclinometers are used in geotechnical works to monitor lateral deformations of braced excavations, retaining walls, slopes and landslide areas. Conventional inclinometer measurement is done by lowering a probe into a grooved casing and reading the inclination at prescribed intervals as the probe is drawn upwards. This study aims to develop an automated inclinometer system for continuous monitoring from domestically available electronic parts. The developed equipment will provide significant savings in terms of equipment, material and operating costs.

This thesis explains the design and development of an inclinometer from a microcontroller chip, a tri-axial accelerometer sensor. One of an improvement in this study was made by using an electronic compass to detect the twist of grooved cases which was not possible by conventional equipments. The sensor and compass were installed in an aluminum pipe with a diameter of 1 inch. Two sets of guided wheels were attached to the pipe in a similar way as conventional probes. The distance between guide wheels was 50 cm. In addition to the sensor head, a computer code was also written to read and record the inclination and azimuth of the sensor head.

The efficiency of developed system was evaluated by comparing its measurements with those obtained by a conventional inclinometer. The trend of lateral movement observed from both equipments was in a fair agreement. However the error of developed device was still higher than practical standard. Nonetheless, it is supposed that this error can be minimized by upgrading the microcontroller and accelerometer chips to some higher classes. For instance, replace the adopted 10bit ADC microcontroller by 16bit ADC ones.

Department : Civil Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Civil Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2011

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์.ดร. วิรุวัต บุญญะฐี เป็นอย่างยิ่งในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้โอกาสในการทำวิทยานิพนธ์ที่มีจุดมุ่งหมายในการพัฒนาเทคโนโลยีการก่อสร้างของประเทศให้เกิดความก้าวหน้า พร้อมทั้งยังให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษาในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างมากมาย ท่านอาจารย์ได้เสียสละเวลาหลังเลิกงานที่จะส่งสอนข้าพเจ้าด้วยความอดทนตลอด 4 ปีที่ผ่านมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วง อีกทั้งความรู้ที่ได้รับจากอาจารย์ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับงานหลายสาขาอาชีพ นอกจากนี้ความอดทนทุ่มเทให้กับการสอน การทำงานที่แสวงหาความรู้ใหม่ๆ และวิสัยทัศน์ของอาจารย์ยังเป็นแบบอย่างให้ข้าพเจ้านำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อตนเองในภายภาคหน้า

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบทุกท่าน ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณวิศวกรบริษัทเอสทีเอส ทุกท่านที่ให้ความร่วมมือและให้ความช่วยเหลือในการเข้าทดสอบในโครงการซึ่งต้องใช้ทั้งอุปกรณ์ และสถานที่ ในการปฏิบัติงาน จนทำงานสำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มอบทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ กระผมชิตนุพงษ์ ชัยสุขนิพัทธ์ ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นอย่างยิ่ง

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ รุ่นพี่และเพื่อนๆ ทุกท่านที่ให้คำแนะนำดีๆ รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ที่มีส่วนร่วมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฎ
บทที่ 1 .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	3
1.5 วิธีการดำเนินการ .....	3
บทที่ 2 .....	4
2.1 ประวัติการพัฒนามาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ .....	4
2.2 มาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ (INCLINOMETER) .....	6
2.3 มาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ (IN-PLACE INCLINOMETER).....	9
2.4 วิธีการแปลสัญญาณนอกเป็นมุมเอียง.....	14
2.5 วิธีการปรับแก้ระยะเคลื่อนที่แนวราบด้วยมุมบิด .....	15
บทที่ 3 .....	16
3.1 ชั้นศึกษาและรวบรวมข้อมูล .....	17
3.2 การต่อวงจรและพัฒนาโปรแกรม .....	19
3.3 การออกแบบและประดิษฐ์ต้นแบบหัวอ่าน .....	22
3.4 การสอบเทียบหัวอ่านมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ .....	25

บทที่ 4.....	31
4.1 การทดสอบประสิทธิภาพในสนาม.....	31
4.2 การวิเคราะห์ผลทดสอบโครงการก่อสร้างก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีม่วง .....	32
4.3 การวิเคราะห์ผลทดสอบโครงการก่อสร้างคอนโดมิเนียม 185 .....	38
บทที่ 5.....	47
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	48
5.2 ปัญหาและข้อจำกัด .....	49
5.3 ข้อเสนอแนะ .....	49
รายการอ้างอิง.....	50
ภาคผนวก ก .....	51
ภาคผนวก ข .....	68
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	76



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ก-1	ผลสอบเทียบแรงดันที่ความเร่งเท่ากับ 0 g แกน Y.....	47
ก-2	ผลสอบเทียบแรงดันที่ความเร่งเท่ากับ 0 g แกน X.....	49
ก-3	ผลทดสอบโครงการคอนโดมิเนียม 185หลุมที่ I3.....	51
ก-4	ผลทดสอบโครงการคอนโดมิเนียม 185หลุมที่ I4.....	53
ก-5	ผลทดสอบโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วงหลุมที่ S3.....	55
ก-6	ผลทดสอบโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วงหลุมที่ S5.....	57
ก-7	ผลสำรวจบริษัท STS โครงการคอนโดมิเนียม 185หลุมที่ I3.....	59
ก-8	ผลสำรวจบริษัท STS โครงการคอนโดมิเนียม 185หลุมที่ I4.....	60
ก-9	ผลสำรวจบริษัท STS โครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วงหลุมที่ S3.....	61
ก-10	ผลสำรวจบริษัท STS โครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วงหลุมที่ S5.....	62

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	มาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ (Inclinometer).....	5
2.2	อุปกรณ์อ่านสัญญาณ (Readout Unit).....	5
2.3	หลักการทำงานมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ.....	7
2.4	หลักการคำนวณระยะเคลื่อนที่แนวราบ.....	7
2.5	หลักการสอบเทียบหัวอ่าน.....	8
2.6	หลักการมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ (In-Place Inclinometer).....	9
2.7	มาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ (In-Place Inclinometer).....	10
2.8	โมดูลส่งสัญญาณไร้สาย.....	10
2.9	อุปกรณ์จ่ายแรงดันด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	11
2.10	องค์ประกอบภายนอกมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่.....	11
2.11	องค์ประกอบภายในมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่.....	12
2.12	เซนเซอร์วัดความเร่งที่ติดตั้งภายในหัวอ่าน.....	12
2.13	โครงการAtlas.....	12
2.14	การประยุกต์ใช้มาตรวัดในโครงการ Atlas.....	13
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงกับความเร่ง.....	14
2.16	การปรับแก้ระยะเคลื่อนที่ด้วยมุมบิด.....	15
3.1	แผนผังการพัฒนามาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่.....	16

ภาพที่	หน้า	
3.2	หน้าที่ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	17
3.3	เซนเซอร์วัดความเร่งสามแกนรุ่น ADXL335.....	18
3.4	เซนเซอร์เข็มทิศรุ่น HMC6352.....	18
3.5	ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นPIC18F8722.....	18
3.6	โมดูลบันทึก ET-usb flash drive.....	19
3.7	แบบวงจรระบบมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่.....	20
3.8	วงจรรระบบมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่.....	20
3.9	แผนผังการพัฒนาโปรแกรมภาษาซี.....	21
3.10	การทดสอบวงจร.....	21
3.11	รูปแบบหัวอ่าน.....	22
3.12	ส่วนล๊อของหัวอ่าน.....	23
3.13	ระบบป้องกันน้ำ.....	23
3.14	การป้องกันเซนเซอร์.....	24
3.15	วิธียึดหัวอ่าน.....	24
3.16	ผลทดสอบเซนเซอร์วัดความเร่ง.....	25
3.17	หลักการสอบเทียบ.....	26
3.18	การเตรียมอุปกรณ์ก่อนการสอบเทียบ.....	26
3.19	ผลสอบเทียบแรงดัน $V_0$ แกน X.....	27
3.20	ผลสอบเทียบแรงดัน $V_0$ แกน Y.....	27

ภาพที่	หน้า
3.21 ผลสอบเทียบSensitivity แกน X.....	28
3.22 ผลสอบเทียบSensitivity แกน Y.....	28
3.23 ความละเอียดของเซนเซอร์วัดความเร่ง.....	29
3.24 ผลสอบเทียบมุมบิดแกน X.....	30
3.25 ผลสอบเทียบมุมบิดแกน Y.....	30
4.1 การทดสอบในสนาม.....	31
4.2 ท่อวัด Inclinomater ในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง.....	32
4.3 การบิดตัวของท่อนำทางโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง.....	33
4.4 การเปรียบเทียบระยะเบี่ยงเบนแนวราบหลุมที่ S3.....	34
4.4 การเปรียบเทียบระยะเบี่ยงเบนแนวราบหลุมที่ S5.....	35
4.7 การเปรียบเทียบระยะเบี่ยงเบนแนวราบหลุมที่ S3 หลังปรับแก้ด้วยมุมบิด.....	36
4.7 การเปรียบเทียบระยะเบี่ยงเบนแนวราบหลุมที่ S5 หลังปรับแก้ด้วยมุมบิด.....	37
4.8 กราฟผลลัพธ์ระยะเบี่ยงเบนแนวราบโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง.....	38
4.9 กราฟผลลัพธ์ระยะเบี่ยงเบนแนวราบโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วงหลังปรับแก้ ของบริษัทเอสทีเอส.....	39
4.10 การตรวจวัดในโครงการคอนโดมิเนียม 185.....	40
4.11 การบิดตัวของท่อนำทางโครงการคอนโดมิเนียม 185.....	41
4.12 การเปรียบเทียบระยะเบี่ยงเบนแนวราบหลุมที่ I3.....	42
4.13 การเปรียบเทียบระยะเบี่ยงเบนแนวราบหลุมที่ I4.....	43

ภาพที่	หน้า
4.14	เปรียบเทียบระยะเบี่ยงเบนแนวราบหลุมที่ 13 หลังปรับแก้ด้วยมุมบิด..... 44
4.15	เปรียบเทียบระยะเบี่ยงเบนแนวราบหลุมที่ 14 หลังปรับแก้ด้วยมุมบิด..... 45
4.16	กราฟผลลัพธ์ระยะเบี่ยงเบนแนวราบโครงการคอนโดมิเนียม 185..... 46
4.17	กราฟผลลัพธ์ระยะเบี่ยงเบนแนวราบโครงการคอนโดมิเนียม 185หลังปรับแก้ ของบริษัทเอสทีเอส..... 47

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ราคาที่ดินที่สูงในกรุงเทพฯ ทำให้ผู้ประกอบการหรือเจ้าของโครงการนิยมก่อสร้างอาคารที่มีชั้นใต้ดินเพื่อเพิ่มเนื้อที่ใช้สอย แต่ในเมืองหลวงที่มีอาคารขนาดใหญ่อยู่รวมกันอย่างหนาแน่นพื้นที่สำหรับเตรียมการขุดดินจึงมีอย่างจำกัด ระบบค้ำยันจึงถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของดินซึ่งการเคลื่อนตัวที่มากเกินไปกว่าค่าที่วิศวกรออกแบบจะก่อให้เกิดความสูญเสียทั้งชีวิตและค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมจำนวนมาก การพังทลายของดินอาจเกิดขึ้นได้จากปัจจัยหลายประการ เช่นปริมาณฝนที่ส่งผลต่อการไหลของน้ำใต้ดิน หรือแรงกระทำจากสิ่งปลูกสร้างรอบโครงการ ฯลฯ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวล้วนแล้วแต่คาดการณ์ได้ยาก และส่งผลให้เกิดการพังทลายได้ตลอดเวลา เพื่อให้วิศวกรมีความมั่นใจในการทำงานมากขึ้น มาตรการวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ (Inclinometer) จึงถูกนำมาใช้พร้อมกับระบบค้ำยัน โดยที่มาตรการวัดการเคลื่อนตัวแนวราบจะทำหน้าที่ตรวจสอบและเฝ้าระวังการเคลื่อนตัวของดินที่มีระยะเพิ่มขึ้นตลอดเวลาระหว่างการก่อสร้าง ดังนั้นข้อมูลที่ได้รับจากมาตรการวัดการเคลื่อนตัวแนวราบจึงต้องมีความแม่นยำเพื่อช่วยให้วิศวกรใช้ตัดสินใจทำการก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

มาตรการส่วนใหญ่ที่ใช้ในประเทศไทยนำเข้าจากต่างประเทศ และมีราคาแพง มาตรการดังกล่าวทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติ (Semi Automatic) โดยผู้สำรวจต้องหย่อนหัวอ่าน (Probe) ลงในท่อนำทาง (Casing) แล้วดึงหัวอ่านขึ้นจากกันหลุมเพื่อเก็บข้อมูลการเอียงตัวของท่อนำทาง แล้วกลับด้านหัวอ่านเพื่อหย่อนซ้ำอีกครั้งหนึ่งเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล มาตรการประเภทนี้มีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเนื่องจากการเคลื่อนที่ของหัวอ่านภายในท่อนำทางอยู่เสมอ และใช้เวลานานสำหรับการสำรวจในแต่ละครั้ง นอกจากนี้มาตรการวัดการเคลื่อนตัวแนวราบยังไม่ตอบสนองต่อการเฝ้าระวังอย่างต่อเนื่อง เช่นโครงการที่เสี่ยงต่อการพังทลายของดินอยู่ตลอดเวลา วิศวกรธรณีจึงมีความจำเป็นต้องเดินทางเข้าโครงการเพื่อเก็บข้อมูลอย่างสม่ำเสมอเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการทำงาน ทำให้ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง ค่าวัสดุในการสำรวจ และค่าใช้จ่ายสำหรับการแปลผลในห้องวิจัยมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยปัญหาเหล่านี้ผู้วิจัยจึงพัฒนาต้นแบบของหัวอ่านระบบมาตรการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ (In-Place Inclinometer) โดยใช้เซนเซอร์ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) ซึ่งมีราคาถูกกว่าการสั่งซื้อหัวอ่านที่มีราคาแพงจากต่างประเทศเนื่องจากใช้

เทคโนโลยีที่สามารถหาได้ภายในประเทศซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับประเทศอีกทางหนึ่ง

ปัจจุบันเทคโนโลยีต่างๆ ได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างมากโดยเฉพาะอุปกรณ์ประเภทสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) จึงทำให้อุปกรณ์อย่างไม่โครคอนโทรลเลอร์ได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วทำให้มีขนาดเล็กแต่การทำงานมีประสิทธิภาพและราคาถูกลง [1] และยังสามารถนำมาใช้แทนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ฟังก์ชันการทำงานต่างๆ สามารถแก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงด้านฮาร์ดแวร์ เพียงแต่เปลี่ยนแปลงโปรแกรมเท่านั้น ดังนั้นจึงสะดวกและเหมาะสมที่จะนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์เป็นหน่วยควบคุมระบบมาตรวจวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์จะควบคุมการทำงานของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ที่ทำหน้าที่เป็นตรวจวัดมุมเอียง และเซนเซอร์เข็มทิศ (Compass Sensor) ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดมุมบิดของท่อนำทาง แทนการกลับด้านหัวอ่านของมาตรวัดแบบเดิม (Inclinometer) นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์อื่นๆ เช่น ไมโครลูปพีกา ฯลฯ เพื่อช่วยให้การใช้งานในสนามง่ายขึ้น

งานวิจัยนี้จึงเป็นการพัฒนาต้นแบบของหัวอ่านมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ (In-Place Inclinometer) ที่ควบคุมด้วยการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับสำรวจการเคลื่อนตัวของค้ำยันขณะทำการก่อสร้าง โดยหัวอ่านมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่เมื่อได้รับการพัฒนาแล้วจะอ่านมุมเอียงได้ละเอียดประมาณ 0.5 องศา โดยท่อนำทางเอียงได้ไม่เกิน  $\pm 15$  องศาตามแนวตั้ง และอ่านมุมบิดของท่อนำทางได้ละเอียดเท่ากับ 0.1 องศา เซนเซอร์ทั้งสองประเภทจะถูกติดตั้งในท่อนำทางขนาด 1 นิ้วทำจากอะลูมิเนียม และมีล้อเลื่อนด้านข้าง 2 ชุดที่มีระยะห่างระหว่างล้อเท่ากับ 50 เซนติเมตร หัวอ่านของมาตรวัดฯในที่นี้จะเชื่อมต่อกับสายเคเบิลเพื่อส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผล และบันทึกข้อมูลที่เวลาต่างๆ ระบบมาตรวัดฯในที่นี้จะใช้ไฟเลี้ยงจากแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ ซึ่งทำให้สามารถสำรวจอย่างต่อเนื่องได้ประมาณ 2 วัน และใช้งานได้กับหลุมเจาะที่ลึกไม่เกิน 30 เมตร งานวิจัยนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งที่จะช่วยพัฒนางานการก่อสร้างในประเทศให้มีความทันสมัย เพิ่มความปลอดภัยในการทำงานโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการนำเข้ามามาตรวัดฯที่มีราคาแพงจากต่างประเทศ

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างต้นแบบของระบบหัวอ่านมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเซนเซอร์วัดความเร่งและเซนเซอร์เข็มทิศ ที่นำมาประยุกต์เป็นหัวอ่าน ซึ่งหัวอ่านมาตรวัดฯที่ผู้วิจัยพัฒนาจะทำจากอุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถหาได้ในประเทศทั้งหมด จึงมีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ซึ่งเป็นแนวทางให้ผู้วิจัยรุ่นหลังใช้พัฒนาให้มีสมบูรณ์แบบ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการสำรวจของโครงการ และลดการนำเข้ามาตรวจวัดจากต่างประเทศ

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

การพัฒนามาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่จะประยุกต์ใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) ประเภทเซนเซอร์วัดความเร่งสามแกนสำหรับวัดมุมเอียง เช่น เซอร์เข็มทิศสำหรับวัดมุมบิด มาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ใช้งานได้ในความลึกไม่เกิน 30 เมตร

การทดสอบจะทำในโครงการที่มีระบบค้ำยันแบบเสาเข็ม (Contiguous Piles) ที่มีความลึกในการขุดประมาณ 20 เมตร ในโครงการที่เป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และการศึกษาจะศึกษาเฉพาะการเคลื่อนตัวแนวราบ (Horizontal Displacement) โดยไม่คำนึงถึงการเคลื่อนตัวแนวตั้ง การเปรียบเทียบเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมาตรวัดการเคลื่อนตัวเดิมกับมาตรวัดที่ผู้วิจัยพัฒนาจะใช้วิธีเปรียบเทียบระยะเคลื่อนตัวที่ได้จากมาตรวัดทั้งสองประเภทที่ตำแหน่งเดียวกันโดยมีสมมุติฐานว่ามาตรวัดการเคลื่อนตัวแบบมาตรฐานทำงานถูกต้อง 100%

### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภายในประเทศพัฒนามาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในเพื่อตรวจสอบระยะเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงกันดินถือเป็นพื้นฐานสำคัญที่จะลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ลดค่าใช้จ่ายในการตรวจวัด และลดความเสี่ยงจากการพังทลายของดิน

### 1.5 วิธีการดำเนินการ

ผู้วิจัยเริ่มต้นพัฒนามาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่เกิดจากการศึกษาหน้าที่ของหน่วยต่างๆ และวิธีการทำงานของระบบมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบเพื่อนำความรู้มาใช้ในการเลือกฮาร์ดแวร์ที่เหมาะสมสำหรับพัฒนาเป็นมาตรวัดฯในที่ และการศึกษาวิธีการต่อวงจรรวมฮาร์ดแวร์เหล่านั้นให้เป็นระบบเดียวกัน จากนั้นผู้วิจัยจะเขียนคำสั่งควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยภาษาซีเพื่อประมวลสัญญาณไฟฟ้าจากเซนเซอร์เป็นการเอียงตัว สุดท้ายผู้วิจัยจะออกแบบด้านกายภาพของมาตรวัดฯในที่เพื่อใช้งานในสนาม และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัวอ่านที่ผู้วิจัยพัฒนากับมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในหลุมเดียวกัน



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ประวัติการพัฒนามาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ

ในศตวรรษที่ผ่านมาการตรวจสอบระยะเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน โดยใช้กล้องสำรวจซึ่งตรวจสอบได้เฉพาะการเคลื่อนตัวที่ผิวดิน หรือตำแหน่งที่สามารถมองเห็นได้เท่านั้น ในยุคนี้การแปลผลสำรวจทำด้วยเครื่องคิดเลข และการสร้างกราฟระยะเคลื่อนตัวด้วยมือใช้เวลานาน จึงไม่ตอบสนองต่อการเฝ้าระวังการพังทลายของดิน วิศวกรธรณีจึงพัฒนาเครื่องมือที่สามารถตรวจสอบการเคลื่อนตัวของชั้นดินที่ระดับความลึกต่างๆ เรียกว่า มาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ (Inclinometer) มาตรวัดการเคลื่อนตัวนี้จะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ได้แก่ ท่อนำทาง (Casing) หัวอ่าน (Probe) สายเคเบิล (Cable) และ Data logger มาตรวัดทำงานโดยการหย่อนหัวอ่านลงไปในท่อนำทางที่ถูกติดตั้งไว้ตามความลึกที่ต้องการสำรวจ และดึงหัวอ่านขึ้นเพื่ออ่านและบันทึกการเอียงตัวของท่อนำทาง การประยุกต์ใช้งานมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ (Inclinometer) กับระบบค้ำยัน (Bracing Systems) เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของกำแพงกันดินว่าการแอ่นตัวอยู่ในขีดจำกัดที่ออกแบบไว้หรือไม่นั้น ถือเป็นความช่วยเหลือลดความเสี่ยงจากการพังทลายของดิน

ในปี ค.ศ. 1960 Wilson ได้พัฒนามาตรวัดหัวอ่านบรจจุเซนเซอร์แบบ Potentiometric Transducer ที่ภายในประกอบด้วยลูกตุ้มที่เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ กับขดลวดความต้านทานที่แบ่งเป็นสองส่วน และเชื่อมต่อกันในลักษณะของ Half Bridge ตำแหน่งของตัวกวาดดังกล่าวจะขึ้นกับความเอียงของหัวอ่าน ส่วน Half Bridge ที่เหลือรวมกับสวิทช์ แบตเตอรี่ และ Potentiometric จะอยู่ในอุปกรณ์อ่านค่า ตัวอย่างหัวอ่านระบบนี้ได้แก่ รุ่น 200B ของบริษัท Slope Indicator ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งวัดได้เพียงระนาบเดียวเท่านั้น จนเมื่อประมาณต้นศตวรรษที่ 20 เป็นยุคของการก่อสร้างสาธารณูปโภคขนาดใหญ่เช่นโครงการรถไฟใต้ดิน โครงการก่อสร้างอาคารชั้นใต้ดินที่ต้องการความลึกเพื่อเพิ่มพื้นที่ใช้สอย Duncliff [2] จึงพัฒนามาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบที่มีความละเอียดของการวัดสูงขึ้น ภายในหัวอ่านจะประกอบด้วย Servo Accelerometer จำนวน 2 ชุด โดยชุดที่ 1 จะทำหน้าที่วัดการเอียงของท่อนำทางในระนาบที่ขนานกับระนาบของล้อ เรียกว่าระนาบ A และอีกชุดจะวัดในแนวตั้งฉากกับระนาบของล้อเรียกว่าระนาบ B ซึ่งระบบนี้เรียกว่าระบบกึ่งอัตโนมัติ (Semi-Automatic) ภาพที่ 2.1 แสดงมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบที่ใช้หัวอ่านระบบ Servo ของบริษัท Slope Indicator



ภาพที่ 2.1 มาตรฐานวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ (Inclinometer) ของบริษัท Slopeindicator

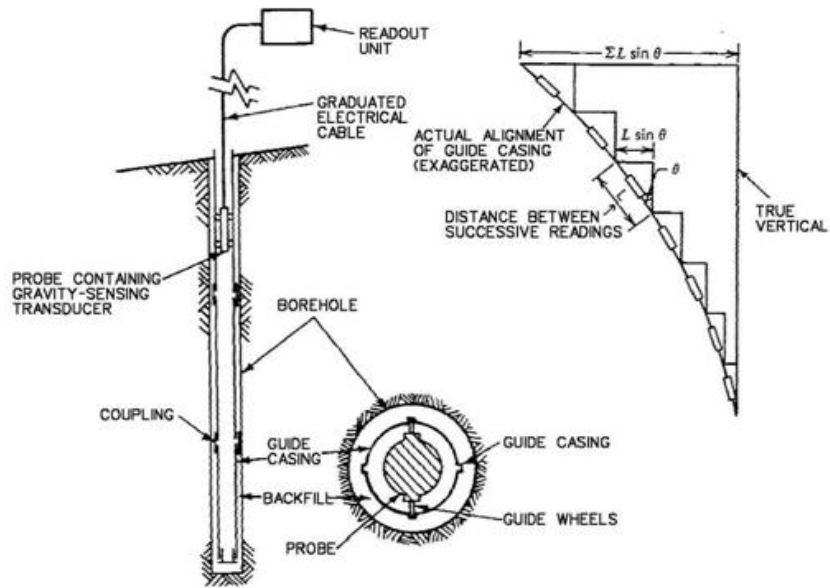
การติดตั้งท่อนำทางนั้นกระทำได้ 2 วิธีคือ วิธีการเจาะหลุมสำหรับการติดตั้งลงในแนวตั้งผ่านชั้นดินที่คาดว่าจะเกิดการเคลื่อนตัวจนถึงระดับที่ต้องการ วิธีนี้จะทำให้เกิดความผิดพลาดได้ง่ายหากการติดตั้งท่อนำทางไม่อยู่ในแนวตั้ง และอีกวิธีคือ การยึดติดกับโครงสร้างที่ต้องการวัด เช่น กำแพงกันดิน ผนังไดอะแฟรม หรือ ผนังเข็มพืด ฯลฯ ขณะทำงานสายเคเบิลจะใช้ในการควบคุมความลึกของหัวอ่าน และเป็นตัวส่งผ่านสัญญาณระหว่างหัวอ่านกับอุปกรณ์อ่านสัญญาณ สายเคเบิลจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอ กล่าวคือจะต้องรับน้ำหนักของหัวอ่านได้ไม่ยืดหรือหดเมื่อใช้งาน และต้องทนต่อการกัดกร่อนของสารละลายที่อยู่กับน้ำ ที่ผิวของสายเคเบิลจะมีมาตรฐานส่วนก้ำกับข้างละ 50 เซนติเมตร อุปกรณ์อ่านสัญญาณโดยทั่วไปแล้วจะอ่านค่าเป็นดิจิตอล และสามารถบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปประมวลผลในภายหลัง (ภาพที่ 2.2)



ภาพที่ 2.2 อุปกรณ์อ่านสัญญาณ (Readout Unit) ของบริษัท Slopeindicator

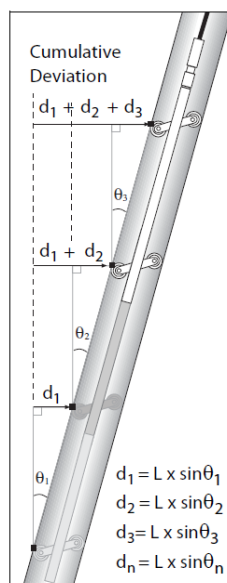
## 2.2 มาตรการวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ (Inclinometer)

Inclinometer เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดระยะเคลื่อนที่แนวราบของกำแพงกันดิน โดยมาตรการวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ (Inclinometer) จะเคลื่อนที่ในท่อพลาสติกประเภท ABS ซึ่งมีร่อง อยู่ในสำหรับควบคุมการเคลื่อนตัวของหัววัดตลอดความยาวท่อ นำทาง โดยทั่วไปท่อ นำทางมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 70 มม. ระบบอ่านบันทึกข้อมูลประกอบด้วยหัวอ่าน การเรียงตัวแบบสองแกนต่อเข้าเครื่องอ่านระบบดิจิทัลด้วยสายนำสัญญาณ การตรวจวัดและอ่านค่าจะใช้เครื่องอ่านแบบกึ่งอัตโนมัติ การบันทึกข้อมูลจะบันทึกจากปลายท่อด้านล่างสุดขึ้นมาหาปากท่อด้านบน และจะหยุดทุกๆ 2 ฟุตเพื่อเรียกข้อมูล เนื่องจากหัววัดที่ใช้เป็นแบบสองแกนทำให้สามารถบันทึกค่าได้สองทิศทางในเวลาเดียวกันซึ่งมีร่องทั้งหมด 4 ร่อง คือ A,-A+,B-,B+ ค่าที่อ่านได้พร้อมกันคือ A+ B- ส่วนด้าน A-,B+ ก็สามารถอ่านได้พร้อมกันเช่นกันโดยหมุนหัววัดกลับด้าน 180 องศาแล้วหย่อนด้านลือชี้ขึ้นไปในช่อง A- และวัดจากกันท้อขึ้นมาจนถึงปากท้อซ้ำอีกครั้งหนึ่ง การทำเช่นนี้เพื่อตรวจสอบการเยื้องศูนย์กลางของหัวอ่าน โดยผลรวมของค่าที่วัดได้ (Checksums) ในทิศ 0 องศา และทิศ 180 องศา ที่ระดับความลึกเดียวกัน ซึ่งในทางทฤษฎีผลรวมของค่าที่วัดได้ควรมีค่าเท่ากับ 0 โดยค่าที่อ่านได้ทั้ง 2 ทิศทางจะต้องมีค่าเท่ากันและมีเครื่องหมายตรงกันข้าม แต่ในทางปฏิบัติเนื่องจากการผันแปรของร่องในท่อ นำทาง ตำแหน่งของหัววัด และการเยื้องศูนย์กลางของหัววัดเอง จะมีผลทำให้ผลรวมของค่าที่วัดได้ไม่เท่ากับศูนย์ ข้อมูลที่อ่านได้แต่ละครั้งนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลครั้งแรก และสร้างกราฟ แสดงค่าการเคลื่อนตัวของชั้นดินในแนวราบเทียบกับความลึกของท่อ ในกรณีที่ทำ การอ่านครั้งแรก หลังการติดตั้งท่อ นำทางเสร็จ profile ที่ได้จะเป็น initial profile สำหรับใช้ในการอ้างอิงและใช้ในการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวของชั้นดินในแนวราบ Inclinometer ที่ใช้ในปัจุบันสามารถอ่านข้อมูลได้ถึง 100 ฟุต แต่ยังไม่สามารถยืนยันได้ว่าค่าการเคลื่อนตัวที่ได้นั้นเป็นค่าการเคลื่อนตัวจริงของดิน เพราะการทำงานจะเกิดความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ และผู้ปฏิบัติงานอยู่เสมอ



ภาพที่ 2.3 หลักการทำงานของมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ (Dunnicliff, 1993)

ภาพที่ 2.3 การแปลผลจากค่า Readout Unit เป็นมุมเอียง  $\theta$  ในเทอมของฟังก์ชัน  $\sin$  กระทำได้ดังนี้คือ  $\sin\theta$  มีค่าเท่ากับ Combined Readout Unit/ Instrument constant โดย Combining Reading คือการนำผลรวมของ Readout unit จากการอ่านทั้ง 2 ครั้ง (+A และ -A) มาหาค่าเฉลี่ย ตัวอย่างเช่น +A Reading = 359, -A Reading = -339 ซึ่งได้ Combined Reading มีค่าเท่ากับ 349 สำหรับค่า Instrument constant จะมีค่าเท่ากับ 20000 เมื่อวัดด้วยหน่วยอังกฤษ และมีค่าเท่ากับ 25000 เมื่อวัดด้วยหน่วยเมตริก ดังนั้นค่า  $\sin\theta$  มีค่าเท่ากับ 0.014



ภาพที่ 2.4 หลักการคำนวณระยะเคลื่อนตัวแนวราบ (Dunnicliff, 1993)

ภาพที่ 2.4 แสดงวิธีการคำนวณระยะเคลื่อนตัวแนวราบ จากค่า  $\sin\theta$  ด้วยสมการที่ 1

$$d = L \times \sin\theta \quad (1)$$

โดย  $d$  คือระยะแทนที่ด้านข้าง (Deviation)

$L$  คือช่วงการวัด 0.5 เมตร (ระยะระหว่างล้อบนกับล้อล่าง)

$\theta$  คือมุมเอียงของท่อนำทางที่วัดจากแนวดิ่ง

จากตัวอย่างข้างต้นเมื่อกำหนดให้ระยะห่างระหว่างล้อมีค่าเท่ากับ 50 เซนติเมตรจะทำให้ระยะเบี่ยงเบนที่ได้เท่ากับ 0.69 เซนติเมตร นอกจากค่า Readout Unit ถูกใช้คำนวณมุมเอียงแล้วยังใช้ตรวจสอบผลรวมของค่าที่วัดได้ (Checksums) หรือ ผลรวมของค่าที่วัดได้ในทิศ 0 องศา (+A) และทิศ 180 องศา (-A) ที่ระดับความลึกเดียวกัน ซึ่งตามทฤษฎีผลรวมของค่าที่ได้ควรมีค่าเท่ากับ 0 กล่าวคือค่าที่อ่านได้ทั้ง 2 ทิศทางจะต้องมีค่าเท่ากันและมีเครื่องหมายตรงกันข้าม แต่ในทางปฏิบัติเนื่องจากการผันแปรของร่องในท่อนำทางอาจส่งผลให้ตำแหน่งของหัวอ่านเกิดการเยื้องศูนย์

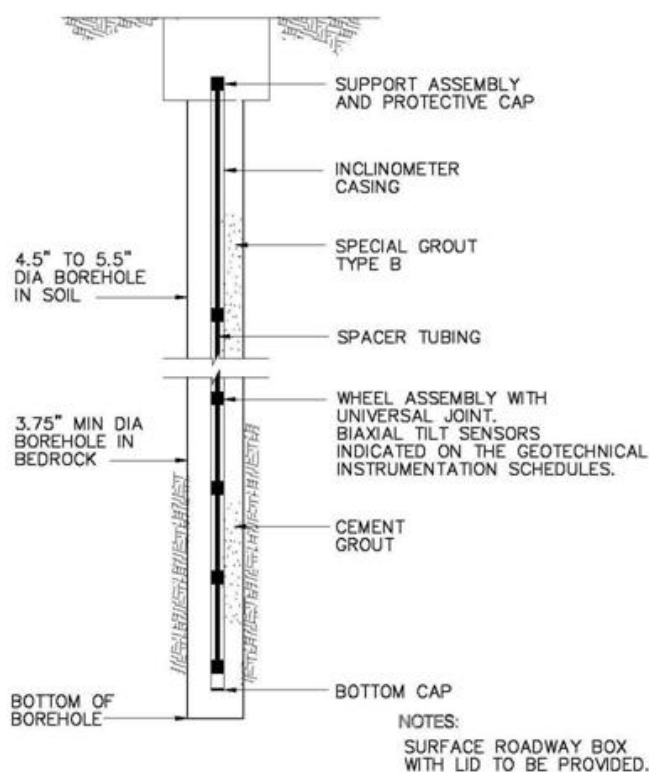
โดยทั่วไปหัวอ่านที่ซื้อใหม่จะผ่านการสอบเทียบโดยบริษัทผู้ผลิตมาแล้ว ในกรณีที่ไม่แน่ใจว่าหัวอ่านได้รับการกระทบกระเทือน หรือผ่านการใช้งานมาเป็นเวลานานแล้วควรทำการสอบเทียบ โดยการใช้อุปกรณ์ทดสอบหัวอ่านจับยึดหัวอ่านไว้ในตำแหน่งที่กำหนดไว้แน่นอน แล้วต่ออุปกรณ์อ่านค่าเพื่อทดลองอ่านค่าว่าตรงตามที่กำหนดไว้หรือไม่



ภาพที่ 2.5 หลักการสอบเทียบหัวอ่าน (Dunnicliff, 1993)

### 2.3 มาตรการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ (In-place Inclinator)

มาตรการการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ที่ถูกนำมาใช้กับงานตรวจวัดที่ต้องการข้อมูลอย่างรวดเร็ว และนำมาใช้ในโครงการที่เข้าเก็บข้อมูลได้ยาก คอมพิวเตอร์จะสั่งให้เซนเซอร์ทำงาน เซนเซอร์ที่ติดอยู่ในท่อ ณ ตำแหน่งต่างๆจะแปลงความเร่งโน้มถ่วงเป็นการเอียงตัว การติดตั้ง เซนเซอร์จะติดตั้งในระยะห่างเท่ากัน หรือติดตั้งจำนวนมากในบริเวณที่คาดว่าจะมีการเคลื่อนตัว เกิดขึ้นสูงดังภาพที่ 2.6 โดยทั่วไปเซนเซอร์จะมีประมาณ 10-12 ตัวติดตั้งในลักษณะกึ่งถาวรเพื่อนำกลับไปใช้งานอีก จำนวนเซนเซอร์ที่มากเกินไปจะทำให้ท่อขนาดปกติไม่สามารถใช้งานได้ เนื่องจากเซนเซอร์แต่ละตัวมีสายนำสัญญาณของตัวเอง (มาตรวัดเดิม มีสายนำสัญญาณเส้นเดียว) ดังนั้นหากมากเกินไปจำเป็นต้องขยายหลุมเจาะเพื่อให้ท่อขนาดใหญ่ขึ้นอาจไม่คุ้มกับการลงทุน สัญญาณจะถูกป้อนให้กับ Data logger ที่ผิวดินและยังสามารถส่งสัญญาณแบบไร้สายให้กับคอมพิวเตอร์สำหรับการวัดตลอดเวลา เมื่อเทียบระหว่าง in-place inclinometer กับ inclinometer จำนวนเซนเซอร์ที่มากจะบอกถึงความราบรื่นของกราฟ ซึ่ง inclinometer จะให้ความราบรื่นมากกว่า



ภาพที่ 2.6 หลักการมาตรการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ (Dunnicliff, 1993)

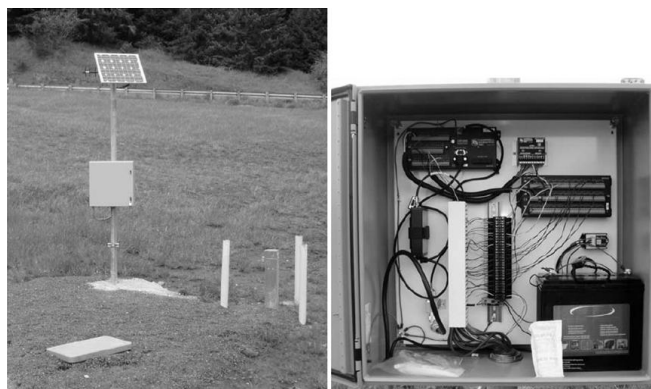
ปัจจุบันมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบถูกพัฒนาให้ทำงานได้อย่างอัตโนมัติ (Automatic) หรือที่เรียกว่ามาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ (In-Place Inclinometer) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเฝ้าระวังการเคลื่อนตัวของดิน มาตรวัดประเภทนี้นิยมใช้ในโครงการที่อาจเกิดการพังทลายของดินอยู่ตลอดเวลา หรือในพื้นที่ที่เข้าถึงข้อมูลสำรวจได้ยาก มาตรวัดฯในที่ทำจากเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) ทำให้สามารถอ่านข้อมูลการเคลื่อนตัวของดินได้ตลอดเวลา (Continuous Reading) และยังสามารถประยุกต์ใช้งานมาตรวัดฯในที่ได้หลายฟังก์ชัน เช่นการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อจ่ายกระแสให้มาตรวัดฯในที่ทำงานในพื้นที่ที่ไม่มีไฟฟ้า หรือการประยุกต์ให้มาตรวัดฯส่งข้อมูลสำรวจแบบไร้สาย (Remote sensing) เพื่อลดค่าใช้จ่ายต่างๆในการเก็บข้อมูล เช่นค่าใช้จ่ายในการเดินทาง และค่าวัสดุเป็นต้น เนื่องจากมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่จะถูกติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งต่างๆที่ต้องการตรวจวัดภายในท่อนำทางตลอดช่วงเวลาก่อสร้างจึงไม่มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเคลื่อนที่ของหัวอ่านเหมือนกับมาตรวัดการเคลื่อนตัวแบบเดิม



ภาพที่ 2.7 มาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ (In-place Inclinometer) ของบริษัท Geodag

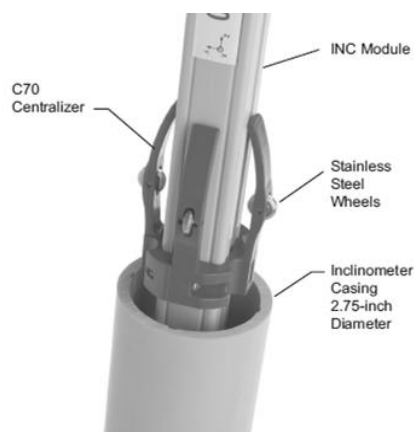


ภาพที่ 2.8 โมดูลส่งสัญญาณไร้สาย ของบริษัท Geodag



ภาพที่ 2.9 อุปกรณ์จ่ายแรงดันด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Ruiz, 2003)

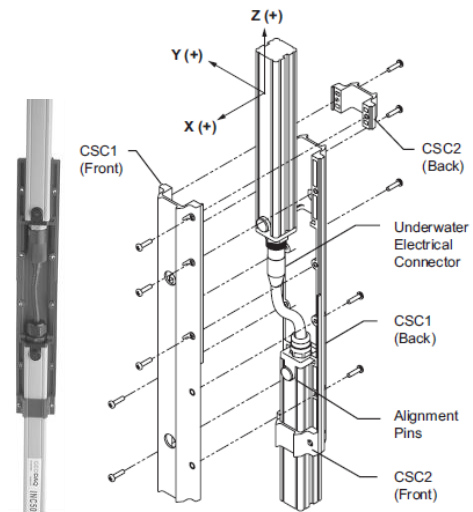
ภาพที่ 2.10 องค์ประกอบมาตรฐานวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่รุ่น INC500 ของบริษัท Geodaq [3] ประเทศแคนาดา ซึ่งภายนอกมีลักษณะเป็นท่ออะลูมิเนียม (Aluminum Tube) ที่แต่ละท่อมีความยาว 8 ฟุต (1 ไมล์) และสามารถเพิ่มจำนวนไมล์ได้ยาวถึง 100 ฟุต (12 ไมล์) ภายในท่อจะบรรจุเซ็นเซอร์วัดความเร่งสองแกนระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMs) ห่างกันทุกๆ 12 นิ้ว และวงจรรีเลย์ทรานซิสต์ ซึ่งจะถูกผนึกด้วยซิลิโคนเพื่อป้องกันน้ำ ที่สามารถอ่านมุมเอียงได้ในช่วง  $\pm 42$  องศา



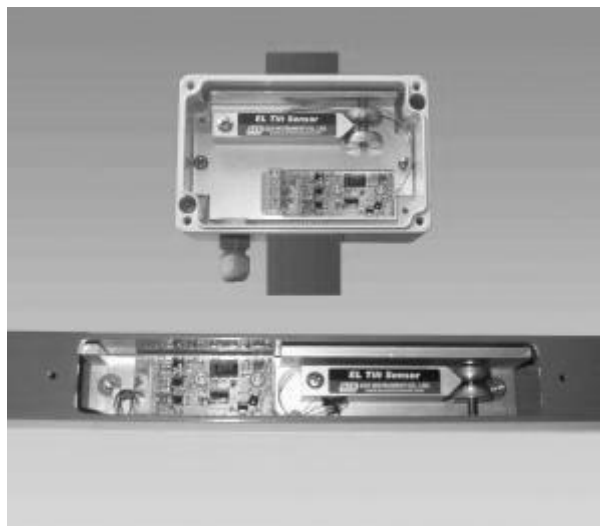
ภาพที่ 2.10 องค์ประกอบของ In-place Inclinerometer ของบริษัท Geodaq

รูปแบบด้านกายภาพทำจากพลาสติก ABS ซึ่งทนต่อแรงบิดภายในท่อนำทาง จุดเด่นของมาตรวัดคือสามารถทำงานสำรวจได้อย่างต่อเนื่องโดยอัตโนมัติ และติดตั้งง่ายโดยเชื่อมต่อกับไมล์ด้วยปลั๊กที่ปลายทั้งสองด้าน ภาพที่ 2.11





ภาพที่ 2.11 ภายใน In-place inclinometer ของบริษัท Geodac



ภาพที่ 2.12 เซนเซอร์วัดความเร่งที่ติดตั้งภายในหัวอ่าน

ภาพที่ 2.13 ภาพการใช้งานมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่บริเวณโครงการ Atlas ซึ่งตั้งอยู่ริมหน้าผาเพื่อเฝ้าระวังการเคลื่อนตัวของดินที่กระทบต่อโครงสร้างอาคารด้านบน เนื่องจากบริเวณโครงการเป็นหน้าผาซึ่งยากจะเข้าเก็บข้อมูลจึงใช้พลังงานแสงอาทิตย์จากแผงโซลาร์เซลล์ และส่งผลสำรวจแบบไร้สายทางไกลซึ่งสามารถเปิดดูข้อมูลได้บนเว็บเบราว์เซอร์โดยไม่ต้องเดินทางเข้าโครงการ ([www.slopeindicator.com](http://www.slopeindicator.com))

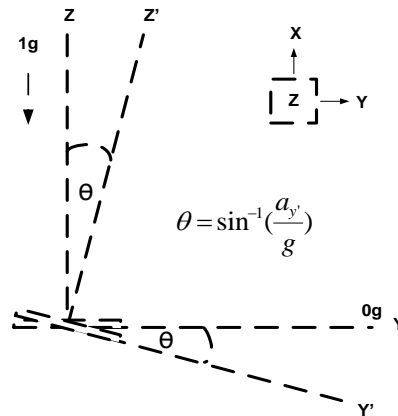


ภาพที่ 2.13 โครงการ Atlas (Slopeindicator, Online)



ภาพที่ 2.14 การประยุกต์ใช้มาตรวัดในโครงการ Atlas (Slopeindicator, Online)

## 2.4 วิธีการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นมุมเอียง



ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงกับความเร่ง

ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างสัญญาณขาออก (Output) และมุมเอียง [4] ดังสมการที่ 2

$$\theta = \sin^{-1} \left[ \frac{V_{out} - V_0}{\text{sensitivity}(V/g)} \right] \left( \frac{1}{1g} \right) \quad (2)$$

$\theta$  = มุมเอียงตามแนวตั้ง

$V_{out}$  = สัญญาณอนาลอกของแกนใดๆ

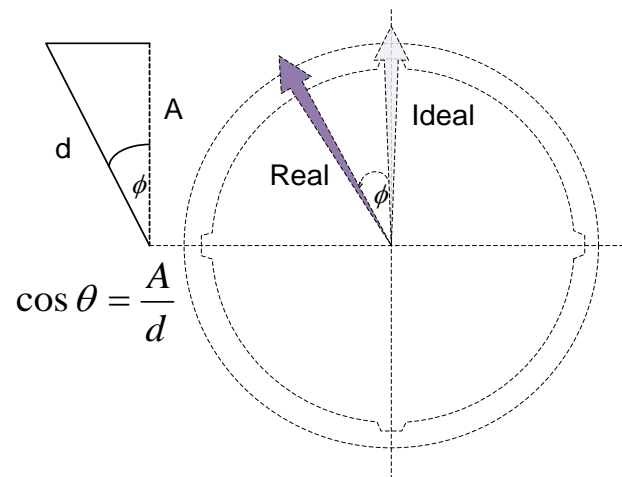
$V_{1g}$  = สัญญาณอนาลอกของความเร่ง 1g

$V_{0g}$  = สัญญาณอนาลอกของความเร่ง 0g

สมการ(2) ถูกใช้คำนวณมุมเอียงของท่อนำทาง ซึ่งการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความต่างศักย์เป็นความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและความเร่ง (หรือการเอียง) ของเซ็นเซอร์ จากมาตรฐานของผู้ผลิตแรงดันไฟฟ้าขาออก ( $V_{out}$ ) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-3.3 โวลต์ แรงดันขาออกที่ 0 g (ทิศตั้งฉากกับแรงโน้มถ่วงของโลก) มีค่าประมาณ 1.65 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าหรือสัญญาณอนาลอกเมื่อส่งผ่านสายเคเบิลมาถึงไมโครคอนโทรลเลอร์จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลมีค่าอยู่ในช่วง 0-1024 ( $2^{10}$  หรือ 10บิต) โดยแรงดันไฟฟ้ากับสัญญาณดิจิทัลมีความสัมพันธ์ดังนี้คือ อันดับบิต =  $(V_{out} \times 1024)/3.3$  และพจน์  $\left[ \frac{V_{out} - V_0}{\text{sensitivity}} \right]$  คือค่าความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) ซึ่งจากคู่มือของบริษัทผู้ผลิตเซ็นเซอร์จะมีค่าอยู่ในช่วง  $\pm 1$  g

## 2.5 วิธีการปรับแก้ระยะเคลื่อนที่แนวราบด้วยมุมบิด

การนำเซนเซอร์เข็มทิศ (Compass Sensor) มาใช้ในการพัฒนาหัวอ่านมาตรวัดฯ เพื่อทำหน้าที่ตรวจสอบทิศทางการบิดตัวของท่อ นำทางซึ่งจะเกิดการเยื้องศูนย์ขึ้นขณะที่ติดตั้งลงในดิน มาตรวัดการเคลื่อนตัวที่ใช้กันทั่วไปนั้นตีความการเคลื่อนตัวจากผลทดสอบจากมาตรวัดเพียงทิศทางเดียวเท่านั้นคือทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวกันดิน ซึ่งการตีความนี้ไม่ตรงกับพฤติกรรมจริงของท่อ นำทาง จนบางครั้งผลการคำนวณอาจมากเกินไปจนความเป็นจริงส่งผลให้ต้นทุนการก่อสร้างระบบค้ำยันเพิ่มสูงขึ้น การปรับแก้ด้วยเซนเซอร์เข็มทิศจะช่วยให้การสำรวจมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยการปรับแก้ด้วยมุมบิดนั้นจะเป็นการนำระยะเบี่ยงเบน (d) ที่ได้จากสมการที่ 3 มาใช้คำนวณระยะเคลื่อนตัวหลังการปรับแก้ (A) ด้วยสมการที่ 3 ดังรูปภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 แสดงวิธีการปรับแก้ระยะเคลื่อนตัวด้วยมุมบิด

$$A = d \times \cos \theta \quad (3)$$

โดยที่ A = ระยะเคลื่อนที่หลังปรับแก้ด้วยมุมบิด

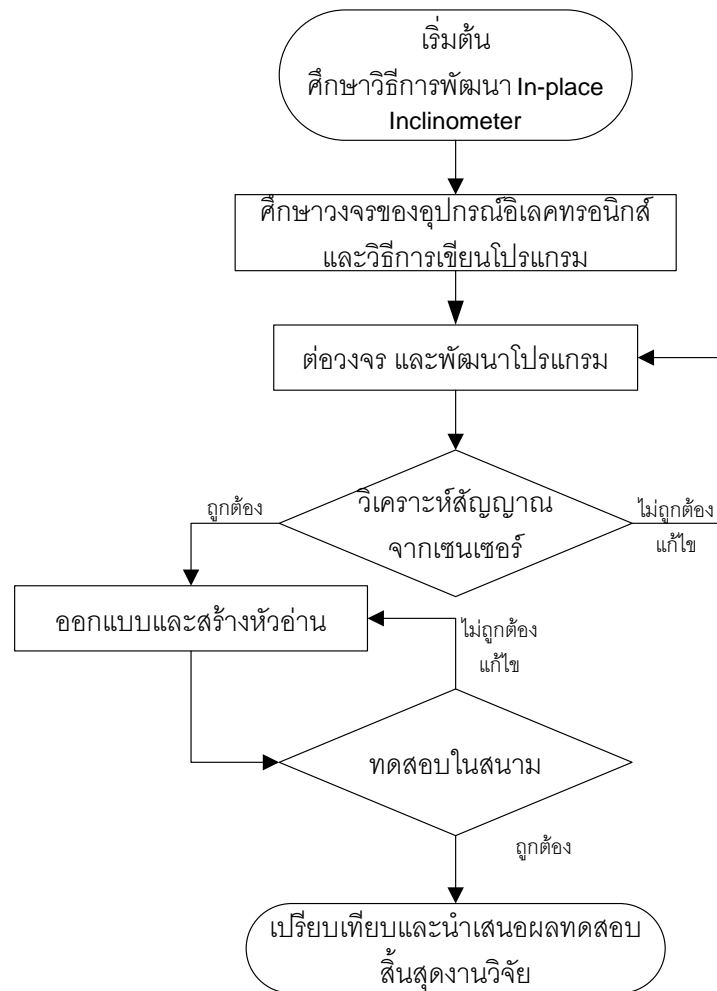
d = ระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง

$\theta$  = มุมบิดของท่อ นำทาง

### บทที่ 3

## ขั้นตอนการพัฒนาห้วอ่านมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่

ขั้นตอนการดำเนินงานสร้างห้วอ่านมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น แสดงด้วย Flowchart ดังนี้



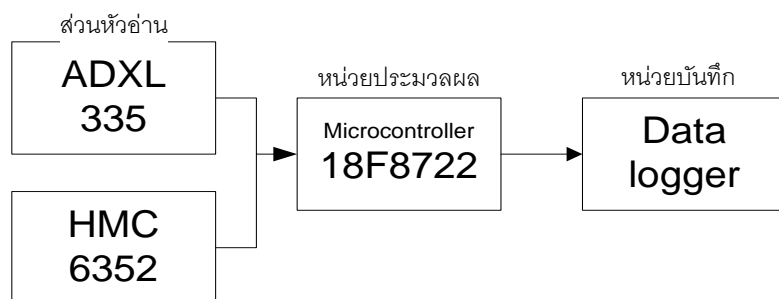
ภาพที่ 3.1 แผนผังการพัฒนาห้วอ่านมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่

### 3.1 ชั้นศึกษาและรวบรวมข้อมูล

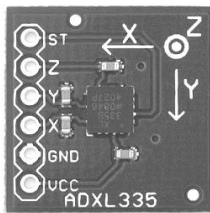
ชั้นการศึกษาและรวบรวมข้อมูลนั้นเป็นการศึกษา เพื่อกำหนดถึงรายละเอียดที่มาของงานวิจัย ซึ่งจะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา แนวทางแก้ไขปัญหา เพื่อที่จะใช้กำหนดเป็นวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ผลที่คาดว่าจะได้รับ ตลอดจนขอบเขตของงานวิจัยนี้ว่าจะไปในลักษณะใด ซึ่งได้กล่าวไว้โดยรวมแล้วในบทที่ 1 สำหรับในชั้นการรวบรวมข้อมูลนั้นก็จะเป็นขั้นตอนที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมาก เพราะเป็นขั้นของการรวบรวมข้อมูล การรวบรวมทฤษฎีและหลักการการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่จะใช้ในการสร้างชิ้นงานนี้ ซึ่งเนื้อหาที่ใช้เป็นพื้นฐานสำคัญในการนำไปออกแบบสร้างมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบให้ได้ตามวัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2

หน้าที่คุณสมบัติอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ประกอบเป็นหน่วยต่างๆของระบบมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ที่ผู้วิจัยพัฒนาได้แก่ ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC18F8722, เซนเซอร์วัดความเร่งสามแกน รุ่น ADXL 335, เซนเซอร์เข็มทิศรุ่น HMC 6352 โมดูลนาฬิกา DS1307 และ Flash Drive หลักการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาประยุกต์เป็นระบบเดียวกัน เขียนด้วย Block Diagram ได้ดังภาพที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วยภาคต่างๆดังต่อไปนี้คือ

1. ส่วนหัวอ่าน ทำหน้าที่อ่านข้อมูลการเอียง และการบิดตัวของท่อทางประกอบด้วย เซนเซอร์วัดความเร่งสามแกน จำนวน 1 ตัว และเซนเซอร์เข็มทิศจำนวน 1 ตัว
2. หน่วยประมวลผล ในโครงการนี้ผู้วิจัยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ 18F8722 ทำหน้าที่ในการประมวลผลสัญญาณไฟฟ้าจากเซนเซอร์เป็นข้อมูลมุมเอียง และมุมบิด
3. ภาคบันทึกผล ทำหน้าที่ในการบันทึกข้อมูลที่ได้รับจากไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 3.2 หน้าที่ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



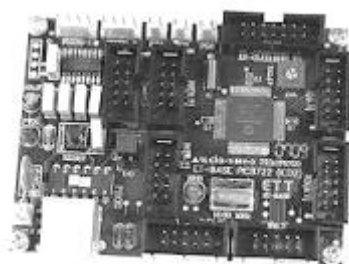
ภาพที่ 3.3 เซนเซอร์วัดความเร่งสามแกนรุ่น ADXL335

มาตรวัดความเร่ง 3 แกน (Tri-Accelerometer) ที่ผู้วิจัยนำมาประยุกต์ใช้เป็นมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบแบบฝังในที่เป็นเซนเซอร์ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMs) รุ่น ADXL 335 ผลิตโดยบริษัท Analog Device สามารถวัดได้ทั้งความเร่งในเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Acceleration) หรือความสั่นสะเทือน (Vibration) และเชิงสถิตยศาสตร์ (Static Acceleration) ซึ่งก็คือความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก (Gravity)



ภาพที่ 3.4 เซนเซอร์เข็มทิศ รุ่น HMC 6352

โมดูล HMC6352 นี้จะใช้การบอกทิศทางแบบอะซิมุท (Azimuth) ซึ่งวัดจากแนวทิศเหนือเวียนตามเข็มนาฬิกามาบรรจบกับแนวเป้าหมาย โดยมีค่าตั้งแต่ 0-360 องศา



ภาพที่ 3.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ PIC18F8722

ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น PIC-18F8722 ของบริษัทที่รับแรงดันไฟเลี้ยง 5 โวลต์มีจำนวนช่องรับสัญญาณอนาลอก 16 ช่อง ไมโครคอนโทรลเลอร์มีหน้าที่รับสัญญาณจากเซนเซอร์แต่ละตัว

เพื่อนำมาประมวลผลหามุมเอียง และบันทึกข้อมูลลงบน ET-USB Flash Drive ผ่านสาย RS232 (ภาพที่ 3.6)



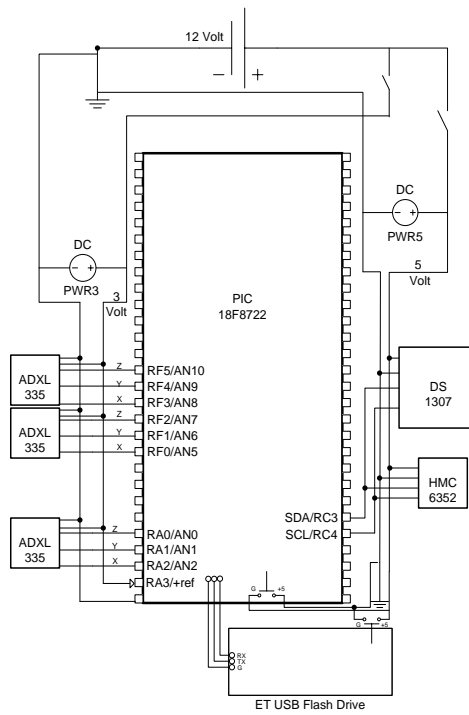
ภาพที่ 3.6 โมดูลบันทึก ET-USB Flash Drive

### 3.2 การต่อวงจรและพัฒนาโปรแกรม

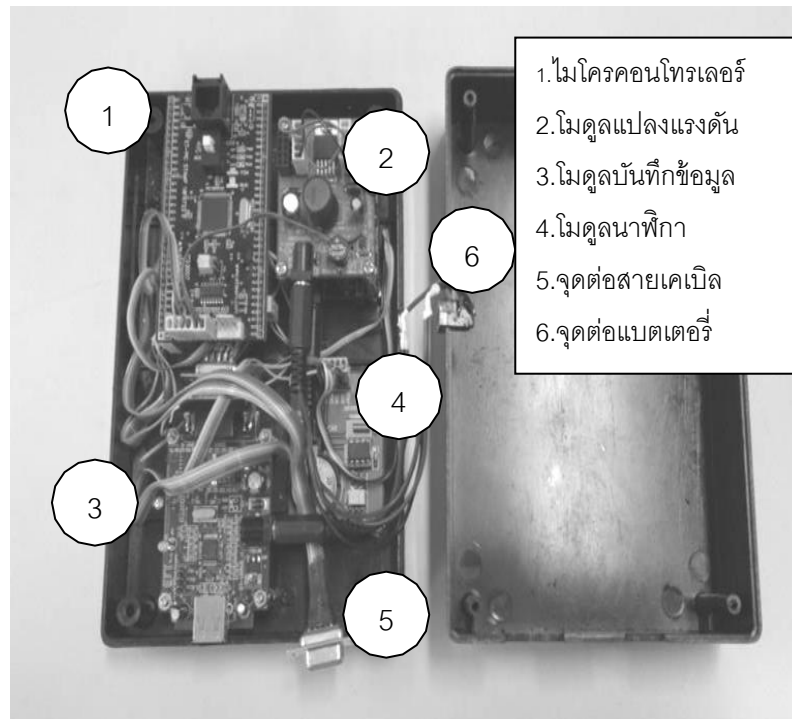
หลังจากที่ได้ศึกษา และรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องแล้วก็มาถึงขั้นของการนำเอาข้อมูลที่ได้จาก บทที่ 1 และบทที่ 2 มาใช้ในการออกแบบเพื่อให้ชิ้นงานตรงตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ คือ การสร้างมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบ ที่ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับขั้นตอนของการออกแบบนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆคือ การออกแบบด้านฮาร์ดแวร์ (Hardware) และซอฟต์แวร์ (Software) เพื่อที่จะเป็นการง่ายในการทำความเข้าใจ และเมื่อออกแบบทั้งสองส่วนเสร็จแล้ว ผู้วิจัยจะนำมาประกอบเพื่อนำไปทดลองใช้จริงในโครงการเพื่อดูผลซึ่งจะได้กล่าวในบทต่อไป

ขั้นตอนการต่อวงจร ระบบมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ (In-place Inclinator Systems) ที่ผู้วิจัยพัฒนาประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือ 1.ส่วนหัวอ่าน (Probe) ประกอบด้วย เซนเซอร์วัดความเร่งสามแกนรุ่นADXL335 และเซนเซอร์เข็มทิศ รุ่นHMC6352 ทำหน้าที่ในการอ่านมุมเอียงและมุมบิดของท่อนำทางตามลำดับ 2.หน่วยประมวลผล (CPU) ประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เบอร์ PIC18F8722 ทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานของมาตรวัดฯและประมวลผล และส่งข้อมูลที่ประมวลผลแล้วไปยังหน่วยบันทึกข้อมูล 3.หน่วยบันทึกข้อมูล ประกอบด้วยโมดูลET-USB Flash Drive ทำหน้าที่เหมือนกับ Data logger ของระบบมาตรวัดการเคลื่อนตัว (Inclinator) วงจรของระบบจะใช้ไฟเลี้ยงขนาด 3.3 โวลต์สำหรับเลี้ยงส่วนหัวอ่าน และไฟเลี้ยงขนาด 5 โวลต์สำหรับหน่วยประมวลผลและบันทึกข้อมูล โดยไฟเลี้ยงระบบมาจากแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ซึ่งต้องผ่านการแปลงแรงดันด้วยโมดูลET MINI PWR (ภาพที่ 3.7)



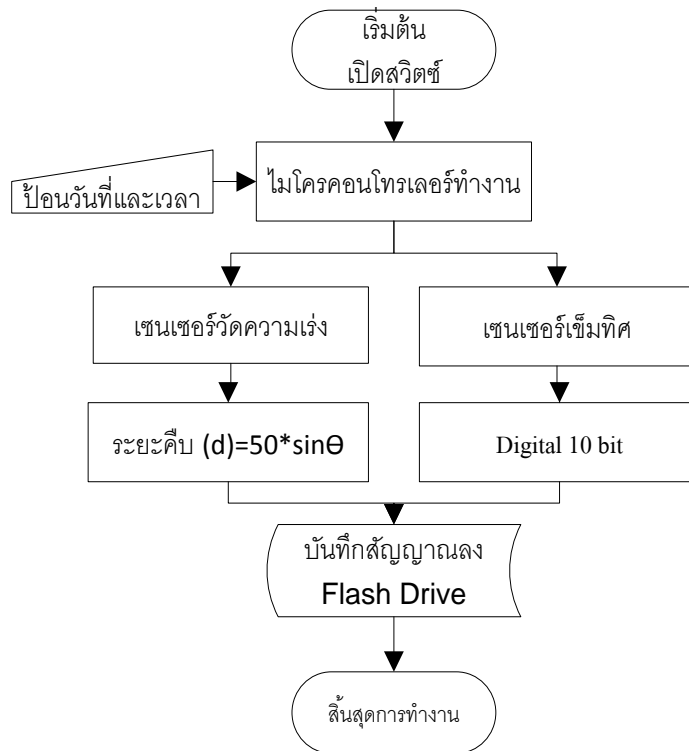


ภาพที่ 3.7 แบบวงจรระบบไมโครควบคุมการเคลื่อนตัวแนวราบในที่



ภาพที่ 3.8 วงจรระบบไมโครควบคุมการเคลื่อนตัวแนวราบในที่

ขั้นการพัฒนาโปรแกรม โปรแกรมสำหรับควบคุมระบบมาตรวัดฯทั้งหมดเขียนโดยภาษาซี โดยใช้โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ตั้งแต่การรับข้อมูลจากเซนเซอร์ การเก็บข้อมูล รวมทั้งควบคุมการทำงานหรือการประมวลผลของ CPU รายละเอียดทั้งหมดของโปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวก ข



ภาพที่ 3.9 แผนผังการพัฒนาโปรแกรมภาษาซี



ภาพที่ 3.10 การทดสอบโปรแกรม

### 3.3 การออกแบบและประดิษฐ์ต้นแบบหัวอ่าน

หัวอ่านถือเป็นชิ้นส่วนสำคัญและทำได้ยากที่สุดของการทำงานวิจัยนี้ เนื่องจากการทดสอบในสนามมีสภาวะแวดล้อมที่เสี่ยงให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งภายในหัวอ่าน เช่นน้ำภายในท่อนำทางจะทำให้เกิดไฟฟ้าลัดวงจร การกระแทกของหัวอ่านกับกันหลุมอาจทำให้เซนเซอร์ไม่ตั้งอยู่ในแนวเดิม และการสัมผัสระหว่างล้อของหัวอ่านกับร่องภายในท่อนำทาง เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสำรวจภาคสนามเป็นอย่างยิ่ง การประดิษฐ์หัวอ่านจึงมีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าการพัฒนาซอฟต์แวร์ และเพื่อให้หัวอ่านมีประสิทธิภาพสูงสุด ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบให้หัวอ่านและองค์ประกอบอื่นๆ มีกายภาพและหน้าที่การทำงานคล้ายคลึงกับมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบเดิม โดยการออกแบบจะต้องออกแบบให้หัวอ่านมีขนาดเล็กที่สุดและเพียงพอสำหรับการติดตั้งเซนเซอร์เพื่อให้เคลื่อนที่ในท่อนำทางได้อย่างสะดวก มีความทนทานในการใช้งานโดยเฉพาะการป้องกันน้ำที่มีแรงดันสูง และสามารถลดแรงกระแทกที่อาจส่งผลกระทบต่อเซนเซอร์ที่ติดตั้งไว้ภายในหัวอ่าน

วัสดุที่นำมาใช้ประดิษฐ์เป็นหัวอ่านผู้วิจัยเลือกใช้เหล็กในส่วนที่เป็นล้อเนื่องจากมีความแข็งแรงและช่างสามารถกลึงและประกอบได้ง่าย ในส่วนของท่อที่ใช้สำหรับติดตั้งเซนเซอร์นั้น ผู้วิจัยจะใช้สเตนเลสเพื่อป้องกันสนามแม่เหล็ก



ภาพที่ 3.11 รูปแบบหัวอ่าน



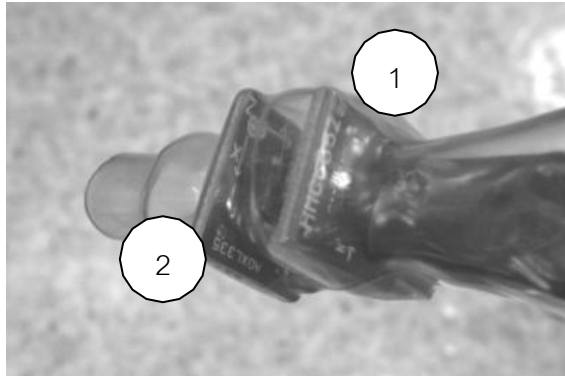
ภาพที่ 3.12 ส่วนล้อของหัวอ่าน

หัวอ่านจะถูกออกแบบให้สายสัญญาณสามารถเดินผ่านเข้าเชื่อมต่อได้กับเซนเซอร์โดยไม่ให้มีรอยต่อเพื่อลดปัญหาสัญญาณขัดข้องที่เกิดจากน้ำ การเหนียวน้ำ และการกระแทก



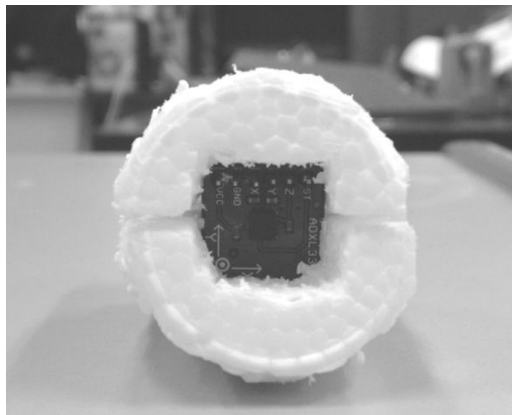
ภาพที่ 3.13 ระบบป้องกันน้ำ

การป้องกันน้ำผู้วิจัยจะใช้ปะเกน เพื่อป้องกันน้ำภายในท่อนำทางเข้าสู่หัวอ่าน นอกจากนี้ผู้วิจัยยังหุ้มเซนเซอร์ด้วยท่อหดเพื่อป้องกันความชื้น ภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 การป้องกันเซนเซอร์

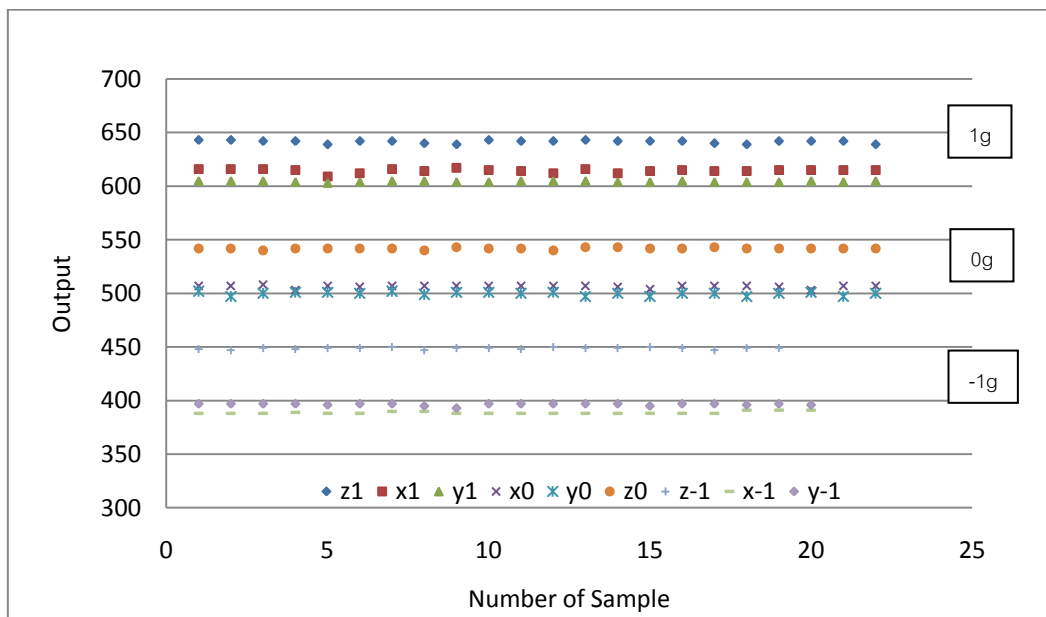
ภาพที่ 3.14 ตำแหน่งที่ 1 คือเซนเซอร์เข็มทิศ ตำแหน่งที่ 2 คือเซนเซอร์วัดความเร็ว การติดตั้งเซนเซอร์ในหัวอ่านผู้วิจัยจะใช้วิธีฝังเซนเซอร์ไว้ในโฟมที่สร้างขึ้นเพื่อยึดติดกับผิวท่อและลดแรงกระแทกขณะใช้งานซึ่งอาจส่งผลให้เซนเซอร์เบี่ยงเบนไปจากที่ได้ติดตั้งไว้ในครั้งแรก บล็อกโฟมที่สร้างขึ้นจะมีขนาดเท่ากับท่อทาง โดยจะใช้กาวทาผิวนอกของโฟมสำหรับยึดติดกับผนังของหัวอ่าน



ภาพที่ 3.15 การยึดหัวอ่าน

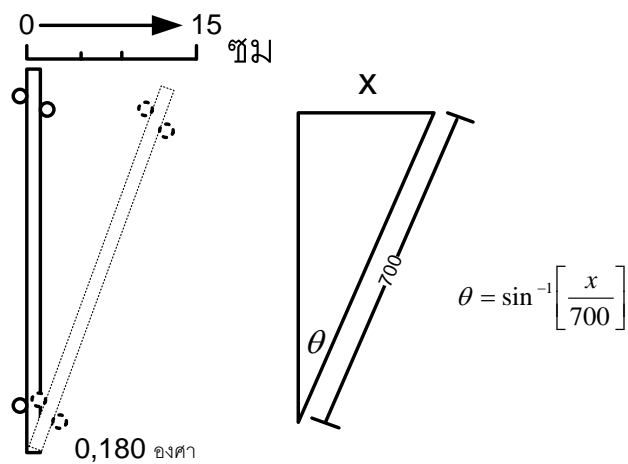
### 3.4 การสอบเทียบหัวอ่านมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่

ผลการทดสอบโปรแกรมเบื้องต้นผู้วิจัยพบว่าไมโครคอนโทรลเลอร์เมื่อรับสัญญาณอนาลอกจากเซนเซอร์วัดความเร่งฯ และเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลแล้วมีอันดับอยู่ระหว่าง 400-700 ระดับ โดยมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 650 เมื่อหงายเซนเซอร์ขึ้น (แกน X หรือ Y หรือ Z อยู่ในแนวตั้ง และมีทิศทางสวนทางกับทิศทางของแรงโน้มถ่วง) จึงกำหนดให้อันดับนี้เป็นความเร่ง 1 g จากนั้นหมุนเซนเซอร์ให้แกน X หรือ Y หรือ Z อยู่ในแนวราบพบว่าค่าอันดับลดลงจนเหลือประมาณ 500 และเมื่อหมุนเซนเซอร์คว่ำลงพบว่าค่าอันดับลดลงอีกและมีค่าน้อยที่สุดประมาณ 400 จากจึงกำหนดให้เป็นอันดับที่ความเร่งเท่ากับ -1 g (ภาพที่ 3.16) พฤติกรรมของเซนเซอร์ที่ได้รับ เป็นไปตามคู่มือของบริษัทผู้ผลิต ผู้วิจัยจึงสรุปว่าโปรแกรมรับสัญญาณอนาลอกมีความถูกต้อง

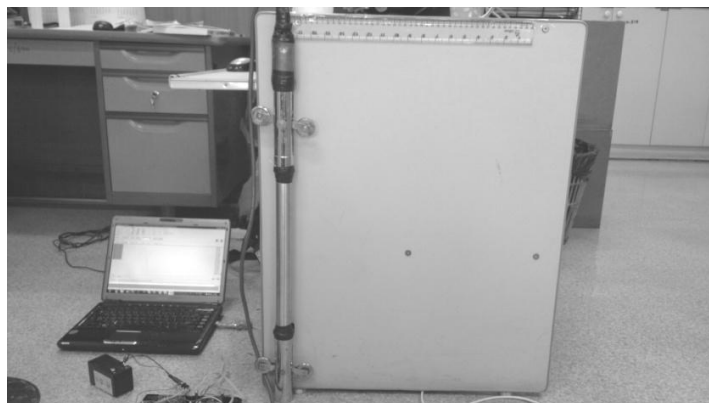


ภาพที่ 3.16 ผลทดสอบเซนเซอร์วัดความเร่ง

เมื่อติดตั้งเซนเซอร์ในหัวอ่านแล้วก่อนใช้งานในสนาม ผู้วิจัยทำการสอบเทียบหัวอ่านเพื่อหาค่าอันดับเฉลี่ยแรงดันขาออก (Output) ที่ 0 g ( $V_{0g}$ ) ของแกน X และ Y และหาค่า Sensitivity เพื่อเป็นมาตรฐานในการคำนวณมุมเอียง(ตามสมการที่ 2) การสอบเทียบใช้ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงจากการคำนวณและมุมเอียงจากการทดสอบ ภาพที่ 3.17 แสดงวิธีการสอบเทียบหัวอ่าน โดยการเคลื่อนปลายบนของหัวอ่านออกจากแนวตั้ง (ระยะ 0 ซม.) ไปข้างหน้าทุกๆระยะ 1 เซนติเมตร โดยปลายล่างของหัวอ่านยังคงอยู่กับที่ บันทึกค่าอันดับของแกน X,Y,Z และมุมบิดทุกๆระยะ 1 เซนติเมตร ทำเช่นนี้จนถึงระยะ 15 เซนติเมตร เมื่อเสร็จแล้วกลับหัวอ่าน 180 องศาและทำการสอบเทียบด้วยขั้นตอนเดิมอีกครั้งหนึ่ง กระทำเช่นนี้ทั้งแกน X และแกน Y

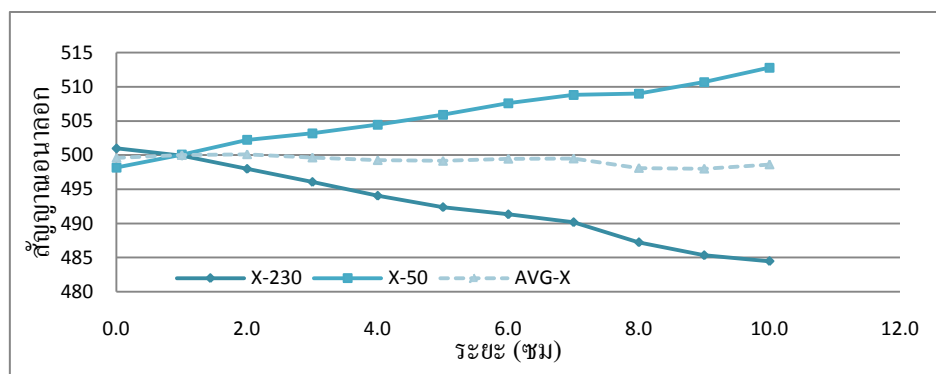


ภาพที่ 3.17 หลักการสอบเทียบ

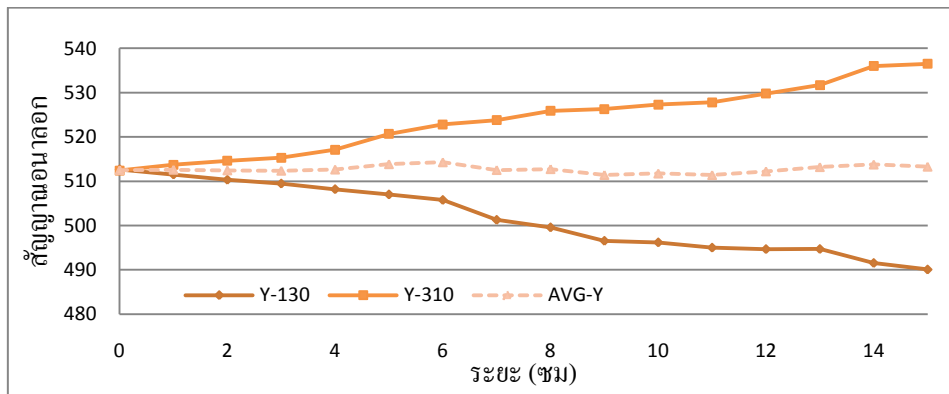


ภาพที่ 3.18 การเตรียมอุปกรณ์ก่อนการสอบเทียบ

ผลการสอบเทียบเมื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอันดับแรงดันที่ 0 g ( $V_{0g}$ ) กับระยะแนวราบของการสอบเทียบทั้งสองครั้งจะได้ค่าเฉลี่ยแรงดันที่ 0 g ( $V_{0g}$ ) ดังภาพที่ 3.19 สำหรับแกน X และ 3.20 สำหรับแกน Y โดยที่ X50 ,X230 และ Y130 ,Y310 คือมุมบิดขณะที่ทำการสอบเทียบหัวอ่านซึ่งจะต่างกันประมาณ 180 องศา กราฟการสอบเทียบพบว่าค่าอันดับเฉลี่ยที่แรงดันขาออกเท่ากับ 0 g ( $V_{0g}$ ) เท่ากับ 499 สำหรับแกน X และ 512 สำหรับแกน Y ซึ่งค่าอันดับที่ได้เป็นค่ามาตรฐานของเครื่องมือสำหรับใช้คำนวณมุมเอียงหลังจากทดสอบในสนาม (ผลการสอบเทียบดูได้จากภาคผนวก ก)



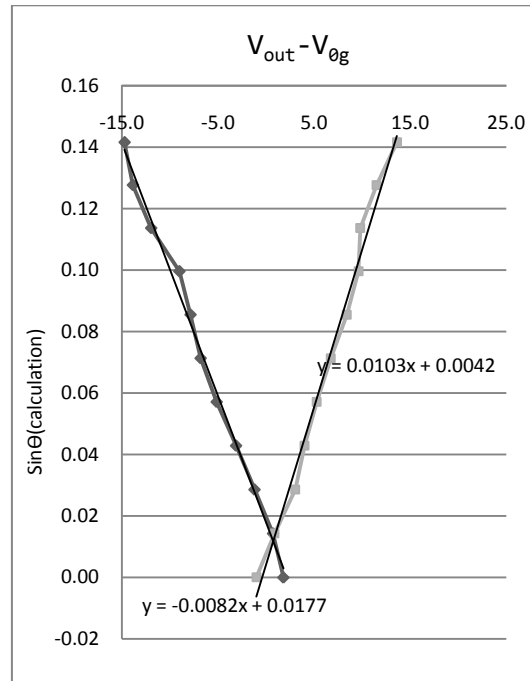
ภาพที่ 3.19 ผลสอบเทียบแรงดัน  $V_0$  แกน X



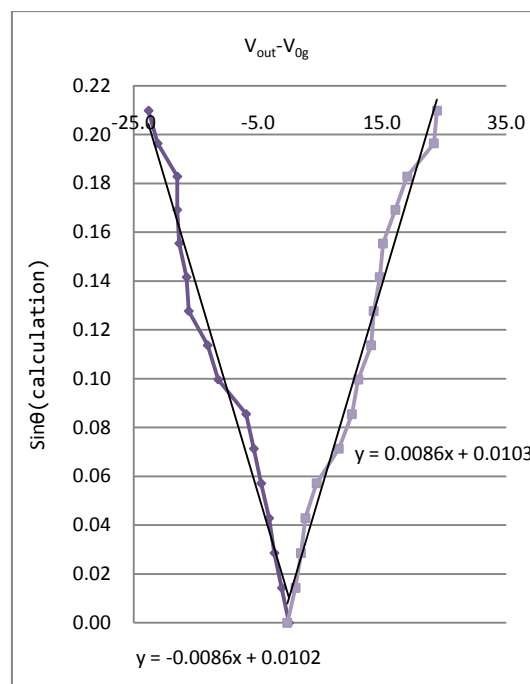
ภาพที่ 3.20 ผลสอบเทียบแรงดัน  $V_0$  แกน Y



จากความสัมพันธ์ของมุมเอียงตามสมการที่ 2 ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.5 ค่าหนึ่งที่ต้องสอบเทียบ คือ Sensitivity ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างมุมเอียงจากการคำนวณกับมุมเอียงจากการทดสอบในเทอมของฟังก์ชัน sin ดังนี้คือ  $\text{sensitivity} = 1/(V_{\text{out}} - V_{0g})/\sin\theta$

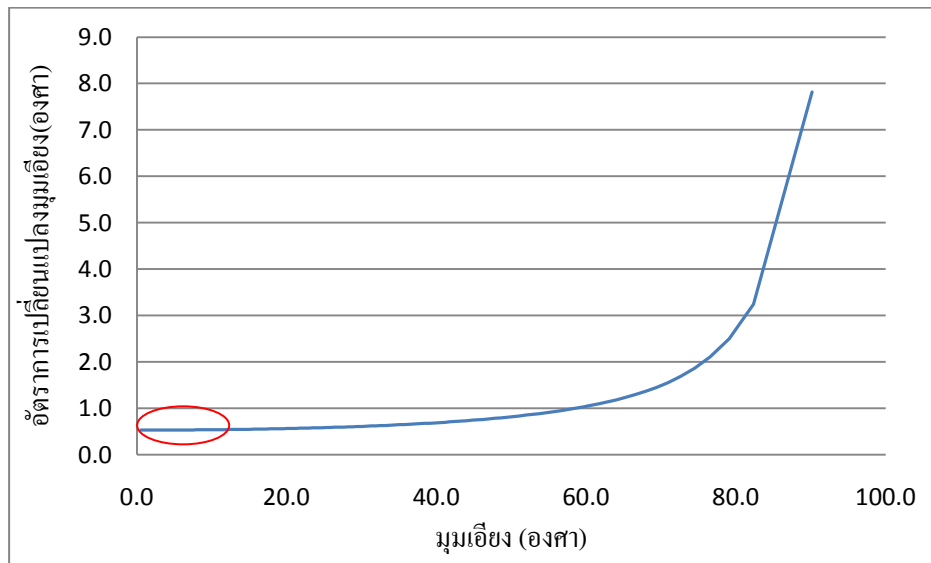


ภาพที่ 3.21 ผลสอบเทียบค่า Sensitivity แกนX



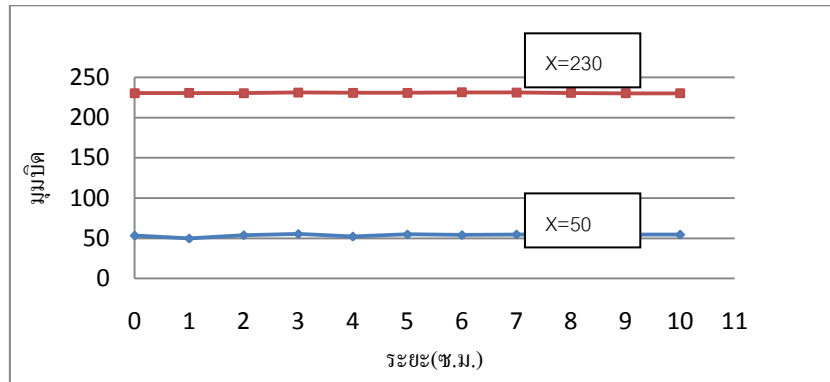
ภาพที่ 3.22 ผลสอบเทียบค่า Sensitivity แกนY

ภาพที่ 3.19 และ 3.20 สรุปได้ว่า ค่า sensitivity ของแกน X มีค่าเท่ากับ 110 และ แกน Y มีค่าเท่ากับ 116 เมื่อได้ค่าแรงดันที่ 0 โวลต์กับ ค่า sensitivity แล้วผู้วิจัยจะคำนวณตามสมการที่ 2 เพื่อหาค่า resolution และ range ของเครื่องมือ ซึ่งเมื่อนำความสัมพันธ์ของมุมเอียงและความแตกต่างของมุมเอียงที่คำนวณได้จากสมการที่ 2 ได้ดังภาพที่ 3.23 พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงคงที่เท่ากับ 0.5 องศา (Resolution) ในช่วงระหว่าง  $\pm 15$  องศา

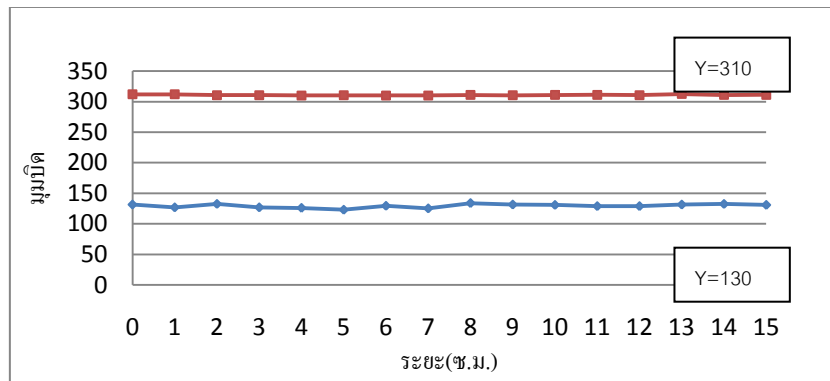


ภาพที่ 3.23 อัตราการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง

ผลสอบเทียบมูมบิตเมื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างของมูมบิตทั้งสองด้านกับระยะแนวราบ พบว่ามีความแตกต่างกันประมาณ 180 องศา ผู้วิจัยจึงสรุปว่ามีความถูกต้อง ภาพที่ 3.24



ภาพที่ 3.24 ผลการสอบเทียบมูมบิตแกน X



ภาพที่ 3.25 ผลการสอบเทียบมูมบิตแกน Y

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่

จากการดำเนินงานทั้งหมดที่ผ่านมา หัวอ่านของมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ที่ผู้วิจัยพัฒนาจะสมบูรณ์ไม่ได้หากไม่ผ่านการทดลองใช้งานจริง และการปรับแต่งเพื่อให้ได้ซึ่งค่าความถูกต้องและแม่นยำในการใช้งานจริง ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบทางด้านวงจร และโปรแกรมไปพร้อมกันเพื่อหาค่าคงที่ๆที่ต้องการ มาปรับค่าของการวัด (Calibrate) ให้ถูกต้องที่สุดโดยการทดสอบปรับแต่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 การทดสอบประสิทธิภาพในสนาม

เพื่อประเมินความถูกต้องของมาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ที่พัฒนาขึ้นผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บข้อมูลการสำรวจด้วยเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นไปพร้อมกับการตรวจวัดด้วย Inclinometer ของบริษัทเอสทีเอส [5] จำนวน 4 หลุม โดยสำรวจในเวลาใกล้เคียงกัน และเก็บข้อมูลทุกๆความลึก 0.5 เมตรเหมือนกับการสำรวจของบริษัทฯ โครงการที่ทดสอบเครื่องมือมี 2 โครงการ โครงการแรกคือโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง เป็นการวัดระยะเคลื่อนตัวของตอมอรถไฟฟ้ามหานคร ที่มีความลึกหลุมเจาะ 21 เมตร และโครงการที่สองคือ โครงการคอนโดมิเนียม 185 ซึ่งเป็นการวัดระยะเคลื่อนตัวของระบบค้ำยันแบบแข็งเกร็ง ที่มีหลุมสำรวจลึก 18 เมตร



ภาพที่ 4.1 การทดสอบในสนาม

จากการตรวจวัดในสนามตรวจพบว่าข้อมูลระยะเคลื่อนตัวแนวราบที่ได้จากเครื่องมือของผู้วิจัยสอดคล้องกับข้อมูลของบริษัท STS ทุกหลุม และตรวจพบว่าท่อंनाทางเกิดการบิดตัวซึ่งตรง

กับข้อมูล Readout ของบริษัท STS ที่เปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกเป็นลบหรือจากลบเป็นบวก โดยรายละเอียดผลทดสอบและการวิเคราะห์ผลของหัวอ่านแต่ละโครงการมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.2 การวิเคราะห์ผลทดสอบโครงการก่อสร้างก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีม่วง

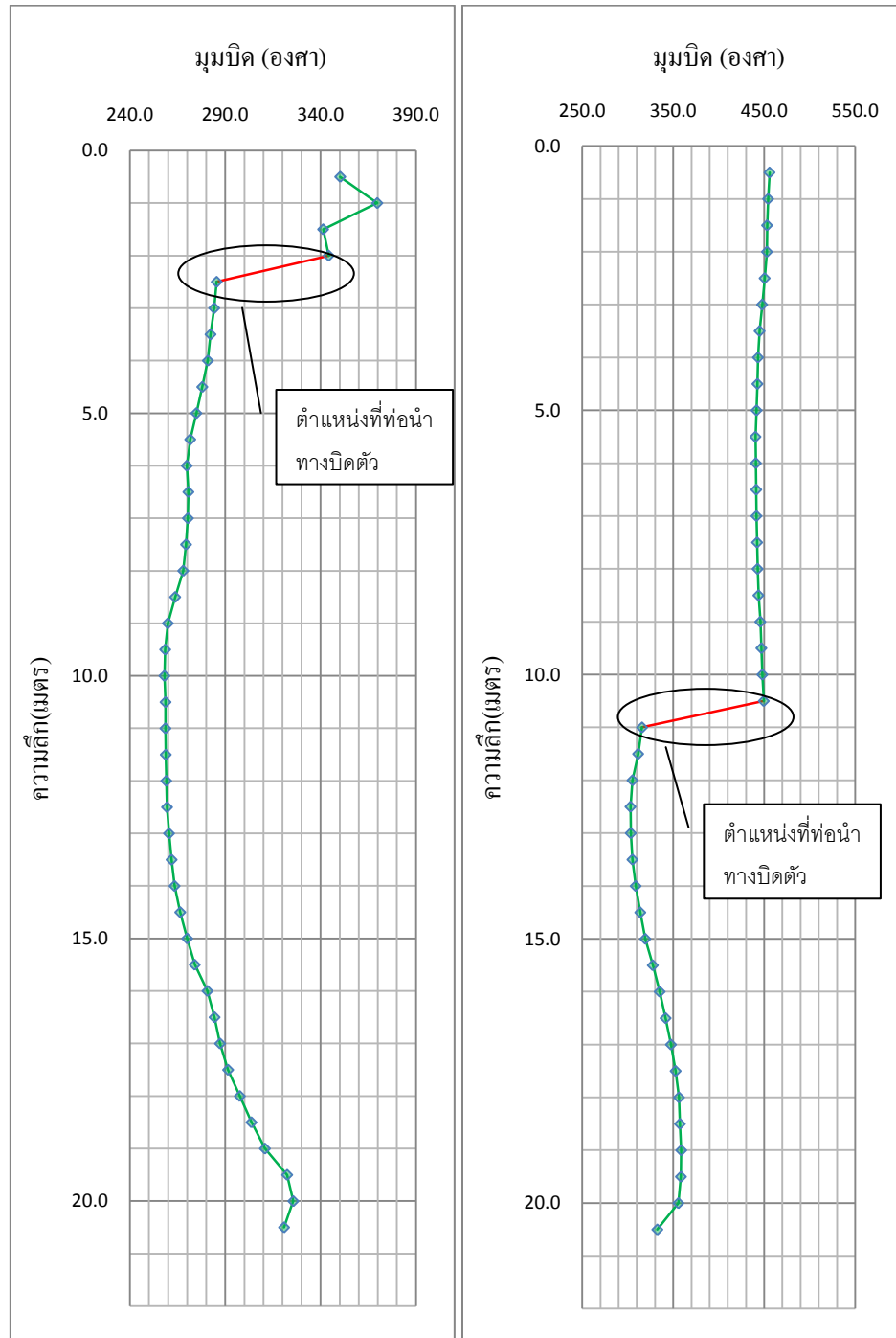
โครงการนี้เป็นการตรวจวัดระยะเคลื่อนตัวของตอมอ โดยทำการสำรวจจำนวน 2 หลุมซึ่งแต่ละหลุมมีความลึกประมาณ 21 เมตร (ภาพที่ 4.2 โครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง) ผลการสำรวจด้วยเครื่องมือของบริษัท STS สรุปได้ว่าหลุม S3 มีระยะเบี่ยงเบนสูงสุดด้าน A ประมาณ +0.72 เมตร และด้าน B ประมาณ -0.21 เมตรและเกิดขึ้นที่บริเวณผิวดิน (ภาพที่ 4.3และ ภาคผนวก ก ตารางที่ ก-9) หลุม S5 มีระยะเบี่ยงเบนสูงสุดด้าน A ประมาณ -0.45 เมตร และด้าน B ประมาณ +0.76 เมตร และเกิดขึ้นที่ระดับผิวดิน (ภาพที่ 4.4และ ภาคผนวก ก ตารางที่ ก-10) ผลรวมของผลสำรวจของหลุมที่ S3 และ S5 เท่ากับ ตามลำดับ



ภาพที่ 4.2 ท่อวัด Inclinator ในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง

การสำรวจด้วยเครื่องมือวัดของผู้วิจัยให้ผลที่สอดคล้องกับของบริษัท STS โดยพบว่ามุมบิดจากการสำรวจหลุมที่ S3 และ S5 (ภาพที่ 4.3aและ 4.3b) ที่ความลึก 2 และ 10.5 เมตรเกิดการเปลี่ยนแปลงมุมบิดประมาณ 180 องศาตามลำดับ ส่งผลให้กราฟของมุมบิดที่ได้ไม่ต่อเนื่องผู้วิจัยได้ตรวจสอบกับข้อมูลสำรวจของบริษัท STS ซึ่งพบว่าข้อมูลที่ความลึกดังกล่าวเปลี่ยนแปลงเครื่องหมายจากบวกเป็นลบ ผู้วิจัยจึงสรุปว่าที่ความลึก 2 และ 10 เมตรเกิดการบิดตัวของท่อนำทางทำให้หัวอ่านสลับด้านเมื่อผ่านบริเวณนั้น ด้านระยะเบี่ยงเบนแนวราบพบว่าผลสำรวจสอดคล้องกับข้อมูลของบริษัท STS แต่ระยะเคลื่อนตัวเฉลี่ยแล้วแตกต่างกันมากกว่า 2 เท่า โดยหลุม

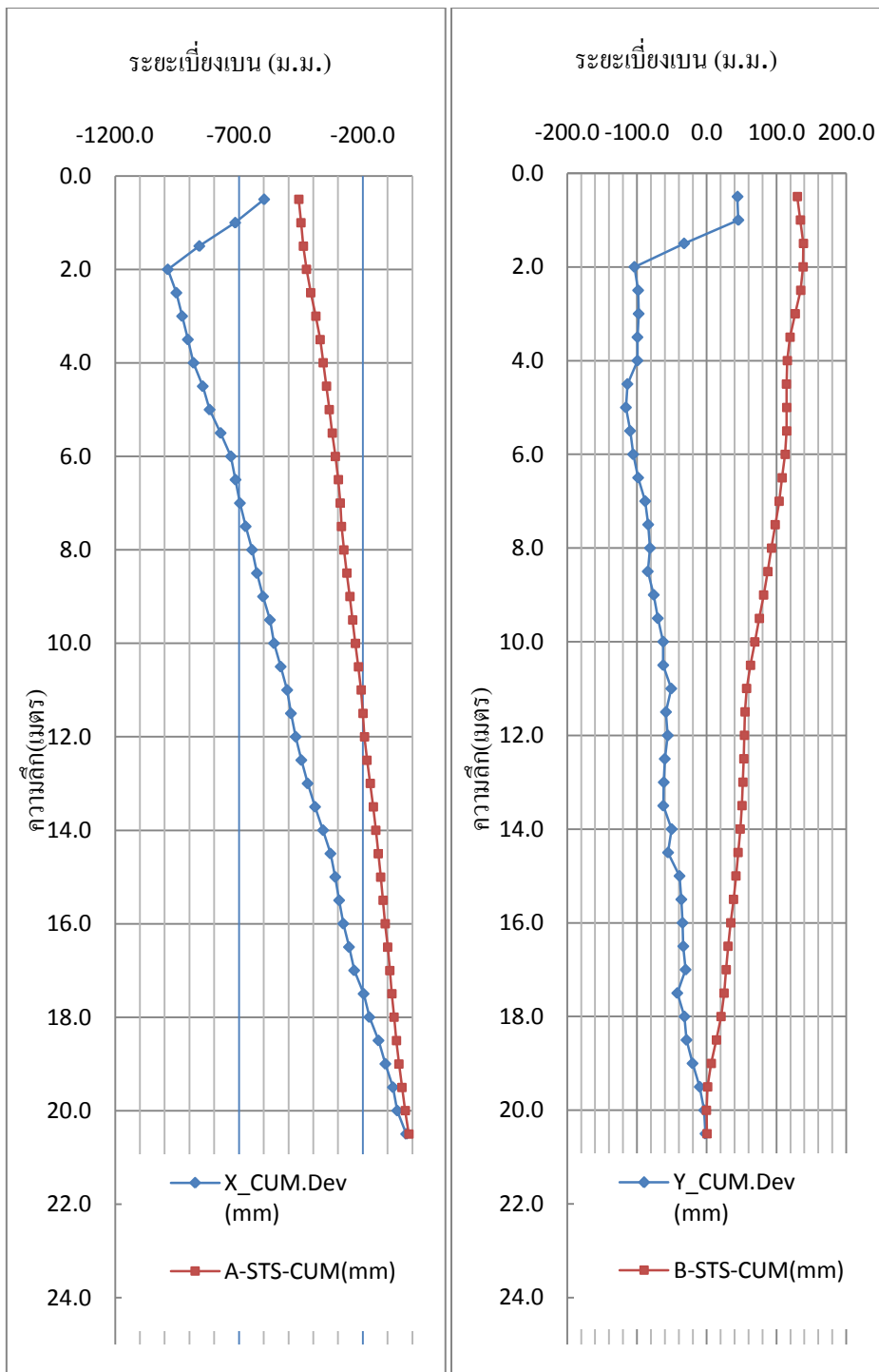
ที่ S3 อ่านระยะแกน X และ Y ได้ประมาณ 0.9 และ 0.2 เมตรตามลำดับ (ภาพที่ 4.4) และหลุมที่ S5 มีค่าแกน X และ Y ได้ประมาณ 1.0 และ 0.17 เมตรตามลำดับ (ภาพที่ 4.5)



(a) มุมบิตหลุมที่ S3

(b) มุมบิตหลุมที่ S5

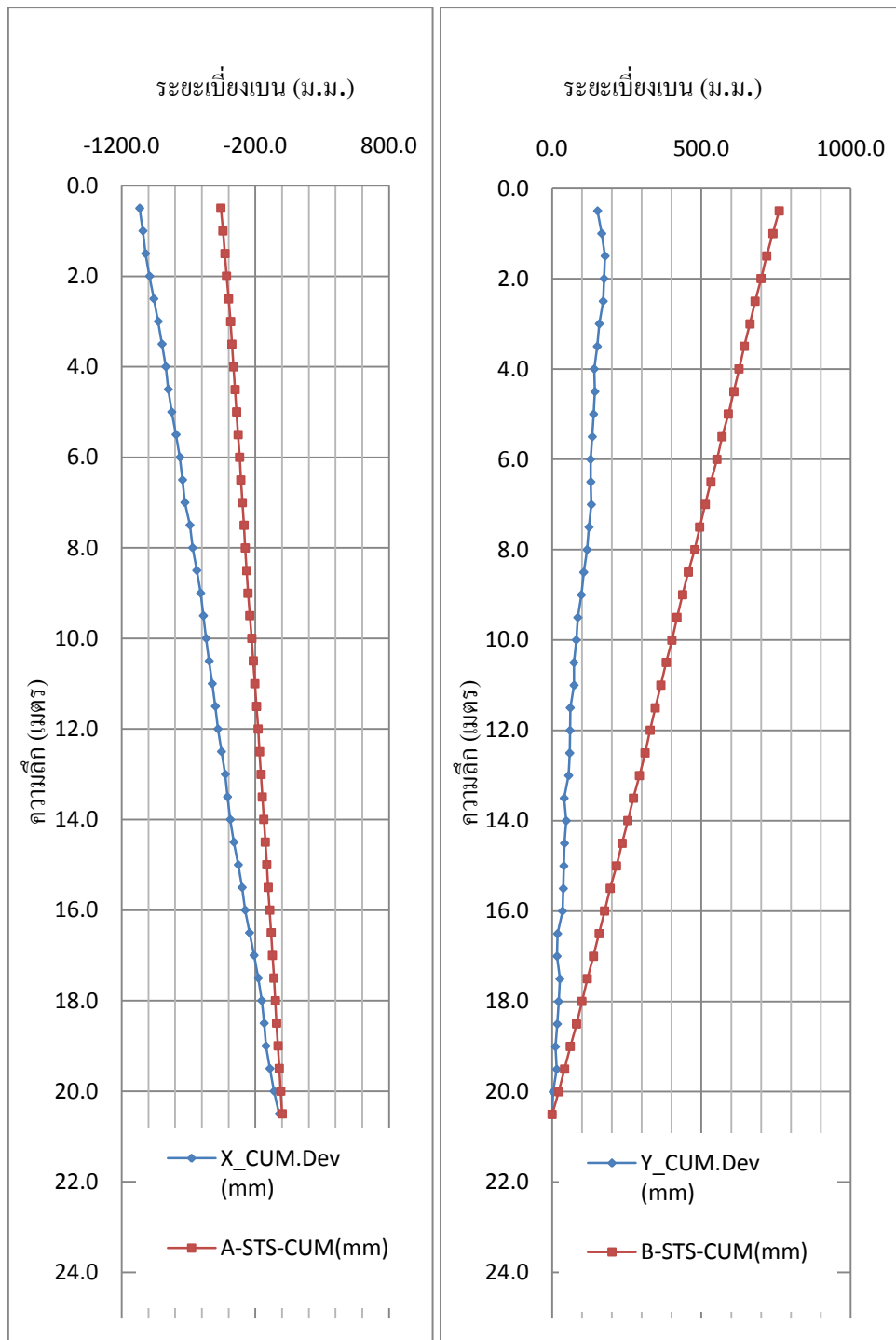
ภาพที่ 4.3 การบิตของท่อน้ำทางในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง



(a) แกน X

(b) แกน Y

ภาพที่ 4.4 การเปรียบเทียบระยะเบี่ยงเบนแนวราบหลุมที่ S3

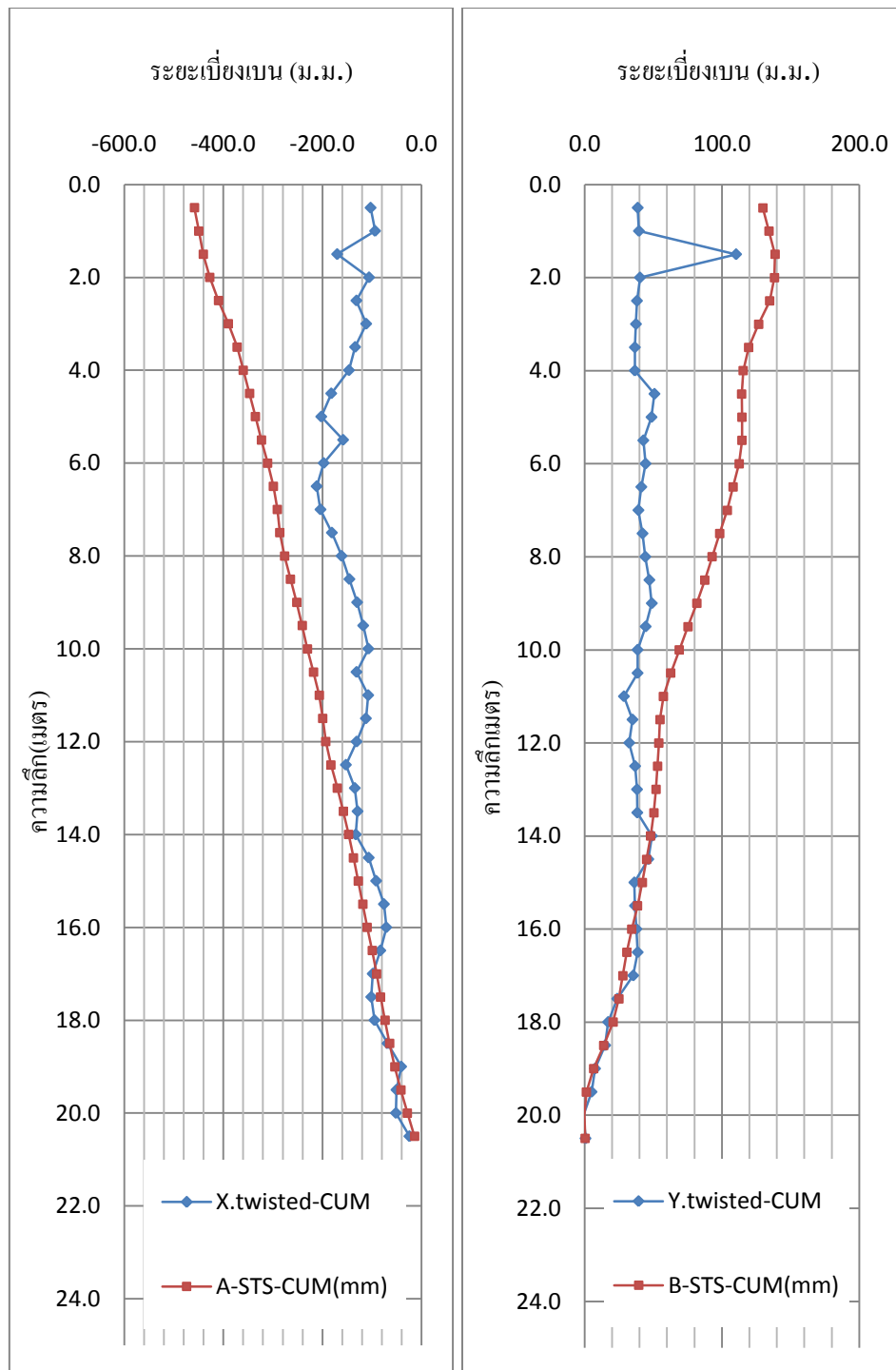


(a) แกน X

(b) แกน Y

ภาพที่ 4.5 การเปรียบเทียบระยะเบี่ยงเบนแนวราบหลุมที่ S5

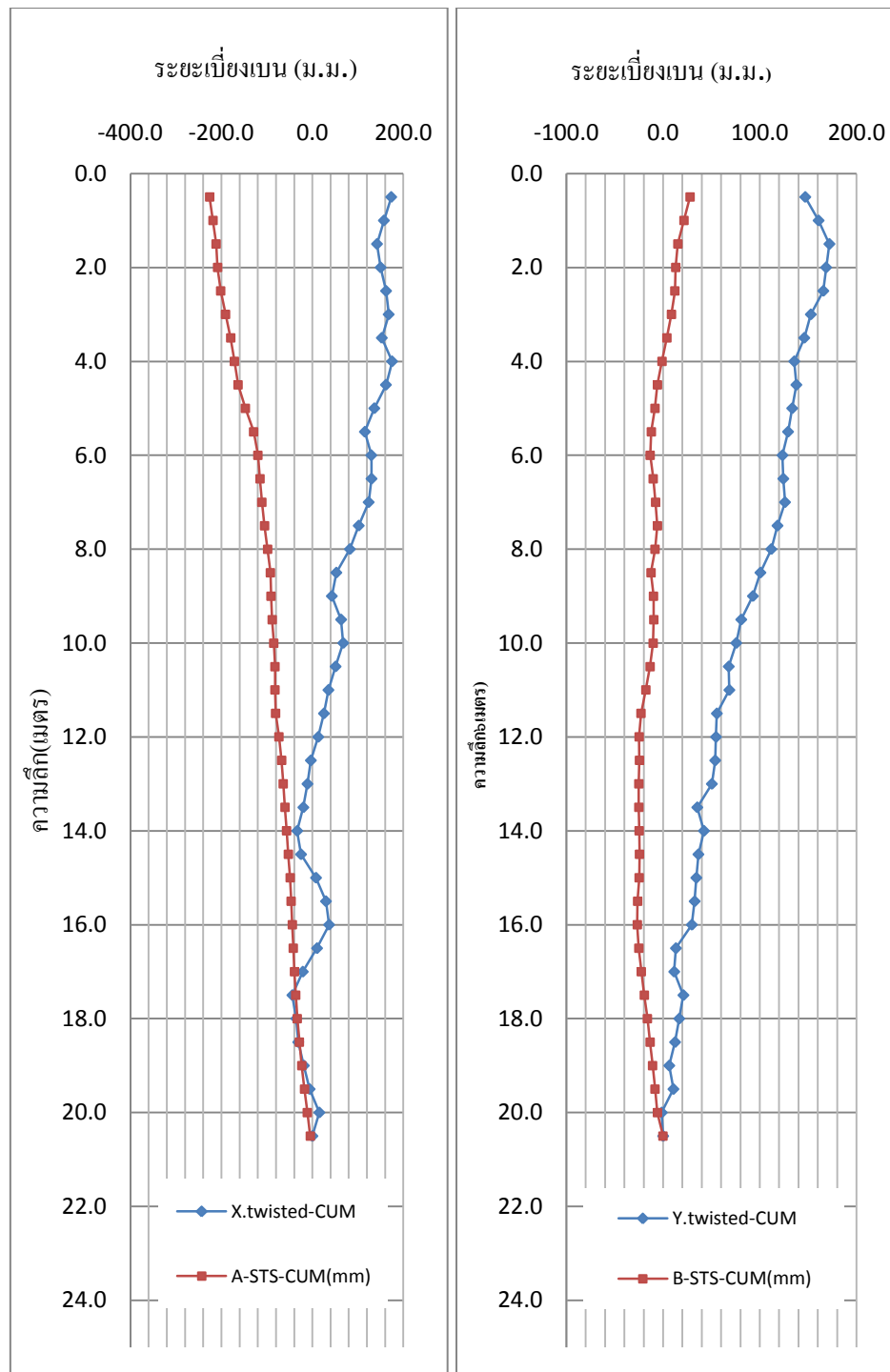




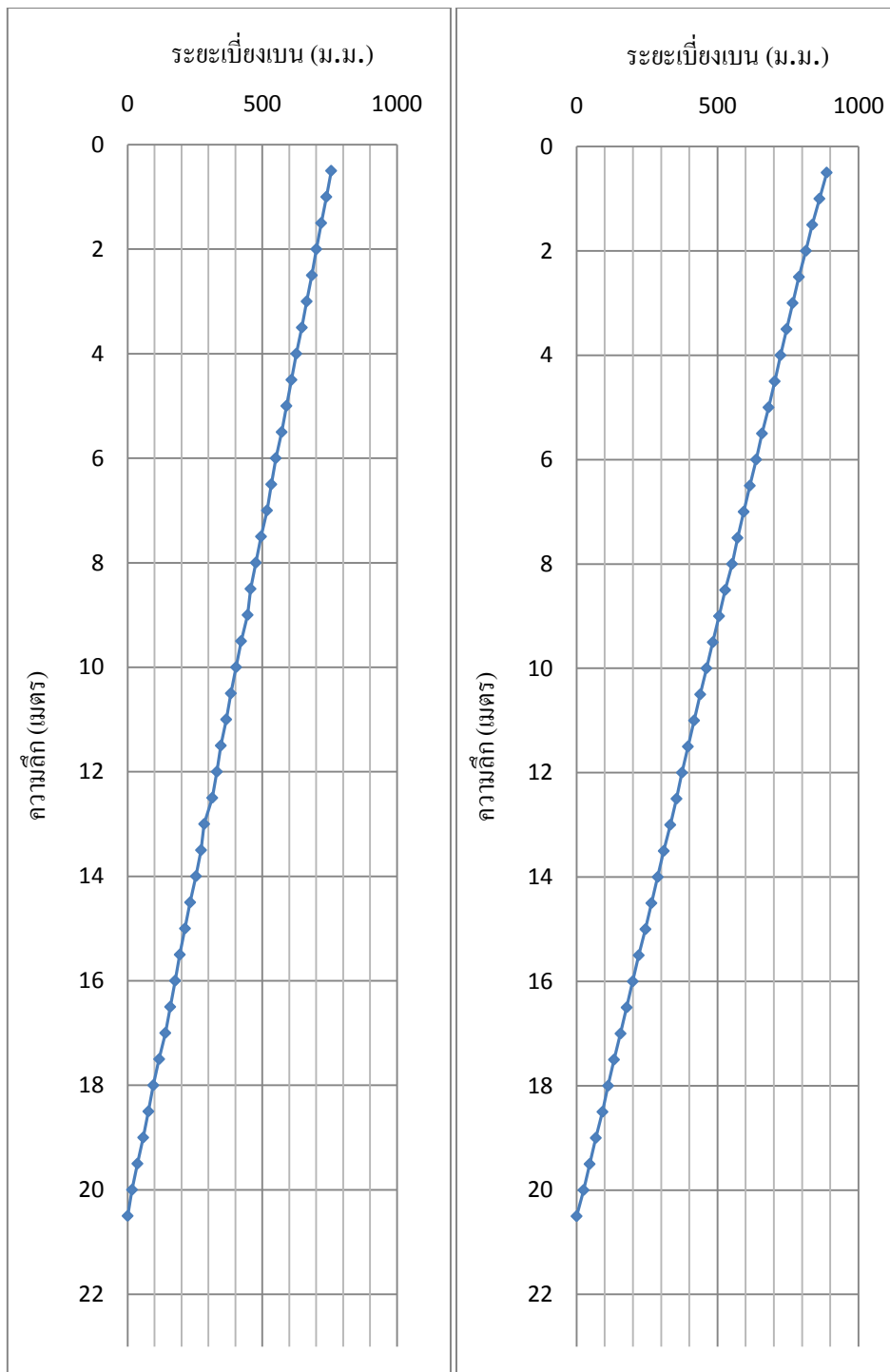
(a) แกนX

(b) แกนY

ภาพที่ 4.6 การเปรียบเทียบระยะเบี่ยงเบนแนวราบหลุมที่ S3 หลังปรับแก้ด้วยมูมบิต



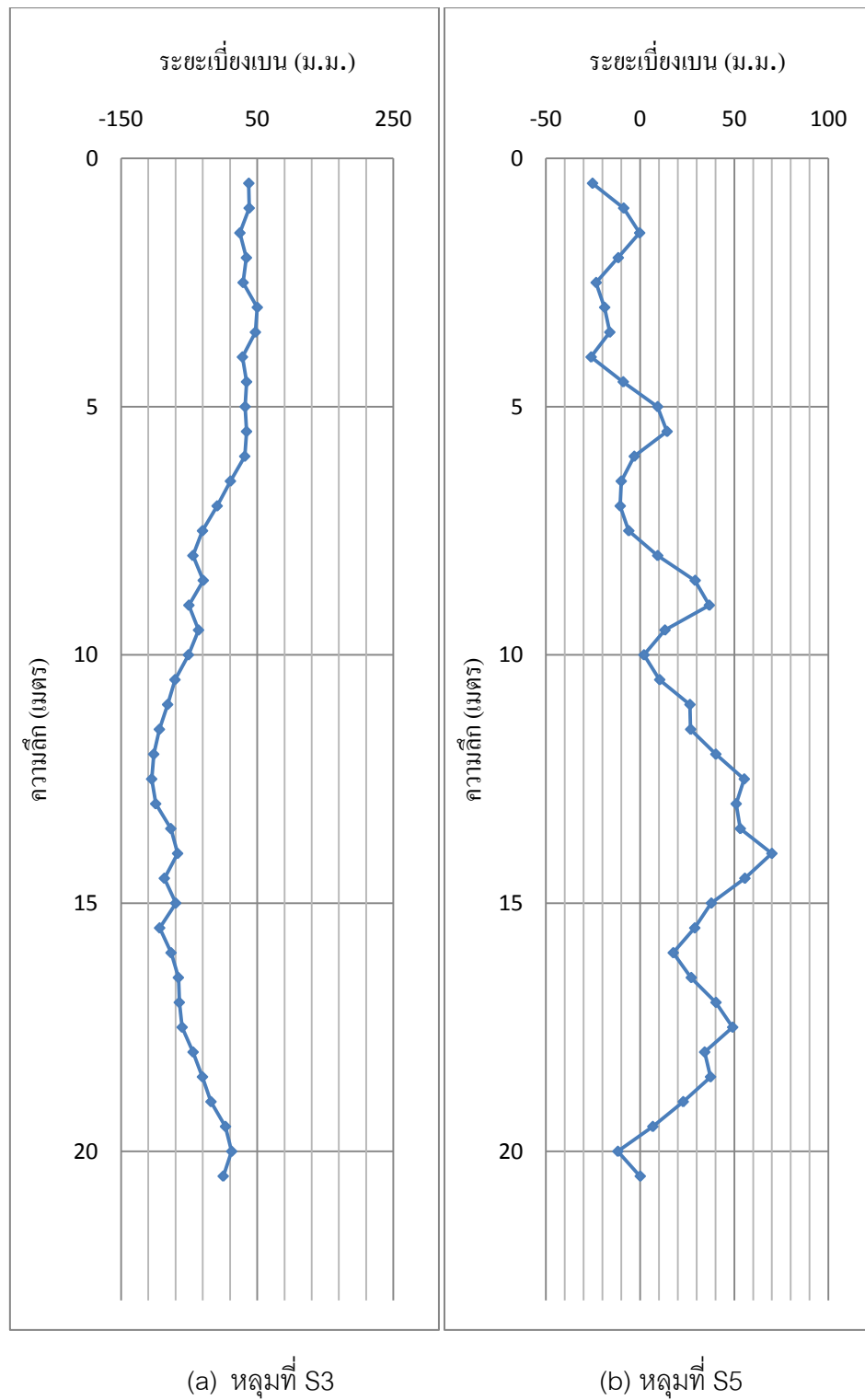
ภาพที่ 4.7 การเปรียบเทียบระยะเบี่ยงเบนแนวราบหลุมที่ S5 หลังปรับแก้ด้วยมุมบิด



(a) กลุ่มที่ S3

(b) กลุ่มที่ S5

ภาพที่ 4.8 กราฟผลลัพธ์ระยะเบี่ยงเบนแนวราบโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วงของบริษัทเอสทีเอส



ภาพที่ 4.9 กราฟผลลัพธ์ระยะเบี่ยงเบนแนวราบโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วงหลังปรับแก้ด้วยมูมบิต  
ของบริษัทเอสทีเอส

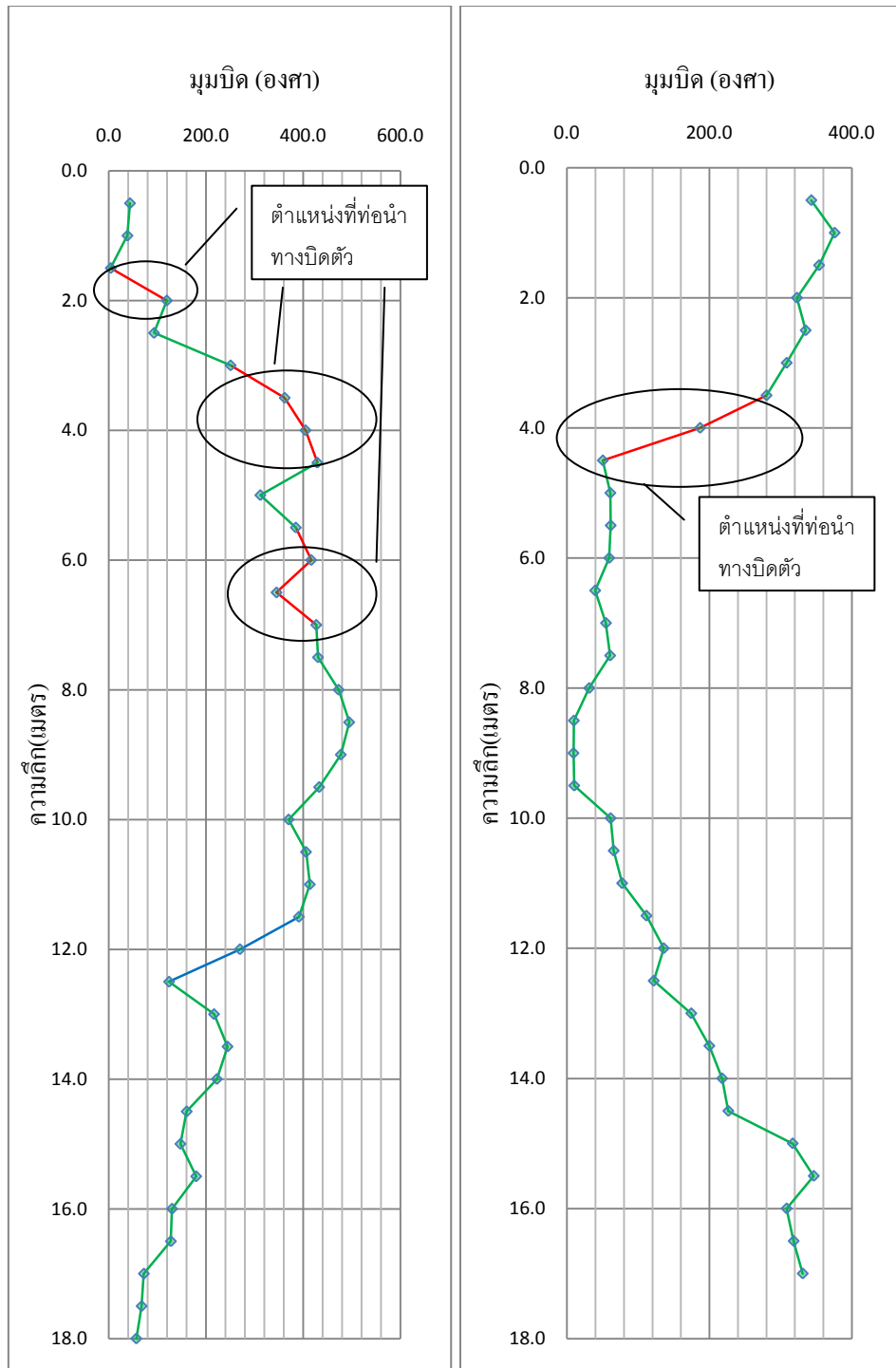
#### 4.3 การวิเคราะห์ผลทดสอบโครงการก่อสร้างคอนโดมิเนียม 185

โครงการนี้เป็นการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของระบบค้ำยันเสาชิมแบบต่อเนื่องที่มีงานขุดลึก 8 เมตร มีระบบค้ำยัน 3 ชั้นที่ความลึก 0.5 3.0 และ 6.0 เมตรจากระดับผิวดิน ผู้วิจัยทำการสำรวจจำนวน 2 หลุม ความลึกของท่อน้ำทางประมาณ 18 เมตร (ภาพที่ 4.8 โครงการคอนโดมิเนียม 185) ผลการสำรวจด้วยเครื่องมือของบริษัท STS สรุปได้ว่าหลุม I3 มีระยะเคลื่อนตัวสูงสุดด้าน A ประมาณ +0.83 เมตร และด้าน B ประมาณ -0.14 เมตรที่ระดับผิวดิน (ภาพที่ 4.10 และ ภาคผนวก ก ตารางที่ ก-7) หลุม I4 มีระยะเคลื่อนตัวสูงสุดด้าน A ประมาณ +0.10 เมตร และด้าน B ประมาณ -0.12 เมตร และเกิดขึ้นที่ระดับผิวดิน (ภาพที่ 4.11 และภาคผนวก ก ตารางที่ ก-8) ผลรวมของผลสำรวจของหลุมที่ I3 และ I4 เท่ากับ ตามลำดับ

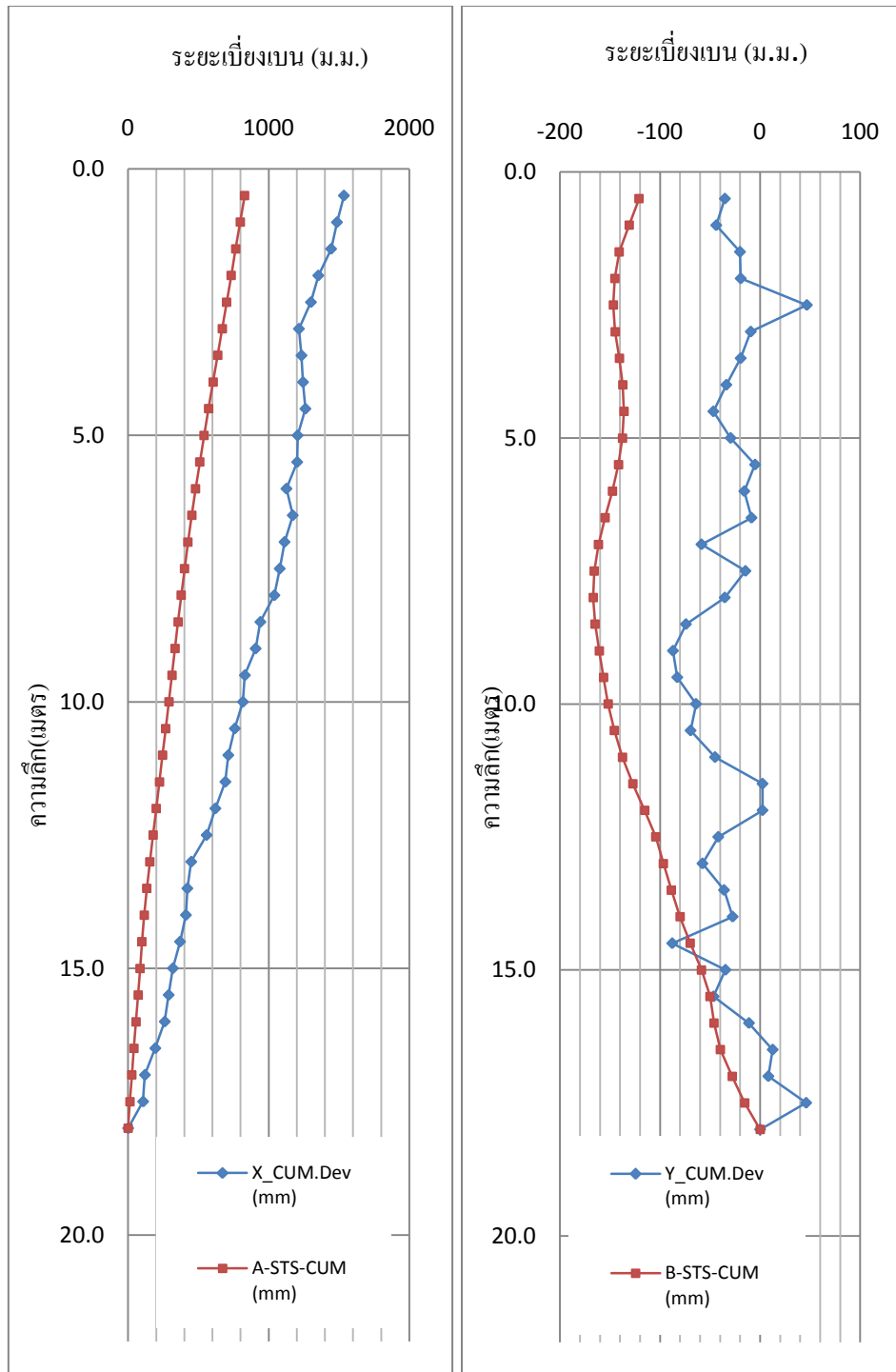


ภาพที่ 4.10 การตรวจวัดในโครงการคอนโดมิเนียม 185

การสำรวจด้วยเครื่องมือวัดของผู้วิจัยให้ผลที่สอดคล้องกับของบริษัท STS โดยผลสำรวจมุมบิดพบว่าหลุมที่ I3 เกิดการบิดตัวของท่อน้ำทางมากถึง 3 ครั้งและหลุมที่ I4 เกิดการบิด 1 ครั้ง (ภาพที่ 4.11a และ 4.11b) ซึ่งตรงกับข้อมูลสำรวจของบริษัทเอสทีเอสที่เปลี่ยนแปลงเครื่องหมายจากบวกเป็นลบ (ตารางที่ 7 และ 8) ผู้วิจัยจึงสรุปว่าผลการสำรวจมุมบิดมีความ ด้านระยะเบี่ยงเบนแนวราบตรวจพบว่าข้อมูลคล้อยกับข้อมูลของบริษัท STS แต่ระยะเบี่ยงเบนเฉลี่ยแล้วยังแตกต่าง โดยหลุมที่ I3 อ่านระยะแกน X และ Y ได้ประมาณ +1.5 และ -0.15 เมตรตามลำดับ (ภาพที่ 4.12) และหลุมที่ I4 มีค่าแกน X และ Y ได้ประมาณ +1.2 และ -0.17 เมตรตามลำดับ (ภาพที่ 4.13)



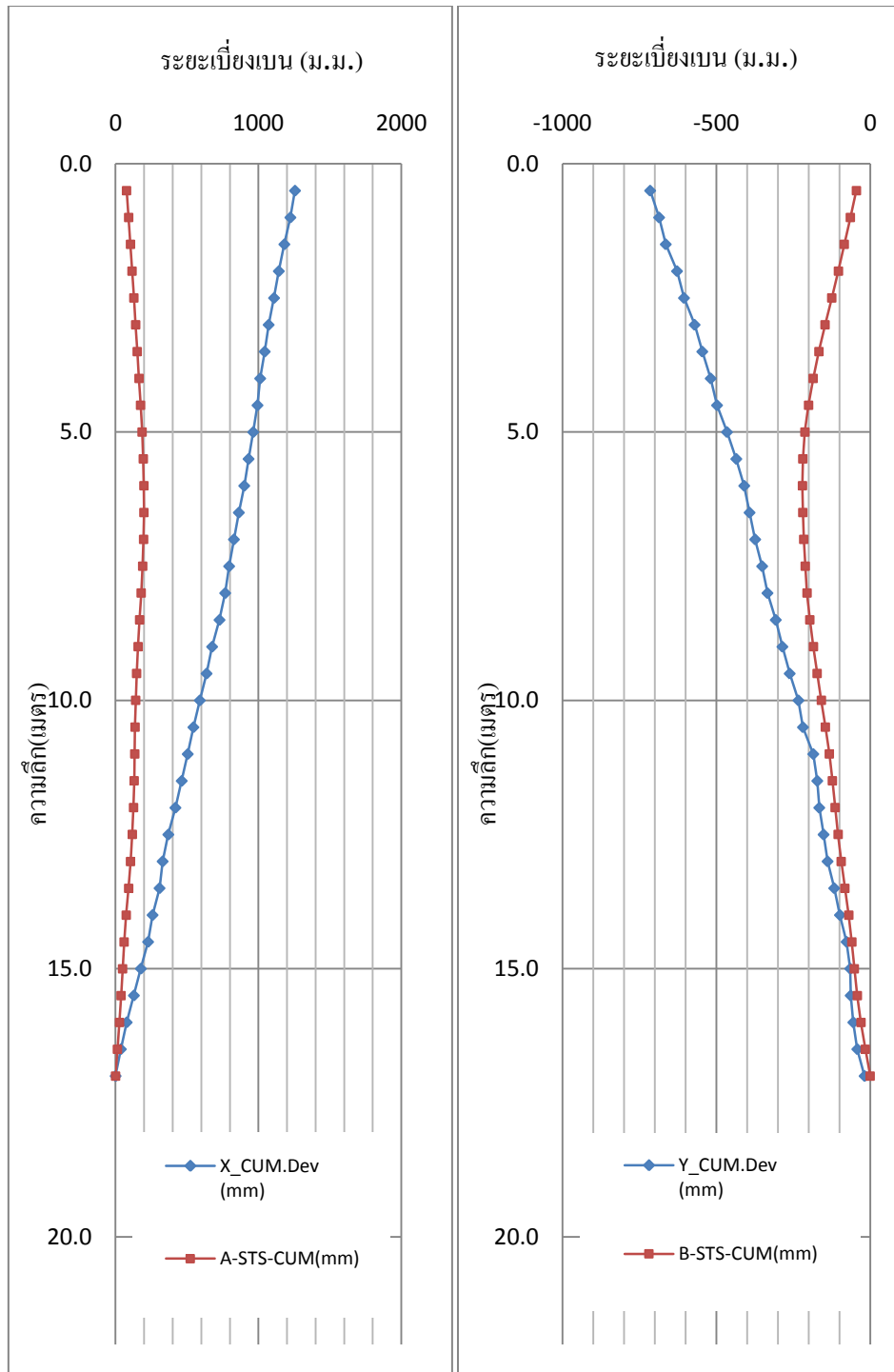
ภาพที่ 4.11 การบิตตัวของท่อนำทางในโครงการคอนโดมิเนียม 185



(a) แกนX

(b) แกนY

ภาพที่ 4.12 การเปรียบเทียบระยะเบี่ยงเบนแนวราบหลุมที่ I3

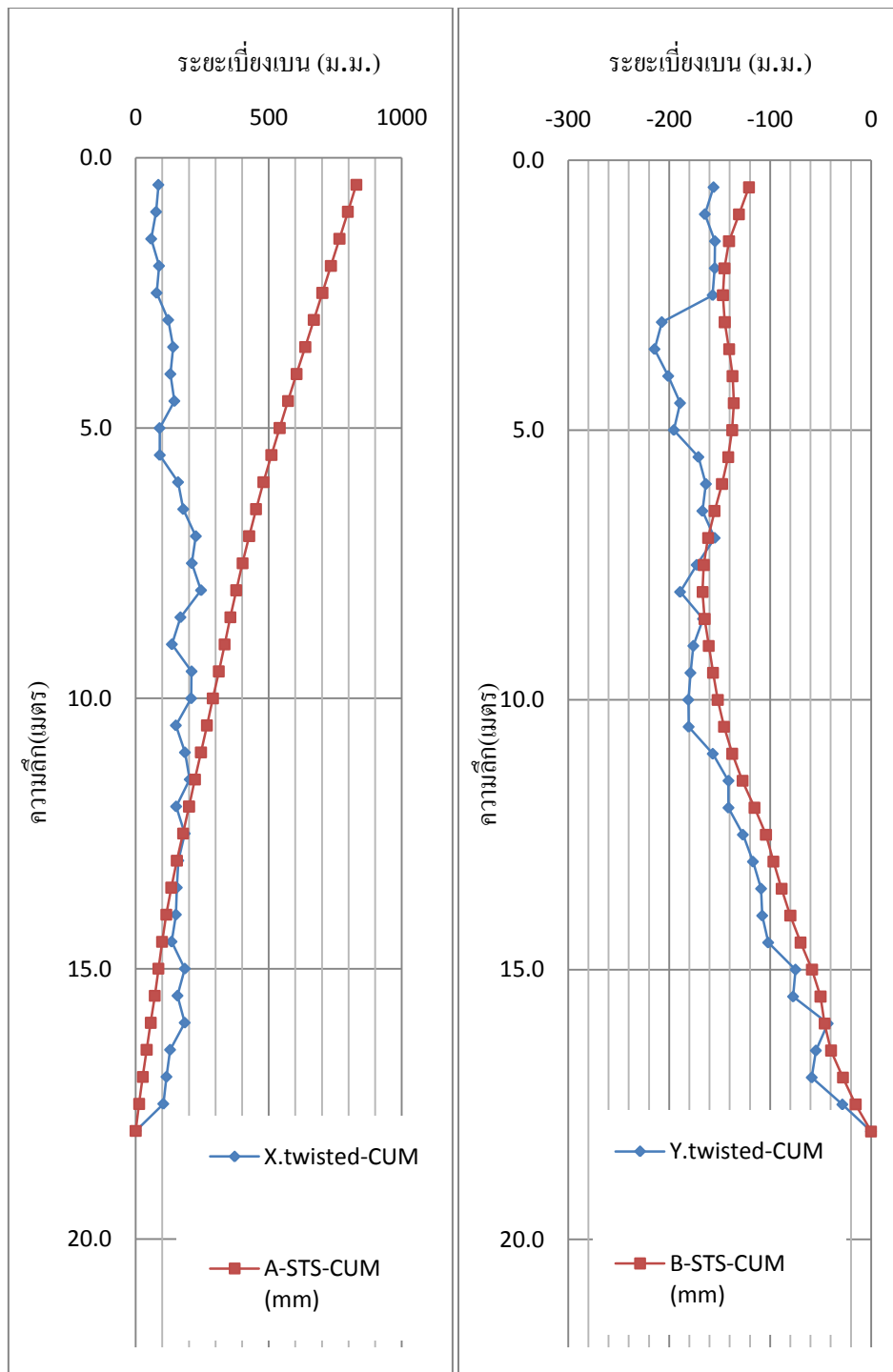


(a) แกน X

(b) แกน Y

ภาพที่ 4.13 การเปรียบเทียบระยะเบี่ยงเบนแนวราบหลุมที่ 14

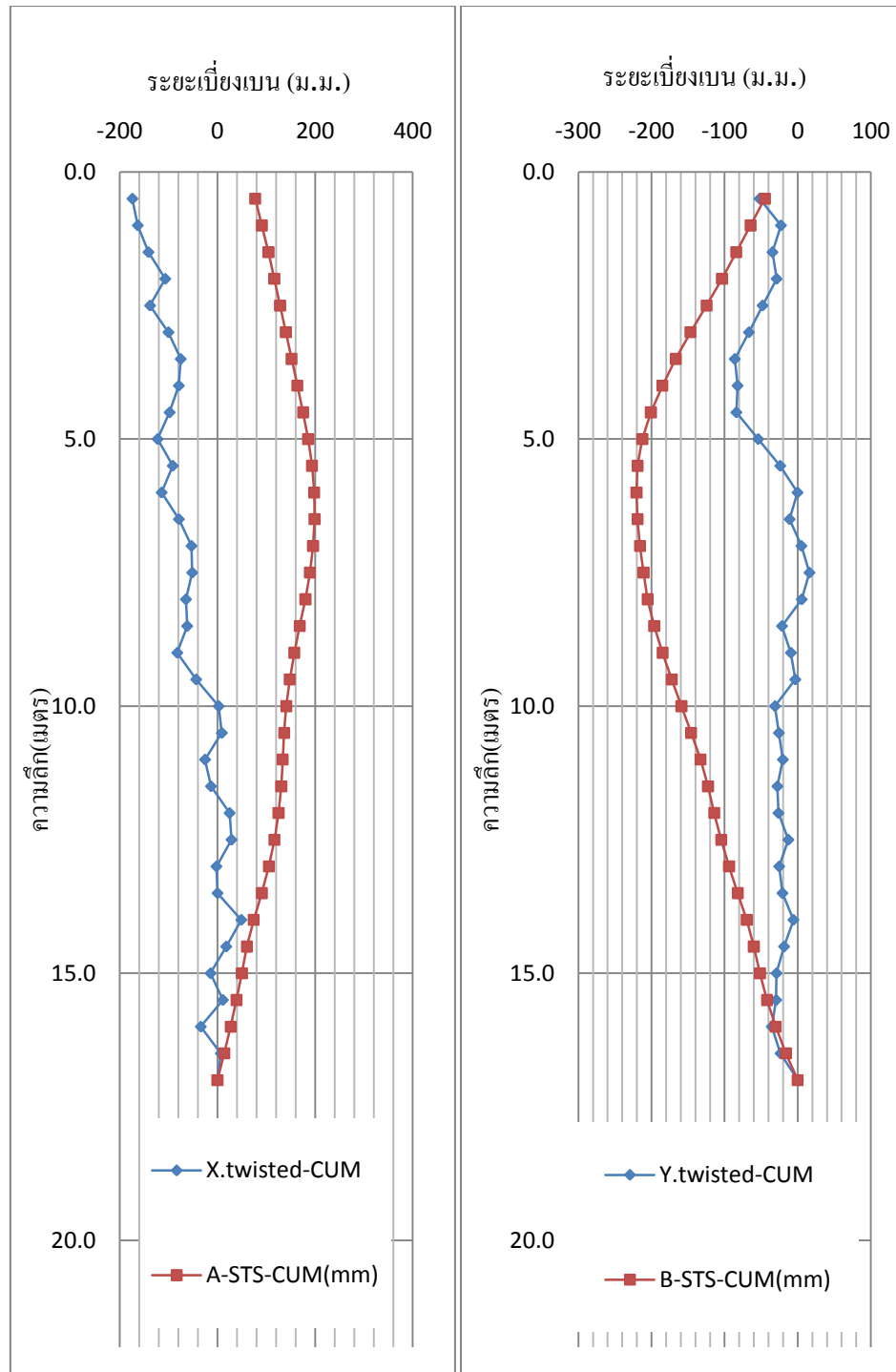




(a) แกน X

(b) แกน Y

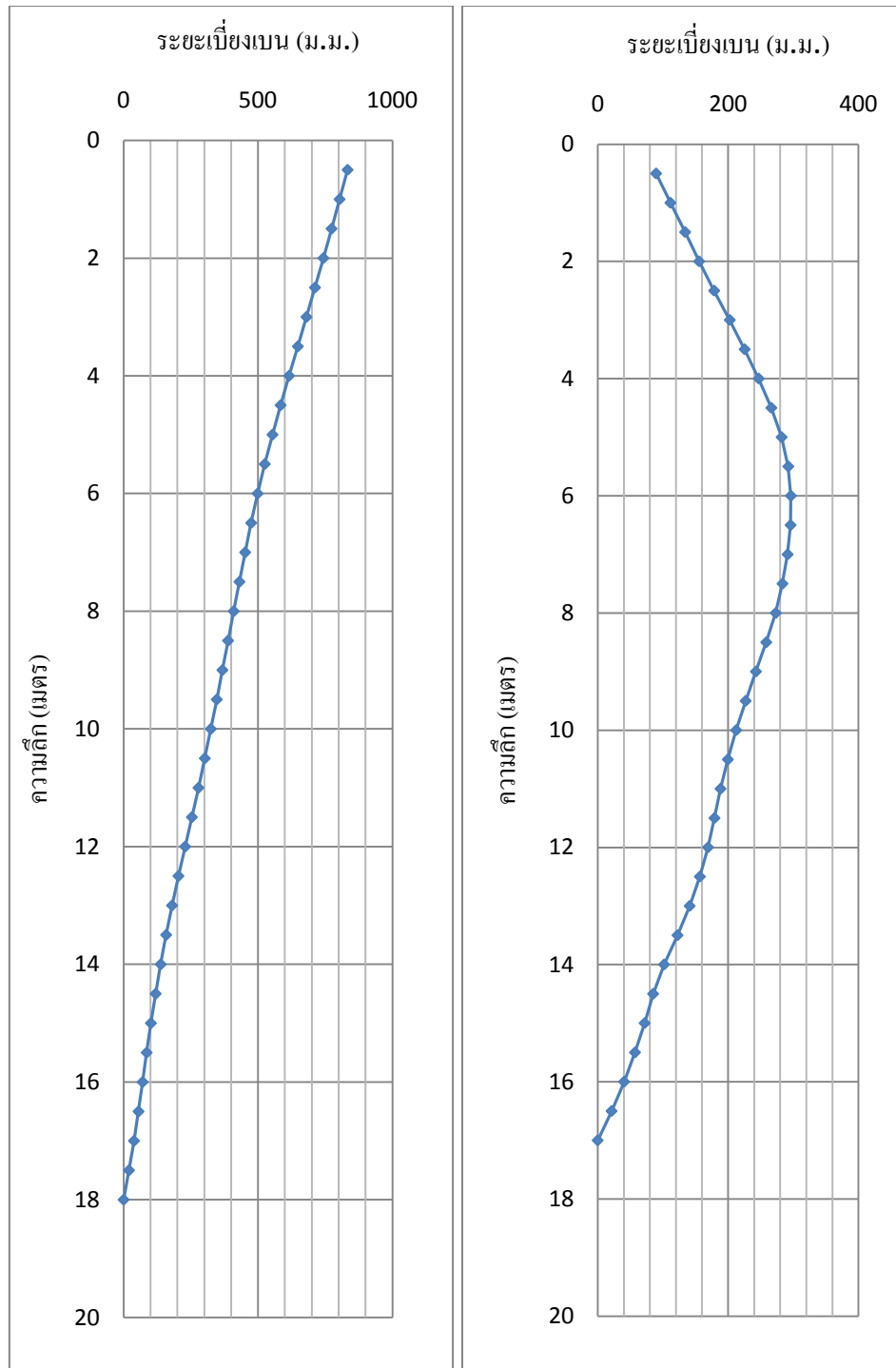
ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบระยะเบี่ยงเบนแนวราบหลุมที่ 13 หลังปรับแก้ด้วยมูมบิต



(a) แกน X

(b) แกน Y

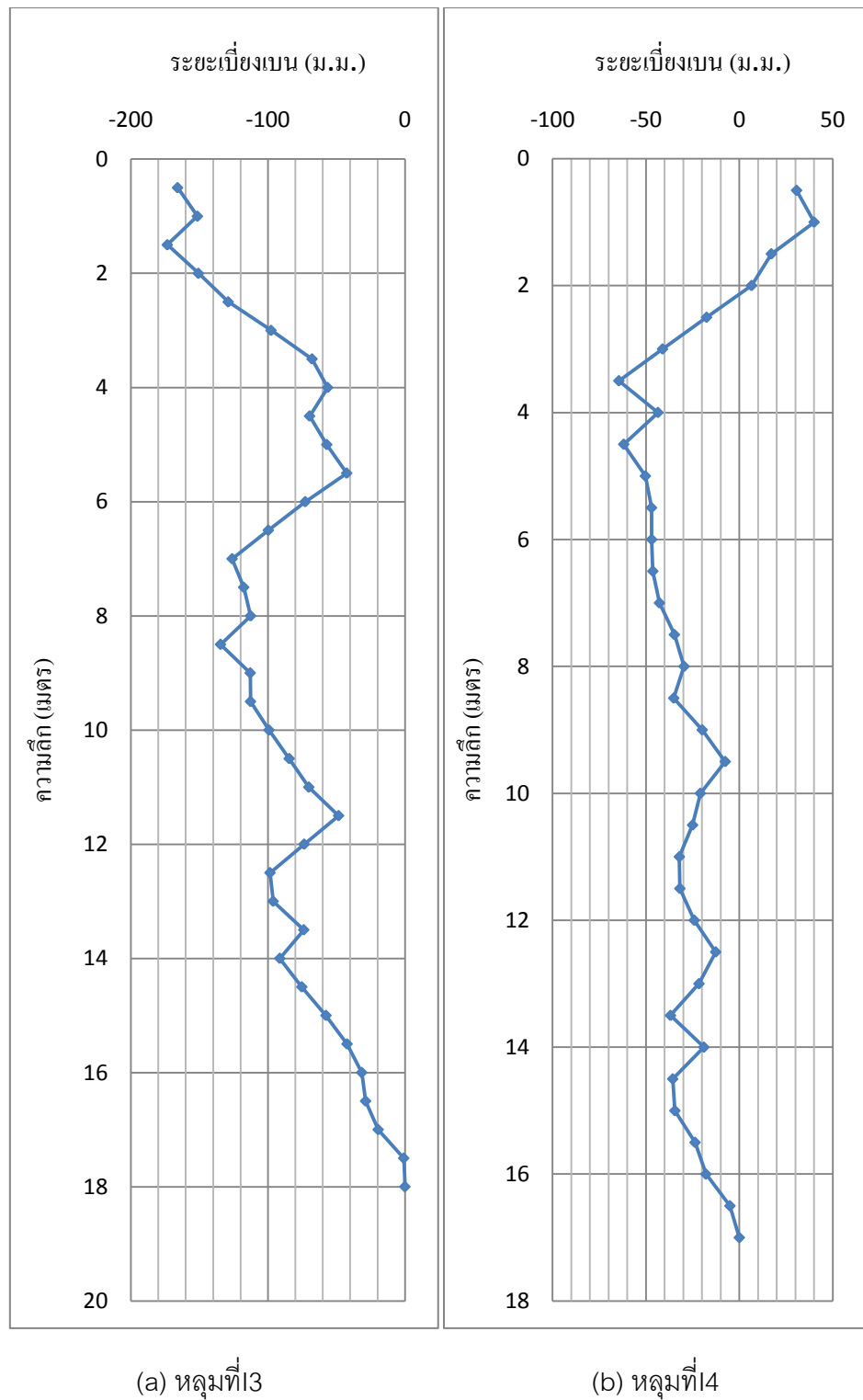
ภาพที่ 4.15 การเปรียบเทียบระยะเบี่ยงเบนแนวราบหลุมที่ 14 หลังปรับแก้ด้วยมูมบิต



(a) กลุ่มที่ 13

(b) กลุ่มที่ 14

ภาพที่ 4.16 กราฟผลลัพธ์ระยะเบี่ยงเบนแนวราบโครงการคอนโดมิเนียม 185 ก่อนปรับแก้ของ บริษัทเอสทีเอส



ภาพที่ 4.17 กราฟผลลัพธ์ระยะเบี่ยงเบนแนวราบโครงการคอนโดมิเนียม 185 หลังปรับแก้ของ บริษัทเอสทีเอส

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

การศึกษาวิจัยสามารถสรุปการดำเนินงาน ผลการทดลอง และปัญหาต่างๆ ที่ประสบในการดำเนินงานได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

การพัฒนามาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่หนึ่งหัวอ่านเสียค่าใช้จ่ายประมาณ 30,000 บาท ซึ่งมีราคาถูกกว่า Inclinometer ของบริษัท Sisgeo ที่มีราคาประมาณหกแสนบาท หัวอ่านที่ผู้วิจัยออกแบบภายในบรรจุเซนเซอร์วัดความเร่ง และเซนเซอร์เข็มทิศอย่างละตัว ค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่ของงานวิจัยจะใช้ในการขึ้นรูปหัวอ่าน โดยวัสดุที่ใช้ทำหัวอ่านเป็นอะลูมิเนียมทั้งหมดเพื่อทนต่อแรงดันน้ำในท่อนำทางที่สูงถึง 30 บาร์ เนื่องจากแรงดันน้ำในท่อนำทางสูงมาก ผู้วิจัยจึงประสบปัญหาในการป้องกันน้ำ ในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้ใช้ซิลิโคนหุ้มเซนเซอร์และสายสัญญาณที่อยู่ในหัวอ่านอีกชั้นหนึ่ง นอกเหนือจากการใช้โริงป้องกันบริเวณรอยต่อต่างๆ การใช้อะลูมิเนียมยังช่วยกันเสียง และการสัมผัสเพื่อที่ส่งผลต่อการทำงานของเซนเซอร์ด้วย

มาตรวัดที่ผู้วิจัยพัฒนามีข้อได้เปรียบมาตรวัดของบริษัท Sisgeo คือสามารถหาทิศทางจริงของหน้าที่ย่านได้ ซึ่งจากผลการตรวจวัดมุมบิดด้วยเซนเซอร์เข็มทิศพบว่าตรงกับผลสำรวจของบริษัท STS ที่ตรวจพบการเปลี่ยนแปลงเครื่องหมายที่บริเวณความลึกเดียวกัน และพบว่าการบิดของท่อนำทางที่ฝังในดินเกิดการบิดตัวมากกว่าท่อนำทางที่ฝังในเสาเข็ม

จากการเปรียบเทียบผลตรวจวัดในสนามพบว่าค่าที่ได้จากระบบมาตรวัดที่ผู้วิจัยพัฒนา (mems Inclinometer) (conventional inclinometers) มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับมาตรวัดแบบเดิม แต่มีความคลาดเคลื่อนสูงกว่า และเมื่อนำข้อมูลการเบี่ยงเบนของบริษัทเอสทีเอสมาประมวลผลร่วมกับข้อมูลมุมบิดจากเครื่องมือของผู้วิจัยแล้วพบว่าระยะเบี่ยงเบนมีแนวโน้มใกล้เคียงกันมาก ซึ่งหากจะนำมาตรวัดของผู้วิจัยไปใช้งานจะต้องทำการปรับปรุงโดยใช้อุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติในการทำงานละเอียดมากขึ้น

## 5.2 ปัญหาและข้อจำกัด

เมื่อเทียบหัวอ่านของบริษัท SISGEO พบว่าประสิทธิภาพการทำงานของมาตรวัดการเคลื่อนตัวที่ผู้วิจัยพัฒนาต่ำกว่า เนื่องจากความแตกต่างด้านความละเอียดของไมโครคอนโทรลเลอร์ และเซนเซอร์วัดความเร่งที่ผู้วิจัยใช้มีขนาด 10 บิต (1024 อันดับ) ความละเอียดของมุมเอียงมีค่าเท่ากับ 0.5 องศาสำหรับช่วงการวัด  $\pm 15$  องศา แต่ความละเอียดของหัวอ่านแบบเดิมทำงานด้วยความละเอียด 16 บิต (65000 อันดับ) จึงมีความละเอียดมุมสูงถึง 0.003 องศา ปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจมีผลต่อประสิทธิภาพของมาตรวัดคือการออกแบบและการประกอบหัวอ่านให้มีความทนทานและคงทนต่อการใช้งานในสนาม

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

มาตรวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นเป็นการประยุกต์ใช้ความรู้พื้นฐานในวิศวกรรมหลายสาขา ผลการศึกษาที่ได้นำเสนอในที่นี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพสำหรับการพัฒนาระบบตรวจวัดที่มีราคาต่ำเพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างได้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังจำเป็นต้องพัฒนาเพิ่มเติมต่อไปอีกจึงจะสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สิ่งที่ควรปรับปรุงนั้นมีหลายประการแต่ปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดคือ การออกแบบทางกายภาพของหัวอ่านและการติดตั้งเซนเซอร์ เพราะหัวอ่านต้องมีความทนทาน สามารถกันความชื้นและกันกระแทกได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้การใช้งานที่มีความแม่นยำสูงมากจำเป็นต้องมีวงจรขยายสัญญาณ และวงจรตัดสัญญาณรบกวน ซึ่งไม่ได้ในมาใช้ในงานวิจัยนี้ แนวโน้มที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของวงจรดังกล่าวว่าจะสามารถทำให้มาตรวัดที่ผู้วิจัยพัฒนากลายเป็นตัวเลือกสำหรับการใช้งานที่มีความละเอียดสูงได้

## รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

วิชัย สัจจพรปทานสกุล. เอกสารการสอนวิชา Geotechnical Instrumentation  
ประจัน พลังสันติกุล. เรียนรู้การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์  
การวรรณ สุวรรณรัตน์. (2539). เครื่องมือวัดอุณหภูมิ 16 ช่อง ควบคุมโดยไมโครโปรเซสเซอร์  
ETT CO.,LTD. คู่มือการใช้งานบอร์ด PIC 18F9722, โมดูล ET-USB,DS1307  
WARA CO.,LTD. บทความการใช้งาน โมดูลเข็มทิศ ดิจิตอล HMC6352

ภาษาอังกฤษ

- [1] Ruiz-Sandoval, M., Spencer, Jr., B.F. , and Kurata, N., “Development of a High Sensitivity Accelerometer for the Mica Platform,” Proceedings of the 4th International Workshop on Structural Health Monitoring, September 2003
- [2] Dunncliff, J., “Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance,” NewYork, Wiley & Sons Inc., 1993.
- [3] Geodaq, “Geodaq INC300 Series Inclinator Data Sheet,” Available Online: <http://www.geodaq.com> [October 2004].
- [4] Clifford, M.A., “Accelerometers Jump Into the Consumer Goods Market,” Sensors Magazine, August 2004, pgs. 36-39.
- [5] Slope Indicator, “Digitilt Inclinator Probe 50302599”, [Online] Available From: <http://www.slopeindicator.com/pdf/manuals/digitilt-probe.pdf> [2000].
- [6] Hanna, T.H., (1973) Foundation Instrumentation, Trans Tech Publication
- [7] ANALOG DEVICE CO.,LTD. Manual ADXL335 version 2 [Online] Available From: [www.funspark.com](http://www.funspark.com)
- [8] HONEYWELL CO.,LTD. Manual HMC6352 [Online] Available From: [www.funspark.com](http://www.funspark.com)

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ข้อมูลสำรวจ

ตารางที่ ก-1 ผลสอบเทียบแรงดันที่ความเร่งเท่ากับ 0 g ในแนวแกน Y

1	2	3	4	5
DEV (cm)	Reading Y-130	Reading X-130	Reading Y-310	Reading X-310
0	512.7	501.5	512.4	499.7
1	511.5	502.3	513.7	500.7
2	510.3	502.0	514.6	503.2
3	509.5	501.5	515.3	498.5
4	508.2	501.7	517.1	500.4
5	507.0	503.1	520.7	504.3
6	505.8	502.3	522.8	502.5
7	501.3	501.4	523.8	500.5
8	499.6	504.6	525.9	503.5
9	496.5	504.3	526.3	501.7
10	496.2	502.4	527.3	500.7
11	495.0	503.6	527.8	500.1
12	494.7	502.3	529.8	503.1
13	494.7	502.9	531.7	504.2
14	491.5	504.1	536.0	507.2
15	490.1	506.1	536.5	505.4

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ผลสอบเทียบแรงดันที่ความเร่งเท่ากับ 0 g ในแนวแกน Y

6=2-4	7	8	9=2-6	10=4-6
$V_{0g}=(\text{Reading}Y_{130}-\text{Reading}Y_{310})$	$\theta=\tan^{-1}(1/500)$	$\sin(\theta)$	$\Delta 130= \text{Reading}Y_{130}-V_{0g}$	$\Delta 310= \text{Reading}Y_{310}-V_{0g}$
512.5	0.00	0.00	-0.03	-0.30
512.6	0.82	0.01	-1.20	1.00
512.5	1.64	0.03	-2.39	1.90
512.4	2.46	0.04	-3.25	2.60
512.6	3.28	0.06	-4.52	4.40
513.9	4.09	0.07	-5.70	8.00
514.3	4.91	0.09	-6.95	10.10
512.5	5.72	0.10	-11.43	11.10
512.7	6.53	0.11	-13.13	13.20
511.4	7.34	0.13	-16.17	13.60
511.7	8.14	0.14	-16.51	14.60
511.4	8.95	0.16	-17.70	15.10
512.2	9.75	0.17	-18.03	17.10
513.2	10.54	0.18	-18.01	19.00
513.8	11.33	0.20	-21.17	23.30
513.3	12.12	0.21	-22.63	23.80

ตารางที่ ก-2 ผลสอบเทียบแรงดันที่ความเร่งเท่ากับ 0 g ในแนวแกน X

1	2	3	4	5
DEV (cm)	Reading Y-230	Reading X-230	Reading Y-50	Reading X-50
0.0	512.9	501.0	511.3	498.2
1.0	513.1	499.9	513.2	500.1
2.0	512.7	498.0	511.9	502.2
3.0	514.4	496.1	516.0	503.2
4.0	512.8	494.1	513.0	504.5
5.0	512.6	492.4	513.7	505.9
6.0	511.9	491.3	515.2	507.6
7.0	510.4	490.2	517.3	508.8
8.0	511.1	487.2	515.0	509.0
9.0	512.0	485.3	514.8	510.7
10.0	510.8	484.5	512.5	512.8

ตารางที่ ก-2 (ต่อ) ผลสอบเทียบแรงดันที่ความเร่งเท่ากับ 0 g ในแนวแกน X

6=3-5	7	8	9=3-6	10=5-6
V <sub>0g</sub>	$\theta = \tan^{-1}(1/500)$	$\sin(\theta)$	$\Delta_{230} = \text{Reading}Y_{230} - V_{0g}$	$\Delta_{50} = \text{Reading}Y_{50} - V_{0g}$
499.6	0.0	0.0	2.0	-0.8
500.0	0.8	0.8	0.9	1.1
500.1	1.6	1.6	-1.0	3.2
499.6	2.5	2.5	-2.9	4.2
499.3	3.3	3.3	-4.9	5.5
499.2	4.1	4.1	-6.6	6.9
499.5	4.9	4.9	-7.7	8.6
499.5	5.7	5.7	-8.8	9.8
498.1	6.5	6.5	-11.8	10.0
498.0	7.3	7.3	-13.7	11.7
498.6	8.1	8.1	-14.5	13.8

ตารางที่ ก-3 ผลทดสอบโครงการคอนกรีตอัดแรง 185 หลุมที่ 13

1	2	3	4	5	6	7
Depth	Reading Twisted	Reading Twisted	Reading AVG-Y	Reading AVG-X	Y_INCR. DEV(mm)	X_INCR. DEV(mm)
0.5	324.7	43.5	514.0	508.7	8.6	49.4
1.0	319.6	38.3	506.5	507.0	-23.7	41.7
1.5	285.1	3.9	511.8	517.7	-0.7	91.0
2.0	66.8	119.3	496.7	509.3	-66.1	52.5
2.5	40.6	93.1	525.0	516.5	56.0	85.6
3.0	198.3	250.8	514.3	494.0	10.1	-18.5
3.5	309.8	362.3	515.3	495.7	14.4	-10.8
4.0	93.1	405.2	515.0	494.3	12.9	-17.0
4.5	117.4	429.5	508.0	510.0	-17.2	55.6
5.0	312.1	312.1	506.3	498.7	-24.4	3.1
5.5	25.2	385.2	514.5	514.5	10.8	76.4
6.0	56.9	416.9	510.3	488.3	-7.2	-44.8
6.5	345.4	345.4	523.6	510.6	50.0	58.3
7.0	67.2	427.2	501.8	505.4	-44.0	34.3
7.5	70.9	430.9	516.8	506.2	20.7	38.0
8.0	113.3	473.3	521.0	519.5	38.8	99.5
8.5	135.1	495.1	515.0	505.3	12.9	34.0
9.0	117.8	477.8	511.0	514.5	-4.3	76.4
9.5	73.2	433.2	507.7	501.0	-18.7	13.9
10.0	10.3	370.3	513.3	510.5	5.4	57.9
10.5	46.2	406.2	506.3	508.0	-24.4	46.3
11.0	53.9	413.9	501.0	502.5	-47.4	20.8
11.5	31.4	391.4	512.0	513.3	0.0	71.0
12.0	270.1	270.1	522.3	511.5	44.2	62.5
12.5	124.0	124.0	515.7	521.7	15.8	109.6
13.0	216.7	216.7	507.0	504.0	-21.6	27.8
13.5	244.5	244.5	510.0	500.2	-8.6	10.2
14.0	222.5	222.5	526.0	507.0	60.3	41.7
14.5	160.3	160.3	499.7	509.0	-53.2	50.9
15.0	147.4	147.4	514.8	504.5	11.9	30.1
15.5	179.9	179.9	503.8	504.0	-35.3	27.8
16.0	130.2	130.2	506.5	512.5	-23.7	67.1
16.5	127.8	127.8	513.0	514.0	4.3	74.1
17.0	72.2	72.2	503.3	500.8	-37.7	12.7
17.5	67.5	67.5	522.7	521.0	46.0	106.5
18.0	56.5	56.5	501.0	506.7	-47.4	40.1

ตารางที่ ก-3 (ต่อ) ผลทดสอบโครงการคอนกรีตอัดแรง 185 หลุมที่ 13

1	8	9	10	11	12	13
Depth	Y_CUM. Dev(mm)	X_CUM. Dev(mm)	Y_Twist.D EV(mm)	X_Twisted DEV(mm)	Y.twistedC UM(mm)	X.twisted CUM(mm)
0.5	-35.2	1535.4	8.6	8.5	-156.0	85.4
1.0	-43.8	1486.0	-10.0	18.3	-164.6	76.9
1.5	-20.1	1444.4	0.2	-29.3	-154.6	58.6
2.0	-19.4	1353.3	2.1	9.0	-154.8	87.9
2.5	46.7	1300.8	50.4	-43.4	-156.9	78.9
3.0	-9.3	1215.2	7.2	-18.4	-207.3	122.2
3.5	-19.4	1233.7	-13.6	10.1	-214.5	140.6
4.0	-33.8	1244.5	-11.7	-14.9	-200.9	130.5
4.5	-46.7	1261.5	6.2	55.4	-189.2	145.4
5.0	-29.5	1205.9	-24.4	-0.8	-195.4	90.0
5.5	-5.0	1202.9	-7.4	-68.4	-171.0	90.8
6.0	-15.8	1126.5	3.5	-19.6	-163.6	159.2
6.5	-8.6	1171.2	-12.2	-47.3	-167.1	178.8
7.0	-58.6	1112.9	17.9	15.1	-154.9	226.1
7.5	-14.7	1078.6	16.4	-34.6	-172.7	211.0
8.0	-35.3	1040.7	-22.7	77.3	-189.2	245.6
8.5	-74.1	941.1	9.6	32.1	-166.4	168.2
9.0	-87.1	907.2	2.9	-73.9	-176.0	136.2
9.5	-82.8	830.8	2.1	1.7	-178.9	210.1
10.0	-64.1	816.9	-0.4	57.3	-181.0	208.4
10.5	-69.5	759.0	-23.9	-34.1	-180.7	151.0
11.0	-45.0	712.7	-15.6	-18.0	-156.8	185.1
11.5	2.4	691.9	0.0	51.0	-141.2	203.1
12.0	2.4	620.9	-14.2	-32.4	-141.2	152.1
12.5	-41.8	558.4	-10.0	24.2	-127.0	184.4
13.0	-57.6	448.8	-8.1	5.7	-117.0	160.3
13.5	-36.1	421.1	-1.1	3.4	-108.9	154.6
14.0	-27.4	410.9	-5.9	16.3	-107.8	151.2
14.5	-87.8	369.2	-27.0	-49.8	-101.9	134.9
15.0	-34.6	318.3	2.4	27.5	-74.8	184.7
15.5	-46.5	288.2	-34.3	-27.1	-77.2	157.2
16.0	-11.1	260.4	11.7	54.8	-42.9	184.3
16.5	12.6	193.3	4.1	13.7	-54.6	129.4
17.0	8.3	119.2	-30.3	11.8	-58.7	115.8
17.5	46.0	106.5	-28.4	104.0	-28.4	104.0

ตารางที่ ก-4 ผลทดสอบโครงการคอนกรีตเสริมเหล็ก 185 หลุมที่ 14

1	2	3	4	5	6	7
Depth	Reading Twisted	Reading Twisted	Reading AVG-Y	Reading AVG-X	Y_INCR.DEV (mm)	X_INCR.DEV (mm)
0.5	343.6	0.0	505.3	505.5	-29.1	32.3
1.0	107.1	123.5	507.0	507.8	-21.6	42.2
1.5	32.5	48.9	503.5	507.0	-36.6	38.8
2.0	25.0	41.4	506.8	505.8	-22.6	33.4
2.5	50.6	67.0	504.0	506.8	-34.5	37.7
3.0	94.2	110.6	506.2	504.4	-25.0	27.6
3.5	172.5	-171.1	505.7	505.3	-27.3	31.6
4.0	282.4	-61.2	507.2	502.4	-20.7	19.0
4.5	299.2	-44.4	504.5	505.0	-32.3	30.2
5.0	299.7	-43.9	505.0	505.5	-30.2	32.3
5.5	300.0	-43.6	506.0	505.0	-25.9	30.2
6.0	316.2	-27.4	508.0	506.8	-17.2	37.9
6.5	305.4	-38.2	507.8	506.0	-18.3	34.5
7.0	292.3	-51.3	506.8	505.8	-22.6	33.4
7.5	328.8	-14.8	508.0	504.4	-17.2	27.6
8.0	258.8	-84.8	505.8	507.3	-26.9	39.9
8.5	9.7	26.1	507.0	510.0	-21.6	51.7
9.0	10.1	26.5	506.5	507.0	-23.7	38.8
9.5	49.8	66.2	505.4	509.0	-28.4	47.4
10.0	64.1	80.5	508.6	508.4	-14.7	44.8
10.5	76.4	92.8	504.2	507.2	-33.6	39.7
11.0	111.5	127.9	509.0	507.8	-12.9	42.0
11.5	135.8	152.2	510.5	508.3	-6.5	44.2
12.0	122.1	138.5	508.8	509.5	-14.0	49.6
12.5	162.4	178.8	509.0	507.3	-12.9	40.0
13.0	219.3	-124.3	507.0	503.0	-21.6	21.6
13.5	217.3	-126.3	507.7	509.3	-18.7	48.9
14.0	226.4	-117.2	507.0	505.3	-21.6	31.3
14.5	322.1	-21.5	509.3	509.8	-11.9	50.6
15.0	335.4	-8.2	511.7	509.3	-1.4	48.9
15.5	309.8	-33.8	510.0	509.7	-8.6	50.3
16.0	330.7	-13.0	509.0	507.5	-12.9	40.9
16.5	331.2	-12.5	506.5	506.5	-23.7	36.6
17.0	331.8	-11.9	507.8	507.8	-18.3	42.0



ตารางที่ ก-4 (ต่อ) ผลทดสอบโครงการคอนกรีตอัดแรง 185 หลุมที่ 14

1	8	9	10	11	12	13
Depth	Y_CUM. DEV(mm)	X_CUM. DeV(mm)	Y Twisted. DEV(mm)	X Twisted. DEV(mm)	Y.twisted. CUM(mm)	X.twisted. CUM(mm)
0.5	-696.8	1255.8	-29.1	-11.0	-52.1	-174.4
1.0	-667.7	1223.5	11.6	-21.9	-23.0	-163.4
1.5	-646.1	1181.3	-5.7	-34.5	-34.6	-141.5
2.0	-609.5	1142.5	19.2	31.2	-28.9	-107.0
2.5	-586.9	1109.1	18.6	-37.7	-48.1	-138.2
3.0	-552.4	1071.3	19.4	-25.1	-66.7	-100.5
3.5	-527.4	1043.8	-3.9	3.9	-86.1	-75.4
4.0	-500.1	1012.2	1.7	18.9	-82.2	-79.2
4.5	-479.4	993.2	-29.9	24.6	-83.9	-98.1
5.0	-447.1	963.0	-30.1	-31.1	-54.0	-122.8
5.5	-416.9	930.7	-23.6	22.8	-24.0	-91.7
6.0	-391.0	900.5	10.8	-35.3	-0.4	-114.5
6.5	-373.8	862.6	-16.1	-25.8	-11.2	-79.1
7.0	-355.5	828.1	-11.1	-1.5	4.9	-53.3
7.5	-332.8	794.7	10.6	12.9	16.0	-51.8
8.0	-315.6	767.1	26.9	-2.6	5.4	-64.7
8.5	-288.6	727.2	-12.2	20.3	-21.6	-62.2
9.0	-267.1	675.5	-5.9	-38.8	-9.3	-82.4
9.5	-243.4	636.7	27.7	-46.2	-3.4	-43.6
10.0	-214.9	589.3	-5.3	-6.4	-31.1	2.6
10.5	-200.3	544.5	-5.5	34.5	-25.8	9.0
11.0	-166.7	504.8	7.5	-12.2	-20.4	-25.5
11.5	-153.7	462.8	-1.4	-38.2	-27.8	-13.3
12.0	-147.3	418.6	-13.6	-3.8	-26.4	24.9
12.5	-133.3	369.0	12.6	31.0	-12.8	28.7
13.0	-120.3	329.0	-4.4	-2.4	-25.4	-2.2
13.5	-98.8	307.5	-15.0	-48.8	-21.0	0.1
14.0	-80.1	258.6	12.8	31.0	-5.9	49.0
14.5	-58.5	227.4	10.3	32.1	-18.7	17.9
15.0	-46.7	176.7	0.4	-25.3	-29.0	-14.1
15.5	-45.3	127.9	6.1	45.3	-29.5	11.2
16.0	-36.6	77.6	-12.0	-40.9	-35.5	-34.2
16.5	-23.7	36.6	-23.5	6.8	-23.5	6.8
17.0	0.0	0.0	-13.8	34.3	0.0	0.0

ตารางที่ ก-5 ผลทดสอบโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง หลุมที่ S3

1	2	3	4	5	6	7
Depth	Reading Twisted	Reading Twisted	Reading AVG-Y	Reading AVG-X	Y_INCR.DEV (mm)	X_INCR.DEV (mm)
0.5	9.7	19.4	511.8	523.3	-1.1	116.9
1.0	341.3	9.0	530.0	529.3	77.6	145.1
1.5	344.2	6.1	528.5	525.5	71.1	127.3
2.0	285.5	64.8	510.8	490.5	-5.4	-34.7
2.5	284.2	66.1	511.8	493.0	-0.7	-23.1
3.0	282.3	68.0	512.4	493.0	1.7	-23.1
3.5	280.9	69.4	512.0	493.0	0.0	-23.1
4.0	277.9	72.4	515.3	490.0	14.4	-37.0
4.5	274.8	75.5	512.5	492.0	2.2	-27.8
5.0	271.6	78.7	510.6	488.4	-6.0	-44.4
5.5	269.8	80.5	511.0	489.0	-4.3	-41.7
6.0	270.6	79.7	510.3	494.0	-7.2	-18.5
6.5	270.4	79.9	509.7	494.2	-10.1	-17.7
7.0	269.4	80.9	511.0	493.0	-4.3	-23.1
7.5	267.9	82.4	511.4	492.4	-2.6	-25.9
8.0	265.1	85.2	512.8	493.8	3.2	-19.7
8.5	263.7	86.6	510.0	492.7	-8.6	-24.7
9.0	259.9	90.4	510.7	492.0	-5.7	-27.8
9.5	258.5	91.8	510.2	494.4	-7.8	-16.7
10.0	258.1	92.2	512.0	492.2	0.0	-26.9
10.5	258.7	91.6	509.3	492.3	-11.5	-26.2
11.0	258.6	91.7	513.8	494.8	7.5	-15.0
11.5	258.8	91.5	511.4	493.8	-2.6	-19.4
12.0	259.0	91.3	513.0	493.1	4.3	-22.6
12.5	259.5	90.9	512.3	492.5	1.4	-25.5
13.0	260.5	89.8	512.2	491.5	0.7	-30.1
13.5	261.8	88.5	509.2	491.0	-12.1	-32.4
14.0	263.4	86.9	513.2	491.6	5.2	-29.6
14.5	266.4	83.9	508.2	493.8	-16.4	-19.4
15.0	270.0	80.3	511.4	494.6	-2.6	-15.7
15.5	274.0	76.3	511.6	494.4	-1.7	-16.7
16.0	280.7	69.7	511.8	493.0	-1.1	-23.1
16.5	284.4	65.9	511.3	493.5	-3.2	-20.8
17.0	287.3	63.0	514.8	489.8	11.9	-38.2
17.5	291.5	58.8	509.6	493.0	-10.3	-23.1
18.0	297.6	52.7	511.3	490.0	-2.9	-37.0
18.5	303.7	46.6	510.0	492.0	-8.6	-27.8
19.0	310.8	39.5	509.6	491.4	-10.3	-30.6
19.5	322.5	27.9	510.5	494.3	-6.5	-17.4
20.0	325.7	24.6	511.6	490.2	-1.7	-36.1
20.5	320.8	29.5	511.6	492.7	-1.8	-24.5

ตารางที่ ก-5 (ต่อ) ผลทดสอบโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง หลุมที่ S3

1	8	9	10	11	12	13
Depth	Y_CUM. Dev(mm)	X_CUM. Dev(mm)	Y_Twisted. DEV(mm)	X_Twisted. DEV(mm)	Y.twisted. CUM(mm)	X.twisted. CUM(mm)
0.5	44.1	-598.3	-0.9	-9.0	38.7	-102.8
1.0	45.1	-715.2	-70.7	76.6	39.5	-93.7
1.5	-32.5	-860.2	69.9	-64.5	110.2	-170.3
2.0	-103.6	-987.5	2.2	25.6	40.3	-105.8
2.5	-98.2	-952.8	0.7	-19.7	38.1	-131.4
3.0	-97.5	-929.7	0.8	22.4	37.4	-111.7
3.5	-99.2	-906.5	0.0	12.4	36.6	-134.1
4.0	-99.2	-883.4	-14.3	35.8	36.6	-146.4
4.5	-113.6	-846.3	2.1	20.2	50.9	-182.3
5.0	-115.7	-818.6	6.0	-44.2	48.7	-202.5
5.5	-109.7	-774.1	-1.6	39.2	42.7	-158.3
6.0	-105.4	-732.4	3.1	14.2	44.4	-197.5
6.5	-98.2	-713.9	2.1	-7.8	41.3	-211.8
7.0	-88.1	-696.2	-3.0	-23.0	39.2	-204.0
7.5	-83.8	-673.0	-2.0	-19.6	42.2	-181.0
8.0	-81.2	-647.1	-3.0	-15.8	44.2	-161.4
8.5	-84.5	-627.4	-1.8	-15.6	47.2	-145.6
9.0	-75.8	-602.7	4.5	-12.2	48.9	-129.9
9.5	-70.1	-575.0	5.9	-10.6	44.4	-117.7
10.0	-62.3	-558.3	0.0	24.1	38.6	-107.2
10.5	-62.3	-531.4	9.9	-23.6	38.6	-131.3
11.0	-50.8	-505.2	-6.3	4.6	28.6	-107.6
11.5	-58.4	-490.2	2.4	18.8	34.9	-112.3
12.0	-55.8	-470.7	-4.2	21.6	32.5	-131.1
12.5	-60.1	-448.1	-1.4	-18.1	36.8	-152.7
13.0	-61.5	-422.6	-0.2	-5.6	38.1	-134.6
13.5	-62.3	-392.5	-10.6	3.7	38.3	-129.1
14.0	-50.2	-360.1	2.6	-26.2	49.0	-132.8
14.5	-55.4	-330.5	10.1	-15.1	46.4	-106.5
15.0	-39.0	-311.0	-0.4	-15.6	36.2	-91.5
15.5	-36.4	-295.3	-1.0	-4.7	36.7	-75.8
16.0	-34.7	-278.6	-0.9	12.0	37.7	-71.1
16.5	-33.6	-255.5	3.2	15.3	38.6	-83.1
17.0	-30.4	-234.7	11.6	3.0	35.4	-98.5
17.5	-42.2	-196.5	6.7	-6.5	23.8	-101.4
18.0	-31.9	-173.3	2.1	-26.3	17.1	-94.9
18.5	-29.0	-136.3	7.4	-27.6	15.0	-68.6
19.0	-20.4	-108.5	2.6	9.4	7.6	-41.0
19.5	-10.0	-77.9	5.9	1.1	5.0	-50.5
20.0	-3.6	-60.6	-1.5	-27.3	-0.9	-51.6
20.5	-1.8	-24.5	0.6	-24.3	0.6	-24.3

ตารางที่ ก-6 ผลทดสอบโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง หลุมที่ S5

1	2	3	4	5	6	7
Depth	Reading Twisted	Reading Twisted	Reading AVG-Y	Reading AVG-X	Y INCR. DEV(mm)	X INCR. DEV(mm)
0.5	96.0	123.4	508.8	492.4	-13.8	-24.1
1.0	94.4	121.8	509.4	493.4	-11.2	-19.8
1.5	93.3	120.7	512.8	491.0	3.4	-30.2
2.0	93.2	120.6	512.7	490.7	2.9	-31.6
2.5	90.6	118.0	515.0	490.3	12.9	-33.0
3.0	87.8	115.2	513.6	491.4	6.8	-28.3
3.5	85.0	112.4	514.4	491.4	10.3	-28.4
4.0	83.3	110.7	511.5	493.8	-2.2	-18.3
4.5	82.7	110.1	513.0	492.0	4.3	-25.9
5.0	81.7	109.1	513.0	490.5	4.3	-32.3
5.5	80.5	107.9	513.3	491.2	5.7	-29.5
6.0	81.0	108.4	511.8	493.6	-0.9	-19.0
6.5	81.4	108.8	511.6	494.0	-1.7	-17.2
7.0	81.6	109.0	513.8	489.2	7.8	-37.9
7.5	82.3	109.7	513.5	493.3	6.5	-20.1
8.0	82.8	110.2	514.6	490.8	11.2	-31.0
8.5	83.8	111.2	513.8	491.2	7.8	-29.3
9.0	85.8	113.2	514.8	493.2	12.1	-20.7
9.5	87.0	114.4	513.2	493.2	5.2	-20.7
10.0	88.1	115.5	513.8	492.8	7.8	-22.4
10.5	89.6	117.0	511.9	492.7	-0.6	-22.8
11.0	315.8	-16.9	515.0	492.5	12.9	-23.7
11.5	311.5	-21.1	512.2	493.6	0.9	-19.0
12.0	305.2	-27.4	512.2	491.8	0.9	-26.7
12.5	303.0	-29.6	512.8	491.4	3.4	-28.4
13.0	303.4	-29.3	515.5	494.3	15.1	-16.2
13.5	305.2	-27.4	510.4	493.0	-6.9	-21.6
14.0	308.7	-23.9	513.3	491.8	5.7	-26.6
14.5	313.8	-18.8	512.5	490.3	2.2	-33.0
15.0	319.3	-13.3	512.4	491.4	1.7	-28.4
15.5	327.6	-5.0	512.7	492.7	2.9	-23.0
16.0	335.1	2.5	515.8	490.5	16.5	-32.3
16.5	341.7	9.1	512.4	490.2	1.7	-33.6
17.0	347.5	14.9	509.8	490.6	-9.5	-31.9
17.5	352.7	20.1	513.0	492.0	4.3	-25.9
18.0	356.4	23.8	513.0	493.8	4.3	-18.1
18.5	357.4	24.8	513.4	495.0	6.0	-12.9
19.0	358.9	26.3	511.0	491.0	-4.3	-30.2
19.5	358.5	25.9	514.8	490.8	12.1	-31.0
20.0	355.8	23.2	512.9	489.0	3.7	-38.8
20.5	332.6	0.0	513.0	493.0	4.3	-21.6

ตารางที่ ก-6 (ต่อ) ผลทดสอบโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง หลุมที่ S5

1	8	9	10	11	12	13
Depth	Y_CUM. Dev(mm)	X_CUM. Dev(mm)	Y_Twisted. DEV(mm)	X_Twisted. DEV(mm)	Y.twisted. CUM(mm)	X.twisted. CUM(mm)
0.5	152.2	-1065.6	9.2	16.1	147.1	173.5
1.0	166.0	-1041.5	8.6	15.1	160.9	157.4
1.5	177.2	-1021.7	0.9	-8.1	172.1	142.2
2.0	173.8	-991.5	1.1	-11.9	168.6	150.3
2.5	170.9	-959.9	2.2	-5.7	165.8	162.2
3.0	158.0	-926.8	-3.6	15.1	152.8	167.9
3.5	151.2	-898.5	8.2	-22.5	146.1	152.8
4.0	140.9	-870.1	1.6	13.5	135.7	175.4
4.5	143.0	-851.7	-4.3	25.6	137.9	161.9
5.0	138.7	-825.9	-2.8	20.8	133.6	136.3
5.5	134.4	-793.5	2.8	-14.2	129.3	115.5
6.0	128.7	-764.1	0.0	-0.5	123.5	129.7
6.5	129.5	-745.1	0.6	6.3	124.4	130.1
7.0	131.2	-727.9	-4.5	21.9	126.1	123.8
7.5	123.5	-690.0	-6.3	19.5	118.3	101.9
8.0	117.0	-669.8	-10.8	29.8	111.9	82.5
8.5	105.8	-638.8	-2.6	10.0	100.7	52.7
9.0	98.1	-609.5	11.9	-20.5	92.9	42.7
9.5	86.0	-588.8	1.2	-4.7	80.8	63.2
10.0	80.8	-568.1	-5.8	16.9	75.7	67.9
10.5	73.1	-545.7	0.4	15.8	67.9	51.0
11.0	73.7	-522.9	-5.4	9.9	68.5	35.2
11.5	60.7	-499.2	-0.6	12.5	55.6	25.4
12.0	59.9	-480.2	-0.5	16.3	54.7	12.9
12.5	59.0	-453.5	-0.9	7.5	53.9	-3.5
13.0	55.6	-425.1	-8.5	9.1	50.4	-10.9
13.5	40.5	-408.9	4.3	13.5	35.3	-20.0
14.0	47.4	-387.4	1.8	-8.4	42.2	-33.5
14.5	41.6	-360.8	2.2	-33.0	36.5	-25.1
15.0	39.5	-327.7	1.3	-21.9	34.3	8.0
15.5	37.7	-299.3	0.9	-6.9	32.6	29.8
16.0	34.9	-276.3	-13.6	26.5	29.7	36.7
16.5	18.3	-244.0	-1.6	31.4	13.2	10.2
17.0	16.6	-210.3	6.8	22.9	11.5	-21.2
17.5	26.1	-178.4	1.4	-8.6	21.0	-44.2
18.0	21.8	-152.6	1.0	-4.3	16.6	-35.5
18.5	17.5	-134.5	5.7	-12.3	12.3	-31.3
19.0	11.5	-121.6	-1.8	-12.8	6.3	-18.9
19.5	15.8	-91.4	8.3	-21.5	10.6	-6.2
20.0	3.7	-60.3	-1.5	15.3	-1.5	15.3
20.5	0.0	-21.6	4.3	-21.6	0.0	0.0





ตารางที่ ก-9 ผลสำรวจบริษัท STS โครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วงหลุมที่ S3

depth(m)	A+	A-	INCR.Dev (mm)	Cum.Dev	B+	B-	INCR.Dev (mm)	Cum.Dev (mm)
0.5	-269	305	18	726	248	-253	-2.5	-211
1	-269	305	18	708	248	-261	-6.5	-208.5
1.5	-104	139	17.5	690	85	-94	-4.5	-202
2	-266	298	16	672.5	25	-33	-4	-197.5
2.5	-406	442	18	656.5	140	-155	-7.5	-193.5
3	-431	466	17.5	638.5	186	-194	-4	-186
3.5	-305	345	20	621	196	-205	-4.5	-182
4	-316	351	17.5	601	185	-194	-4.5	-177.5
4.5	-617	654	18.5	583.5	95	-103	-4	-173
5	-705	739	17	565	149	-158	-4.5	-169
5.5	-359	402	21.5	548	41	-51	-5	-164.5
6	-164	196	16	526.5	-134	126	-4	-159.5
6.5	-150	180	15	510.5	-97	85	-6	-155.5
7	-210	254	22	495.5	-81	74	-3.5	-149.5
7.5	-255	291	18	473.5	86	-101	-7.5	-146
8	-231	271	20	455.5	173	-176	-1.5	-138.5
8.5	-39	59	10	435.5	-117	108	-4.5	-137
9	-75	123	24	425.5	-7	-2	-4.5	-132.5
9.5	-131	168	18.5	401.5	20	-26	-3	-128
10	-81	117	18	383	122	-137	-7.5	-125
10.5	7	26	16.5	365	168	-179	-5.5	-117.5
11	-36	74	19	348.5	187	-199	-6	-112
11.5	-270	297	13.5	329.5	82	-94	-6	-106
12	-215	249	17	316	-21	15	-3	-100
12.5	-114	173	29.5	299	21	-33	-6	-97
13	-136	157	10.5	269.5	-5	-6	-5.5	-91
13.5	-131	167	18	259	-24	12	-6	-85.5
14	-133	174	20.5	241	-19	6	-6.5	-79.5
14.5	-136	172	18	220.5	3	-16	-6.5	-73
15	-78	116	19	202.5	69	-78	-4.5	-66.5
15.5	-84	118	17	183.5	5	-13	-4	-62
16	-76	111	17.5	166.5	-69	59	-5	-58
16.5	-73	108	17.5	149	-111	100	-5.5	-53
17	-96	136	20	131.5	-130	107	-11.5	-47.5
17.5	-120	162	21	111.5	-142	130	-6	-36
18	-167	200	16.5	90.5	-113	97	-8	-30
18.5	-189	226	18.5	74	-114	103	-5.5	-22
19	-216	258	21	55.5	-101	91	-5	-16.5
19.5	-235	274	19.5	34.5	-102	92	-5	-11.5
20	-238	268	15	15	-115	102	-6.5	-6.5
20.5	-169	207	0	0	-133	123	0	0





ภาคผนวก ข

โปรแกรมมาตรฐานวัดการเคลื่อนตัวแนวราบในที่

### โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

```

1:   #include <18F8722.h>
2:   #device ADC = 10
3:   #include <stdlib.h>
4:   #include <stdio.h>
5:   #fuses HS,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP // Configuration word
6:   #use delay(clock=500000,internal)
7:   #use rs232(baud=9600, xmit=PIN_C6, rcv=PIN_C7,stream=UART1)
8:   #use rs232(baud=9600, xmit=PIN_G1, rcv=PIN_G2,stream=UART2)
9:   #use I2C (master,sda=pin_c4,scl=pin_c3)
10:  #include "input.c"
11:  #include <ds1307.c>
12:  #define myPort uart2
13:  #define HMC6352_I2C_WRITE_ADDRESS 0x42
14:  #define HMC6352_I2C_READ_ADDRESS 0x43
15:  int16 i adc[15];
16:  float direction;
17:  unsigned char d=0x0D;
18:      BYTE sec;
19:      BYTE min;
20:      BYTE hrs;
21:      BYTE day;
22:      BYTE month;
23:      BYTE yr;
24:      BYTE dow;
25:  float HMC6352_read_heading(void)
26:  {
27:      byte heading[2];
28:      i2c_start();
29:      i2c_write(0x42);

```

**โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)**

```
30:         i2c_write(0x41);
31:         i2c_stop();
32:         i2c_start();
33:         if(i2c_write(0x43))
34:     {
35:     printf("No acknowledge from module\n");
36:         i2c_stop();
37:         }else
38:     {
39:         delay_ms(10);
40:         heading[0] = i2c_read(1);
41:         heading[1]= i2c_read(0);
42:         i2c_stop();
43:         return((heading[0]*256+ heading[1])*0.1);
44:     }
45: }
46: void echo()
47: {
48:     unsigned char k;
49:     do{
50:         k = fgetc(myPort);
51:     }while(k!='>') ;
52: }
53: void main()
54: {
55:     ds1307_init();
56:     ds1307_set_date_time(25,8,11,2,9,49,55);
57:     SETUP_ADC(ADC_CLOCK_DIV_8);
58:     SETUP_ADC_PORTS(All_analog|VSS_VDD);
```

### โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

```

59:   SETUP_ADC_PORTS(All_analog|VSS_VREF);
60:   fprintf(myPort,"%c",d);
61:   echo();
62:   fprintf(myPort,"ECS\r");
63:   echo();
64:   fprintf(myPort,"IPA\r");
65:   echo();
66:   while(true)
67:   {
68:     for(i=0;i<15;i++){
69:       set_adc_channel(i);
70:       delay_us(20);
71:       adc[i] = read_adc();
72:     }
73:     direction = HMC6352_read_heading() ;
74:     i++;
75:     ds1307_get_date(day,month,yr,dow);
76:     ds1307_get_time(hrs,min,sec);
77:     fprintf(myPort,"OPW em_adc.txt\r");
78:     echo();
79:     fprintf(myPort,"WRF %ld\r",70);
80:     fprintf(myport,"%3.1f %04ld %04ld %04ld %04ld %04ld %04ld %04ld
81:
82:     %04ld\r\n",direction,adc[10],adc[9],adc[8],adc[5],adc[6],adc[7],adc[0],adc[1],a
83:     dc[2]);
84:     echo();
85:     fprintf(myPort,"CLF em_adc.txt\r");
86:     echo();
87:     delay_ms(2000);

```

### โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

```

86:   }
87:   }
88:   #define RTC_SDA PIN_C4
89:   #define RTC_SCL PIN_C3
90:   #use i2c(master, sda=RTC_SDA, scl=RTC_SCL)
91:   BYTE bin2bcd(BYTE binary_value);
92:   BYTE bcd2bin(BYTE bcd_value);
93:   void ds1307_init(void)
94:   {
95:       BYTE seconds = 0;
96:       i2c_start();
97:       i2c_write(0xD0); // WR to RTC
98:       i2c_write(0x00); // REG 0
99:       i2c_start();
100:      i2c_write(0xD1); // RD from RTC
101:      seconds = bcd2bin(i2c_read(0)); // Read current "seconds" in DS1307
102:      i2c_stop();
103:      seconds &= 0x7F;
104:      delay_us(3);
105:      i2c_start();
106:      i2c_write(0xD0); // WR to RTC
107:      i2c_write(0x00); // REG 0
108:      i2c_write(bin2bcd(seconds)); // Start oscillator with current "seconds
value
109:      i2c_start();
110:      i2c_write(0xD0); // WR to RTC
111:      i2c_write(0x07); // Control Register
112:      i2c_write(0x80); // Disable squarewave output pin
113:      i2c_stop();

```

### โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

```

    }

114: void ds1307_set_date_time(BYTE day, BYTE mth, BYTE year, BYTE dow, BYTE
    hr, BYTE min, BYTE sec)
115: {
116:   sec &= 0x7F;
117:   hr &= 0x3F;
118:   i2c_start();
119:   i2c_write(0xD0);      // I2C write address
120:   i2c_write(0x00);      // Start at REG 0 - Seconds
121:   i2c_write(bin2bcd(sec)); // REG 0
122:   i2c_write(bin2bcd(min)); // REG 1
123:   i2c_write(bin2bcd(hr)); // REG 2
124:   i2c_write(bin2bcd(dow)); // REG 3
125:   i2c_write(bin2bcd(day)); // REG 4
126:   i2c_write(bin2bcd(mth)); // REG 5
127:   i2c_write(bin2bcd(year)); // REG 6
128:   i2c_write(0x80);      // REG 7 - Disable squarewave output pin
129:   i2c_stop();
130: }
131: void ds1307_get_date(BYTE &day, BYTE &mth, BYTE &year, BYTE &dow)
132: {
133:   i2c_start();
134:   i2c_write(0xD0);
135:   i2c_write(0x03);      // Start at REG 3 - Day of week
136:   i2c_start();
137:   i2c_write(0xD1);
138:   dow = bcd2bin(i2c_read() & 0x7f); // REG 3
139:   day = bcd2bin(i2c_read() & 0x3f); // REG 4
140:   mth = bcd2bin(i2c_read() & 0x1f); // REG 5

```

**โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)**

```
141: year = bcd2bin(i2c_read(0)); // REG 6
142: i2c_stop();
143: }
144: void ds1307_get_time(BYTE &hr, BYTE &min, BYTE &sec)
145: {
146: i2c_start();
147: i2c_write(0xD0);
148: i2c_write(0x00); // Start at REG 0 - Seconds
149: i2c_start();
150: i2c_write(0xD1);
151: sec = bcd2bin(i2c_read() & 0x7f);
152: min = bcd2bin(i2c_read() & 0x7f);
153: hr = bcd2bin(i2c_read(0) & 0x3f);
154: i2c_stop();
155: }
156: BYTE bin2bcd(BYTE binary_value)
157: {
158: BYTE temp;
159: BYTE retval;
160: temp = binary_value;
161: retval = 0;
162: while(TRUE)
163: {
164: if(temp >= 10)
165: {
166: temp -= 10;
167: retval += 0x10;
168: }
169: else // Get the ones digit by adding the remainder.
```



**โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)**

```
170:  {
171:  retval += temp;
172:  break;
173:  }
174:  }
175:  return(retval);
176:  }
177:  BYTE bcd2bin(BYTE bcd_value)
178:  {
179:  BYTE temp;
180:  temp = bcd_value;
181:  temp >>= 1;
182:  temp &= 0x78;
183:  return(temp + (temp >> 2) + (bcd_value & 0x0f));
184: }
```

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชิตตฤพงษ์ ชัยสุขนิพัทธ์ เกิดเมื่อวันที่ 21 ธันวาคม พ.ศ. 2527 จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรีจากคณะวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปี พ.ศ. 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมโยธา ในปีเดียวกันจนจบหลักสูตรในปีการศึกษา 2554 ปัจจุบันรับราชการที่กรมการbinพลเรือน ตำแหน่งวิศวกรโยธา