



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า	วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขา	ภาควิชา
เรื่อง ระบบจัดเก็บข้อมูลและส่งสัญญาณผ่านเครือข่ายไร้สายสำหรับเครื่องมือตรวจวัดข้อมูลทางธรณีเทคนิคบริเวณ Area 4.1 ในเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จังหวัดลำปาง	
Data Logger and Data Transmission System over Wireless Networks for Measuring Geotechnical Data in Area 4.1 of Mae Moh Mine, Electricity Generating Authority of Thailand, Lampang	
นามผู้วิจัย	นายธันวุฒิ วิวัฒน์ถาวรวงศ์
ได้พิจารณาเห็นชอบโดย	
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	(รองศาสตราจารย์พีระยศ แสนโกชณ์, D.Sc.)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	(อาจารย์จันทน์ รุ่งเรืองพิทยากุล, D.Sc.)
หัวหน้าภาควิชา	(รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ระบบจัดเก็บข้อมูลและส่งสัญญาณผ่านเครือข่ายไร้สายสำหรับเครื่องมือตรวจวัดข้อมูลทางธรณี
เทคนิคบริเวณ Area 4.1 ในเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จังหวัดลำปาง

Data Logger and Data Transmission System over Wireless Networks for Measuring Geotechnical
Data in Area 4.1 of Mae Moh Mine, Electricity Generating Authority of Thailand, Lampang

โดย

นายธัญวลี วิวัฒน์ถาวรวงศ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2555

ชั้นวุฒิ วิวัฒน์ถาวรวงศ์ 2555: ระบบจัดเก็บข้อมูลและส่งสัญญาณผ่านเครือข่ายไร้สาย สำหรับเครื่องมือตรวจวัดข้อมูลทางธรณีเทคนิคบริเวณ Area 4.1 ในเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จังหวัดลำปาง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์พีระยศ แสนโกชณ์, D.Sc. 99 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลและส่งสัญญาณผ่านเครือข่ายไร้สายเพื่อเฝ้าติดตามการเคลื่อนตัวของผนังบ่อเหมือง จากการทำเหมืองเปิดในพื้นที่บริเวณ Area 4.1 ที่เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้เครื่องมือต้นแบบทางธรณีเทคนิค ที่ทำการพัฒนาโดยภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ซึ่งก็คือ อุปกรณ์สำหรับวัดการยืดตัวด้วยสาย (wire extensometer) และอุปกรณ์สำหรับวัดหลุมเจาะสำรวจ (borehole joint meter) โดยการพัฒนาเครื่องมือต้นแบบทางธรณีเทคนิคเพื่อใช้ตรวจวัดพฤติกรรมทางด้านเสถียรภาพของเชิงลาดนั้นจะต้องทนต่อสภาพแวดล้อมในสนาม โดยวิทยานิพนธ์นี้พัฒนาชุดจัดเก็บข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย มาจัดเก็บยังคอมพิวเตอร์ส่วนกลางที่อยู่ภายในที่กองวิศวกรรมธรณีเหมืองแม่เมาะเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลและแจ้งเตือนเหตุการณ์ที่ไม่ปกติผ่าน E-mail และ SMS ไปยังผู้ดูแลระบบต่อไป

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Thunnawut Viwatthavonwong 2012: Data Logger and Data Transmission System over Wireless Networks for Measuring Geotechnical Data in Area 4.1 of Mae Moh Mine, Electricity Generating Authority of Thailand, Lampang. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Peerayot Sanposh, D.Sc.
99 pages.

The aim of this thesis is to develop an equipment that is used to monitor the movement of the mine's wall at Mae Moe free-zone-mine, Area 4.1, in Lumpang Province by using prototypes of geotechnical instruments developed by the Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University. The instrument are wire extersometer and borehole jointmeter. The prototype equipments that are used to analyze the slope stability of the wall by monitoring the bending angle. The instruments must be able to withstand the field environment and must be reliable. The scope of this thesis is to develop a wirelss data logger system that can send data back to the Department of Soil Engineering Mae Moh Mine for analyzing and unusual event warning to the system administrator via E-mail and SMS message.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ซึ่งไม่อาจจะนำมากล่าวได้ทั้งหมด ซึ่งผู้มีพระคุณท่านแรกที่ขอกราบพระคุณคือ รศ.ดร.พีระยศ แสนโกชณ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยและนำไปแก้ปัญหาที่ประสบขณะทำการวิจัย พร้อมทั้งให้ความสนับสนุนช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.จันทน์ รุ่งเรืองพิทยากุล และ ผศ.ดร.บารเมศ วรรณะภูติ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยเพื่อให้งานวิจัยสามารถดำเนินการไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โรงไฟฟ้าแม่เมาะที่สนับสนุนทุนวิจัย และอำนวยความสะดวกในการทำงาน

ขอขอบคุณพี่นคร ตริสิงหวงศ์ ที่ช่วยในการออกแบบและพัฒนาวงจรไฟฟ้าของ Data Logger และช่วยในการแก้ปัญหาต่างๆ ทั้งทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ และด้าน Software

ขอขอบคุณพี่สรศักดิ์ เชี่ยวศิริกุล, พี่วิรัช ธีราวุฒิ, พี่ยุตติกร สิ้นสุขศรีวิไล, ปริญา ศรีธานี ที่ช่วยทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการควบคุมทุกคนที่ช่วยในการแก้ปัญหาในระหว่างการทำวิจัยหลายครั้ง

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ ขณะที่กำลังศึกษาในระดับปริญญาโทจนประสบผลสำเร็จในการเล่าเรียน

ชนวุฒิ วิวัฒน์ถาวรวงศ์

เมษายน 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	11
อุปกรณ์	11
วิธีการ	12
ผลและวิจารณ์	70
สรุปและข้อเสนอแนะ	79
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	80
ภาคผนวก	83
ภาคผนวก ก ปัญหา Exception for C# Programming สำหรับโปรแกรม KU Data Logger และแนวทางแก้ไข	84
ภาคผนวก ข ปัญหาของ Strain Gage ในวงจร Half Bridge Network ที่ใช้สำหรับวัดค่าความเครียดบนแท่งเหล็ก Borehole Joint Meter	89
ภาคผนวก ค คู่มือการใช้งานโปรแกรม KU Data Logger	92
ภาคผนวก ง ตาราง IP Address ที่ใช้ติดตั้งในอุปกรณ์ต่างๆ	97
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	99

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	Wire Extensometer ที่ผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์	8
2	Electric Joint/Crack Meter ที่ผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์	10
3	ขนาดและคุณสมบัติของชุดเครื่องมือ Wire Extensometer	16
4	ขนาดและคุณสมบัติของชุดเครื่องมือ Borehole Joint Meter	34
5	เปรียบเทียบคุณสมบัติของเหล็กตัวอย่างที่นำมาทดสอบและคุณสมบัติของ Stainless Steel (Type 304)	47
6	ขีดจำกัดของ Borehole Joint Meter ชนิด Cantilever End และ Restrained End	47
ตารางผนวกที่		
ง1	รายละเอียดการตั้งค่า IP Address อุปกรณ์ต่างๆ	98

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	อุปกรณ์ Slope Extensometer หรือ Wire Extensometer	7
2	ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย	14
3	ส่วนประกอบของ Wire Extensometer	18
4	ภาพ 3 มิติ และภาพด้านบน, ด้านหน้า, และด้านขวา ของ Wire Extensometer	19
5	ภาพชุดเครื่องมือ Wire Extensometer ที่ประกอบแล้ว	20
6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของเชิงลาดและความยาวของลวด	22
7	จอแสดงผลของ Wire Extensometer มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร	29
8	การสอบเทียบเครื่องมือ Wire Extensometer ในห้องปฏิบัติการ	31
9	แสดงขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องมือ Wire Extensometer	32
10	ส่วนประกอบของ Borehole Joint Meter	36
11	ส่วนประกอบของชุดเครื่องมือ Borehole Joint Meter แบบอิสระและไม่เกิดโมเมนต์ที่ปลายด้านบน	37
12	ส่วนประกอบของชุดเครื่องมือ Borehole Joint Meter แบบเกิดโมเมนต์ที่ปลายด้านบน (Restrained End)	38
13	ภาพ 3 มิติ และภาพด้านบน, ด้านหน้า, และด้านขวา ของชุดเครื่องมือ Borehole Joint Meter แบบอิสระและไม่เกิดโมเมนต์ที่ปลายด้านบน (Cantilever End) ภาพ	39
14	3 มิติ และภาพด้านบน, ด้านหน้า, และด้านขวา ของชุดเครื่องมือ Borehole Joint Meter แบบเกิดโมเมนต์ที่ปลายด้านบน (Restrained End)	40
15	ภาพตัดตามแนวตั้ง 3 มิติ Borehole Joint Meter	41
16	Uniaxial Bonded Foil Resistance Stain Gage	42
17	การเคลื่อนตัวของ Steel Rebar ในกรณีที่ปลายด้านหนึ่งไม่เคลื่อนตัว (Restrained Condition) และปลายอีกด้านหนึ่งมีลักษณะการเคลื่อนตัวแบบ Cantilever	43
18	แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของ Steel Rebar ในกรณีที่ปลายทั้งสองด้านถูกยึดแบบ Restrained Condition	45
19	ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแท่งเหล็กตัวอย่าง Stainless Steel Bar	48
20	ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแท่งเหล็กตัวอย่าง Stainless Steel Bar	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	ชุดอุปกรณ์สอบเทียบ Borehole Joint Meter	51
22	ทิศทางแรงที่กระทำในระหว่างการสอบเทียบ และตำแหน่งติดตั้ง Strain Gage	52
23	แผนผังการทำงานของระบบจัดเก็บข้อมูลและประมวลผล	53
24	แผนผังการทำงานของระบบจัดเก็บข้อมูลทำการติดตั้งในพื้นที่ที่ต้องการ ตรวจสอบ	54
25	แผนผังการทำงานของ คอมพิวเตอร์ ที่ทำการรับข้อมูลอยู่ที่กองวิศวกรรมธรณี	55
26	อุปกรณ์ Data Logger ที่ได้พัฒนาขึ้น	56
27	IC รุ่น MSP430F47197 จากผู้ผลิต Texas Instruments	57
28	แผงวงจรต้นแบบของอุปกรณ์ Data Logger	58
29	แสดงการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจวัด และไฟเลี้ยงของ Data Logger	59
30	และตำแหน่งโดยประมาณของเสาสัญญาณเครือข่ายไร้สาย	60
31	ตำแหน่งโดยประมาณของสถานที่ติดตั้งเสารับส่งสัญญาณเครือข่ายไร้สาย	61
32	Ubiquiti NanoStation M5 Outdoor Wireless	62
33	EnGenius ENH-200	62
34	ชุด Solar Cell System ที่ก่อนการทำการติดตั้ง	64
35	แผนผังการทำงานของโปรแกรมจัดเก็บและประมวลผลข้อมูล	66
36	แสดงหน้าต่างแสดงผลข้อมูลที่ได้จาก Sensor หลังจากการปรับแก้ค่าแล้วของ โปรแกรม Data Logger ที่ได้พัฒนาขึ้น	67
37	ส่วนตั้งค่า IP Address ของ Sensor ในโปรแกรม Data Logger ที่ได้พัฒนาขึ้น	67
38	หน้าต่างการตั้งค่าการแจ้งเตือนของโปรแกรม Data Logger ที่ได้พัฒนาขึ้น	68
39	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวของลวดและค่าที่อ่านจากเครื่องนับรอบ การหมุน	70
40	ความสัมพันธ์ระหว่าง Read Out Unit และ ระยะการเคลื่อนตัวของลวด	71
41	ผลเปรียบเทียบการวัดค่าความเครียดของแท่งเหล็ก J1 (Kyowa) กับทฤษฎี Cantilever End	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
42	ผลเปรียบเทียบการวัดค่าความเครียดของแท่งเหล็ก J2 (Kyowa) กับทฤษฎี Cantilever End	73
43	ผลสอบเทียบของอุปกรณ์ Analog to Digital Converter กับระยะการเคลื่อนตัวของปลาย Borehole Joint Meter J1 ที่มุม 0 – 180 องศา	74
44	ผลสอบเทียบของอุปกรณ์ Analog to Digital Converter กับระยะการเคลื่อนตัวของปลาย Borehole Joint Meter J2 ที่มุม 0 – 180 องศา	75
45	ผลการทดสอบ Ping คอมพิวเตอร์ ไปยังตัว Data Logger	76
46	หน้าต่างการแสดงผลค่าที่ได้รับจาก Data Logger หลังจากรับปรับแก้ค่า	77
47	หน้าต่างการแสดงผลค่าที่ได้รับจากข้อมูล Data Logger	77
48	ผลการทดสอบส่ง Email ไปยัง Email ที่กำหนดไว้	78
49	ผลการตรวจสอบ Email ที่ได้รับจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเอง	78
ภาพผนวกที่		
ก1	หน้าต่างการแสดงผล Exception from HRESULT:0x800401A8	86
ก2	หน้าต่างการแสดงผล The operation is not allowed on non-connected sockets	88
ข1	แสดงการต่อ Strain gage แบบ Half bridge ที่ติดตั้งบนผิว Borehole Joint Meter	90
ข2	แสดงการต่อ Strain gage แบบ Half bridge และปัญหาของการเดินสายไฟที่มี	91
ค1	แสดงขั้นตอนการเริ่มใช้งาน โปรแกรม	93
ค2	แสดงขั้นตอนการเข้าถึงการตั้งค่าของ Sensor	93
ค3	แสดงขั้นตอนการตั้งค่าของ Sensor	94
ค4	แสดงขั้นตอนการเข้าถึงการตั้งค่าของระบบแจ้งเตือน	94
ค5	แสดงขั้นตอนการตั้งค่าของระบบแจ้งเตือน	95
ค6	แสดงขั้นตอนการเข้าถึงหน้าจอ Monitor	95
ค7	แสดงขั้นตอนการเข้าถึงการบันทึกค่าของระบบ	96
ค8	แสดงขั้นตอนการอ่านค่าทันที	96

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

c	=	ระยะจาก Neutral Axis ถึงผิว Steel Rebar หรือเท่ากับรัศมี (r) ของ Steel Rebar
E	=	Modulus of Elasticity ของ Steel Rebar และมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียด ($E = \frac{\sigma}{\epsilon}$)
GF	=	ค่า Gage Factor
I	=	Moment of Inertia ของ Steel Rebar ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pi r^4 / 4$
L	=	ความยาวของ Steel Rebar
M	=	โมเมนต์ใน Steel Rebar
M_{max}	=	ค่าโมเมนต์คัตสูงสุด ณ ตำแหน่งปลายที่ไม่เคลื่อนตัว
$M_{A(max)}$	=	ค่าโมเมนต์คัตสูงสุดที่จุด A
P	=	แรงที่กระทำที่ปลาย Steel Rebar ในแนวตั้งฉากกับแกน
R	=	ค่าความต้านทานของ Electrical Resistance Strain Gage
ΔR	=	ค่าความต้านทานของ Electrical Resistance Strain Gage ที่เปลี่ยนแปลง
S	=	Section Modulus = I/c
ϵ	=	ความเครียดที่ผิวของ Steel Bar
ϵ_{max}	=	ความเครียดสูงสุดที่ผิวของ Steel Rebar ณ ตำแหน่งปลายที่ไม่เคลื่อนตัว
σ_{max}	=	ค่า Flexural Stress สูงสุด

ระบบจัดเก็บข้อมูลและส่งสัญญาณผ่านเครือข่ายไร้สายสำหรับเครื่องมือตรวจวัดข้อมูลทางธรณีเทคนิคบริเวณ Area 4.1 ในเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
จังหวัดลำปาง

**Data Logger and Data Transmission System over Wireless Networks for
Measuring Geotechnical Data in Area 4.1 of Mae Moh Mine, Electricity
Generating Authority of Thailand, Lampang**

คำนำ

เหมืองแม่เมาะเป็นเหมืองถ่านหินลิกไนต์ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทย ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยที่เหมืองแม่เมาะ เป็นหน่วยงานหนึ่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ที่มีหน้าที่และความรับผิดชอบในการผลิตถ่านหินลิกไนต์ เพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับโรงไฟฟ้าแม่เมาะ สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งบริเวณที่ทำการขุดเอาหินลิกไนต์แห่งใหม่จะอยู่ด้านล่างของ area 4.1 โดยที่ area 4.1 จะเป็นบริเวณที่มีความสำคัญเนื่องจากถ้าบริเวณนี้เกิดการเคลื่อนตัวของหน้าดินและพังทลายลงมา จะทำให้ไม่สามารถขุดถ่านหินลิกไนต์ที่อยู่ด้านล่างบริเวณ area 4.1 ได้ โดยในบริเวณ area 4.1 ได้มีการศึกษาการเคลื่อนที่เชิงธรณีวิทยาเนื่องมาจากการทำเหมืองแบบเปิด โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การวัดการเคลื่อนตัวของเชิงลาดแบบ translational slide เป็นการเคลื่อนตัวแบบเป็นการเลื่อนไถลลงมาตามระนาบการเคลื่อนที่มีลักษณะค่อนข้างตรง โดยใช้เครื่องมือชื่อว่า wire extensometer และการวัดการเคลื่อนตัวของเชิงลาดแบบ rotational slide เป็นการเคลื่อนตัวแบบเลื่อนไถลของวัตถุลงมาตามระนาบของการเคลื่อนที่ที่มีลักษณะโค้งครึ่งวงกลมคล้ายซ้อน ทำให้มีการหมุนตัวของวัตถุขณะเคลื่อนที่ซึ่งการเคลื่อนที่จะเป็นไปอย่างช้าๆ โดยใช้เครื่องมือชื่อว่า borehole joint meter โดยทั่วไปอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลคือ data logger เพื่อเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์และประมวลผล โดยที่เหมืองแม่เมาะมีอุปสรรคในการเก็บข้อมูลในพื้นที่ปฏิบัติงาน ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้แก้ปัญหาโดยพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลและส่งสัญญาณผ่านเครือข่ายไร้สายเข้ามาช่วยอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลและแจ้งเตือนการถล่มกลับไปที่กองวิศวกรรมธรณี โดยไม่ต้องออกไปในพื้นที่ปฏิบัติงาน

วัตถุประสงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งในโครงการวิจัยย่อยเรื่อง “การพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดทาง
ธรณีเทคนิคและระบบสื่อสารผ่านเครือข่ายไร้สาย” ของโครงการการวิจัย “การเพิ่มเสถียรภาพต่อ
ทางเลือกของการขุดและการเพิ่มกำลังแก้ววัสดุค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1”
ดำเนินการเพื่อพัฒนาโปรแกรมเฝ้าติดตามการเคลื่อนตัวของผนังบ่อเหมือง จากการทำเหมืองเปิด

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ มีดังนี้

1. พัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลและประมวลผล โดยผ่านเครือข่ายไร้สายของเหมืองแม่เมาะ
และสามารถเชื่อมต่อกับเครื่องมือต้นแบบทางธรณีเทคนิค ที่พัฒนาโดยภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. ระบบสามารถแจ้งเตือนเหตุการณ์ผ่าน E-mail และ SMS ได้

การตรวจเอกสาร

Data Acquisition หรือ Data Logger

Data Acquisition หรือ Data Logger คือกระบวนการอ่านค่าสัญญาณทางไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ และส่งสัญญาณไปยังระบบจัดเก็บข้อมูล ตามช่วงเวลาที่กำหนดไว้โดยอัตโนมัติ เพื่อการวัด วิเคราะห์ จัดเก็บ หรือแสดงผลด้วยซอฟต์แวร์ (กิจไพบูลย์, 2550)

TCP Protocols (Transmission Control Protocol)

โปรโตคอล TCP เป็นโปรโตคอลที่มีความน่าเชื่อถือสูง เป็นการส่งข้อมูลในรูปแบบคอนเนกชัน โอเรียนเต็ดในการส่งข้อมูลจะต้องสร้างคอนเนกชันเพื่อการเชื่อมต่อกับฝั่งปลายทางก่อน จึงดำเนินการส่งข้อมูลจริงสำหรับการสร้างคอนเนกชันเพื่อกำหนดเส้นทางการเชื่อมต่อนี้ (โอภาส, 2552)

Microsoft .NET Framework

.NET Framework เป็นโครงสร้างพื้นฐานของแพลตฟอร์มใน .NET และเป็นตัวกำหนดสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทำงานของแอปพลิเคชัน และการบริการต่างๆ บนเว็บ .NET Framework ถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถใช้งานได้จากภาษาใดๆ เช่นภาษา C#, C++, Visual Basic, Jscript, Delphi และอื่นๆ จึงเกิดภาษาเหล่านี้ขึ้นมาในรูปแบบเฉพาะ สำหรับ .NET อีกด้วย ได้แก่ภาษา Managed C++, Visual Basic.Net, Jscript.Net, Borland C#, Delphi8 เป็นต้น สำหรับเป้าหมายหลักของ .NET Framework คือ การสนับสนุนให้การพัฒนาแอปพลิเคชันง่ายขึ้น และสามารถนำไปใช้งานบนอินเทอร์เน็ต อย่างไรก็ตาม .NET Framework สามารถนำมาพัฒนา Desktop Application บนระบบปฏิบัติการต่างๆ ในตระกูล windows ได้เช่นกัน โดยต้องติดตั้ง .NET Framework ลงในระบบปฏิบัติการเสียก่อน เพื่อให้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา สามารถใช้งานในระบบปฏิบัติการนั้นๆ ได้ (สุธี, 2549)

Microsoft Visual Studio

เป็นซอฟต์แวร์ที่รวมการพัฒนาแอปพลิเคชันทั้งบน window และ web เข้าด้วยกัน โดยรองรับการทำงานภายใต้เทคโนโลยี .NET ได้อย่างสมบูรณ์แบบ ตั้งแต่การสร้างแอปพลิเคชันทั่วไป ที่ทำงานบนคอมพิวเตอร์เครื่องเดียว เว็บแอปพลิเคชัน จนถึงแอปพลิเคชันที่สามารถทำงานบน แพลตฟอร์มต่างๆ ในรูปแบบ Web Service โดยมี .NET Framework และ Microsoft Visual Studio เป็นเครื่องมือที่ใช้ช่วยให้การสร้างแอปพลิเคชันแบบต่างๆ ตามที่กล่าวมาทำได้สะดวกและรวดเร็ว ยิ่งขึ้น (สุทธิ, 2549)

Microsoft Visual C#

ภาษาหนึ่งที่อยู่ใน Microsoft Visual Studio คือภาษา Visual C# เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่ถูก ออกแบบมาเพื่อรองรับการทำงานในยุค .NET โดยเป็นภาษาระดับสูงที่ใช้รูปแบบการเขียน โปรแกรมแบบเชิงวัตถุสมัยใหม่ (Modern Object Oriented Programming) จุดเด่นสำคัญของภาษา Visual C# คือการนำเอาความสามารถของภาษา C++ มารวมกับความใช้งานง่ายของภาษา Visual Basic ทำให้ภาษา Visual C# เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่ความน่าเชื่อถือสูง ในขณะที่เดียวกันการใช้งาน ได้ง่าย ก็ทำให้การพัฒนาโปรแกรมทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ สะดวก ง่ายดาย และรวดเร็ว (กวิน, 2551)

อุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมเชิงลาดสำหรับงานธรณีเทคนิค

อุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมเชิงลาดในสนามที่นิยมสำหรับงานธรณีเทคนิค สามารถจำแนก ได้เป็น 3 ประเภท คือ การวัดหน่วยแรงในมวลดินหรือหิน, การวัดการเคลื่อนตัว, การวัดแรงดันน้ำ สำหรับโครงการวิจัย “การเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุดและการเพิ่มกำลังแก้ววัสดุค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง Area 4.1” จะเน้นพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดทางธรณีเทคนิคเพื่อตรวจวัดการ เคลื่อนตัวเชิงลาดชนิด Translation Slide และหน่วยแรงที่เปลี่ยนแปลงในมวลหิน ควบคู่กับการ พัฒนาระบบส่งสัญญาณผ่านเครือข่าย เพื่อให้สามารถประเมินความปลอดภัยของเสถียรภาพเชิง ลาดได้

การตรวจวัดการเคลื่อนตัวเชิงลาด สามารถดำเนินการโดยใช้เครื่องมือหลายชนิด อาทิ การสำรวจด้วยกล้อง Survey, การใช้อุปกรณ์ Surface Extensometer, Borehole Extensometer, Transverse Deformation Gage, Tilt Meter, และ Inclinator เป็นต้น ซึ่งมีประสิทธิภาพและวัตถุประสงค์แตกต่างกัน (Dunncliff and Green, 1988)

หากต้องการตรวจวัดความเครียดบริเวณรอยแตก หรือรอยแยกของมวลหิน สามารถใช้อุปกรณ์ Joint/Crack Meter ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวติดตั้งบนผิวของมวลหิน

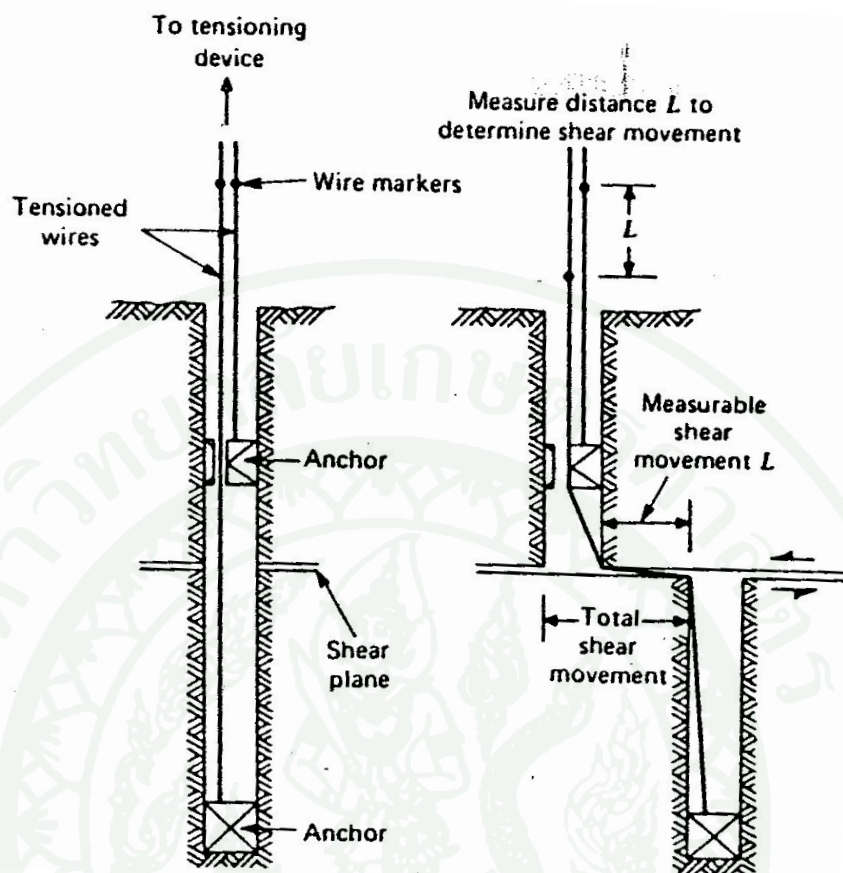
สำหรับการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในมวลหิน นิยมติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในหลุมเจาะ เพื่อวัดค่า การเคลื่อนตัวหรือเปลี่ยนรูป, ความเครียด (Strain), หรือ การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงบริเวณหลุมเจาะ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลง In Situ Stress ของมวลหินในสนาม อุปกรณ์ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในมวลหิน สามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ Soft Inclusion Gage และ Rigid Inclusion Gage (Dunncliff and Green, 1988) Soft Inclusion Gage ได้แก่ Flat and Cylindrical Borehole Pressure Cell, Biaxial and Triaxial Strain Cells เป็นต้น Rigid Inclusion Gage ได้แก่ Vibrating Wire Stressmeter, Biaxial Stressmeter เป็นต้น

Slope Extensometer (Wire Extensometer)

ในการตรวจวัดการเคลื่อนตัวบริเวณระนาบพิบัติ (Shear Plane) ซึ่งอยู่ลึกจากผิวดิน และมีปริมาณการเคลื่อนตัวมากนั้น นิยมใช้อุปกรณ์ประเภท Transverse Deformation Gage ซึ่งหมายถึง อุปกรณ์ที่ติดตั้งในหลุมเจาะหรือท่อเพื่อวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับแกนหลุมเจาะหรือท่อ ได้แก่ Shear Probe, Shear Strip, Slope Extensometer, และ Plum Line and Inverted Pendulum เป็นต้น

อุปกรณ์ Slope Extensometer เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการตรวจวัดการเคลื่อนตัวเชิงลาด และเป็นที่ยอมรับกันโดยแพร่หลายในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค เนื่องจากสามารถตรวจวัดการเคลื่อนตัวของเชิงลาดได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถวัดปริมาณการเคลื่อนตัวได้มากกว่าอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนตัวชนิดอื่นๆ (Bonnard and Steinmann, 1990; Angeli et al., 1988, 1989; และ Corominas et al., 2000) ส่วนประกอบของอุปกรณ์ประกอบด้วยเส้นลวด (Tensioned Wire) ปลายด้านหนึ่งยึดติดกับชั้นหินที่ไม่เคลื่อนตัวกันหลุมเจาะ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่ง ยึดติดกับชุดอุปกรณ์อ่านการเคลื่อนตัวของลวด ดังแสดงในภาพที่ 1 Slope Extensometer จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Wire Extensometer

ตัวอย่างของ Wire Extensometer ที่ผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ที่ใช้การเปลี่ยนแปลงค่า Resistance ในลวดแปลงเป็นการเคลื่อนตัว (Resistance Wire Extensometer) แสดงดังตารางที่ 1



ภาพที่ 1 อุปกรณ์ Slope Extensometer หรือ Wire Extensometer (Kirschke, 1977; Dunicliff and Green, 1988)

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้ววัสดุค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

ตารางที่ 1 Wire Extensometer ที่ผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์


Company	Geotechnical Systems Australia PTY. LTD
Product name	Resistance Wire Extensometer
Model	4040
Applications	<ul style="list-style-type: none"> – Underground hard rock mines: pillar and slope wall displacement – Underground coal mines: roof and pillar Displacement – Embankment displacement – Construction joint displacement – Retaining wall bridge pier and abutment displacement
Specification	
Standard Size	16 mm OD x 1000 mm long
Optional Size	16 mm OD x 2000 mm long
Instrument Head	26 mm OD x 120 mm long
Sealing	IP68
Wire Resistance	70 Ohm/m
Output	micro Volt
Sensitivity to Movement	0.005 mm
Image	

Electrical Joint/Crack Meter

Electrical Joint Meter หรือ Crack Meter เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนตัวที่รอยแตกหรือรอยแยกในหินหรือโครงสร้าง มีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับ Embedment Strain Gage ซึ่งเชื่อมหรือหล่อติดกับโครงสร้างที่ต้องการตรวจวัดค่าความเครียด และสามารถใช้วิเคราะห์หน่วยแรงที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของวัสดุที่ติดตั้งในกรณีที่ไม่สามารถติดตั้ง Load Cell ได้ (Dunnicliff and Green, 1988)

อุปกรณ์ Electrical Joint Meter มีส่วนประกอบสำคัญ คือ Strain Gage ซึ่งอุปกรณ์ในเชิงพาณิชย์ที่ใช้ Electrical Strain Gage ที่ผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 Electric Joint/Crack Meter ที่ผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

Company	Environmental Systems & Services. LTD
Product name	VW Joint/Crackmeter
Model	RP 131
Application	<ul style="list-style-type: none"> - Dams & embankments - Lifts in dams - Strata deformation - Tunnels, underground works & mines - Slopes & open excavation
Specification	
Standard Range	25, 50, 100, 150 mm.
Over	15 x Range
Resolution	0.1 mm.
Accuracy	1 % of Full Scale or better
Repeatability	+/- 0.03 mm.
Coil Resistance	120 – 140 ohm nominal
Electrical Cable	4-conductor, shielded
Material	Stainless Steel
Image	

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. Data Logger
2. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล จำนวน 1 ชุด
3. ระบบปฏิบัติการ Windows XP ขึ้นไป
4. โปรแกรม Microsoft .Net Framework
5. โปรแกรม Data Logger
6. อุปกรณ์ส่งสัญญาณไร้สาย Ubiquiti NanoStation M5 Outdoor จำนวน 2 ชุด
7. อุปกรณ์ส่งสัญญาณไร้สาย EnGenius ENH-200 จำนวน 2 ชุด
8. สายแลน
9. ตัวรับรู้นัด Wire Extensometer
10. ตัวรับรู้นัด Borehole Joint Meter (Joint/Crack Meter)
11. เซลล์สุริยะ จำนวน 1 แผง
12. แบตเตอรี่ขนาด 12V 55Ah จำนวน 1 ลูก
13. เครื่อง KYOYA รุ่น KFW-5-120-C1-16L1M2R

วิธีการ

1. ขั้นตอนและแผนการดำเนินการศึกษา

การศึกษาโครงการได้แบ่งส่วนของการดำเนินงานเป็น 7 ขั้นตอน แสดงดังภาพที่ 2 โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน ดังนี้

1. ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการออกแบบเครื่องมือตรวจวัด

รวบรวมข้อมูล หลักการออกแบบ และ รายละเอียด (Specifications) ของเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมเชิงลาดที่นิยมใช้ในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค เพื่อพัฒนาเครื่องมือตรวจวัด 2 ชนิด คือ Wire Extensometer และ Borehole Joint Meter พร้อมทั้งศึกษาระบบและอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลในสนาม ระบบส่งสัญญาณ และเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ในสำนักงานเพื่อรับข้อมูล

2. ออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดและระบบรับ-ส่งสัญญาณ

อุปกรณ์ที่ออกแบบเน้นความถูกต้อง แม่นยำ ทนทาน และประหยัด โดยใช้วัสดุและเทคโนโลยีภายในประเทศเป็นหลัก และคำนึงถึงการติดตั้งในสนามที่สะดวก และเป็นพื้นที่เสี่ยงภัยต่อการพิบัติของเชิงลาด นอกจากนี้มีการสำรวจพื้นที่ติดตั้งจริงในสนาม และประชุมร่วมกับคณะกรรมการกำกับโครงการ รวมทั้งเสนอแบบอุปกรณ์ตรวจวัดเบื้องต้น และขอความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพื่อมาปรับปรุงการออกแบบ

3. จัดทำชิ้นส่วนและประกอบเครื่องมือต้นแบบ

ดำเนินการติดต่อบริษัทผลิตชิ้นส่วนวัสดุ และอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อจัดทำชิ้นส่วนต่างๆตามแบบ และนำชิ้นส่วนทั้งหมดมาประกอบ พร้อมทั้งพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลและประมวลผล และพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อควบคุมการจัดเก็บข้อมูล

4. ทดสอบอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ

สอบเทียบเครื่องมือเพื่อปรับแก้ให้สามารถใช้งานได้จริงและแม่นยำ และศึกษาขีดจำกัดของเครื่องมือวัดที่ออกแบบ และส่งผลสอบเทียบแก่คณะกรรมการกำกับโครงการเพื่อพิจารณา

5. ติดตั้งอุปกรณ์ในสนาม

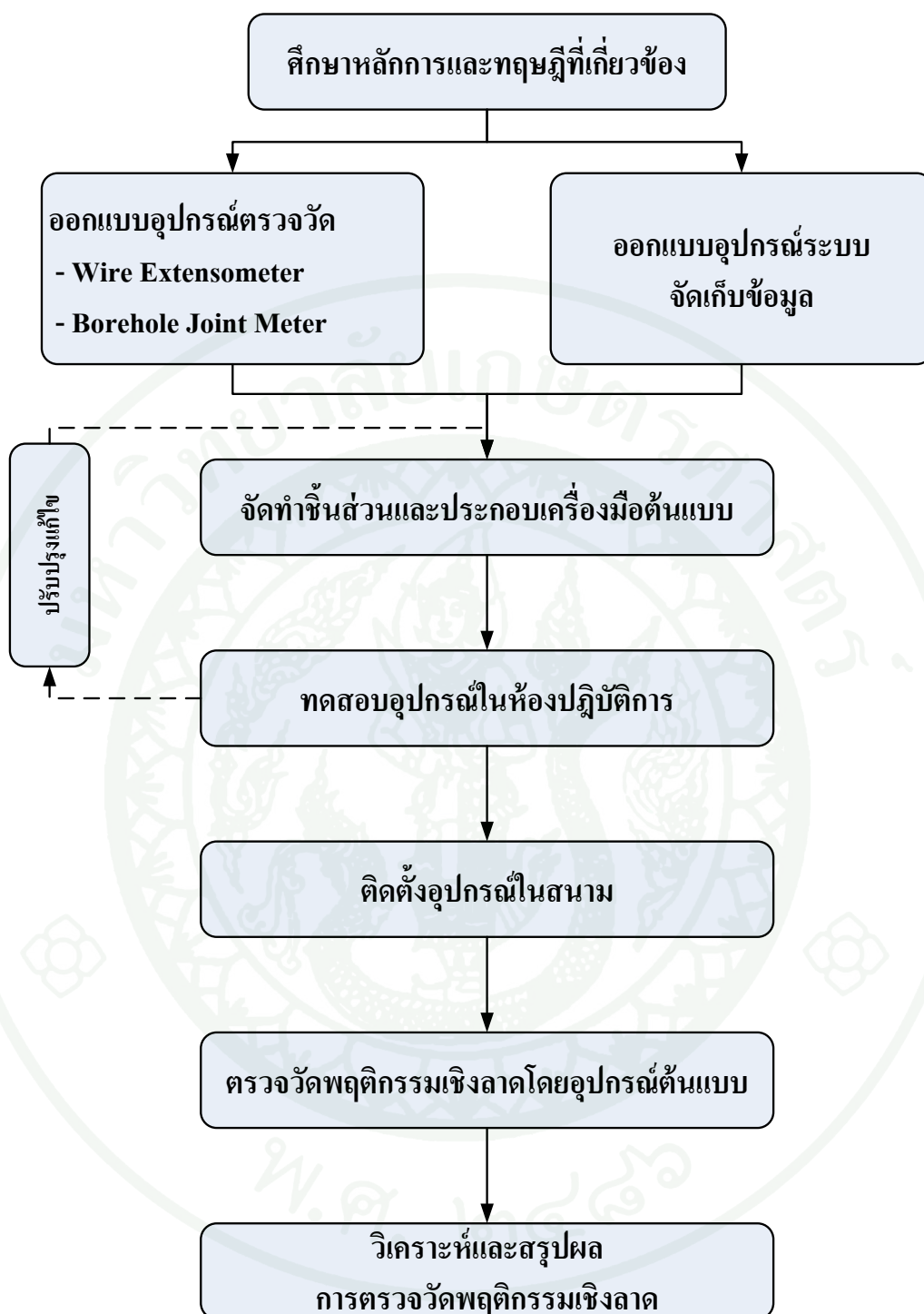
เสนอแผนการติดตั้งเครื่องมือในสนามแก่คณะกรรมการกำกับโครงการเพื่อพิจารณา และเข้าดำเนินการติดตั้งโดยได้รับความอนุเคราะห์จากกองวิศวกรรมธรณี โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

6. ตรวจวัดพฤติกรรมเชิงลาดโดยอุปกรณ์ต้นแบบ

การตรวจวัดจะดำเนินการหลังติดตั้ง และเข้าตรวจวัดจนแล้วเสร็จโครงการ

7. วิเคราะห์และสรุปผลการตรวจวัดพฤติกรรมเชิงลาด

ข้อมูลจากเครื่องมือจะถูกนำมาวิเคราะห์และประมวลเชิงสถิติ เพื่อประเมินความปลอดภัยของเสถียรภาพเชิงลาดเบื้องต้น พร้อมทั้งสรุปผลการตรวจวัดและประสิทธิภาพของเครื่องมือวัด



ภาพที่ 2 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้วสาคูค้ำยัน
สำหรับผนังป่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

2. การออกแบบและพัฒนาเครื่องมือ Wire Extensometer

2.1 องค์ประกอบและรายละเอียดเครื่องมือ

เครื่องมือ Wire Extensometer ออกแบบเพื่อให้สามารถตรวจวัดการเคลื่อนตัวของเชิงลาดได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถวัดปริมาณการเคลื่อนตัวได้มากกว่าอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนตัวชนิดอื่นๆ Wire Extensometer มีกลไกการทำงานคือ นำลวดสแตนเลส (Protected Stainless Steel) ปลายหนึ่งยึดติดกับชิ้นหินที่ไม่เคลื่อนตัวกันหลุมเจาะ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่ง ยึดติดกับกล่องชุดอุปกรณ์ Wire Extensometer ซึ่งติดตั้งบนแท่นเหนือหลุมเจาะบนผิวเชิงลาด ขณะที่เชิงลาดมีการเคลื่อนตัว ลวดจะเคลื่อนตัวชุดเพลลาและเฟืองซึ่งเชื่อมต่อกับมู่เฒ่าและขั้วมาตรวัด (Meter) ซึ่งแสดงปริมาณการเคลื่อนตัวของลวดและสัมพันธ์กับปริมาณการเคลื่อนตัวของเชิงลาด นอกจากนี้ชุดเพลลา ยังเชื่อมต่อกับ Potentiometer ซึ่งจะให้สัญญาณไฟฟ้าสัมพันธ์กับองศาและรอบการหมุนของชุดเพลลา จากนั้นสัญญาณไฟฟ้าที่ต่อเชื่อมกับระบบสื่อสารจะส่งข้อมูลมายังวิศวกรเพื่อใช้ในการประมวลผลต่อ

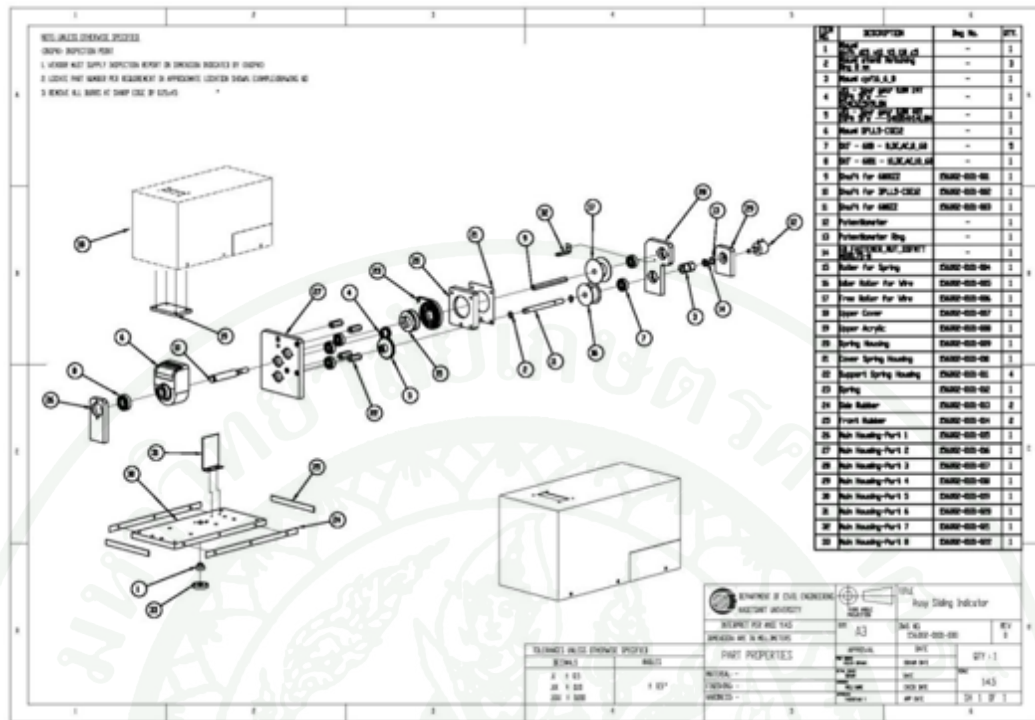
เครื่องมือ Wire Extensometer ถูกพัฒนาให้สามารถวัดการเคลื่อนตัวได้สูงสุดถึง 80 เซนติเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวของลวดสแตนเลสที่ใช้ ชุดเครื่องมือ Wire Extensometer มีชิ้นส่วนประกอบรวมทั้งสิ้น 32 ชิ้นส่วนดังแสดงในภาพที่ 3 และภาพที่ 4 แสดงภาพ 3 มิติของชุดเครื่องมือ Wire Extensometer ภาพที่ 5 แสดงชุดเครื่องมือ Wire Extensometer ที่ประกอบแล้ว และตารางที่ 3 สรุปรายละเอียดเครื่องมือ (Specifications)

ตารางที่ 3 ขนาดและคุณสมบัติของชุดเครื่องมือ Wire Extensometer

รายละเอียด	ขนาด/คุณสมบัติ	
1.ขนาดและคุณสมบัติทั่วไป		
1.1 ความกว้างxความยาวxความสูง	60 x 155 x 91 มม.	
1.2 ความสูงจากระดับปากหลุมถึงเครื่องมือวัด	≥ 1 ม.	
1.3 ความลึกของหลุม	≤ 100 มม.	
1.4 ขอบเขตการเคลื่อนตัว	≤ 800 มม.	
1.5 หน่วยแสดงผลการวัด	มิลลิเมตร	
1.6 สามารถแสดงผลแบบตัวเลข	5 หลัก	
2.ชุดอุปกรณ์วัดระยะ		
2.1 เส้นลวดสแตนเลส	เส้นผ่านศูนย์กลาง	0.5 มม.
	รับแรงดึงสูงสุด	13.6 กก. (30 ปอนด์)
2.2 ลูกดิ่งสแตนเลส	ขนาด (กว้างxความยาว)	20 มม. x 50 มม.
	น้ำหนัก	500 ก.
2.3 สปริงรับแรงดึงคงที่	แรงดึงสูงสุด	1.4 กก.
2.4 เฟืองขบ	วัสดุ	ทองเหลือง
	อัตราทด	1 : 2
3. ชุดอุปกรณ์แสดงผลแบบตัวเลข		
3.1 เครื่องนับรอบการหมุน	อัตราทด	1 : 5
	หน่วยที่แสดงต่อรอบการหมุน	0005 . 0
	ความเร็วรอบสูงสุด	60 รอบ/นาที
	น้ำหนัก	100 ก.
	วัสดุตัวอุปกรณ์	Nylon
	วัสดุแกนหมุน	Carbon Steel

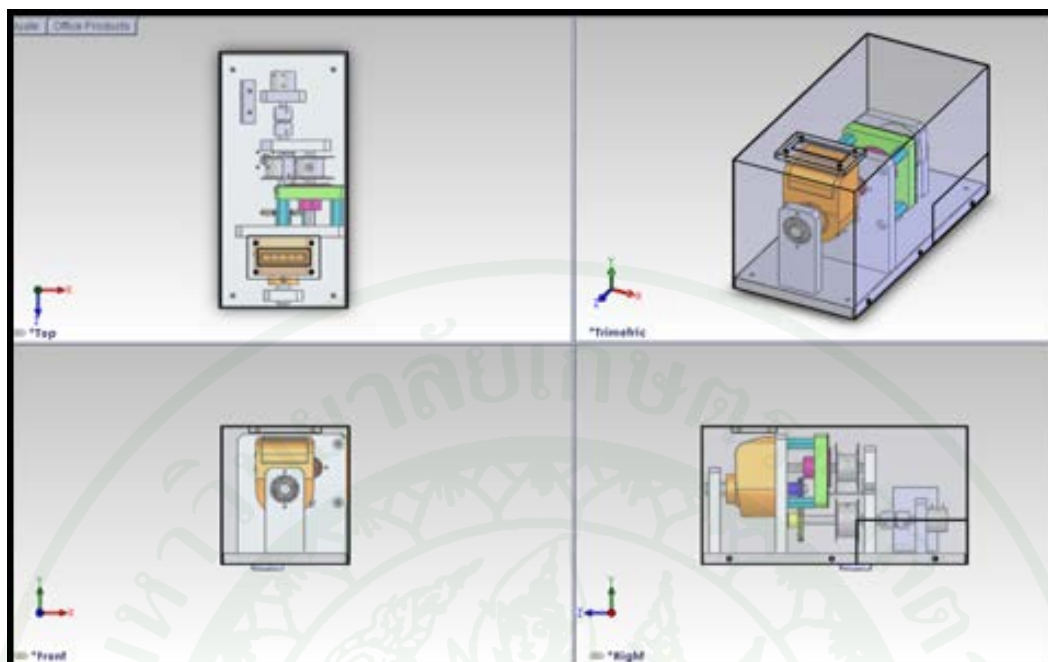
ตารางที่ 3 (ต่อ)

รายละเอียด	ขนาด/คุณสมบัติ	
4. ชุดอุปกรณ์แปลงผลการวัดเป็นสัญญาณไฟฟ้า		
4.1 อุปกรณ์ Potentiometer	ความต้านทาน	50 k Ω \pm 5 %
	ความเป็นเชิงเส้น	\pm 0.2 %
	จำนวนรอบการหมุน	10 รอบ
	องศาหมุนทางกล	3600 $^{\circ}$ +10 $^{\circ}$
	ช่วงอุณหภูมิในการทำงาน	-40 $^{\circ}$ C ถึง 85 $^{\circ}$ C
5. ชุดกล่องอุปกรณ์และฐานติดตั้งเครื่องมือ		
5.1 กล่องอุปกรณ์	ขนาด (กว้าง x ยาว x สูง)	15 x 220 x 50 มม.
	วัสดุ	พลาสติก
5.2 ฐานติดตั้งเครื่องมือ	วัสดุ	PVC 8.5
	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	200 มม. หรือ 8 นิ้ว
4. ชุดอุปกรณ์แปลงผลการวัดเป็นสัญญาณไฟฟ้า		
4.1 อุปกรณ์ Potentiometer	ความต้านทาน	50 k Ω \pm 5 %
	ความเป็นเชิงเส้น	\pm 0.2 %
	จำนวนรอบการหมุน	10 รอบ
	องศาหมุนทางกล	3600 $^{\circ}$ +10 $^{\circ}$
	ช่วงอุณหภูมิในการทำงาน	-40 $^{\circ}$ C ถึง 85 $^{\circ}$ C
5. ชุดกล่องอุปกรณ์และฐานติดตั้งเครื่องมือ		
5.1 กล่องอุปกรณ์	ขนาด (กว้าง x ยาว x สูง)	15 x 220 x 50 มม.
	วัสดุ	พลาสติก
5.2 ฐานติดตั้งเครื่องมือ	วัสดุ	PVC 8.5
	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	200 มม. หรือ 8 นิ้ว



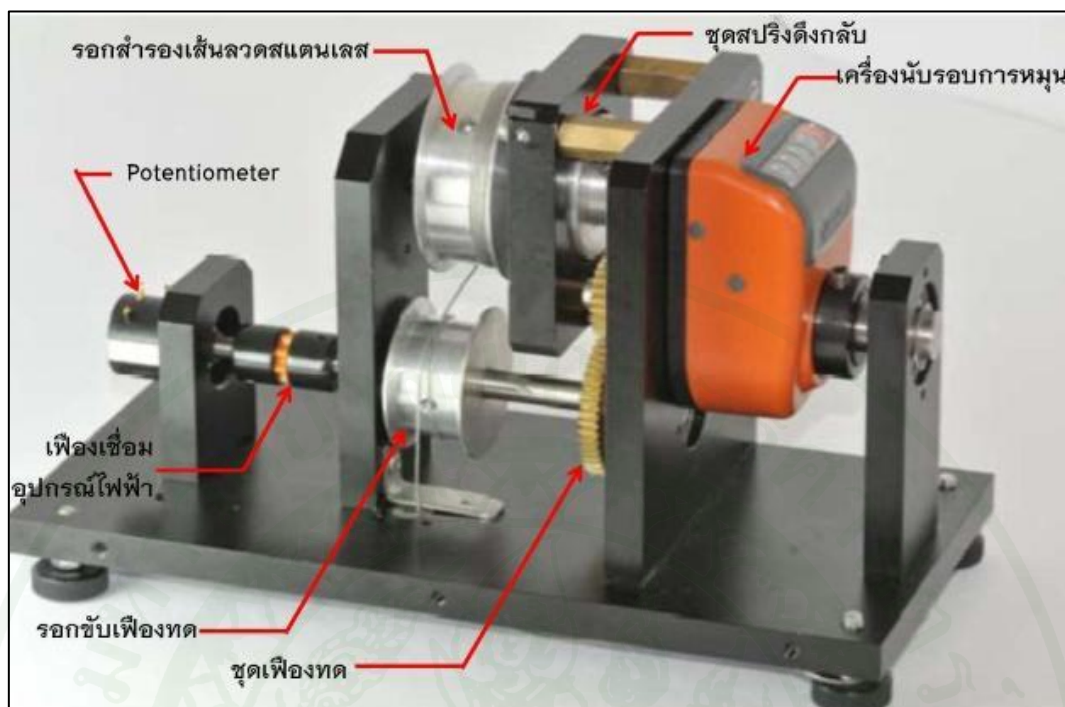
ภาพที่ 3 ส่วนประกอบของ Wire Extensometer

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลื้อยของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้วัสดุที่ย้ำ
 สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)



ภาพที่ 4 ภาพ 3 มิติ และภาพด้านบน, ด้านหน้า, และด้านขวา ของ Wire Extensometer

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขูด และการเพิ่มกำลังแก้วัสดุค้ำยัน
สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)



ภาพที่ 5 ภาพชุดเครื่องมือ Wire Extensometer ที่ประกอบแล้ว

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการชุด และการเพิ่มกำลังแก้ววัสดุค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

2.2. การวิเคราะห์ผลการตรวจวัดพฤติกรรม

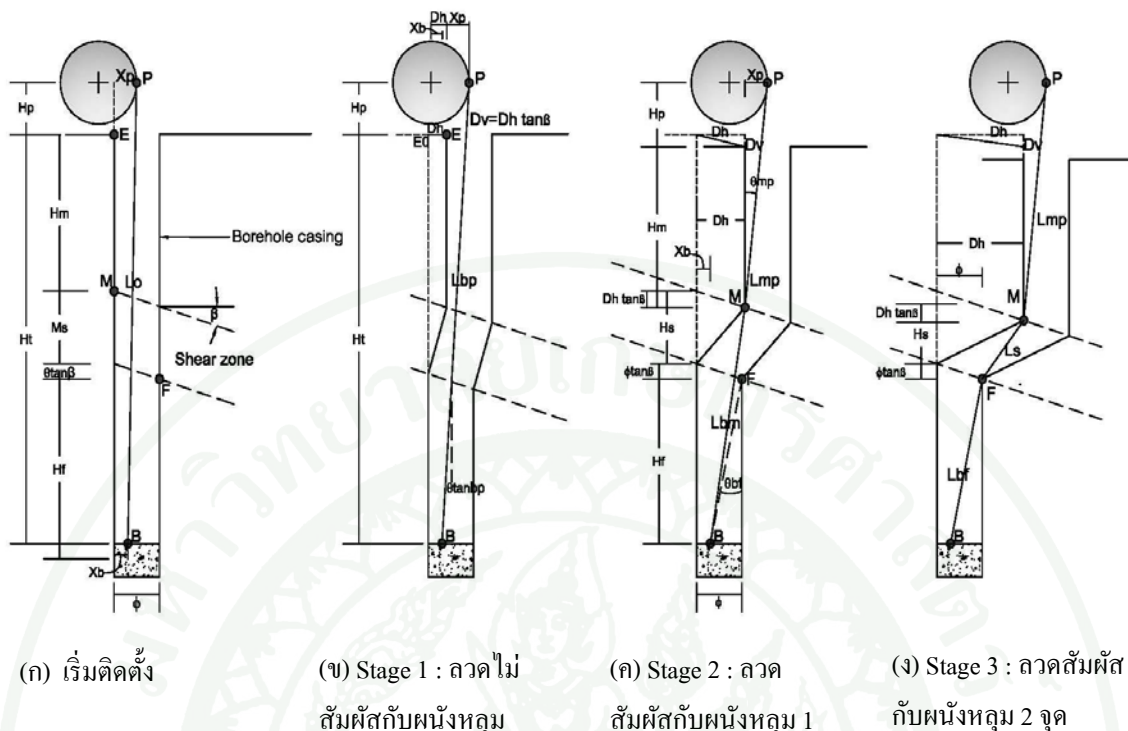
การวิเคราะห์ปริมาณการเคลื่อนตัวของเชิงลาดจาก Wire Extensometer เป็นการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของลวดในกรณีการพิบัติเป็นแบบ Translational Slide ซึ่งมีสมมุติฐานดังนี้ (Corominas et al., 2000)

1. การเคลื่อนตัวเกิดขึ้นในระนาบพิบัติเพียงหนึ่งระนาบ โดยที่ชั้นหินด้านบนและด้านล่างระนาบพิบัติไม่เกิดการเสีรूपขณะเชิงลาดมีการเคลื่อนตัว
2. หลุมเจาะซึ่งติดตั้ง Wire Extensometer ต้องเป็นแนวตั้งและปลายของลวดต้องยึดติดแน่นกับก้นหลุมเจาะซึ่งลึกกว่าระนาบพิบัติ

3. Shear Zone มีความหนาคงที่ และมีอัตราการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นเชิงเส้นจากขอบด้านล่างไปยังขอบด้านบนของ Shear Zone โดยที่ขอบด้านล่างมีค่าการเคลื่อนตัวเท่ากับศูนย์ และขอบด้านบนมีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด

วิธีคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของลวดในหลุมเจาะใช้หลักการทางเรขาคณิต เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของเชิงลาดกับการเคลื่อนที่สุทธิของลวด ภาพที่ 6 แสดงลำดับการเคลื่อนตัวของระนาบพิบัติสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของลวด ในอุปกรณ์ Wire Extensometer ปริมาณการเคลื่อนที่สุทธิของลวดแสดงโดยการเปลี่ยนแปลงระยะจากจุด B ซึ่งยึดติดกับก้นหลุมเจาะ และ จุด P ซึ่งติดกับมู่เต้ในกล่องชุดอุปกรณ์ Wire Extensometer ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่สุทธิของลวดจะแสดงเป็นฟังก์ชันกับการเคลื่อนที่ในแนวราบบนผิวดิน (เทียบกับจุด E)

ความยาวของลวดในหลุมเจาะจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเชิงลาดมีการเคลื่อนตัว ลำดับและพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของความยาวลวดสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชั้น ขึ้นกับการสัมผัสของลวดกับผนังหลุมเจาะ ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของเชิงลาดและความยาวของลวด (Corominas et al., 2000)

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก๊วสคูค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

ในภาพที่ 6ก การเคลื่อนตัวของจุด E (แทนโดยเวกเตอร์ D_s) ซึ่งอยู่บนปากหลุมเจาะ จะมีค่าเท่ากับปริมาณการเคลื่อนตัวที่จุด M ณ ผิววนของระนาบพิบัติ ทิศทางของ เวกเตอร์ D_s จะขนานกับระนาบพิบัติ ซึ่งมีมุม Dip เท่ากับ β

$$D_v = D_h \tan \beta \tag{1}$$

โดยที่ D_v และ D_h คือ ส่วนประกอบของเวกเตอร์ D_s ในแนวตั้งและแนวราบตามลำดับ กำหนดให้มุม β มีค่าเป็นบวกเมื่อเป็นมุมก้มและเชิงลาดเคลื่อนที่ลงและเป็นลบในกรณีกลับกัน

การเปลี่ยนแปลงความยาวของลวดในหลุมเจาะขึ้นอยู่กับขนาดของหลุมเจาะ (ความลึก H_t และ เส้นผ่าศูนย์กลาง, ϕ) ระยะแนวราบจากตำแหน่งศูนย์กลางแกนมูเล่ถึงจุดที่ลวดสัมผัสกับมูเล่ (จุด P) เท่ากับ $X_p + X_b$ และระยะในแนวตั้งวัดจากตำแหน่งศูนย์กลางแกนมูเล่ถึงขอบด้านล่างของระนาบพิบัติ (จุด F) เท่ากับ $H_p + H_m + H_s + \phi \tan \beta$ การเปลี่ยนแปลงความยาวของลวดในชั้นต่างๆ สามารถคำนวณได้ดังนี้

ขั้นที่ 1: ลวดยังไม่สัมผัสกับผนังหลุมเจาะ (ภาพที่ 6ข)

ความยาวลวดที่เปลี่ยนแปลง (D_1) ระหว่างจุด P และ B คือ

$$D_1 = L_{bp} - L_o \quad (2)$$

โดยที่

$$L_{bp} = \left[(D_h + X_p - X_b)^2 + (H_t + H_p - D_h \tan \beta)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

และ

$$L_o = \left[(X_p - X_b)^2 + (H_t + H_p)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

ขั้นที่ 2: ลวดเคลื่อนที่หลังจากมีการสัมผัสกับผนังหลุมเจาะ 1 ตำแหน่ง (ภาพที่ 6ค) สามารถเกิดขึ้นได้ 2 รูปแบบคือ

- a. ลวดสัมผัสกับผนังหลุมเจาะที่จุด M ก่อนซึ่งเป็นขอบบนของระนาบพิบัติ ($\theta_{mp} \leq \theta_{bf}$)
- b. ลวดสัมผัสกับผนังหลุมเจาะจุด F ซึ่งเป็นขอบล่างของระนาบพิบัติ ($\theta_{mp} \geq \theta_{bf}$)

กรณีจุด M เป็นจุดสัมผัสแรก

ความยาวลวดที่เปลี่ยนแปลง (D_1) ระหว่างจุด P และ B เท่ากับ

$$D_1 = L_{mp} + L_{bm} - L_o \quad (5)$$

โดยที่

$$L_{mp} = \left[X_p^2 + (H_m + H_p)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

และ

$$L_{bm} = \left[(D_h - X_b)^2 + (H_s + H_f - (D_h - \phi) \tan \beta)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

กรณีจุด F เป็นจุดสัมผัสแรก

$$D_1 = L_{bf} + L_{fp} - L_o \quad (8)$$

โดยที่

$$L_{bf} = \left[(\phi - X_b)^2 + H_f^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

และ

$$L_{fp} = \left[(D_h + X_p - \phi)^2 + (H_m + H_p + H_s - (D_h - \phi) \tan \beta)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

เมื่อ L_{bf} และ L_{fp} คือ ระยะระหว่างจุด B และ F และ จุด F และ P, ตามลำดับ

ขั้นที่ 3: ลวดเคลื่อนที่หลังจากมีการสัมผัสกับผนังหลุมเจาะ 2 ตำแหน่ง (ภาพที่ 6ง)

ในขั้นนี้ ลวดจะสัมผัสกับผนังหลุมเจาะ 2 ตำแหน่ง คือ จุด M และ จุด F และความยาวลวดที่เปลี่ยนแปลง (D_1) ระหว่างจุด P และ B เท่ากับ

$$D_1 = L_{mb} + L_s + L_{bf} - L_o \quad (11)$$

โดยที่

$$L_s = \left[(D_h - \phi)^2 + (H_s - (D_h - \phi) \tan \beta)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

ขอบเขตการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเคลื่อนตัวของลวดสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. การเปลี่ยนแปลงจากขั้นที่ 1 เป็นขั้นที่ 2a และการเปลี่ยนแปลงจากขั้นที่ 2a ไปเป็นขั้นที่ 3 (กรณีจุด M เป็นจุดสัมผัสแรก)

1.1 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเคลื่อนตัวของลวดจากขั้นที่ 1 เป็นขั้น 2b เกิดขึ้นเมื่อ $\theta_{bp} = \theta_{mp}$ หรือสามารถเขียนสมการในรูปของ

$$\tan \theta_{bp} = \tan \theta_{mp} \quad (13)$$

เนื่องจาก

$$\tan \theta_{bp} = \frac{X_p - X_b + d_{1,2a}}{H_t + H_p - d_{1,2a} \tan \beta} \quad (14)$$

และ

$$\tan \theta_{mp} = \frac{X_p}{H_m + H_p} \quad (15)$$

แทนสมการที่ (14) และ (15) ใน สมการที่ (13) จะได้ปริมาณการเคลื่อนตัวในแนวราบคือ

$$d_{1,2a} = \frac{X_p(H_t - H_m) + X_b(H_m + H_p)}{H_m + H_p(1 + \tan \beta)} \quad (16)$$

1.2 การเปลี่ยนแปลงจากชั้นที่ 2a ไปเป็นชั้นที่ 3 เกิดขึ้นเมื่อ $\theta_{bm} = \theta_{bf}$ ดังนั้น ปริมาณการเคลื่อนตัวในแนวราบ คือ

$$d_{2a,3} = \phi + \frac{X_s(\phi - X_b)}{H_f + (\phi - X_b)\tan \beta} \quad (17)$$

ในกรณีที่ระนาบพิบัติเคลื่อนตัวมากจนกระทั่ง $H_s = 0$ ค่า $d_{2a,3}$ จะมีค่าเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมเจาะ (ϕ)

2. การเปลี่ยนแปลงจากชั้นที่ 1 เป็นชั้นที่ 2b และการเปลี่ยนแปลงจากชั้นที่ 2b ไปเป็นชั้นที่ 3 (กรณีที่จุด F เป็นจุดสัมผัสแรก)

2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเคลื่อนตัวของลวดจากชั้นที่ 1 เป็นชั้น 2b เกิดขึ้นเมื่อ $\theta_{bp} = \theta_{bf}$ ดังนั้นปริมาณการเคลื่อนตัวในแนวราบคือ

$$d_{1,2b} = \frac{(\phi - X_b)(H_t - H_p) - (X_p - X_b)H_f}{H_f + (\phi - X_b)\tan \beta} \quad (18)$$

2.2 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเคลื่อนตัวของลวดจากชั้นที่ 2b เป็นชั้น

3 เกิดขึ้นเมื่อ $\theta_{ip} = \theta_{mp}$ ดังนั้นปริมาณการเคลื่อนตัวในแนวราบคือ

$$d_{2b,3} = \frac{(H_m + H_p)\phi + (H_s + \phi \tan \beta)X_p}{H_m + H_p(1 + \tan \beta)} \quad (19)$$

ปริมาณการเคลื่อนตัวของผิวเชิงลาดในแนวราบ ณ จุด E (D_h) สามารถคำนวณได้สมการพื้นฐานคือ

$$D_h = \left[b \tan \beta - a \pm \sqrt{\frac{(a - b \tan \beta)^2 - [a^2 + b^2 - (D_1 - c)^2]}{\cos^2 \beta}} \right] \cos^2 \beta \quad (20)$$

โดยที่ค่า a, b, และ c ขึ้นกับรูปแบบการเคลื่อนตัว คือ

กรณีชั้นที่ 1

$$a = X_p - X_b$$

$$b = H_t + H_p$$

$$c = -L_o$$

(21ก)

กรณีชั้นที่ 2a

$$a = -X_b$$

$$b = H_f + H_s + \phi \tan \beta$$

$$c = L_{mp} - L_o$$

(21ข)

กรณีขั้นที่ 2b

$$\left. \begin{aligned} a &= -X_b - \phi \\ b &= H_p + H_m + H_s + \phi \tan \beta \\ c &= L_{bf} - L_o \end{aligned} \right\} (21ค)$$

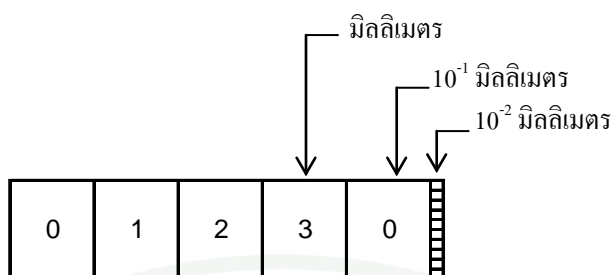
กรณีขั้นที่ 3

$$\left. \begin{aligned} a &= -\phi \\ b &= H_s + \phi \tan \beta \\ c &= L_{mp} + L_{Bf} - L_o \end{aligned} \right\} (21ง)$$

2.3 การสอบเทียบเครื่องมือ

หลักการสอบเทียบเครื่องมือค่านึงถึง 5 ประการสำคัญ คือ ความเที่ยงตรงของชุดอุปกรณ์ทดสอบ (Validity), ความเชื่อมั่นของเครื่องมือตรวจวัด (Reliability), ความยากง่าย (Difficulty) ในการสอบเทียบ, การวินิจฉัยผลการสอบเทียบที่ยุติธรรม (Discrimination), และ การบรรลุตามประโยชน์ใช้สอยของเครื่องมือ (Objectivity)

การสอบเทียบเครื่องมือ Wire Extensometer นั้น เป็นการสอบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนตัวของลวดกับค่าที่อ่านได้จากเครื่องนับรอบการหมุนของชุดเพลลา (ชุดอุปกรณ์แสดงผลแบบตัวเลข) และการเคลื่อนตัวของลวดกับค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ Potentiometer (ชุดอุปกรณ์ Data Logger) โดยระยะการเคลื่อนตัวของลวดจะเทียบกับสเกลมาตรฐานและค่าที่อ่านได้จากเครื่องนับรอบ (ค่าความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร, ภาพที่ 7) และความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 7 หน้าจอแสดงผลของ Wire Extensometer มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลื้อยของการขุด และการเพิ่มกำลังแก๊วสคูค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

2.4 วิธีการสอบเทียบเครื่องมือ

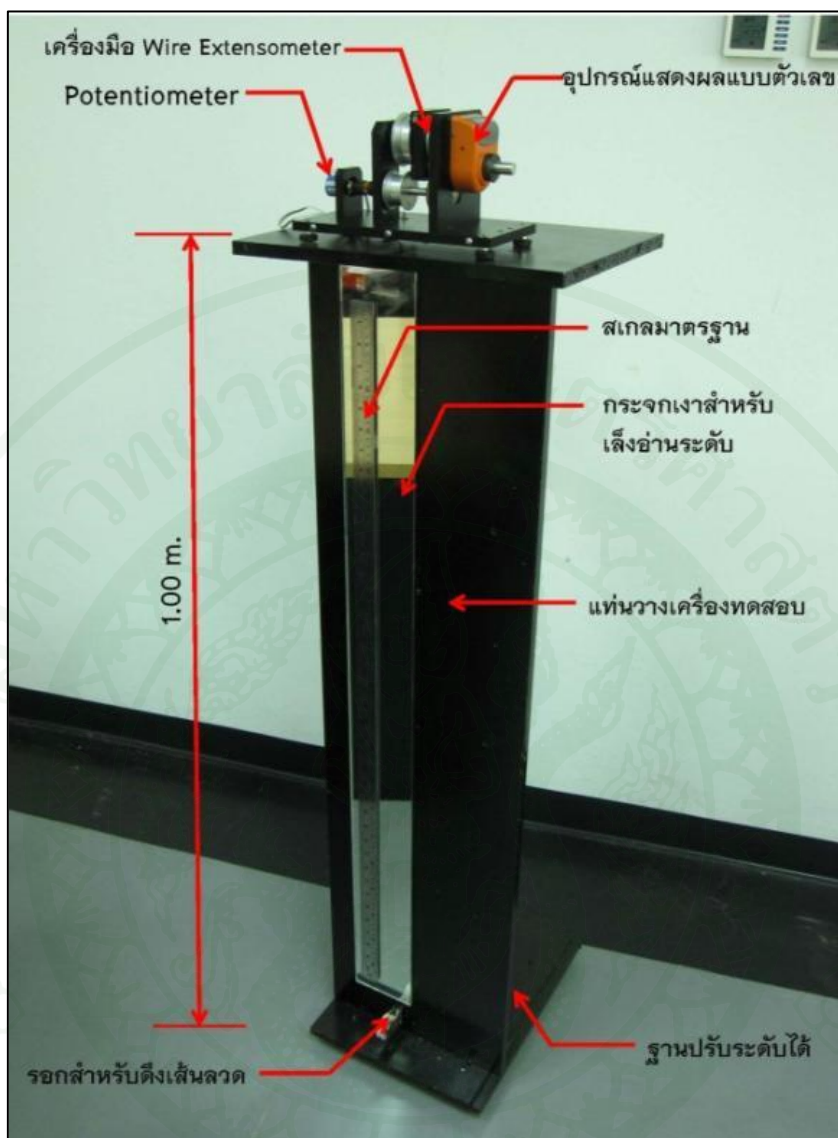
การสอบเทียบได้ใช้หลักการตามข้อกำหนดของ JIS B7516: 1987 ซึ่งประกอบด้วย การสอบเทียบแบบหยาบและการสอบเทียบแบบส้อม (แบบละเอียด) โดยทำการดึงลวดเทียบสเกลมาตรฐาน ดังแสดงในภาพที่ 8 และ ภาพที่ 9 ซึ่งดำเนินการทำแบบละ 3 ครั้งและมีขั้นตอนดังนี้

2.4.1. การสอบเทียบแบบหยาบ

1. ติดตั้งอุปกรณ์ Wire Extensometer บนแท่นวัดให้อยู่ในแนวระนาบและแนวตั้ง
2. ดึงเส้นลวดตามระยะจากนั้นปล่อยเส้นลวดตามระยะ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 500, 300 และ 0 มิลลิเมตร โดยเทียบกับสเกลมาตรฐาน
3. อ่านระยะเพื่อเทียบสเกลมาตรฐาน พร้อมกับอ่านค่าชุดอุปกรณ์แสดงผลแบบตัวเลขและชุดอุปกรณ์ Data Logger

2.4.2. การสอบเทียบแบบสุ่ม (แบบละเอียด)

1. ติดตั้งอุปกรณ์ Wire Extensometer บนแท่นวัดให้อยู่ในแนวระนาบและแนวดิ่ง
2. ดึงเส้นลวดโดยการสุ่มระยะจำนวนไม่น้อยกว่า 8 ครั้ง เทียบกับสเกลมาตรฐาน
3. อ่านระยะเพื่อเทียบสเกลมาตรฐาน พร้อมกับอ่านค่าชุดอุปกรณ์แสดงผลแบบตัวเลขและชุดอุปกรณ์ Data Logger



ภาพที่ 8 การสอบเทียบเครื่องมือ Wire Extensometer ในห้องปฏิบัติการ

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้ววัสดุค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 9 แสดงขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องมือ Wire Extensometer, (ก) ต่อเชื่อม Potentiometer กับ Read Out Unit, (ข) ติดตั้ง Wire Extensometer กับแท่นสอบเทียบความยาว, (ค) ดึงเส้นลวดตามระยะที่กำหนด, (ง) อ่านค่าการเคลื่อนตัวของลวดจากสเกลมาตรฐาน

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก๊วดูดควันสำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

3. การออกแบบและพัฒนาเครื่องมือ Borehole Joint Meter

3.1 องค์ประกอบและรายละเอียดเครื่องมือ

เครื่องมือ Borehole Joint Meter เป็นเครื่องมือตรวจวัดการเคลื่อนตัวของรอยแตก (Joint) รอยเลื่อน (Fault) หรือระนาบที่มีการเคลื่อนตัว (Failure Plane) ได้ผิวดิน โดยเครื่องมือ Borehole Joint Meter จะติดตั้งในหลุมเจาะ บริเวณระนาบหรือโซนที่คาดว่าจะมีการเคลื่อนตัวดังแสดงในภาพที่ 10 เครื่องมือ Borehole Joint Meter ประกอบด้วยแท่งเหล็ก (Stainless Steel Bar) ซึ่งมี Strain Gage ติดตั้งปลายด้านล่างต่อเชื่อมกับท่อนเหล็กเพื่อถ่วงน้ำหนักและยึดติดกับหลุมเจาะ ส่วนปลายด้านบนยึดติดกับชุดลูกบอลเหล็ก (Ball Roller System) เพื่อให้ปลายด้านบนสามารถเคลื่อนตัวได้ ทั้งแบบอิสระและไม่เกิดโมเมนต์ที่ปลายด้านบน (Cantilever End) และแบบเกิดโมเมนต์ที่ปลายด้านบน (Restrained End) เมื่อชั้นหินมีการเคลื่อนตัวจะดันให้ปลายด้านบนของ Borehole Joint Meter เกิดการเคลื่อนที่ และเกิดความเครียดในแท่งเหล็ก (Steel Bar) จากนั้นสัญญาณไฟฟ้าจาก Strain Gage จะผ่านสายไฟมาที่อุปกรณ์ขยายสัญญาณ และส่งมายังเครื่องรับสัญญาณที่ผิวดินเพื่อประมวลผลต่อ โดยชุดเครื่องมือ Borehole Joint Meter มีองค์ประกอบดังแสดงในภาพที่ 11 และภาพที่ 12 สำหรับชนิดไม่เกิดโมเมนต์ที่ปลายด้านบน (Cantilever End) และแบบเกิดโมเมนต์ที่ปลายด้านบน (Restrained End), ตามลำดับ ภาพที่ 13 และภาพที่ 14 แสดงภาพ 3 มิติของเครื่องมือ Borehole Joint Meter ชนิดไม่เกิดโมเมนต์ที่ปลายด้านบน (Cantilever End) และแบบเกิดโมเมนต์ที่ปลายด้านบน (Restrained End) ภาพที่ 15 แสดงภาพตัดตามยาวในภาพ 3 มิติของเครื่องมือ Borehole Joint Meter ทั้งสองแบบ และตารางที่ 4 สรุปขนาดและคุณสมบัติ (Specifications) ของชุดเครื่องมือ Borehole Joint Meter

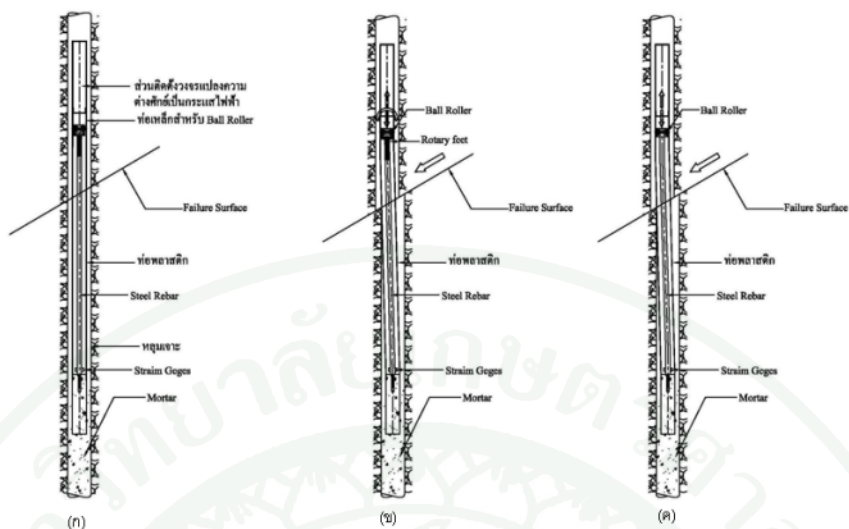
Electrical Resistance Strain Gage ที่ติดตั้งบน Steel Bar เป็นแบบ Bonded Foil Resistance Strain Gage (KYOYA, KFW-5-120-C1-16L1M2R) ซึ่งประกอบด้วยแผ่น Foil ซึ่งเป็นโลหะผสมความต้านทาน (Resistance Alloy Foil) ได้แก่ Copper-Nickel Alloy Foil ติดกับแผ่นฟิล์มพลาสติก ดังภาพที่ 16 Electrical Resistance Strain Gage ติดตั้งแบบ Half Bridge ซึ่งประกอบด้วย Strain Gage 2 ตัว และติดตั้งท่ามุม 180 องศา

ตารางที่ 4 ขนาดและคุณสมบัติของชุดเครื่องมือ Borehole Joint Meter

รายละเอียด		ขนาด/คุณสมบัติ	
1.ขนาดและคุณสมบัติทั่วไป			
1.1	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง x ความยาว	60 x 1700 มม.	
1.2	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก	20 มม.	
1.3	ขนาดหลุมเจาะ	≥ 100 มม.	
1.4	ความลึกของหลุม	≤ 100 ม.	
1.5	ท่อพลาสติกต้านทานแรงดัน	500 kPa	
1.6	ขอบเขตการเคลื่อนตัว	40 มม.	
2.ชุดอุปกรณ์ประกอบแท่งเหล็ก			
2.1	Stainless Steel Bar (Type 304)	เส้นผ่านศูนย์กลาง	20 มม.
		Ultimate Strength	621 MPa
		0.2% Yield Strength	290 MPa
		Modulus of Elasticity	193×10^3 MPa
2.2	Strain Gage	วัสดุ	CuNi alloy foil
		ขนาด	2 มม.
		ความต้านทานรวม	120 Ω
2.3	ท่อพลาสติกเสริมใยลวดสปริง	วัสดุ	โพลีไวนิลคลอไรด์
		ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอก	60 มม.
		ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายใน	54 มม.
3.ชุดอุปกรณ์ฐานรองรับแบบล้อเลื่อน			
3.1	Rotary Feet	วัสดุ	สแตนเลส
		Allowable Vertical Load	16 kN
		Max Vertical Movement	15 องศา
3.2	Ball Roller	วัสดุ	สแตนเลส
		Allowable Load	343 N

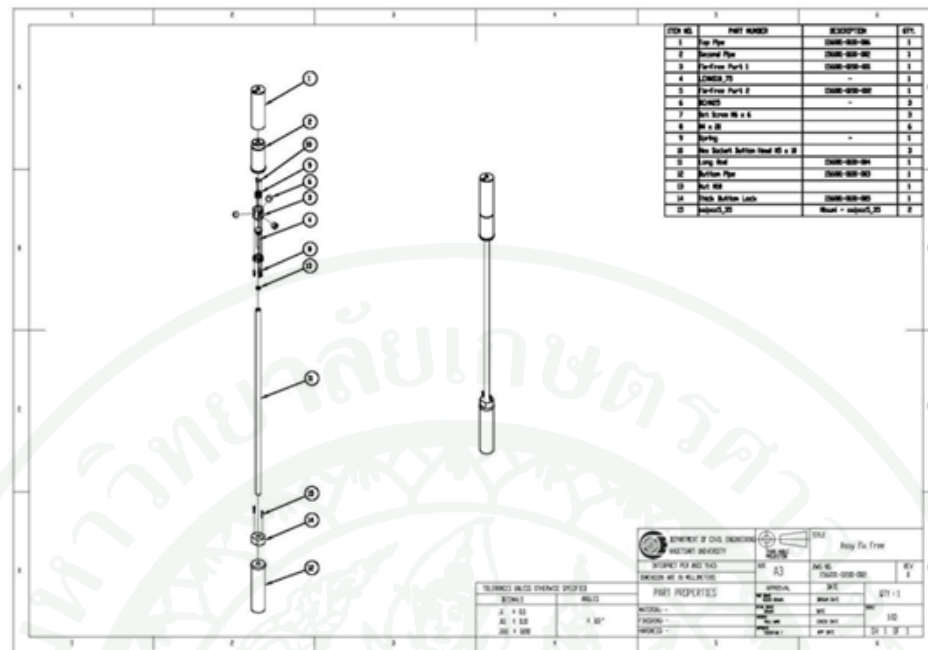
ตารางที่ 4 (ต่อ)

รายละเอียด		ขนาด/คุณสมบัติ	
3.3	ฐานยึด Ball Roller	วัสดุ	ทองเหลือง
		ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	60 มม.
		สูง	35 มม.
3.4	ฐานยึด Rotary Feet	วัสดุ	ทองเหลือง
		ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	60 มม.
		สูง	35 มม.
4. ชุดอุปกรณ์ฐานรองรับแบบยึดแน่น			
4.1	Ball Roller	วัสดุ	สแตนเลส
		Allowable Load	343 N
4.2	ฐานยึด Ball Roller	วัสดุ	ทองเหลือง
		ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	60 มม.
		สูง	35 มม.



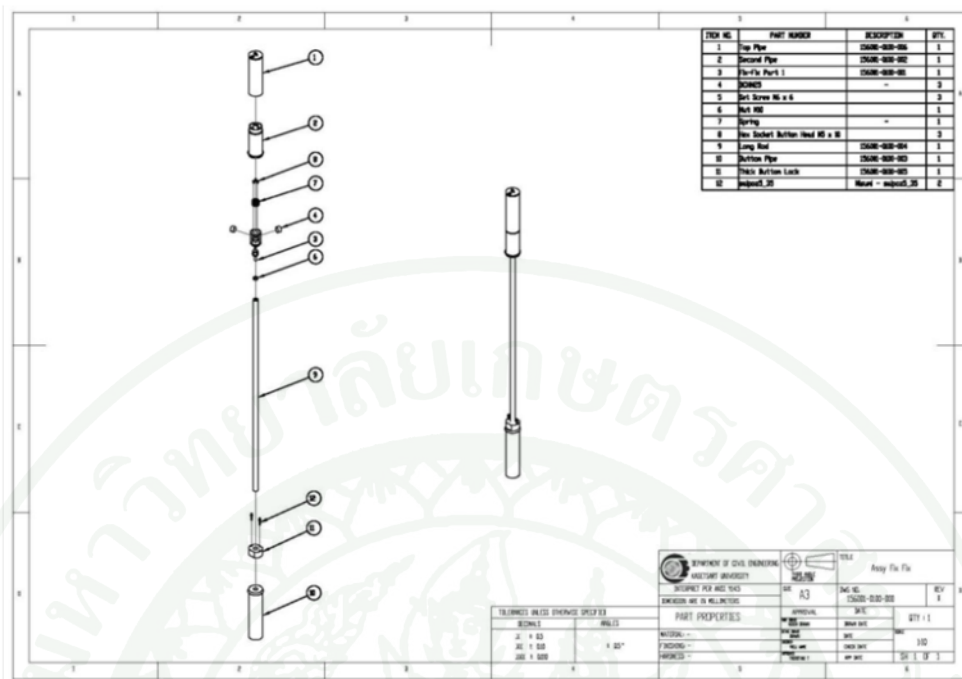
ภาพที่ 10 (ก) ส่วนประกอบของ Borehole Joint Meter , (ข) Borehole Joint Meter แบบอิสระและ
ไม่เกิดโมเมนต์ที่ปลายด้านบน (Cantilever End), (ค) Borehole Joint Meter แบบเกิด
โมเมนต์ที่ปลายด้านบน (Restrained End)

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้วคู้ยั้น
สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)



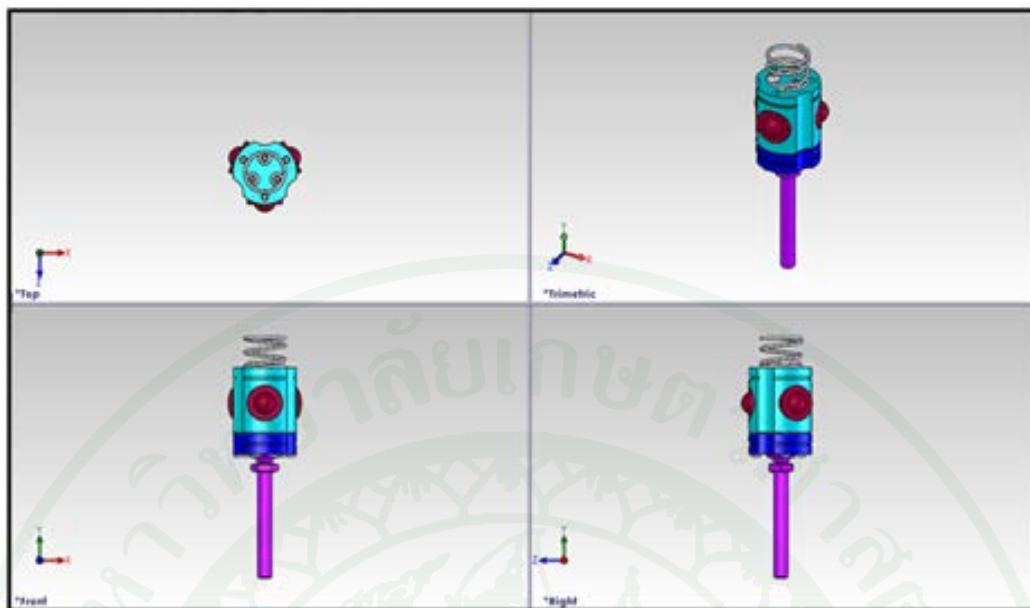
ภาพที่ 11 ส่วนประกอบของชุดเครื่องมือ Borehole Joint Meter แบบอิสระและไม่เกิดโมเมนต์ที่ปลายด้านบน (Cantilever End)

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลี้ยวของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้วัสดุค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)



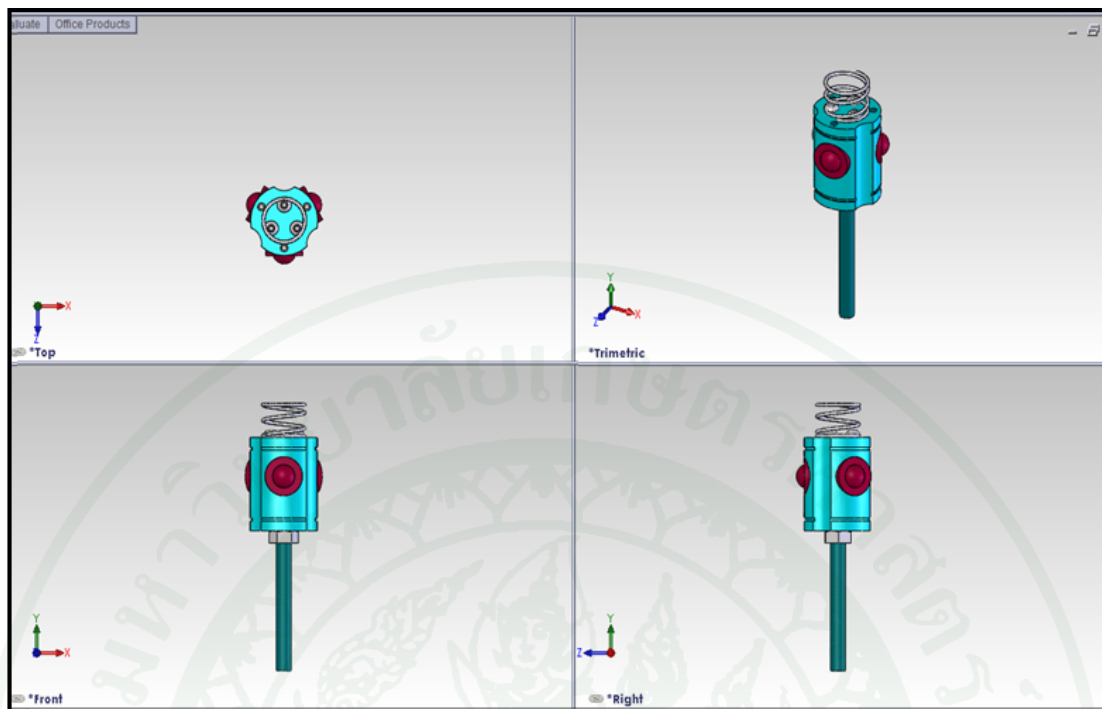
ภาพที่ 12 ส่วนประกอบของชุดเครื่องมือ Borehole Joint Meter แบบเกิด โมเมนต์ที่ปลายด้านบน (Restrained End)

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลี้ยวของการขุด และการเพิ่มกำลังแก่วัดดูค่าขึ้น สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)



ภาพที่ 13 ภาพ 3 มิติ และภาพด้านบน, ด้านหน้า, และด้านขวา ของชุดเครื่องมือ Borehole Joint Meter แบบอิสระและไม่เกิดโมเมนต์ที่ปลายด้านบน (Cantilever End)

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก๊วสคูต้ายัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)



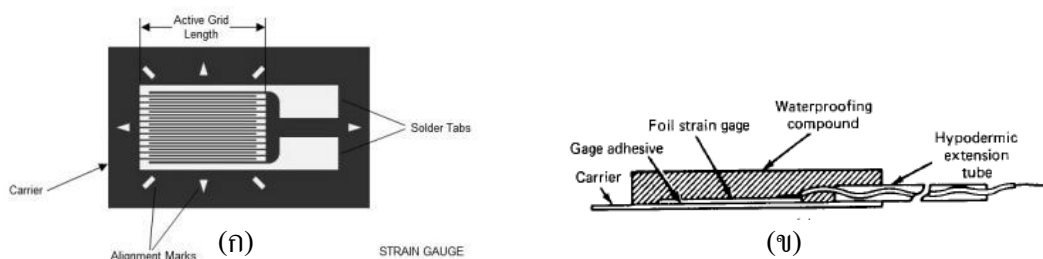
ภาพที่ 14 ภาพ 3 มิติ และภาพด้านบน, ด้านหน้า, และด้านขวา ของชุดเครื่องมือ Borehole Joint Meter แบบเกิด โมเมนต์ที่ปลายด้านบน (Restrained End)

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้วสตุ้ก้ายัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)



ภาพที่ 15 ภาพตัดตามแนวดิ่ง 3 เมตร Borehole Joint Meter (ก) Cantilever End (ข) Restrained End

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้วัสดุค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)



ภาพที่ 16 Uniaxial Bonded Foil Resistance Strain Gauge (ก) รูปด้านบนของ Gage และ (ข) รูปตัดด้านข้างแสดงส่วนประกอบของ Gage

ที่มา: Dunicliff and Green, 1988 และ zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/4176

3.2 การวิเคราะห์ผลการตรวจวัดพฤติกรรม

เมื่อระนาบพืดเคลื่อนตัวส่งผลให้ผนังหลุมเจาะต้นปลายด้านบนของ Borehole Joint Meter และเกิดการโก่งตัวของ Steel Bar และเกิดโมเมนต์ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นใน Steel Bar ซึ่งเปรียบเสมือนคานรับแรงในแนวตั้งฉากกับแนวแกน (Flexural Stress and Strain in Beam) และเกิดการเสยรูปของคาน (Beam Deflection) โดยเครื่องมือ Borehole Joint Meter ถูกออกแบบเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการโก่งตัวของคาน คือ Restrained End Type และ Cantilever End Type โดยมีสมมุติฐานในการวิเคราะห์คือ

- วัสดุ Stainless Steel Bar ต้องมีคุณสมบัติทางอีลาสติก ตาม Hooke's Law
- ค่า Modulus of Elasticity สำหรับแรงกดและแรงดึงมีค่าเท่ากัน
- Stainless Steel Bar ต้องตรง และมีขนาดหน้าตัดคงที่

ค่าหน่วยแรง (Flexural Stress, σ) ใน Steel Bar มีความสัมพันธ์กับค่าโมเมนต์ดัด (Bending Moment, M) ดังสมการที่ (22)

$$\sigma_{\max} = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{S} \quad (22)$$

โดยที่

σ_{\max} = ค่า Flexural Stress สูงสุด

M = โมเมนต์ใน Steel Rebar

c = ระยะจาก Neutral Axis ถึงผิว Steel Rebar หรือเท่ากับรัศมี (r) ของ Steel

Rebar

I = Moment of Inertia ของ Steel Rebar ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pi r^4 / 4$

S = Section Modulus = I/c

ระยะการเคลื่อนตัวและการโก่งตัวของ Steel Bar สามารถวิเคราะห์ได้โดยวิธี Double-Integration Method หรือ Area-Moment Method โดยมีผลลัพธ์ของสมการขึ้นกับลักษณะการโก่งตัวดังนี้

3.2.1. การวิเคราะห์กรณี Cantilever End

การเคลื่อนตัวของ Steel Bar ในกรณีที่ปลายด้านหนึ่งไม่เคลื่อนตัว (Restrained Condition) และปลายอีกด้านหนึ่งมีลักษณะการเคลื่อนตัวแบบ Cantilever จะทำให้เกิดค่าโมเมนต์ใน Steel Bar และที่ปลาย Restrained จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ สมการที่ (23) และมีลักษณะการเคลื่อนตัว ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 การเคลื่อนตัวของ Steel Rebar ในกรณีที่ปลายด้านหนึ่งไม่เคลื่อนตัว (Restrained Condition) และปลายอีกด้านหนึ่งมีลักษณะการเคลื่อนตัวแบบ Cantilever

ที่มา: Dunicliff and Green, 1988 และ zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/4176

$$M_{\max} = -PL \quad (23)$$

และแรงที่กระทำที่ปลาย Steel Rebar ในแนวตั้งฉากกับแกน (P) สามารถคำนวณได้จาก

$$P = \frac{3EI\Delta}{L^3} \quad (24)$$

ดังนั้นจากสมการ 23 จะได้

$$M_{\max} = -\frac{3EI\Delta}{L^2} \quad (25)$$

เมื่อกำหนดให้ $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ จะได้

$$\epsilon_{\max} = -\frac{3r\Delta}{L^2} \quad (26)$$

โดยที่

M_{\max} = ค่าโมเมนต์คดสูงสุด ณ ตำแหน่งปลายที่ไม่เคลื่อนตัว

P = แรงที่กระทำที่ปลาย Steel Rebar ในแนวตั้งฉากกับแกน

L = ความยาวของ Steel Rebar

E = Modulus of Elasticity ของ Steel Rebar และมีค่าเท่ากับ

อัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียด ($E = \frac{\sigma}{\epsilon}$)

I = Moment of Inertia ของ Steel Rebar

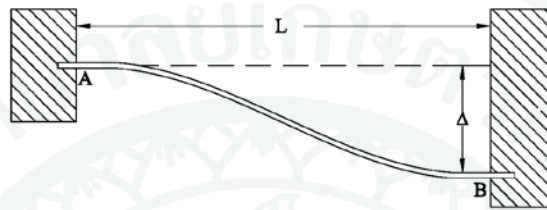
Δ = ระยะการเคลื่อนตัวที่ปลาย Steel Rebar ในแนวแรง P

ϵ_{\max} = ความเครียดสูงสุดที่ผิวของ Steel Rebar ณ ตำแหน่ง

ปลายที่ไม่เคลื่อนตัว

3.2.1. การวิเคราะห์กรณี การวิเคราะห์กรณี Restrained End

การเคลื่อนตัวของ Steel Bar ในกรณีที่ปลายทั้งสองด้านถูกยึดแบบ Restrained Condition ค่าโมเมนต์สูงสุดซึ่งเกิดที่ปลาย Steel Bar เท่ากับสมการที่ (27) และมีลักษณะการเคลื่อนตัว ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของ Steel Rebar ในกรณีที่ปลายทั้งสองด้านถูกยึดแบบ Restrained Condition

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้วสาคูค้ำยัน สำหรับผนังป่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

$$M_{A(\max)} = -\frac{6EI\Delta}{L^2} \quad (27)$$

ดังนั้นจากสมการ (26) จะได้

$$\varepsilon_{\max} = \frac{6r\Delta}{L^2} \quad (28)$$

โดยที่

- $M_{A(\max)}$ = ค่าโมเมนต์ค้ดสูงสุดที่จุด A
- Δ = ระยะการเคลื่อนตัวของปลายจุด B
- L = ความยาวของ Steel Rebar

ϵ_{\max} = ความเครียดสูงสุดที่ผิวของ Steel Rebar ณ ตำแหน่ง
ปลายที่ไม่เคลื่อนตัว

เครื่องมือ Borehole Joint Meter มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดโดย
ความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistance Strain Gage) เพื่อวัดค่าความเครียดจากการโก่งตัว
ของ Steel Bar ที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของเชิงลาดต้นปลายด้านบนของเครื่องมือ Borehole Joint
Meter และเมื่อความเครียด(ϵ) ที่ผิวของ Steel Bar มีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ค่าความต้านทานของ
Electrical Resistance Strain Gage มีการเปลี่ยนแปลงตาม ซึ่งความสัมพันธ์แสดงดังสมการ (29)

$$\frac{\Delta R}{R} = \epsilon \times GF \quad (29)$$

โดยที่

R = ค่าความต้านทานของ Electrical Resistance
Strain Gage

ΔR = ค่าความต้านทานของ Electrical Resistance
Strain Gage ที่เปลี่ยนแปลง

ϵ = ความเครียดที่ผิวของ Steel Bar

GF = ค่า Gage Factor

3.3 การสอบเทียบเครื่องมือวัด Borehole Joint Meter

Borehole Joint Meter เป็นเครื่องมือตรวจวัดที่มีความละเอียดและแม่นยำสูง และค่า
ความเครียดของ Steel Bar (Stainless Steel, Type 304) สามารถนำมาวิเคราะห์หาการเคลื่อนตัวของ
เชิงลาดชนิด Translation Slide และ การเปลี่ยนแปลงความเครียดบริเวณ Shear Zone

คณะวิจัยได้ตรวจสอบคุณสมบัติของ Steel Bar (Stainless Steel, Type 304)
เส้นผ่าศูนย์กลาง 22 mm ที่นำมาใช้ผลิต Borehole Joint Meter โดยนำมาทดสอบกำลังรับแรงดึง
ตามมาตรฐาน มอก.20-2543 พร้อมทั้งติดตั้ง Strain Gage จำนวน 2 ตัว บนผิวของวัสดุ (ภาพที่ 19)

ผลการทดสอบพบว่า Steel Bar มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับมาตรฐาน Stainless Steel ของ ASTM A240/A480 แสดงตารางที่ 5 และภาพที่ 20

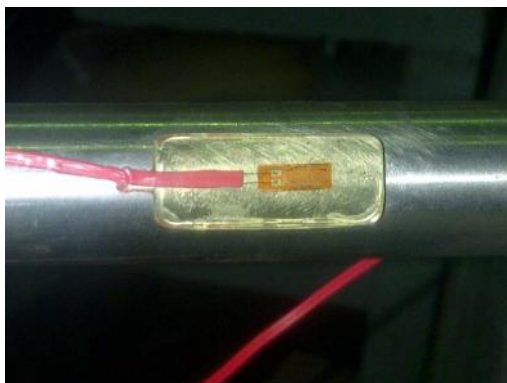
เนื่องจาก Yield Strength (σ_y) ของ Stainless Steel (Type 304) ตามมาตรฐาน ASTM A240/A480 มีค่าเท่ากับ 290 MPa และ ค่า Modulus of Elasticity (E) เท่ากับ 193×10^3 MPa เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าการเคลื่อนตัว (Δ) ของแท่งเหล็กในช่วง Elastic Range ($\sigma < \sigma_y$) ตามสมการที่ (26) สำหรับ Cantilever End และ สมการที่ (28) สำหรับ Restrained End พบว่า อุปกรณ์ Borehole Joint Meter สามารถใช้งานได้โดยที่ Maximum Strain เท่ากับ 1.50×10^{-3} และเกิดการเคลื่อนตัวสูงสุด (Δ) เท่ากับ 50 mm และ 25 mm สำหรับ Cantilever End และ Restrained End, ตามลำดับ ดังสรุปในตารางที่ 6 แต่อย่างไรก็ตามในการใช้งานภาคสนามควรมีตัวคูณลดค่า เพื่อความปลอดภัยของเครื่องมือวัด

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเหล็กตัวอย่างที่นำมาทดสอบและคุณสมบัติของ Stainless Steel (Type 304)

		304 Stainless Steel Standard	Test Results
Ultimate Strength	(MPa)	621	658
Yield Strength at 0.02% ϵ	(MPa)	290	423
Modulus of Elasticity	(MPa)	193×10^3	187×10^3
Elongation at Failure	(%)	55	56

ตารางที่ 6 ขีดจำกัดของ Borehole Joint Meter ชนิด Cantilever End และ Restrained End

	Cantilever End	Restrained End
Maximum Strain	0.0015	0.0015
Maximum Displacement (mm)	50	25



(ก)



(ข)



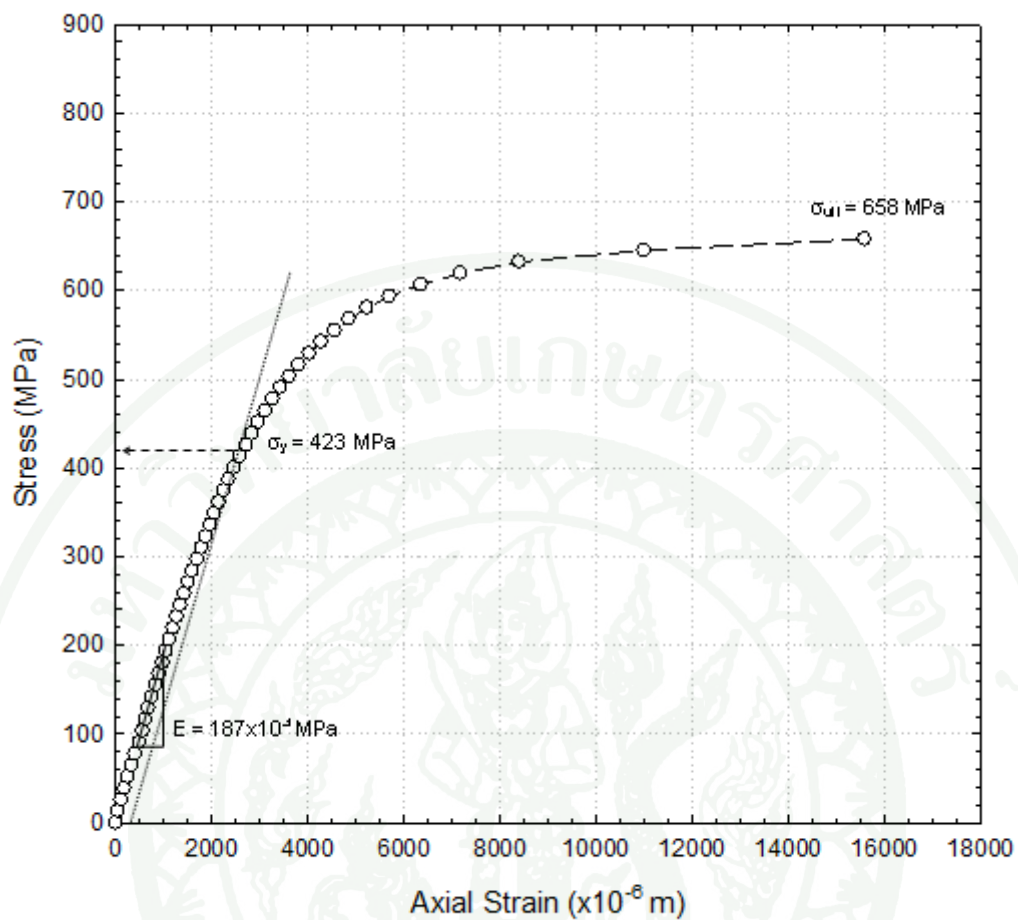
(ค)



(ง)

ภาพที่ 19 ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแท่งเหล็กตัวอย่าง Stainless Steel Bar (ก) ติดตั้ง Strain Gage บนแท่งเหล็กตัวอย่าง (ข) นำเข้าเครื่องทดสอบ (ค) รอยพิบัตินของแท่งเหล็กตัวอย่าง (ง) ตรวจสอบความยาวภายหลังการทดสอบ

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลื้อกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก่วัสดุค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)



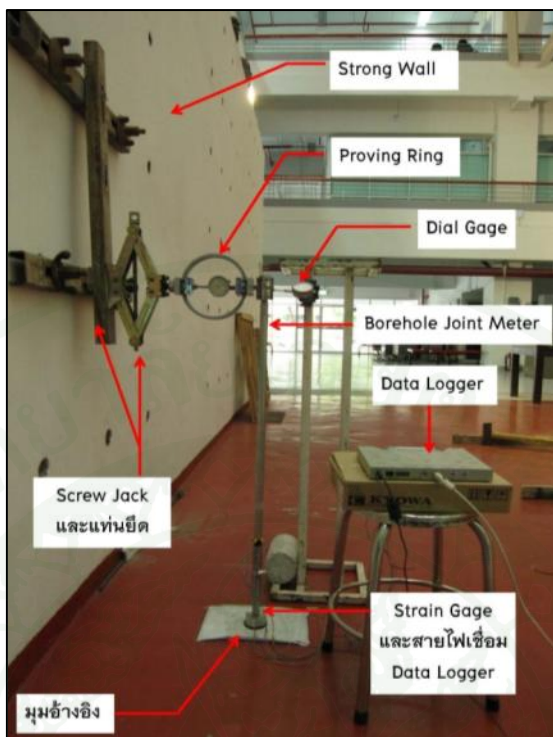
ภาพที่ 20 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแท่งเหล็กตัวอย่าง Stainless Steel Bar

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้ววัสดุค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

3.4 วิธีการสอบเทียบเครื่องมือ

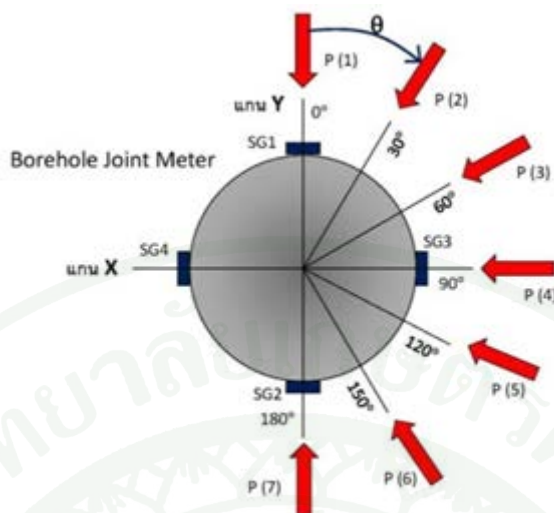
การตรวจวัดการเคลื่อนตัวตามแนวแรง และความเครียดบนผิววัสดุ มีขั้นตอนดังนี้

1. นำเครื่องมือ Borehole Joint Meter ติดตั้งในชุดอุปกรณ์สอบเทียบ ดังภาพที่ 21 โดย กำหนดให้ Strain Gages (SG1) และ (SG2) อยู่ในแนวแกน Y และ (SG3) และ (SG4) อยู่ในแนวแกน X ดังภาพที่ 22
2. ดันปลาย Borehole Joint Meter ให้เกิดแรงกระทำกับในมุม 0 องศา กับแกน Y โดยใช้ Screw Jack ควบคุมปริมาณเคลื่อนตัวทุกๆ 5 mm จนถึงระยะ 40 mm จากนั้นจึงถอยกลับทุกๆ 5 mm จนถึงจุดเริ่มต้น ซึ่งจะใช้อุปกรณ์ Dial Gage ควบคุมปริมาณการเคลื่อนตัว
3. ขณะที่ Screw Jack ดันปลาย Borehole Joint Meter จะเกิดแรงต้านของแท่ง Stainless Steel Bar อ่านค่าแรงต้านจาก Proving Ring และ ขณะเดียวกันจะเกิด Strain ขึ้นที่ปลาย Fixed End ทำการตรวจวัดโดย Strain Gage ซึ่งเชื่อมต่อกับ Data Logger (Kyowa รุ่น PCD-300A และ Data Logger [KU-Type])
4. ปรับมุมที่แรงกระทำกับแกน Y เป็น 30 องศา จนถึงมุม 180 ดังแสดงในภาพที่ 22 และ ดำเนินการซ้ำตามข้อ 2



ภาพที่ 21 ชุดอุปกรณ์สอบเทียบ Borehole Joint Meter

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้ววัสดุค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)



ภาพที่ 22 ทิศทางแรงที่กระทำในระหว่างการสอบเทียบ และตำแหน่งติดตั้ง Strain Gage

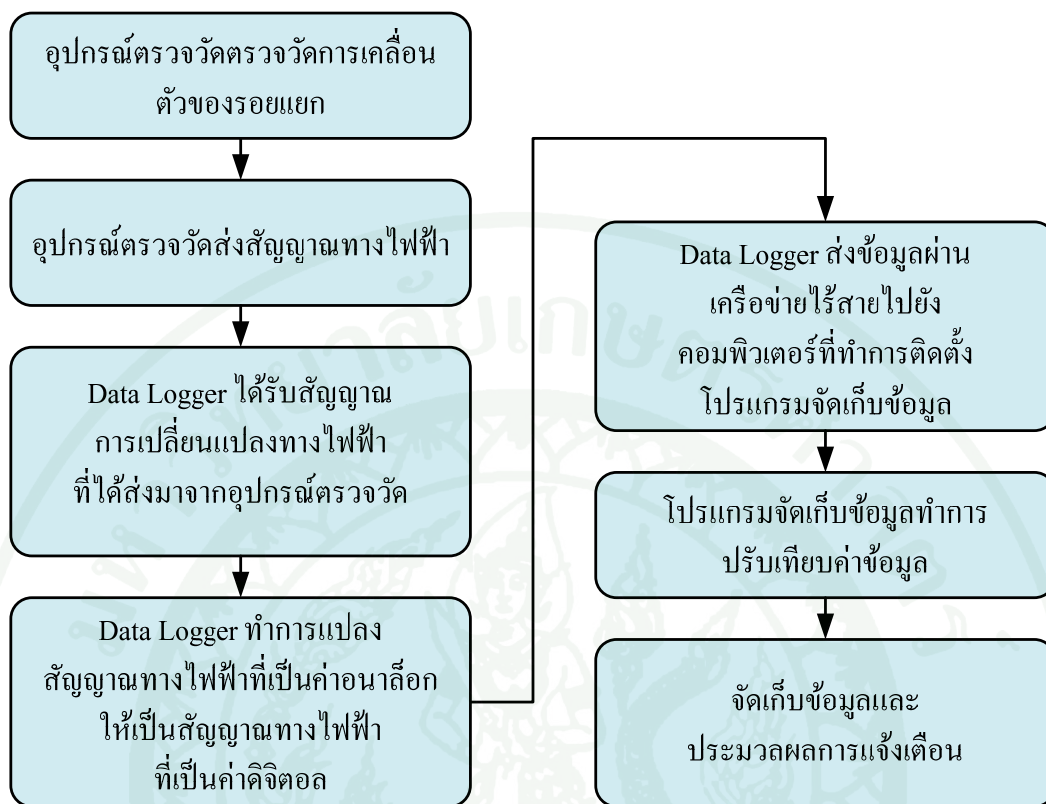
ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้ววัสดุค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

4. การออกแบบและพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลและประมวลผลผ่านเครือข่ายไร้สาย

ระบบจัดเก็บข้อมูลและประมวลผลจะมีหลักการทำงานคือเมื่ออุปกรณ์ตรวจวัดได้ทำการตรวจพบการเคลื่อนตัวของ การเคลื่อนที่ของบริเวณที่ทำการตรวจสอบแล้ว อุปกรณ์ตรวจวัดจะมีการเปลี่ยนค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ส่งไปให้ Data Logger เพื่อให้แปลงค่าสัญญาณทางไฟฟ้าจากค่าที่เป็นอนาล็อกไปเป็นค่าดิจิทัล แล้วส่งข้อมูลที่ได้ผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย ไปยังโปรแกรมจัดเก็บข้อมูลที่พัฒนาขึ้นมาเฉพาะให้ปรับแก้ค่าก่อนที่จะทำการประมวลผลและแจ้งเตือนต่อไป โดยมีแผนผังการทำงานของระบบจัดเก็บข้อมูลดังภาพที่ 23

โดยระบบจัดเก็บข้อมูลและประมวลผลผ่านเครือข่ายไร้สายจะแบ่งเป็น 2 ส่วนที่สำคัญคือ

1. ส่วนที่ติดตั้งในพื้นที่ทำการตรวจสอบ
2. ส่วนที่ติดตั้งในกองวิศวกรรมธรณี



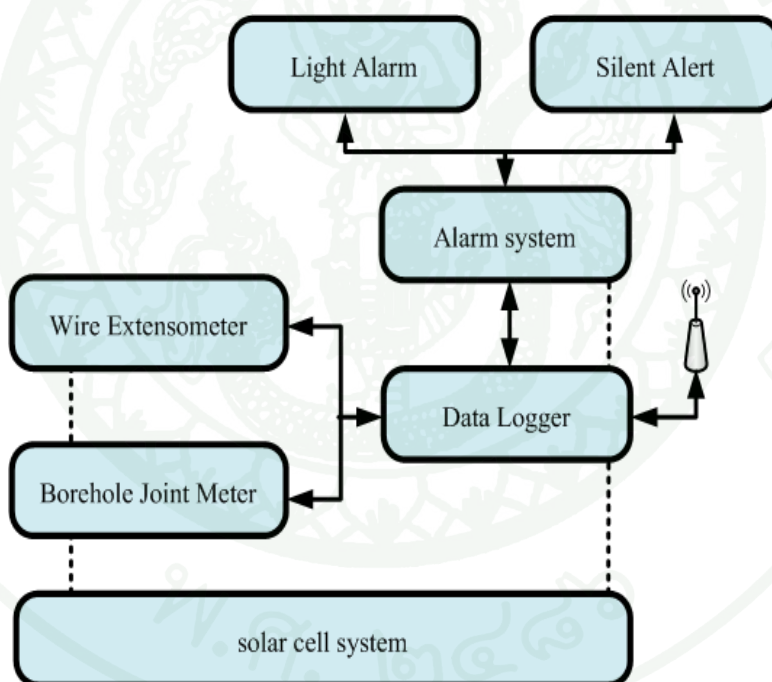
ภาพที่ 23 แผนผังการทำงานของระบบจัดเก็บข้อมูลที่และประมวลผล

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขาด และการเพิ่มกำลังแก้วสุคู้ยั้น สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

1. ส่วนที่ติดตั้งในพื้นที่ทำการตรวจสอบ

โดยระบบส่งสัญญาณจะติดตั้งกับชุดเครื่องมือตรวจวัด ในส่วนนี้จะต้องคำนึงถึงสภาพแวดล้อมในการติดตั้งและแหล่งพลังงานที่จะมาใช้จ่ายไฟให้แก่ระบบ รวมทั้งการที่ระบบจะจัดส่งข้อมูลผ่านระบบไร้สายไปยังส่วนที่ใช้จัดเก็บข้อมูลและประมวลผลข้อมูล ทั้งนี้ในเมื่อเกิดสถานะผิดปกติ จะต้องสามารถแจ้งเตือนสัญญาณได้ถูกต้อง

หลักการทำงานของส่วนนี้จะเป็นการอ่านค่าความต่างศักย์ของตัวรับรู้ที่มีค่าเป็นอนาล็อกมาแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลที่ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อให้ส่งสัญญาณผ่านระบบเครือข่ายไร้สายเพื่อไปจัดเก็บยังส่วนจัดเก็บข้อมูลและประมวลผลต่อไป โดยมีแผนผังการทำงานดังภาพที่ 24



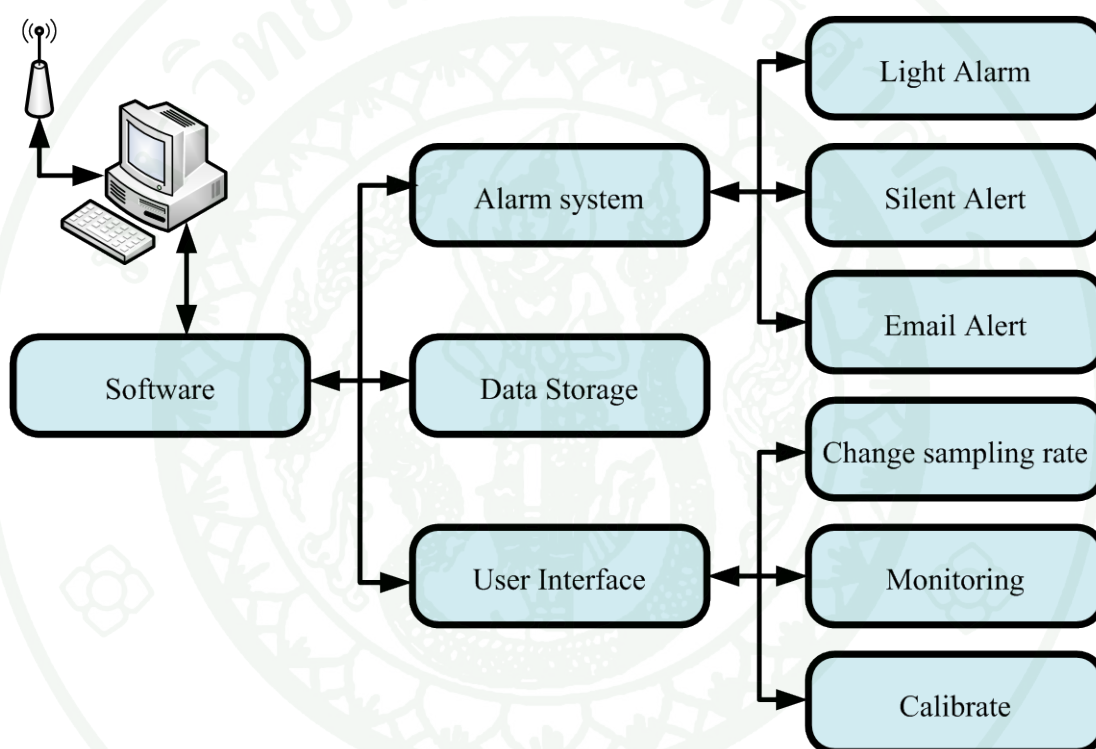
ภาพที่ 24 แผนผังการทำงานของระบบจัดเก็บข้อมูลที่ทำการติดตั้งในพื้นที่ที่ต้องการตรวจสอบ

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก๊วสคูค่ายัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

2. ส่วนที่ติดตั้งในกองวิศวกรรมธรณี

ส่วนนี้จะรับข้อมูลมาจากพื้นที่ทำการตรวจสอบ และนำข้อมูลที่ได้ทำการจัดเก็บและประมวลผลเพื่อแจ้งผลให้ผู้ดูแลระบบต่อไป

หลักการทำงานในส่วนนี้จะรับข้อมูลดิบมาจากพื้นที่ทำการตรวจสอบมาแล้วทำการปรับแต่งค่าให้มีความเที่ยงตรงยิ่งขึ้นเพื่อประมวลผลต่อไป โดยมีแผนผังการทำงานดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 แผนผังการทำงานของ คอมพิวเตอร์ ที่ทำการรับข้อมูลอยู่ที่กองวิศวกรรมธรณี

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้ววัสดุค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

4.1 องค์ประกอบและรายละเอียดเครื่องมือ

4.1.1 Data Logger

Data Logger(ภาพที่ 26) คือ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเก็บบันทึกข้อมูลที่เป็นสัญญาณชนิดต่างๆ โดย Data Logger จะสามารถเก็บค่าที่วัดได้ของสัญญาณทางไฟฟ้าและส่งสัญญาณไปยังระบบจัดเก็บข้อมูล ตามเวลาที่กำหนดไว้โดยอัตโนมัติ โดยที่ Data Logger จะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่อยู่ 2 ส่วนคือ Microcontroller และ Signal Processing



ภาพที่ 26 กล่องอุปกรณ์ Data Logger ที่ได้พัฒนาขึ้น

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขาด และการเพิ่มกำลังแก๊สคู่ค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

4.1.1.1 Microcontroller และ Signal Processing

เนื่องจากในปัจจุบันไมโครคอนโทรลเลอร์มีความสามารถมากขึ้นจึงสามารถรวมส่วนระบบรับส่งสัญญาณและระบบประมวลผลมาไว้ในไอซีตัวเดียวได้ จึงทำให้ส่วนประมวลผลสัญญาณมารวมอยู่บนไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้สะดวกต่อการใช้งานและลดจำนวนอุปกรณ์

ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น MSP430F47197 จากผู้ผลิต Texas Instruments (ภาพที่ 27) เป็นหนึ่งในตัวเลือกชุดพัฒนาชุดอุปกรณ์ตรวจวัด เนื่องมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นนี้มีอัตราการใช้พลังงานที่ต่ำ และมีจำนวนช่องสัญญาณการแปลงสัญญาณอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัลที่เพียงพอต่อการใช้งาน และยังสามารถวัดสัญญาณอนาล็อกที่มีขนาดน้อยๆ ได้ดี

ในโครงการนี้ต้องการจำนวนช่องสัญญาณอนาล็อกอย่างน้อย 6 ช่องสัญญาณ



ภาพที่ 27 IC รุ่น MSP430F47197 จากผู้ผลิต Texas Instruments

ที่มา: <http://www.ti.com/graphics/folders/partimages/MSP430F47197.jpg>



ภาพที่ 28 แผงวงจรต้นแบบของอุปกรณ์ Data Logger

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก๊วสดูค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

4.1.1.2 ช่องการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์การตรวจวัดและระบบส่งสัญญาณไร้สาย

ช่องการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์การตรวจวัด สามารถเชื่อมต่อได้ทั้งหมดจำนวน 8 ช่องสัญญาณ โดยที่ช่องสัญญาณที่ 0-5 จะเป็นช่องสัญญาณที่วัดความต่างศักย์ทางแรงดันไฟฟ้าในช่วง -30 mV ถึง 30 mV ส่วนในช่องสัญญาณช่องที่ 6 จะวัดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าในช่วง $0 - 5\text{ V}$ พร้อมทั้งช่องสัญญาณสำหรับตรวจวัดพลังงานของ Battery และระบบส่งสัญญาณไร้สาย



ภาพที่ 29 แสดงการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจวัด และไฟเลี้ยงของ Data Logger

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก่วัดสุก้ายัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

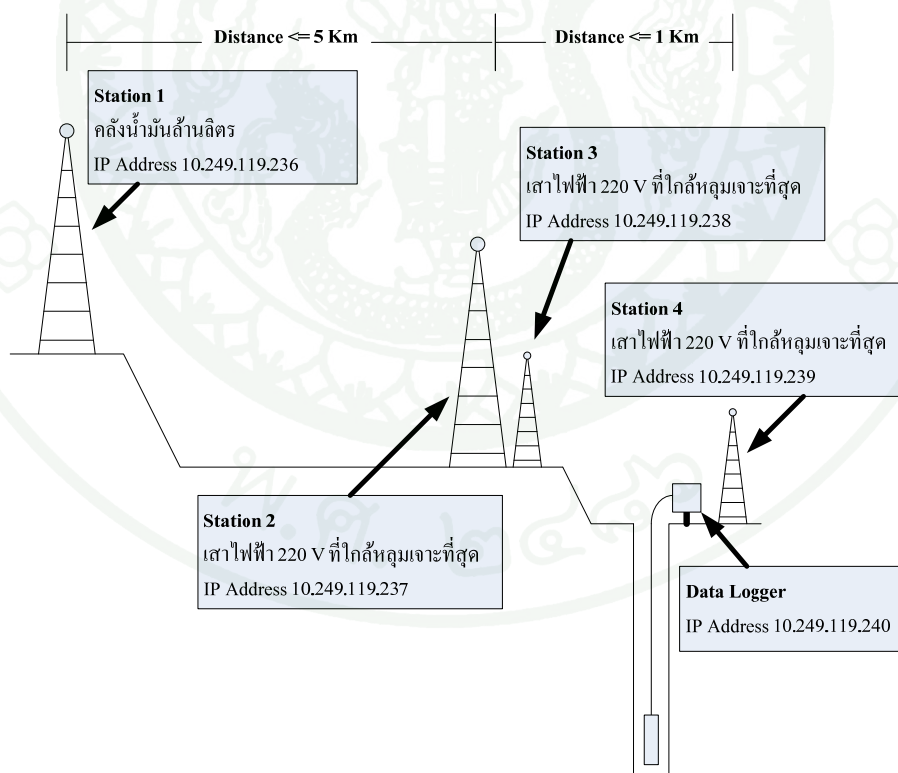
4.1.2 ระบบรับส่งสัญญาณเครือข่ายไร้สาย

สำหรับระบบรับส่งสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลไปยัง คอมพิวเตอร์ จะใช้ระบบการรับส่งสัญญาณไร้สายเข้ามาช่วยในการส่งสัญญาณ เพื่อความสะดวกในการจัดเก็บข้อมูล เนื่องจากทางกรไฟฟ้า แม้จะมีเครือข่ายแลนอยู่รอบๆบริเวณปากเหมืองอยู่แล้ว แต่ในพื้นที่ทำการตรวจสอบนั้นไม่มีเครือข่ายแลนติดตั้งเนื่องจากในพื้นที่ทำการตรวจสอบนั้นไม่สามารถเดินเครือข่ายแลนได้

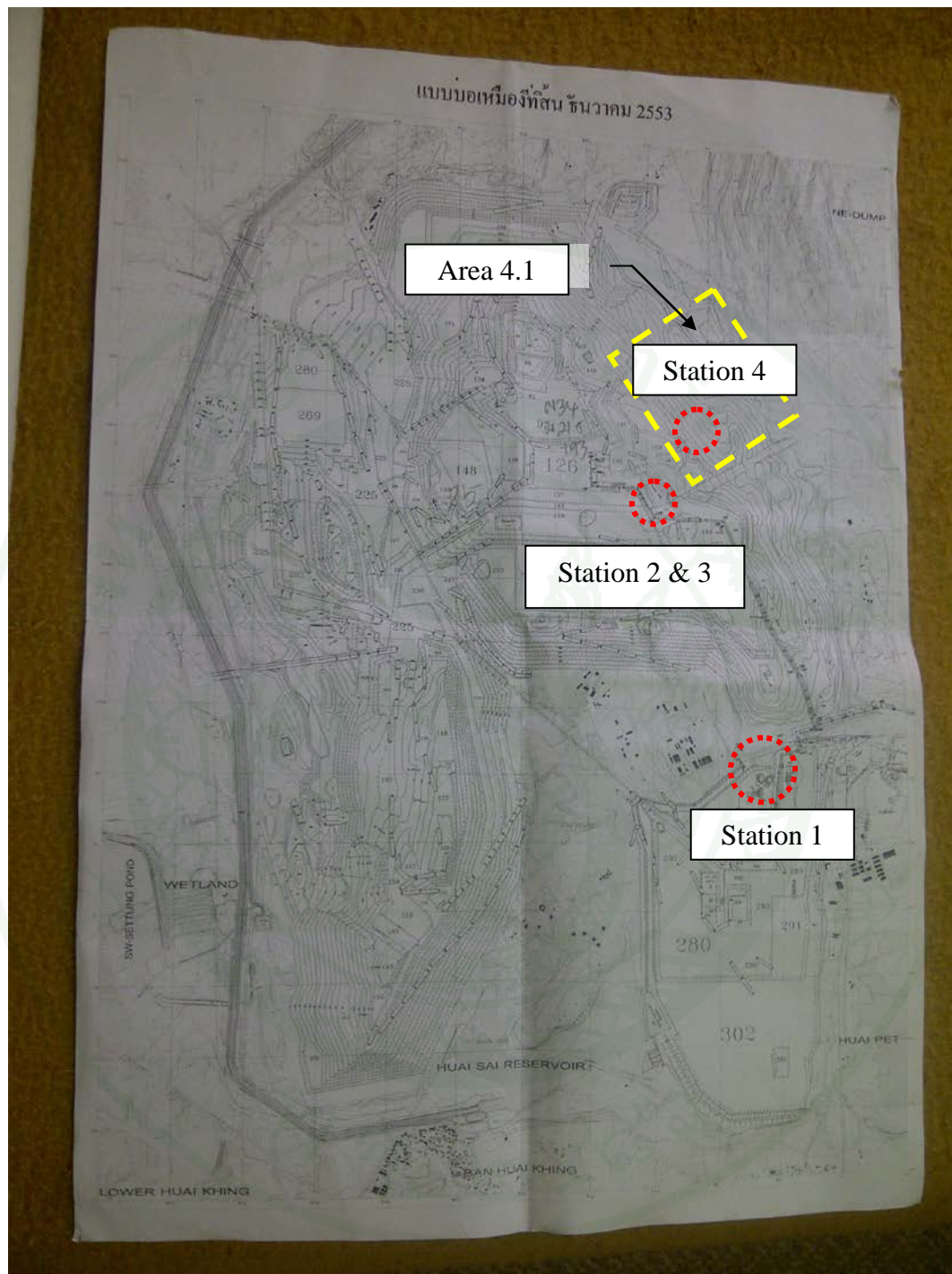
จึงได้ใช้เครือข่ายไร้สายที่มีกำลังส่งระยะไกล เพื่อรับส่งสัญญาณเข้าไปในพื้นที่ทำการตรวจสอบ จึงทำให้สะดวกต่อการใช้งานและจัดเก็บข้อมูล โดยที่ ระยะห่างของ Station1 กับ Station2 จะมีระยะห่างไม่เกิน 5 กิโลเมตร และระยะห่างของ ของ Station3 กับ Station4 จะมีระยะไม่เกิน 1 กิโลเมตร โดยที่ Station2 กับ Station3 อาจจะเป็นเสาสัญญาณเสาเดียวกันก็ได้ ควรมีระยะห่างไม่เกิน 10 เมตร ซึ่งจะแสดงไว้ในภาพที่ 30 และภาพที่ 31

Station1, Station2 จะใช้การส่งสัญญาณแบบ Point to Point โดยใช้ Ubiquiti NanoStation M5 Outdoor Wireless (ภาพที่ 32) ที่มีคุณสมบัติส่งสัญญาณที่ความถี่ 5 GHz ที่มีความสามารถในการส่งสัญญาณเป็นระยะทาง 5 กิโลเมตร

Station3, Station4 จะใช้การส่งสัญญาณแบบ Point to Multi Point โดยใช้ EnGenius ENH-200 (ภาพที่ 33) มีคุณสมบัติส่งสัญญาณที่ความถี่ 2.4 GHz ที่มีความสามารถในการส่งสัญญาณเป็นระยะทาง 1 กิโลเมตร



ภาพที่ 30 ระยะห่างและตำแหน่งโดยประมาณของเสาสัญญาณเครือข่ายไร้สาย



ภาพที่ 31 ตำแหน่งโดยประมาณของสถานที่ติดตั้งเสารับส่งสัญญาณเครือข่ายไร้สาย

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก่วัดดูค่าขึ้น
สำหรับบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)



ภาพที่ 32 Ubiquiti NanoStation M5 Outdoor Wireless

ที่มา: <http://sys2u.com/images/20100617-121351-m.gif>



ภาพที่ 33 EnGenius ENH-200

ที่มา: http://www.spekit.com/shop/s/spekit/img-lib/spd_20110509195605_b.jpg

4.1.3 Solar Cell System (Power Supply Unit)

Power Supply Unit ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้เลือกระบบพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ซึ่งไม่จำเป็นจะต้องเปลี่ยน Battery ถ้าเกิดในวันที่สภาพอากาศไม่ดีไม่มีแสงแดด จะสามารถสำรองระบบไฟฟ้าให้ใช้ได้ต่อเนื่องได้ประมาณ 3 วัน โดยที่จะต้องรีบไปทำการเปลี่ยนแบตเตอรี่ก่อนที่จะหมด

การวัดการกินกระแสไฟฟ้าของระบบตรวจวัดและรับส่งสัญญาณไร้สาย จะได้กระแสไฟที่ 0.6 A แต่เพื่อความปลอดภัยให้เพื่อวงจรกินกระแสเป็น 1 A และแบตเตอรี่ที่ใช้จ่ายแรงดันไฟประมาณ 12 V

จากการที่เลือกอัตราการกินกระแสของระบบตรวจวัดและส่งสัญญาณไร้สายเป็น 1 A เพื่อให้ระบบสามารถทำงานอยู่ได้เป็นระยะเวลา 3 วันหรือ 72 ชั่วโมง จึงจำเป็นต้องขนาดความจุของแบตเตอรี่มีขนาด 12V 72 Ah หรือมากกว่า เพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งานของระบบ

ในส่วนการเลือกขนาดการผลิตกระแสไฟของแผง Solar Cell จะเลือกโดยพิจารณาขนาดกำลังการผลิตกระแสไฟของแผง Solar Cell โดยการดูอัตราการกินของกระแสสูงสุดในที่งานวิจัยนี้คือ 1 A และเลือกอัตราการผลิตกระแสไฟให้มีค่ามากกว่าอัตราการกินกระแสสูงสุดของวงจร เพื่อให้สามารถเก็บประจุเข้าแบตเตอรี่ได้พอเพียงพอต่อการใช้งานอย่างต่อเนื่องทั้งเวลากลางวันและกลางคืน โดยที่งานวิจัยนี้ได้เลือกแผง Solar Cell (ภาพที่ 34) ที่มีกำลังการผลิตพลังงานที่ 80 W 12 V ที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าเมื่อได้รับแสงแดดเต็มที่ประมาณ 6.67 A



ภาพที่ 34 ชุด Solar Cell System ที่ก่อนการทำการติดตั้ง

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการชุด และการเพิ่มกำลังแก๊วดูดซับ
สำหรับผนังป่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

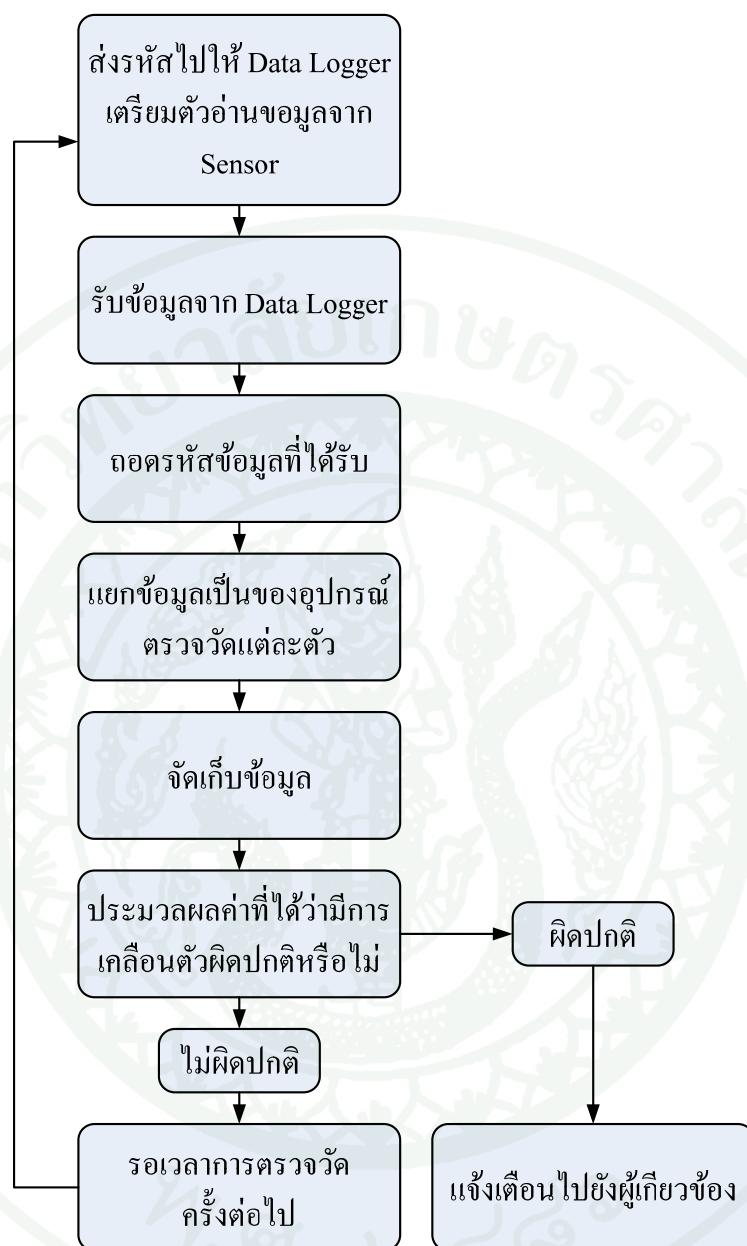
4.1.4 Software คอมพิวเตอร์

Software คอมพิวเตอร์ ที่ได้พัฒนาขึ้นจะต้องทำการติดตั้งในคอมพิวเตอร์ที่สามารถเปิดได้ตลอด 24 ชั่วโมง และเชื่อมต่อกับระบบ Network และสามารถเข้าถึง Data Logger ด้วย Software ที่พัฒนาขึ้น โดย Software จะมีหลักการทำงานคือเมื่อ Data Logger ได้ส่งข้อมูลมา จะทำการถอดรหัสที่ได้รับเป็นค่าข้อมูลของอุปกรณ์ตรวจวัดแต่ละตัวแล้วไปปรับแก้ค่าให้มีความเที่ยงตรงแล้วทำการจัดเก็บข้อมูลและประมวลผลว่ามีเหตุการณ์ผิดปกติหรือไม่ โดยมีแผนผังการทำงานดังภาพที่ 35 ในส่วนการแจ้งเตือนเมื่อเกิดเหตุการณ์ไม่ปกติไปยังผู้ดูแล จะมีทั้งทาง Email, Sms, สัญญาณเสียง และ สัญญาณไฟกระพริบ โดย Software คอมพิวเตอร์ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ

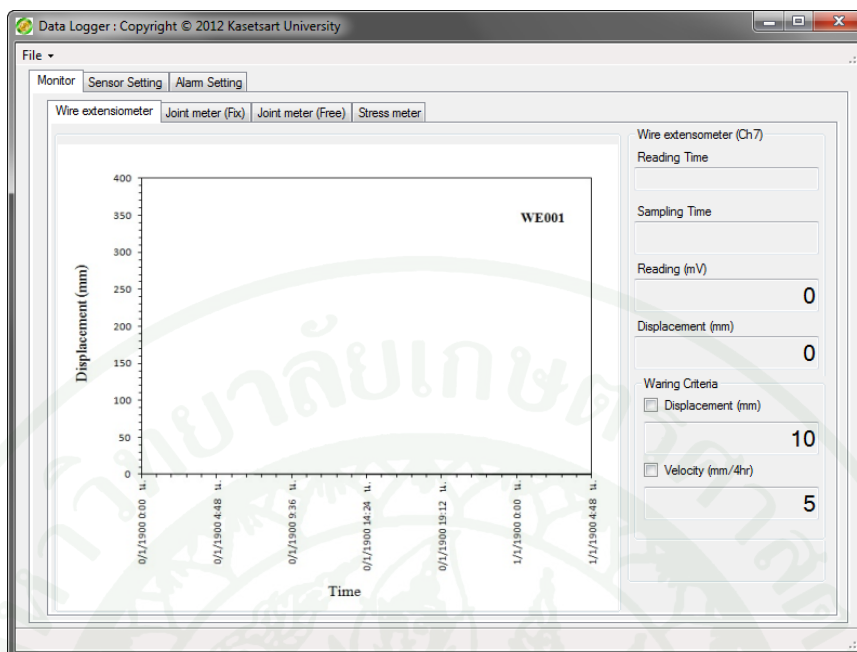
1. ส่วนแสดงผลข้อมูล เป็นส่วนที่แสดงผลข้อมูลที่ได้มาจาก Sensor ต่างๆ เพื่อมาแสดงผลและปรับแต่ง Sampling Time ในการวัดข้อมูลของ Sensor ทุกตัวหลังจากการปรับแก้ค่าให้มีความถูกต้องเที่ยงตรงยิ่งขึ้นแล้ว โดยค่าที่แสดงที่หน้าตาจะแสดงเป็นค่าการเคลื่อนตัวของรอยแยกที่ทำการตรวจสอบ ซึ่งจะมีรายละเอียดดังภาพที่ 36

2. ส่วนตั้งค่า IP Address ของ Sensor และคู่ว่าที่ Sensor ส่งข้อมูลมาก่อนการปรับแก้ค่าให้มีความเที่ยงตรงยิ่งขึ้น ซึ่งจะมีรายละเอียดดังภาพที่ 37

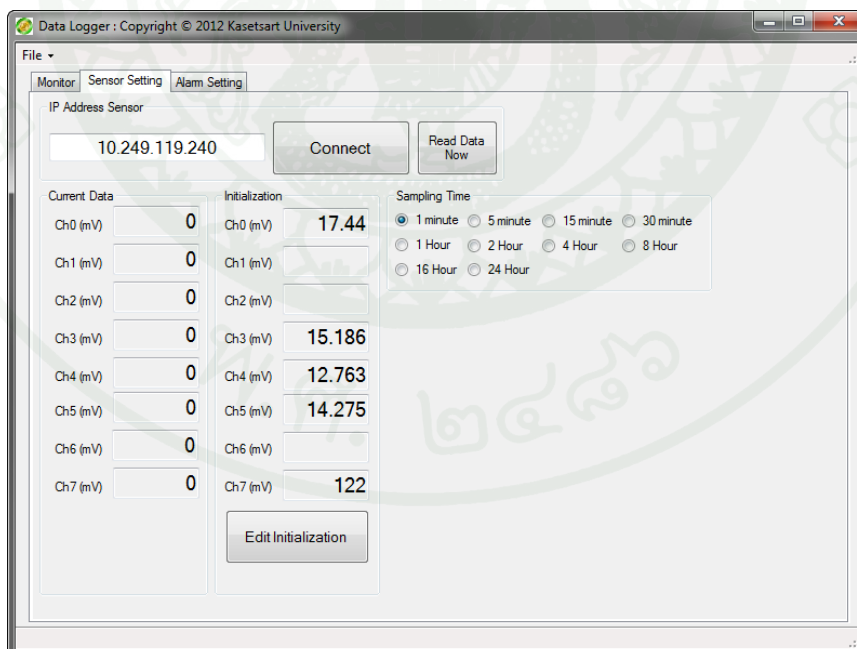
3. ส่วนตั้งการแจ้งเตือน โดยที่สามารถตั้งค่า Email ตั้งค่าการส่ง SMS และการตั้งค่าเวลาในการแจ้งเตือนซึ่งจะมีรายละเอียดดังภาพที่ 38



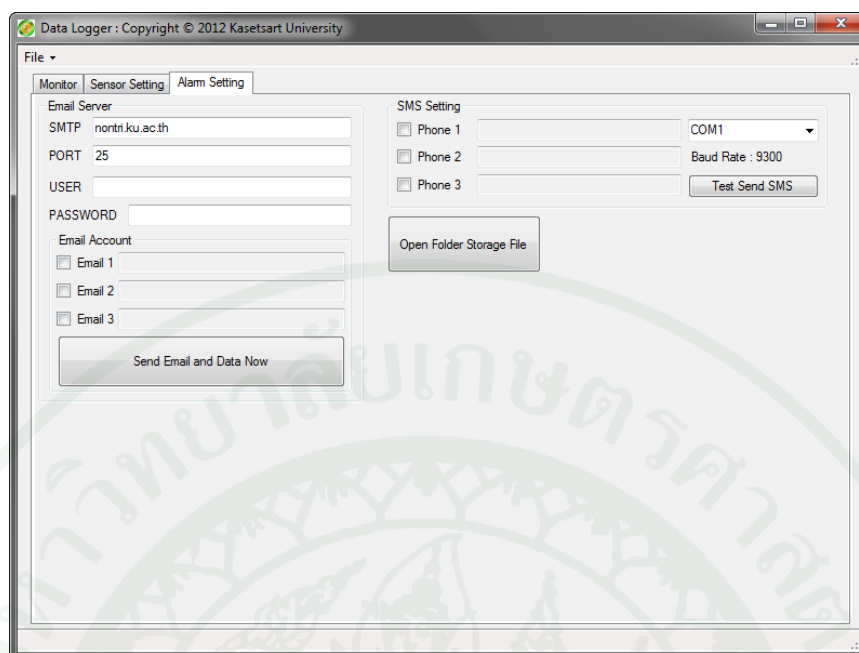
ภาพที่ 35 แผนผังการทำงานของโปรแกรมจัดเก็บและประมวลผลข้อมูล



ภาพที่ 36 แสดงหน้าต่างแสดงผลข้อมูลที่ได้จาก Sensor หลังจากการปรับแก้ค่าแล้วของโปรแกรม Data Logger ที่ได้พัฒนาขึ้น



ภาพที่ 37 ส่วนตั้งค่า IP Address ของ Sensor ในโปรแกรม Data Logger ที่ได้พัฒนาขึ้น



ภาพที่ 38 หน้าต่างการตั้งค่าการแจ้งเตือนของโปรแกรม Data Logger ที่ได้พัฒนาขึ้น

4.2 การทดสอบระบบส่งสัญญาณไร้สายและเก็บข้อมูล

การทดสอบระบบส่งสัญญาณนั้นจะทำการทดสอบโดยการจำลองสถานที่ที่มีระยะทางใกล้เคียงกับสถานที่จริงเพื่อตรวจสอบ และทำการทดลองส่งสัญญาณภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน โดยการเขียนโปรแกรมให้ Data logger ทดลองส่งข้อมูลมา โดยไม่ต้องต่ออุปกรณ์ตรวจวัด เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดมีขนาดใหญ่ทำให้ไม่สะดวกให้การเคลื่อนย้าย

สถานที่ทำการวิจัย

ชั้น 8 ตึกวิศวกรรมศาสตร์ 60 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์, ชั้น 7 ตึกวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิต
แห่งประเทศไทย

ระยะเวลาทำการวิจัย

การวิจัยเริ่มตั้งแต่ เดือนพฤษภาคม 2553 สิ้นสุดเดือนเมษายน 2555

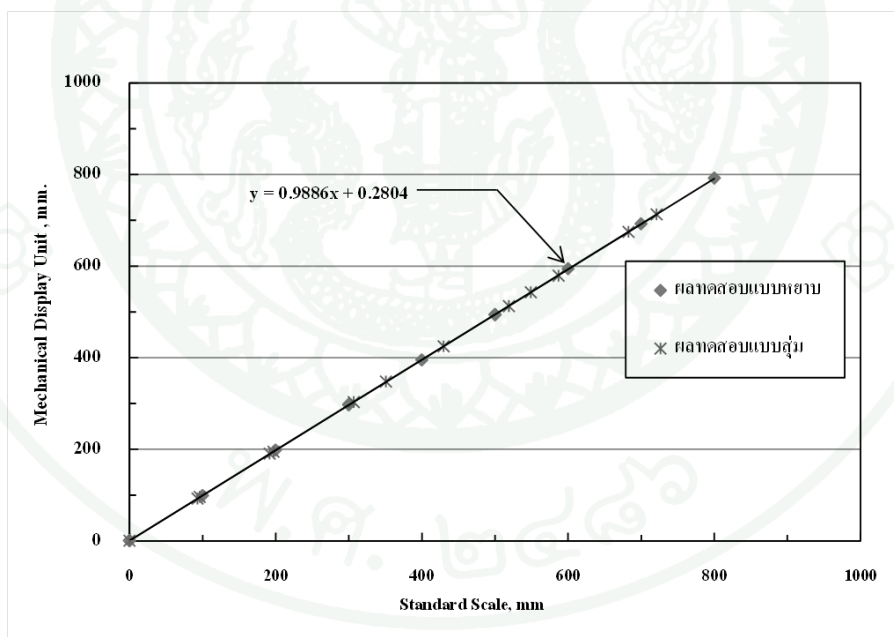


ผลและวิจารณ์

1. ผลการสอบเทียบเครื่องมือ Wire Extensometer

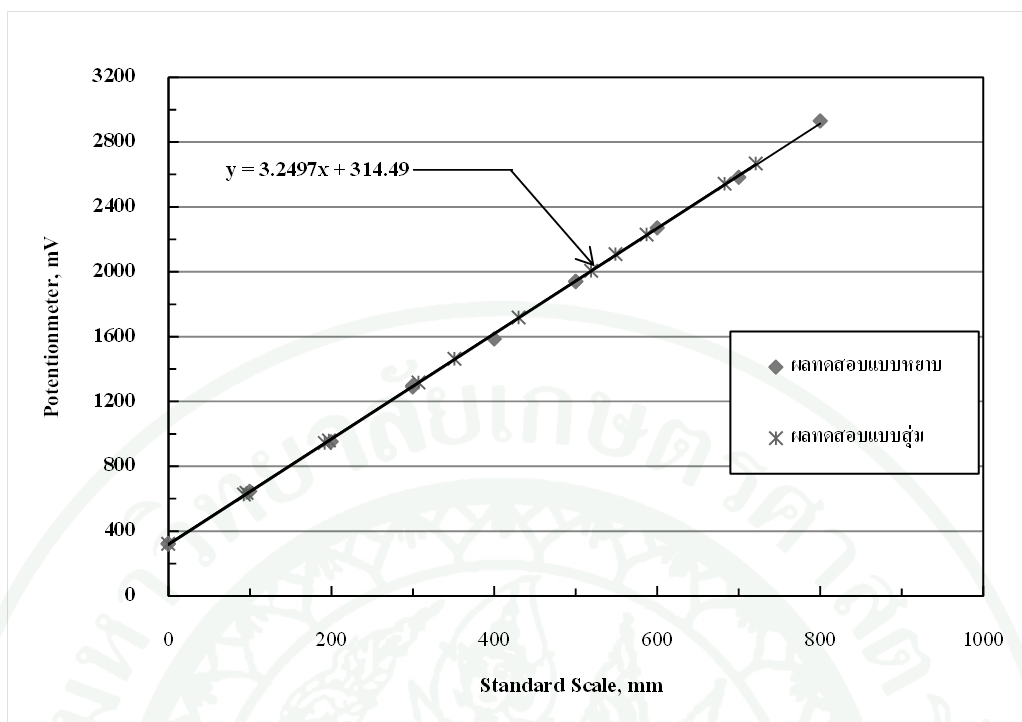
เครื่องนับรอบการหมุนมีความสามารถวัดการเคลื่อนตัวได้ระดับ 0.01 มิลลิเมตร และการเคลื่อนตัวของเส้นลวดมีความสัมพันธ์กับระยะสเกลมาตรฐานเป็นลักษณะเชิงเส้นตรง ผลการสอบเทียบแบบหยาบให้ผลความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 8.8 มิลลิเมตร หรือ $\pm 1.10\%$ ส่วนการสอบเทียบแบบส้อม(แบบละเอียด) ให้ผลความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 9.8 มิลลิเมตร หรือ $\pm 1.28\%$ ดังแสดงในภาพที่ 39

สำหรับชุดอุปกรณ์แสดงผลของ Data Logger มีความสามารถวัดการเคลื่อนตัวได้ระดับ 0.3 มิลลิเมตร โดยผลที่ได้มีความสัมพันธ์กับระยะสเกลมาตรฐาน (การเคลื่อนตัวของเส้นลวด) เป็นลักษณะเชิงเส้นตรง และการสอบเทียบแบบหยาบให้ผลความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 4.4 มิลลิเมตร หรือ $\pm 0.55\%$ ส่วนการสอบเทียบแบบส้อม (แบบละเอียด) ให้ผลความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.6 มิลลิเมตร หรือ $\pm 0.08\%$ ดังแสดงในภาพที่ 40



ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวของลวดและค่าที่อ่านจากเครื่องนับรอบการหมุน

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลี้ยวของการขุด และการเพิ่มกำลังแก่วัสดุค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)



ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่าง Read Out Unit และ ระยะการเคลื่อนตัวของลวด

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลื้อยของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้ววัสดุค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

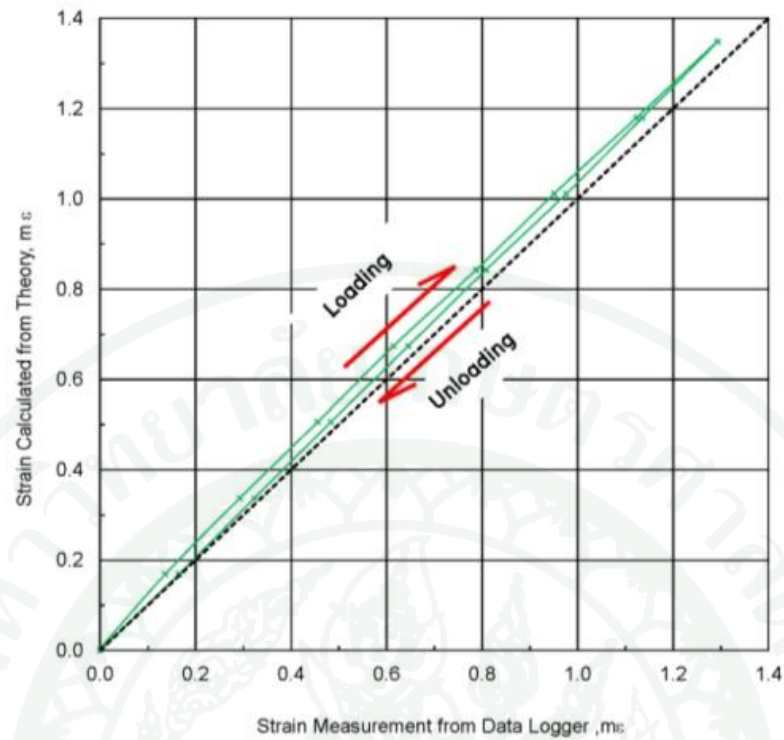
2. ผลการสอบเทียบเครื่องมือ Borehole Joint Meter

การสอบเทียบเคลื่อนตัวตามแนวแรง และความเครียดบนแท่งวัสดุ Stainless Steel Bar ที่นำมาประกอบกับปลายชนิด Cantilever End (J1) และ Fixed End (J2) ได้ผลดังนี้

2.1. ผลการเปรียบเทียบการวัดค่า Strain ที่ได้จากการติดตั้ง Strain Gage บนแท่ง Stainless Steel Bar กับการคำนวณทางทฤษฎี Cantilever End พบว่าค่าที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงทฤษฎี ดังภาพที่ 41 และ ภาพที่ 42 สำหรับ J1 และ J2, ตามลำดับ โดยแท่งเหล็ก J1 และ J2 สามารถหาความสัมพันธ์ดังสมการที่ (30) และ (31), ตามลำดับ

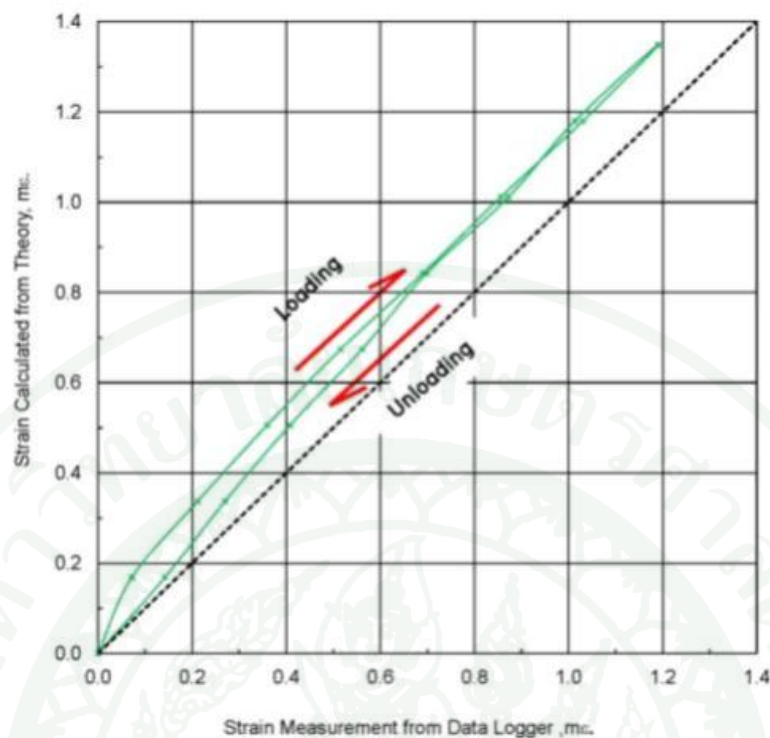
$$\epsilon_{\text{theory}} = 1.052 \epsilon_{\text{measurement}} \quad (30)$$

$$\epsilon_{\text{theory}} = 1.181 \epsilon_{\text{measurement}} \quad (31)$$



ภาพที่ 41 ผลเปรียบเทียบการวัดค่าความเครียดของแท่งเหล็ก J1 (Kyowa) กับทฤษฎี Cantilever End

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้วสุดค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

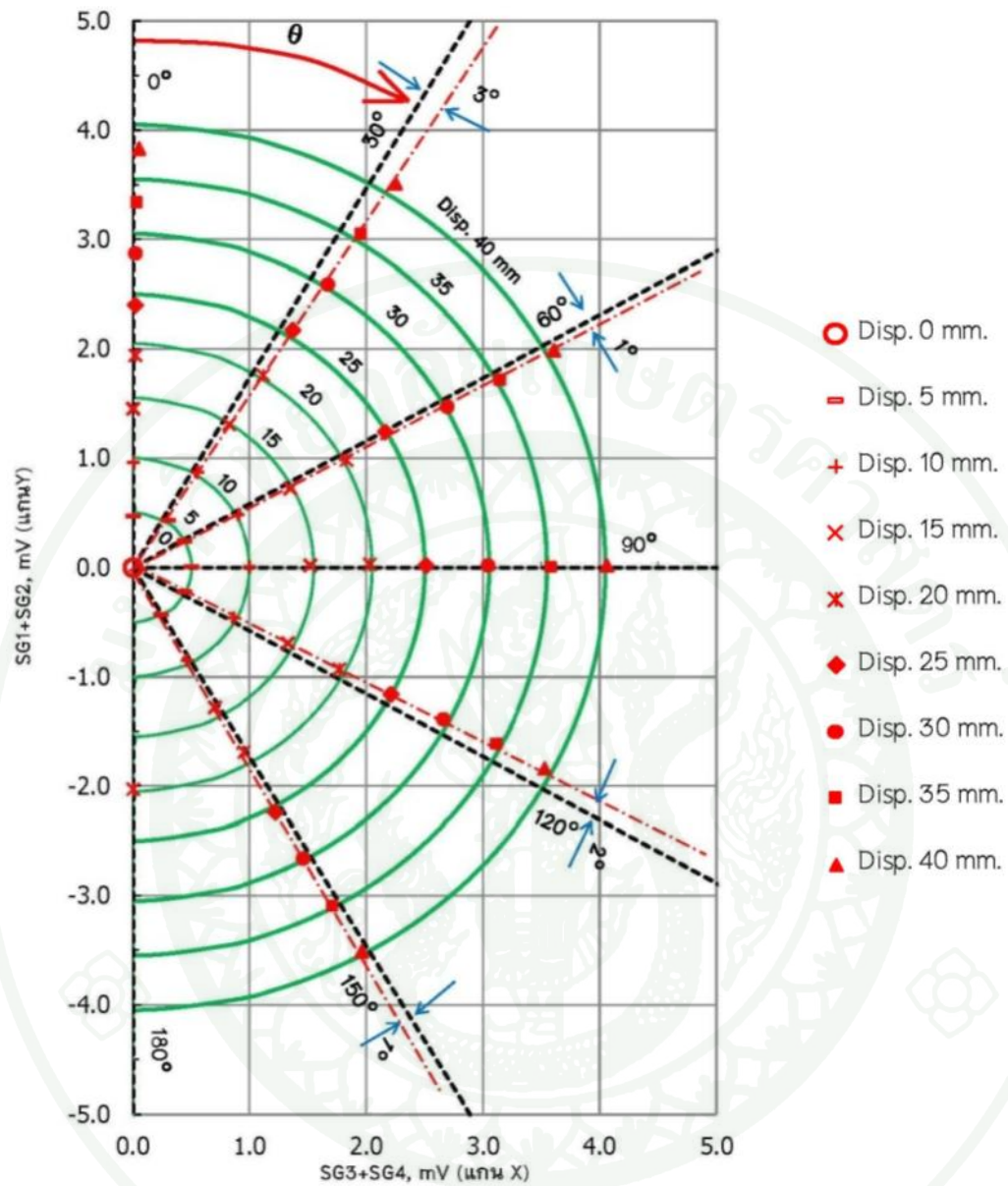


ภาพที่ 42 ผลเปรียบเทียบการวัดค่าความเครียดของแท่งเหล็ก J2 (Kyowa) กับทฤษฎี Cantilever End

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้วชุดค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

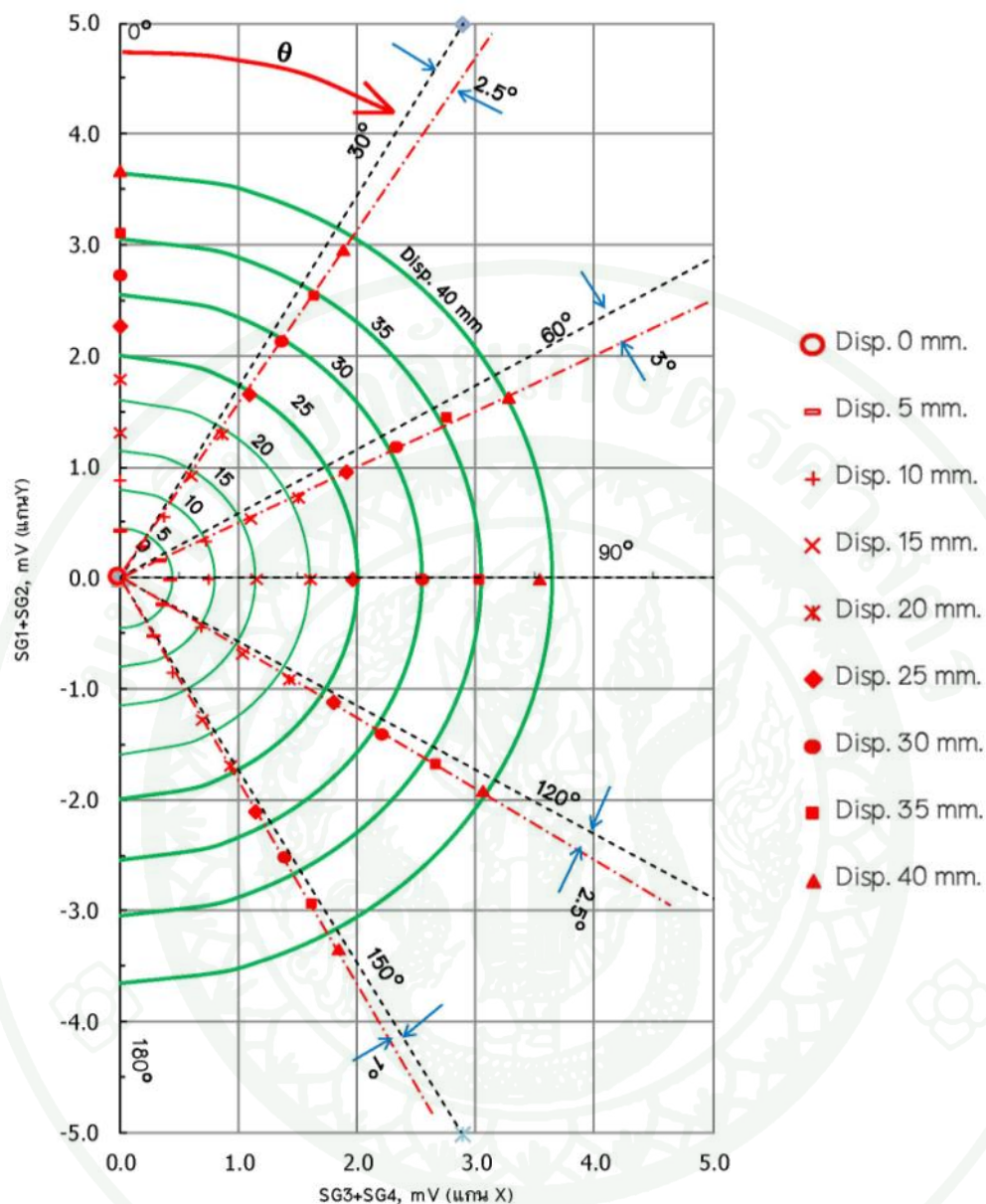
2.2. ผลการสอบเทียบอุปกรณ์แสดงผล Data Logger สามารถวัดค่าการเปลี่ยนแปลงค่า Strain ได้ 0.01 mV ซึ่งเทียบเท่ากับการเคลื่อนตัวในแนวราบที่ปลายด้านบนเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร

2.3. ค่า Strain ที่ได้ในแกน X (SG3+SG4) และแกน Y (SG1+SG2) สามารถใช้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวและทิศทางการเคลื่อนตัวของแรงกระทำได้ สำหรับแท่งเหล็ก J1 นั้น มีความคลาดเคลื่อนของทิศทางในช่วง $\pm 1-3$ องศา (ภาพที่ 43) และมีความคลาดเคลื่อนของระยะการเคลื่อนที่ในแนวราบเฉลี่ย 1.1 มิลลิเมตรหรือ $\pm 2.75\%$ และแท่งเหล็ก J2 นั้น มีความคลาดเคลื่อนของทิศทางในช่วง $\pm 1-3$ องศา (ภาพที่ 44) และมีความคลาดเคลื่อนของระยะการเคลื่อนที่ในแนวราบเฉลี่ย 3.75 มิลลิเมตรหรือ $\pm 9.37\%$ (ภาพที่ 44)



ภาพที่ 43 ผลสอบเทียบของอุปกรณ์ Analog to Digital Converter กับระยะการเคลื่อนตัวของปลาย Borehole Joint Meter J1 ที่มุม 0 – 180 องศา

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลื้อยของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้ววัสดุค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)



ภาพที่ 44 ผลสอบเทียบของอุปกรณ์ Analog to Digital Converter กับระยะการเคลื่อนตัวของปลาย Borehole Joint Meter J2 ที่มุม 0 – 180 องศา

ที่มา: โครงการวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเสื่อของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้วสคูค้ำยัน สำหรับผนังบ่อเหมือง บริเวณ Area 4.1 (2555)

3. ผลการทดสอบส่งสัญญาณและเก็บข้อมูล

ผลการทดสอบ Ping คอมพิวเตอร์ ไปยังตัว Data Logger โดยติดตั้งทั้งระบบผ่านระบบของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จะเห็นได้ว่าสามารถทดสอบรับส่งข้อมูลขึ้นพื้นฐาน โดยการใช้คำสั่ง Ping ใน Windows ได้ โดยไม่มีการสูญหายของข้อมูล จะเห็นได้ดังภาพที่ 45

ในสวนการจำลองให้ Data Logger ส่งข้อมูลที่สมมุติขึ้นมาเพื่อทดสอบระบบมาจัดเก็บยังคอมพิวเตอร์สามารถเก็บบันทึกข้อมูลได้ถูกต้องเป็นไปตามที่ Data Logger ได้ทำการส่งมาดังภาพที่ 46 และภาพที่ 47

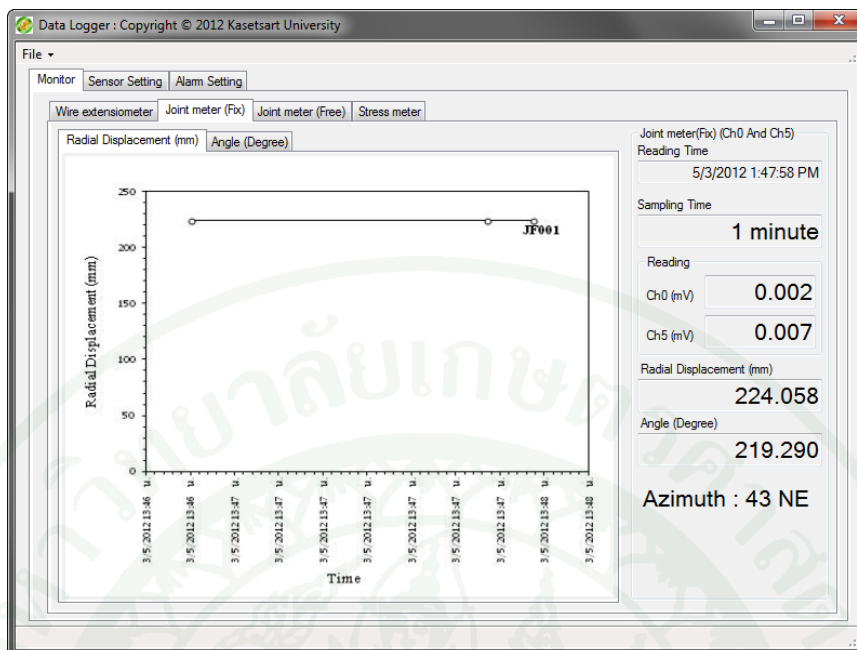
และในส่วนการส่ง Email แจ้งเตือนนั้นได้ทำการทดสอบให้แจ้งเตือนไปยัง Email โดยทำการตั้งค่าดังภาพที่ 48 และทำการทดลองส่งการแจ้งเตือนไปยัง Email ที่ระบุไว้จะได้ผลดังภาพที่ 49

```

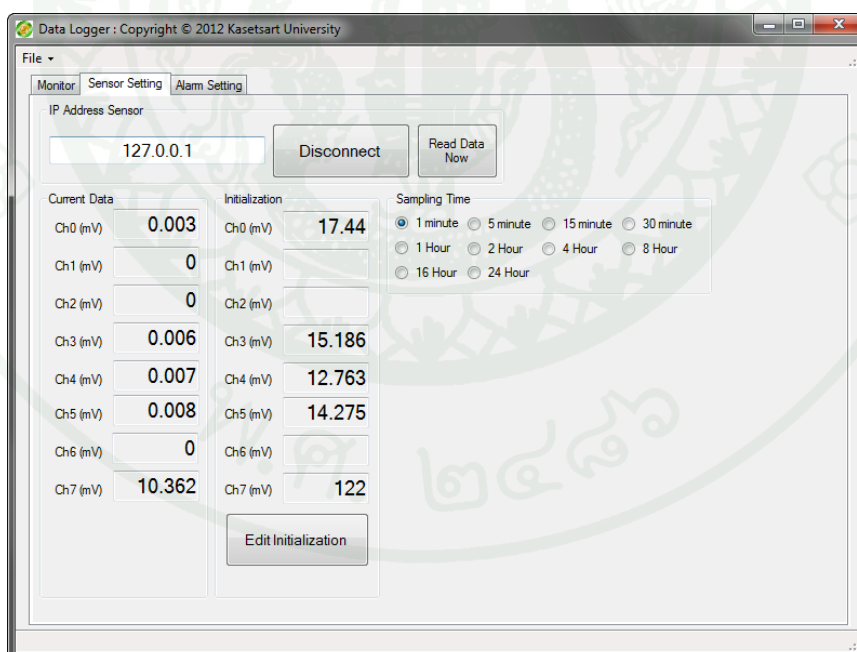
C:\Windows\system32\ping.exe
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=1ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=22ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=11ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=7ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=3ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=23ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=2ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=4ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=1ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=1ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=1ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=2ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=2ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=8ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=15ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=4ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=1ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=3ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=10ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=1ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=3ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=1ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=5ms TTL=128
Reply from 158.108.47.64: bytes=32 time=4ms TTL=128

```

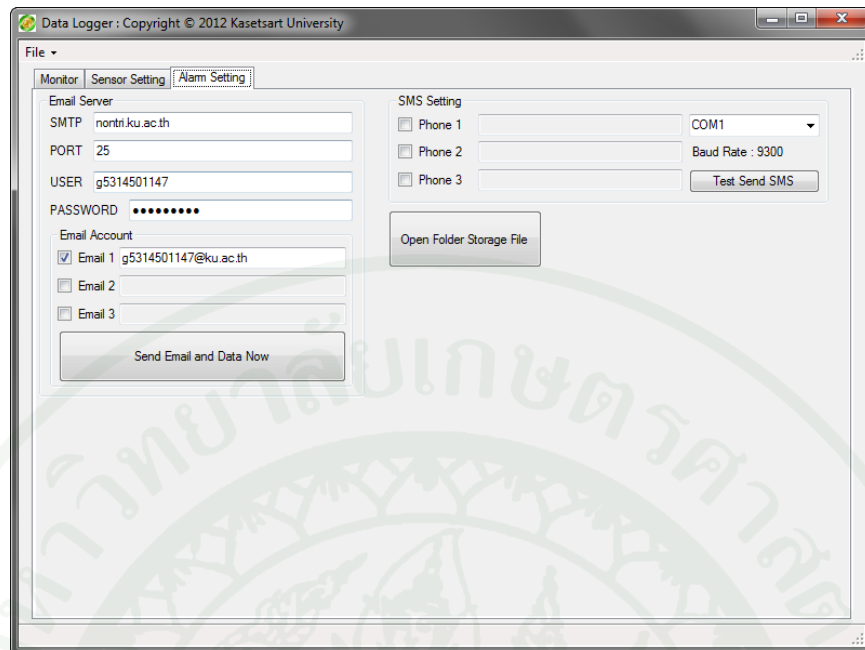
ภาพที่ 45 ผลการทดสอบ Ping คอมพิวเตอร์ ไปยังตัว Data Logger



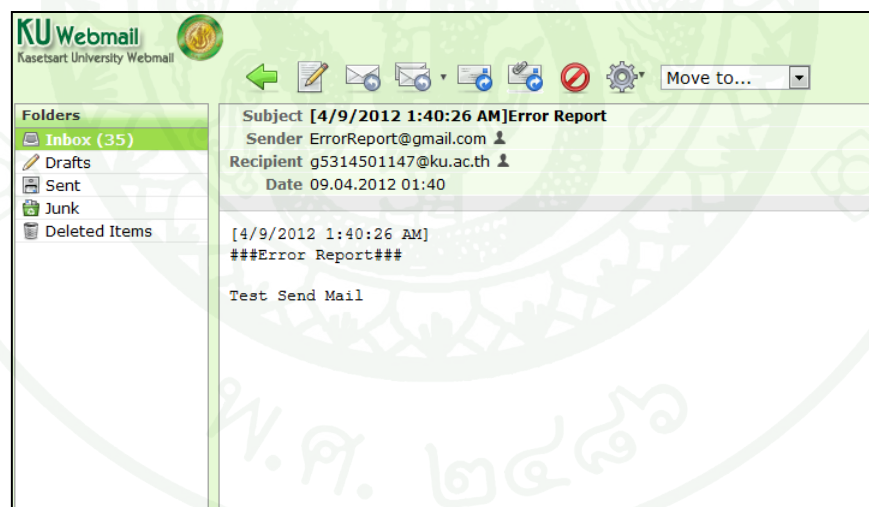
ภาพที่ 46 หน้าต่างการแสดงผลค่าที่ได้รับจาก Data Logger หลังจากการปรับแก้ค่า



ภาพที่ 47 หน้าต่างการแสดงผลค่าที่ได้รับจากข้อมูล Data Logger



ภาพที่ 48 ผลการทดสอบส่ง Email ไปยัง Email ที่กำหนดไว้



ภาพที่ 49 ผลการตรวจสอบ Email ที่ได้รับจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเอง

สรุปและข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัย การพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดทางธรณีเทคนิคและระบบสื่อสารผ่านเครือข่ายไร้สาย ได้ดำเนินการพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบทางตรวจวัดทางธรณีเทคนิค 2 ชนิดคือ Wire Extensometer กับ Borehole Joint Meter ผ่านการสอบเทียบเครื่องมือในและสรุป Specification ของเครื่องมือทั้ง 2 ประเภท ได้ว่าอุปกรณ์ Wire Extensometer เหมาะสำหรับใช้วัดการเคลื่อนตัวของเชิงลาดชนิด Translation Slide ที่มีปริมาณการเคลื่อนตัวมาก ส่วน Borehole Joint Meter นั้นใช้ตรวจวัดความเครียดที่ระนาบพิบัติ หรือ Shear Zone

ในส่วนที่อุปกรณ์ตรวจวัดทางธรณีเทคนิค เชื่อมต่อกับระบบรับส่งข้อมูล โดยใช้สัญญาณเครือข่ายไร้สาย มายังสำนักงาน ซึ่งสามารถตรวจสอบข้อมูลและประเมินความปลอดภัยของเชิงลาดขณะปฏิบัติงานได้อัตโนมัติ และเชื่อมต่อกับระบบเตือนภัยในเหมือง.

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

บารเมศ วรรณะภุติ, พีระยศ แสนโกชณ์, สรศักดิ์ เชื้อวศิริกุล, ยุทธิกร ดินสุขศรีวิไล, วีริศ ธีราวุฒิ และธันวุฒิ วิวัฒน์ถาวรวงศ์. 2555. การพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดทางธรณีเทคนิค และระบบสื่อสารผ่านเครือข่ายไร้สาย, น. 1-125. ใน รายงานการประชุมการเพิ่มเสถียรภาพต่อทางเลือกของการขุด และการเพิ่มกำลังแก้วสตุค้ำยันสำหรับผนังป่อเหมือง บริเวณ **Area 4.1**. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, นนทบุรี

Angeli, M.G., P. Gasparetto, S. Silvano and G. Tonetti. 1988. An automatic recording system to detect the critical stability of slopes. *In Proceeding International Symposium 5(1)*: 375-378.

Angeli, M.G., P. Gasparetto, A. Pasuto and S. Silvano. 1989. Examples of landslide instrumentation. *In Proceeding International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering 12(3)*: 1531–1534.

Bonnard, C. and G. Steinmann. 1990. Continuous measurement of landslide movement. *In Proceeding Geotechnical Instrumentation in Practice* : 177-189.

Corominas, J. 2000. Measurement of landslide displacement using a wire extensometer. *In Proceeding Engineering Geology 55*: 149-166.

Dunnicliff, J. and G. E. Green. 1988. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. John Wiley & Sons, New York.

Geokon Incorporated. 2010. **Bore Pressure Cell**. Available Source:

<http://www.geokon.com/products/bhpressure.php>, November 26, 2010

Hawkes, I. and W.V. Bailey, 1973. **Design, Develop, Fabricate, Test, and Demonstrate Permissible Low Cost Cylindrical Stress Gages and Associated components Capable of Measuring Change in Stress as a Function of Time in Underground Coal Mines.** Bureau of Mines, United States.

Hoffmann, K. 1987. **An Introduction to Measurements using Strain Gages.** Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Germany.

Murray, W. M. and W. R. Miller. 1992. **The Bonded Electrical Resistance Strain Gage : An Introduction.** Oxford University Press, New York.

Agilent Technologies. 1999. **Practical Strain Gage Measurements.** Available Source: http://www.omega.com/techref/pdf/StrainGage_Measurement.pdf, December 2, 2010.

Sellers, J. B., 1977. The Measurement of Stress Changes in Rock Using the Vibrating Wire Stress meter. *In Proceeding of the International Symposium on Field Measurements in Rock Mechanics 1:* 275-288.

Shuri, F.S. and G.E. Green. 1987. Instrumentation for Nuclear Waste Studies in Salt. *In Proceeding International Symposium on Field Measurement in Geomechanics 2:* 357-364

Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd. 2010. **Strain gages.** Available Source: <http://www.kyowa-ei.co.jp/eng/support/download/catalogue.html>, March 15, 2011.

Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. 2010. **Strain gauges: Precise and Flexible,** Available Source: http://www.tml.jp/e/download/catalog/STRAIN_GAUGES.pdf. March 20, 2011.

Rajesh, V.S. 2001. **Network Programming in C#**. Available Source:

<http://www.c-sharpcorner.com/UploadFile/dottys/>

SocketProgDTRP11222005023030AM/SocketProgDTRP.aspx, December 17, 2011.

Rajesh, V.S. 2001. **Network Programming in C# - Part 2**. Available Source:

<http://www.c-sharpcorner.com/UploadFile/rajeshvs/>

NetworkProgramPart211182005040120AM/NetworkProgramPart2.aspx,

December 20, 2011.

Anbarasan, K. 2011. **Read and Write Excel Data Using C#**. Available Source:

[http://www.c-sharpcorner.com/uploadfile/ae35ca/read-and-write-excel-data-using-C-](http://www.c-sharpcorner.com/uploadfile/ae35ca/read-and-write-excel-data-using-C-Sharp)

Sharp, December 25, 2011.



ภาคผนวก



1. Exception Handling

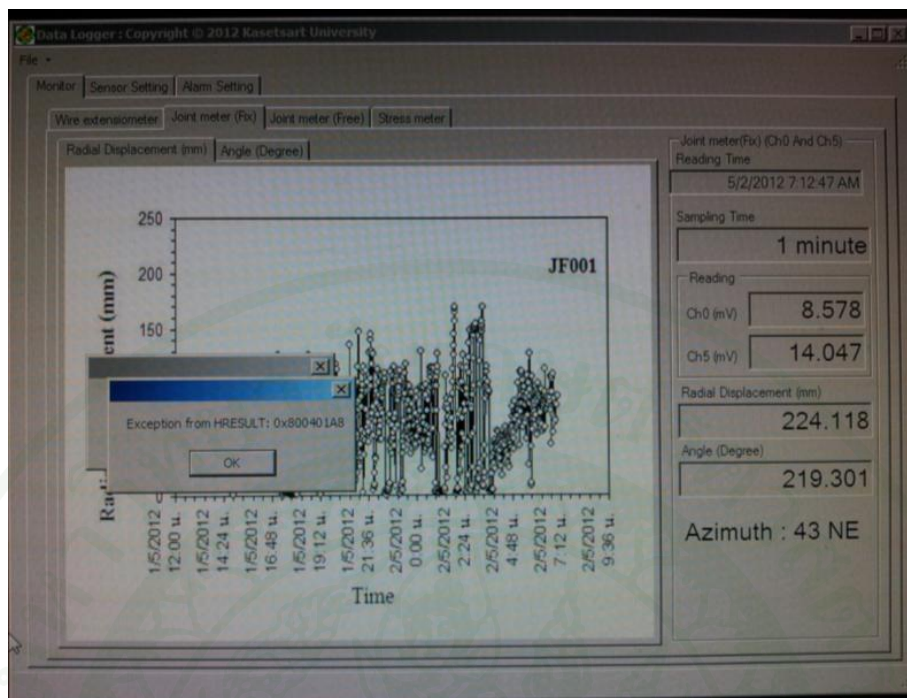
Class Error จะเป็นความผิดพลาดประเภทร้ายแรง ซึ่งจะไม่ทำการดักจับความผิดพลาด และเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้น โปรแกรมต้องหยุดทำงานทันที

Class Exception คือความผิดพลาดที่ไม่ร้ายแรง สามารถทำให้การทำงานของโปรแกรมไม่ เป็นไปตามขั้นตอนที่กำหนดไว้ แต่โปรแกรมสามารถทำงานต่อได้ เช่น เมื่อโปรแกรมพยายามเปิด ไฟล์ที่ไม่มีอยู่จริง

1.1. ปัญหาและแนวทางการแก้ไขของปัญหา Exception from HRESULT:0x800401A8

การใช้งาน Excel.Application (COM) นั้นจะเป็นการใช้ Microsoft Office 12.0 Object Library มาเป็นตัวช่วยในการเรียนรู้ใช้โปรแกรม Excel เป็นโปรแกรมพื้นหลัง ซึ่งจะใช้ หน่วยความจำที่ค่อนข้างมาก และเนื่องด้วยจำนวนข้อมูลทำการเขียนลงไป ใน worksheet มี ปริมาณข้อมูลมาก จึงเป็นสาเหตุให้หน่วยความจำไม่เพียงพอ จึงทำให้โปรแกรมเกิด Exception from HRESULT:0x800401A8 ขึ้น

การแก้ปัญหาในขั้นต้นนั้นได้มีการเขียนโปรแกรมให้ปิด Excel.exe ที่มีการใช้งานอยู่ใน พื้นหลังและเปิดขึ้นมาใหม่หลังจากนั้นพยายามเขียนข้อมูลลงไปใหม่ แต่ถ้าไม่สามารถบันทึกข้อมูล ได้จะต้องปิดโปรแกรม KU Data Logger ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นเพื่อคืนค่าเริ่มต้นของโปรแกรม KU Data Logger ซึ่งจะเป็นการ Reset Excel.exe ใหม่ แต่ถ้าในท้ายที่สุดนั้น โปรแกรม KU Data Logger ไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากอาจจะมี Process ของ Excel ที่ทำงานในพื้นที่ค้างอยู่ในระบบ จะต้องทำการ End Process Excel.exe หรือ Restart เครื่อง Computer แล้วจึงเริ่มทำงานจัดเก็บข้อมูล ใหม่อีกครั้ง



ภาพผนวกที่ ก1 หน้าต่างการแสดงผล Exception from HRESULT:0x800401A8

1.2. ปัญหาและแนวทางการแก้ไขของปัญหา Exception from HRESULT: 0x80028018

เนื่องจากการที่ Microsoft Office 12.0 Object Library ไม่รองรับรูปแบบภาษาไทย (th-TH) จำเป็นจะต้องกำหนดให้คอมพิวเตอร์มี Region and Language เป็นรูปแบบภาษาอังกฤษ (en-US) จึงจะใช้ความสามารถของ Microsoft Office 12.0 Object Library ในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นได้

แก้ไขโดยทำการเพิ่มส่วนโปรแกรมกำหนดค่า Region and Language ให้เป็นรูปแบบภาษาอังกฤษ (en-US) ก่อนการเรียกใช้ Microsoft Office 12.0 Object Library

```
System.Threading.Thread.CurrentThread.CurrentCulture =
new System.Globalization.CultureInfo("en-US");
```

1.3. ปัญหาและแนวทางการแก้ไขของปัญหา The operation is not allowed on non-connected sockets

1.3.1. ปัญหาที่เกิดขึ้นของ ของปัญหา The operation is not allowed on non-connected sockets

ปัญหาที่เกิดขึ้นเกิดมาจากการที่ ตัวโปรแกรม KU Data Logger ไม่สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ Data Logger ได้ โดยมีสาเหตุต่างๆดังนี้

กรณีที่ 1. ระบบเครือข่ายของการไฟฟ้าแม่เมาะมีปัญหาขัดข้องทำให้ไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้

กรณีที่ 2. ระบบจ่ายพลังงานไม่พอเพียงต่อการใช้งานทำให้ไม่สามารถจ่ายไฟให้ Data Logger

กรณีที่ 3. ในส่วน Data Logger มีอาการค้างไม่สามารถทำงานได้ต่อเนื่องเป็นเวลานาน

1.3.2. แนวทางแก้ไขของปัญหา The operation is not allowed on non-connected sockets

กรณีที่ 1 ระบบเครือข่ายของการไฟฟ้าแม่เมาะมีปัญหาขัดข้องทำให้ไม่สามารถติดต่อสื่อสาร

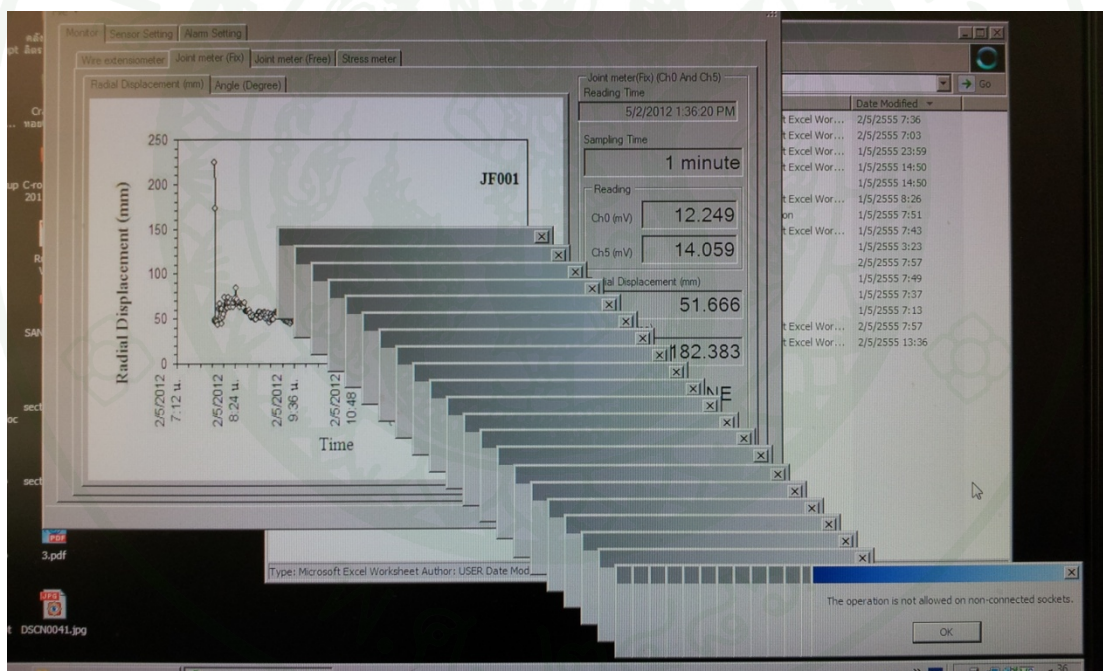
ให้ทำการ Ping ไปที่ตัวส่งสัญญาณ Wireless ที่ละ Station โดยที่เริ่มจาก Station 1 (IP Address : 10.249.119.236) ถ้าสามารถ Ping ได้ให้ทำการ Ping ตัวส่งสัญญาณ Wireless ที่ Station 2 (IP Address : 10.249.119.237), Station 3 (IP Address : 10.249.119.238), Station 4 (IP Address : 10.249.119.239) และ Data Logger (IP Address : 10.249.119.240) ตามลำดับ ถ้าสามารถ Ping ได้ทุก Station จะแสดงได้ว่าระบบเครือข่ายของการไฟฟ้าแม่เมาะไม่มีปัญหาแต่อย่างใด

กรณีที่ 2 ระบบจ่ายพลังงานไม่พอเพียงต่อการใช้งานทำให้ไม่สามารถจ่ายไฟให้ Data Logger

ในกรณีนี้จำเป็นต้องเข้าไปตัววัดอุปกรณ์ระบบจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์ว่ามีอุปกรณ์ตัวไหนเสียหรือไม่สามารถประจุไฟเข้า Battery ได้เป็นต้น

กรณีที่ 3 Data Logger มีอาการค้างไม่สามารถทำงานได้ต่อเนื่องเป็นเวลานาน

กรณีนี้จำเป็นต้องดูหน้าปัดแสดงผลว่ามีอาการดับเกิดขึ้นหรือไม่ หน้าจอแสดงผลไม่ตอบสนองการทำงานหรือไม่ ถ้ามีให้ทำการปลดไฟเลี้ยงเพื่อ reset ระบบของ Data Logger ซึ่งจะทำให้ Data Logger กลับมาทำงานปกติอีกครั้ง



ภาพผนวกที่ ก2 หน้าต่างการแสดงผล The operation is not allowed on non-connected sockets

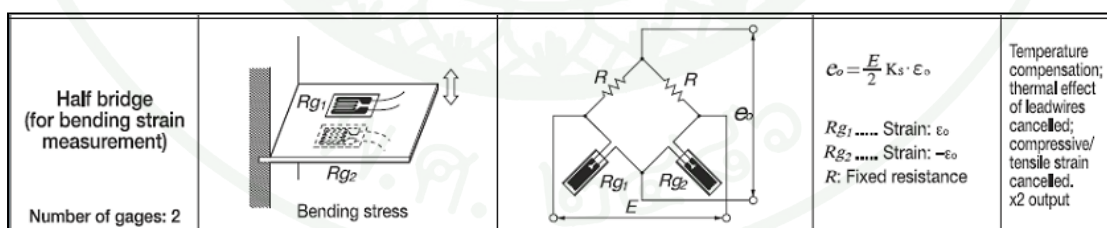


ภาคผนวก ข

ปัญหาของ Strain Gage ในวงจร Half Bridge Network ที่ใช้สำหรับ
วัดค่าความเครียดบนแท่งเหล็ก Borehole Joint Meter

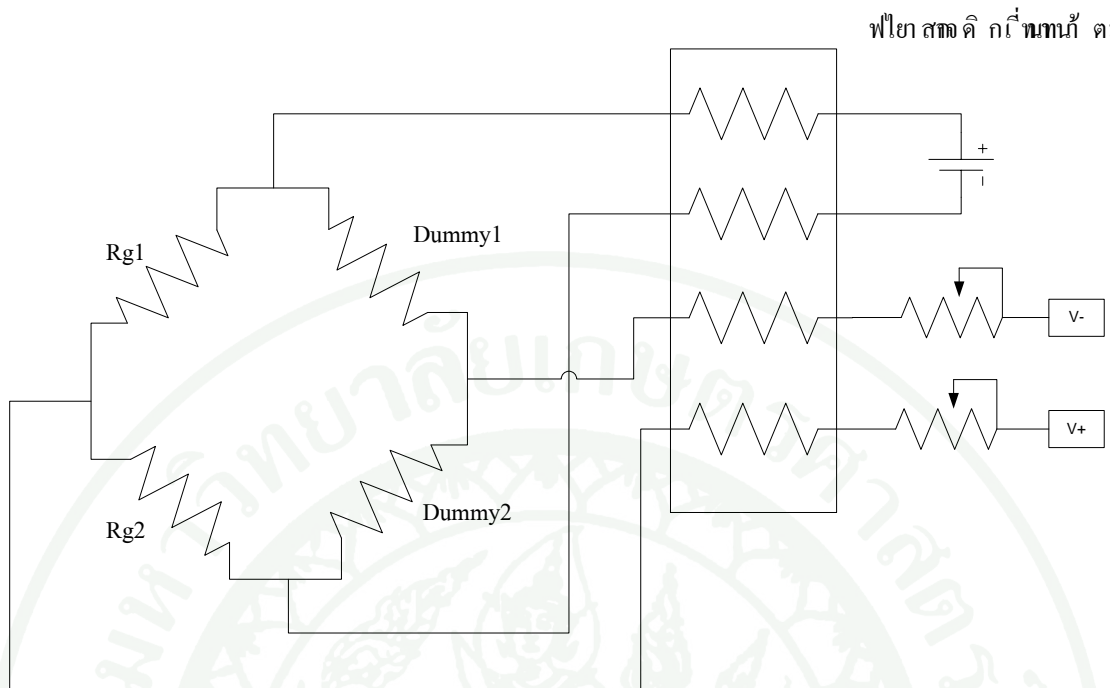
วงจรของ Strain Gage ที่ใช้ติดตั้งบนพื้นผิวของ Borehole Joint Meter จะใช้ Strain Gage 2 ตัวที่เป็น Active Gage และ Strain Gage 2 ตัวที่เป็น Dummy Gage ซึ่ง Strain Gage ทั้ง 2 ตัวที่เป็น Active Gage จะติดที่ผิวของวัสดุที่เกิดความเครียดจากแรงตัด ซึ่งติดสองฝั่งตรงกันข้ามกันเพื่อศึกษาตรวจวัดความเครียดที่เกิดจากการค้ำวัสดุตัวอย่าง Strain Gage ทั้งสองจะมีค่าความเครียดตรงกันข้ามกัน ยกตัวอย่าง Strain Gage ตัวแรก (R_{g1}) รับความเครียดดึง (+) ตัวที่สอง (R_{g2}) จะรับความเครียดอัด (-) ผลที่ได้เป็นผลต่างความเครียดของ Strain Gage ตัวที่หนึ่งลบด้วยตัวที่สอง ($\epsilon_{R_{g1}} - \epsilon_{R_{g2}}$) นั่นก็คือค่าความเครียดเป็นสองเท่าของที่ผิวของวัสดุ (ความเครียดในวัสดุเป็นเชิงเส้น) โดยจะมีลักษณะการติดตั้งและวงจรดังภาพที่ 52

แต่เนื่องจากขนาดของผิวแห่ง Borehole Joint Meter เป็นผิวโค้งทำให้การติด Strain Gage ให้ได้ตำแหน่งที่ตรงข้ามกันทั้งสองตัวพอดี ที่จะทำให้ $V_{R_{g1}}$ เท่ากับ $V_{R_{g2}}$ จึงจะต้องมีการปรับแก้ค่าให้มีความเที่ยงตรงก่อนการนำไปใช้จริง ด้วยการใส่ ตัวต้านทานที่ปรับแก้ค่าได้และอีกปัญหาที่พบในการใช้งานจริงเนื่องจากการใช้ติดตั้งคือการที่ต้องติดตั้ง Borehole Joint Meter ในหลุมเจาะที่มีความลึกมาก ดังนั้นจำเป็นต้องใช้สายไฟที่มีความยาวตามความยาวของหลุมเจาะ การที่สายไฟมีความยาวมากๆ จะทำให้ความต้านทานในสายไฟเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งอาจทำให้สัญญาณที่วัดได้ถูกลดทอนลงมาก ดังนั้นการแก้ปัญหาเบื้องต้นคือการต่อวงจร Half bridge ก่อนที่จะมีการลากสายไฟที่มีความยาวขึ้น ซึ่งในที่นี้จะเป็นการต่อวงจร Half bridge ในช่องว่างของ Borehole Joint Meter ที่ทำขึ้นเฉพาะ แล้วลากสายสัญญาณไฟเลี้ยงและสายสัญญาณไฟที่ต้องการตรวจวัดขึ้นมายังพื้นผิว โดยจะมีวงจรดังภาพที่ 53



ภาพผนวกที่ ข1 แสดงการต่อ Strain gage แบบ Half bridge ที่ติดตั้งบนผิว Borehole Joint Meter

ที่มา: <http://www.kyowa-ei.co.jp/eng/support/download/catalogue.html>



ภาพผนวกที่ ข2 แสดงการต่อ Strain gage แบบ Half bridge และปัญหาของการเดินสายไฟที่มี
ความยาวมาก

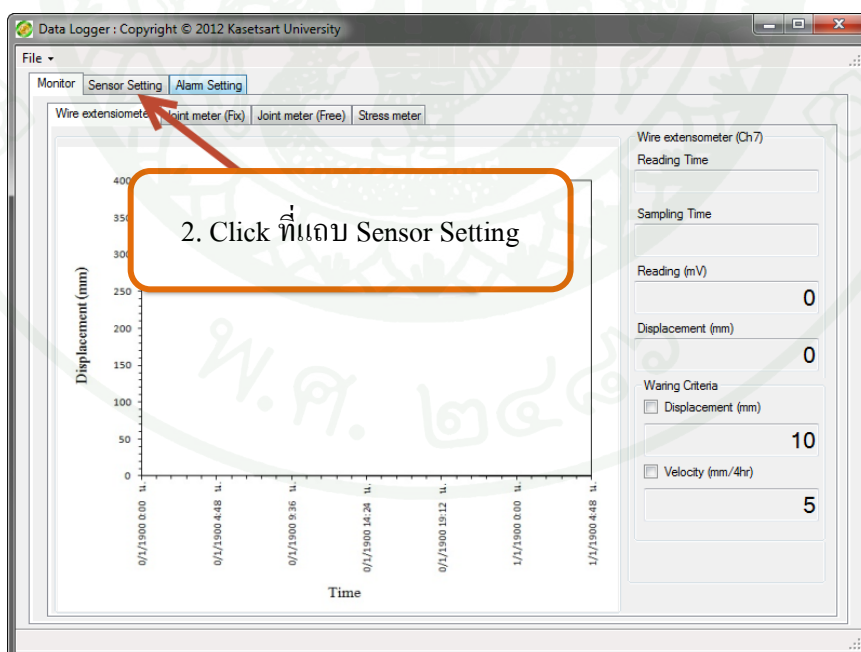


ภาคผนวก ค
คู่มือการใช้งาน โปรแกรม KU Data Logger

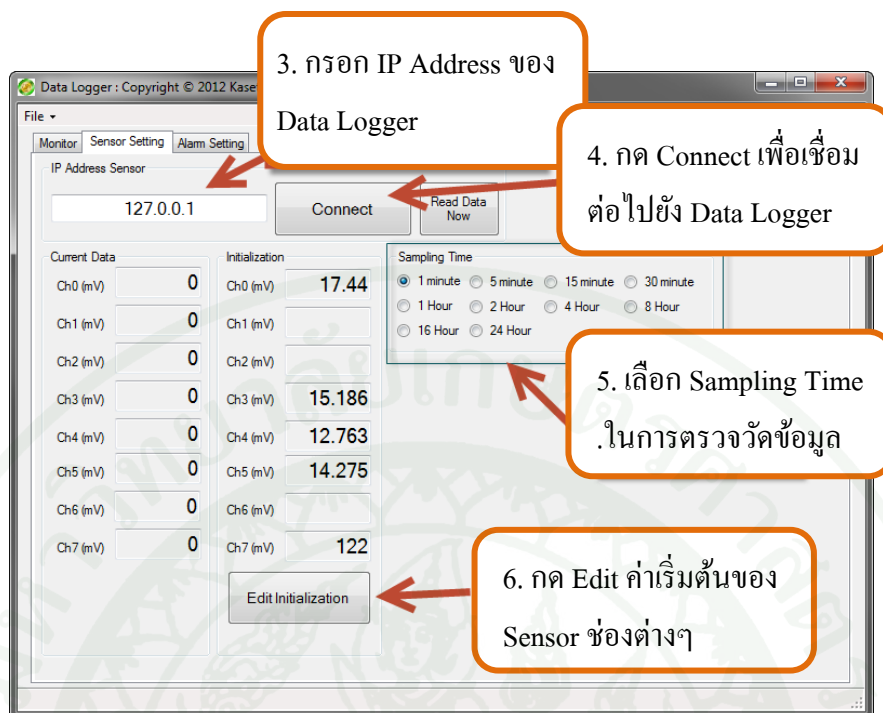
ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม KU Data Logger



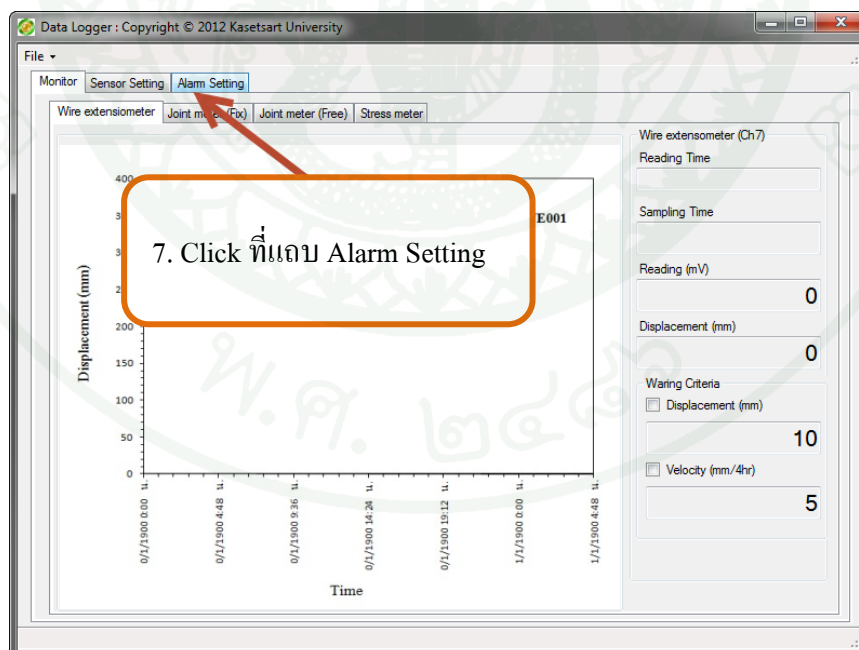
ภาพผนวกที่ ๑ แสดงขั้นตอนการเริ่มใช้งาน โปรแกรม



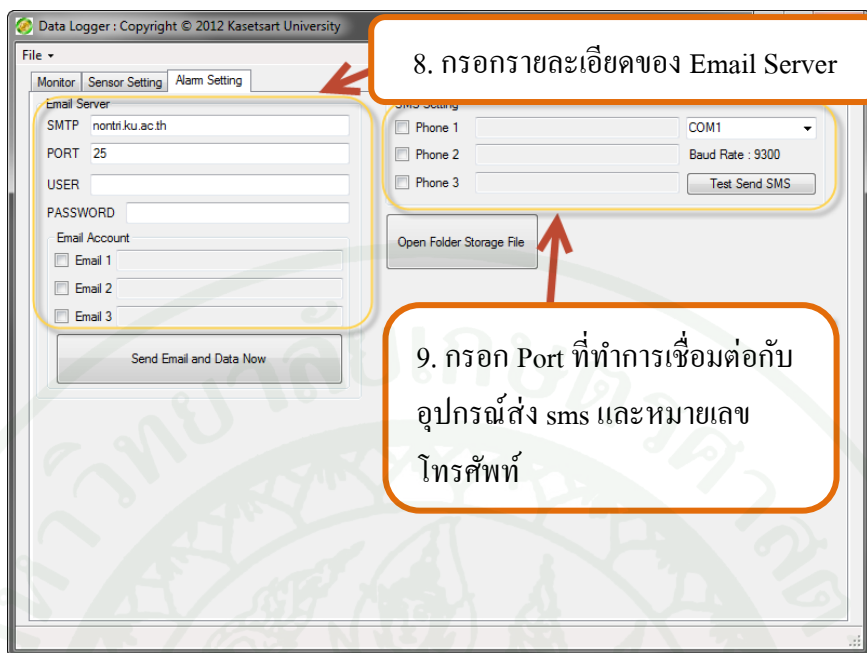
ภาพผนวกที่ ๒ แสดงขั้นตอนการเข้าถึงการตั้งค่าของ Sensor



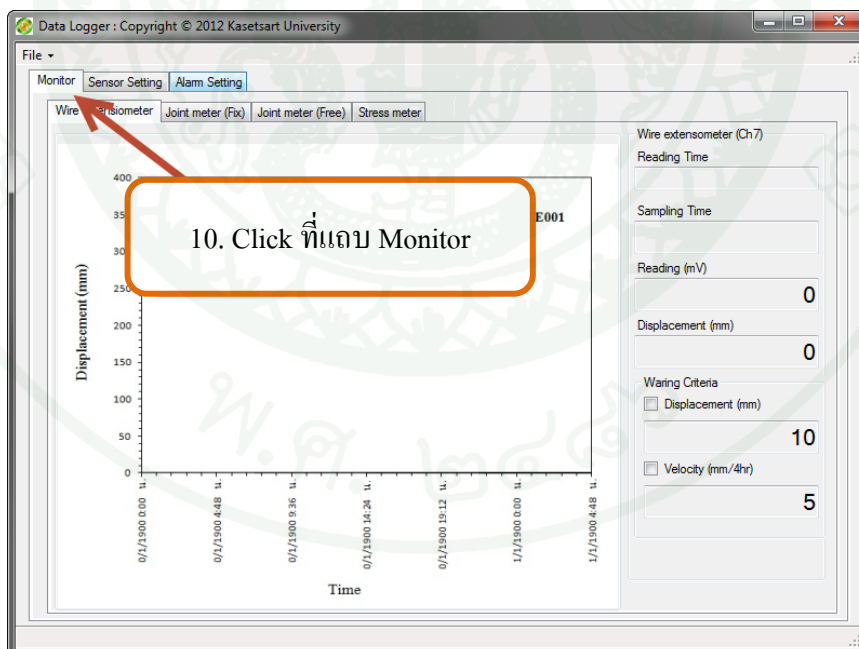
ภาพผนวกที่ ค3 แสดงขั้นตอนการตั้งค่าของ Sensor



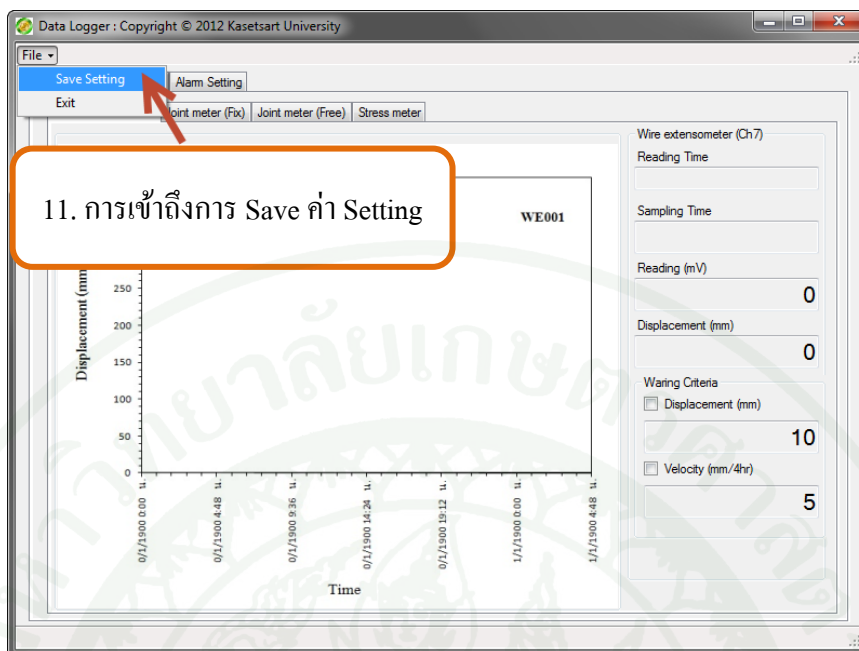
ภาพผนวกที่ ค4 แสดงขั้นตอนการเข้าถึงการตั้งค่าของระบบแจ้งเตือน



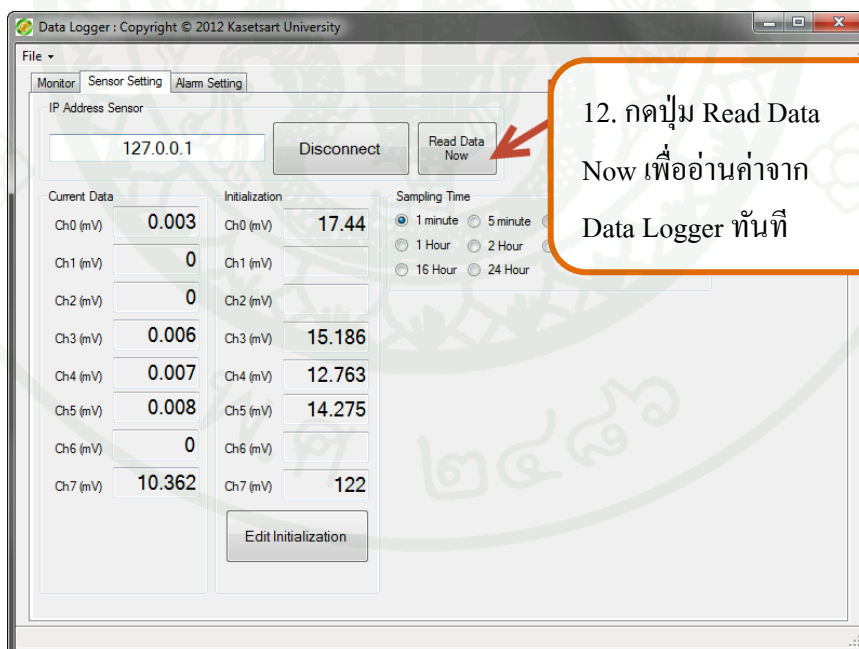
ภาพผนวกที่ ค5 แสดงขั้นตอนการตั้งค่าของระบบแจ้งเตือน



ภาพผนวกที่ ค6 แสดงขั้นตอนการเข้าถึงหน้าจอ Monitor



ภาพผนวกที่ ค7 แสดงขั้นตอนการเข้าถึงการบันทึกค่าของระบบ



ภาพผนวกที่ ค8 แสดงขั้นตอนการอ่านค่าทันที



ภาคผนวก ง
ตาราง IP Address ที่ใช้ติดตั้งในอุปกรณ์ต่างๆ

ตารางผนวกที่ ๑1 รายละเอียดการตั้งค่า IP Address อุปกรณ์ต่างๆ

อุปกรณ์	Ipaddress	Subnet Mask	Default Gateway
Station 1	10.249.119.236	255.255.255.0	10.249.119.1
Station 2	10.249.119.237	255.255.255.0	10.249.119.1
Station 3	10.249.119.238	255.255.255.0	10.249.119.1
Station 4	10.249.119.239	255.255.255.0	10.249.119.1
Data Logger	10.249.119.240	255.255.255.0	10.249.119.1

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายธัญฉวี วิวัฒน์ถาวรวงศ์
เกิดวันที่	2 ธันวาคม 2529
สถานที่เกิด	เขตพญาไท จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (ไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ปีงบประมาณ 2554 (2553-2555)