



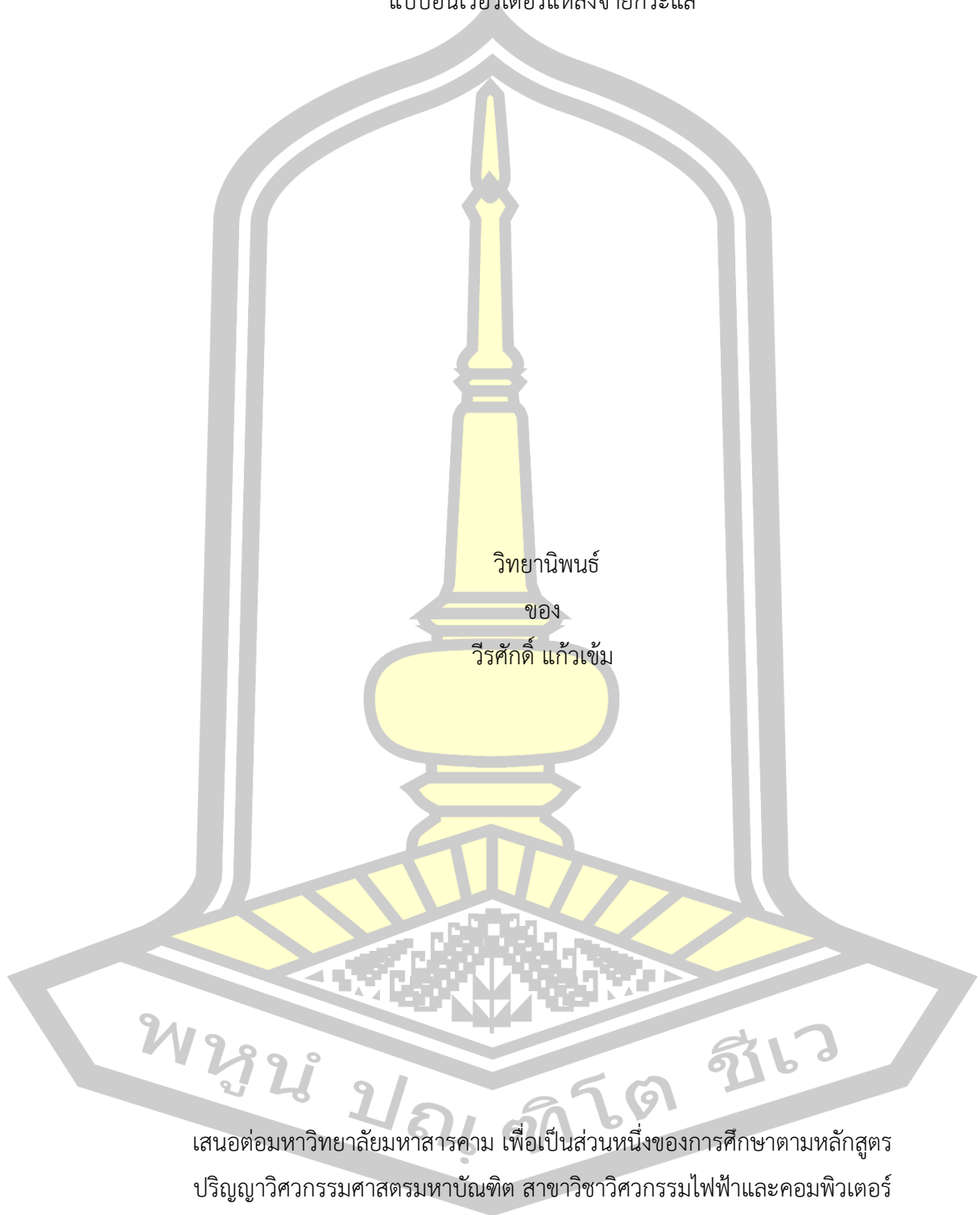
ผลของกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินด้วยเครื่องตรวจวัด
แบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส

วิทยานิพนธ์
ของ
วีรศักดิ์ แก้วเข้ม

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
เมษายน 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผลของกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินด้วยเครื่องตรวจวัด
แบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส

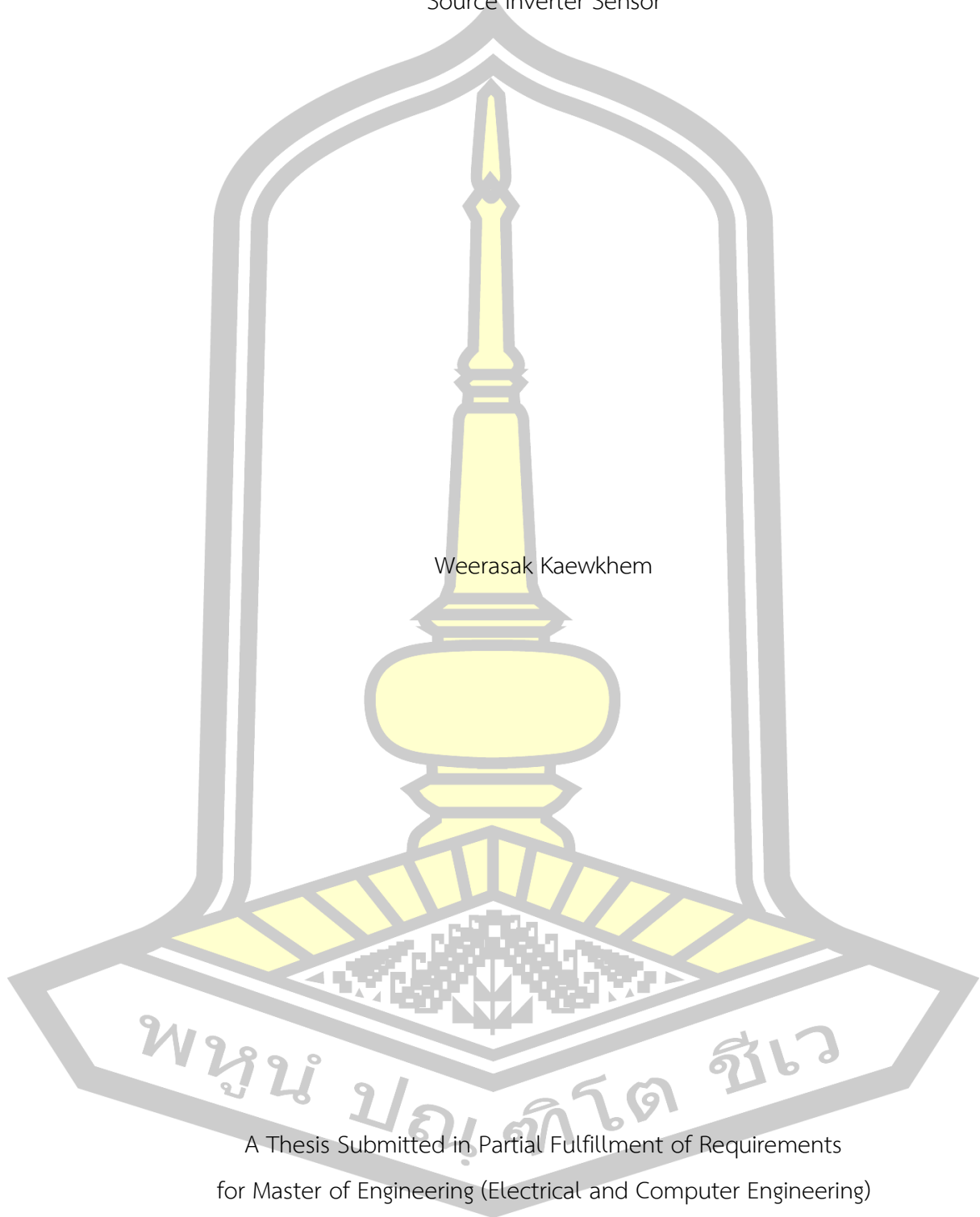


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

เมษายน 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Effects of Electric Power on Soil Resistivity Measurement Precision of a Current
Source Inverter Sensor



Weerasak Kaewkhem

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Electrical and Computer Engineering)

April 2019

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายวีรศักดิ์ แก้วเข้ม แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ณีรัฐฉวี สุวรรณทา)

กรรมการ

(ผศ. ดร. นิวัฒน์ อังควิศิษฐพันธ์)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทาลัย
มหาสารคาม

(รศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

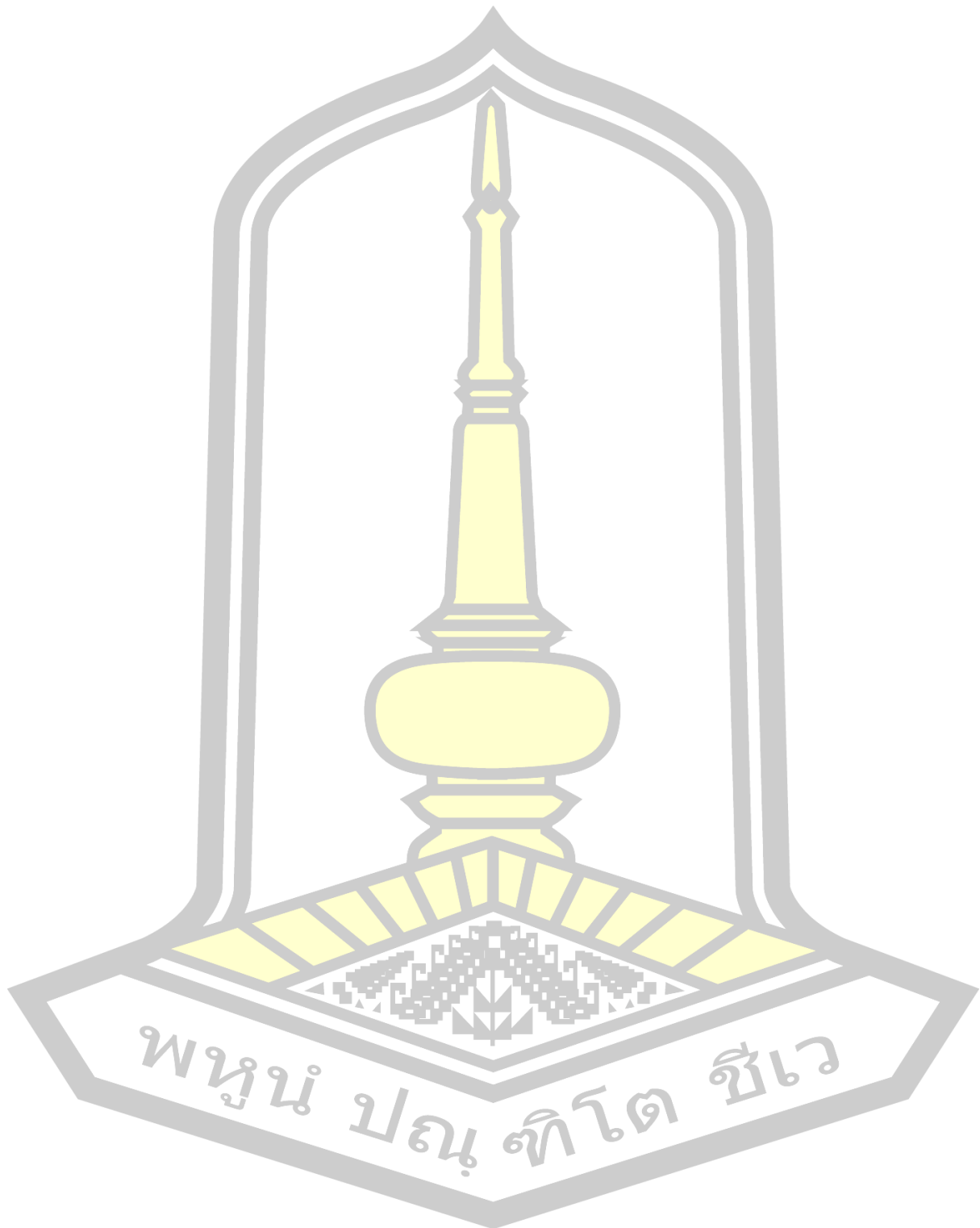
ชื่อเรื่อง	ผลของกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินด้วยเครื่องตรวจวัดแบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส		
ผู้วิจัย	วีรศักดิ์ แก้วเข้ม		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2562

บทคัดย่อ

ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเป็นค่าการวัดที่มีความสำคัญและจำเป็นต่อการวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณภาพของดินสำหรับงานด้านธรณีฟิสิกส์ ธรณีวิทยา และงานด้านวิศวกรรมโยธาและไฟฟ้า การตรวจวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมมากที่สุดคือ การป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำลงในดินแล้วคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินจากค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ เครื่องตรวจวัดส่วนใหญ่จะออกแบบเครื่องให้มีกำลังไฟฟ้าสูง (ในหน่วยกิโลวัตต์) เพื่อให้ค่าการวัดได้มีความถูกต้องและเที่ยงตรงสูง อย่างไรก็ตาม การใช้ระดับกำลังสูงอาจประสบปัญหาการจัดหาแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เพียงพอ โดยเฉพาะการตรวจวัดค่าในบริเวณห่างไกลที่ไม่มีระบบไฟฟ้า ดังนั้นการออกแบบเครื่องตรวจวัดให้สามารถใช้กำลังต่ำแต่มีความเที่ยงตรงในการวัดสูงจะเป็นประโยชน์ต่อการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินสำหรับที่ห่างไกล งานวิจัยนี้นำเสนอผลการศึกษาระดับของกำลังไฟฟ้าต่อความเที่ยงตรงในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินด้วยเครื่องตรวจวัดแบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสที่สามารถปรับระดับความถี่ต่ำกระแสไฟฟ้าสลับความถี่ต่ำได้ในช่วง 10-80 เฮิร์ตซ์ สำหรับค่าความลึกของดินในห้องปฏิบัติการไม่เกิน 0.5 เมตร ผลการศึกษาพบว่า ระดับกำลังไฟฟ้าที่ต่ำมากเกินไปจะไม่สามารถวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้อย่างถูกต้อง ระดับกำลังไฟฟ้าต่ำจะให้ค่าความเที่ยงตรงการวัดต่ำด้วยเมื่อเทียบกับระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่า อย่างไรก็ตาม ค่าความเที่ยงตรงในการวัดจะมีค่าไม่แตกต่างกันที่ระดับกำลังไฟฟาระดับหนึ่งขึ้นไป กล่าวคือ การเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นจากระดับดังกล่าวไม่ได้ช่วยให้ค่าความเที่ยงตรงการวัดดีขึ้น ในทางตรงกันข้ามกลับสูญเสียกำลังไฟฟ้าในการวัดโดยเปล่าประโยชน์ การศึกษายังพบอีกว่า การใช้ความถี่ที่สูงขึ้นจะให้ค่าความเที่ยงตรงการวัดที่ดีขึ้นแม้จะใช้ระดับกำลังไฟฟ้าต่ำกว่า

คำสำคัญ : ความต้านทานจำเพาะของดิน, ความเที่ยงตรงการวัด, ระดับกำลังไฟฟ้า, อินเวอร์เตอร์

แบบแหล่งจ่ายกระแส



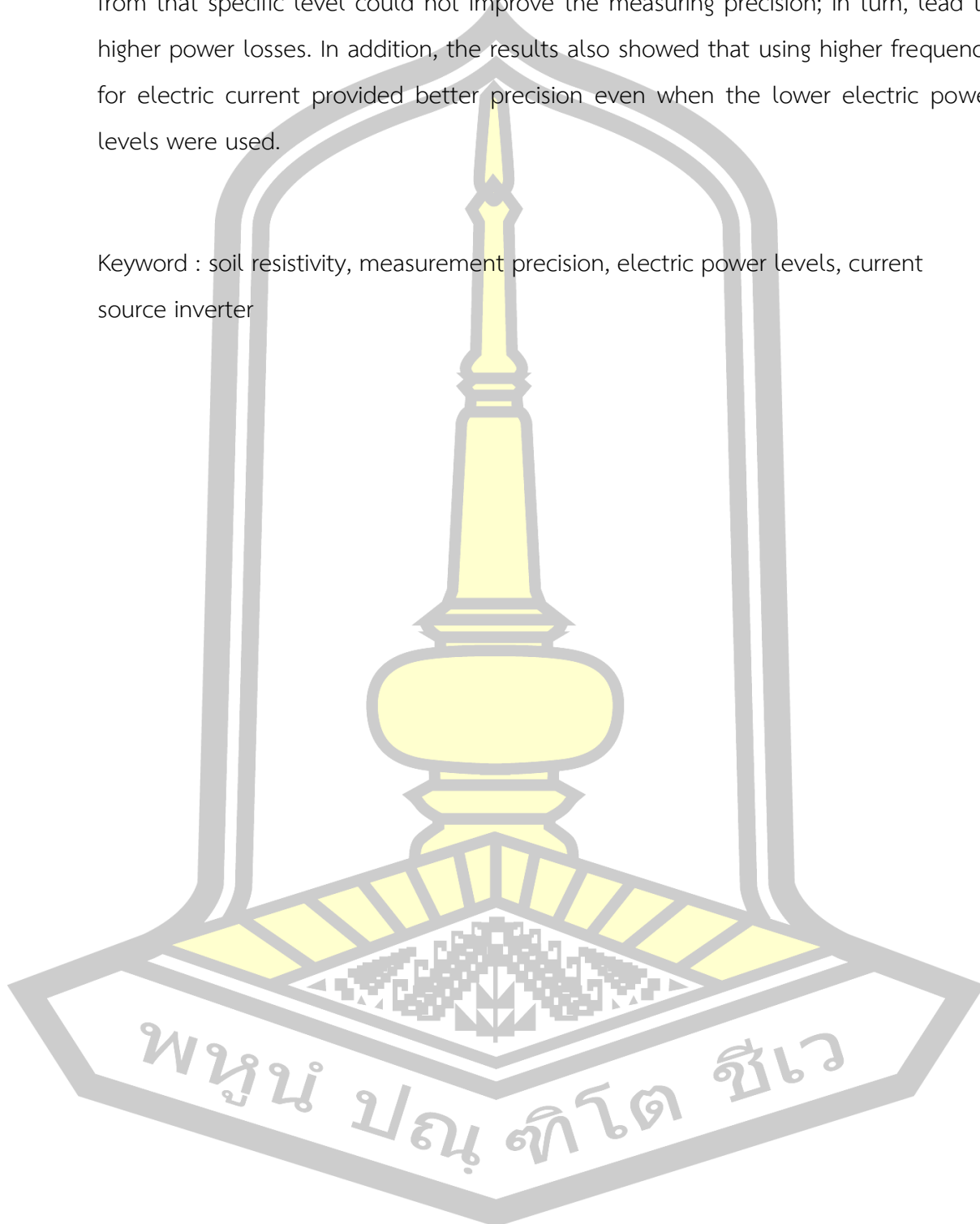
TITLE	Effects of Electric Power on Soil Resistivity Measurement Precision of a Current Source Inverter Sensor		
AUTHOR	Weerasak Kaewkhem		
ADVISORS	Assistant Professor Chonlatee Photong , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Electrical and Computer Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2019

ABSTRACT

Soil resistivity is an important and required measure for analyzing characteristics and quality of soil for applications in geophysics, geology and engineering for both civil and electrical. There are several methods for measuring the soil resistivity; however, the most popular method is by applying low frequency voltage into the soil sample and then calculating the soil resistivity from the measured electric current and voltage. Most soil resistivity measurement devices are designed to have high electric power levels (units of kW) in order to achieve high accuracy and precision for the measurement. Unfortunately, using high electric power levels would encounter problems such as to find sufficient electric power sources; especially, where the measurement must be done in the rural areas where the power grid utility is not available. Therefore, designing the measuring device with low electric power while maintaining high precision in measurement would be more preferable for the soil resistivity measurement in rural areas. This research presents effects of electric power levels on soil resistivity measurement precision when using a current source inverter as the soil resistivity sensor which allows supplying electric current to be controlled in the range of 10-80 Hz for measuring the soil resistivity of the sample soil in the laboratory with depth upto 0.5 meter. The test results showed that too low electric power levels could not be used for measuring the soil resistivity correctly. Using low electric power would give lower precision in measuring compared to higher power levels. However, the precision of the measurement was

not different at a specific level or higher. In other words, increasing electric power from that specific level could not improve the measuring precision; in turn, lead to higher power losses. In addition, the results also showed that using higher frequency for electric current provided better precision even when the lower electric power levels were used.

Keyword : soil resistivity, measurement precision, electric power levels, current source inverter



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีโดยได้รับความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง อาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสี่ยงวิบูล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิวัตร อังควิสิษฐพันธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณิชวุฒิ สุวรรณทา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คุณ ประติมากรณ์ หาแก้ว ผู้ประดิษฐ์เครื่องมือในการทดลองและงานวิจัยที่ข้าพเจ้าได้นำมาต่อยอด เรื่องผลกระทบของกระแสความถี่สูงต่อการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ตลอดจนพี่สาวและพี่ชายที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือมาโดยตลอด ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตลอดจนผู้มีพระคุณที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ในที่นี้

วีรศักดิ์ แก้วเข้ม



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยครั้งนี้.....	5
บทที่ 2 ปรีทัศน์เอกสารข้อมูล.....	6
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน.....	6
2.1.1 นิยามและความสำคัญ.....	6
2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน.....	6
2.1.3 ประโยชน์ของค่าความต้านทานจำเพาะของดิน.....	10
2.2 ประวัติความเป็นมาของการสำรวจวัดค่าความต้านทานจำเพาะ.....	14
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.3.1 หลักการวางขั้วแบบเวนเนอร์ (Wenner configuration).....	21
2.3.2 หลักการวางขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจอร์ (Schlumberger configuration).....	22

2.3.3	หลักการวางขั้วไฟฟ้าแบบไดโพล-ไดโพล (dipole-dipole configuration)	24
2.4	ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย	28
3.1	โครงสร้างอุปกรณ์	28
3.1.1	แบตเตอรี่	29
3.1.2	ตัวเหนี่ยวนำ (Inductors)	30
3.1.3	วงจรแหล่งจ่ายกระแส	31
3.1.4	วงจรขับเคลื่อน	31
3.1.4.1	วงจรปรับสัญญาณ	31
3.1.4.2	วงจรสร้าง overlap time	32
3.1.5	ขั้วไฟฟ้า	33
3.2	วิธีการดำเนินการทดลอง	34
3.3	การทำทดลอง	34
บทที่ 4	ผลการทดลอง	42
4.1	โครงสร้างเครื่องแหล่งจ่ายกระแส CSI	42
4.1.1	วงจร Buck converter	45
4.1.2	วงจร Arduino	46
4.1.3	บอร์ดวงจรขับเคลื่อน IGBT	47
4.1.4	เครื่องแหล่งจ่ายกระแส CSI	48
4.2	การนำเครื่องจ่ายกระแสแบบปรับความถี่ได้วัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	49
4.3	ผลการทดลองส่วนที่หนึ่ง	53
4.4	ผลการวิจัยผลของกำลังไฟฟ้า	126
บทที่ 5	สรุปและอภิปรายผลการทดลอง	128
5.1	สรุปผลการทดลอง	131

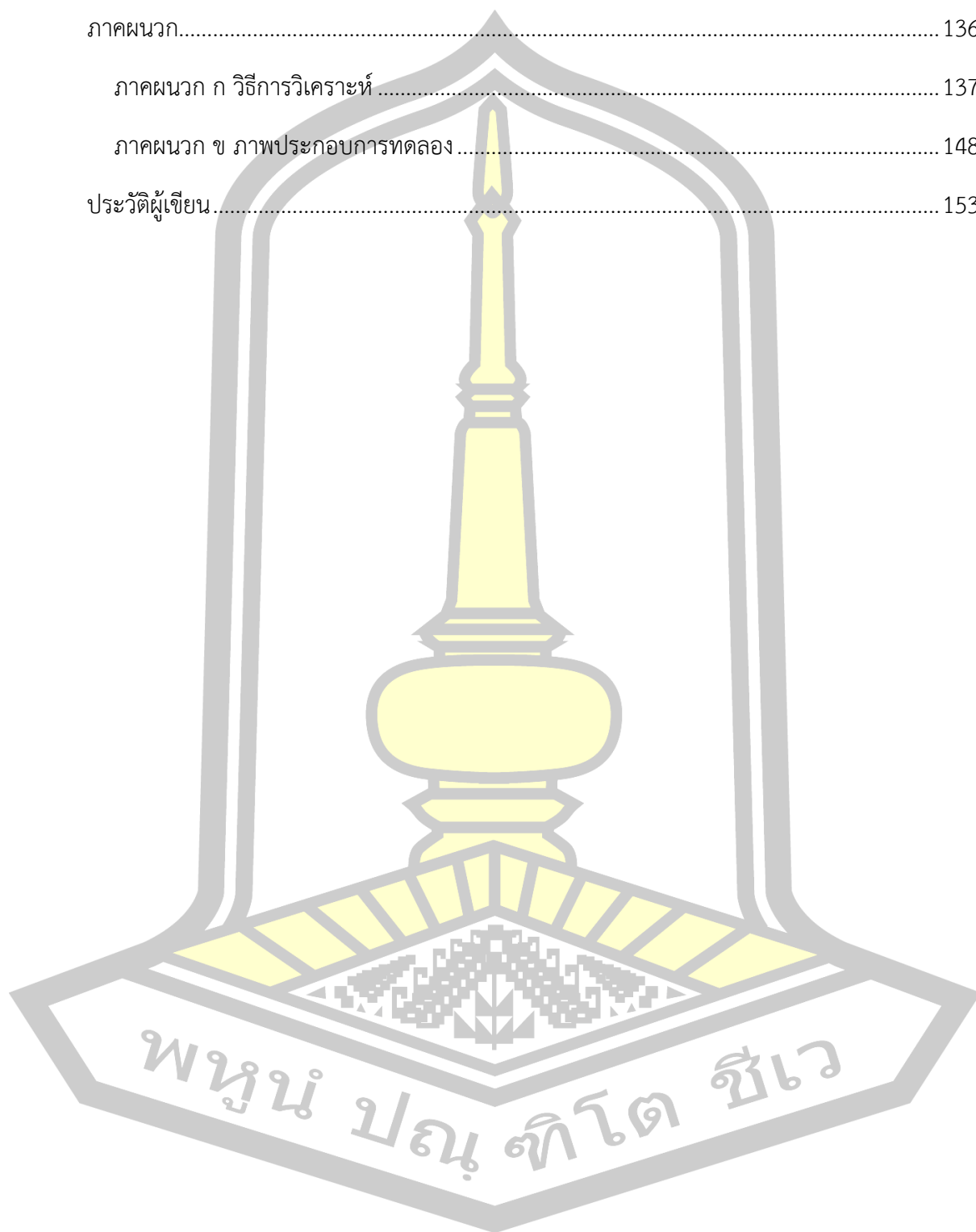
บรรณานุกรม..... 132

ภาคผนวก..... 136

 ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์..... 137

 ภาคผนวก ข ภาพประกอบการทดลอง..... 148

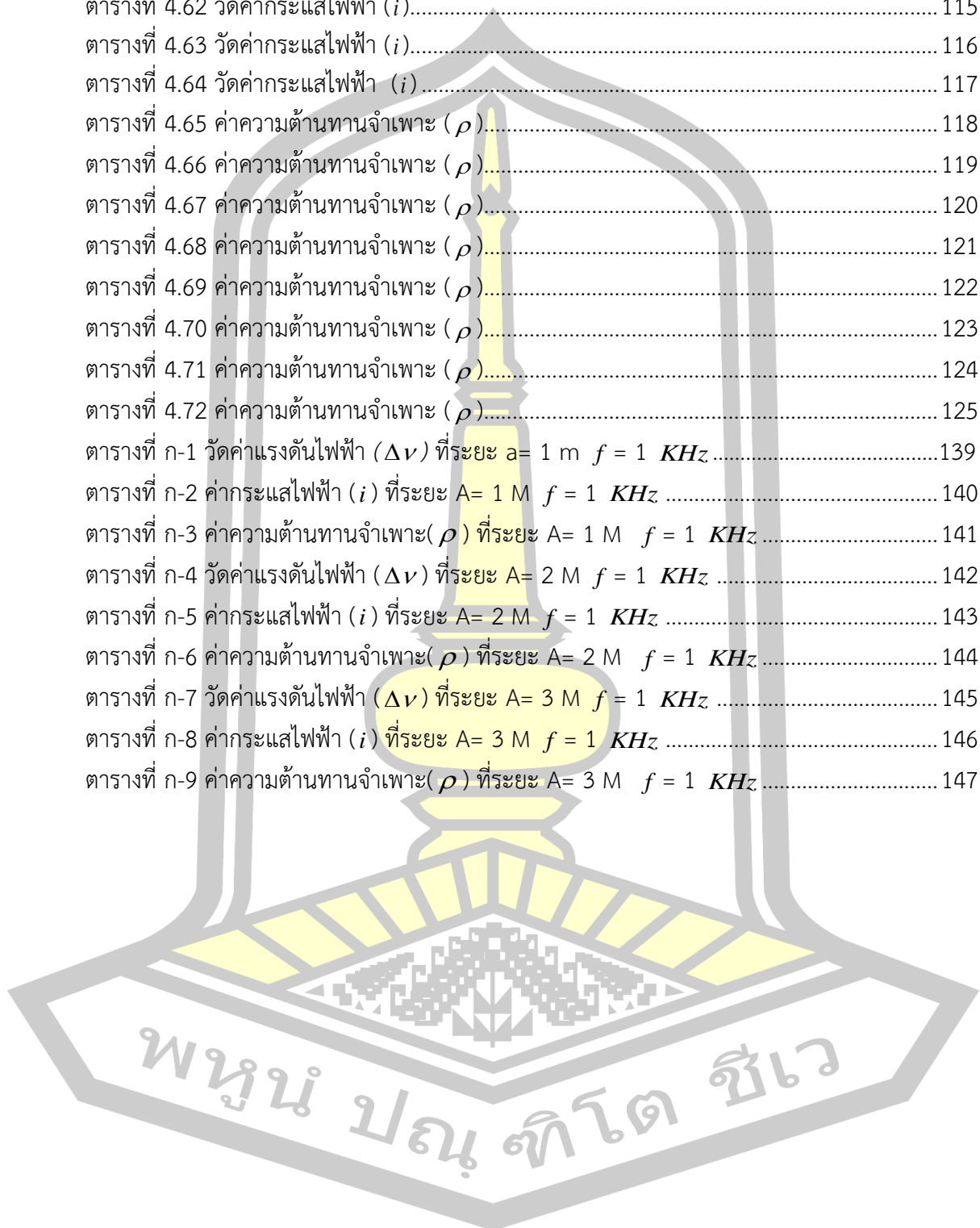
ประวัติผู้เขียน..... 153



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 วิธีการสำรวจธรณีฟิสิกส์	1
ตารางที่ 1.2 วิธีการสำรวจธรณีฟิสิกส์ (ต่อ).....	2
ตารางที่ 3.1 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv).....	35
ตารางที่ 3.2 วัดค่ากระแส (i).....	36
ตารางที่ 3.3 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv).....	37
ตารางที่ 3.4 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i).....	38
ตารางที่ 3.5 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv).....	39
ตารางที่ 3.6 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i).....	40
ตารางที่ 4.1 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv).....	53
ตารางที่ 4.2 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv).....	54
ตารางที่ 4.3 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv).....	55
ตารางที่ 4.4 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv).....	56
ตารางที่ 4.5 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv).....	57
ตารางที่ 4.6 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv).....	58
ตารางที่ 4.7 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv).....	59
ตารางที่ 4.8 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv).....	60
ตารางที่ 4.9 วัดค่ากระแส (i).....	61
ตารางที่ 4.10 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i).....	62
ตารางที่ 4.11 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i).....	63
ตารางที่ 4.12 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i).....	64
ตารางที่ 4.13 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i).....	65
ตารางที่ 4.14 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i).....	66
ตารางที่ 4.15 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i).....	67
ตารางที่ 4.16 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i).....	69
ตารางที่ 4.17 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ).....	70
ตารางที่ 4.18 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ).....	71
ตารางที่ 4.19 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ).....	72
ตารางที่ 4.20 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ).....	73
ตารางที่ 4.21 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ).....	74
ตารางที่ 4.22 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ).....	75
ตารางที่ 4.23 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ).....	76
ตารางที่ 4.24 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ).....	77

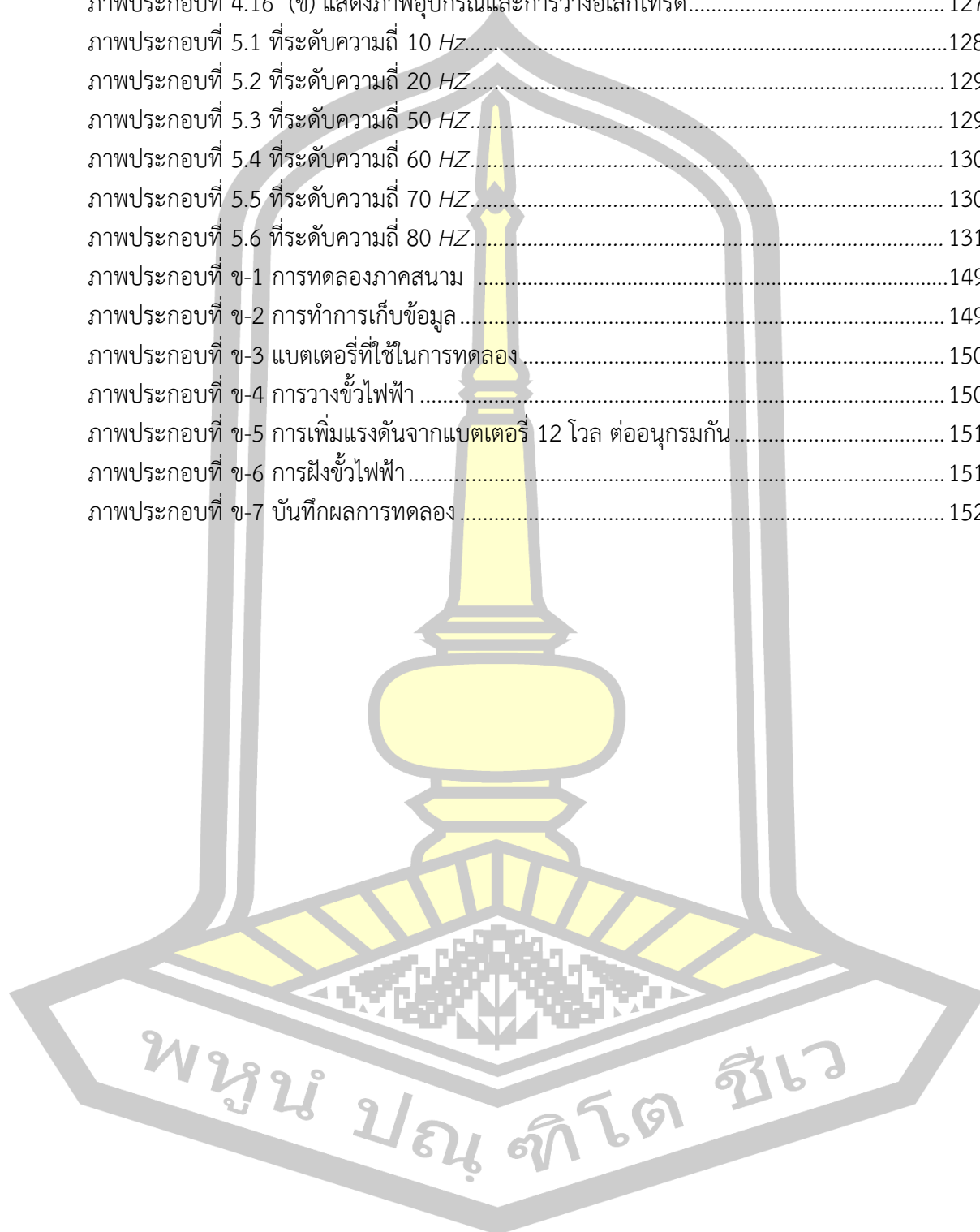
ตารางที่ 4.61	วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i).....	114
ตารางที่ 4.62	วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i).....	115
ตารางที่ 4.63	วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i).....	116
ตารางที่ 4.64	วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i).....	117
ตารางที่ 4.65	ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ).....	118
ตารางที่ 4.66	ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ).....	119
ตารางที่ 4.67	ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ).....	120
ตารางที่ 4.68	ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ).....	121
ตารางที่ 4.69	ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ).....	122
ตารางที่ 4.70	ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ).....	123
ตารางที่ 4.71	ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ).....	124
ตารางที่ 4.72	ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ).....	125
ตารางที่ ก-1	วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) ที่ระยะ $a = 1 \text{ m}$ $f = 1 \text{ KHz}$	139
ตารางที่ ก-2	ค่ากระแสไฟฟ้า (i) ที่ระยะ $A = 1 \text{ M}$ $f = 1 \text{ KHz}$	140
ตารางที่ ก-3	ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $A = 1 \text{ M}$ $f = 1 \text{ KHz}$	141
ตารางที่ ก-4	วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) ที่ระยะ $A = 2 \text{ M}$ $f = 1 \text{ KHz}$	142
ตารางที่ ก-5	ค่ากระแสไฟฟ้า (i) ที่ระยะ $A = 2 \text{ M}$ $f = 1 \text{ KHz}$	143
ตารางที่ ก-6	ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $A = 2 \text{ M}$ $f = 1 \text{ KHz}$	144
ตารางที่ ก-7	วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) ที่ระยะ $A = 3 \text{ M}$ $f = 1 \text{ KHz}$	145
ตารางที่ ก-8	ค่ากระแสไฟฟ้า (i) ที่ระยะ $A = 3 \text{ M}$ $f = 1 \text{ KHz}$	146
ตารางที่ ก-9	ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $A = 3 \text{ M}$ $f = 1 \text{ KHz}$	147



สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบที่ 2.1 หลักการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน.....	15
ภาพประกอบที่ 2.2 การฝังขั้วไฟฟ้าแบบจุดให้จ่ายกระแสในดิน	16
ภาพประกอบที่ 2.3 ขั้วกระแสไฟฟ้าที่วางอยู่บนผิวดิน	17
ภาพประกอบที่ 2.4 ขั้วกระแสไฟฟ้าสองขั้วที่วางบนพื้นผิวดิน	17
ภาพประกอบที่ 2.5 ภาพตัดขวางของดิน แสดงเส้นทางการไหลของกระแสและศักย์ไฟฟ้า	18
ภาพประกอบที่ 2.6 ภาพในแนวนอนแสดงเส้นสนามไฟฟ้าของกระแสและศักย์ไฟฟ้า	18
ภาพประกอบที่ 2.7 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะ	19
ภาพประกอบที่ 2.8 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะ	20
ภาพประกอบที่ 2.9 ความหมายค่าความต้านทานจำเพาะ $1 \Omega - m$	21
ภาพประกอบที่ 2.10 การจัดวางขั้วแบบเวนเนอร์	22
ภาพประกอบที่ 2.11 หลักการวางขั้วไฟฟ้าแบบชลิมเบอร์เจอร์	23
ภาพประกอบที่ 2.12 การวางขั้วไฟฟ้าแบบไดโพล-ไดโพล	24
ภาพประกอบที่ 3.1 แสดงแผนภาพอุปกรณ์ต่าง ๆที่ใช้ในการทดลอง.....	29
ภาพประกอบที่ 3.2 แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลอง.....	30
ภาพประกอบที่ 3.3 ตัวเหนี่ยวนำ	30
ภาพประกอบที่ 3.4 เป็นวงจรแหล่งจ่ายกระแส (CSI) แบบเฟสเดียว	31
ภาพประกอบที่ 3.5 วงจรขับเคลื่อน	32
ภาพประกอบที่ 3.6 วงจรสร้าง OVERLAP TIME	32
ภาพประกอบที่ 3.7 การจัดวางขั้วแบบเวนเนอร์.....	33
ภาพประกอบที่ 4.1 เครื่องแหล่งจ่ายกระแส CSI.....	42
ภาพประกอบที่ 4.2 แบตเตอรี่ที่ใช้เป็น VOLTAGE SOURCE.....	43
ภาพประกอบที่ 4.3 ตัวเหนี่ยวนำขนาด 1 MH 20 A.....	44
ภาพประกอบที่ 4.4 (ก) IGBT ติดแผ่น HEAT SINK (ข) พัฒนาระบายความร้อนให้กับเครื่อง CSI..	45
ภาพประกอบที่ 4.5 วงจร BUCK CONVERTER.....	45
ภาพประกอบที่ 4.6 (ก) บอร์ดรุ่น ARDUINO UNO	46
ภาพประกอบที่ 4.7 (ข) โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ARDUINO IDE	47
ภาพประกอบที่ 4.8 วงจรขับเคลื่อน IGBT [14].....	48
ภาพประกอบที่ 4.9 (ก) ด้านหน้าของเครื่องแหล่งจ่ายกระแส CSI	48
ภาพประกอบที่ 4.10 (ข) ด้านหลังของเครื่องแหล่งจ่ายกระแส CSI.....	49
ภาพประกอบที่ 4.11 การนำเครื่องจ่ายกระแสแบบปรับความถี่ได้ (CSI) ทำการทดลอง.....	50
ภาพประกอบที่ 4.12 ทำการวัดค่าแรงดันและกระแสที่ระยะ (A) ต่างๆ	50
ภาพประกอบที่ 4.13 ทำการฝังขั้วไฟฟ้าลงไปในดินที่จะทดสอบ	51
ภาพประกอบที่ 4.14 ระยะเวลาการวางขั้วไฟฟ้า	52

ภาพประกอบที่ 4.15 (ก) แสดงภาพอุปกรณ์และการวางอิเล็กทรอนิกส์ทรอด.....	126
ภาพประกอบที่ 4.16 (ข) แสดงภาพอุปกรณ์และการวางอิเล็กทรอนิกส์ทรอด.....	127
ภาพประกอบที่ 5.1 ที่ระดับความถี่ 10 Hz.....	128
ภาพประกอบที่ 5.2 ที่ระดับความถี่ 20 Hz.....	129
ภาพประกอบที่ 5.3 ที่ระดับความถี่ 50 Hz.....	129
ภาพประกอบที่ 5.4 ที่ระดับความถี่ 60 Hz.....	130
ภาพประกอบที่ 5.5 ที่ระดับความถี่ 70 Hz.....	130
ภาพประกอบที่ 5.6 ที่ระดับความถี่ 80 Hz.....	131
ภาพประกอบที่ ข-1 การทดลองภาคสนาม	149
ภาพประกอบที่ ข-2 การทำการเก็บข้อมูล	149
ภาพประกอบที่ ข-3 แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลอง	150
ภาพประกอบที่ ข-4 การวางขั้วไฟฟ้า	150
ภาพประกอบที่ ข-5 การเพิ่มแรงดันจากแบตเตอรี่ 12 โวลต์ ต่ออนุกรมกัน	151
ภาพประกอบที่ ข-6 การฝังขั้วไฟฟ้า	151
ภาพประกอบที่ ข-7 บันทึกผลการทดลอง	152



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและปัญหา

การสำรวจวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity survey) หรืออีกชื่อหนึ่งที่นิยมเรียกกันมาก คือการสำรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Resistivity) มีประโยชน์ในการวิเคราะห์คุณภาพดินและประโยชน์อื่น ๆ มากมาย ทั้งทางด้านธรณีวิทยา ธรณีฟิสิกส์ และวิศวกรรมศาสตร์ อาทิเช่น การสำรวจแหล่งทรัพยากรธรรมชาติ การสำรวจและวิเคราะห์สภาพดินสำหรับการเกษตรและเหมืองแร่ การตรวจสอบสภาพดินก่อนการก่อสร้างหรือทำถนน การสำรวจสภาพดินเพื่อจัดทำระบบลงดินหรือติดตั้งอุปกรณ์ทางไฟฟ้า เป็นต้น [1]-[6] จนได้มีองค์กรกำหนดมาตรฐานการวัดค่าความต้านทานจำเพาะเพื่อให้เป็นแนวทางเดียวกันไว้ส่วนหนึ่ง อาทิเช่น มาตรฐาน IEEE standard 442-1981 [7] เป็นต้น การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์จะเลือกวิธีการใดวิธีการหนึ่งในสำรวจนั้น จะเลือกจากคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของสิ่งที่ต้องการสำรวจ วิธีการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์สามารถแบ่งได้ตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 1.1 วิธีการสำรวจธรณีฟิสิกส์ [1]

วิธีการสำรวจ	การวัดความผิดปกติ	สาเหตุของการเกิดความผิดปกติทางกายภาพ
1. การสำรวจวัดสนามแม่เหล็ก (Magnetic)	ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก	ความแตกต่างของแร่ที่มีสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก
2. การสำรวจวัดค่าความเร่งโน้มถ่วง (Gravity)	ค่าความเร่งโน้มถ่วง	ความแตกต่างทางความหนาแน่นของแร่ต่างชนิดที่ประกอบในหิน
3. การสำรวจวัดความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity)	ค่าของสภาพต้านทานไฟฟ้า	ความแตกต่างสภาพความต้านทานไฟฟ้าหรือสภาพนำไฟฟ้าของชั้นดิน-หิน
4. การสำรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า (Induced polarization)	ค่าของสภาพความจุไฟฟ้า	ความแตกต่างทางการเก็บประจุทางไฟฟ้าของแร่ที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี

ตารางที่ 1.2 วิธีการสำรวจธรณีฟิสิกส์ [1] (ต่อ)

วิธีการสำรวจ	การวัดความผิดปกติ	สาเหตุของการเกิดความผิดปกติทางกายภาพ
5. การสำรวจวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic)	ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	ความแตกต่างทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อถูกเหนี่ยวนำของสายแร่ หรือแร่ประกอบหินของพวกแร่ดินเหนียว
6. การสำรวจด้วยคลื่นสั่นสะเทือน (Seismic)	เวลาที่คลื่นใช้เดินทาง/ ค่าความเร็วคลื่น	ความแตกต่างทางเวลาหรือค่าความเร็วคลื่นของชั้นดิน-หิน เมื่อเกิดการสะท้อนและหักเหกลับสู่ผิวดิน
7. การสำรวจวัดค่ากัมมันตรังสี(Radioactive)	อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตภาพรังสี	ความแตกต่างของแร่ยูเรเนียม (Uranium)หรือทอเรียม (Thorium) และโพแทสเซียม(Potassium) ที่ประกอบอยู่ในหิน
8. การสำรวจวัดค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (Self - potential)	ค่าสนามความต่างศักย์ทางไฟฟ้า	ความแตกต่างทางสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ เนื่องจากมวลสารละลายทางเคมีที่มีผลให้เกิดกระแสไฟฟ้า
9. การสำรวจด้วยเรดาร์ (Ground-penetrating radar)	เวลาของคลื่นเรดาร์ที่สะท้อนกลับ	ความแตกต่างของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกส์ (Dielectric constant) ของแร่องค์ประกอบที่อยู่ในดินหิน

การสำรวจหาแหล่งน้ำหรือทรัพยากรใต้ดินสามารถสำรวจได้ทั้ง 9 วิธีที่กล่าวมาในข้างต้น แต่เนื่องด้วยการสำรวจนั้นมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างที่สูง ปัจจุบันจึงนิยมใช้กันอยู่ 3 วิธี [16] คือ

- (1) การสำรวจด้วยการวัดค่าความต้านทาน (Resistivity)
- (2) การสำรวจด้วยการวัดค่าความจุไฟฟ้า (Induced polarization)
- (3) การสำรวจด้วยคลื่นสั่นสะเทือน (Seismic)

การสำรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity Survey) เป็นการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ที่นิยมสำรวจกันในระดับตื้นเท่านั้น ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้กันในระดับความลึกไม่เกิน 1 กิโลเมตร [16] ในทางปฏิบัติเป็นวิธีการที่ดีอีกวิธีหนึ่ง เพราะเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจนั้นค่อนข้างง่ายและการแปลความหมายทางธรณีฟิสิกส์นั้นไม่ยุ่งยากและซับซ้อนมากนัก โดยอาศัยหลักการ

ที่ว่าเปลือกโลกนั้นประกอบด้วยแร่ที่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่ด้วยเนื้อดินหรือหินที่ประกอบเป็นเปลือกโลกนั้นมีช่องว่างระหว่างกัน ประกอบไปด้วยรูพรุน รอยเลื่อน รอยแยก รอยแตกเฉือน โดยช่องว่างเหล่านี้มีน้ำที่มีความนำไฟฟ้าอยู่ น้ำเหล่านี้จะเคลื่อนไหลตามช่องว่างของชั้นดินหรือชั้นหิน ทำให้กระแสไฟฟ้าจะสามารถไหลใต้ดินได้

การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินสามารถทำได้หลายวิธีการด้วยกัน แต่โดยส่วนใหญ่ใช้วิธีการคือ การปล่อยกระแสไฟฟ้ากระแสตรงหรือกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่ำ (ประมาณ 1 Hz) ให้ไหลลงไปได้ผิวดินผ่านทางขั้วกระแสไฟฟ้า (current electrodes) 2 แห่ง (สำหรับกระแสไหลลง และกระแสไหลขึ้น) แล้วทำการวัดค่าความต่างศักย์จากขั้วศักย์ไฟฟ้า (potential electrodes) 2 แห่ง ที่ฝังอยู่ในระยะที่เหมาะสมตามรูปแบบการวัดที่แตกต่างกัน จากนั้นทำการวัดค่ากระแส (i) ที่วัดได้ และค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ (v) จากขั้วศักย์ไฟฟ้า มาทำการหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้จากสมการ [8]

$$\rho = K(v/i) \quad \dots (1.1)$$

เมื่อ ρ = ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน มีหน่วยเป็น $\Omega \cdot m$

v = ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากขั้วศักย์ไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

i = ค่ากระแสที่วัดได้จากแหล่งจ่ายกระแส มีหน่วยเป็น แอมป์ (A)

K = ค่าคงที่ (constant) ที่ได้จากการจัดวางขั้วกระแสไฟฟ้าและขั้วศักย์ไฟฟ้า

ในการวัด

งานวิจัย [4] แสดงให้เห็นว่า ค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้จะมีความแม่นยำ (precision) สูง หากมีการป้องกันกำลังไฟฟ้าระดับสูงในการวัด โดยเฉพาะที่ระดับความลึกจากพื้นผิวดินลงไปมาก อย่างไรก็ตาม การป้องกันกำลังไฟฟ้าปริมาณมากจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายกำลังของเครื่องตรวจวัดที่มีกำลังสูงขึ้นไปด้วย ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาหากการสำรวจจัดทำในบริเวณที่ห่างไกลจากระบบสายส่งไฟฟ้า ซึ่งแหล่งจ่ายกำลังแบบ stand alone อาทิเช่น แผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ เป็นต้น ก็จำเป็นต้องให้กำลังไฟฟ้าสูง ซึ่งส่งผลให้อาจมีขนาดใหญ่ขึ้นและน้ำหนักมากขึ้น และเป็นภาระในส่วนของการขนส่งหรือเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ภาคสนามได้

ผู้วิจัยทำการศึกษาค้นคว้า พบว่า หากมีการออกแบบอุปกรณ์ที่ความถี่สูงขึ้น ความแม่นยำของการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีแนวโน้มที่ดีขึ้น [9]-[11] ยิ่งไปกว่านั้น แนวโน้มของขนาดอุปกรณ์ในการวัดมีขนาดเล็กลงได้ด้วย [12]-[13] ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน โดยการศึกษาจะใช้เครื่องตรวจวัดแบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส (current source inverter) ต้นแบบที่ได้มีการทดสอบและวิเคราะห์ในส่วนของผลกระทบของค่าความถี่ต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทาน

จำเพาะของดิน ซึ่งได้ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้แล้วในงานวิจัย [14] ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องตรวจวัดแบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสดังกล่าวสามารถปรับความถี่ของสัญญาณกระแสที่ป้อนลงไปในดินได้ด้วย ซึ่งจะได้ศึกษาความสัมพันธ์ในส่วนของความแม่นยำระหว่างกำลังไฟฟ้าและความถี่สัญญาณด้วย จึงเป็นที่มาของหัวข้อวิจัยในครั้งนี้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของค่ากำลังไฟฟ้าที่มีต่อค่าความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ที่ระดับความถี่ของสัญญาณกระแสแหล่งจ่ายที่แตกต่างกัน

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของค่ากำลังไฟฟ้าที่มีต่อค่าความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ที่ระดับความถี่ของการวัดที่แตกต่างกัน

1.2.3 หาสภาวะที่เหมาะสมในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน สำหรับระดับกำลังไฟฟ้าน้อยที่สุดและความถี่ของสัญญาณที่สูงที่สุด ณ ระดับความถี่ของดินต่าง ๆ เพื่อใช้แหล่งจ่ายมีขนาดเล็กในขณะที่ทำให้ความแม่นยำในการวัดที่สูงด้วย

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

หากระดับค่ากำลังไฟฟ้าและความถี่ของสัญญาณกระแสแหล่งจ่ายมีผลต่อค่าความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ณ ระดับความถี่ของดินที่แตกต่างกัน ดังนั้น จะมีสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวัดอยู่ในช่วงใดช่วงหนึ่งเท่านั้น ที่กินกำลังไฟฟ้าต่ำ ความถี่สัญญาณสูง ในขณะที่ให้ค่าความแม่นยำในการวัดสูง ในขณะเดียวกัน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นแบตเตอรี่แรงดันต่ำ 12 V ขนาดกำลังไม่เกิน 100 W เพื่อให้สามารถชาร์จพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พื้นที่ไม่ใหญ่จนเกินไปได้ สะดวกต่อการพกพาและตรวจวัดดินในแหล่งที่ไม่มีไฟฟ้าได้

1.4.2 ทดสอบกับค่าความถี่ของสัญญาณกระแสไม่เกิน 300 Hz ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงผลของค่ารีแอกแตนซ์ (reactance) ที่อาจส่งผลกระทบต่อค่าความถูกต้องของการวัดความต้านทานจำเพาะของดินได้

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยครั้งนี้

1.5.1 ได้สรุปผลของค่ากำลังไฟฟ้าที่มีต่อค่าความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ที่ระดับความถี่ของสัญญาณกระแสแหล่งจ่ายที่แตกต่างกัน

1.5.2 ได้สรุปผลของค่ากำลังไฟฟ้าที่มีต่อค่าความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ที่ระดับความถี่ของการวัดที่แตกต่างกัน

1.5.3 ได้สภาวะที่เหมาะสมในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน สำหรับระดับกำลังไฟฟ้าน้อยที่สุดและความถี่ของสัญญาณที่สูงที่สุด ณ ระดับความถี่ของดินต่าง ๆ แต่ให้ค่าความแม่นยำในการวัดสูง



บทที่ 2

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

ในบทนี้ผู้วิจัยจะอธิบายถึงหลักการ ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนที่เกี่ยวกับความต้านทานจำเพาะของดิน ซึ่งประกอบด้วยนิยามและความสำคัญ พร้อมประโยชน์ของค่าความต้านทานจำเพาะของดินสำหรับการใช้งานในด้านต่าง ๆ หลังจากนั้นจะอธิบายหลักการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินแบบต่าง ๆ ที่ผู้วิจัยได้ศึกษา และทบทวนวรรณกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยนี้ โดยรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

2.1.1 นิยามและความสำคัญ

ความต้านทานจำเพาะ (resistivity) คือ คุณสมบัติเบื้องต้นทางไฟฟ้าของวัสดุชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงว่าวัสดุนั้น ๆ แตกต่างจากวัสดุชนิดอื่น วัสดุแต่ละชนิด เช่น ทราย (sand) ทรายแป้ง (gravel) ตะกอน (sedimentary) และหิน (rocks) จะมีค่าความต้านทานจำเพาะแตกต่างกัน [15] ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ อีกนิยามหนึ่งกล่าวไว้ว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดิน (resistivity) คือ ค่าที่ได้จากการวัดความต้านทานทางไฟฟ้าของดินที่มีปริมาตรหนึ่งหน่วย โดยทั่วไปมีหน่วยเป็น $\Omega - m$ ซึ่งหมายความว่า ค่าความต้านทานที่วัดระหว่างผิวหน้าของด้านตรงข้ามดินหนึ่งลูกบาศก์เมตร[28] อีกความหมายหนึ่งตามเว็บไซต์วิกิพีเดีย (wikipedia) กล่าวไว้ว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity) คือ ปริมาณการวัดของการต่อต้านการไหลของกระแสไฟฟ้าในวัสดุ เป็นค่าที่แสดงว่าวัสดุยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านมากน้อยเพียงใด มีหน่วยเป็น $\Omega - m$ [29]

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ค่าของความต้านทานจำเพาะของดินมีปัจจัยควบคุมหลายอย่างด้วยกัน ไม่ใช่เพียงแค่ชั้นดินชั้นหินเพียงเท่านั้น ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ได้แก่ [16]

2.1.1 ปริมาณสารละลายหรือของเหลวที่แทรกซึมอยู่ในเนื้อดิน ชั้นดินที่กักเก็บความชื้นได้มากกว่าจะมีค่าความต้านทานจำเพาะที่ต่ำกว่าชั้นดินที่กักเก็บความชื้นได้น้อย ดังนั้นดินเหนียวจึงมีค่าความต้านทานจำเพาะที่น้อยกว่า ทราย กรวด หิน ค่าของสภาพต้านทานไฟฟ้าของ

ของเหลวหรือสารละลายในชั้นดิน ชั้นหิน และค่าความพรุนของชั้นดิน ชั้นหิน ที่ยอมให้น้ำไหลผ่าน ตามรูพรุน ตามกฎของอาร์ชี (Archie's law) คือ

$$\frac{\rho_r}{\rho_e} = a\phi^{-m} = F \quad \dots (2.1)$$

เมื่อ ρ_r คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของชั้นดิน ชั้นหิน
 ρ_e คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของของเหลวที่มีไอออนของสารละลายปะปน
 อยู่
 a คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการอิมตัว มีค่า 0.6-1.0
 ϕ คือ ค่าความพรุน
 m คือ ค่าคงตัวของการเชื่อมประสานของเนื้อหิน มีค่า 1.40-2.20
 F คือ อัตราส่วนของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของหินต่อค่าสภาพความต้านทานของเหลวและไอออนในของเหลว

ค่าโดยประมาณกรณีหินทรายโดยทั่วไป พบว่าอัตราส่วนค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของชั้นดินชั้นหินต่อค่าสภาพความต้านทานของของเหลวและไอออนในของเหลวมีค่าดังสมการ

$$\frac{\rho_r}{\rho_e} = 0.62\phi^{-m} \quad \dots (2.2)$$

นั่นคือ a มีค่าเท่ากับ 0.62

ค่าโดยประมาณกรณีหินปูนทั่ว ๆ ไป พบว่าอัตราส่วนของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของชั้นดินชั้นหินต่อค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของของเหลวและไอออนในของเหลว มีค่าดังสมการ

$$\frac{\rho_r}{\rho_e} = \phi^{-m} \quad \dots (2.3)$$

นั่นคือ a มีค่าเท่ากับ 1

ส่วนค่าความพรุนของชั้นดินชั้นหิน สามารถหาได้จากสมการ

$$\phi = \frac{W}{Vr} \quad \dots (2.4)$$

เมื่อ v คือ ปริมาตรของช่องว่างในเนื้อดินเนื้อหิน

v_r คือ ปริมาตรของชั้นดินชั้นหิน

2.1.2.2 ชนิดของแร่ดินเหนียวและปริมาณของแร่ดินเหนียว มีผลต่อค่าความต้านทานจำเพาะเป็นอย่างมาก ถึงแม้ว่าจะมีความชื้นสะสมอยู่ในหิน (กรณีชั้นดินชั้นหินแห้งมาก แม้จะมีแร่ดินเหนียวประกอบอยู่ด้วยก็ไม่สามารถทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของหินนั้นเปลี่ยนไป) ด้วยที่ว่าแร่ดินเหนียวนั้นมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า (cation exchange capacity, CEC) เนื่องจากแร่ดินเหนียวที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติเกิดจากการย่อยสลายของแร่ธาตุ เช่น แร่ในกลุ่มเฟลด์สปาร์ (feldspar) แร่ในกลุ่มไมกา (mica) ตัวอย่างเช่น แร่ออร์โทเคลสเฟลด์สปาร์ (orthoclase feldspar) สลายเป็นแร่คาโอลิไนต์ (kaolinite) ซึ่งในระหว่างที่สลายตัวจะมีไอออนอิสระทั้งไอออนบวกและไอออนลบสำหรับไอออนบวกส่วนใหญ่ถูกดูดหรือเกาะที่ผิวของผลึกแร่ดินเหนียวอย่างหลวมๆ สามารถแลกเปลี่ยนหรือถูกดึงไปจับผลึกหรือประกอบเป็นสารใหม่ได้ คุณสมบัตินี้เรียกว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกนั่นเอง

2.1.2.3 เนื้อดิน กรณีที่เนื้อดินมีองค์แร่ประกอบที่เหมือนกันทุกอย่าง แต่มีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ดินที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าจะมีค่าความต้านทานจำเพาะที่ต่ำกว่าดินที่มีความหนาแน่นสูง เพราะความหนาแน่นของดินบ่งบอกถึงความพรุน ที่ของเหลวสามารถแทรกซึมเข้าไปได้

2.1.2.4 การเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยา ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะเป็นอย่างมาก เช่นกระบวนการย่อยสลาย กระบวนการผุกร่อน อยู่ที่มีการละลายของแร่บางชนิด กระบวนการนี้ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะต่ำลง และกระบวนการตกผลึกหรือการอัดแน่นจะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะสูงขึ้น

2.1.2.5 อุณหภูมิ ส่งผลต่อค่าความต้านทานจำเพาะคือ การที่อุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้นส่งผลต่อความหนืด ทำให้การเคลื่อนย้ายไอออนที่มีอยู่ในน้ำเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น เมื่อไอออนเคลื่อนที่ได้เร็ว การไหลของประจุไฟฟ้าย่อมเคลื่อนที่ได้เร็ว และส่งผลให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินต่ำลง สมการการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลงดังนี้

$$\rho_t = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha(t - 18)} \quad \dots (2.5)$$

เมื่อ ρ_t คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่อุณหภูมิใด ๆ

∞ คือ สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิต่อค่าของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะมีค่า 0.025/ องศาเซลเซียส

ρ_{18} คือ ค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่อุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส

t คือ อุณหภูมิ

2.1.2.6 การซึมผ่านของน้ำ มีผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของชั้นดินชั้นหิน

ตั้งสมการ

$$k = 0.136 \frac{\phi^{4.4}}{S_{wi}^2} \quad \dots (2.6)$$

เมื่อ k คือ ค่าของการซึมผ่าน

S_{wi} คือ irreducible water saturation

2.1.2.7 ความอึดตัวของน้ำของช่องว่าง มีผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของชั้นดินชั้นหิน ตั้งสมการ

$$\frac{\rho_r}{\rho_e} = \frac{a \phi^{-m}}{S_w^n} \quad \dots (2.7)$$

เมื่อ S_w คือ ค่าความอึดตัวของน้ำในช่องว่างของเนื้อดินเนื้อหิน

n คือ ค่าคงตัว มีค่าประมาณ 2

$$S_w = \frac{w}{v_p} \quad \dots (2.8)$$

เมื่อ w คือ ปริมาตรของน้ำในช่องว่าง

v_p คือ ปริมาตรของช่องว่างทั้งหมด

กรณีที่มีแร่ดินเหนียวประกอบอยู่ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของชั้นดินชั้นหินเปลี่ยนแปลงตั้งสมการ

$$\frac{1}{\rho_r} = \frac{v_{cl}}{\rho_{cl}} S_w + \frac{\phi^m}{a \rho_e} S_w^2 \quad \dots (2.9)$$

เมื่อ vcl คือ ปริมาณแร่ดินเหนียวในชั้นดินชั้นหิน

ρcl คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของแร่ดินเหนียว

2.1.3 ประโยชน์ของค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีวัดค่าความต้านทานจำเพาะ (Resistivity Survey) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการสำรวจทางธรณี ในปัจจุบันนิยมสำรวจกันที่ระดับความลึกไม่เกิน 1 กิโลเมตร[16] เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ดีในการสำรวจทางธรณี เพราะเครื่องมือ อุปกรณ์นั้นหาได้ง่ายราคาไม่สูงมากนัก การแปลความหมายทางธรณีฟิสิกส์ไม่ซับซ้อน โดยอาศัยหลักการที่ว่าโลกนั้นประกอบด้วยแร่ที่มีความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า แต่ด้วยเนื้อดินเนื้อหินเหล่านั้นมีความพรุน รอยเลื่อน รอยเฉือน รอยแตกระหว่างกัน ทำให้ของเหลวที่มีความนำไฟฟ้าเข้าไปแทรกระหว่างช่องว่างเหล่านี้ ทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลได้ดินได้ แต่ในการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ทุกประเภทไม่สามารถตรวจวัดชนิดของดิน หิน หรือแร่ได้โดยตรงเหมือนกับการเจาะสำรวจ แต่เป็นการตรวจหาค่าซึ่งเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น หาค่าความหนาแน่น (density) ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical property) ของชั้นดิน หินและแร่ ที่สะสมอยู่ใต้ผิวดินในบริเวณนั้น ดังนั้นการสำรวจโดยวิธีการนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อวัดค่าความผันแปรของความต้านทานกระแสไฟฟ้าของชั้นตะกอนใต้ผิวดิน ทั้งในแนวด้านข้าง แนวตั้งและแนวลึก แล้วจึงนำผลที่ได้มาแปลความหมายให้เป็นข้อมูลด้านธรณีวิทยา เช่น โครงสร้างของชั้นหินหรือชั้นของตะกอนอีกทีหนึ่ง

วิธีการสำรวจค่าความต้านทานจำเพาะจัดอยู่ในประเภทการสำรวจด้วยวิธีการทางไฟฟ้า (electrical survey) เป็นการประยุกต์เอาหลักการทางไฟฟ้ามาตรวจวัดสภาพใต้ผิวดิน ซึ่งการสำรวจทางไฟฟ้านี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ [16] คือ

1. กลุ่มที่ต้องปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปในดิน ต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าอยู่บนผิวดิน
2. กลุ่มที่ไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า อาศัยหลักการที่ว่ากระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นเองที่

ผิวดิน

การสำรวจด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน จัดอยู่ในกลุ่มที่ 1 ที่อาศัยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปในดิน แล้วทำการวัดค่า กลุ่มที่ต้องปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปในดินไม่ใช่แค่ค่าความต้านทานจำเพาะเพียงเท่านั้น แต่ยังมีอีกหลายวิธีที่นิยมทำกัน ได้แก่ การสำรวจวัดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (induced polarization survey) การสำรวจวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic survey, EM) หลักการเบื้องต้นของวิธีการสำรวจทางไฟฟ้า มีดังนี้

2.1.3.1 การสำรวจด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะ (resistivity survey)

เป็นการวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปในดิน ด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงหรือกระแสสลับที่มีความถี่ระดับต่าง ๆ ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต่างศักย์และทางเดิน

ของกระแสไฟฟ้า คือ คุณสมบัติทางกายภาพของชั้นดิน ชั้นหินที่ประกอบด้วย แร่องค์ประกอบของชั้นดิน ชั้นหิน ของเหลวในรูพรุน

2.1.3.2 การสำรวจด้วยการวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (induced polarization survey) เป็นการสำรวจที่คล้ายกันกับการสำรวจด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะ โดยการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงภายหลังจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปในดิน เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปในชั้นดิน ชั้นหินแล้วนั้น ชั้นดิน ชั้นหินจะทำหน้าที่เป็นตัวเก็บกระแสไฟฟ้าหรือประจุไฟฟ้า เมื่อหยุดการปล่อยกระแสไฟฟ้าแล้วนั้น ชั้นดิน ชั้นหินจะทำหน้าที่เป็นตัวปล่อยประจุไฟฟ้าออกมา เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลภายในชั้นดิน ชั้นหินจะทำให้สามารถวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ การสำรวจด้วยวิธีการวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการสำรวจหาสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้าใต้ดิน เช่น การสำรวจหาแหล่งแร่เหล็ก แร่ทองแดง แร่ดินเหนียว เป็นต้น

2.1.3.3 การสำรวจด้วยวิธีการวัดศักย์ไฟฟ้า (self-potential survey) เป็นการตรวจวัดศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าตามธรรมชาติที่ไหลในชั้นดิน ชั้นหิน ซึ่งโดยทั่วไปหากสภาพชั้นดิน ชั้นหินมีแร่บางชนิดที่เกิดกระแสไฟฟ้าได้ จะสามารถวัดค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า การถ่ายเทประจุไฟฟ้าจากการเคลื่อนไหลของน้ำบาดาลและขบวนการทางชีวภาพที่สามารถทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ผิวดิน การสำรวจด้วยวิธีการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้านิยมสำรวจแบบยังลึกลงในหลุมที่มีการขุดเจาะ เพื่อบ่งบอกชั้นน้ำจืดหรือน้ำเค็ม และบ่งบอกค่าความเป็นดินเหนียว

2.1.3.4 การสำรวจด้วยวิธีการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic) เป็นการสำรวจที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เกิดจากการสร้างกระแสไฟฟ้าเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นใหม่ ถ้าใต้ดินมีสภาพความนำไฟฟ้า สนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นใหม่นี้อาจทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลใต้ชั้นดินชั้นหิน โดยสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นใหม่นี้ เกิดจากตัวกำเนิดที่อยู่บนผิวดินที่ถูกสร้างขึ้นและเกิดจากแหล่งกำเนิดที่อยู่ใต้ผิวดินที่ถูกเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้น วิธีการนี้เหมาะสำหรับหาแร่ตัวนำไฟฟ้า หาบริเวณที่วางท่อเหล็ก สายเคเบิล หรือวัสดุอื่น ๆ ที่เป็นตัวนำไฟฟ้า หาวัดอุโบราณที่ทำจากโลหะ หรือวัสดุอื่นที่ประกอบด้วยแร่โลหะจำพวก ดีบุก สังกะสี เหล็ก ทองแดง ตะกั่ว เงิน เป็นต้น

2.1.3.5 การสำรวจด้วยวิธีการสำรวจแมกนีโตเทลลูริก (magnetotelluric survey) เป็นการสำรวจที่วัดค่ากระแสเทลลูริก (telluric current) เป็นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยที่กระแสเทลลูริกนั้นเกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กโลก โดยวิธีการนี้นิยมใช้สำรวจหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นผิวดินลึกถึงชั้นเนื้อโลก (mantle) หลักการวัดจะวัดเปรียบเทียบกันระหว่างค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่จุดฐานกับจุดสำรวจอื่น ๆ เพื่อตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใต้ชั้นดิน

การสำรวจด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินมีวัตถุประสงค์เพื่อ หาสภาพทางธรณีวิทยาใต้พื้นดินเช่นเดียวกับวิธีการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์วิธีการอื่น ๆ ดังนั้นประโยชน์ที่ได้จากการสำรวจ คือ ทราบสภาพทางธรณีวิทยาใต้พื้นผิวดิน โดยวิธีการสำรวจด้วยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ อาศัยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสภาพชั้นดิน ชั้นหิน โดยอาศัยหลักการที่ว่าโลกนั้นประกอบด้วยแร่ที่มีความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า แต่ด้วยเนื้อดินเนื้อหินเหล่านั้นมีความพรุน รอยเลื่อน รอยเฉือน รอยแตกระหว่างกัน ทำให้ของเหลวที่มีความนำไฟฟ้าเข้าไปแทรกระหว่างช่องว่างเหล่านี้ ข้อมูลทางธรณีวิทยามีความจำเป็นอย่างยิ่งต่องานด้านวิศวกรรม ด้านเกษตรกรรม ด้านธรณีฟิสิกส์ โดยการสำรวจด้วยวิธีการนี้สามารถใช้ได้กับงานได้หลายประเภทดังตัวอย่าง รายละเอียดมีดังนี้

1. งานหาแหล่งน้ำใต้ดินหรือน้ำบาดาล หมายถึง

น้ำที่ใต้ผิวดินที่อยู่ในเขตอิมมูน้ำรวมถึงธารน้ำใต้ดิน ในทางกฎหมายแหล่งน้ำใต้ดินหรือน้ำบาดาล ตามพระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ.2520 กำหนดไว้ว่า น้ำบาดาล หมายความว่า น้ำใต้ดินที่เกิดอยู่ในชั้นดิน กรวด หิน หรือหิน ที่อยู่ลึกจากผิวดินเกินความลึกที่รัฐมนตรีกำหนด โดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่จะกำหนดความลึก น้อยกว่า 10 เมตร มิได้ เป็นสิ่งที่อยู่ใต้พื้นดินและมองไม่เห็น การสำรวจแหล่งน้ำใต้ดินนั้นจำเป็นเป็นต้องอาศัยองค์ความรู้ทางด้านธรณีวิทยา ทั้งนี้เพราะแหล่งน้ำใต้ดินมีความสัมพันธ์กันกับสภาพทางธรณี เมื่อทราบถึงสภาพสิ่งแวดล้อมทางธรณีวิทยา โครงสร้างทางธรณีแล้ว ยังต้องศึกษาลักษณะสิ่งแวดล้อมทางอุทกวิทยาอีกด้วย ด้วยศาสตร์และวิธีการเหล่านี้ทำให้ทราบถึงลักษณะชั้นดินชั้นหินว่ามีการอุมน้ำหรือให้น้ำมากน้อยเพียงใด การสำรวจแหล่งน้ำใต้ดินนั้นมีอยู่หลากหลายวิธีการ แต่บางวิธีการอาจใช้ได้แค่พื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งเพียงเท่านั้น แต่สำหรับบางพื้นที่ต้องใช้หลายวิธีรวมกัน การสำรวจด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะนั้น เป็นหนึ่งในวิธีการที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากหลักการสำรวจนั้นไม่ยุ่งยากและค่าใช้จ่ายในการสำรวจนั้นไม่สูงเหมือนวิธีการอื่น ๆ

2. งานด้านเทคโนโลยีวิศวกรรม

การต่อลงดินเป็นงานอย่างหนึ่งทางวิศวกรรมไฟฟ้า เป็นการนำหลักการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินมาประยุกต์ใช้ในการทำให้อุปกรณ์ทางไฟฟ้ามีความปลอดภัย จุดประสงค์หลักของการต่อระบบไฟฟ้าลงดินคือ เพื่อให้ระบบไฟฟ้าทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า ค่าความต้านทานจำเพาะของดินนั้นส่งผลอย่างมากต่อการกัดกร่อนของตัวนำต่างๆที่ฝังอยู่ในดิน เช่น สายทองแดงเปลือย ท่อน้ำที่เป็นโลหะ เป็นต้น และส่งผลอย่างมากต่ออายุการใช้งานของระบบกราวด์ลงดิน ตัวนำกราวด์ที่ถูกฝังอยู่ในดินนั้นจะถูกธาตุเกลือกัดกร่อน ถ้าใต้พื้นดินมีธาตุเกลืออยู่เยอะ เราสามารถมองได้สองแบบคือ แบบที่หนึ่งการที่ใต้พื้นดินมีระดับธาตุเกลืออยู่ในค่าที่สูง จะส่งผลให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินนั้นมีค่าที่ต่ำ เมื่อความต้านทานจำเพาะของดินต่ำก็จะส่งผลให้ค่าความต้านทานของระบบกราวด์ต่ำลงไปด้วย ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการติดตั้งระบบกราวด์ แบบที่สองนั้นกล่าวคือธาตุเกลือที่ผสมอยู่ในดินนั้น ถ้ามี

ปริมาณที่สูงนั้นจะส่งผลอย่างมากต่ออายุการใช้งานของตัวนำที่ฝังอยู่ในดิน เพราะตัวนำต่าง ๆ นั้นจะถูกกัดกร่อนจนเสียสภาพตัวนำไฟฟ้าที่ดี

3. งานค้นหาวัดถุโบราณ

หาวัดถุโบราณที่ทำจากโลหะ ซึ่งโลหะนั้นจะมีความนำไฟฟ้า ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ปล่อยจากแหล่งจ่ายสามารถที่จะไหลใต้พื้นดินได้ โดยเทคนิคการวัดนั้นจะเปรียบเทียบจากการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจากพื้นที่รอบ ๆ บริเวณที่มีโลหะที่นำไฟฟ้าจะทำให้ค่าต้านทานไฟฟ้าจำเพาะบริเวณนั้นต่ำ

4. การสำรวจการรุกกล้าของน้ำทะเลตามชายฝั่ง

แหล่งน้ำบาดาลเป็นแหล่งน้ำจืดใต้ดินที่มีขนาดใหญ่ ที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตบนโลก ซึ่งน้ำบาดาลนั้นถูกนำมาใช้อย่างมากตั้งแต่ภาคครัวเรือน อุตสาหกรรม ภาคเกษตรกรรม ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการสำรวจและขุดเจาะเพื่อนำน้ำบาดาลขึ้นมาใช้มากขึ้น แต่ในพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเล มักจะประสบปัญหาการปนเปื้อนของน้ำเค็ม บางครั้งมีปริมาณที่สูงจนไม่สามารถนำมาใช้อุปโภคบริโภคได้ เนื่องจากน้ำทะเลนั้นมีค่าความต้านทานด้านชลศาสตร์ที่ค่อนข้างสูงกว่าน้ำจืด จึงทำให้น้ำทะเลนั้นแพร่เข้าไปผสมกับน้ำบาดาล ในชั้นดินชั้นหินที่อุ้มน้ำ เรียกบริเวณที่น้ำทะเลและน้ำบาดาลผสมกันว่า Transitional zone นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่เป็นการทำให้น้ำทะเลแพร่เข้ามาผสมกับน้ำบาดาล เช่น การสูบน้ำใต้ดินหรือน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ในปริมาณมาก การสร้างคลองชลประทาน เป็นต้น ยังเป็นปัจจัยกระตุ้นที่ทำให้ น้ำทะเลแพร่เข้าสู่ชั้นน้ำบาดาลเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยของปาริชาติ ศรีเสน [32] ได้ประยุกต์ใช้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะเพื่อประเมินการรุกกล้าของน้ำทะเลตามชายฝั่ง มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินขอบเขตของการรุกกล้า ของน้ำทะเล เข้าไปในชั้นน้ำตะกอน ทรายชายหาด (beach sand aquifer, Qbs) ด้วยเทคนิควัดความต้านทานไฟฟ้า (resistivity survey) แบบ ความต้านทานไฟฟ้าหยั่งลึก (vertical electrical sounding, VES) โดยพื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ที่ ตำบลชะอำ อำเภอ ชะอำ จังหวัดเพชรบุรี ซึ่งพื้นที่ศึกษาอยู่ติดชายฝั่งทะเลอ่าวไทย มีคลองขุดสำหรับขนส่งสินค้าทางเรือ ลึกประมาณ 10 เมตร กว้าง 45 เมตร ยาว 3.5 กิโลเมตร และคลองธรรมชาติ ลึกประมาณ 1-2 เมตร กว้าง 25 เมตร ทั้งสองคลองมีปากแม่น้ำไหลออกสู่ทะเล จากการศึกษาระดับน้ำตะกอนทรายชายหาดที่มีความลึกตั้งแต่ 1-15 เมตร พบว่ามีมวลน้ำ เค็มขนาดใหญ่แพร่เข้าไปในชั้นน้ำตะกอนทรายชายหาดตั้งแต่หน้าหาดลึกเข้าไปในแผ่นดิน จนกระทั่งถึงจุดสำรวจแล้ว ซึ่งเกิดจากอิทธิพลการรุกกล้าของน้ำทะเลจากหน้าหาดเข้ามาในแผ่นดิน ทำให้บริเวณที่ทำการสำรวจไม่เห็นแนวรอยต่อระหว่างน้ำทะเลกับน้ำบาดาลอย่างที่คาดการณ์ไว้ สำหรับขอบเขต การรุกกล้าของน้ำทะเลจากปัจจัยของโครงสร้างทางชลศาสตร์ อันได้แก่ คลองขุดและคลองธรรมชาตินั้นไม่สามารถบอกได้ เนื่องจากน้ำ ทะเลได้รุกกล้า เข้ามาในชั้นทรายชายหาดเกินกว่าบริเวณที่ทำการสำรวจ

แล้ว ดังนั้นเราจึงไม่สามารถเปรียบเทียบขอบเขตการรุกรานของน้ำทะเลจากอิทธิพลของคลองขุดและคลองธรรมชาติได้ ดังนั้นจึงบอกได้เพียงว่าในพื้นที่ที่ศึกษาได้รับอิทธิพลการรุกรานของน้ำทะเลจากน้ำหาดเข้ามาในแผ่นดิน มากกว่าอิทธิพลจากโครงสร้างทางชลศาสตร์ จนเกิดการปนเปื้อนของน้ำทะเลทั่วทั้งชั้นน้ำแล้ว

5. การศึกษาเสถียรภาพความมั่นคงของเขื่อน

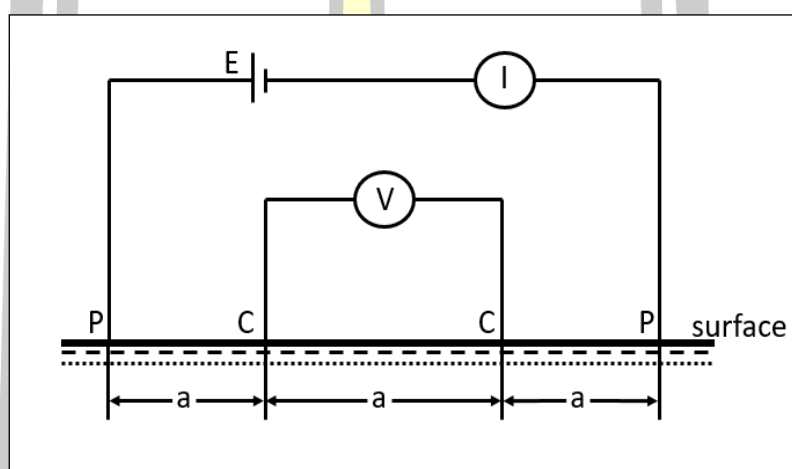
สำหรับในงานสำรวจแหล่งถ่านหิน การสำรวจด้วยวิธีวัดค่าความต้านทานจำเพาะ (Resistivity Survey) นี้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ดี เนื่องจากชั้นถ่านหินมีคุณสมบัติความต้านทานจำเพาะที่สูงกว่าชั้นตะกอนดินเหนียว ชั้นทรายที่เกิดรวมกันอยู่ ดังนั้นจึงทำให้สามารถสร้างแบบจำลองทางธรณีวิทยาของพื้นที่บริเวณนั้นได้อย่างคร่าว ๆ โดยเฉพาะเมื่อต้องทำการสำรวจในพื้นที่เป็นปริมาณมาก ๆ ทั้งนี้เพราะการสำรวจด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายไม่แพง เมื่อเทียบกับการเก็บข้อมูลด้วยวิธี Seismic อย่างไรก็ตาม จุดด้อยของการสำรวจด้วยวิธีนี้ คือ จะไม่สามารถกำหนดความลึกและความหนาที่แน่นอนของชั้นถ่านหินได้ โดยเฉพาะเมื่อชั้นถ่านหินนั้นมีความหนาไม่มาก และชั้นถ่านหินอยู่ในระดับลึกจากชั้นผิวดินมาก ๆ

2.2 ประวัติความเป็นมาของการสำรวจวัดค่าความต้านทานจำเพาะ

การสำรวจวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินนั้นมีการศึกษามานานแล้ว เกิดจากกระบวนการต่อยอดและพัฒนาจากการสำรวจด้วยวิธีการทางไฟฟ้าอื่น ๆ อย่างต่อเนื่อง การสำรวจทางไฟฟ้ามีการประยุกต์เริ่มแรกและมีการแสดงให้เห็นว่ามีการใช้งานจริง ในปี ค.ศ.1830 โดยวิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า (SP method) ผู้ที่ทำการศึกษาคือ โรเบิร์ต ฟ็อกซ์ (Robert Fox) ซึ่งฟ็อกซ์ได้นำมาใช้ในการสำรวจเหมืองแร่ทองแดง ที่อยู่ในประเทศอังกฤษ ต่อมาในช่วงราวๆ ค.ศ.1900 ที่ประเทศฝรั่งเศส คอนราด ชรัมเบอร์เจอร์ (Conrad Schumberger) และประเทศสหรัฐอเมริกา แฟรงค์ เวินเนอร์ (Frank Wenner) ได้ทำการทดลองปล่อยกระแสไฟฟ้าลงในดินและทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า เพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้าตามกฎของโอห์ม โดยที่กฎของโอห์มได้ค้นพบประมาณ ค.ศ. 1827 จึงเป็นที่มาของการสำรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ต่อมาชื่อของชรัมเบอร์เจอร์และเวินเนอร์ได้เป็นที่รู้จักในชื่อของรูปแบบการวางขั้วไฟฟ้าเพื่อการสำรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ในปี ค.ศ. 1917 เอส อาร์ คอน คลิน (H.R. Conklin) ได้เสนอวิธีการสำรวจวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้าของ ไมเคิล ฟาราเดย์ (ค.ศ.1831) ในปี ค.ศ.1920 โอ.เอส.กรีช (O.H. Gish) และ ดับเบิลยู เจ รูเนย์ (W.J. Rooney) ชาวอเมริกา เสนอวิธีการสำรวจโดยใช้กระแสเทลลูริก ซึ่งต่อยอดจากการพบกระแสเทลลูริกและสนามไฟฟ้าจากกระแสเทลลูริก เริ่มต้นโดย ปีเตอร์ บาร์โลว์ (Peter Barlow) ในช่วง ค.ศ.1847

2.3 หลักการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

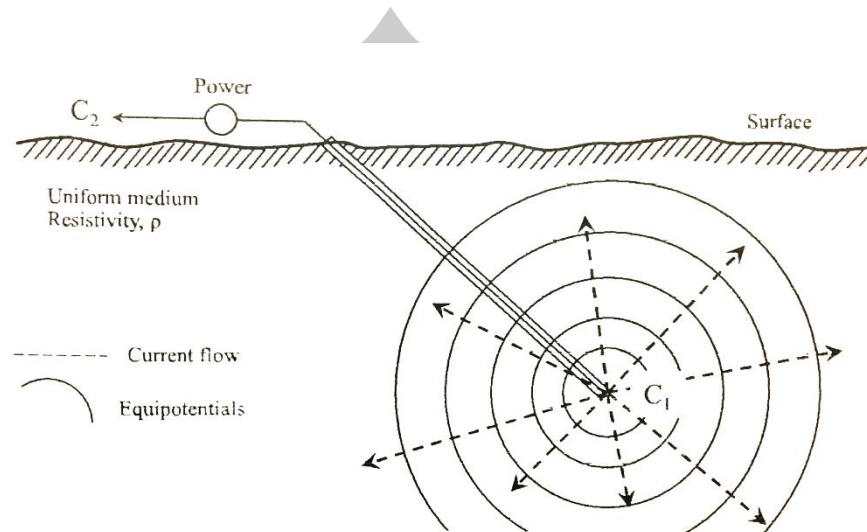
การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน สมมุติว่าดินในบริเวณที่ทำการวัดเป็นพื้นที่ย่อย ๆ และถือว่าดินเป็นตัวกลางที่มีรูปทรงที่แน่นอนเพียงรูปแบบเดียว เช่น ทรงลูกบาศก์ เป็นต้น และดินมีส่วนประกอบที่เป็นเอกพันธ์ทั้งหมดในพื้นที่นั้น ๆ หลักการวัดแสดงดัง ภาพประกอบที่ 2.1



ภาพประกอบที่ 2.1 หลักการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ภาพประกอบที่ 2.1 อุปกรณ์จะประกอบไปด้วย แบตเตอรี่ (Battery) ที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน เป็นตัวจ่ายกระแสให้กับขั้วไฟฟ้า P,P กระแสที่ไหลจากขั้วไฟฟ้าจะแพร่ (Spread) กระจายออกไปทั้งแนวตั้งและแนวนอน คล้ายๆกับลักษณะของน้ำที่ไหลเข้าไปในชั้นของทรายที่มีความพรุนอยู่ (Porous Sand Layer) ถ้าวัสดุตัวกลางหรือดินในบริเวณนั้นเป็นตัวกลางที่เป็น Uniform และเป็น Homogeneous Ground แล้ว เส้นทางเดินของกระแส (Paths of Current Flow) ที่ไหลออกจากขั้วไฟฟ้า จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าเป็นลักษณะครึ่งทรงกลม (Hemispherical Equipotential) ขึ้นรอบขั้วกระแสไฟฟ้า P,P ปริมาตรของดินที่กระแสไหลผ่าน จะเป็นสัดส่วนกับระยะทางระหว่างขั้วกระแสไฟฟ้าทั้ง 4 ขั้ว จากความสัมพันธ์นี้จะถือว่าความลึก (Depth) ของดินที่ทำการวัดค่าความต้านทานจำเพาะจะเป็นสัดส่วนกับระยะทางระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ทราบค่า ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะวัดค่าความต้านทาน (Resistance) จากปริมาตรของดิน

2.3.1 ขั้วกระแสไฟฟ้าขั้วเดียวที่ฝังอยู่ในดิน (Single Current Electrode at Depth)

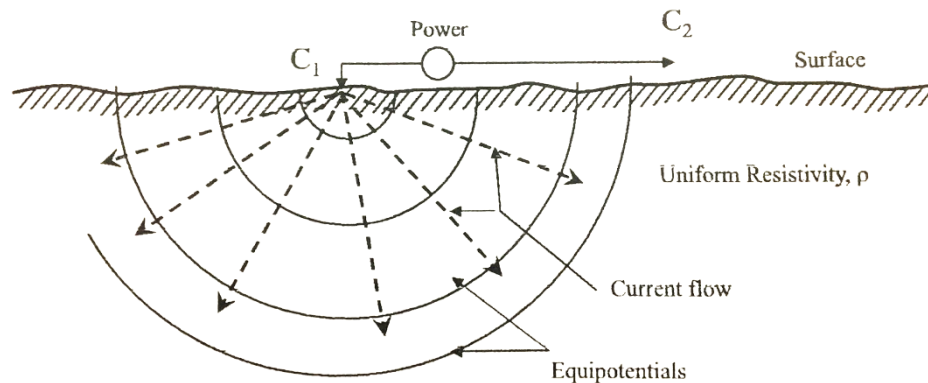


ภาพประกอบที่ 2.2 การฝังขั้วไฟฟ้าแบบจุดให้จ่ายกระแสในดิน [14]

ภาพประกอบที่ 2.2 มีขั้วไฟฟ้าถูกฝังอยู่ในพื้นดิน วิธีการทำได้โดยการเจาะรูลงไปบนพื้นดินแล้วนำเอาขั้วไฟฟ้าฝังลงไป ทำให้ขั้วไฟฟ้ากลายเป็นแหล่งจ่ายกระแสแบบจุด (Point Source of Current Electrode) ขั้วไฟฟ้าจะถูกฝังลงในตำแหน่ง C_1 แล้วจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ขั้วไฟฟ้า โดยมีขั้วไฟฟ้าอีกหนึ่งอันที่ตำแหน่ง C_2 โดยขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่ง C_2 จะทำให้วงจรกระแสครบวงจรพอดี แต่ตำแหน่งของ C_2 ต้องวางห่างจากตำแหน่งของ C_1 เพื่อไม่ให้ขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่งของ C_2 มีผลกระทบต่อขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่งของ C_1 เมื่อตำแหน่งของ C_1 ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าที่ฝังอยู่ในดินแล้วทำการปล่อยกระแสให้กับขั้วตำแหน่งของ C_1 กระแสจะถูกปล่อยออกมารอบจุดขั้วไฟฟ้าเป็นรูปทรงไอโซโทริก แล้วจะเกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นรอบๆขั้ว C_1

2.3.2 ขั้วกระแสไฟฟ้าขั้วเดียวที่วางบนพื้นผิวดิน (Single Current Electrode at Surface)

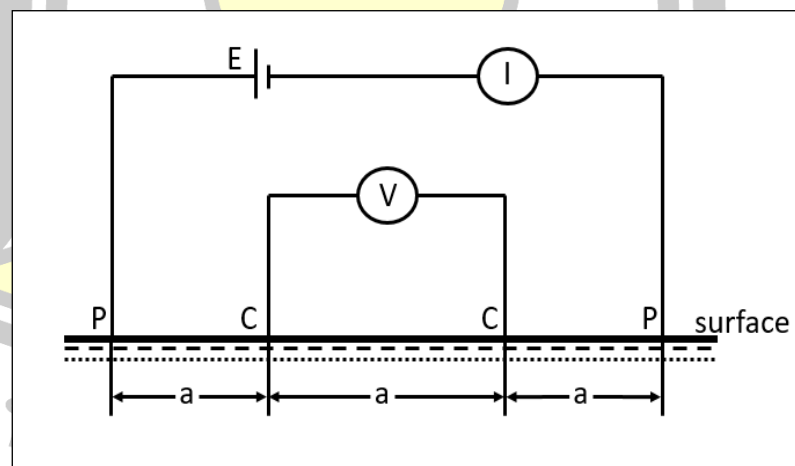
พหุบัน ปณฺ ทิโต ชิว



ภาพประกอบที่ 2.3 ขั้วกระแสไฟฟ้าที่วางอยู่บนผิวดิน [14]

ภาพประกอบที่ 2.3 เป็นการวางขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่ง C_1 ไว้บนพื้นดิน ถ้าอากาศที่อยู่รอบๆ หรือบนผิวดินมีความนำไฟฟ้า (σ) เท่ากับศูนย์ กระแสที่ไหลออกจากขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่ง C_1 ทั้งหมดจะไหลลงดินที่เป็นตัวกลางที่อยู่ชั้นล่าง ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า (Equipotential) โดยมีลักษณะเป็นพื้นผิวครึ่งทรงกลม (Hemispherical Surface)

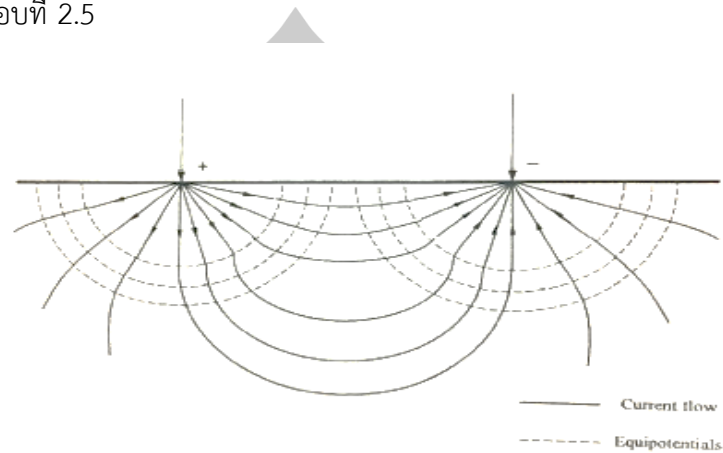
2.3.3 ขั้วกระแสไฟฟ้าสองขั้วที่วางบนพื้นผิวดิน



ภาพประกอบที่ 2.4 ขั้วกระแสไฟฟ้าสองขั้วที่วางบนพื้นผิวดิน

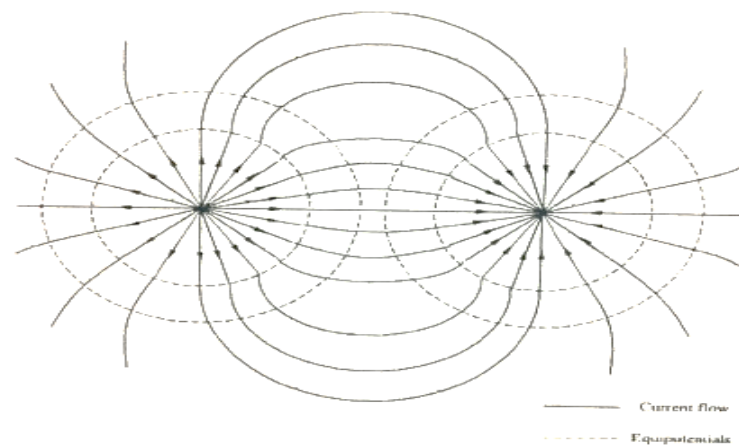
ภาพประกอบที่ 2.4 เป็นการวางขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่ง P_1, P_2 ไว้ที่พื้นผิวดินที่ต้องการวัดค่าความต้านทานจำเพาะ โดยที่ระยะทางระหว่างขั้วกระแสไฟฟ้าทั้งสองขั้วคือ จาก P_1 ถึง P_2 นั้นเป็นระยะที่จำกัด แล้วจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง กระแสที่ไหลเข้าและไหลออกจากขั้วไฟฟ้า จะ

เป็นผลให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นรอบๆบริเวณขั้วไฟฟ้า เส้นทางเดินของกระแสและศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแสดงดังภาพประกอบที่ 2.5



ภาพประกอบที่ 2.5 ภาพตัดขวางของดิน แสดงเส้นทางการไหลของกระแสและศักย์ไฟฟ้า [14]

ภาพประกอบที่ 2.5 แสดงภาพตัดขวางแนวตั้งของดิน แสดงเส้นทางเดินของกระแสและศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในพื้นที่ การวัดค่าความต้านทานจำเพาะจะใช้วิธีการ resistivity methods โดยศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสองจุดนี้จะทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ส่วนภาพในแนวนอนแสดงดังภาพประกอบที่ 2.6



ภาพประกอบที่ 2.6 ภาพในแนวนอนแสดงเส้นสนามไฟฟ้าของกระแสและศักย์ไฟฟ้า [14]

ภาพประกอบที่ 2.3 แสดงเส้นสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นการมองจากด้านบนและเป็นสนามไฟฟ้าเส้นเดียวกับภาพประกอบที่ 2.2 จากความสัมพันธ์ของภาพประกอบที่ 2.2 และภาพประกอบที่ 2.3 จะเห็นได้ว่ารูปทรงของศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแนวตั้งของพื้นที่รูปครึ่งวงกลม ดังนั้นรัศมี (r) ที่ลงใน

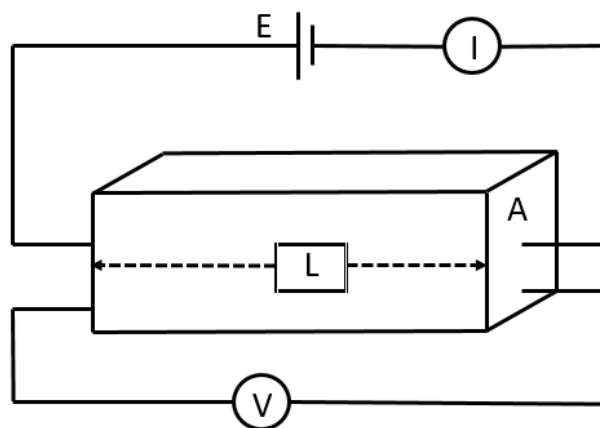
แนวคิด การวัดความลึกของดินตามรัศมี (r) ชั้นของไฟฟ้าบนพื้นดินก็จะขยายตามออกไป ดังนั้นจึงสามารถเพิ่มการวัดที่ความลึกของดินในชั้นต่าง ๆ ได้

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นในดินโดยแปรผกผันกัน ถ้าความชื้นดินสูง ค่าความต้านทานจำเพาะของดินต่ำ จากกฎของโอห์มได้กล่าวไว้ว่า “กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวนำไฟฟ้าตัวหนึ่งมีความแปรผันตรงกับค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างปลายของตัวนำไฟฟ้าทั้งสองด้าน” จากกฎของโอห์มกล่าวได้ว่า

$$\begin{aligned} & v \propto i \\ & \text{และ } i \propto 1/R \\ \text{ดังนั้นจะได้ว่า } & v = IR \end{aligned} \quad \dots(2.10)$$

การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัตถุนั้นสามารถทำได้โดยการนำวัตถุนั้น ๆ มาทำการปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่าน แล้วทำการวัดค่ากระแสด้วยแอมป์มิเตอร์ และทำการวัดค่าความต่างศักย์ด้วยโวลต์มิเตอร์ แสดงดังภาพประกอบที่ 2.7



ภาพประกอบที่ 2.7 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะ

ภาพประกอบที่ 2.7 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) เท่ากับค่าความต้านทานวัตถุตัวนำ (R) คูณด้วยพื้นที่หน้าตัด (A) หารด้วยความยาวของวัตถุ (L) ดังสมการ

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad \dots(2.11)$$

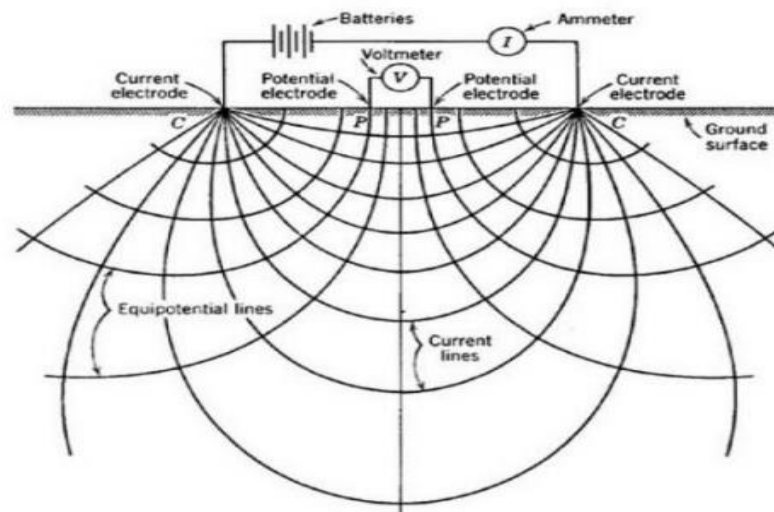
เมื่อ ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะ (Ω/m)

R คือ ค่าความต้านทาน (Ω)

A คือ พื้นที่หน้าตัด (m^2)

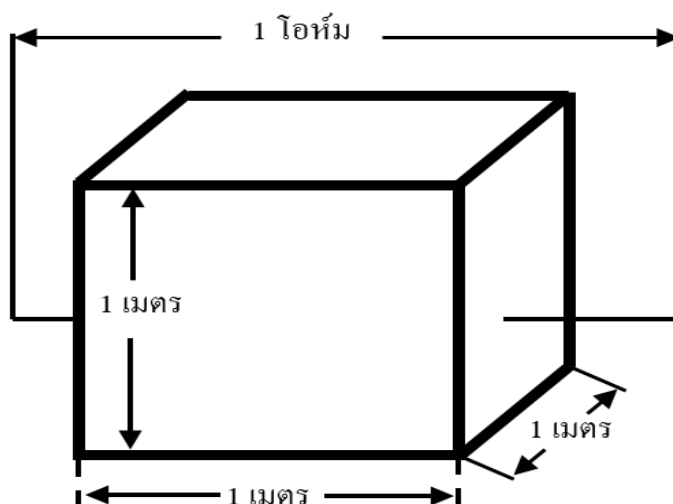
L คือ ความยาว (m)

ในการทดลองเพื่อทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ผลของกำลังไฟฟ้าต่อการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินนั้น อาศัยหลักการปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปในดินผ่านขั้วไฟฟ้าสองขั้ว แล้วทำการวัดค่าความต่างศักย์และค่ากระแส นำค่าที่ได้มาแปลความหมายหรือหาค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแสดงดังภาพประกอบที่ 2.8



ภาพประกอบที่ 2.8 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะ [14]

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน $1 \Omega\text{-}m$ หมายความว่า ปริมาตรดิน $1 m^2$ มีค่าความต้านทาน 1Ω



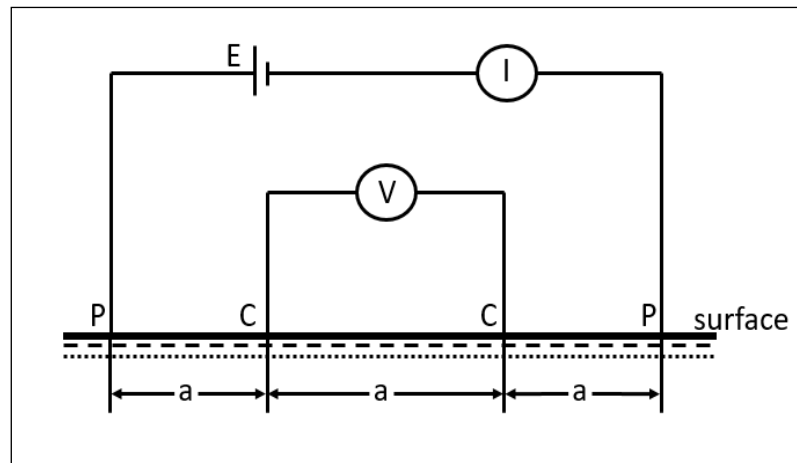
ภาพประกอบที่ 2.9 ความหมายค่าความต้านทานจำเพาะ $1 \Omega \cdot m$

ในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินนั้นไม่สามารถบอกชนิดของดินได้ เพราะค่าความต้านทานจำเพาะของดินนั้นเปลี่ยนแปลงตามองค์ประกอบมากมาย เช่น อุณหภูมิ ปริมาณน้ำในดิน ความร้อน ลม เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามองค์ประกอบที่กล่าวมาในข้างต้นมีผลต่อการวัดค่าความต้านทานจำเพาะนั้น มีผลเฉพาะที่ความลึก 0-1.5 เมตรจากผิวดินเท่านั้น

ตามมาตรฐาน ASTM 2005 (American Society for Testing and Materials) ได้กำหนดวิธีการจัดวางขั้วไฟฟ้าเพื่อทำการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินไว้ 3 แบบ [18] คือ การจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบเวนเนอร์ (Wenner configuration) การจัดวางขั้วแบบชลัมเบอร์เจอร์ (Schlumberger configuration) และการจัดวางขั้วแบบไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole configuration) ซึ่งรายละเอียดหลักการจัดวางและข้อดีข้อเสียของการจัดวางขั้วไฟฟ้ามียังต่อไปนี้

2.3.1 หลักการวางขั้วแบบเวนเนอร์ (Wenner configuration)

หลักการวางขั้วแบบเวนเนอร์ คือ การจัดวางระยะขั้วไฟฟ้าให้เท่า ๆ กันทุก ๆ ขั้ว ตามภาพประกอบที่ 2.10



ภาพประกอบที่ 2.10 การจัดวางขั้วแบบเวนเนอร์

ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสามารถหาได้จากสมการ

$$\rho = 2\pi a \frac{\Delta v}{i} \quad \dots(2.12)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ ($\Omega\text{-m}$)

a คือ ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า (m)

v คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Volt)

i คือ กระแสไฟฟ้า (Amp)

ข้อดีของการวางขั้วไฟฟ้าแบบเวนเนอร์

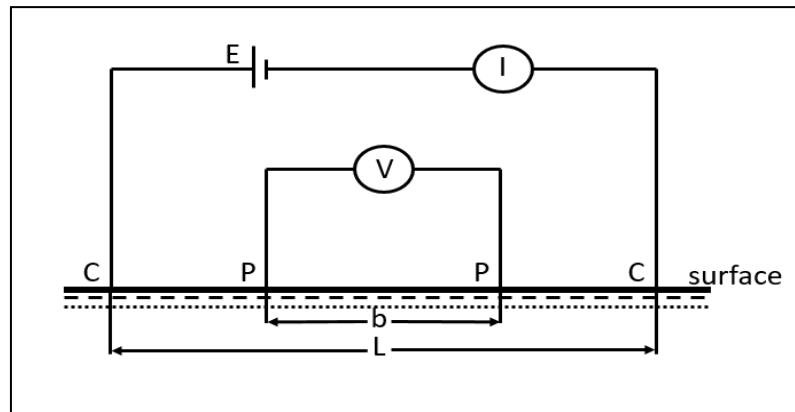
1. วิธีการนี้สามารถสำรวจได้ลึกกว่าวิธีการอื่น
2. ข้อผิดพลาดจากการวางขั้วไฟฟ้านั้นค่อนข้างน้อย เนื่องจากทุกครั้ง que เพิ่มขนาดความลึก ขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 ขั้วจะขยายออกไปเท่า ๆ กัน
3. สามารถสำรวจทางธรณีได้ดีในแนวตั้ง

ข้อเสียของการวางขั้วไฟฟ้าแบบเวนเนอร์

1. ไม่เหมาะสำหรับสำรวจโครงสร้างธรณีที่เป็นโพรง ผนัง หรือแหล่งรวมของแร่

2.3.2 หลักการวางขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจอร์ (Schlumberger configuration)

การจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจอร์นั้นมีหลักการคล้ายกับแบบเวนเนอร์ คือมีการวางขั้วไฟฟ้า 4 ขั้ว โดยกำหนดให้ระยะ L ระหว่างขั้วไฟฟ้า cc มีค่ามาก ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับระยะของ b ที่เป็นระยะของขั้วไฟฟ้า PP โดยระยะของ L นั้นจะต้องมากกว่าระยะของ b 5 เท่า



ภาพประกอบที่ 2.11 หลักการวางขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจอร์

ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะหาได้จากสมการ

$$\rho = \frac{(\pi(\frac{L}{2})^2 - (\frac{b}{2})^2) \frac{v}{i}}{b} \quad \dots(2.13)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ ($\Omega\text{-m}$)

b คือ ระยะห่างระหว่างขั้วความต่างศักย์ (m^2)

L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วปล่อยกระแสไฟฟ้า (m^2)

v คือ ค่าความต่างศักย์ (Volt)

i คือ กระแสไฟฟ้า (Amp)

ข้อดีของการวางขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจอร์

1. ใช้เวลาในการสำรวจน้อยกว่าวิธีการอื่นที่ระดับความลึกเดียวกัน และสภาพทางธรณีวิทยาแบบเดียวกัน

2. เหมาะสำหรับการสำรวจทางธรณีทั้งแนวตั้งและแนวราบ

3. ปัญหาด้าน Lateral resistivity variation น้อยแม้ว่ากรณีที่ชั้นหินใต้ดินไม่วางตัวเป็นแนวระนาบเดียวกัน

4. Signal-to-noise ratio (S/N) ดีกว่าแบบไดโพล-ไดโพล

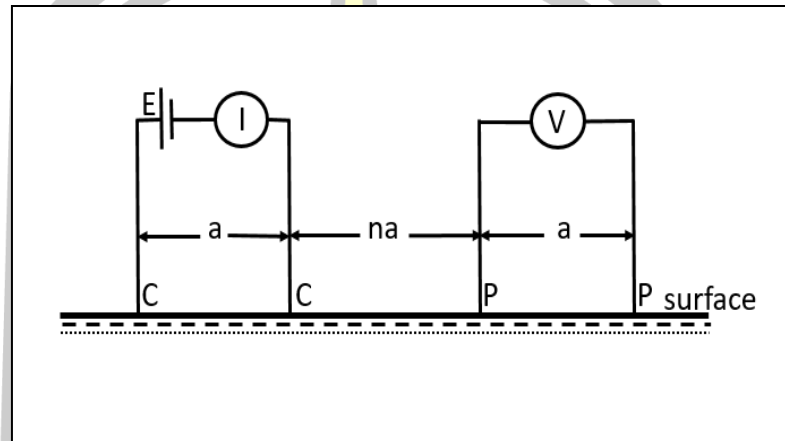
ข้อเสียของการวางขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจอร์

1. Signal-to-noise ratio (S/N) น้อยกว่ากว่ารูปแบบเวนเนอร์

2. ความผิดพลาดจากการวางตำแหน่งขั้วไฟฟ้าค่อนข้างสูง

2.3.3 หลักการวางขั้วไฟฟ้าแบบไดโพล-ไดโพล (dipole-dipole configuration)

การจัดวางขั้วแบบไดโพล-ไดโพลนั้น กำหนดให้ขั้วไฟฟ้า cc มีระยะเท่ากับกับขั้วไฟฟ้า pp และระยะห่างของขั้ว cc กับขั้ว pp เท่ากับ na



ภาพประกอบที่ 2.12 การวางขั้วไฟฟ้าแบบไดโพล-ไดโพล

ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏได้จากสมการ

$$\rho = n(n+1)(n+2)a\left(\frac{V}{i}\right) \quad \dots (2.14)$$

เมื่อ ρ คือ ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ ($\Omega\text{-m}$)

a คือ ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า (m^2)

n คือ factor number of spacing; 1, 2, 3...

V คือ ค่าความต่างศักย์

i คือ กระแสไฟฟ้า

ข้อดีของการวางขั้วไฟฟ้าแบบไดโพล-ไดโพล

1. วิธีการวางขั้วไฟฟ้าแบบไดโพล-ไดโพลใช้สายไฟฟ้าสั้นกว่าวิธีการอื่น
2. สสำรวจโครงสร้างทางธรณีได้ดี เช่น โปรงหิน ผัน รอยแตก

เสียของวิธีการวางขั้วแบบไดโพล-ไดโพล

1. ไม่เหมาะสำหรับสำรวจหินใต้ดินในแนวราบ
2. ค่าสัญญาณที่วัดได้น้อยกว่าวิธีการอื่น

2.4 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในปีค.ศ. 1982 Goldman (Israel) ได้ใช้วิธีการทางไฟฟ้าทำการสำรวจน้ำทะเลที่รุกล้ำชายฝั่งด้านล่าง (Electrical Prospecting methods in Monitoring Seawater Intrusions) ในประเทศอิสราเอล การประยุกต์การสำรวจนี้มาจากการสำรวจแหล่งน้ำใต้ดิน การศึกษาในครั้งนี้ Goldman ได้ใช้วิธีการสำรวจแบบวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะเป็นวิธีการเบื้องต้น เพราะต้นทุนของอุปกรณ์และเครื่องมือไม่สูงมากและทำการสำรวจอีกครั้งด้วยวิธีการสำรวจทางแม่เหล็กไฟฟ้า[17]

ในปีค.ศ. 2001 เพียงตา สাত্রักษ์และคณะ ได้ทำการหาโพรงและชั้นเกลือหินใต้ผิวดินด้วยวิธีการวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (determination of subsurface cavity and rock salt by using resistivity survey) ในการประยุกต์การสำรวจนี้หลักการวางขั้วไฟฟ้าแบบโดโพล-โดโพล เพราะวิธีการนี้เหมาะสำหรับสำรวจธรณีที่มีลักษณะเป็นโพรง ผนัง จากการสำรวจพบว่าลักษณะของโพรงจะปรากฏเป็นรูปร่างที่มีขอบเขตเป็นวงรอบซึ่งมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำประมาณ 0.1 – 0.6 ($\Omega - m$) แทรกอยู่บริเวณที่มีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูง โดยพื้นที่การสำรวจอยู่ที่จังหวัดบุรีรัมย์ [18]

ในปีค.ศ. 2009 Mahamound I.I. Mohamaden และคณะทำการสำรวจแหล่งน้ำใต้ดินในเขตทะเลทรายทางตะวันออกและทางตะวันตกของเมือง Asyut ประเทศอียิปต์ การสำรวจครั้งนี้เพื่อหาแหล่งน้ำมาเก็บไว้สำหรับทำการเกษตร การสำรวจในครั้งนี้ใช้วิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ใช้หลักการวางขั้วไฟฟ้าแบบซัลมเบอร์แจ ผลของการสำรวจแบ่งออกเป็น 4 ชั้นโดยแปลความหมายออกมาได้ว่า ชั้นบนสุดเป็นกรวด ทราย ที่มีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่สูง ชั้นที่ 2 เป็นดินทรายอุ้มน้ำที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะไม่สูงมาก ชั้นที่ 3 เป็นชั้นที่มีโคลนปนน้ำเพราะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่ต่ำ ชั้นที่ 4 นั้นเป็นชั้นหินปูนที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่สูง [19]

ในปีค.ศ. 2009 Bush และ Wang ได้ทำการศึกษาวงจรแหล่งจ่ายกระแสเฟสเดียวที่มีแผงโซลาร์เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน (single-phase current source sola inverter) แหล่งจ่ายแรงดันทางด้านอินพุทของวงจรเป็น Photovoltaic โดยตัววงจรออกแบบให้มี Ripple ที่ต่ำโดยใช้อุปกรณ์พาสซีฟ (passive components) ทำให้อุปกรณ์เล็กกะทัดรัดลงและปรับปรุงวงจรให้มีกำลัง (power) ที่สูงขึ้น [20]

ในปีค.ศ. 2013 Elija A. Ayolabi และคณะได้ทำการสำรวจหาสารไฮโดรคาร์บอนที่รั่วไหลในเขตชุมชน Baruwa ประเทศไนจีเรีย ที่มีการขุดเจาะน้ำมันเป็นจำนวนมาก โดยใช้วิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะตามแนวท่อส่งน้ำมัน พบว่าการสำรวจที่ระดับความลึก 1-35.44 m มีค่าความ

ต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่สูงอยู่ในช่วง 943–4749 Ω แปลความหมายทางธรณีฟิสิกส์ได้ว่าการรั่วไหลของสารไฮโดรคาร์บอนจากท่อส่งน้ำมันที่ระดับความลึก 2–3 m จากระดับพื้นผิว [21]

ในปี ค.ศ. 2013 ปารีชาต ศรีเสน ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้การประยุกต์เทคนิคการสำรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าเพื่อประเมินการรุกรานของน้ำทะเลในชั้นน้ำไร้แรงดัน อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดเพชรบุรี แบบ ความต้านทานไฟฟ้ายังลึก (vertical electrical sounding, VES) โดยพื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ที่ ตำบลชะอำ อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดเพชรบุรี ซึ่งพื้นที่ศึกษาอยู่ติดชายฝั่งทะเลอ่าวไทย มีคลองขุดสำหรับขนส่งสินค้าทางเรือ ลึก ประมาณ 10 m กว้าง 45 m ยาว 3.5 Km และคลองธรรมชาติ ลึกประมาณ 1-2 m กว้าง 25 m ทั้งสองคลองมีปากแม่น้ำไหลออกสู่ทะเล จากการศึกษาชั้นน้ำตะกอนทรายชายหาดที่มีความลึกตั้งแต่ 1-15 m พบว่ามีมวลน้ำ เค็มขนาดใหญ่แพร่เข้าไปในชั้นน้ำตะกอนทรายชายหาดตั้งแต่หน้าหาด ลึกเข้าไปใน แผ่นดินจนกระทั่งถึงจุดสำรวจแล้ว ซึ่งเกิดจากอิทธิพลการรุกรานของน้ำทะเลจากหน้าหาดเข้ามาในแผ่นดิน ทำให้บริเวณที่ทำการสำรวจไม่เห็นแนวรอยต่อระหว่างน้ำทะเลกับน้ำบาดาลอย่างที่คาดการณ์ไว้ สำหรับขอบเขต การรุกราน ของน้ำทะเลจากปัจจัยของโครงสร้างทางชลศาสตร์ อันได้แก่ คลองขุดและคลองธรรมชาตินั้นไม่ สามารถบอกได้ เนื่องจากน้ำ ทะเลได้รุกราน เข้ามาในชั้นทรายชายหาดเกินกว่าบริเวณที่ทำการสำรวจแล้ว ดังนั้นเราจึงไม่สามารถเปรียบเทียบขอบเขตการรุกรานของน้ำทะเลจากอิทธิพลของคลองขุดและคลองธรรมชาติได้ ดังนั้นจึงบอกได้เพียงว่าในพื้นที่ศึกษาได้รับอิทธิพลการรุกรานของน้ำทะเลจากหน้าหาดเข้ามาในแผ่นดิน มากกว่าอิทธิพลจากโครงสร้างทางชลศาสตร์ จนเกิดการปนเปื้อนของน้ำทะเลทั่วทั้งชั้นน้ำแล้ว[16]

ในปีค.ศ. 2013 O.Anomohanran จากภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเดลดัสเตท ประเทศไนจีเรีย ได้ทำการสำรวจด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดิน เพื่อสำรวจหาแหล่งน้ำใต้ดินที่เมือง Oleh โดยใช้วิธีการวางขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจอร์ แล้วทำการแปลค่าด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ นำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่า Lithologic Log ที่ทำการขุดเจาะบ่อน้ำชั้นดิน 4 ชั้นพบหินอุ้มน้ำที่ชั้นที่ 2 มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะอยู่ระหว่าง 347.4–1137 $\Omega - m$ ชั้นของหินอุ้มน้ำจะมีความหนา 12 – 14.9 m และพบชั้นหินอุ้มน้ำอีกครั้งในชั้นที่ 4 ที่ระดับความลึก 12.8–28.7 m ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะอยู่ระหว่าง 416.7–1459.2 $\Omega - m$ [22]

ในปีค.ศ. 2014 Victor O.Chukwudi และคณะได้ทำการสำรวจที่เมือง Lokpaukwu รัฐ Abia ทางตะวันออกเฉียงใต้ของไนจีเรียเพื่อหาแหล่งน้ำใต้ดิน โดยจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจอร์ และได้แปลค่าทางธรณีฟิสิกส์ออกมาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Interpex แสดงผลการสำรวจชั้นดินหลายชั้น ผลการสำรวจในครั้งนี้พบว่า ที่ระดับความลึก 40 m พบชั้นหินดินดานที่ปนด้วยดินเหนียว และทรายและมีแหล่งน้ำที่สามารถนำมาใช้ได้ [23]

ในปีค.ศ. 2015 ประติมากรรม หาแก้ว ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ได้ทำการศึกษาผลกระทบของกระแสความถี่สูงต่อการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดิน โดยการทดลองเริ่มต้นที่ความถี่ 1 Hz ไปจนถึง 1000 Hz ผลของงานวิจัยชี้ว่าที่ความถี่ 1000 Hz ให้ค่าเฉลี่ยเป็น 1.0% ในขณะที่ช่วงความถี่อื่นให้ค่าความคลาดเคลื่อน 1.6–11.5 % นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลกระทบของการฝังขั้วไฟฟ้าที่ระดับความลึก 1–10 cm ผลการวิจัยพบว่าที่ระดับความลึก 8 cm ให้ค่าการวัดที่แม่นยำที่สุดและการปรับระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่ระยะ 1–15 cm พบว่าที่ระยะ 15 cm ให้ความแม่นยำในการวัดดีที่สุด โดยมีความคลาดเคลื่อนในการวัด 1.31 % [14]



บทที่ 3

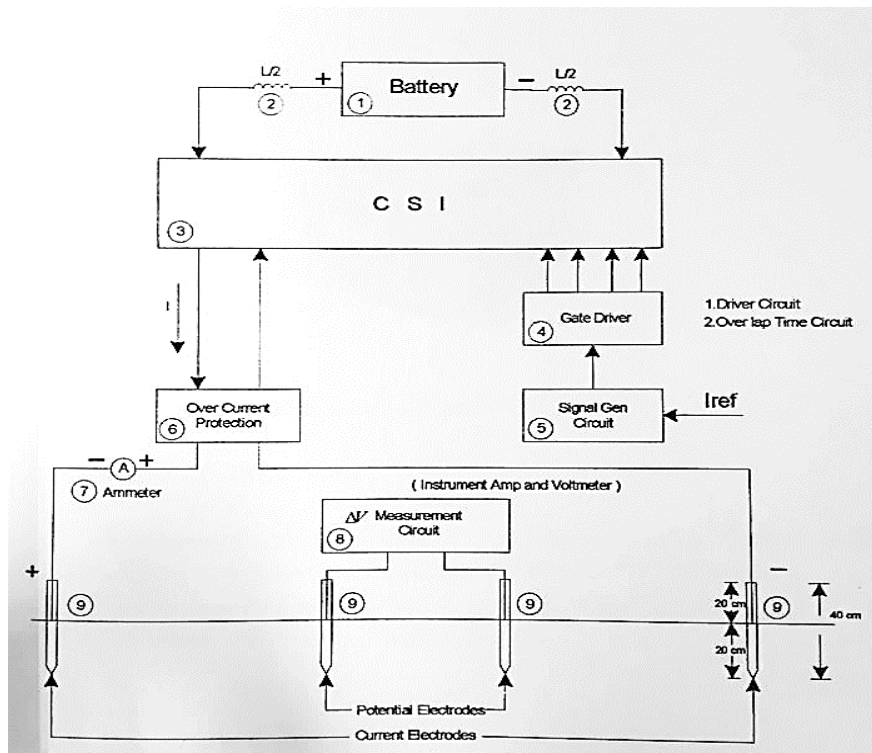
วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัย การวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง โดยผู้วิจัย จะทำการศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ซึ่งเป็น คุณสมบัติทางกายภาพของดิน อีกข้อหนึ่งค่าความต้านทานจำเพาะของดินเป็นตัวแปรด้านไฟฟ้า วิธีการทำได้โดยปล่อยไฟฟ้ากระแสสลับ ที่สามารถปรับค่าได้ลงไปบนดิน แล้วทำการวัดค่ากระแส แรงแดัน เพื่อนำค่าที่ได้มาหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ดินที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ คือ สนาม ด้านหลังคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม แล้วทำการศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าที่ เหมาะสมต่อการวัดค่าความต้านทานจำเพาะ ที่ความถี่ระดับต่าง ๆ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ครั้งนี้ แหล่งจ่ายเป็นเครื่อง CSI ของ คุณประติมากรณ์ หาแก้ว [14] ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ ผลกระทบของความถี่สูงต่อการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน รายละเอียดของอุปกรณ์สามารถ อธิบายได้ดังต่อไปนี้

3.1 โครงสร้างอุปกรณ์

ภาพประกอบ 3.1 แสดงแผนภาพอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองการวัดค่าความต้านทาน ไฟฟ้าจำเพาะของดิน โดยอุปกรณ์นั้นประกอบไปด้วย แบตเตอรี่ (battery) ตัวเหนี่ยวนำ (inductor) วงจรแหล่งจ่ายกระแส (current source inverter , CSI) วงจรขับเกต (gate driver) วงจรกำเนิด สัญญาณควบคุม (control signal generator) วงจรป้องกันกระแสเกิน (over protection circuit) เครื่องวัดกระแส (ammeter) เครื่องวัดความต่างศักย์ (potential measurement) ขั้วไฟฟ้า (electrodes)

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ



ภาพประกอบที่ 3.1 แสดงแผนภาพอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง [14]

3.1.1 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแสตรงที่ใช้ป้อนพลังงานให้กับเครื่องวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน เป็นแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ ข้อดีของแบตเตอรี่ขนาดนี้คือ สะดวกต่อการเคลื่อนย้าย สามารถเพิ่มชุดจ่ายกำลังได้ในกรณีที่ต้องการเพิ่มกำลังไฟฟ้า นอกจากนี้แบตเตอรี่ยังสามารถจัดเก็บพลังงานจากแหล่งพลังงานแบบพกพาอื่น ๆ ได้ เช่น แผงพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cells) ด้วยขนาดแบตเตอรี่ที่ไม่ใหญ่มากนักทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการบรรจุพลังงานให้กับแบตเตอรี่นั้นมีขนาดที่เล็กตาม ทำให้สะดวกต่อการเคลื่อนย้าย และสามารถบรรจุพลังงานให้กับแบตเตอรี่ได้ในกรณีที่ห่างไกลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า

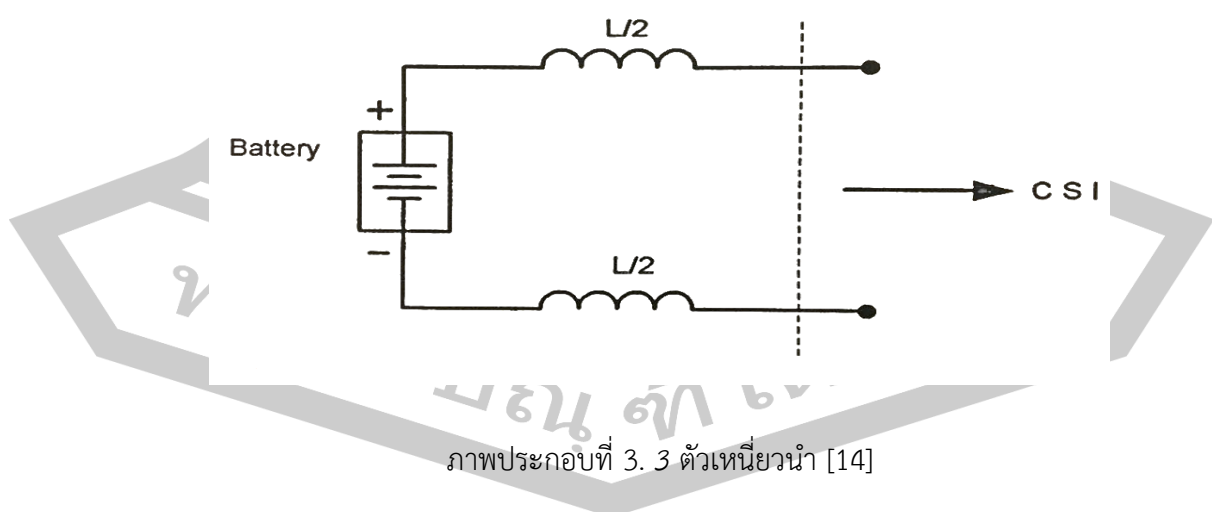
แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ น้ำหนักของตัวแบตเตอรี่ต้องเบาที่สุด เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย อย่างไรก็ตามพลังงานของแบตเตอรี่เป็นสิ่งสำคัญ จะต้องเพียงพอต่อการใช้งานในระยะเวลา 1-3 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาระดับพลังงานที่ได้จากแบตเตอรี่ 100-500 วัตต์ ที่ระดับแรงดัน 12-24 โวลต์ กระแส 20 แอมป์ ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้แบตเตอรี่ SPA รุ่น SL12-26 ที่มีขนาดแรงดัน 12 โวลต์ กระแส 26 แอมแปร์ชั่วโมง(Ah) ซึ่งเป็นแบตเตอรี่แบบ Sealed Rechargeable Battery แสดงลักษณะตามภาพ 3.2



ภาพประกอบที่ 3.2 แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลอง [14]

3.1.2 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductors)

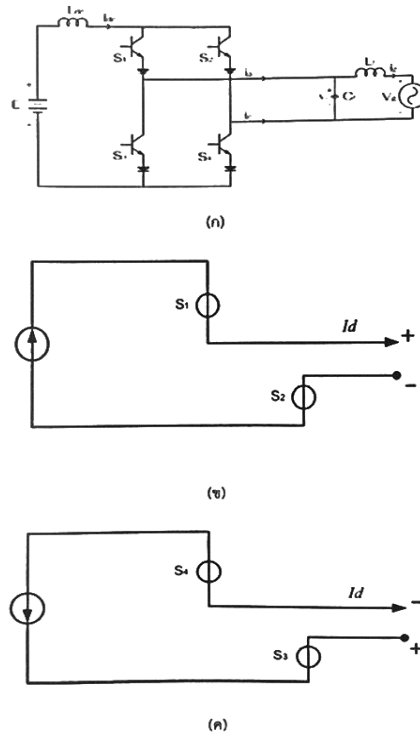
เพื่อให้แหล่งจ่ายกระแส (CSI) ทำงานได้ดี จะต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสม สามารถจ่ายกระแสอย่างต่อเนื่องให้กับวงจร จากภาพประกอบ 3.2 จะใช้ตัวเหนี่ยวนำสองชุดด้วยกัน เพื่อเพิ่มอัตราการระบายความร้อนและความสมดุล สำหรับวงจร CSI ที่มีระบบกราวด์แบบลอย (floating ground)



ภาพประกอบที่ 3.3 ตัวเหนี่ยวนำ [14]

3.1.3 วงจรแหล่งจ่ายกระแส

วงจรแหล่งจ่ายกระแสแสดงได้ดังภาพประกอบ 3.4



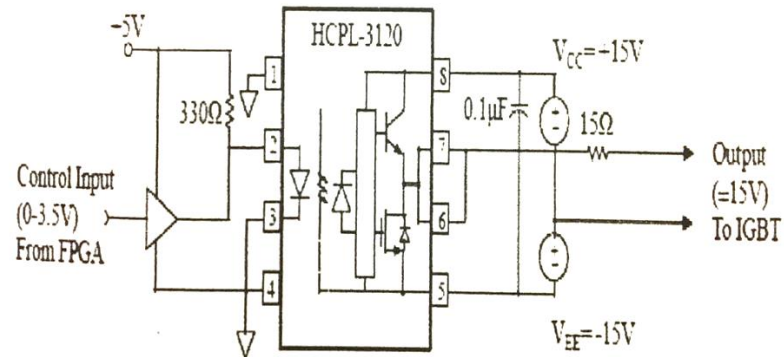
ภาพประกอบที่ 3.4 เป็นวงจรแหล่งจ่ายกระแส (CSI) แบบเฟสเดียว [14]

3.1.4 วงจรขับเคลื่อน

วงจรขับเคลื่อนทำหน้าที่สัญญาณควบคุม (control signal) ให้มีระดับแรงดันและกระแสที่เหมาะสมในการ turn-on หรือ turn-off

3.1.4.1 วงจรปรับสัญญาณเกต

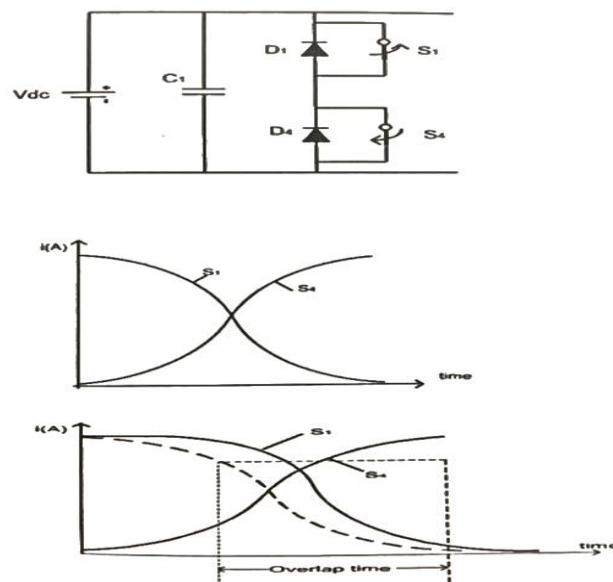
วงจรทำหน้าที่ปรับระดับแรงดันของสัญญาณ gate control signal generator ให้มีขนาดแรงดัน $\pm 15V$ ลักษณะแสดงดังภาพประกอบที่ 3.5



ภาพประกอบที่ 3.5 วงจรขับเกต [14]

3.1.4.2 วงจรสร้าง overlap time

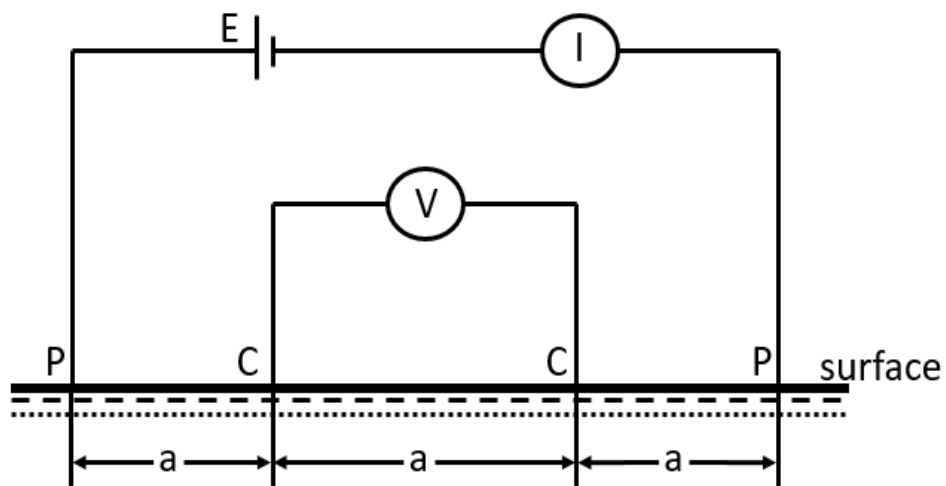
เครื่อง CSI เป็นแหล่งจ่ายกระแส การทำงานของวงจร CSI สวิตช์ต้องไม่ก่อให้เกิดการเปิดการปิดวงจร ไม่เช่นนั้นแรงดันจะตกคร่อมสวิตช์ทำให้วงจรพังเสียหาย จึงจำเป็นต้องให้สวิตช์อยู่ในชั่วเดี๋ยวกัน Turn-on จนเสร็จสมบูรณ์เสียก่อนที่จะทำการ Turn-off แสดงดังภาพประกอบที่ 3.6



ภาพประกอบที่ 3.6 วงจรสร้าง Overlap Time [14]

3.1.5 ขั้วไฟฟ้า

การจัดวางขั้วไฟฟ้าเพื่อทำการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินนั้น มีด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ การวางขั้วแบบเวนเนอร์ (Wenner configuration) การวางขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจอร์ (Schlumberger configuration) การวางขั้วไฟฟ้าแบบไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole configuration) ทางด้านผู้วิจัยจะใช้หลักการในการทดลองครั้งนี้ จะใช้หลักการวางขั้วไฟฟ้าแบบเวนเนอร์ (Wenner configuration) หลักการวางขั้วแบบเวนเนอร์ คือ การจัดวางระยะขั้วไฟฟ้าให้เท่าๆกันทุกขั้ว แสดงดังภาพประกอบที่ 3.7



ภาพประกอบที่ 3.7 การจัดวางขั้วแบบเวนเนอร์

ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสามารถหาได้จากสมการ

$$\rho = 2\pi a \left(\frac{\Delta V}{I} \right) \quad \dots(3.1)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ ($\Omega\text{-m}$)

a คือ ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า (m^2)

ΔV คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Volt)

i คือ กระแสไฟฟ้า (Amp)

3.2 วิธีการดำเนินการทดลอง

วิธีการดำเนินการทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังต่อไปนี้

3.2.1 การทดลองในห้องปฏิบัติการ

การทดลองที่ 1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในการทดลองนี้จะกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและความลึกของดินที่ใช้วัดค่าความต้านทานจำเพาะให้คงที่ โดยกำหนดความถี่ที่ $10\text{--}80\text{ Hz}$ และระดับความลึกของดินที่ 0.03 m แหล่งจ่ายพลังงานระดับแรงดันที่ $10\text{--}200\text{ v}$ แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) และค่ากระแสไฟฟ้า (i)

การทดลองที่ 2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในการทดลองนี้จะกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและความลึกของดินที่ใช้วัดค่าความต้านทานจำเพาะให้คงที่ โดยกำหนดความถี่ที่ $10\text{--}80\text{ Hz}$ และระดับความลึกของดินที่ 0.04 m แหล่งจ่ายพลังงานระดับแรงดันที่ $10\text{--}200\text{ v}$ แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) และค่ากระแสไฟฟ้า (i)

การทดลองที่ 3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในการทดลองนี้จะกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและความลึกของดินที่ใช้วัดค่าความต้านทานจำเพาะให้คงที่ โดยกำหนดความถี่ที่ $10\text{--}80\text{ Hz}$ และระดับความลึกของดินที่ 0.05 m แหล่งจ่ายพลังงานระดับแรงดันที่ $10\text{--}200\text{ v}$ แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) และค่ากระแสไฟฟ้า (i)

3.2.2 การทดลองภาคสนาม

การทดลองภาคสนามเป็นการทดลองเพิ่มเติม เพื่อทดสอบกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความแม่นยำในการวัด โดยผลการทดลองจะแนบในภาคผนวก ก

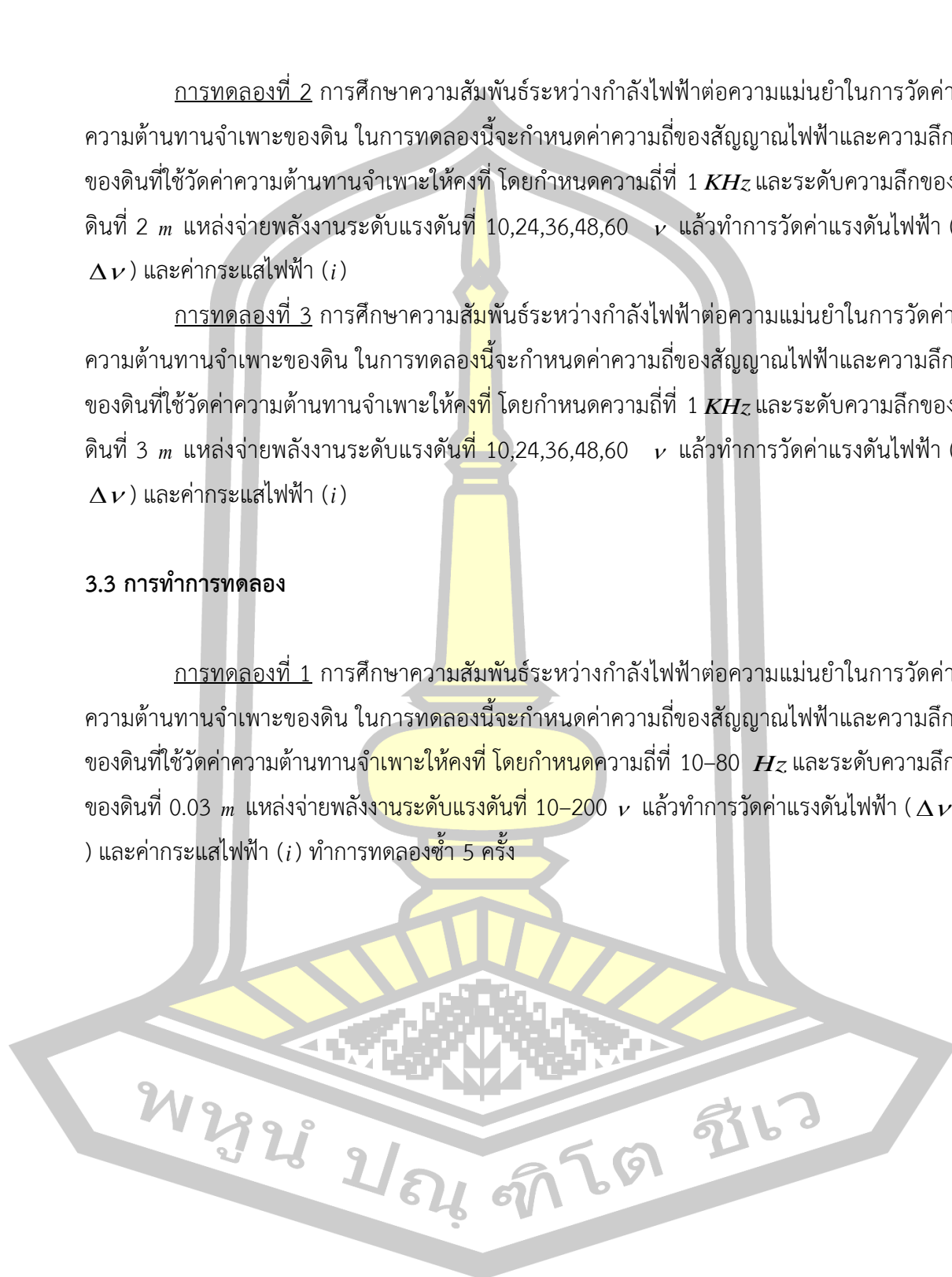
การทดลองที่ 1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในการทดลองนี้จะกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและความลึกของดินที่ใช้วัดค่าความต้านทานจำเพาะให้คงที่ โดยกำหนดความถี่ที่ 1 KHz และระดับความลึกของดินที่ 1 m แหล่งจ่ายพลังงานระดับแรงดันที่ $10, 24, 36, 48, 60\text{ v}$ แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) และค่ากระแสไฟฟ้า (i)

การทดลองที่ 2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในการทดลองนี้จะกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและความลึกของดินที่ใช้วัดค่าความต้านทานจำเพาะให้คงที่ โดยกำหนดความถี่ที่ 1 KHz และระดับความลึกของดินที่ 2 m แหล่งจ่ายพลังงานระดับแรงดันที่ $10,24,36,48,60\text{ v}$ แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) และค่ากระแสไฟฟ้า (i)

การทดลองที่ 3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในการทดลองนี้จะกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและความลึกของดินที่ใช้วัดค่าความต้านทานจำเพาะให้คงที่ โดยกำหนดความถี่ที่ 1 KHz และระดับความลึกของดินที่ 3 m แหล่งจ่ายพลังงานระดับแรงดันที่ $10,24,36,48,60\text{ v}$ แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) และค่ากระแสไฟฟ้า (i)

3.3 การทำการทดลอง

การทดลองที่ 1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในการทดลองนี้จะกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและความลึกของดินที่ใช้วัดค่าความต้านทานจำเพาะให้คงที่ โดยกำหนดความถี่ที่ $10\text{--}80\text{ Hz}$ และระดับความลึกของดินที่ 0.03 m แหล่งจ่ายพลังงานระดับแรงดันที่ $10\text{--}200\text{ v}$ แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) และค่ากระแสไฟฟ้า (i) ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง



ตารางที่ 3.1 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 10 - 80 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v					
20 v					
30 v					
40 v					
50 v					
60 v					
70 v					
80 v					
90 v					
100 v					
110 v					
120 v					
130 v					
140 v					
150 v					
160 v					
170 v					
180 v					
190 v					
200 v					



การทดลองที่ 1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในการทดลองนี้จะกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและความลึกของดินที่ใช้วัดค่าความต้านทานจำเพาะให้คงที่ โดยกำหนดความถี่ที่ $10 - 80 \text{ Hz}$ และระดับความลึกของดินที่ 0.03 m แหล่งจ่ายพลังงานระดับแรงดันที่ $10 - 200 \text{ v}$ แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) และค่ากระแสไฟฟ้า (i) ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง

ตารางที่ 3.2 วัดค่ากระแส (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 10 - 80 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v					
20 v					
30 v					
40 v					
50 v					
60 v					
70 v					
80 v					
90 v					
100 v					
110 v					
120 v					
130 v					
140 v					
150 v					
160 v					
170 v					
180 v					
190 v					
200 v					

การทดลองที่ 2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในการทดลองนี้จะกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและความลึกของดินที่ใช้วัดค่าความต้านทานจำเพาะให้คงที่ โดยกำหนดความถี่ที่ 10–80 Hz และระดับความลึกของดินที่ 0.04 m แหล่งจ่ายพลังงานระดับแรงดันที่ 10–200 v แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) และค่ากระแสไฟฟ้า (i)

ตารางที่ 3.3 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 10 - 80 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v					
20 v					
30 v					
40 v					
50 v					
60 v					
70 v					
80 v					
90 v					
100 v					
110 v					
120 v					
130 v					
140 v					
150 v					
160 v					
170 v					
180 v					
190 v					
200 v					

การทดลองที่ 2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในการทดลองนี้จะกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและความลึกของดินที่ใช้วัดค่าความต้านทานจำเพาะให้คงที่ โดยกำหนดความถี่ที่ $10\text{--}80\text{ Hz}$ และระดับความลึกของดินที่ 0.04 m แหล่งจ่ายพลังงานระดับแรงดันที่ $10\text{--}200\text{ v}$ แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) และค่ากระแสไฟฟ้า (i)

ตารางที่ 3.4 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.04\text{ m}$ $f = 10 - 80\text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v					
20 v					
30 v					
40 v					
50 v					
60 v					
70 v					
80 v					
90 v					
100 v					
110 v					
120 v					
130 v					
140 v					
150 v					
160 v					
170 v					
180 v					
190 v					
200 v					

การทดลองที่ 3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในการทดลองนี้จะกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและความลึกของดินที่ใช้วัดค่าความต้านทานจำเพาะให้คงที่ โดยกำหนดความถี่ที่ 10–80 Hz และระดับความลึกของดินที่ 0.05 m แหล่งจ่ายพลังงานระดับแรงดันที่ 10–200 v แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) และค่ากระแสไฟฟ้า (i)

ตารางที่ 3.5 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 10 - 80 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v					
20 v					
30 v					
40 v					
50 v					
60 v					
70 v					
80 v					
90 v					
100 v					
110 v					
120 v					
130 v					
140 v					
150 v					
160 v					
170 v					
180 v					
190 v					
200 v					

การทดลองที่ 3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในการทดลองนี้จะกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและความลึกของดินที่ใช้วัดค่าความต้านทานจำเพาะให้คงที่ โดยกำหนดความถี่ที่ 10–80 Hz และระดับความลึกของดินที่ 0.05 m แหล่งจ่ายพลังงานระดับแรงดันที่ 10–200 v แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) และค่ากระแสไฟฟ้า (i)

ตารางที่ 3.6 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.04\ m$ $f = 10 - 80\ Hz$					
	1	2	3	4	5
10 v					
20 v					
30 v					
40 v					
50 v					
60 v					
70 v					
80 v					
90 v					
100 v					
110 v					
120 v					
130 v					
140 v					
150 v					
160 v					
170 v					
180 v					
190 v					
200 v					

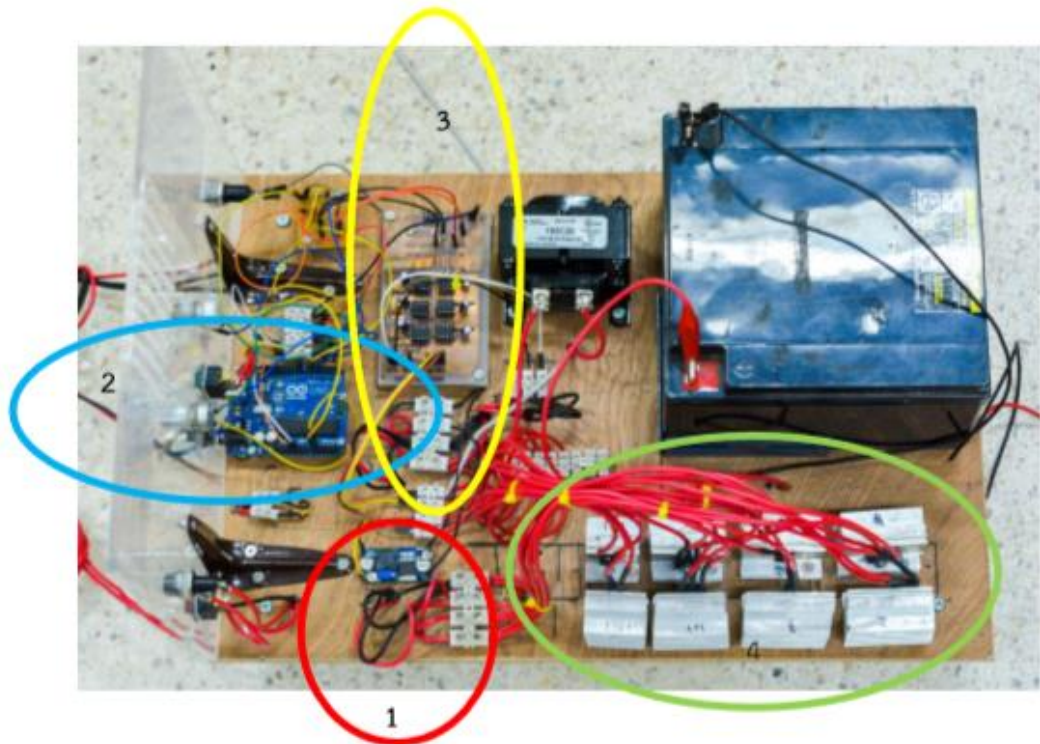
บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิจัยและรวบรวมข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง โดยจะกล่าวถึงโครงสร้างเครื่องมือในการวิจัย โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นการต่อยอดงานวิจัยของคุณ ประติมากร หาแก้ว [14] ที่ใช้ในงานวิจัยเรื่อง ผลกระทบของความถี่สูงต่อการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ซึ่งจะกล่าวถึงเครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง กระบวนการทดลอง ผลของการทดลอง ตารางการเก็บข้อมูล ดังต่อไปนี้

4.1 โครงสร้างเครื่องแหล่งจ่ายกระแส CSI

เครื่องแหล่งจ่ายกระแส CSI ซึ่งมีส่วนประกอบหลักดังนี้ (1) วงจร Buck converter (2) บอร์ด Arduino UNO (3) บอร์ดวงจรขับเคลื่อน IGBT (4) วงจร IGBT ซึ่งแสดงได้ดังภาพประกอบ 4.1



ภาพประกอบที่ 4.1 เครื่องแหล่งจ่ายกระแส CSI [14]

วงจร CSI ประกอบด้วย วงจร Buck Converter ทำหน้าที่ลดแรงดันไฟ 12 v (DC) ให้เหลือ 9 v เพื่อเป็นพลังงานให้กับวงจรในบอร์ด Arduino โดยวงจรบอร์ด Arduino นั้นทำหน้าที่เป็น วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อน ส่วนวงจรขับเคลื่อนนั้นทำหน้าที่นำสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นไปเปิดสวิตช์ของ IGBT และวงจร CSI ใช้ IGBT 1,200 v จำนวน 4 ตัว โดยต่ออนุกรมอยู่กับ Input Rectifier Diode เบอร์ 20ETS12 ขนาด 1200 v 20 A จำนวน 4 ตัวเช่นเดียวกัน โดยที่ไดโอดทำหน้าที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรจากแบตเตอรี่ไปยัง IGBT ได้ในทิศทางเดียวและทำให้ IGBT สลับกันทำงาน โดย IGBT จะจ่ายกระแสให้แก่โหลดเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม (AC) ส่วนแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source) จากภายนอกวงจร CSI ใช้แบตเตอรี่ใช้ขนาด 12,24,36,48,60v แสดงดังภาพประกอบ 4.2



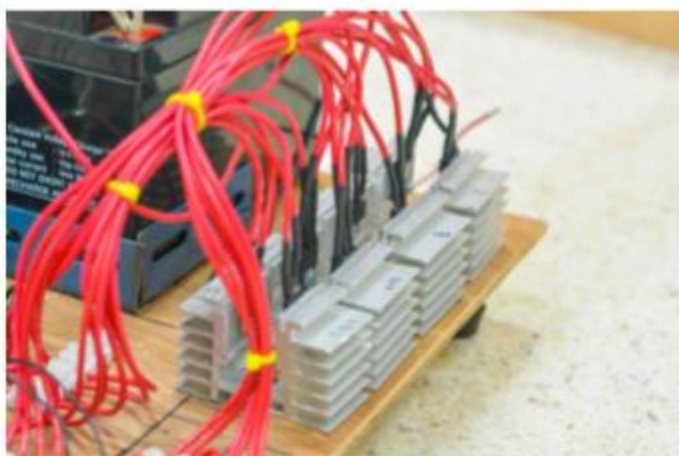
ภาพประกอบที่ 4.2 แบตเตอรี่ที่ใช้เป็น Voltage Source

ด้านอินพุตของวงจร CSI มีต่อตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ขนาด 1 mH 20 ADC เพื่อรักษา ระดับกระแสให้มีความสม่ำเสมอ ตัวเหนี่ยวนำแสดงดังภาพประกอบที่ 4.3

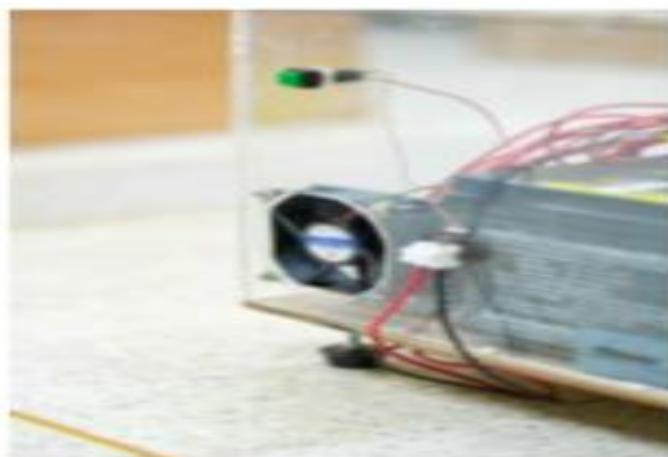


ภาพประกอบที่ 4.3 ตัวเหนี่ยวนำขนาด 1 mH 20 A [14]

ด้านอินพุตจะต่อสวิตช์เพื่อตัดวงจรและเป็นสวิตช์สั่งการทำงาน นอกจากนี้ยังมีฟิวส์ขนาด 10 A ต่ออยู่ด้วยเพื่อป้องกันกระแสไหลผ่านเกินโหลด วงจร CSI มีหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้า DC จากแบตเตอรี่เป็นกระแสไฟฟ้า AC (DC to AC Converter) โดยความถี่นั้นขึ้นอยู่กับคำสั่งงาน การปรับค่าความถี่จากวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมและวงจรขับเคลื่อน ตัว IGBT ติดแผ่นระบายความร้อน (Heat Sink) เพื่อระบายความร้อนให้กับ IGBT นอกจากนี้ด้านหลังของเครื่อง CSI ติดพัดลมเพื่อระบายความร้อนดังแสดงในภาพประกอบ 4.4 (ก) และ 4.4 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 4.4 (ก) IGBT ติดแผ่น Heat Sink (ข) พัฒนาระบายความร้อนให้กับเครื่อง CSI [14]

4.1.1 วงจร Buck converter

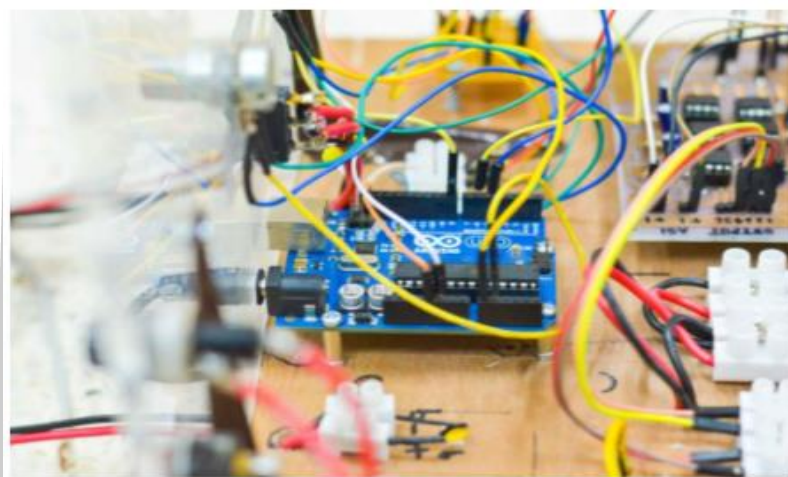
วงจร Buck converter ทำหน้าที่ลดขนาดแรงดันไฟฟ้า DC โดยกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะผ่านสวิตช์ก่อนเข้าวงจร Buck converter เพื่อใช้เป็นสวิตช์สั่ง ปิด-เปิด Arduino ซึ่งวงจร Buck converter ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) 12 โวลต์ จากแบตเตอรี่ เป็น 9 โวลต์และจ่ายให้กับวงจร Arduino ทางด้านวงจร Arduino แสดงดังภาพประกอบที่ 4.5



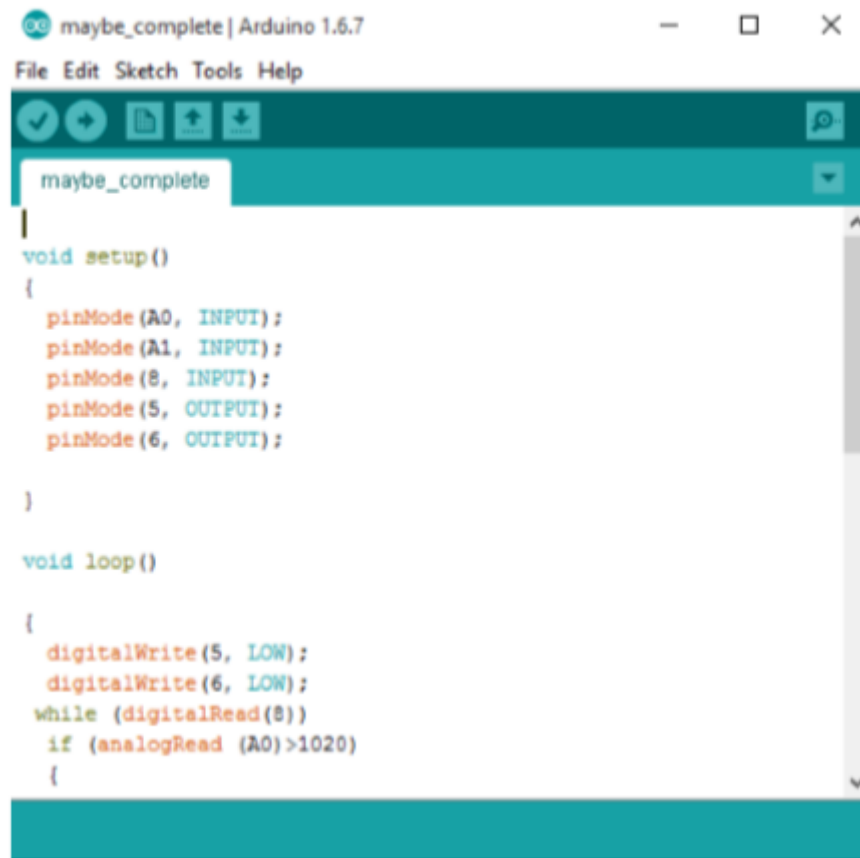
ภาพประกอบที่ 4.5 วงจร Buck converter [14]

4.1.2 วงจร Arduino

วงจร Arduino เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source ซึ่งบอร์ดที่นำมาใช้เป็นบอร์ดรุ่น Arduino UNO แสดงดังภาพประกอบที่ 4.6 (ก) และการเขียนโค้ดให้ตัว Arduino ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Arduino IDE แสดงดังภาพประกอบที่ 4.6 (ข) ซึ่งเป็นโปรแกรมฟรี สามารถดาวน์โหลดได้ที่เว็บไซต์ของ Arduino ส่วนการทำงานของ Arduino จะมีอนาล็อกอินพุตสองตัว โดยใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้และสวิตช์แบบกดมาเป็นดิจิตอลอินพุต ส่วนทางด้านเอาต์พุตจะมีสองตัว แล้วนำเอาต์พุตทั้งสองตัวแยกโดยการบัดกรีเพิ่มสายให้เอาต์พุตอย่างละเส้น ก่อนนำสัญญาณทั้งสองเส้นไปต่อกับวงจรขับเคลื่อนของ IGBT ทางด้านอินพุต โดยจะใช้โปรแกรมให้ Arduino สร้างสัญญาณพัลส์ออกมาสองสัญญาณซึ่งมีสถานะตรงข้ามกัน สามารถปรับความถี่ได้ตั้งแต่ 0.5 Hz – 1K Hz



ภาพประกอบที่ 4.6 (ก) บอร์ดรุ่น Arduino UNO [14]



```

maybe_complete | Arduino 1.6.7
File Edit Sketch Tools Help
maybe_complete
void setup()
{
  pinMode(A0, INPUT);
  pinMode(A1, INPUT);
  pinMode(8, INPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);
  pinMode(6, OUTPUT);
}

void loop()
{
  digitalWrite(5, LOW);
  digitalWrite(6, LOW);
  while (digitalRead(8))
  if (analogRead (A0)>1020)
  {

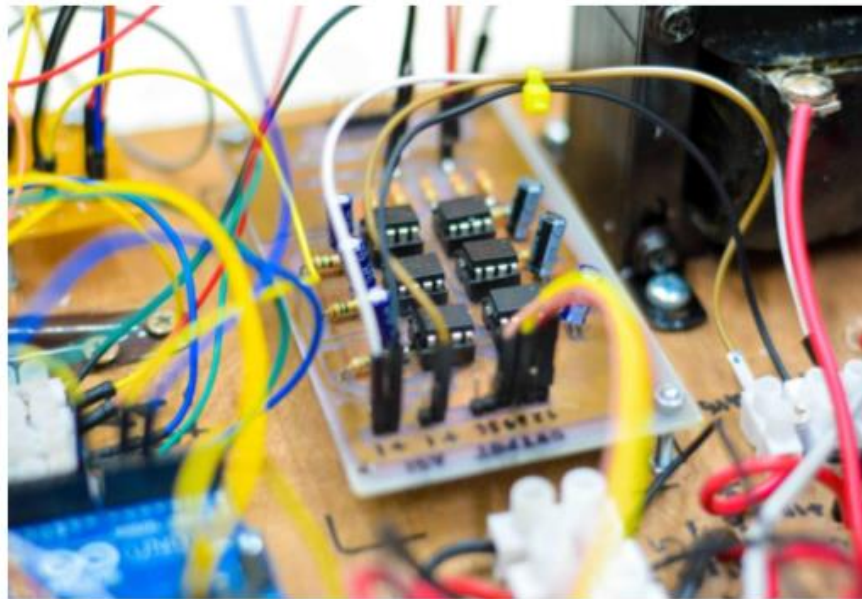
```

ภาพประกอบที่ 4.7 (ข) โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Arduino IDE [14]

4.1.3 บอร์ดวงจรขับเคลื่อน IGBT

วงจรขับเคลื่อนทำหน้าที่ปรับแรงดันของสัญญาณที่เกิดจาก Gate Control Signal Generator ที่ได้จากบอร์ด โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Arduino ซึ่งเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม + 5 V (DC) ให้กลายเป็นสัญญาณที่มีขนาดความสูง (Amplitude) 15 V (AC) เพื่อป้อนไปขับเคลื่อน IGBT วงจรขับเคลื่อน แสดงดังภาพประกอบที่ 4.7

พหุ ประถมศึกษา



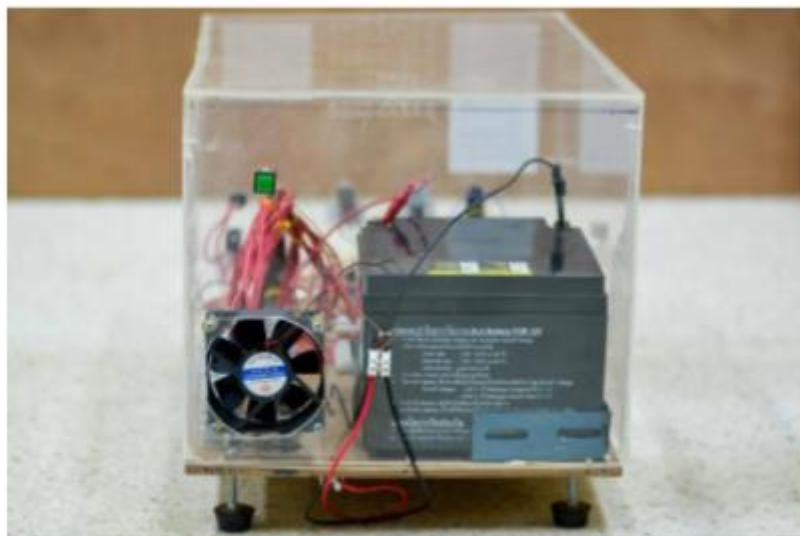
ภาพประกอบที่ 4.8 วงจรขับเคลื่อน IGBT [14]

4.1.4 เครื่องแหล่งจ่ายกระแส CSI

เครื่องแหล่งจ่ายกระแส CSI แสดงดังภาพประกอบที่ 4.8 (ก) และ 4.8 (ข)



ภาพประกอบที่ 4.9 (ก) ด้านหน้าของเครื่องแหล่งจ่ายกระแส CSI [14]



ภาพประกอบที่ 4.10 (ข) ด้านหลังของเครื่องแหล่งจ่ายกระแส CSI [14]

4.2 การนำเครื่องจ่ายกระแสแบบปรับความถี่ได้วัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ทำการทดลองเพื่อให้ได้ผลของการวิจัย ในการทดลองครั้งนี้ประกอบด้วยสองส่วนคือในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม ทำการทดลองในภาคสนามนั้นใช้ดินในบริเวณอาคารปฏิบัติการโยธา วิทยาลัยเทคนิคสกลนคร ใช้แหล่งจ่ายแรงดัน 12 , 24 , 36 , 48 ,60 v จากแบตเตอรี่เป็นตัวจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ให้แก่วงจร CSI แล้ว CSI จึงจ่ายกระแสรูปพัลส์สี่เหลี่ยมให้แก่ขั้วกระแสไฟฟ้าด้านนอก (Outer Current Electrodes) แล้วทำการวัดความต่างศักย์ที่ขั้วแรงดันไฟฟ้าด้านใน (Inner Potential Electrodes) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.9

พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์



ภาพประกอบที่ 4.11 การนำเครื่องจ่ายกระแสแบบปรับความถี่ได้ (CSI) ทำการทดลอง



ภาพประกอบที่ 4.12 ทำการวัดค่าแรงดันและกระแสที่ระยะ (d) ต่างๆ

การทำการทดลองวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน เพื่อหาผลของกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน จะเริ่มการทดลองที่ระยะ(a) เท่ากับ 1 เมตร และเพิ่มระยะของขั้วไฟฟ้าเป็น 2 เมตรและ 3 เมตร โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันจากแบตเตอรี่ขนาด 12 , 24 , 36 , 48 , 60 , ทำการวางขั้วแบบเวนเนอร์ (Wenner configuration) คือระยะ(a) ของขั้วไฟฟ้าห่างเท่ากันทั้งหมด จากนั้นทำการฝังขั้วไฟฟ้า (Electrodes) ลงไปในดิน ซึ่งขั้วไฟฟ้าจะมีอยู่ 4 ขั้ว โดยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วอยู่ด้านนอก (Outer Electrodes) จะใช้สำหรับเป็นขั้วรับกระแสจากเครื่อง CSI ส่วนขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วด้านใน (Inner Electrodes) ใช้สำหรับวัดค่าความต่างศักย์ (Δv) ในการทดลองจะฝังขั้วไฟฟาลงไปในดินให้ลึกลงจากพื้นผิวหน้าดิน 20 cm ระยะความลึกของการฝังขั้วไฟฟ้านิยามให้เป็น ความลึกขั้วไฟฟ้า (Electrode Depth , b) ส่วนระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (Electrode Spacing , a) ส่วนวิธีการฝังขั้วไฟฟ้า แสดงดังภาพประกอบที่ 4.11



ภาพประกอบที่ 4.13 ทำการฝังขั้วไฟฟาลงไปในดินที่จะทดสอบ



ภาพประกอบที่ 4.14 ระยะการวางขั้วไฟฟ้า



4.3 ผลการทดลองส่วนที่หนึ่ง

การทดลองที่ 1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในการทดลองนี้จะกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและความลึกของดินที่ใช้วัดค่าความต้านทานจำเพาะให้คงที่ โดยกำหนดความถี่ที่ 10–80 Hz และระดับความลึกของดินที่ 0.03 m แหล่งจ่ายพลังงานระดับแรงดันที่ 10–200 v แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) และค่ากระแสไฟฟ้า (i) ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง

ตารางที่ 4.1 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.03 m$ $f = 10 Hz$					
	1	2	3	4	5
10 v	2.27	2.21	2.26	2.24	2.17
20 v	4.41	4.63	4.52	4.6	4.44
30 v	6.46	6.82	6.78	6.91	6.72
40 v	8.37	9.05	8.86	8.59	8.55
50 v	10.52	10.61	10.64	11	10.55
60 v	12.71	12.78	12.99	13.13	12.76
70 v	14.98	14.62	14.8	14.94	14.62
80 v	17.12	16.87	17.29	17.15	17.13
90 v	19.32	18.94	19.35	19.44	19.08
100 v	21.64	21.5	22.01	21.88	21.74
110 v	23.35	23.88	24.25	24.35	23.75
120 v	23.57	26.08	26.97	26.81	26.4
130 v	24.87	27	29.5	29.38	29
140 v	25.15	28.09	31.92	31.88	31.7
150 v	27.14	29.12	33.54	34.13	33.94
160 v	28.63	30.7	35.15	35.85	35.56
170 v	30.84	32.87	37.69	37.98	37.47
180 v	32.87	35.1	39.6	40.73	40.07
190 v	35.94	38.01	41.96	42.38	42.81
200 v	39.11	44.47	44.99	45.18	44.89

ตารางที่ 4.2 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 20 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	1.76	2.16	2.16	2.15	2.09
20 v	3.42	4.63	4.63	4.35	4.31
30 v	5.51	6.29	6.47	6.39	6.47
40 v	7.51	8.58	8.33	8.46	8.24
50 v	9.22	10.41	10.36	10.38	10.44
60 v	11.1	12.43	12.38	12.45	12.54
70 v	12.84	14.52	14.22	14.47	14.08
80 v	14.92	16.64	16.41	16.28	16.33
90 v	17.03	18.5	18.35	18.52	18.23
100 v	19.23	20.85	20.78	20.83	20.55
110 v	21.93	23.32	23.12	23.24	22.95
120 v	24.39	25.86	25.62	25.52	25.33
130 v	27.19	28.31	28.26	28.27	27.8
140 v	29.84	30.69	30.78	30.63	30.55
150 v	32.49	33.48	33.17	33.81	32.81
160 v	34.97	35.41	35.24	35.08	34.76
170 v	37.64	38.11	37.59	37.32	37.03
180 v	39.76	39.85	39.46	39.31	38.76
190 v	41.94	41.63	41.06	41.89	40.32
200 v	44.54	43.9	43.43	43.83	42.67



ตารางที่ 4.3 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 30 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	1.91	2.22	2.22	2.13	2.18
20 v	3.44	4.22	4.06	3.58	4.26
30 v	5.08	6.46	5.94	5.82	6.28
40 v	6.71	8.03	7.6	7.27	7.86
50 v	8.3	9.8	9.46	9.04	9.72
60 v	9.91	11.58	11.12	10.86	11.58
70 v	11.63	13.68	13.03	12.6	13.64
80 v	13.71	15.53	14.79	14.34	15.38
90 v	15.36	17.37	16.57	16.2	17.26
100 v	17.48	19.59	18.76	18.14	19.49
110 v	19.61	21.74	20.89	20.26	21.45
120 v	21.62	24.05	23.1	22.68	23.9
130 v	24.61	26.65	26.43	24.98	26.37
140 v	27.16	29.06	28.12	27.69	28.74
150 v	29.87	31.81	30.54	30.26	31.13
160 v	32.47	34.11	33.22	32.71	33.46
170 v	35.77	36.71	36.04	35.8	36.27
180 v	38.97	39.44	38.51	38.23	38.32
190 v	41.19	40.87	40.35	40.1	40.2
200 v	43.29	43.32	42.56	42.68	42

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตารางที่ 4.4 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 40 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	1.9	2.02	2.17	2.09	2.19
20 v	0.52	3.83	4.33	4.26	3.94
30 v	5.27	5.69	6.35	6.29	5.84
40 v	6.82	7.18	8.14	8.33	7.51
50 v	8.47	9.12	10.08	10.17	9.39
60 v	10.05	10.85	11.94	12.13	10.97
70 v	12.05	12.76	14.06	14.04	12.98
80 v	13.96	14.7	15.98	15.93	14.97
90 v	15.67	16.21	17.89	17.78	16.92
100 v	17.98	18.54	20.05	20.12	19.01
110 v	20.15	20.78	22.25	22.33	21.26
120 v	22.62	23.37	24.68	24.75	23.59
130 v	25.3	25.89	27.17	27.33	26.17
140 v	28.03	28.3	29.46	29.86	28.67
150 v	30.68	31.13	32.13	32.15	31.37
160 v	33.2	33.59	34.33	34.4	33.52
170 v	36.28	36.57	37	37.02	35.12
180 v	39.03	39.36	39.22	39.07	38.37
190 v	41.67	41.49	41.23	40.75	40.5
200 v	43.8	44.07	43.52	43.08	42.41



ตารางที่ 4.5 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 50 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	1.89	2.07	2.19	2.22	1.98
20 v	3.48	3.92	4.04	4.24	3.78
30 v	5.25	5.77	6.25	6	5.47
40 v	6.94	7.37	8.13	8.06	7.27
50 v	8.38	9.13	9.83	9.99	8.71
60 v	10.22	11.22	11.72	11.67	10.51
70 v	11.99	12.78	13.75	13.44	12.31
80 v	13.64	14.8	15.51	15.51	14.2
90 v	15.45	16.47	17.37	17.26	15.76
100 v	17.5	18.66	19.43	19.4	17.75
110 v	19.74	20.86	21.51	21.58	19.93
120 v	22.03	22.91	23.85	23.78	22.34
130 v	24.58	25.31	26.3	26.3	24.88
140 v	27.28	27.98	28.66	28.59	27.13
150 v	29.62	30.41	31.21	31.12	29.68
160 v	32.19	32.75	33.48	33.2	32.35
170 v	35.39	35.82	35.98	35.76	35.06
180 v	38.48	38.58	38.14	37.61	37.53
190 v	40.81	40.51	49.04	39.95	39.59
200 v	43.41	43.29	43.02	41.46	41.75



ตารางที่ 4.6 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 60 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	1.68	2.15	2.29	2.23	1.93
20 v	3.06	4.12	4.34	4.15	4.19
30 v	4.6	5.99	6.1	6.03	6.05
40 v	6.08	7.74	7.86	7.6	7.81
50 v	7.59	9.54	9.5	9.29	9.71
60 v	9.33	11.09	11.23	11.23	11.39
70 v	10.89	12.3	12.91	13.09	13.28
80 v	12.96	14.34	14.74	14.77	15.03
90 v	14.68	15.74	16.55	16.22	16.55
100 v	16.93	17.59	18.45	18.32	18.82
110 v	18.94	19.88	20.5	20.43	20.81
120 v	21.16	22.07	22.67	22.82	23.03
130 v	24.72	24.26	25.98	25.13	25.43
140 v	27.39	26.82	27.55	27.7	27.88
150 v	29.81	29.34	29.83	29.9	30.34
160 v	31.9	31.6	32.15	32.27	32.51
170 v	43.8	34.89	34.74	35.38	35.03
180 v	37.04	37.55	37.55	37.59	37.7
190 v	39.33	39.43	39.36	39.35	39.41
200 v	41.74	42.1	41.37	40.98	41.03

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตารางที่ 4.7 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 70 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	2.11	2.06	1.82	2.2	1.91
20 v	4.05	3.91	3.34	4.03	3.58
30 v	5.83	5.56	5.12	5.77	5.52
40 v	7.54	7.34	6.49	7.22	6.81
50 v	8.95	8.99	7.92	9.06	8.34
60 v	11.08	10.68	9.4	10.54	10
70 v	12.95	12.57	11.23	12.3	11.74
80 v	14.78	14.4	13.05	13.93	13.25
90 v	16.56	15.87	14.77	15.67	15.25
100 v	18.38	18.05	16.46	17.38	17.07
110 v	20.44	19.92	18.3	19.28	10.1
120 v	22.67	22.05	20.32	21.45	21.46
130 v	25.15	24.48	22.63	23.87	23.8
140 v	27.8	26.78	25.12	25.97	26.13
150 v	29.76	29.16	27.5	28.23	28.37
160 v	31.63	31.45	29.76	30.4	30.99
170 v	34.71	34.27	32.74	33.08	34.39
180 v	39.87	36.55	35.68	35.68	37.28
190 v	38.53	38.33	37.95	37.86	38.74
200 v	40.54	39.73	39.86	40.19	40.99



ตารางที่ 4.8 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 80 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	1.93	2.25	1.9	2.23	2.14
20 v	3.55	3.96	3.27	4.22	3.92
30 v	5.31	5.89	4.81	6.19	5.74
40 v	6.74	7.77	6.22	7.83	7.55
50 v	8.48	9.36	7.89	9.62	9.14
60 v	10.14	11.07	9.57	11.68	10.92
70 v	11.98	12.95	11.26	13.38	12.79
80 v	13.71	14.73	13.17	14.85	14.37
90 v	15.5	16.34	14.91	16.51	16.15
100 v	17.57	18.25	16.88	18.24	18.16
110 v	19.51	20.38	18.89	20.23	20.17
120 v	21.66	22.61	21.14	22.49	22.34
130 v	24.29	24.88	23.55	24.81	24.77
140 v	26.92	27.24	25.9	27.18	27.06
150 v	29.53	29.85	28.97	29.5	29.36
160 v	32.16	32.31	31.58	31.82	31.85
170 v	35.4	35.11	34.65	35.18	34.52
180 v	37.31	37.23	37.8	38.12	37.28
190 v	39.07	38.88	40.11	40.33	39.3
200 v	40.98	40.68	42.39	42.63	41.57

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตารางที่ 4.9 วัดค่ากระแส (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 10 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001
20 ν	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02
30 ν	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05
40 ν	0.05	0.07	0.07	0.07	0.08
50 ν	0.08	0.09	0.1	0.12	0.12
60 ν	0.1	0.13	0.14	0.15	0.16
70 ν	0.14	0.15	0.18	0.19	0.2
80 ν	0.18	0.2	0.24	0.24	0.26
90 ν	0.22	0.25	0.28	0.31	0.3
100 ν	0.27	0.3	0.34	0.36	0.4
110 ν	0.29	0.36	0.39	0.43	0.46
120 ν	0.35	0.41	0.47	0.52	0.52
130 ν	0.41	0.49	0.57	0.62	0.63
140 ν	0.36	0.45	0.65	0.74	0.76
150 ν	0.38	0.46	0.77	0.83	0.87
160 ν	0.43	0.55	0.8	0.93	0.94
170 ν	0.46	0.57	0.99	1.02	1.03
180 ν	0.54	0.66	1.01	1.17	1.09
190 ν	0.66	0.76	1.1	1.16	1.29
200 ν	0.73	1.04	1.17	1.31	1.32

พหุ ประถมศึกษา

ตารางที่ 4.10 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 20 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
20 ν	0.02	0.05	0.05	0.05	0.05
30 ν	0.06	0.08	0.19	0.1	0.11
40 ν	0.1	0.15	0.16	0.18	0.19
50 ν	0.15	0.23	0.24	0.26	0.29
60 ν	0.23	0.3	0.32	0.35	0.37
70 ν	0.29	0.37	0.4	0.42	0.43
80 ν	0.37	0.45	0.48	0.49	0.51
90 ν	0.43	0.51	0.53	0.56	0.56
100 ν	0.47	0.58	0.6	0.63	0.65
110 ν	0.56	0.64	0.67	0.7	0.73
120 ν	0.62	0.7	0.78	0.77	0.8
130 ν	0.69	0.77	0.82	0.84	0.87
140 ν	0.78	0.86	0.92	0.95	0.95
150 ν	0.84	0.92	0.97	1	1.03
160 ν	0.93	0.99	1.02	1.08	1.1
170 ν	0.99	1.06	1.11	1.13	1.16
180 ν	1.06	1.14	1.18	1.25	1.23
190 ν	1.11	1.22	1.22	1.26	1.3
200 ν	1.2	1.28	1.32	1.33	1.36

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตารางที่ 4.11 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 30 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
20 ν	0.03	0.05	0.05	0.04	0.07
30 ν	0.08	0.14	0.13	0.12	0.15
40 ν	0.13	0.19	0.19	0.18	0.21
50 ν	0.19	0.25	0.25	0.24	0.27
60 ν	0.24	0.31	0.3	0.3	0.34
70 ν	0.29	0.37	0.36	0.35	0.4
80 ν	0.34	0.42	0.41	0.41	0.46
90 ν	0.39	0.47	0.48	0.46	0.51
100 ν	0.44	0.53	0.53	0.52	0.57
110 ν	0.5	0.58	0.58	0.58	0.63
120 ν	0.55	0.65	0.64	0.64	0.69
130 ν	0.62	0.71	0.71	0.7	0.77
140 ν	0.68	0.78	0.78	0.78	0.84
150 ν	0.75	0.85	0.85	0.85	0.91
160 ν	0.81	0.91	0.92	0.92	0.98
170 ν	0.9	0.98	1	1.01	1.07
180 ν	0.98	1.06	1.08	1.08	1.13
190 ν	1.06	1.11	1.15	1.15	1.19
200 ν	1.12	1.21	1.23	1.23	1.29



ตารางที่ 4.12 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 40 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
20 ν	0.05	0.06	0.09	0.09	0.08
30 ν	0.11	0.13	0.16	0.17	0.15
40 ν	0.15	0.17	0.22	0.24	0.21
50 ν	0.2	0.23	0.27	0.29	0.26
60 ν	0.24	0.28	0.33	0.35	0.32
70 ν	0.29	0.33	0.39	0.41	0.38
80 ν	0.34	0.39	0.45	0.47	0.44
90 ν	0.39	0.43	0.5	0.52	0.49
100 ν	0.44	0.44	0.56	0.58	0.55
110 ν	0.5	0.54	0.62	0.64	0.61
120 ν	0.55	0.61	0.68	0.71	0.68
130 ν	0.62	0.67	0.75	0.79	0.75
140 ν	0.69	0.74	0.82	0.86	0.83
150 ν	0.75	0.81	0.89	0.93	0.9
160 ν	0.82	0.88	0.95	1	0.97
170 ν	0.89	0.96	1.04	1.09	1.05
180 ν	0.96	1.04	1.1	1.15	1.12
190 ν	1.04	1.11	1.17	1.21	1.18
200 ν	1.1	1.18	1.25	1.29	1.25

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตารางที่ 4.13 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 50 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
20 ν	0.06	0.08	0.09	0.1	0.08
30 ν	0.12	0.14	0.16	0.16	0.14
40 ν	0.16	0.19	0.22	0.22	0.2
50 ν	0.21	0.24	0.27	0.28	0.24
60 ν	0.25	0.3	0.32	0.34	0.3
70 ν	0.3	0.34	0.38	0.39	0.35
80 ν	0.43	0.4	0.44	0.46	0.41
90 ν	0.39	0.44	0.49	0.51	0.45
100 ν	0.45	0.5	0.55	0.56	0.51
110 ν	0.5	0.56	0.61	0.63	0.57
120 ν	0.56	0.62	0.67	0.64	0.63
130 ν	0.62	0.68	0.73	0.76	0.7
140 ν	0.69	0.75	0.8	0.83	0.77
150 ν	0.75	0.82	0.87	0.9	0.84
160 ν	0.82	0.88	0.94	0.97	0.91
170 ν	0.89	0.96	1.01	1.04	0.99
180 ν	0.97	1.04	1.09	1.11	1.07
190 ν	1.05	1.1	1.44	1.16	1.13
200 ν	1.12	1.18	1.22	1.25	1.21

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตารางที่ 4.14 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

ตารางที่ 4.13 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i) ค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a=0.03\text{ m}$ $f=60\text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.1	0.02	0.04	0.03	0.02
20 ν	0.06	0.1	0.11	0.11	0.11
30 ν	0.1	0.16	0.17	0.17	0.18
40 ν	0.14	0.21	0.23	0.23	0.24
50 ν	0.18	0.26	0.28	0.28	0.3
60 ν	0.23	0.31	0.33	0.34	0.36
70 ν	0.26	0.35	0.38	0.4	0.42
80 ν	0.32	0.41	0.44	0.46	0.48
90 ν	0.36	0.45	0.5	0.51	0.53
100 ν	0.41	0.5	0.55	0.57	0.6
110 ν	0.46	0.56	0.62	0.63	0.67
120 ν	0.51	0.62	0.68	0.69	0.73
130 ν	0.65	0.68	0.75	0.76	0.81
140 ν	0.72	0.75	0.82	0.87	0.88
150 ν	0.79	0.82	0.89	0.92	0.96
160 ν	0.85	0.89	0.96	0.99	1.03
170 ν	0.93	0.98	1.04	1.08	1.19
180 ν	0.99	1.07	1.12	1.15	1.25
190 ν	1.07	1.13	1.18	1.22	1.32
200 ν	1.14	1.21	1.26	1.29	1.32

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตารางที่ 4.15 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 70 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.04	0.03	0.02	0.04	0.03
20 ν	0.11	0.11	0.08	0.11	0.09
30 ν	0.18	0.17	0.14	0.17	0.16
40 ν	0.24	0.23	0.19	0.22	0.21
50 ν	0.28	0.28	0.24	0.28	0.26
60 ν	0.36	0.35	0.28	0.33	0.31
70 ν	0.42	0.41	0.24	0.38	0.37
80 ν	0.48	0.47	0.4	0.44	0.42
90 ν	0.54	0.5	0.45	0.5	0.49
100 ν	0.6	0.6	0.51	0.55	0.54
110 ν	0.67	0.65	0.56	0.61	0.61
120 ν	0.74	0.72	0.62	0.67	0.68
130 ν	0.81	0.8	0.69	0.75	0.74
140 ν	0.89	0.86	0.76	0.81	0.81
150 ν	0.96	0.95	0.83	0.88	0.88
160 ν	1.02	1.02	0.9	0.95	0.96
170 ν	1.12	1.13	0.98	1.03	1.06
180 ν	1.19	1.17	1.07	1.12	1.16
190 ν	1.26	1.27	1.16	1.2	1.25
200 ν	1.3	1.31	1.25	1.28	1.35

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตารางที่ 4.16 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 80 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03
20 ν	0.09	0.11	0.07	0.09	0.09
30 ν	0.15	0.18	0.12	0.15	0.15
40 ν	0.2	0.24	0.15	0.2	0.21
50 ν	0.26	0.29	0.2	0.25	0.26
60 ν	0.31	0.36	0.24	0.31	0.31
70 ν	0.37	0.42	0.29	0.36	0.31
80 ν	0.43	0.48	0.34	0.41	0.42
90 ν	0.49	0.53	0.38	0.45	0.47
100 ν	0.55	0.59	0.43	0.5	0.53
110 ν	0.61	0.66	0.48	0.56	0.59
120 ν	0.68	0.73	0.54	0.61	0.65
130 ν	0.75	0.8	0.6	0.68	0.72
140 ν	0.83	0.87	0.66	0.74	0.78
150 ν	0.91	0.95	0.73	0.82	0.85
160 ν	1	1.04	0.8	0.88	0.93
170 ν	1.11	1.13	0.88	0.96	1
180 ν	1.18	1.22	0.97	1.04	1.09
190 ν	1.25	1.28	1.03	1.22	1.16
200 ν	1.31	1.36	1.13	1.2	1.24

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตารางที่ 4.17 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 10 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03
20 v	41.5633	43.6367	42.6	28.9027	41.846
30 v	40.5894	32.1385	31.95	26.0501	25.3338
40 v	31.5542	24.3698	23.8582	23.1311	20.1455
50 v	24.7872	22.2215	20.0559	17.2788	16.5719
60 v	23.9578	18.5306	17.4897	16.4996	15.0325
70 v	20.169	18.372	15.4985	14.8217	13.779
80 v	17.928	15.8996	13.5795	13.4696	12.419
90 v	16.5533	14.2804	13.0264	11.8205	11.9883
100 v	15.1076	13.5088	12.2023	11.4563	10.2447
110 v	15.1771	12.5035	11.7206	10.6741	9.73211
120 v	12.6938	11.9902	10.8164	9.7184	9.56977
130 v	11.4339	10.3865	9.75547	8.93226	8.67678
140 v	13.1685	11.7663	9.25658	8.12059	7.86225
150 v	13.4626	11.9326	8.21057	7.75103	7.35349
160 v	12.5503	10.5215	8.28202	7.2662	7.13075
170 v	12.6374	10.8699	7.17616	7.01869	6.85721
180 v	11.4738	10.0245	7.39052	6.5619	6.92937
190 v	10.2644	9.42726	7.19025	6.88659	6.25542
200 v	10.0987	8.06	7.24822	6.50094	6.41028

พหุ ประถมศึกษา

ตารางที่ 4.18 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a=0.03\text{ m}$ $f=20\text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	33.1752	40.715	40.715	40.5265	39.3956
20 v	32.2327	17.4547	17.4547	16.3991	16.2483
30 v	17.3102	14.8205	6.41877	12.0449	11.087
40 v	14.156	10.7819	9.81355	8.85929	8.17475
50 v	11.5862	8.53147	8.13672	7.52532	6.78584
60 v	9.09696	7.81	7.29242	6.70506	6.38847
70 v	8.3458	7.39718	6.70102	6.49412	6.17213
80 v	7.60096	6.97015	6.44419	6.26267	6.03555
90 v	7.4653	6.83758	6.52621	6.23382	6.1362
100 v	7.71228	6.77609	6.52823	6.23232	5.95936
110 v	7.38162	6.86831	6.5045	6.25805	5.92599
120 v	7.41517	6.96356	6.19135	6.24728	5.96824
130 v	7.42782	6.93027	6.4962	6.34377	6.02319
140 v	7.21116	6.72666	6.30641	6.07749	6.06162
150 v	7.29074	6.8596	6.44577	6.37303	6.00441
160 v	7.08784	6.74205	6.51234	6.12262	5.95646
170 v	7.16664	6.77695	6.38338	6.22536	6.01723
180 v	7.07036	6.58908	6.30342	5.92781	5.93991
190 v	7.12208	6.43202	6.34396	6.26673	5.84626
200 v	6.99633	6.46481	6.20179	6.21185	5.91405

พหุ ประถมศึกษา

ตารางที่ 4.19 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 30 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	36.0027	41.846	41.846	40.1496	41.092
20 v	21.6142	15.909	15.3058	16.8704	11.4713
30 v	11.9695	8.69772	8.6128	9.14203	7.89168
40 v	9.72927	7.96642	7.53982	7.61313	7.05512
50 v	8.23428	7.38903	7.13267	7.1	6.78584
60 v	7.7833	7.04122	6.9869	6.82354	6.41994
70 v	7.55932	6.96924	6.82249	6.78584	6.4277
80 v	7.60081	6.96985	6.79963	6.59275	6.30231
90 v	7.42383	6.96631	6.50702	6.63832	6.37928
100 v	7.48841	6.96722	6.67203	6.5756	6.44523
110 v	7.3928	7.06533	6.78909	6.58434	6.41782
120 v	7.40959	6.97434	6.80351	6.67981	6.52905
130 v	7.48206	7.07522	7.01681	6.7266	6.45536
140 v	7.52873	7.02267	6.79551	6.69159	6.44924
150 v	7.50715	7.05417	6.77253	6.71044	6.44821
160 v	7.55611	7.06548	6.80633	6.70184	6.43578
170 v	7.49165	7.06089	6.79338	6.68133	6.38947
180 v	7.49558	7.01346	6.72126	6.67239	6.39217
190 v	7.32465	6.94037	6.61374	6.57276	6.36767
200 v	7.28569	6.74845	6.52225	6.54064	6.13706



ตารางที่ 4.20 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 40 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	35.8142	38.0761	20.4518	19.6978	20.6403
20 v	1.96035	12.0323	9.06873	8.92212	9.28341
30 v	9.03065	8.25031	7.48092	6.97434	7.33876
40 v	8.57026	7.96117	6.97434	6.54237	6.74096
50 v	7.98279	7.47426	7.03717	6.61034	6.80759
60 v	7.89325	7.3042	6.82011	6.53272	6.46186
70 v	7.83232	7.28849	6.79551	6.45482	6.43861
80 v	7.73941	7.10483	6.69369	6.3888	6.41313
90 v	7.57365	7.10584	6.74437	6.4451	6.50887
100 v	7.70261	7.94252	6.74881	6.53885	6.51509
110 v	7.59637	7.25359	6.76456	6.57673	6.56953
120 v	7.75231	7.22154	6.84128	6.5708	6.53913
130 v	7.69183	7.28381	6.82857	6.52099	6.57724
140 v	7.65729	7.20868	6.77205	6.54474	6.51105
150 v	7.71073	7.24428	6.8049	6.51627	6.57012
160 v	7.63177	7.19496	6.81163	6.48425	6.51378
170 v	7.68384	7.1805	6.70609	6.40193	6.30473
180 v	7.66352	7.13383	6.72072	6.40393	6.45766
190 v	7.55251	7.04566	6.64245	6.34809	6.46955
200 v	7.50555	7.03983	6.56266	6.29487	6.39528



ตารางที่ 4.21 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 50 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	35.6257	19.5093	20.6403	20.923	18.6611
20 v	10.9327	9.23628	8.46136	7.99221	8.90642
30 v	8.24668	7.76871	7.36311	7.06858	7.36479
40 v	8.17599	7.31164	6.96577	6.90579	6.85181
50 v	7.52187	7.17069	6.86263	6.72525	6.84082
60 v	7.7057	7.04973	6.90365	6.46983	6.60363
70 v	7.53354	7.08522	6.82056	6.49585	6.62966
80 v	5.97925	6.97434	6.64447	6.35558	6.52838
90 v	7.46732	7.05573	6.68198	6.37928	6.60153
100 v	7.33038	7.03465	6.65903	6.53002	6.56038
110 v	7.4418	7.02146	6.64679	6.45672	6.59073
120 v	7.41528	6.96521	6.70988	7.00379	6.68411
130 v	7.47294	7.01592	6.791	6.52294	6.69967
140 v	7.4524	7.03214	6.75285	6.49288	6.64141
150 v	7.44432	6.99043	6.76201	6.51776	6.66018
160 v	7.3996	7.01503	6.71365	6.4516	6.70091
170 v	7.49535	7.03324	6.71492	6.48135	6.67541
180 v	7.47764	6.99246	6.59562	6.38677	6.61144
190 v	7.32619	6.94178	6.41932	6.49172	6.60402
200 v	7.30589	6.91523	6.64679	6.25202	6.50388



ตารางที่ 4.22 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 60 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	3.16673	20.2633	10.7914	14.0115	18.1898
20 v	9.61327	7.76602	7.43701	7.11142	7.17997
30 v	8.6708	7.0568	6.76366	6.68605	6.33555
40 v	8.18609	6.94741	6.44163	6.22855	6.13396
50 v	7.94823	6.91634	6.39539	6.25401	6.10097
60 v	7.64636	6.74328	6.41456	6.2259	5.96379
70 v	7.89506	6.62427	6.40389	6.16852	5.96005
80 v	7.63407	6.59275	6.3146	6.05235	5.90227
90 v	7.68643	6.59316	6.2392	5.9949	5.88604
100 v	7.78349	6.63127	6.32317	6.05831	5.91248
110 v	7.7611	6.69159	6.23251	6.11264	5.85462
120 v	7.82072	6.70983	6.28411	6.23401	5.94665
130 v	7.16863	6.72486	6.52949	6.23275	5.91783
140 v	7.17069	6.7406	6.33299	6.00153	5.97188
150 v	7.11272	6.74446	6.31778	6.12611	5.95725
160 v	7.07413	6.69265	6.31264	6.14419	5.94951
170 v	8.87753	6.71083	6.29648	6.17497	5.54874
180 v	7.0524	6.61496	6.31965	6.16135	5.68503
190 v	6.92853	6.57733	6.28745	6.07975	5.62773
200 v	6.90158	6.5584	6.18894	5.98802	5.85907

พหุ ประถมศึกษา

ตารางที่ 4.23 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.03 \text{ m}$ $f = 70 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	9.94314	12.9434	17.1531	10.3673	12.0009
20 ν	6.94006	6.70016	7.86969	6.90579	7.49793
30 ν	6.10516	6.16491	6.89355	6.39776	6.5031
40 ν	5.9219	6.01547	6.43861	6.18608	6.11264
50 ν	6.02513	6.05205	6.22035	6.09918	6.04636
60 ν	5.80147	5.75181	6.32807	6.02043	6.0805
70 ν	5.81195	5.779	6.24533	6.1013	5.98091
80 ν	5.80409	5.77518	6.14967	5.9676	5.94659
90 ν	5.78053	5.98285	6.18684	5.90745	5.86644
100 ν	5.77425	5.67057	6.0836	5.95646	5.95855
110 ν	5.75052	5.77666	6.15977	5.9577	5.98091
120 ν	5.77459	5.77268	6.17779	6.03467	5.9487
130 ν	5.85267	5.76796	6.18211	5.99919	6.06242
140 ν	5.88784	5.86966	6.23027	6.04349	6.08073
150 ν	5.84336	5.78582	6.24533	6.04685	6.07684
160 ν	5.84521	5.81195	6.23292	6.03186	6.08487
170 ν	5.84168	5.71659	6.29729	6.05382	6.11544
180 ν	6.31539	5.88847	6.28553	6.00493	6.05786
190 ν	5.76407	5.689	6.16673	5.94703	5.84185
200 ν	5.87816	5.71674	6.01075	5.91847	5.72328



ตารางที่ 4.24 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a=0.03\text{ m}$ $f=80\text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	12.1265	10.6029	11.9381	14.0115	13.446
20 v	7.4351	6.78584	8.80544	8.83835	8.21003
30 v	6.67274	6.16799	7.55553	7.77858	7.2131
40 v	6.3523	6.10254	7.81628	7.3796	6.77686
50 v	6.14786	6.08386	7.43615	7.25331	6.62634
60 v	6.16563	5.79624	7.51626	7.10203	6.63991
70 v	6.10318	5.81195	7.31883	7.00575	7.77696
80 v	6.00994	5.78446	7.30143	6.82722	6.44924
90 v	5.96261	5.81135	7.39597	6.91569	6.47703
100 v	6.02158	5.83058	7.39955	6.87632	6.45864
110 v	6.02877	5.82051	7.41809	6.8094	6.44399
120 v	6.00414	5.8382	7.37925	6.94961	6.47845
130 v	6.10474	5.86221	7.39845	6.87732	6.48477
140 v	6.11362	5.90186	7.39702	6.92339	6.53935
150 v	6.11678	5.92273	7.48043	6.78124	6.51086
160 v	6.06202	5.85605	7.44086	6.81583	6.45547
170 v	6.01148	5.85671	7.42201	6.90758	6.50687
180 v	5.95997	5.7522	7.3455	6.90909	6.44689
190 v	5.89162	5.72555	7.34035	6.23117	6.3861
200 v	5.8966	5.63823	7.07109	6.6963	6.31916



ตารางที่ 4.25 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 10 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	1.8	1.99	2.12	2.17	2.01
20 v	2.98	3.59	3.83	3.73	3.94
30 v	4.7	5.28	5.44	5.35	5.18
40 v	5.88	6.68	6.91	6.87	6.99
50 v	7.36	8.21	8.63	8.49	8.53
60 v	8.91	9.92	10.05	10.29	10.14
70 v	10.24	11.37	11.64	11.8	11.72
80 v	11.94	13.04	13.32	13.5	13.32
90 v	13.4	14.72	14.88	14.97	14.95
100 v	15.02	16.44	16.75	16.66	16.8
110 v	16.98	18.07	18.56	18.64	18.48
120 v	18.73	20.13	20.49	20.44	20.39
130 v	20.86	22.33	22.71	22.65	22.61
140 v	23.03	24.57	24.88	24.78	24.88
150 v	25.09	26.81	27.05	26.77	26.86
160 v	27.23	28.71	28.81	28.83	28.68
170 v	29.75	31.06	31.01	30.65	30.59
180 v	31.81	32.55	32.74	32.52	32.19
190 v	33.49	34.13	34.05	33.93	33.76
200 v	35.57	38.05	35.86	35.88	35.61



ตารางที่ 4.26 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 20 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	1.94	1.97	1.97	2.09	1.99
20 v	3.27	3.62	3.85	3.84	3.63
30 v	5	5.31	5.35	5.37	5.28
40 v	6.5	6.8	6.96	6.96	6.88
50 v	7.92	8.31	8.21	8.43	8.38
60 v	9.5	9.89	9.93	9.72	9.86
70 v	11.02	11.3	11.62	11.45	11.4
80 v	12.64	13.04	13.18	12.87	12.83
90 v	13.96	14.46	14.67	14.36	14.32
100 v	15.61	16.2	16.2	16.1	16.05
110 v	17.42	17.86	17.96	17.87	17.71
120 v	19.29	19.73	19.76	19.77	19.69
130 v	21.36	21.8	21.91	21.8	21.69
140 v	23.37	23.86	24.04	23.97	23.69
150 v	25.35	26.03	26.14	25.91	25.59
160 v	27.49	27.73	27.77	27.67	27.44
170 v	29.36	29.7	29.87	29.54	29.24
180 v	31.08	31.5	31.32	31.21	30.91
190 v	32.66	33.07	32.73	32.65	32.44
200 v	34.42	34.75	34.69	34.5	34.5



ตารางที่ 4.27 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 30 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	2.03	2.03	2.05	2	2.01
20 v	3.44	3.56	3.35	3.54	3.51
30 v	5.12	5.21	5.2	5.2	5.18
40 v	6.63	6.64	6.63	6.59	6.55
50 v	8.05	8.06	8.09	7.9	7.9
60 v	9.6	9.52	9.5	9.52	9.39
70 v	11.08	11.05	11.17	10.96	10.81
80 v	12.57	12.73	12.8	12.65	12.46
90 v	14.03	14.23	14.15	14.06	13.9
100 v	15.39	15.73	15.63	15.59	15.47
110 v	17.05	17.47	17.3	17.29	17.02
120 v	18.91	19.15	19.03	19.06	18.92
130 v	20.6	20.98	20.94	20.9	20.72
140 v	22.76	23.13	22.94	22.8	22.68
150 v	24.93	25.04	24.84	24.89	24.76
160 v	26.8	26.81	26.64	26.5	26.44
170 v	28.69	28.83	28.57	28.41	28.3
180 v	30.37	30.2	30.06	29.98	29.75
190 v	31.6	31.68	31.48	31.2	31.2
200 v	33.36	33.11	33.07	32.79	32.88

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตารางที่ 4.28 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 40 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	1.94	1.94	1.93	2.05	1.96
20 v	3.04	3.41	3.43	3.49	3.4
30 v	4.61	5.03	5	4.84	5.01
40 v	5.83	6.48	6.38	6.38	6.37
50 v	7.02	7.68	7.72	7.68	7.77
60 v	8.45	9.19	9.28	9.27	9.19
70 v	9.95	10.55	10.71	10.71	10.52
80 v	11.31	12.16	12.22	11.91	12.12
90 v	12.53	13.48	13.51	13.49	13.53
100 v	14.15	15.09	15.11	15.06	15.07
110 v	15.6	16.52	16.65	16.61	16.5
120 v	17.21	18.16	18.37	18.25	18.18
130 v	19.28	20.17	20.23	20.19	20.05
140 v	21.08	22.08	22.28	22.2	22.16
150 v	23	24.2	24.3	23.92	23.94
160 v	25.02	25.85	25.97	25.73	25.62
170 v	27.2	27.87	27.75	27.75	27.53
180 v	29.25	29.47	29.68	29.35	29.24
190 v	30.43	30.94	31.01	30.78	30.79
200 v	32.39	32.39	32.7	32.37	32.3



ตารางที่ 4.29 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 50 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	1.76	1.93	1.97	1.96	1.97
20 v	2.84	3.48	3.43	3.44	3.46
30 v	4.47	5.03	5.08	4.98	4.96
40 v	5.75	6.43	6.15	6.4	6.41
50 v	6.83	7.55	7.61	7.66	7.73
60 v	8.23	9.11	9.25	9.13	9.21
70 v	9.69	10.52	10.34	10.46	10.65
80 v	11.05	11.96	11.92	11.95	11.81
90 v	12.41	13.45	13.53	13.34	13.3
100 v	13.84	14.83	14.81	14.78	14.78
110 v	15.27	16.34	16.22	16.26	16.29
120 v	17.05	17.98	17.99	17.94	17.82
130 v	18.72	19.69	19.77	19.66	19.84
140 v	20.56	21.76	21.98	21.87	21.91
150 v	22.5	23.85	23.82	23.8	23.76
160 v	24.45	25.33	25.53	25.37	25.29
170 v	26.61	27.5	27.42	27.49	27.34
180 v	28.55	29.08	29.28	29.22	29
190 v	30.17	30.76	30.85	30.53	30.67
200 v	31.79	32.4	32.12	32.11	32.48

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตารางที่ 4.30 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 60 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	1.84	1.92	1.96	1.95	2
20 v	2.9	3.32	3.37	3.44	3.45
30 v	4.28	4.96	4.96	5.02	5.05
40 v	5.57	6.21	6.01	6.54	6.54
50 v	6.64	7.49	7.53	7.64	7.75
60 v	7.94	8.98	9.14	9.16	9.37
70 v	9.37	10.24	10.6	10.54	10.97
80 v	10.8	11.78	11.85	12.28	12.43
90 v	12.07	12.93	13.35	13.57	13.66
100 v	13.32	14.55	14.64	14.9	15.07
110 v	14.97	15.92	16.08	16.42	16.68
120 v	16.59	17.61	17.93	18.09	18.3
130 v	18.36	19.46	19.82	19.93	20.21
140 v	20.31	21.25	21.63	21.8	22.22
150 v	22.3	23.02	23.68	23.81	24.26
160 v	24.25	25.03	25.5	25.62	25.87
170 v	26.32	27.37	27.48	27.61	28.02
180 v	28.35	29.02	29.42	29.6	29.86
190 v	30.28	30.72	31.02	31.25	31.46
200 v	32.19	32.49	32.71	32.95	33.03

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตารางที่ 4.31 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 70 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	1.8	1.88	2.05	1.96	1.93
20 v	2.91	3.31	3.53	3.4	3.56
30 v	4.39	4.91	5.01	5.09	5.02
40 v	5.4	6.4	6.32	6.32	6.31
50 v	6.73	7.59	7.63	7.82	7.62
60 v	8.07	9.04	9.21	9.26	9.22
70 v	9.52	10.46	10.6	10.64	10.48
80 v	10.82	11.85	12.05	12.12	11.82
90 v	12.17	13.11	13.33	13.57	13.33
100 v	13.57	14.67	14.81	14.98	14.9
110 v	14.97	16.05	16.3	16.32	16.42
120 v	16.57	17.71	17.9	17.95	17.88
130 v	18.39	19.51	19.55	19.87	19.66
140 v	20.36	21.32	21.56	21.6	21.72
150 v	22.09	23.15	23.5	23.7	23.42
160 v	24.2	24.86	25.4	25.43	25.37
170 v	26.44	27.28	27.56	27.47	27.5
180 v	28.28	29.06	29.41	29.27	29.14
190 v	30.14	30.71	31.08	31.03	31.11
200 v	32.35	32.91	32.6	32.61	32.77

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตารางที่ 4.32 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 80 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	1.67	1.93	1.99	1.99	2.13
20 v	2.81	3.33	3.54	3.48	3.41
30 v	4.2	4.83	4.99	5.29	4.98
40 v	5.31	6.17	6.17	6.49	6.36
50 v	6.54	7.29	7.48	7.66	7.48
60 v	7.92	8.7	9.1	9.22	8.98
70 v	9.32	9.99	10.32	10.53	10.38
80 v	10.73	11.54	11.68	12.07	11.75
90 v	11.92	12.83	12.92	13.35	13.18
100 v	13.38	14.26	14.44	14.85	14.52
110 v	14.89	15.75	15.87	16.15	15.89
120 v	16.37	17.28	17.56	17.79	17.55
130 v	18.22	19.16	19.59	19.69	19.42
140 v	20.01	20.95	21.59	21.55	21.13
150 v	21.98	23.01	23.51	23.32	23
160 v	23.94	24.85	25.25	25.26	25.04
170 v	26.35	26.93	27.31	27.31	27.11
180 v	28.19	28.78	29.3	29.15	29.07
190 v	29.98	30.69	31.08	30.83	30.91
200 v	32.1	32.56	32.82	32.73	32.32



ตารางที่ 4.33 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 10 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.00001	0	0	0	0
20 ν	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
30 ν	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04
40 ν	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08
50 ν	0.08	0.09	0.11	0.11	0.12
60 ν	0.1	0.13	0.14	0.16	0.15
70 ν	0.13	0.17	0.19	0.21	0.21
80 ν	0.17	0.21	0.23	0.24	0.26
90 ν	0.21	0.26	0.28	0.3	0.3
100 ν	0.28	0.31	0.34	0.36	0.38
110 ν	0.31	0.38	0.41	0.45	0.46
120 ν	0.37	0.44	0.47	0.48	0.51
130 ν	0.45	0.52	0.58	0.59	0.61
140 ν	0.5	0.61	0.64	0.72	0.71
150 ν	0.59	0.71	0.8	0.82	0.85
160 ν	0.72	0.84	0.91	0.93	0.96
170 ν	0.87	0.96	0.99	1.05	1.05
180 ν	0.98	1.04	1.07	1.11	1.17
190 ν	1.06	1.11	1.16	1.16	1.23
200 ν	1.12	1.18	1.39	1.26	1.28



ตารางที่ 4.34 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 20 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.00001	0.01	0.01	0.01	0.01
20 ν	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06
30 ν	0.1	0.11	0.12	0.12	0.12
40 ν	0.16	0.19	0.22	0.22	0.21
50 ν	0.26	0.29	0.29	0.29	0.3
60 ν	0.34	0.36	0.37	0.37	0.38
70 ν	0.41	0.42	0.46	0.45	0.45
80 ν	0.49	0.51	0.52	0.52	0.53
90 ν	0.53	0.58	0.58	0.59	0.59
100 ν	0.6	0.63	0.65	0.66	0.67
110 ν	0.69	0.7	0.73	0.73	0.74
120 ν	0.75	0.77	0.81	0.82	0.82
130 ν	0.85	0.86	0.9	0.89	0.9
140 ν	0.92	0.95	0.94	0.99	0.97
150 ν	0.99	1.01	1.05	1.06	1.06
160 ν	1.09	1.1	1.12	1.13	1.13
170 ν	1.14	1.17	1.21	1.21	1.23
180 ν	1.24	1.23	1.27	1.26	1.25
190 ν	1.27	1.31	1.33	1.32	1.34
200 ν	1.33	1.35	1.38	1.44	1.45



ตารางที่ 4.35 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 30 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01
20 ν	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09
30 ν	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19
40 ν	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
50 ν	0.33	0.33	0.33	0.32	0.33
60 ν	0.39	0.39	0.49	0.4	0.4
70 ν	0.46	0.46	0.47	0.46	0.46
80 ν	0.53	0.54	0.54	0.54	0.53
90 ν	0.59	0.6	0.6	0.6	0.6
100 ν	0.65	0.67	0.67	0.67	0.67
110 ν	0.72	0.74	0.74	0.75	0.74
120 ν	0.79	0.81	0.81	0.82	0.81
130 ν	0.87	0.89	0.89	0.89	0.89
140 ν	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98
150 ν	1.04	1.05	1.05	1.05	1.06
160 ν	1.12	1.12	1.12	1.12	1.13
170 ν	1.19	1.2	1.21	1.21	1.21
180 ν	1.25	1.26	1.25	1.27	1.27
190 ν	1.33	1.33	1.33	1.33	1.35
200 ν	1.39	1.39	1.39	1.42	1.41



ตารางที่ 4.36 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 40 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
20 ν	0.08	0.1	0.11	0.11	0.11
30 ν	0.17	0.18	0.18	0.18	0.19
40 ν	0.23	0.25	0.25	0.26	0.26
50 ν	0.28	0.31	0.31	0.32	0.32
60 ν	0.35	0.38	0.35	0.38	0.38
70 ν	0.41	0.44	0.38	0.45	0.45
80 ν	0.47	0.51	0.45	0.51	0.52
90 ν	0.52	0.57	0.51	0.58	0.58
100 ν	0.59	0.69	0.57	0.64	0.65
110 ν	0.66	0.7	0.64	0.71	0.71
120 ν	0.72	0.77	0.71	0.78	0.78
130 ν	0.81	0.85	0.78	0.86	0.86
140 ν	0.88	0.92	0.86	0.93	0.94
150 ν	0.96	1	0.93	1.01	1.02
160 ν	1.03	1.07	1.01	1.09	1.09
170 ν	1.12	1.15	1.16	1.17	1.16
180 ν	1.19	1.22	1.24	1.25	1.24
190 ν	1.25	1.28	1.3	1.3	1.31
200 ν	1.33	1.35	1.37	1.37	1.39



ตารางที่ 4.37 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 50 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03
20 ν	0.08	0.11	0.11	0.11	0.11
30 ν	0.16	0.19	0.19	0.19	0.19
40 ν	0.22	0.25	0.24	0.26	0.26
50 ν	0.27	0.3	0.31	0.31	0.32
60 ν	0.33	0.37	0.38	0.38	0.38
70 ν	0.39	0.43	0.43	0.44	0.45
80 ν	0.46	0.5	0.5	0.51	0.51
90 ν	0.51	0.56	0.57	0.57	0.57
100 ν	0.57	0.62	0.63	0.63	0.64
110 ν	0.64	0.69	0.69	0.7	0.7
120 ν	0.71	0.75	0.76	0.77	0.77
130 ν	0.78	0.82	0.85	0.84	0.85
140 ν	0.85	0.9	0.92	0.92	0.93
150 ν	0.92	0.99	0.99	1	1.01
160 ν	1	1.05	1.06	1.07	1.08
170 ν	1.09	1.14	1.14	1.15	1.1
180 ν	1.16	1.22	1.22	1.23	1.23
190 ν	1.23	1.28	1.31	1.29	1.2
200 ν	1.31	1.34	1.37	1.38	1.4



ตารางที่ 4.38 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 60 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
20 ν	0.08	0.1	0.1	0.11	0.11
30 ν	0.13	0.16	0.17	0.18	0.18
40 ν	0.19	0.22	0.22	0.24	0.24
50 ν	0.23	0.27	0.28	0.29	0.3
60 ν	0.29	0.33	0.35	0.35	0.37
70 ν	0.34	0.38	0.41	0.41	0.44
80 ν	0.4	0.45	0.46	0.49	0.5
90 ν	0.45	0.5	0.52	0.54	0.55
100 ν	0.5	0.56	0.57	0.59	0.61
110 ν	0.56	0.62	0.64	0.66	0.68
120 ν	0.62	0.68	0.7	0.72	0.75
130 ν	0.69	0.75	0.78	0.8	0.82
140 ν	0.77	0.82	0.84	0.87	0.9
150 ν	0.83	0.88	0.92	0.94	0.97
160 ν	0.91	0.96	0.99	1.01	1.04
170 ν	0.98	1.04	1.07	1.09	1.12
180 ν	1.06	1.11	1.14	1.17	1.19
190 ν	1.13	1.18	1.21	1.24	1.26
200 ν	1.2	1.25	1.28	1.31	1.35



ตารางที่ 4.39 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 70 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03
20 ν	0.08	0.1	0.11	0.11	0.12
30 ν	0.14	0.16	0.17	0.18	0.17
40 ν	0.18	0.22	0.23	0.23	0.23
50 ν	0.23	0.27	0.28	0.29	0.29
60 ν	0.29	0.33	0.34	0.35	0.36
70 ν	0.34	0.38	0.4	0.41	0.41
80 ν	0.39	0.44	0.46	0.47	0.47
90 ν	0.44	0.49	0.51	0.53	0.53
100 ν	0.5	0.55	0.57	0.59	0.6
110 ν	0.55	0.61	0.63	0.64	0.66
120 ν	0.61	0.67	0.69	0.71	0.72
130 ν	0.68	0.74	0.76	0.78	0.79
140 ν	0.75	0.8	0.83	0.85	0.87
150 ν	0.82	0.87	0.9	0.92	0.93
160 ν	0.89	0.94	0.97	0.99	1.01
170 ν	0.97	1.02	1.06	1.07	1.09
180 ν	1.04	1.09	1.12	1.14	1.16
190 ν	1.11	1.16	1.19	1.21	1.23
200 ν	1.19	1.24	1.26	1.29	1.3



ตารางที่ 4.40 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 80 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.01	0.03	0.03	0.05	0.05
20 ν	0.08	0.1	0.11	0.11	0.11
30 ν	0.13	0.16	0.17	0.18	0.18
40 ν	0.18	0.22	0.22	0.24	0.24
50 ν	0.23	0.26	0.28	0.29	0.29
60 ν	0.29	0.32	0.34	0.35	0.35
70 ν	0.34	0.37	0.39	0.41	0.41
80 ν	0.4	0.43	0.45	0.47	0.47
90 ν	0.45	0.49	0.5	0.53	0.53
100 ν	0.5	0.54	0.56	0.59	0.58
110 ν	0.56	0.61	0.62	0.64	0.65
120 ν	0.62	0.66	0.69	0.71	0.71
130 ν	0.69	0.74	0.76	0.78	0.79
140 ν	0.76	0.8	0.84	0.86	0.85
150 ν	0.83	0.88	0.91	0.92	0.92
160 ν	0.9	0.95	0.98	1	1
170 ν	0.99	1.03	1.06	1.07	1.08
180 ν	1.06	1.1	1.13	1.15	1.15
190 ν	1.12	1.17	1.2	1.22	1.23
200 ν	1.2	1.25	1.28	1.3	1.31



ตารางที่ 4.41 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a=0.04$ m $f=10$ Hz					
	1	2	3	4	5
10 v	45238.9	50014.2	53281.4	54538	50516.8
20 v	74.8956	45.1133	48.1292	46.8726	33.0077
30 v	39.3746	33.1752	34.1805	26.892	32.5469
40 v	29.5561	27.9811	24.8096	21.5827	21.9597
50 v	23.1221	22.9266	19.7178	19.3979	17.8652
60 v	22.3933	19.1782	18.0417	16.1635	16.9897
70 v	19.7969	16.8094	15.3971	14.1222	14.0265
80 v	17.6521	15.6062	14.5551	14.1372	12.8757
90 v	16.0371	14.229	13.3563	12.5412	12.5245
100 v	13.4819	13.3285	12.3816	11.6309	11.1113
110 v	13.7663	11.9513	11.3772	10.4105	10.0968
120 v	12.7226	11.4982	10.9568	10.7024	10.0482
130 v	11.6504	10.7926	9.84077	9.64842	9.31559
140 v	11.5761	10.1231	9.77035	8.64985	8.80708
150 v	10.6878	9.49026	8.49801	8.20492	7.94195
160 v	9.50506	8.59001	7.95686	7.79115	7.50841
170 v	8.59424	8.13149	7.87239	7.33637	7.32201
180 v	8.15788	7.86606	7.69015	7.36321	6.91473
190 v	7.94052	7.72775	7.37733	7.35133	6.89822
200 v	7.98189	8.10424	6.48389	7.15685	6.99201



ตารางที่ 4.42 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 20 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	48757.5	49.5115	49.5115	52.5274	50.0142
20 ν	20.546	18.1961	16.1268	16.085	15.2053
30 ν	12.5664	12.1323	11.205	11.2469	11.0584
40 ν	10.2102	8.99488	7.95109	7.95109	8.23396
50 ν	7.65582	7.20183	7.11517	7.30583	7.02041
60 ν	7.02238	6.90452	6.74508	6.60244	6.52128
70 ν	6.75519	6.7619	6.34875	6.39489	6.36696
80 ν	6.48322	6.4261	6.37018	6.22035	6.08402
90 ν	6.61987	6.26585	6.35685	6.11705	6.10001
100 ν	6.5387	6.4627	6.26385	6.13087	6.0206
110 ν	6.34511	6.41244	6.18334	6.15236	6.01488
120 ν	6.46414	6.43986	6.13115	6.05944	6.03492
130 ν	6.31571	6.37086	6.11843	6.15611	6.05699
140 ν	6.38426	6.31229	6.42756	6.08517	6.13809
150 ν	6.4355	6.47728	6.25686	6.1433	6.06742
160 ν	6.33852	6.33574	6.23157	6.15419	6.10303
170 ν	6.47278	6.37985	6.20426	6.13571	5.97465
180 ν	6.2994	6.43643	6.19809	6.22534	6.21482
190 ν	6.46327	6.34458	6.18492	6.21655	6.08437
200 ν	6.50428	6.46935	6.31779	6.02139	5.97986



ตารางที่ 4.43 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 30 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	51.0195	25.5097	25.7611	25.1327	50.5168
20 v	10.8071	9.9414	10.5243	9.88554	9.80177
30 v	7.14887	7.27453	7.26057	7.26057	6.85198
40 v	6.40885	6.41852	6.40885	6.37018	6.33152
50 v	6.13087	6.13848	6.16133	6.20465	6.01663
60 v	6.18652	6.13497	4.87267	5.98159	5.89991
70 v	6.05371	6.03732	5.97304	5.98815	5.90619
80 v	5.96073	5.92481	5.95739	5.88758	5.90857
90 v	5.97648	5.96065	5.92714	5.88944	5.82242
100 v	5.95066	5.90057	5.86306	5.84805	5.80304
110 v	5.95157	5.93336	5.87563	5.79393	5.78053
120 v	6.01595	5.94188	5.90464	5.84183	5.87051
130 v	5.95097	5.92455	5.91325	5.90196	5.85113
140 v	5.95855	5.99299	5.94376	5.84721	5.81643
150 v	6.02461	5.99356	5.94569	5.95766	5.87063
160 v	6.01391	6.01615	5.978	5.94659	5.88062
170 v	6.05931	6.03814	5.93423	5.901	5.87815
180 v	6.10625	6.02388	6.04392	5.93291	5.88739
190 v	5.97139	5.98651	5.94871	5.8958	5.80846
200 v	6.03186	5.98666	5.97942	5.80354	5.86074



ตารางที่ 4.43 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 40 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	24.3788	24.3788	24.2531	25.7611	24.6301
20 v	9.55044	8.57026	7.83685	7.97393	7.7683
30 v	6.81541	7.0232	6.98132	6.75791	6.62711
40 v	6.3706	6.51441	6.41388	6.16719	6.15752
50 v	6.30114	6.22643	6.25886	6.03186	6.10254
60 v	6.06776	6.07816	6.66377	6.13107	6.07816
70 v	6.09929	6.02615	7.08346	5.98159	5.87548
80 v	6.0479	5.99243	6.82494	5.86923	5.85786
90 v	6.05602	5.94367	6.65771	5.84553	5.86286
100 v	6.0276	5.49642	6.66238	5.91405	5.82693
110 v	5.94047	5.93133	6.53844	5.87965	5.84071
120 v	6.00742	5.92741	6.50265	5.88042	5.85786
130 v	5.98221	5.96385	6.5184	5.90035	5.85944
140 v	6.02043	6.03186	6.51113	5.99943	5.92491
150 v	6.02139	6.08212	6.56694	5.95223	5.8988
160 v	6.10506	6.07179	6.46235	5.93271	5.90735
170 v	6.10367	6.09087	6.01236	5.96097	5.96469
180 v	6.17759	6.071	6.01564	5.90117	5.92646
190 v	6.11831	6.07505	5.99513	5.95066	5.90715
200 v	6.12067	6.03	5.99884	5.9383	5.8402



ตารางที่ 4.44 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 50 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	44.2336	24.2531	24.7558	16.4201	16.5038
20 v	8.92212	7.95109	7.83685	7.85969	7.90539
30 v	7.02146	6.65356	6.7197	6.58742	6.56097
40 v	6.56878	6.46414	6.44026	6.18652	6.19619
50 v	6.35765	6.32507	6.16968	6.21022	6.07113
60 v	6.26795	6.18809	6.11784	6.03847	6.09138
70 v	6.24452	6.14875	6.04355	5.97474	5.94808
80 v	6.03732	6.01175	5.99165	5.88895	5.81995
90 v	6.11563	6.03635	5.96572	5.88194	5.86431
100 v	6.10241	6.01159	5.90819	5.89622	5.80409
110 v	5.99651	5.95172	5.90802	5.83798	5.84875
120 v	6.0354	6.02516	5.94918	5.8556	5.81643
130 v	6.03186	6.03492	5.84558	5.88226	5.86628
140 v	6.07917	6.07654	6.00454	5.97449	5.92106
150 v	6.14659	6.05471	6.04709	5.98159	5.91242
160 v	6.14496	6.06297	6.0532	5.95904	5.88525
170 v	6.13562	6.06272	6.04509	6.00782	6.24663
180 v	6.18569	5.99066	6.03186	5.97056	5.92561
190 v	6.16467	6.03971	5.91866	5.94808	6.42351
200 v	6.09901	6.07687	5.89244	5.84792	5.8308



ตารางที่ 4.45 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 60 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	23.1221	16.085	16.4201	16.3363	16.7552
20 v	9.11062	8.34407	8.46973	7.85969	7.88254
30 v	8.27447	7.79115	7.33285	7.00924	7.05113
40 v	7.36786	7.09429	6.86581	6.84867	6.84867
50 v	7.25571	6.97201	6.75891	6.62118	6.49262
60 v	6.88117	6.83915	6.56324	6.5776	6.3647
70 v	6.92629	6.77261	6.49773	6.46095	6.26605
80 v	6.78584	6.57919	6.47441	6.29857	6.248
90 v	6.74116	6.49933	6.45235	6.31576	6.24206
100 v	6.69536	6.53002	6.45515	6.34708	6.20902
110 v	6.71852	6.45344	6.3146	6.25272	6.16491
120 v	6.72504	6.50864	6.43757	6.3146	6.13239
130 v	6.68749	6.52111	6.38629	6.26119	6.1943
140 v	6.62917	6.51306	6.47168	6.29763	6.20499
150 v	6.75253	6.5745	6.46895	6.36607	6.28578
160 v	6.69746	6.55284	6.47358	6.37526	6.25177
170 v	6.74994	6.61426	6.45465	6.36619	6.28767
180 v	6.72182	6.57074	6.48601	6.35837	6.30642
190 v	6.73468	6.54303	6.44312	6.33386	6.27521
200 v	6.74186	6.5325	6.42259	6.32156	6.14914

พหุ ประถมศึกษา

ตารางที่ 4.46 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.04 \text{ m}$ $f = 70 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	22.6195	15.7499	12.8805	16.4201	16.1687
20 v	9.14203	8.31894	8.06533	7.7683	7.45605
30 v	7.88091	7.71261	7.40677	7.10698	7.42155
40 v	7.53982	7.31134	6.90604	6.90604	6.89511
50 v	7.35406	7.06509	6.84867	6.77717	6.60384
60 v	6.99384	6.88485	6.80802	6.64941	6.43677
70 v	7.03717	6.91812	6.66018	6.52225	6.42417
80 v	6.97272	6.7687	6.58369	6.48104	6.32062
90 v	6.95149	6.72429	6.56901	6.43493	6.32112
100 v	6.82103	6.70359	6.5301	6.38116	6.2413
110 v	6.84068	6.6128	6.5026	6.40885	6.25272
120 v	6.82704	6.6433	6.51994	6.35398	6.2413
130 v	6.79693	6.62621	6.46507	6.4024	6.25455
140 v	6.8227	6.69788	6.52846	6.38667	6.27452
150 v	6.77052	6.68762	6.56244	6.47441	6.32913
160 v	6.83385	6.64681	6.58115	6.45581	6.31305
170 v	6.85062	6.72178	6.53451	6.4523	6.34083
180 v	6.83417	6.70053	6.59959	6.45294	6.31352
190 v	6.82433	6.65368	6.56408	6.4452	6.35674
200 v	6.8323	6.67031	6.5026	6.35332	6.33538



ตารางที่ 4.47 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a=0.04\text{ m}$ $f=80\text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	41.9717	16.1687	16.6714	10.0028	10.7065
20 ν	8.82788	8.3692	8.08817	7.95109	7.79115
30 ν	8.11981	7.58695	7.3772	7.38623	6.95339
40 ν	7.41416	7.04859	7.04859	6.79631	6.66018
50 ν	7.14644	7.04683	6.71403	6.63851	6.48251
60 ν	6.86384	6.83296	6.7267	6.62068	6.44834
70 ν	6.88933	6.78584	6.65051	6.45482	6.36287
80 ν	6.74186	6.74493	6.52334	6.4543	6.28319
90 ν	6.65738	6.58067	6.4943	6.33061	6.24999
100 ν	6.72552	6.63691	6.48066	6.32578	6.29185
110 ν	6.68262	6.48919	6.43317	6.34209	6.14399
120 ν	6.63585	6.58021	6.3961	6.29734	6.21239
130 ν	6.6365	6.50734	6.47829	6.34441	6.1782
140 ν	6.61719	6.58164	6.45971	6.2978	6.2477
150 ν	6.65563	6.57164	6.49309	6.3706	6.28319
160 ν	6.68531	6.5742	6.47553	6.34853	6.29324
170 ν	6.68937	6.57111	6.47524	6.41472	6.30878
180 ν	6.68389	6.57564	6.51672	6.3706	6.35312
190 ν	6.7275	6.59251	6.50938	6.35117	6.31588
200 ν	6.72301	6.54658	6.44419	6.32765	6.20069



ตารางที่ 4.48 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a=0.05\text{ m}$ $f=10\text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	2.12	2.21	2.27	2.41	2.26
20 v	3.94	4.31	4.43	4.39	4.10
30 v	5.73	6.41	6.49	6.42	6.04
40 v	7.45	8.31	8.64	8.38	7.68
50 v	9.27	10.43	10.41	10.18	9.74
60 v	11.17	12.26	12.51	12.26	11.68
70 v	13.16	14.36	14.55	14.26	13.73
80 v	15.11	16.36	16.32	16.22	15.60
90 v	16.92	18.30	18.47	18.11	17.41
100 v	19.13	20.79	20.44	20.30	19.52
110 v	21.25	22.88	22.91	22.70	21.79
120 v	23.82	25.25	25.13	24.89	24.08
130 v	26.37	27.84	27.58	27.37	26.64
140 v	28.81	30.16	29.88	29.64	29.04
150 v	31.56	32.55	32.52	32.35	31.25
160 v	33.92	35.16	25.02	34.47	33.64
170 v	36.65	37.62	37.17	36.83	35.88
180 v	38.76	39.63	39.22	38.88	38.00
190 v	40.87	41.74	41.13	40.61	40.04
200 v	42.96	43.59	43.19	42.56	42.03



ตารางที่ 4.49 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 20 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	2.12	2.10	2.01	2.13	2.14
20 v	3.96	3.95	4.12	4.10	4.29
30 v	5.85	6.02	5.56	6.20	6.12
40 v	7.65	7.80	8.96	7.72	8.07
50 v	9.46	9.40	10.64	9.56	9.91
60 v	11.39	11.20	12.48	11.34	11.54
70 v	13.23	13.18	14.32	13.44	13.51
80 v	15.10	15.32	16.05	15.33	15.41
90 v	16.99	16.90	18.06	16.91	17.16
100 v	18.91	18.90	20.22	19.11	19.46
110 v	20.98	20.96	22.23	21.03	21.10
120 v	23.33	23.11	24.78	23.15	23.15
130 v	25.50	25.38	26.95	25.55	25.58
140 v	28.16	28.10	29.49	27.75	27.82
150 v	30.42	30.09	32.18	30.19	30.11
160 v	32.61	32.21	34.42	32.42	32.20
170 v	34.88	34.45	37.60	35.00	34.67
180 v	37.27	36.72	39.72	37.10	36.77
190 v	39.21	38.60	41.43	39.29	39.05
200 v	41.13	40.51	40.91	41.07	40.93



ตารางที่ 4.50 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a=0.05\text{ m}$ $f=30\text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	2.20	2.15	2.31	2.25	2.22
20 v	3.73	4.30	4.20	4.22	4.06
30 v	5.81	6.05	5.94	5.96	5.80
40 v	7.19	7.68	7.96	7.61	7.21
50 v	9.20	9.64	9.69	9.37	8.96
60 v	10.95	11.29	11.22	11.22	10.77
70 v	12.37	13.05	12.95	13.03	12.63
80 v	14.42	14.90	14.90	14.70	14.41
90 v	16.03	16.57	16.54	16.32	15.98
100 v	18.27	18.70	18.58	18.09	17.88
110 v	20.02	20.52	20.48	19.99	19.67
120 v	22.00	22.70	22.70	22.04	21.95
130 v	24.52	25.07	24.76	24.31	24.06
140 v	26.81	27.25	27.10	26.57	26.02
150 v	29.32	24.88	29.08	28.74	28.08
160 v	31.72	32.02	31.32	30.39	30.20
170 v	34.11	34.17	33.52	32.66	32.55
180 v	36.35	36.20	36.95	34.79	34.63
190 v	38.22	38.27	38.27	36.49	36.17
200 v	40.39	40.38	40.38	38.61	38.38



ตารางที่ 4.51 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (ΔV)

วัดค่าแรงดัน (ΔV) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 40 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 V	1.97	2.06	2.12	1.99	1.97
20 V	3.36	4.07	3.92	3.68	3.19
30 V	5.14	5.48	5.46	5.43	4.82
40 V	6.92	7.04	6.91	6.83	6.08
50 V	8.30	8.59	8.50	8.42	7.51
60 V	10.05	10.10	10.08	10.03	9.11
70 V	11.58	11.83	11.73	11.64	10.51
80 V	13.29	13.70	13.38	13.41	11.89
90 V	14.87	15.44	15.15	14.87	13.81
100 V	16.90	17.07	16.92	17.03	15.55
110 V	18.71	18.91	18.66	18.66	17.16
120 V	20.91	21.08	20.78	20.86	19.92
130 V	23.13	23.38	23.12	23.10	21.13
140 V	25.45	25.61	25.45	25.14	23.44
150 V	27.58	27.72	27.66	27.10	25.51
160 V	29.56	29.52	29.57	28.99	27.51
170 V	31.97	32.00	31.60	31.47	30.01
180 V	33.55	33.85	33.70	33.51	32.01
190 V	35.54	35.64	35.32	35.39	33.62
200 V	37.59	37.64	37.63	37.27	35.69



ตารางที่ 4.52 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 50 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	1.91	1.97	2.10	1.86	1.98
20 v	3.25	3.38	3.50	3.50	3.39
30 v	4.75	5.09	5.44	4.80	5.24
40 v	6.07	6.40	6.87	5.91	6.40
50 v	7.47	7.82	8.40	7.48	7.43
60 v	9.07	9.26	10.05	8.94	9.70
70 v	10.45	10.89	11.65	10.31	11.39
80 v	12.31	12.56	12.28	12.20	13.09
90 v	13.94	14.15	14.96	13.78	14.63
100 v	15.59	17.78	16.78	15.45	16.55
110 v	17.43	17.18	18.65	17.24	18.29
120 v	19.28	19.01	20.23	19.29	20.26
130 v	21.16	20.97	22.35	21.36	22.41
140 v	23.44	23.18	24.56	23.70	24.71
150 v	25.42	24.99	26.53	25.67	26.92
160 v	27.48	27.12	28.24	27.80	28.39
170 v	29.89	29.53	30.71	30.29	30.62
180 v	31.64	31.71	32.38	32.35	32.86
190 v	33.51	33.35	34.37	34.21	34.95
200 v	35.82	35.69	36.55	36.48	37.07



ตารางที่ 4.53 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a=0.05\text{ m}$ $f=60\text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	2.08	2.00	1.94	2.12	2.10
20 v	3.33	3.46	3.20	3.70	3.76
30 v	5.11	5.13	4.98	5.27	5.42
40 v	6.50	6.59	6.30	6.85	6.87
50 v	8.16	7.86	7.80	8.20	8.05
60 v	9.57	9.72	9.42	9.84	9.73
70 v	11.10	11.35	10.94	11.38	11.41
80 v	12.93	12.83	12.60	13.15	12.85
90 v	14.40	14.47	14.02	14.63	14.56
100 v	16.16	16.13	15.71	16.42	16.27
110 v	17.95	17.91	17.48	18.18	18.36
120 v	19.86	20.01	19.47	20.10	20.23
130 v	21.86	22.11	21.43	22.15	22.43
140 v	23.96	24.46	23.96	24.76	24.75
150 v	26.25	26.28	26.02	26.58	26.80
160 v	28.69	28.46	28.20	28.65	28.70
170 v	31.08	30.56	30.64	31.03	31.14
180 v	33.23	32.35	32.70	33.53	33.09
190 v	35.29	34.34	34.64	35.53	34.92
200 v	37.57	36.68	36.85	37.68	36.92



ตารางที่ 4.54 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 70 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	2.05	1.94	2.10	2.21	2.09
20 v	3.43	3.37	3.52	3.53	3.74
30 v	5.11	5.09	5.11	5.23	5.29
40 v	6.63	6.56	6.44	6.69	6.74
50 v	7.88	7.83	7.82	7.82	8.44
60 v	9.63	9.66	9.64	9.74	9.86
70 v	11.16	11.14	11.18	11.21	11.38
80 v	12.72	12.70	12.66	12.80	12.99
90 v	14.51	14.52	14.22	14.19	14.64
100 v	16.04	16.24	15.77	15.91	15.37
110 v	17.87	17.82	17.48	17.59	18.15
120 v	19.68	19.78	19.27	19.46	19.85
130 v	21.56	21.59	21.55	21.64	22.17
140 v	23.90	23.89	23.50	23.86	24.61
150 v	25.63	25.86	25.47	26.22	26.40
160 v	27.65	27.86	27.62	28.10	28.38
170 v	29.92	29.99	30.32	30.57	30.67
180 v	31.81	32.11	32.20	32.82	32.83
190 v	33.81	34.11	34.58	34.64	34.34
200 v	35.87	36.30	36.44	37.13	36.46



ตารางที่ 4.55 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv)

วัดค่าแรงดัน (Δv) ที่ระยะ $a=0.05\text{ m}$ $f=80\text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	2.06	2.02	2.08	2.01	2.15
20 v	3.35	3.36	3.63	3.75	3.35
30 v	4.89	5.34	5.38	5.28	5.21
40 v	6.27	6.72	6.70	6.67	6.62
50 v	7.68	8.11	7.86	8.03	7.99
60 v	9.38	9.69	9.80	9.78	9.65
70 v	10.88	11.37	11.37	11.32	11.17
80 v	12.99	13.03	13.13	12.95	12.81
90 v	14.01	14.49	14.66	14.52	14.46
100 v	15.60	16.14	16.31	16.43	15.97
110 v	17.32	17.76	18.02	17.76	17.85
120 v	19.12	19.56	19.90	19.82	19.78
130 v	21.23	21.79	22.17	21.81	21.92
140 v	23.22	23.83	24.42	24.05	23.92
150 v	25.31	25.85	26.09	25.91	25.92
160 v	27.22	27.55	27.78	27.40	27.46
170 v	29.55	29.44	29.86	29.59	29.57
180 v	31.40	31.69	31.73	31.66	31.45
190 v	33.43	33.60	33.58	33.55	33.34
200 v	35.59	35.66	35.44	35.30	35.26



ตารางที่ 4.56 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 10 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20 ν	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
30 ν	0.04	0.05	0.06	0.05	0.05
40 ν	0.06	0.08	0.09	0.09	0.07
50 ν	0.08	0.11	0.12	0.12	0.12
60 ν	0.13	0.14	0.16	0.16	0.16
70 ν	0.18	0.20	0.20	0.22	0.21
80 ν	0.20	0.24	0.26	0.28	0.27
90 ν	0.26	0.29	0.32	0.31	0.32
100 ν	0.29	0.36	0.37	0.40	0.37
110 ν	0.36	0.43	0.45	0.45	0.47
120 ν	0.45	0.52	0.53	0.52	0.51
130 ν	0.51	0.60	0.65	0.67	0.66
140 ν	0.68	0.72	0.75	0.78	0.75
150 ν	0.73	0.82	0.90	0.92	0.87
160 ν	0.84	0.94	1.01	1.02	1.01
170 ν	0.96	1.02	1.08	1.07	1.06
180 ν	1.06	1.14	1.15	1.17	1.18
190 ν	1.15	1.19	1.22	1.28	1.21
200 ν	1.23	1.32	1.28	1.30	1.34



ตารางที่ 4.57 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 20 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
20 ν	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05
30 ν	0.10	0.11	0.07	0.09	0.10
40 ν	0.16	0.17	0.17	0.15	0.17
50 ν	0.26	0.26	0.25	0.22	0.27
60 ν	0.35	0.35	0.23	0.31	0.34
70 ν	0.42	0.42	0.40	0.39	0.42
80 ν	0.50	0.51	0.46	0.46	0.48
90 ν	0.56	0.57	0.52	0.52	0.55
100 ν	0.63	0.64	0.59	0.59	0.63
110 ν	0.71	0.72	0.65	0.65	0.69
120 ν	0.78	0.78	0.73	0.71	0.74
130 ν	0.86	0.87	0.80	0.79	0.83
140 ν	0.95	0.96	0.88	0.86	0.90
150 ν	1.02	1.03	0.95	0.95	0.98
160 ν	1.11	1.11	1.04	1.02	1.09
170 ν	1.18	1.18	1.13	1.11	1.13
180 ν	1.26	1.26	1.19	1.17	1.19
190 ν	1.31	1.31	1.25	1.22	1.26
200 ν	1.39	1.39	1.35	1.29	1.32



ตารางที่ 4.58 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 30 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02
20 ν	0.06	0.09	0.09	0.09	0.09
30 ν	0.16	0.17	0.18	0.18	0.18
40 ν	0.22	0.24	0.26	0.25	0.24
50 ν	0.29	0.32	0.32	0.32	0.31
60 ν	0.36	0.38	0.39	0.39	0.39
70 ν	0.41	0.44	0.45	0.46	0.46
80 ν	0.48	0.51	0.52	0.52	0.52
90 ν	0.54	0.57	0.58	0.59	0.58
100 ν	0.61	0.64	0.65	0.64	0.65
110 ν	0.67	0.70	0.71	0.71	0.71
120 ν	0.74	0.77	0.78	0.78	0.78
130 ν	0.81	0.85	0.86	0.86	0.86
140 ν	0.89	0.92	0.94	0.94	0.93
150 ν	0.97	1.00	1.01	1.01	1.01
160 ν	1.05	1.09	1.09	1.07	1.08
170 ν	1.13	1.16	1.16	1.15	1.16
180 ν	1.21	1.24	1.23	1.22	1.25
190 ν	1.27	1.28	1.31	1.28	1.30
200 ν	1.35	1.37	1.37	1.34	1.36



ตารางที่ 4.59 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 40 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
20 ν	0.08	0.11	0.11	0.10	0.07
30 ν	0.16	0.18	0.18	0.18	0.14
40 ν	0.24	0.24	0.24	0.24	0.20
50 ν	0.29	0.30	0.30	0.31	0.25
60 ν	0.36	0.36	0.36	0.37	0.31
70 ν	0.42	0.43	0.43	0.43	0.37
80 ν	0.48	0.50	0.49	0.50	0.42
90 ν	0.54	0.57	0.56	0.56	0.48
100 ν	0.61	0.67	0.63	0.64	0.55
110 ν	0.68	0.68	0.69	0.70	0.96
120 ν	0.74	0.76	0.77	0.76	0.67
130 ν	0.83	0.84	0.84	0.86	0.75
140 ν	0.91	0.92	0.92	0.93	0.82
150 ν	0.99	1.00	1.00	1.00	0.89
160 ν	1.05	1.07	1.07	1.07	0.96
170 ν	1.14	1.15	1.16	1.15	1.06
180 ν	1.20	1.22	1.23	1.24	1.12
190 ν	1.27	1.30	1.30	1.30	1.19
200 ν	1.34	1.35	1.37	1.38	1.25



ตารางที่ 4.60 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 50 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02
20 v	0.09	0.09	0.11	0.07	0.08
30 v	0.14	0.16	0.18	0.13	0.15
40 v	0.20	0.21	0.24	0.17	0.20
50 v	0.25	0.27	0.30	0.23	0.25
60 v	0.31	0.32	0.36	0.27	0.31
70 v	0.37	0.38	0.42	0.32	0.37
80 v	0.44	0.45	0.48	0.39	0.43
90 v	0.50	0.50	0.55	0.44	0.49
100 v	0.56	0.57	0.62	0.50	0.55
110 v	0.62	0.62	0.68	0.56	0.61
120 v	0.69	0.98	0.74	0.62	0.67
130 v	0.75	0.75	0.81	0.68	0.74
140 v	0.83	0.82	0.88	0.76	0.81
150 v	0.90	0.88	0.95	0.82	0.89
160 v	0.97	0.96	1.02	0.89	0.94
170 v	1.06	1.05	1.11	0.97	1.02
180 v	1.13	1.12	1.17	1.05	1.02
190 v	1.18	1.19	1.24	1.10	1.15
200 v	1.27	1.26	1.31	1.17	1.17



ตารางที่ 4.61 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 60 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04
20 ν	0.09	0.09	0.09	0.11	0.11
30 ν	0.16	0.16	0.15	0.17	0.18
40 ν	0.21	0.21	0.21	0.23	0.24
50 ν	0.27	0.26	0.27	0.28	0.28
60 ν	0.32	0.33	0.32	0.34	0.34
70 ν	0.38	0.39	0.38	0.40	0.41
80 ν	0.44	0.44	0.44	0.47	0.47
90 ν	0.49	0.50	0.49	0.52	0.53
100 ν	0.56	0.57	0.56	0.59	0.60
110 ν	0.62	0.63	0.62	0.66	0.67
120 ν	0.68	0.70	0.69	0.72	0.74
130 ν	0.75	0.77	0.75	0.79	0.81
140 ν	0.81	0.84	0.89	0.86	0.89
150 ν	0.89	0.90	0.91	0.94	0.96
160 ν	0.97	0.98	0.98	1.01	1.03
170 ν	1.06	1.06	1.07	1.10	1.12
180 ν	1.13	1.12	1.13	1.12	1.19
190 ν	1.20	1.19	1.21	1.26	1.26
200 ν	1.27	1.26	1.28	1.33	1.34



ตารางที่ 4.62 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 70 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04
20 ν	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11
30 ν	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18
40 ν	0.22	0.22	0.22	0.23	0.24
50 ν	0.28	0.28	0.28	0.28	0.31
60 ν	0.34	0.35	0.35	0.36	0.37
70 ν	0.40	0.41	0.41	0.42	0.43
80 ν	0.46	0.47	0.47	0.48	0.49
90 ν	0.53	0.54	0.53	0.53	0.56
100 ν	0.59	0.61	0.59	0.60	0.63
110 ν	0.66	0.66	0.66	0.66	0.69
120 ν	0.72	0.73	0.72	0.73	0.76
130 ν	0.79	0.80	0.80	0.81	0.85
140 ν	0.87	0.87	0.86	0.88	0.91
150 ν	0.94	0.94	0.94	0.96	0.99
160 ν	1.00	1.01	1.01	1.04	1.06
170 ν	1.09	1.10	1.10	1.13	1.15
180 ν	1.15	1.16	1.19	1.21	1.22
190 ν	1.22	1.24	1.27	1.29	1.28
200 ν	1.30	1.31	1.33	1.36	1.36



ตารางที่ 4.63 วัดค่ากระแสไฟฟ้า (i)

วัดค่ากระแส (i) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 80 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 ν	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
20 ν	0.10	0.10	0.11	0.12	0.10
30 ν	0.16	0.18	0.18	0.18	0.18
40 ν	0.22	0.24	0.24	0.24	0.24
50 ν	0.28	0.30	0.29	0.30	0.30
60 ν	0.34	0.36	0.37	0.37	0.36
70 ν	0.41	0.43	0.43	0.43	0.43
80 ν	0.47	0.49	0.50	0.50	0.50
90 ν	0.53	0.55	0.56	0.56	0.56
100 ν	0.60	0.62	0.63	0.64	0.63
110 ν	0.66	0.68	0.70	0.69	0.70
120 ν	0.73	0.76	0.77	0.77	0.77
130 ν	0.80	0.89	0.85	0.84	0.85
140 ν	0.87	0.90	0.92	0.90	0.92
150 ν	0.95	0.97	0.99	0.99	1.00
160 ν	1.02	1.04	1.06	1.06	1.07
170 ν	1.11	1.11	1.13	1.13	1.14
180 ν	1.17	1.19	1.20	1.20	1.21
190 ν	1.25	1.28	1.27	1.28	1.28
200 ν	1.33	1.34	1.34	1.36	1.35

พหุ ประถมศึกษา

ตารางที่ 4.64 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 10 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	66601.8	69429.2	71314.2	75712.4	71000
20 v	61.8894	67.7013	69.5863	68.958	64.4026
30 v	45.0033	40.2752	33.9816	40.338	37.9504
40 v	39.0081	32.6333	30.1593	29.2517	34.4678
50 v	36.4032	29.788	27.2533	26.6512	25.4993
60 v	26.9935	27.5114	24.5633	24.0725	22.9336
70 v	22.9685	22.5566	22.8551	20.3632	20.54
80 v	23.7347	21.4152	19.7195	18.1988	18.1514
90 v	20.4445	19.8245	18.1329	18.353	17.0922
100 v	20.7237	18.1427	17.3552	15.9436	16.574
110 v	18.5441	16.7162	15.9942	15.8476	14.565
120 v	16.6295	15.2548	14.8959	15.0374	14.8332
130 v	16.2439	14.577	13.33	12.8336	12.6806
140 v	13.3102	13.1598	12.5161	11.9381	12.1642
150 v	13.582	12.4706	11.3516	11.0468	11.2845
160 v	12.6861	11.7509	7.78244	10.6167	10.4637
170 v	11.9937	11.5869	10.8123	10.8135	10.634
180 v	11.4876	10.9212	10.7142	10.4398	10.117
190 v	11.1649	11.0193	10.5913	9.96719	10.3958
200 v	10.9726	10.3744	10.6004	10.2851	9.85382



ตารางที่ 4.65 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 20 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	66.6018	65.9734	63.146	66.9159	67.2301
20 v	31.1018	31.0232	32.3584	32.2013	26.9549
30 v	18.3783	17.1931	24.9532	21.6421	19.2265
40 v	15.0207	14.4144	16.558	16.1687	14.9133
50 v	11.4306	11.3581	13.3706	13.6516	11.5308
60 v	10.2236	10.0531	17.0466	11.4921	10.6629
70 v	9.89602	9.85862	11.2469	10.8264	10.1055
80 v	9.48761	9.4371	10.9614	10.4697	10.0858
90 v	9.53137	9.31455	10.911	10.2162	9.80177
100 v	9.42976	9.27752	10.7666	10.1756	9.70403
110 v	9.28319	9.14553	10.7442	10.1643	9.6069
120 v	9.39658	9.30798	10.6642	10.2434	9.82809
130 v	9.31519	9.16478	10.5832	10.1605	9.68216
140 v	9.31234	9.1957	10.5279	10.1371	9.71101
150 v	9.36934	9.17772	10.6417	9.98365	9.65238
160 v	9.22949	9.11628	10.3975	9.98534	9.28067
170 v	9.28633	9.17185	10.4534	9.90592	9.63885
180 v	9.29263	9.1555	10.4861	9.9618	9.70726
190 v	9.40319	9.25691	10.4125	10.1175	9.73644
200 v	9.29595	9.15582	9.52019	10.002	9.74132



ตารางที่ 4.66 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 30 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	34.5575	67.5442	36.2854	35.3429	34.8717
20 v	19.5302	15.0098	14.6608	14.7306	14.1721
30 v	11.4079	11.1804	10.3673	10.4022	10.1229
40 v	10.2673	10.0531	9.61811	9.56301	9.43787
50 v	9.96643	9.46405	9.51314	9.19898	9.08022
60 v	9.55568	9.33384	9.03812	9.03812	8.67563
70 v	9.47841	9.31768	9.04081	8.8989	8.62572
80 v	9.43787	9.17838	9.00187	8.88104	8.70584
90 v	9.32588	9.13266	8.95896	8.68996	8.65563
100 v	9.40933	9.17934	8.98012	8.87991	8.6418
110 v	9.38727	9.20935	9.06195	8.84513	8.70354
120 v	9.33987	9.26158	9.14284	8.87701	8.84076
130 v	9.51011	9.26585	9.04486	8.88048	8.78915
140 v	9.46361	9.30526	9.05714	8.88001	8.7897
150 v	9.49603	7.81628	9.0453	8.93954	8.73425
160 v	9.4906	9.22879	9.02704	8.92271	8.78482
170 v	9.48316	9.25416	9.07812	8.92212	8.81542
180 v	9.43776	9.17142	9.43755	8.95869	8.70347
190 v	9.45446	9.39287	9.17777	8.95599	8.74088
200 v	9.39918	9.25967	9.25967	9.05201	8.86576



ตารางที่ 4.67 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 40 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	30.9447	32.3584	33.3009	31.2588	30.9447
20 v	13.1947	11.6239	11.1955	11.5611	14.3167
30 v	10.0924	9.5644	9.5295	9.47714	10.8161
40 v	9.05826	9.21534	9.04517	8.94045	9.55044
50 v	8.99145	8.99543	8.90118	8.53297	9.43734
60 v	8.77028	8.81391	8.79646	8.51626	9.23223
70 v	8.66182	8.64303	8.56997	8.50422	8.92382
80 v	8.69828	8.60796	8.57847	8.42575	8.8937
90 v	8.65102	8.50986	8.49913	8.34205	9.03862
100 v	8.70376	8.00403	8.43742	8.35958	8.88214
110 v	8.644	8.7364	8.49596	8.37459	5.60975
120 v	8.87712	8.71379	8.47822	8.62285	9.34038
130 v	8.75482	8.7441	8.64686	8.43846	8.85091
140 v	8.7861	8.74524	8.6906	8.49243	8.98036
150 v	8.75203	8.70849	8.68965	8.51372	9.00472
160 v	8.84433	8.66727	8.68195	8.51166	9.00263
170 v	8.81024	8.74182	8.55813	8.59704	8.89426
180 v	8.78337	8.71663	8.60745	8.4899	8.97878
190 v	8.79151	8.6128	8.53547	8.55238	8.87566
200 v	8.81287	8.75923	8.62906	8.48458	8.96988



ตารางที่ 4.68 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 50 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	30.0022	20.6298	21.9911	58.4336	31.1018
20 v	11.3446	11.7984	9.99598	15.708	13.3125
30 v	10.659	9.99419	9.49459	11.5997	10.9746
40 v	9.53473	9.57438	8.99281	10.9217	10.0531
50 v	9.38708	9.09898	8.79646	10.217	9.33681
60 v	9.19169	9.09098	8.77028	10.4022	9.83014
70 v	8.87288	9.00314	8.71418	10.1218	9.67101
80 v	8.78932	8.76853	8.03724	9.82755	9.56359
90 v	8.75876	8.89071	8.54513	9.8389	9.3799
100 v	8.74597	9.79956	8.50257	9.70752	9.45334
110 v	8.83193	8.70525	8.61628	9.67162	9.41963
120 v	8.77825	6.09405	8.58844	9.77441	9.4998
130 v	8.86348	8.78389	8.66847	9.8683	9.51393
140 v	8.87216	8.88075	8.7679	9.79681	9.5838
150 v	8.87325	8.92141	8.77331	9.83472	9.50244
160 v	8.9001	8.875	8.6979	9.81306	9.48828
170 v	8.8587	8.83536	8.69174	9.81019	9.43094
180 v	8.79646	8.89463	8.69442	9.6791	10.1209
190 v	8.92252	8.80438	8.70779	9.77035	9.54771
200 v	8.86078	8.89869	8.76528	9.79532	9.95375



ตารางที่ 4.69 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 60 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	21.7817	20.944	30.4734	22.2006	16.4934
20 v	11.6239	12.0777	11.1701	10.5672	10.7385
30 v	10.0335	10.0727	10.4301	9.73894	9.45968
40 v	9.72398	9.85862	9.42478	9.35648	8.99281
50 v	9.49459	9.49728	9.07571	9.20038	9.03208
60 v	9.39533	9.25342	9.24806	9.09214	8.9905
70 v	9.17676	9.14284	9.04448	8.93783	8.74282
80 v	9.232	9.1606	8.99638	8.78978	8.58925
90 v	9.23244	9.09177	8.9888	8.83875	8.63049
100 v	9.06574	8.89016	8.81329	8.74321	8.51895
110 v	9.09542	8.9311	8.85726	8.65366	8.6089
120 v	9.1753	8.98047	8.86475	8.77028	8.58844
130 v	9.1567	9.02086	8.97658	8.80839	8.6995
140 v	9.29291	9.14802	8.45759	9.04486	8.73645
150 v	9.26593	9.17345	8.98288	8.88335	8.77028
160 v	9.29199	9.12344	9.04009	8.91155	8.75376
170 v	9.21139	9.05727	8.99611	8.86215	8.73475
180 v	9.23851	9.07415	9.09116	9.40514	8.73574
190 v	9.2389	9.06574	8.99378	8.85879	8.7067
200 v	9.29367	9.14553	9.04435	8.90039	8.65579



ตารางที่ 4.70 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a = 0.05 \text{ m}$ $f = 70 \text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	16.1007	20.3156	16.4934	17.3573	16.4148
20 v	10.7757	10.5872	11.0584	10.0817	10.6814
30 v	9.44326	9.4063	9.44326	9.12807	9.23279
40 v	9.46762	9.36766	9.1963	9.13794	8.82264
50 v	8.84134	8.78524	8.77402	8.77402	8.55324
60 v	8.8981	8.6708	8.65284	8.49975	8.37192
70 v	8.76504	8.53594	8.56659	8.38506	8.31426
80 v	8.68719	8.48898	8.46225	8.37758	8.32843
90 v	8.60085	8.44739	8.42895	8.41117	8.21302
100 v	8.54087	8.36385	8.3971	8.33046	7.66449
110 v	8.5061	8.4823	8.32046	8.37282	8.26375
120 v	8.58702	8.51243	8.40812	8.37471	8.20534
130 v	8.57376	8.47837	8.46267	8.39309	8.19401
140 v	8.63035	8.62674	8.58458	8.518	8.49611
150 v	8.56585	8.64272	8.51238	8.58047	8.37758
160 v	8.6865	8.66582	8.59117	8.48834	8.41117
170 v	8.62353	8.56512	8.65937	8.49898	8.37849
180 v	8.68992	8.69625	8.50078	8.52125	8.45397
190 v	8.70633	8.64191	8.55404	8.43603	8.4283
200 v	8.66838	8.70533	8.60749	8.57701	8.42224



ตารางที่ 4.71 ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)

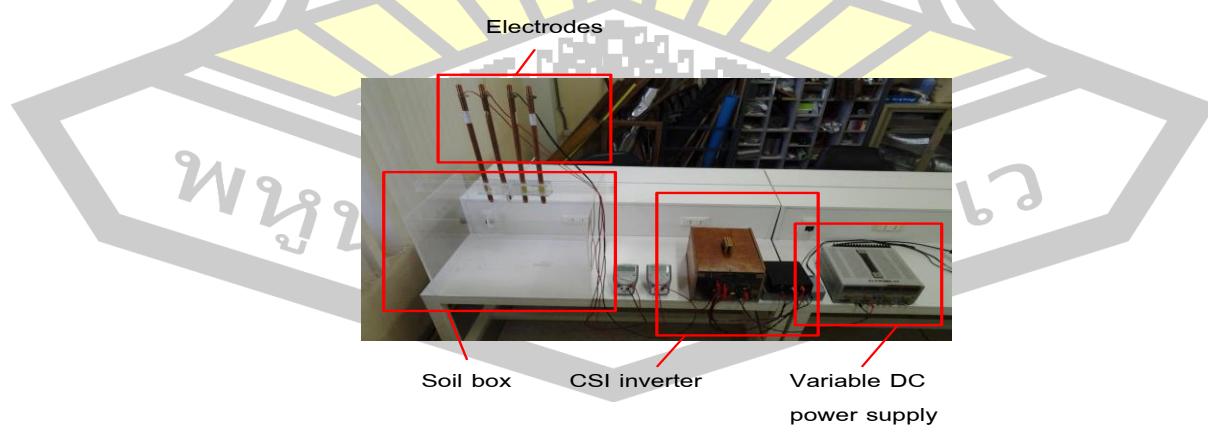
ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ที่ระยะ $a=0.05\text{ m}$ $f=80\text{ Hz}$					
	1	2	3	4	5
10 v	16.1792	15.865	16.3363	15.7865	16.8861
20 v	10.5243	10.5558	10.3673	9.81748	10.5243
30 v	9.60149	9.32006	9.38987	9.21534	9.09317
40 v	8.95354	8.79646	8.77028	8.73101	8.66556
50 v	8.61694	8.49277	8.5148	8.409	8.36711
60 v	8.6671	8.45612	8.32098	8.30399	8.42121
70 v	8.33671	8.30696	8.30696	8.27043	8.16083
80 v	8.68283	8.35407	8.24982	8.13672	8.04876
90 v	8.30447	8.27667	8.22424	8.1457	8.11204
100 v	8.16814	8.17828	8.13323	8.06506	7.96369
110 v	8.2443	8.2051	8.08736	8.08619	8.01106
120 v	8.22839	8.08547	8.11918	8.08654	8.07022
130 v	8.337	7.69161	8.19401	8.15692	8.10161
140 v	8.3848	8.31824	8.33888	8.39503	8.16814
150 v	8.36986	8.37218	8.27921	8.22209	8.14301
160 v	8.38374	8.3222	8.23334	8.12072	8.06244
170 v	8.36343	8.3323	8.30159	8.22652	8.14885
180 v	8.43128	8.36614	8.30689	8.28857	8.16554
190 v	8.40188	8.24668	8.30667	8.23441	8.18287
200 v	8.40671	8.36039	8.30881	8.15428	8.20537



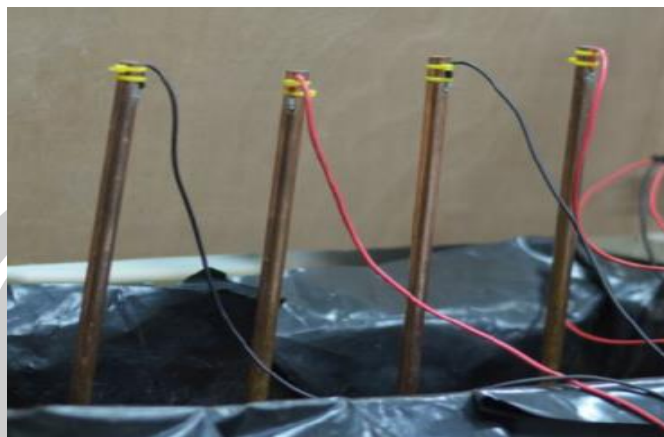
4.4 ผลการวิจัยผลของกำลังไฟฟ้า

ผลการวิจัยค่าของกำลังไฟฟ้าสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

จากภาพประกอบที่ 4.13 (ก) และ 4.13 (ข) แสดงภาพอุปกรณ์และการวางอิเล็กโทรดเพื่อการวิจัยในครั้งนี้ โดยอุปกรณ์ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้ (variable DC power supply) อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter; CSI) ขั้วอิเล็กโทรด (Electrodes) และกล่องบรรจุดินตัวอย่าง (soil box) โดยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงสามารถปรับค่าแรงดันได้ระหว่าง 10-200V, กระแส 0-4A ที่ขนาดกำลัง 800W ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังที่สามารถปรับระดับได้ อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสทำหน้าที่แปลงสัญญาณแรงดันที่ได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับความถี่ได้ระหว่าง 10-80 Hz ขั้วอิเล็กโทรดทำจากทองแดง จำนวน 4 ขั้ว ความต้านทานภายในต่ำ เพื่อทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าลงดิน (2 แห่งขอบ) และ เป็นขั้ววัดความต่างศักย์ไฟฟ้าของดิน (2 แห่งตรงกลาง) วางขั้วในรูปแบบ Wenner เพื่อลดความผิดพลาดเกี่ยวกับการวางขั้วอิเล็กโทรด และกล่องบรรจุดินตัวอย่าง (soil box) ทำจากแผ่นอะคริลิกมีขนาด 50x50x50 cm ดินที่ใช้เป็นดินร่วนปนทรายเปียก บริเวณข้างอาคารปฏิบัติการ 2 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มีค่าความต้านทานจำเพาะประมาณ $6.50 \pm 0.05 \Omega \cdot m$ การทดลองประกอบด้วยการปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายระหว่าง 10-200 V โดยปรับค่าแรงดันครั้งละ 10 V จากนั้นวัดค่ากระแสไฟฟ้า (I) และความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) จากขั้วอิเล็กโทรดตามที่แสดงใน Figure 2 แล้วคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินโดยใช้สมการ (1) และค่าระดับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ โดยปรับระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 5 cm ค่าความถี่กระแสไฟฟ้าที่ป้อนลงดินคือ 10 20 30 40 50 60 70 และ 80 Hz วัดค่า 5 ครั้งต่อสภาวะการทดลอง แล้วศึกษาความเที่ยงตรง (Precision) ของการตรวจวัดแต่ละครั้ง แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบและสรุป



ภาพประกอบที่ 4.15 (ก) แสดงภาพอุปกรณ์และการวางอิเล็กโทรด



ภาพประกอบที่ 4.16 (ข) แสดงภาพอุปกรณ์และการวางอิเล็กโทรด

4.1.1 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ระดับแรงดันต่ำกว่า 20 V จะมีค่ากระแสไหลน้อยมาก ทำให้ได้ค่าการวัดที่ไม่ถูกต้องเมื่อเทียบกับค่าจริง

4.1.2 กรณีศึกษาวิจัยนี้ ระดับกำลังต่ำกว่า 50-60 W ในทุกกรณีให้ค่าความเที่ยงตรงในการวัดต่ำ โดยเฉพาะกรณีที่ป้อนกระแสไฟฟ้าความถี่ต่ำ ระดับพลังงานที่สูงกว่า 50 W ไม่ได้ทำให้ความเที่ยงตรงการวัดเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด

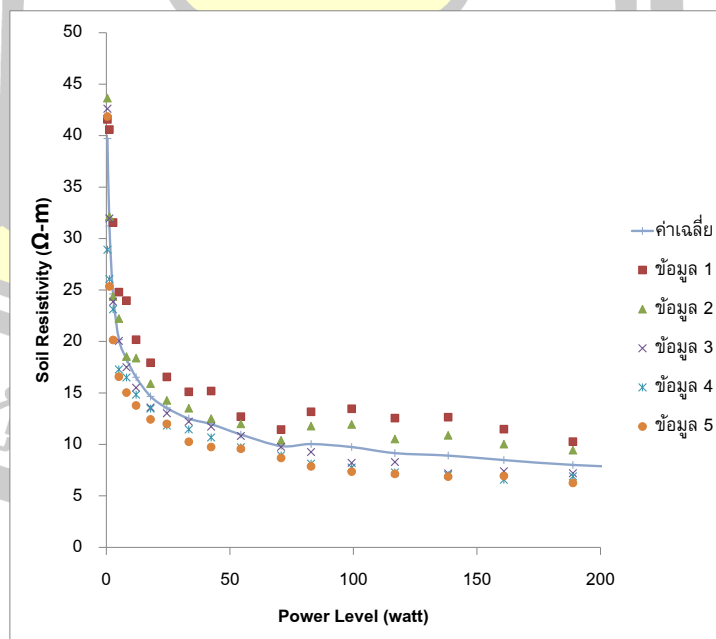
4.1.3 ที่การทดสอบที่ความถี่สูงขึ้นกำลังงานที่ใช้ในการวัดที่ให้ค่าความเที่ยงตรงและความถูกต้องสูงนั้นมีค่าลดลง กล่าวคือ การทดสอบค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ความถี่สูงจะใช้พลังงานน้อยกว่าในขณะที่มีความเที่ยงตรงสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การทดสอบที่ความถี่สูงค่าความถูกต้องของการวัดจะลดลงเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของดินมีผลต่อการวัดมากขึ้น

บทที่ 5

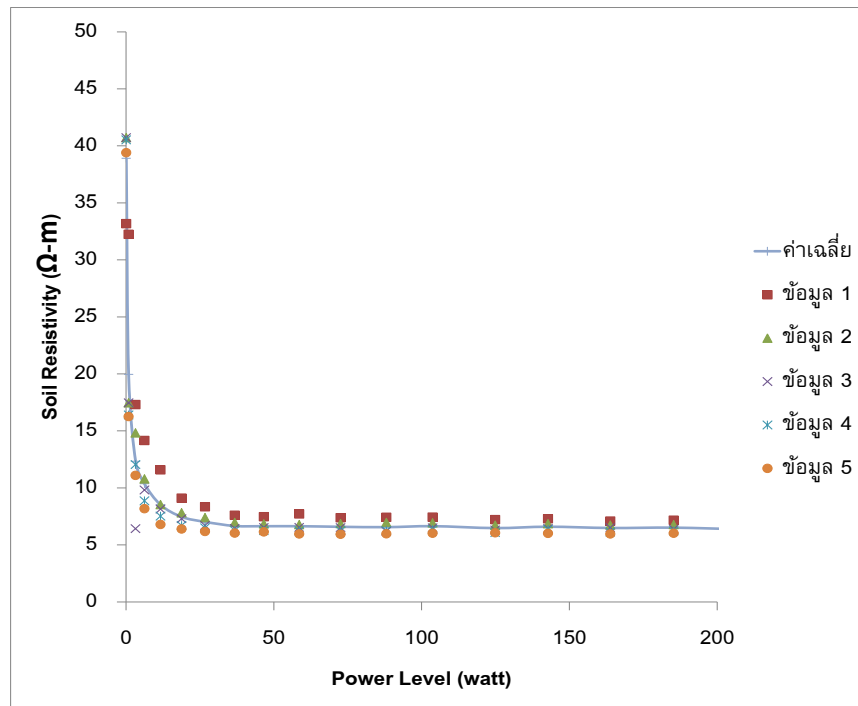
สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

ในบทนี้ผู้วิจัยจะทำการสรุปผลการทดลอง อภิปรายผลที่เกิดจากการทดลองในงานวิจัยครั้งนี้ จากภาพประกอบที่ 5.1 ถึง 5.6 สามารถอธิบายและสรุปได้ดังนี้

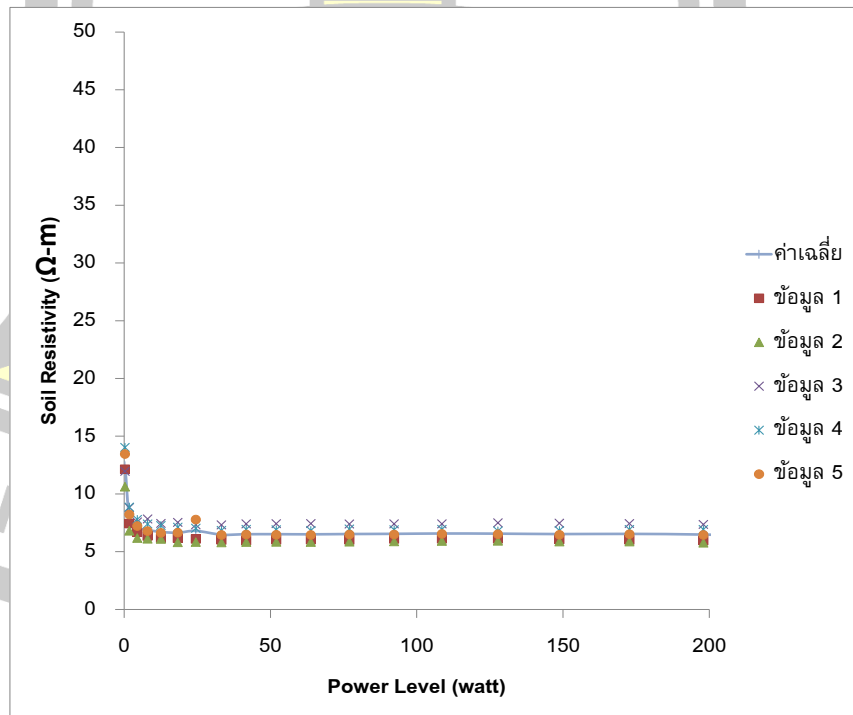
1. การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ระดับแรงดันต่ำกว่า 20 v จะมีค่ากระแสไหลน้อยมาก ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีความ คลาดเคลื่อนและได้ค่าการวัดที่ไม่ถูกต้อง
2. กรณีศึกษาวิจัยนี้ ระดับแรงดันต่ำกว่า 50-60 W ในทุกกรณีให้ค่าความแม่นยำในการวัดที่ต่ำ โดยเฉพาะกรณีที่ป้อนกระแสไฟฟ้าความถี่ต่ำ ระดับพลังงานที่สูงกว่า 50 W ไม่ได้ทำให้ความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด
3. ที่การทดสอบที่ความถี่ที่สูงขึ้นกำลังที่ใช้ในการวัดที่ให้ค่าความแม่นยำและความถูกต้องสูงนั้นมีค่าลดลง กล่าวคือ การทดสอบค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ความถี่สูง จะใช้พลังงานน้อยกว่าในขณะที่มีความแม่นยำสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การทดสอบที่ความถี่สูงค่าความถูกต้องของการวัดจะลดลงเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของดินมีผลต่อการวัดมากขึ้น



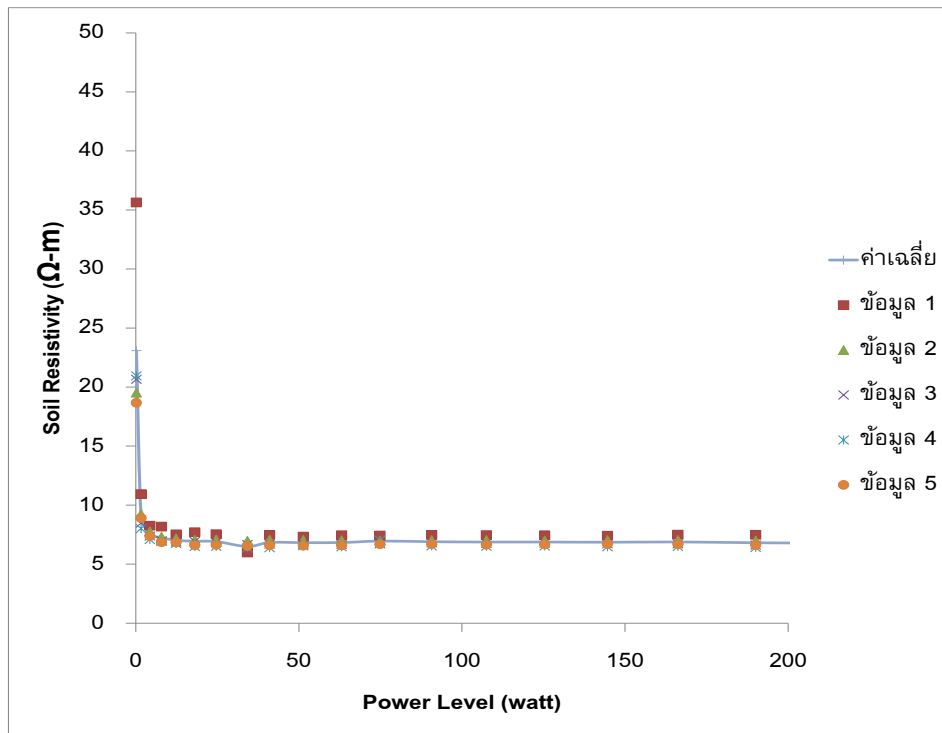
ภาพประกอบที่ 5.1 ที่ระดับความถี่ 10 Hz



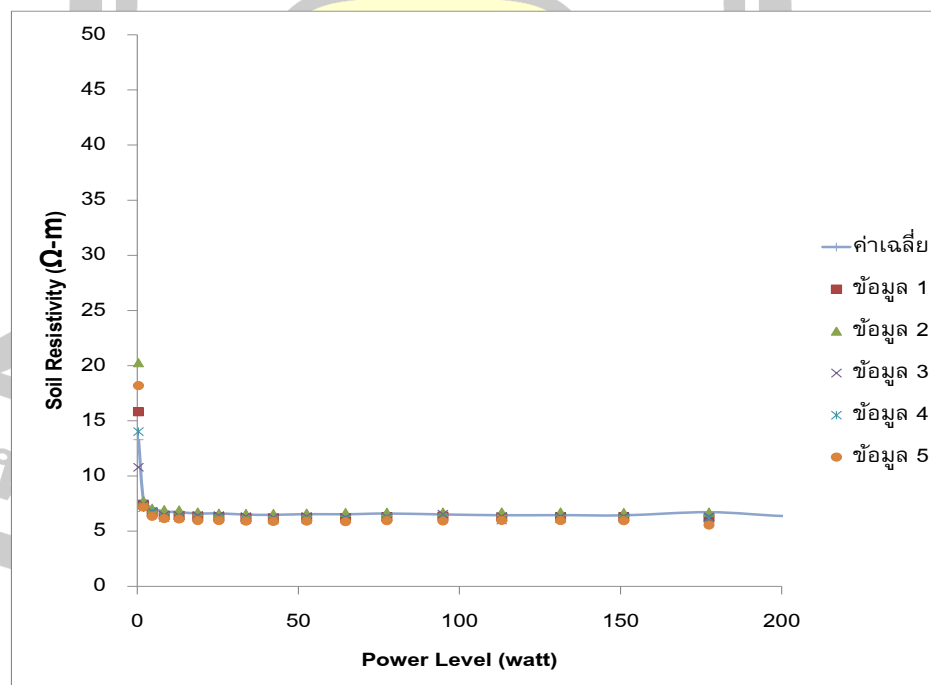
ภาพประกอบที่ 5.2 ที่ระดับความถี่ 20 Hz



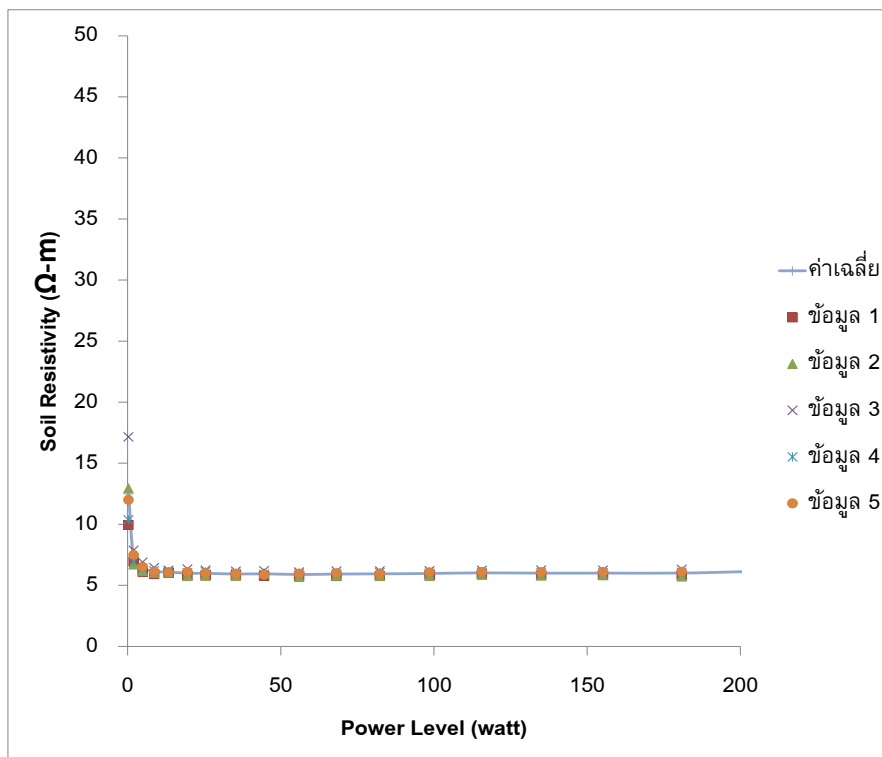
ภาพประกอบที่ 5.3 ที่ระดับความถี่ 50 Hz



ภาพประกอบที่ 5.4 ที่ระดับความถี่ 60 Hz



ภาพประกอบที่ 5.5 ที่ระดับความถี่ 70 Hz

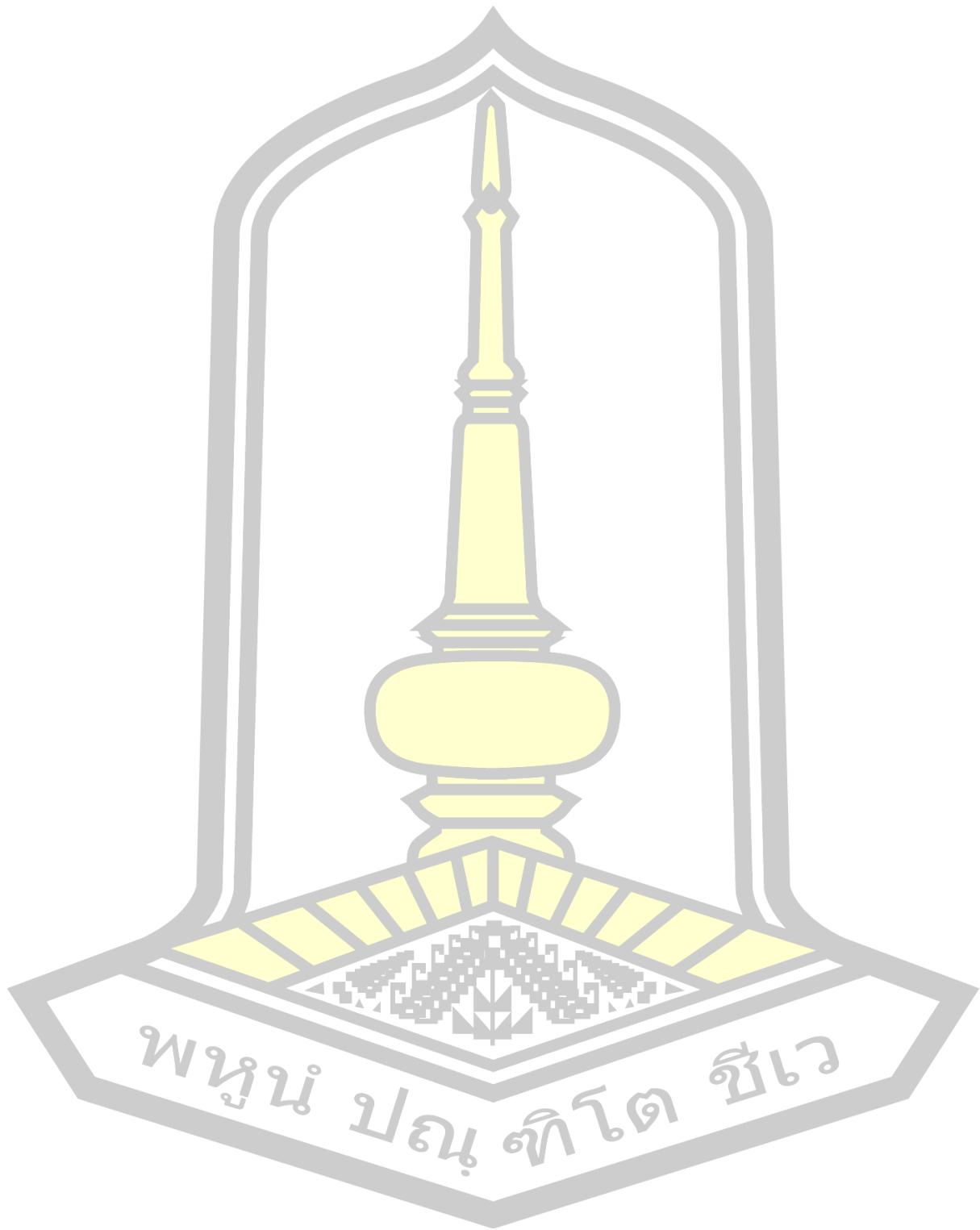


ภาพประกอบที่ 5.6 ที่ระดับความถี่ 80 Hz

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอผลของกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินด้วยเครื่องตรวจวัดแบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส ผลของการทดสอบพบว่า การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ระดับแรงดันต่ำเกินไปจะไม่สามารถวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้อย่างถูกต้อง การวัดที่ระดับกำลังไฟฟ้าต่ำจะทำให้ความแม่นยำในการวัดต่ำด้วย แต่เมื่อระดับกำลังไฟฟ้าสูงกว่าค่าๆหนึ่ง จะให้ค่าความแม่นยำสูงและไม่มีความแตกต่างเมื่อเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นอีก การวัดที่ความถี่สูงขึ้นให้แนวโน้มความแม่นยำสูงขึ้น แต่ค่าความถูกต้องของการวัดลดลงเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของดินมีผลต่อการวัดมากขึ้น

บรรณานุกรม

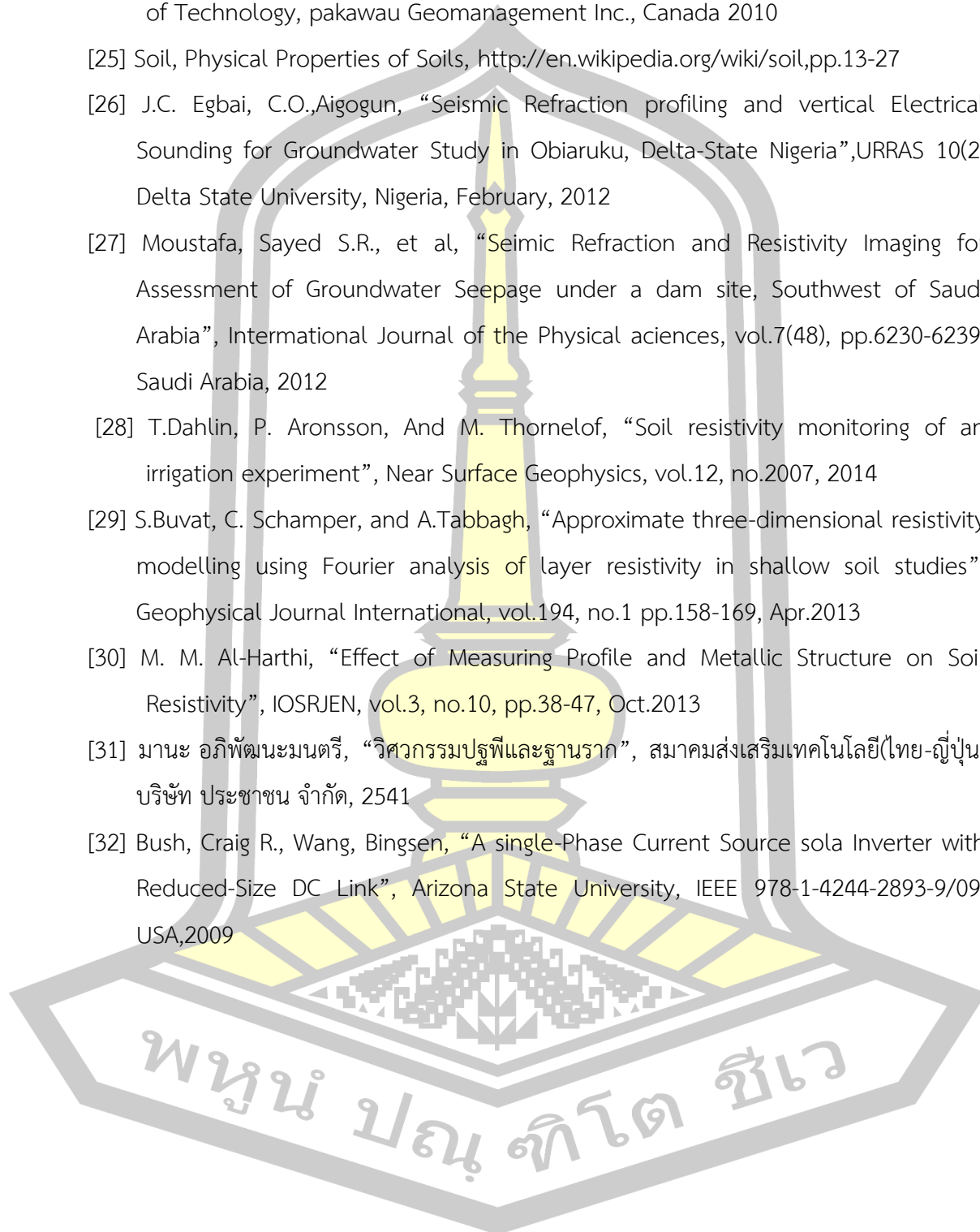


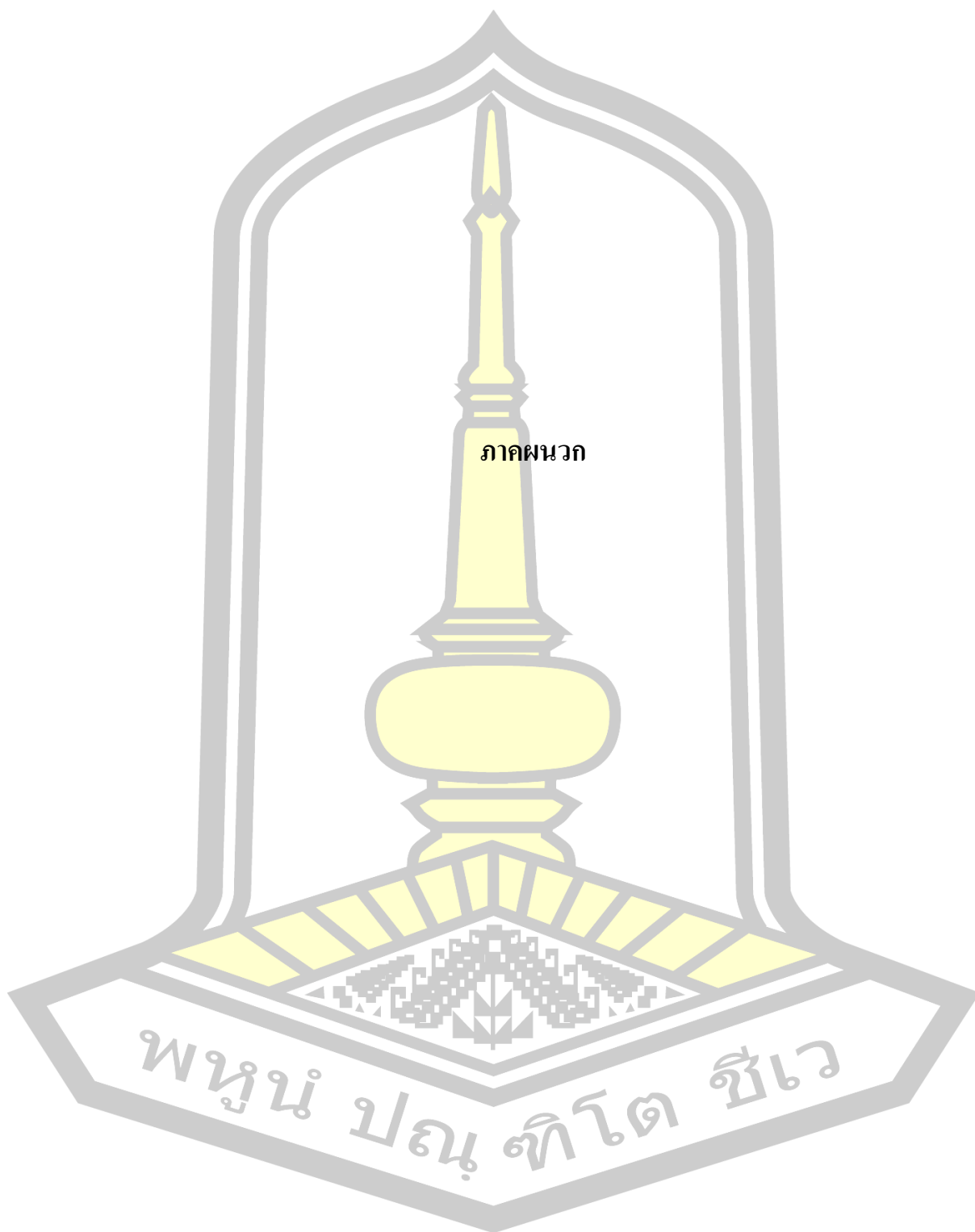
บรรณานุกรม

- [1] “Thermal resistivity of soil,” *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 2, no. 19, pp. 421–422, Jul. 1956.
- [2] T. Dahlin, P. Aronsson, and M. Thörnölöf, “Soil resistivity monitoring of an irrigation experiment,” *Near Surface Geophysics*, vol. 12, no. 2007, 2014.
- [3] S. Buvat, C. Schamper, and A. Tabbagh, “Approximate three-dimensional resistivity modelling using Fourier analysis of layer resistivity in shallow soil studies,” *Geophysical Journal International*, vol. 194, no. 1, pp. 158–169, Apr. 2013.
- [4] M. M. Al-Harhi, “Effect of Measuring Profile and Metallic Structure on Soil Resistivity,” *IOSRJEN*, vol. 3, no. 10, pp. 38–47, Oct. 2013.
- [5] Y. Paillet, N. Cassagne, and J.-J. Brun, “Monitoring forest soil properties with electrical resistivity,” *Biology and Fertility of Soils*, vol. 46, no. 5, pp. 451–460, Mar. 2010.
- [6] Telford, W.M., Geldart, Sheriff, R.E., and Keys, D.A. “Applied Geophysics”, Cambridge University Press, England, 1978.
- [7] IEEE STANDARD 442-1981 - IEEE Guide for Soil Thermal Resistivity Measurements
- [8] ประคอง หงแก้ว, “เครื่องสำรวจแหล่งน้ำใต้ดินแบบวัดค่าความต้านทานจำเพาะ” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2541.
- [9] Y. Xiaolin and R. Chengli, “High frequency properties of Ni₇₅Fe₂₅-SiO₂ granular thin films with very high resistivity,” *Materials Letters*, vol. 61, no. 3, pp. 908–911, Feb. 2007.
- [10] C. Uher and W. P. Pratt, “High-Precision, Ultralow-Temperature Resistivity Measurements on Bismuth,” *Physical Review Letters*, vol. 39, no. 8, pp. 491–494, Aug. 1977.
- [11] X. Wei, Z. Ding, J. Wu, and B. Liu, “Research on the high precision resistivity probe with four point-electrodes for marine sediments,” *JOURNAL OF ELECTRONIC MEASUREMENT AND INSTRUMENT*, vol. 27, no. 9, pp. 810–816, Sep. 2013.
- [12] K. W. E. Cheng, “High frequency inductor design for an aerospace application,” *IEE Colloquium on Capacitors and Inductors for Power Electronics*, 1996.

- [13] L. K. Varga, "High-Frequency Inductor Materials," *Journal of Elec Materi*, vol. 43, no. 1, pp. 117–120, Oct. 2013.
- [14] ประติมากรณ์ หาแก้ว, "Effects of High Frequency Current on Soil Resistivity Measurement using a Current Source Inverter", *วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม* 2560.
- [15] ประเสริฐ ชุ่มรุ่ม และคณะ, "เทคโนโลยีการทำเหมืองถ่านหิน" http://maemohmine.egat.co.th/mining_technology/general.html? , สืบค้นเมื่อ 18 เมษายน 2561
- [16] กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, "การสำรวจแหล่งน้ำบาดาลด้วยธรณีฟิสิกส์", *การจัดทำองค์ความรู้, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม* 2554
- [17] Goldman, Mark "Electrical Prospecting Methods in Monitoring Seawater Intrusions", *The Institute for Petroleum Research and Geophysical*, P.O. Box 2286, Holon 58122, Israel
- [18] เพียงตา สาตวรรษ, "การตรวจหาโพรงและชั้นเกลือหินด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ", *วารสารวิจัย มข.* 2554, ปีที่ 8 (ฉบับที่ 2), หน้า 41-52
- [19] Mohamaden, Mahmoud I., et al, "Goelectrical Survey for Groundwater Exploration at the Asuit Governorate Nile Valley, Egypt", *JKAU. Mar. Sci.*, Vol. 20, pp. 91-108, National Institute of Oceanography and Fisheries, Alexandria, Egypt, 2009
- [20] Bush, Craig R., Bingsen, "A Single-Phase Current Source Sola Inverter with Reduced-Size DC Link", *Arizona State University*, IEEE 978-1-42244-2893-9/09, USA, 2009
- [21] Ayolbi, Elijah A., et al, "Application of Electrical Resistivity Tomography in Mapping Subsurface Hydrocarbon Contamination", *Earth Science Research*; Vol. 2, np. 1, Canadian center of Science and Education, Canada, 2013
- [22] Anomohanran O., "Goelectrical Investigation of Groundwater Condition in Oleh Nigeria", *Delta State Univ.*, *Ijrras* 15(1), Nigeria, April, 2013
- [23] Umeh, Victor O, Ezeh, Chukwudi C, Okonkwo, Austin C., "Groundwater Exploration of Iokpaukwu, Abia State Southeastern Nigeria, using Electrical Resistivity Method", *International Research Journal of Geology and Mining (IRJGM)* (2276-6618) Vol. 4(3) pp. 76-83, Nigeria, April, 2014

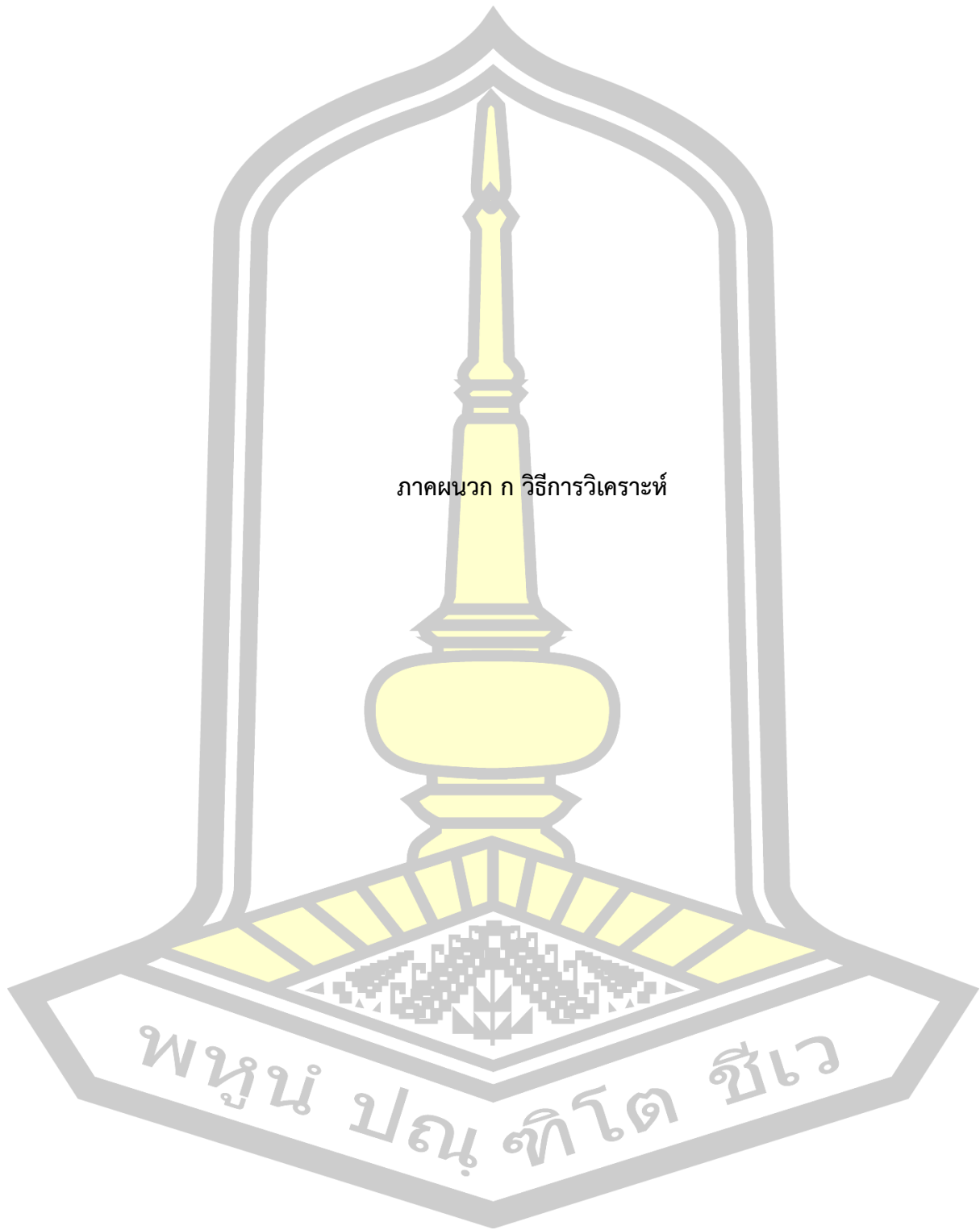
- [24] Stevens ,Robert, “Mineral Exploration and Mining Essentials”, Columbia Institute of Technology, pakawau Geomanagement Inc., Canada 2010
- [25] Soil, Physical Properties of Soils, <http://en.wikipedia.org/wiki/soil>,pp.13-27
- [26] J.C. Egbai, C.O.,Aigogun, “Seismic Refraction profiling and vertical Electrical Sounding for Groundwater Study in Obiaruku, Delta-State Nigeria”,URRAS 10(2) Delta State University, Nigeria, February, 2012
- [27] Moustafa, Sayed S.R., et al, “Seismic Refraction and Resistivity Imaging for Assessment of Groundwater Seepage under a dam site, Southwest of Saudi Arabia”, International Journal of the Physical sciences, vol.7(48), pp.6230-6239, Saudi Arabia, 2012
- [28] T.Dahlin, P. Aronsson, And M. Thornehof, “Soil resistivity monitoring of an irrigation experiment”, Near Surface Geophysics, vol.12, no.2007, 2014
- [29] S.Buvat, C. Schamper, and A.Tabbagh, “Approximate three-dimensional resistivity modelling using Fourier analysis of layer resistivity in shallow soil studies”, Geophysical Journal International, vol.194, no.1 pp.158-169, Apr.2013
- [30] M. M. Al-Harhi, “Effect of Measuring Profile and Metallic Structure on Soil Resistivity”, IOSRJEN, vol.3, no.10, pp.38-47, Oct.2013
- [31] มานะ อภิปพัฒนมนตรี, “วิศวกรรมปฐพีและฐานราก”, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น) บริษัท ประชาชน จำกัด, 2541
- [32] Bush, Craig R., Wang, Bingsen, “A single-Phase Current Source sola Inverter with Reduced-Size DC Link”, Arizona State University, IEEE 978-1-4244-2893-9/09, USA,2009





ภาคผนวก

พหุมนุ ปณฺ ทิโต ชีเว



ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์

พหุบัณฑิตยาลัย

การทดลองส่วนที่ 2

การทดลองส่วนที่ 2 เป็นการทดลองภาคสนาม การทดลองในภาคสนามนั้นใช้ดินในบริเวณอาคารปฏิบัติการโยธา วิทยาลัยเทคนิคสกลนคร ใช้แหล่งจ่ายแรงดัน 12,24,36,48,60 v จากแบตเตอรี่เป็นตัวจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ให้แก่วงจร CSI แล้ว CSI จึงจ่ายกระแสรูปพัลส์สี่เหลี่ยมให้แก่ขั้วกระแสไฟฟ้าด้านนอก (Outer Current Electrodes) แล้วทำการวัดความต่างศักย์ที่ขั้วแรงดันไฟฟ้าด้านใน (Inner Potential Electrodes) ผลการทดลองแสดงดังตารางภาคผนวก ก ที่ 1 ถึง ตารางภาคผนวก ก ที่ 9 การทดลองในส่วนนี้เป็นเพียงการทดสอบในเบื้องต้นเท่านั้น เนื่องจากไม่ทราบค่าความต้านทานจำเพาะของดินและไม่มีการทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน

การทดลองที่ 1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในการทดลองนี้จะกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและความลึกของดินที่ใช้วัดค่าความต้านทานจำเพาะให้คงที่ โดยกำหนดความถี่ที่ 1 KHz และระดับความลึกของดินที่ 1 m แหล่งจ่ายพลังงานระดับแรงดันที่ 12,24,36,48,60 v แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) และค่ากระแสไฟฟ้า (i)

การทดลองที่ 2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในการทดลองนี้จะกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและความลึกของดินที่ใช้วัดค่าความต้านทานจำเพาะให้คงที่ โดยกำหนดความถี่ที่ 1 KHz และระดับความลึกของดินที่ 2 m แหล่งจ่ายพลังงานระดับแรงดันที่ 12,24,36,48,60 v แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) และค่ากระแสไฟฟ้า (i)

การทดลองที่ 3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อความแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในการทดลองนี้จะกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและความลึกของดินที่ใช้วัดค่าความต้านทานจำเพาะให้คงที่ โดยกำหนดความถี่ที่ 1 KHz และระดับความลึกของดินที่ 3 m แหล่งจ่ายพลังงานระดับแรงดันที่ 12,24,36,48,60 v แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) และค่ากระแสไฟฟ้า (i)

ตารางที่ ก-1 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) ที่ระยะ $a = 1 \text{ m}$ $f = 1 \text{ KHz}$

ค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) ที่ระยะ $a = 1 \text{ m}$ $f = 1 \text{ KHz}$					
	12V	24V	36V	48V	60V
1	5.84	4.12	3.96	4.03	4.05
2	5.81	4.14	4.12	4.25	4.47
3	5.84	4.13	4	4.3	4.18
4	5.83	4.87	4.03	4.33	4.1
5	5.83	4.11	3.76	4.23	4.25
6	5.77	4.11	3.79	4.29	4.41
7	5.85	4.18	4.03	4.32	4.31
8	5.86	4.16	3.77	4.11	4.15
9	5.81	4.15	3.74	4.24	4.09
10	5.88	4.09	4.02	4.02	4.13
11	5.79	4.14	4	4.21	4.12
12	5.82	4.1	3.78	4.05	4.21
13	5.8	4.05	3.77	4.35	4.41
14	5.84	4.02	3.82	4.11	4.4
15	5.81	4.07	4.11	4.02	4.16
16	5.83	4.05	3.95	4.22	4.42
17	5.78	4.12	4.08	4.19	4.32
18	5.79	4.1	3.87	4.29	4.2
19	5.85	4.01	3.84	4.27	4.12
20	5.87	4.04	4.11	4.59	4.15
21	5.86	4.18	4.13	4.31	4.17
22	5.83	4.12	4.14	4.24	4.27
23	5.81	4.14	3.84	4.01	4.39
24	5.87	4.11	4.08	4.29	4.42
25	5.79	4.02	3.97	4.35	4.07
26	5.81	4.07	3.97	4.18	4.25
27	5.77	4.18	3.78	4.11	4.2
28	5.79	4.09	4	4.04	4.33
29	5.86	4.07	4.02	4.15	4.15
30	5.82	4.04	3.82	4.35	4.14

ตารางที่ ก-2 ค่ากระแสไฟฟ้า (i) ที่ระยะ $a = 1 \text{ m}$ $f = 1 \text{ KHz}$

ค่ากระแสไฟฟ้า (i) ที่ระยะ $a = 1 \text{ m}$ $f = 1 \text{ KHz}$					
	12 V	24 V	36 V	48 V	60 V
1	0.227083	0.051667	0.057708	0.069792	0.064583
2	0.233333	0.048125	0.053333	0.073125	0.073542
3	0.241667	0.055	0.051042	0.075208	0.073125
4	0.245833	0.05625	0.046875	0.0725	0.058125
5	0.23125	0.051667	0.058125	0.074583	0.065
6	0.225	0.053125	0.045625	0.077917	0.0725
7	0.220833	0.047917	0.060625	0.072292	0.075
8	0.21875	0.048958	0.046667	0.071667	0.066458
9	0.264583	0.054375	0.057708	0.081458	0.051667
10	0.241667	0.053958	0.04625	0.083333	0.057292
11	0.245833	0.055625	0.0475	0.073125	0.056458
12	0.233333	0.051667	0.056458	0.081667	0.061875
13	0.264583	0.053542	0.051667	0.073333	0.069792
14	0.25	0.047083	0.055833	0.076875	0.074375
15	0.208333	0.051042	0.063125	0.071875	0.055625
16	0.26875	0.048125	0.060625	0.077917	0.056875
17	0.233333	0.055833	0.053542	0.075208	0.057708
18	0.245833	0.051875	0.061042	0.069792	0.061667
19	0.2375	0.053125	0.06375	0.076667	0.065417
20	0.2125	0.05208	0.062292	0.07375	0.069375
21	0.270833	0.057292	0.057083	0.082708	0.077083
22	0.239583	0.054583	0.048542	0.080208	0.063333
23	0.2625	0.052708	0.062083	0.078958	0.078125
24	0.2125	0.050833	0.050833	0.071667	0.06375
25	0.260417	0.049167	0.053542	0.07375	0.067708
26	0.258333	0.052083	0.064792	0.082708	0.065833
27	0.241667	0.055833	0.049792	0.069375	0.057292
28	0.225	0.053958	0.055	0.076042	0.078542
29	0.26875	0.050417	0.046458	0.079583	0.058125
30	0.222917	0.056458	0.048125	0.077292	0.074792

ตารางที่ ก-3 ค่าความต้านทานจำเพาะ(ρ) ที่ระยะ $a = 1 \text{ m}$ $f = 1 \text{ KHz}$

ค่าความต้านทานจำเพาะ(ρ) ที่ระยะ $a = 1 \text{ m}$					
	12V	24V	36V	48V	60V
1	161.5055	500.7794	430.9395	362.6278	393.8168
2	156.372	540.2431	485.13	364.9915	381.7101
3	151.7594	471.5709	492.1469	359.056	358.9798
4	148.9318	543.7084	539.9125	375.0676	442.9763
5	158.3239	499.5639	406.2417	356.1707	410.6154
6	161.0471	485.8504	521.6701	345.7694	381.9972
7	166.3608	547.8344	417.4581	375.2798	360.8907
8	168.2322	533.6129	507.3343	360.1507	392.1555
9	137.9029	479.3011	406.9984	326.8812	497.1329
10	152.7989	476.0192	545.8508	302.9472	452.7081
11	147.91	467.4013	528.8421	361.5562	458.2778
12	156.6411	498.3484	420.4587	311.4367	427.2937
13	137.6655	475.0319	458.2374	372.5182	396.821
14	146.7008	536.1897	429.6645	335.7502	371.5227
15	175.1366	500.7595	408.884	351.2431	469.6593
16	136.2322	528.4987	409.1711	340.1275	488.0457
17	155.5646	463.4078	478.5507	349.8708	470.1158
18	147.91	496.347	398.1477	386.0232	427.7189
19	154.6863	474.0292	378.2776	349.7687	395.52
20	173.4758	459.5538	414.354	390.8502	375.6685
21	135.8799	458.1888	454.3603	327.256	339.731
22	152.817	474.0202	535.6058	331.9755	423.4042
23	138.9973	493.2655	388.4328	318.9378	352.8858
24	173.4758	507.7534	504.0472	375.9237	435.4133
25	139.627	513.4698	465.6486	370.4136	377.4956
26	141.2392	490.7443	384.7964	317.3852	405.4177
27	149.9404	470.1564	476.7545	372.0476	460.3811
28	161.6053	476.0192	456.7273	333.6487	346.2162
29	136.9332	506.9673	543.403	327.4806	448.3785
30	163.9608	449.3792	498.4852	353.4404	347.6216

ตารางที่ ก-4 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) ที่ระยะ $a = 2 \text{ m}$ $f = 1 \text{ KHz}$

ค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) ที่ระยะ $a = 2 \text{ m}$ $f = 1 \text{ KHz}$					
	12v	24v	36v	48v	60v
1	4.31	3.68	3.75	3.63	3.84
2	3.67	4.04	3.66	3.97	3.58
3	4.23	4.08	2.75	4.64	3.95
4	3.97	4.23	2.39	3.76	3.48
5	3.85	3.71	3.16	3.95	4.09
6	4.67	3.75	3.15	3.57	4.83
7	3.73	3.8	3.24	3.73	3.52
8	3.78	3.21	3.94	3.03	4
9	4.36	4.14	3.51	3.77	3.59
10	4.29	3.75	3.69	3.54	3.79
11	4.07	3.92	3.73	3.74	4.53
12	4.36	3.97	3.78	3.96	3.78
13	4.03	3.16	3.94	3.53	3.51
14	3.98	3.74	3.54	3.75	4.29
15	4.13	3.24	3.47	3.81	3.99
16	3.64	3.97	3.58	3.55	3.54
17	4.26	3.7	4.85	3.77	3.12
18	4	3.68	4.95	3.87	3.52
19	3.74	3.99	3.95	3.05	3.62
20	3.95	3.72	3.83	3.56	3.79
21	4.42	3.14	3.53	3.78	4.69
22	3.92	3.28	3.7	3.71	4
23	4.26	3.79	3.75	3.88	3.95
24	3.97	4.19	3.64	3.52	3.7
25	4.13	4.08	3.72	3.64	3.83
26	3.76	4.22	3.59	3.18	3.66
27	4.21	4.01	3.62	3.13	4.63
28	3.81	4.25	3.71	3.93	3.7
29	4.21	3.89	3.69	3.12	3.47
30	3.75	3.75	3.83	3.13	3.54

ตารางที่ ก-5 ค่ากระแสไฟฟ้า (i) ที่ระยะ $a = 2 \text{ m}$ $f = 1 \text{ KHz}$

ค่ากระแสไฟฟ้า (i) ที่ระยะ $a = 2 \text{ m}$ $f = 1 \text{ KHz}$					
	12 V	24 V	36 V	48 V	60 V
1	0.071667	0.081667	0.074167	0.085833	0.071042
2	0.074583	0.078542	0.067708	0.074375	0.066875
3	0.071875	0.069583	0.064792	0.074792	0.07375
4	0.075833	0.080208	0.053125	0.078125	0.074167
5	0.069167	0.083333	0.056625	0.082917	0.066875
6	0.0725	0.068958	0.064792	0.071875	0.078333
7	0.069167	0.075208	0.061458	0.083125	0.061667
8	0.059583	0.07375	0.066875	0.071042	0.065625
9	0.054375	0.067083	0.059792	0.07	0.058542
10	0.083125	0.07875	0.055	0.078333	0.079375
11	0.073125	0.070208	0.0575	0.081667	0.077292
12	0.080208	0.074792	0.075625	0.079375	0.056667
13	0.075833	0.076042	0.074167	0.077292	0.061458
14	0.077708	0.083542	0.071458	0.080625	0.056875
15	0.065625	0.077917	0.073125	0.073333	0.055833
16	0.065	0.078958	0.066458	0.084375	0.063333
17	0.061458	0.08	0.055208	0.076458	0.071458
18	0.075833	0.069375	0.068333	0.070833	0.073958
19	0.080833	0.071042	0.081458	0.068958	0.057917
20	0.069583	0.077292	0.080208	0.072708	0.059167
21	0.074792	0.074583	0.057292	0.068958	0.0425
22	0.074375	0.080833	0.069375	0.078958	0.067708
23	0.079375	0.069375	0.055833	0.073125	0.075833
24	0.054375	0.078542	0.052917	0.07625	0.060625
25	0.065417	0.072083	0.059375	0.071458	0.064792
26	0.054583	0.07875	0.072083	0.082917	0.06625
27	0.056875	0.069167	0.05375	0.083958	0.067917
28	0.075833	0.082083	0.08	0.087083	0.072292
29	0.069792	0.074583	0.066042	0.085	0.072917
30	0.076042	0.071875	0.0725	0.069792	0.065

ตารางที่ ก-6 ค่าความต้านทานจำเพาะ(ρ) ที่ระยะ $a = 2 \text{ m}$ $f = 1 \text{ KHz}$

ค่าความต้านทานจำเพาะ(ρ) ที่ระยะ $a = 2 \text{ m}$					
	12 V	24 V	36 V	48 V	60 V
1	755.3526	565.969	635.0562	531.1783	678.903
2	618.0362	646.0571	678.9356	670.4296	672.3708
3	739.1833	736.4522	533.0932	779.2098	672.7051
4	657.5367	662.385	565.0522	604.4877	589.3321
5	699.1229	559.1712	713.5209	598.3357	768.1555
6	809.0372	683.0211	610.6341	623.8497	774.4443
7	677.332	634.6105	662.1462	563.5946	716.9384
8	796.8134	546.6793	739.9836	535.6969	765.5619
9	1007.11	775.1314	737.3201	676.4457	770.2275
10	648.2093	598.0952	842.6618	567.6051	599.7153
11	699.066	701.2729	814.7617	575.1967	736.1311
12	682.742	666.6946	627.7924	626.6154	837.8259
13	667.4743	521.9454	667.2324	573.6298	717.325
14	643.2875	562.2871	622.2143	584.186	947.3829
15	790.4427	522.2811	596.0096	652.5491	897.5713
16	703.36	631.5128	676.5863	528.4504	702.0379
17	870.5996	580.9	1103.384	619.3072	548.3923
18	662.5055	666.2458	909.8341	686.2193	597.7852
19	581.1266	705.4226	609.0476	555.5239	785.0452
20	712.9868	604.505	599.7482	614.9721	804.5476
21	742.2645	528.783	773.8787	688.4853	1386.033
22	661.9859	509.6511	669.8667	590.1543	742.0062
23	674.0863	686.1607	843.5821	666.4315	654.2242
24	917.0244	670.0444	863.9698	579.819	766.5485
25	792.96	710.9105	786.9171	639.791	742.4535
26	865.2018	673.0565	625.5316	481.6981	693.8808
27	929.716	728.1773	845.9014	468.2418	856.2375
28	631.0365	650.3147	582.47	566.8226	642.8403
29	757.6492	655.0847	701.7751	461.0259	597.7125
30	619.3973	655.3043	663.5145	563.2879	684.0369

ตารางที่ ก-7 วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) ที่ระยะ $a = 3 \text{ m}$ $f = 1 \text{ KHz}$

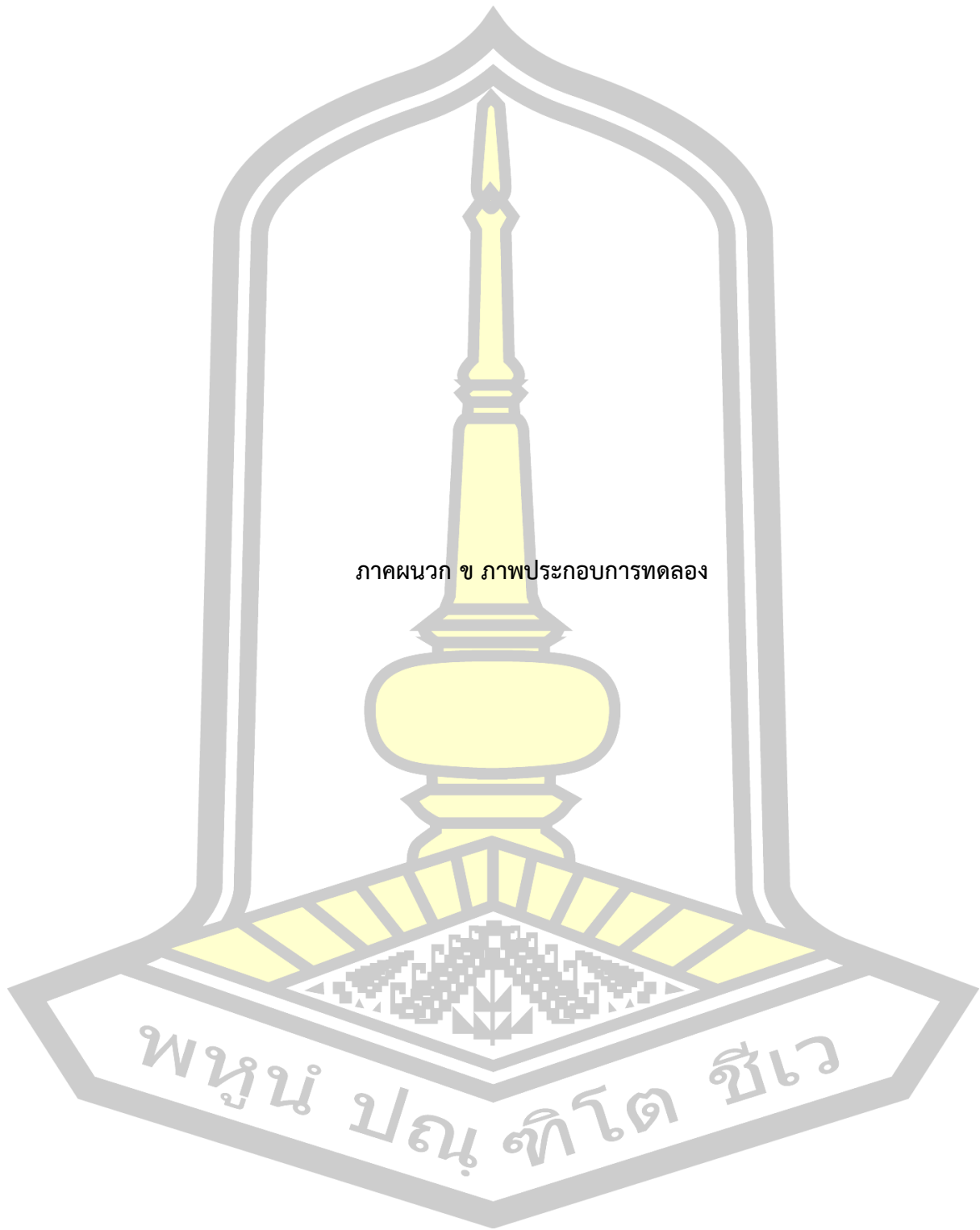
ค่าแรงดันไฟฟ้า (Δv) ที่ระยะ $a = 3 \text{ m}$ $f = 1 \text{ KHz}$					
	12V	24V	36V	48V	60V
1	5.07	5.36	5.73	5.72	5.59
2	4.99	5.42	5.57	5.48	5.62
3	5.02	5.67	5.39	5.76	5.73
4	4.73	5.33	5.61	5.54	5.77
5	4.95	5.4	5.37	5.65	5.57
6	4.82	5.51	5.65	5.41	5.61
7	4.63	5.35	5.49	5.73	5.42
8	4.91	5.37	5.61	5.38	5.39
9	4.92	5.45	5.79	5.63	5.71
10	4.73	5.72	5.95	5.48	5.69
11	4.88	5.39	5.71	5.61	5.79
12	4.61	5.58	5.67	5.42	5.37
13	4.66	5.48	5.51	5.55	5.42
14	4.81	5.77	5.59	5.72	5.54
15	4.88	5.65	5.45	5.48	5.44
16	4.95	5.38	5.79	5.51	5.42
17	4.96	5.44	5.52	5.44	5.77
18	4.71	5.6	5.72	5.71	5.61
19	4.63	5.51	5.68	5.73	5.67
20	4.9	5.76	5.71	5.93	5.51
21	4.98	5.66	5.55	5.43	5.38
22	4.71	5.47	5.44	5.51	5.53
23	4.77	5.75	5.64	5.39	5.61
24	5.02	5.41	5.73	5.71	5.68
25	4.81	5.88	5.72	5.64	5.76
26	4.93	5.61	5.49	5.53	5.48
27	4.85	5.47	5.58	5.78	5.46
28	4.84	5.79	5.61	5.41	5.36
29	4.95	5.44	5.78	5.78	5.41
30	4.65	5.33	5.41	5.48	5.77

ตารางที่ ก-8 ค่ากระแสไฟฟ้า (i) ที่ระยะ $a = 3 \text{ m}$ $f = 1 \text{ KHz}$

ค่ากระแสไฟฟ้า (i) ที่ระยะ $a = 3 \text{ m}$ $f = 1 \text{ KHz}$					
	12V	24V	36V	48V	60V
1	0.062917	0.085625	0.078125	0.071042	0.073958
2	0.066875	0.089792	0.088542	0.078125	0.089792
3	0.068333	0.078958	0.068542	0.078542	0.068958
4	0.065417	0.071042	0.078958	0.082292	0.070417
5	0.0775	0.085	0.085625	0.075208	0.082917
6	0.066458	0.088125	0.074375	0.079792	0.085625
7	0.076875	0.082083	0.0675	0.069375	0.078125
8	0.069167	0.086042	0.083542	0.070417	0.086458
9	0.066458	0.082917	0.074375	0.068958	0.078958
10	0.079375	0.069167	0.0825	0.067708	0.07125
11	0.072917	0.089167	0.0725	0.07875	0.090208
12	0.068125	0.081875	0.078958	0.080833	0.070625
13	0.077083	0.071875	0.086458	0.0825	0.0725
14	0.067917	0.086458	0.075208	0.081875	0.081875
15	0.067083	0.085208	0.074375	0.065625	0.073125
16	0.077708	0.073333	0.068333	0.068125	0.073542
17	0.06625	0.071875	0.087083	0.073125	0.06875
18	0.067083	0.069375	0.071042	0.065208	0.071667
19	0.065417	0.100625	0.074792	0.070208	0.09
20	0.073958	0.0775	0.070833	0.073542	0.07375
21	0.06625	0.066458	0.077292	0.082083	0.08
22	0.067083	0.073958	0.067083	0.070208	0.085
23	0.065833	0.07375	0.070417	0.066458	0.080833
24	0.069167	0.09	0.069167	0.076042	0.079792
25	0.08125	0.084375	0.074375	0.076042	0.085625
26	0.066875	0.089167	0.07125	0.074583	0.082292
27	0.065833	0.086042	0.072708	0.077292	0.083125
28	0.068958	0.070417	0.09	0.077917	0.086875
29	0.068125	0.082708	0.071875	0.07	0.071875
30	0.067917	0.086042	0.065833	0.065625	0.079792

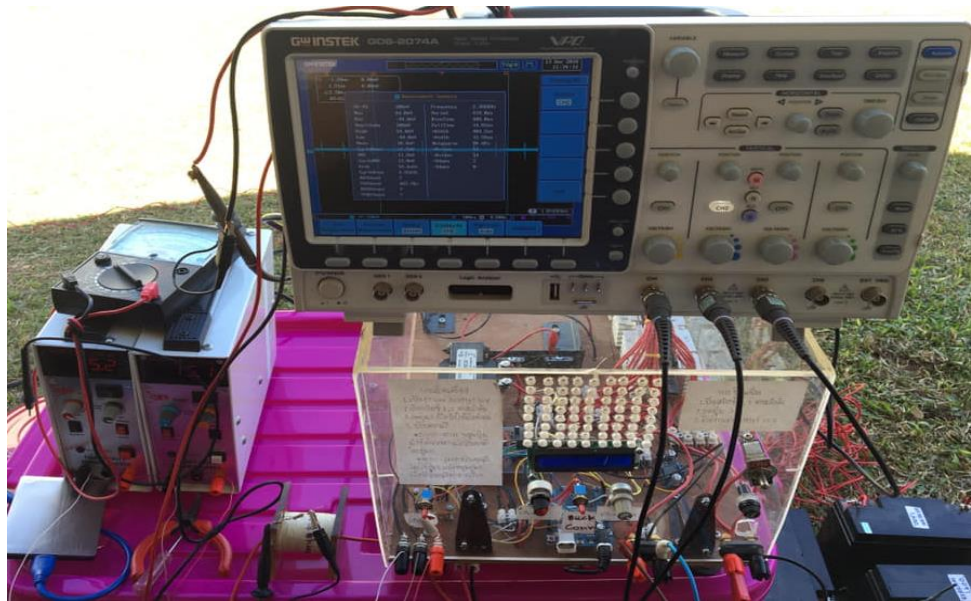
ตารางที่ ก-9 ค่าความต้านทานจำเพาะ(ρ) ที่ระยะ $a=3\text{ m}$ $f=1\text{ KHz}$

ค่าความต้านทานจำเพาะ(ρ) ที่ระยะ $a=3\text{ m}$					
	12V	24V	36V	48V	60V
1	1518.18	1179.356	1381.801	1516.924	1423.986
2	1405.781	1137.219	1185.191	1321.513	1179.183
3	1384.051	1352.901	1481.546	1381.667	1565.484
4	1362.24	1413.497	1338.584	1268.337	1543.765
5	1203.329	1196.894	1181.557	1415.348	1265.594
6	1366.402	1177.968	1431.207	1277.382	1234.364
7	1134.689	1227.947	1532.32	1556.082	1307.044
8	1337.413	1175.835	1265.146	1439.421	1174.526
9	1394.751	1238.328	1466.67	1538.164	1362.445
10	1122.686	1558.045	1358.764	1524.823	1504.556
11	1260.88	1138.852	1483.812	1342.126	1209.241
12	1274.898	1283.996	1352.901	1263.251	1432.507
13	1138.954	1436.427	1200.675	1267.418	1408.452
14	1334.288	1257.332	1400.318	1316.211	1274.792
15	1370.522	1249.244	1380.545	1573.23	1401.567
16	1200.103	1382.171	1596.345	1523.793	1388.503
17	1410.512	1425.942	1194.222	1401.567	1581.19
18	1322.779	1520.778	1516.924	1649.734	1474.778
19	1333.44	1031.636	1430.79	1537.612	1186.92
20	1248.216	1400.237	1518.726	1519.155	1407.572
21	1416.199	1604.53	1352.824	1246.309	1266.99
22	1322.779	1393.417	1527.795	1478.577	1225.708
23	1365.065	1468.881	1508.984	1527.989	1307.535
24	1367.375	1132.493	1560.769	1414.703	1341.133
25	1115.328	1312.939	1448.938	1397.36	1267.368
26	1388.878	1185.335	1451.672	1396.897	1254.601
27	1387.959	1197.731	1445.876	1408.887	1237.491
28	1322.329	1549.116	1174.36	1308.121	1162.387
29	1368.925	1239.169	1515.064	1555.646	1418.079
30	1289.904	1167.076	1548.219	1573.23	1362.383



ภาคผนวก ข ภาพประกอบการทดลอง

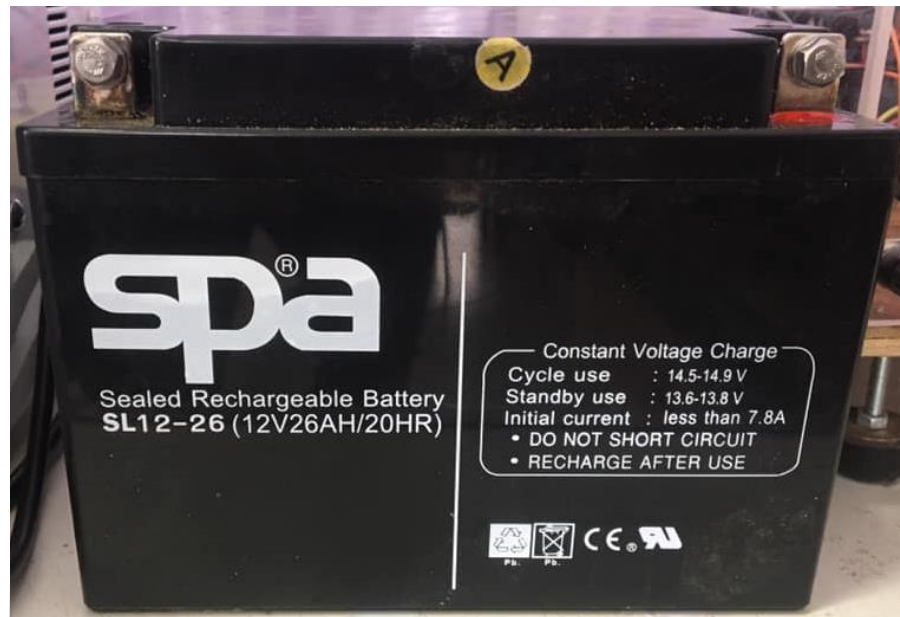
พหุมนุ ปณ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบที่ ข-1 การทดลองภาคสนาม



ภาพประกอบที่ ข-2 การทำการเก็บข้อมูล



ภาพประกอบที่ ข-3 แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลอง



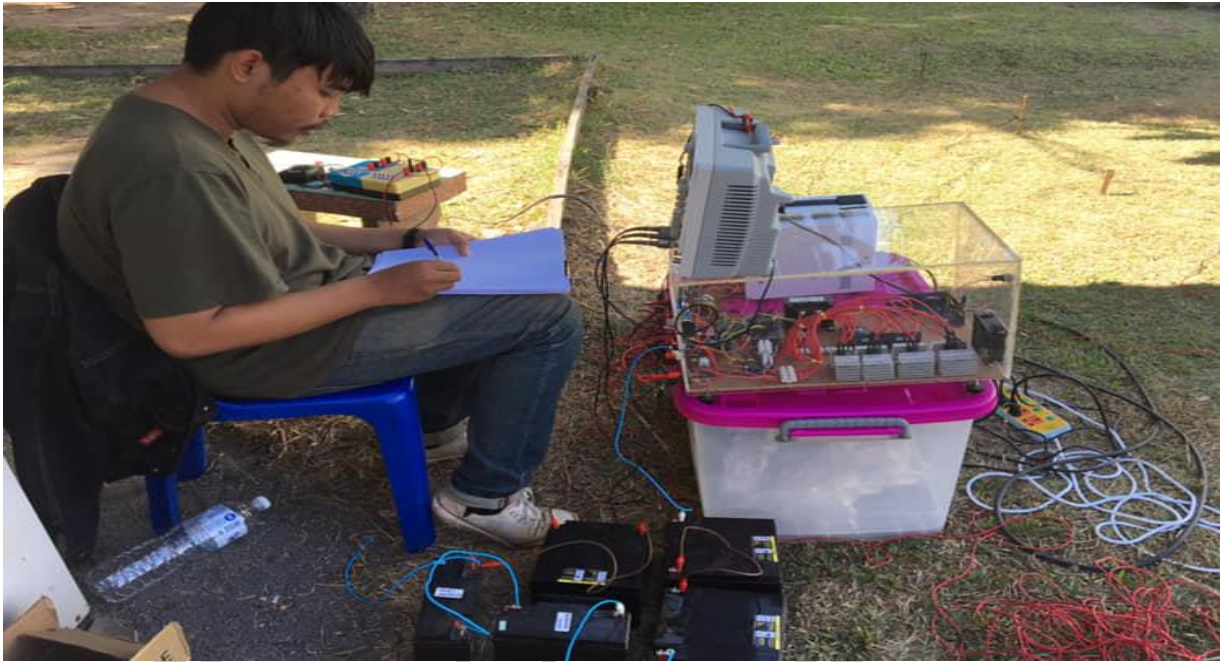
ภาพประกอบที่ ข-4 การวางขั้วไฟฟ้า



ภาพประกอบที่ ข-5 การเพิ่มแรงดันจากแบตเตอรี่ 12 โวลต์ ต่อกัน



ภาพประกอบที่ ข-6 การฝังขั้วไฟฟ้า



ภาพประกอบที่ ข-7 บันทึกผลการทดลอง



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายวีรศักดิ์ แก้วเข้ม
วันเกิด	วันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2532
สถานที่เกิด	อำเภอบ้านแท่น จังหวัดชัยภูมิ
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 26/2 หมู่ 7 ตำบลบ้านเต่า อำเภอบ้านแท่น จังหวัดชัยภูมิ รหัสไปรษณีย์ 36190
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	เจ้าหน้าที่ประสานงานห้องปฏิบัติการ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ศูนย์ความร่วมมือกับภาคอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขาม เรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัด มหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44150
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2550 มัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนหนองเรือวิทยา อำเภอนองเรือ จังหวัดขอนแก่น พ.ศ. 2558 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2562 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูนุ่ ปณุ่ ทีโตะ ชีเว