

การออกแบบและสร้างเทนซิโอมิเตอร์สำหรับเก็บค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน

ปริญญาโท
ของ
ปรีชาติ แนนเอียด

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ตุลาคม 2546
ลิขสิทธิ์เป็นของ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

๒๑. ๓๘๑๕๔๘

ป ๕๕๔ ก

ธ-๒

การออกแบบและสร้างเทนซิโอมิเตอร์สำหรับเก็บค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน

บทคัดย่อ

ของ

ปาริชาติ แนนเอียด

13 ส.ค. 2547

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ตุลาคม ๒๕๔๖

h 236750

ปาริชาติ แนบเนียนด. (2546). การออกแบบและสร้างเทนซิโอมิเตอร์สำหรับเก็บค่าศักย์วัสดุพื้น
ของน้ำในดิน. ปรินญาณิพนธ์ กศ.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรี
นครินทรวิโรฒ คณะกรรมการควบคุม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์บัญชา ศิลป์สกุลสุข, ผู้ช่วย
ศาสตราจารย์ ดร.อดุลย์ คนยัง.

เทนซิโอมิเตอร์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น สำหรับเก็บค่าศักย์วัสดุพื้น
ของน้ำในดิน มีสมบัติสามารถเก็บบันทึกข้อมูลการวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดินอย่างต่อเนื่อง นาน
ถึง 24 ชั่วโมง ซึ่งทำให้ทราบข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินตลอดวัน โปรแกรมควบคุมการ
ทำงานในการรับส่งข้อมูลที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นเอง สามารถตั้งเวลาในการเก็บบันทึกค่าศักย์
วัสดุพื้น หรือกำหนดความถี่ในการเก็บข้อมูลได้ตามการออกแบบและสามารถแสดงข้อมูลที่เก็บ
บันทึกเป็นตัวเลข LED และทางหน้าจออมิเตอร์ของคอมพิวเตอร์

ในการเปรียบเทียบผลการวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดินด้วยเทนซิโอมิเตอร์ที่ออกแบบและสร้าง
ขึ้นพร้อมติดตั้งมาโนมิเตอร์แบบปรอท เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากตัว
รับรู้ความดันของเทนซิโอมิเตอร์ กับความดันบรรยากาศที่กระเปาะพรุณของเทนซิโอมิเตอร์ที่วัดค่า
ได้จากมาโนมิเตอร์แบบปรอท (หรือค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน) เทนซิโอมิเตอร์ที่ออกแบบและ
สร้างขึ้นสามารถวัดค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดินอยู่ในช่วงความดัน 0 ถึง -0.782 บาร์ และเมื่อใช้เทน
ซิโอมิเตอร์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นโดยไม่ได้ติดตั้งมาโนมิเตอร์แบบปรอท สามารถวัดค่าศักย์วัสดุพื้น
ของน้ำในดินอยู่ในช่วงความดัน 0 ถึง -0.867 บาร์

การทดสอบการผ่านของก๊าซ(อากาศและไอน้ำ)เข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์พบว่า ผลคูณระหว่าง
ความดันไอน้ำและอากาศกับปริมาตรของก๊าซในท่อเทนซิโอมิเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นแบบแปรผันตรงกับ
เวลา โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของผลคูณความดันไอน้ำและอากาศกับปริมาตรก๊าซในท่อของ
เทนซิโอมิเตอร์ เท่ากับ 0.032 บาร์.ซม³/ชั่วโมง หรือเท่ากับ 8.805×10^{-7} จูลต่อวินาที กล่าวได้ว่า
อัตราการเปลี่ยนแปลงจำนวนโมเลกุลของก๊าซที่เข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์เพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่

การทดสอบการนำน้ำของกระเปาะพรุณ พบว่าเมื่อทำให้ดินบริเวณรอบๆกระเปาะพรุณอ้อม
ตัวด้วยน้ำ อัตราการคืนกลับของน้ำที่แทรกกลับเข้ามาในเทนซิโอมิเตอร์โดยผ่านทางกระเปาะพรุณ
มีอัตราที่ทำให้ความดันบรรยากาศที่กระเปาะพรุณเปลี่ยนแปลงจาก-0.781 บาร์ เป็น -0.063 บาร์ ใน
เวลา 30 นาที

DESIGN AND CONSTRUCTION OF TENSIOMETER TO RECORD
MATRIC POTENTIAL OF SIOL WATER

AN ABSTRACT
BY
PARICHART NABNIAD

Presented in partial fulfillment of the requirements
for the Master of Education degree in Physics
at Srinakharinwirot University
October 2003

Parichart Nabniad. (2003). *Design and Construction of Tensiometer to Record Matric Potential of Soil Water*. Master thesis, M.Ed. (Physics). Bangkok : Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Assist Prof. Buncha Silskulsuk, Assist Prof Dr. Adul Konyang.

The designed and constructed tensiometer with electronics circuit for recording soil matric potential has properties in which it can be used to record matric potential continuously for 24 hours. All day moisture variation, thus, is informed. A home developed program for controlling data transfer of the instrument can be set to a desired time duration or frequency of recording. The recorded data can be displayed on 7 segments LED or on the computer monitor.

From a calibration of soil water's matric potential measurement by using the designed and constructed tensiometer attached with a mercury manometer, to get relationship between electric potential receiving from the pressure sensor and matric potential or vacuum pressure at tensiometer porous cup measuring with the manometer, It turn out that the tensiometer can be used to measure matric potential from 0 to -0.782 bar and the measuring range extends from 0 to -0.867 bar without manometer.

A testing of gas (air and water vapor) passing into the tensiometer shows that the product of air pressure and gas volume in the tensiometer tube directly increases with time. The rate of increasing is $0.032 \text{ bars.cm}^3/\text{hr}$ or $8.805 \times 10^{-7} \text{ J/s}$. In another words, rate of increasing of number of gas molecules that get in to the tensiometer is constant.

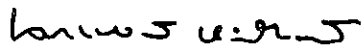
A porous cup water conducting test reveals that, with water saturated soil around the cup, the rate of water returning to tensiometer via the porous cup is such a way that the vacuum pressure at the porous cup change from -0.781 bar to -0.063 bar in 30 minutes.

ปริญญาบัตร
เรื่อง

การออกแบบและสร้างเทนนิสโอมิเตอร์สำหรับเก็บค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน

ของ
นางสาวปาริชาติ แนนเอียด

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. นภาพรณ์ หะวานนท์)

วันที่ 17 เดือนตุลาคม พ.ศ. 2546

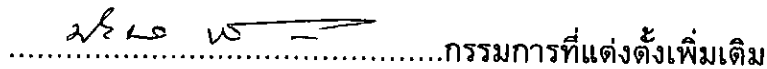
คณะกรรมการสอบปริญญาบัตร

.....ประธาน

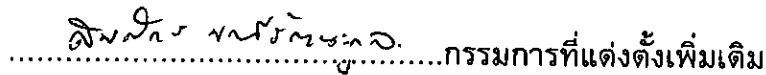
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลปสกุลสุข)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุดลย์ คนยัง)

.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(อาจารย์ นิรมล พัฒนสุวรรณ)

.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(อาจารย์ สมศักดิ์ มณีรัตน์กุล)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลป์สกุลสุข ประธานควบคุมปริญญาโท และผู้ช่วยศาสตราจารย์อดุลย์ คนยัง กรรมการควบคุมปริญญาโท ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขและช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์นิรมล พัฒนสุวรรณ และอาจารย์สมศักดิ์ มณีรัตนกุล ที่กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ทำให้ปริญญาโทฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษา ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้ความเมตตาแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณคณะครู-อาจารย์โรงเรียนสนามชัยเขตทุกท่านที่ได้ให้โอกาส และคอยช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา และทุกๆ คนในครอบครัว ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนในการศึกษาแก่ข้าพเจ้า จนสามารถทำปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ปาริชาติ แนบเนียน

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
ความสำคัญของการวิจัย.....	3
2 ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของดิน.....	4
โครงสร้างของดิน.....	4
การขังน้ำไว้ในดิน.....	5
แรงดูดซับ.....	5
แรงดึงน้ำในช่องรูเล็กหรือแรงดึงคาпилลารี.....	8
ศักย์น้ำในดิน.....	11
ศักย์วัสดุพื้น.....	11
ศักย์ออสโมติก.....	12
ศักย์โน้มถ่วง.....	13
หน่วยวัดศักย์ของน้ำในดิน.....	14
ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นกับศักย์น้ำในดิน.....	15
วิธีการวัดความชื้นในดิน.....	18
การวัดความชื้นโดยการชั่งน้ำหนัก.....	18
การวัดความชื้นจากความต้านทานไฟฟ้า.....	18
การวัดความชื้นโดยการใช้นิวตรอน.....	19
การวัดความชื้นโดยการใช้นิวตรอน.....	20
การวัดความชื้นโดยการใช้นิวตรอนที่ใช้นิวตรอนที่ใช้นิวตรอน.....	20
การวัดความดันสุญญากาศ.....	22
ทฤษฎีทางอิเล็กทรอนิกส์.....	23
เครื่องขยายสัญญาณกระทำการ.....	23
วงจรบริดจ์.....	25
วงจรบริดจ์ที่อยู่ในภาวะสมดุล.....	25

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
2(ต่อ) วงจรบริดจ์ในภาวะไม่สมดุล.....	27
สเทรนเกจ.....	27
เครื่องรับรู้ความดัน.....	29
เครื่องขยายสัญญาณสำหรับเครื่องมือ.....	30
วงจรควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ชนิดซีเนอร์ไดโอด.....	33
ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบแอนะล็อก.....	34
ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบดิจิทัล.....	34
ระบบเลขฐานสิบ.....	35
ระบบเลขฐานสอง.....	35
ปฏิบัติการตรรกะ.....	36
กระบวนการตรรกะ AND.....	36
กระบวนการตรรกะ OR.....	36
กระบวนการตรรกะ NOT (Invert).....	37
รากฐานสำคัญของเกท.....	38
แลตซ์และฟลิปฟลอป.....	39
แลตซ์.....	39
เอสอาร์ แลตซ์.....	39
ดีเลย์ แลตซ์.....	40
ฟลิปฟลอป.....	40
อาร์เอส ฟลิปฟลอป.....	41
ดี ฟลิปฟลอป.....	42
เจเค ฟลิปฟลอป.....	42
หน่วยความจำเก็บรักษาข้อมูล.....	43
การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล.....	43
วงจรรนับ.....	46
วงจรรนับแบบซินโครนัส.....	46
วงจรรนับแบบอะซินโครนัส.....	47

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3	วิธีดำเนินการวิจัย..... 48
	การออกแบบเทนซิโอมิเตอร์วัดค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน..... 48
	ขั้นตอนการออกแบบและสร้างเทนซิโอมิเตอร์..... 48
	ขั้นตอนการออกแบบวงจรระบบวัดและแสดงผลการวัดศักย์วัสดุพื้น ของน้ำในดิน..... 53
	วงจรแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง..... 54
	วงจรขยายสัญญาณสำหรับเครื่องมือ..... 54
	วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล..... 56
	หน่วยความจำ..... 57
	วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาสำหรับตั้งเวลา..... 58
	ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมเพื่อทำการเก็บค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน..... 62
	การทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล..... 64
	ตอนที่ 1 การเปรียบเทียบเทนซิโอมิเตอร์เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลข ระดับศักย์ไฟฟ้าจากหัววัดความดันสุญญากาศที่กระเปาะพรุน..... 64
	ตอนที่ 2 การศึกษาการผ่านของก๊าซ(อากาศและไอน้ำ) เข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์..... 68
	ตอนที่ 3 การทดสอบการนำน้ำของกระเปาะพรุน..... 70
	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย..... 71
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... 72
	ผลการทดสอบการเปรียบเทียบเทนซิโอมิเตอร์เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขระดับ ศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับรู้ความดันกับความดันสุญญากาศของกระเปาะที่เกิดขึ้น..... 72
	การศึกษาการผ่านของก๊าซ(อากาศและไอน้ำ) เข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์..... 75
	ผลการทดสอบการนำน้ำของกระเปาะพรุน..... 77
5	สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 84
	สรุปผลการวิจัย..... 84
	อภิปรายผลการวิจัย..... 85
	ข้อเสนอแนะ..... 86

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
บรรณานุกรม	87
ภาคผนวก	90
ภาคผนวก ก. โปรแกรมควบคุมการทำงานของ ตัวควบคุม เบสิคแสดมบี 2SX ในการควบคุมการเก็บข้อมูลศักย์วัสดุพื้นและการแสดงผลของวงจรร อิเล็กทรอนิกส์.....	91
ภาคผนวก ข. การคำนวณหาสมการเชิงเส้นด้วยวิธีการวิเคราะห์ ความถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย.....	101
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	108

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงหน่วยที่ใช้บอกค่าของศักย์น้ำในดิน.....	14
2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความดันบรรยากาศ.....	22
3 ตารางความจริงของสแทททิกแรม.....	58
4 แสดงข้อมูลการทดสอบเทนซิโอมิเตอร์ที่ออกแบบสร้างขึ้นมาพร้อมกับมาโนมิเตอร์แบบปรอท.....	72
5 แสดงผลการทดสอบการผ่านของก๊าซ(อากาศและไอน้ำ)เข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์.....	75
6 แสดงผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำออกจากเทนซิโอมิเตอร์ก่อนเทน้ำลงไป ในดิน.....	77
7 แสดงผลการทดสอบอัตราการคืนกลับของน้ำที่แทรกกลับเข้ามาในเทนซิโอมิเตอร์หลัง เทน้ำลงไปที่ดิน.....	79
8 แสดงข้อมูลการปรับเทียบเทนซิโอมิเตอร์ที่สร้างขึ้นมาพร้อมกับมาโนมิเตอร์แบบ ปรอท.....	105

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 โครงสร้างของดินเหนียวและดินทราย.....	4
2 การเรียงตัวของอนุภาคดิน.....	5
3 การจับตัวของไฮโดรเจน 2 อะตอมกับออกซิเจน 1 อะตอมของโมเลกุลน้ำ.....	6
4 แรงต่างๆที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจน.....	6
5 สภาพไม่สมดุลของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่กระทำต่อโมเลกุลตรงผิวน้ำ.....	7
6 การเปรียบเทียบน้ำในหลอดรูเล็กกับน้ำในช่องว่างในดิน.....	8
7 มวลน้ำถูกดึงขึ้นไปข้างในหลอดรูเล็กด้วยแรงดึงน้ำในช่องขนาดเล็ก.....	9
8 กระบวนการซึมซับโมเลกุลของน้ำผ่านเยื่อกึ่งซึม(Semipermeable Membrane) ไปยังสารละลายของน้ำตาล.....	12
9 เส้นโค้งลักษณะความชื้น.....	16
10 เส้นโค้งการปล่อยความชื้นของดินที่มีลักษณะเนื้อดินแตกต่างกัน.....	17
11 ลักษณะของเทนซิโอมิเตอร์ใช้วัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน.....	19
12 ลักษณะของเทนซิโอมิเตอร์ที่ใช้มาโนมิเตอร์ปรอท.....	21
13 วงจรสมมูลของออปแอมป์.....	23
14 สัญลักษณ์ของออปแอมป์.....	24
15 วิทสโตนบริดจ์ (Wheatstone-bridge).....	25
16 ลักษณะการวางตัวของสเตรนเกจ แบบต่างๆ.....	27
17 วงจรบริดจ์แบบที่มีแขนหนึ่งของบริดจ์เป็นสเตรนเกจ.....	28
18 วงจรบริดจ์แบบสเตรนเกจที่อยู่ภายในเครื่องรับรู้ความดัน.....	30
19 วงจรขยายสัญญาณเครื่องมือ.....	31
20 วงจรควบคุมความต่างศักย์ให้คงที่ ชนิดซีเนอร์ไดโอด.....	33
21 ลักษณะของสัญญาณดิจิทัล.....	34
22 ตารางความจริงของฟังก์ชันตรรกะพื้นฐาน AND,OR และ INVERT.....	37
23 เกทแบบต่างๆ.....	38
24 ลักษณะของ อาร์เอส แลตช์ และตารางความจริง.....	39
25 ลักษณะของดีเลย์ แลชต์ และตารางความจริง.....	40
26 ลักษณะของสัญญาณนาฬิกาที่มีการกระตุ้นด้วยขอบขาขึ้นและการ กระตุ้นด้วยขอบขาลง.....	41
27 วงจร RS Flip-flop.....	41

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
28 ลักษณะของดีฟลิปฟลอปที่มีการกระตุ้นแบบกระตุ้นขอบขาขึ้นและ กระตุ้นด้วยขอบขาลง.....	42
29 ลักษณะของเคเฟฟลิปฟลอปและตารางความจริง.....	42
30 วงจรอปแอมป์เปรียบเทียบความต่างศักย์.....	44
31 ลักษณะวงจรการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบการ ประมาณอย่างเป็นลำดับ.....	45
32 วงจรนับเลขฐานสองแบบซินโครนัส โดยใช้เจเคฟลิปฟลอป.....	46
33 วงจรนับเลขฐานสองแบบอะซินโครนัส.....	47
34 ลักษณะของเทนซิโอมิเตอร์ที่ผู้วิจัยออกแบบ	49
35 รูปร่างลักษณะของกระเปาะพรุน	50
36 ลักษณะการตัดกระดาษแข็งจำนวน 2 แผ่น.....	50
37 ลักษณะการจัดกล่องสำหรับทำเป็นแบบพลาสติก.....	51
38 ลักษณะการเทหน้าดินขาวลงในแบบพลาสติก.....	52
39 แผนภาพการทำงานของเทนซิโอมิเตอร์ ที่ผู้วิจัยออกแบบขึ้น.....	53
40 วงจรแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	54
41 วงจรขยายสัญญาณสำหรับเครื่องมือ.....	55
42 ลักษณะของไอซีหมายเลข ADC08040LCN	56
43 ลักษณะของสแทททิกแรม หมายเลข CDM6264 แบบ CMOS 8 Bit.....	57
44 ลักษณะโครงสร้างภายในและการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา สำหรับการตั้งเวลา	59
45 วงจรของระบบวัดและแสดงผลการวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน.....	61
46 ลักษณะการติดตั้งเทนซิโอมิเตอร์ในการปรับเทียบค่ากับมาโนมิเตอร์	66
47 การติดตั้งเทนซิโอมิเตอร์ที่ผู้วิจัยออกแบบสร้างขึ้นมาพร้อมกับมาโนมิเตอร์แบบ ปรอท.....	67
48 การติดตั้งเทนซิโอมิเตอร์สำหรับการทดลองตอนที่ 2.....	69
49 การติดตั้งเทนซิโอมิเตอร์ที่ผู้วิจัยออกแบบสร้างขึ้นสำหรับการทดลองตอนที่ 2 โดยฝังเทนซิโอมิเตอร์ไว้ในภาชนะใส่ดินที่อัดแน่น.....	70

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
50 การเทน้ำลงไปในดินจนน้ำเสมอกับระดับผิวดินของเทนซิโอมิเตอร์.....	71
51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับรู้ความดัน กับความดันสูญญากาศของกระเปาะพรุน.....	74
52 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของผลคูณระหว่างความดันไอน้ำและอากาศกับปริมาตร ของก๊าซที่เวลาต่างๆ.....	76
53 กราฟแสดงการซึมน้ำออกจากกระเปาะพรุนก่อนเทน้ำลงไปในดิน.....	79
54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์กับ เวลา.....	82
55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำและอากาศกับเวลา.....	83
56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X กับ ตัวแปร Y.....	102

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ทรัพยากรดินถือว่าเป็นแหล่งผลิตปัจจัยต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยธรรมชาติในดินจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบและเป็นปัจจัยหนึ่งของการเจริญเติบโตของพืช ในเนื้อเยื่อและอวัยวะต่าง ๆ ของพืชตั้งแต่ราก ลำต้น กิ่ง ก้าน ใบ ดอก และผล มีน้ำเป็นองค์ประกอบทั้งสิ้น พืชได้รับน้ำจากชั้นดินผ่านทางรากในอัตราเท่ากับอัตราการคายน้ำ ความเร็วการไหลของน้ำผ่านดินขึ้นกับแรงขับ (Driving Force) และสภาพนำน้ำ (Hydraulic Conductivity) ของดิน ดินที่ชื้นจะมีน้ำผ่านเข้าสู่รากพืชได้เร็วกว่าดินที่แห้ง พืชแต่ละชนิดมีความต้องการน้ำในดินแตกต่างกัน น้ำที่พืชส่วนใหญ่สามารถดูดนำไปหล่อเลี้ยงต้นพืชเป็นน้ำที่มีศักย์น้ำอยู่ระหว่าง -0.1 ถึง -0.3 บาร์¹ จึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือวัดความชื้นในดินสำหรับบอกสภาพความชื้นของดินแต่ละบริเวณเพื่อที่จะนำพืชมาปลูกให้เหมาะสมกับสภาพดินนั้นๆ นอกจากนี้ยังช่วยให้ทราบปริมาณความชื้น ความต้องการน้ำในดิน และช่วยในการวิจัยคุณสมบัติของดิน เครื่องมือวัดความชื้นในดินมีหลายแบบ มีทั้งแบบวัดความชื้นโดยตรงซึ่งใช้การวัดโดยน้ำหนัก (Gravimetric Method) ทำโดยการนำตัวอย่างดินที่มีความชื้นมาชั่งมวลเทียบกับตัวอย่างดินนั้นที่ผ่านการอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 – 110 องศาเซลเซียส ประมาณ 24 ชั่วโมง ผลที่ได้ให้นำมาคำนวณหาระดับความชื้นโดยมวล (Mass Water Content) การวัดความชื้นโดยวิธีนี้ จะใช้เวลานาน นอกจากนี้ยังมีเครื่องมือวัดความชื้นในดินโดยทางอ้อมซึ่งสัมพันธ์กับความชื้นในดิน ได้แก่ การวัดความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistance) ระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ฝังไว้ในวัสดุพรุน การวัดจำนวนนิวตรอนความเร็วต่ำ (Slow Neutron) โดยใช้เครื่องมือวัดความชื้นด้วยนิวตรอน (Neutron Moisture Gauge) และการใช้เทนซิโอมิเตอร์ (Tensiometer) วัดความชื้นในดิน²

¹ Brady, N.C. (1974). *The Nature and Properties of Soils Tenth Edition*. P.142

² อดิชากรย์ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2541). *ปฐพีวิทยาเบื้องต้น*. พิมพ์ครั้งที่ 8. หน้า 116.

ดินซึ่งไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ น้ำในดินจะอยู่ภายใต้แรงดึงดูดพื้น แรงดึงดูดพื้นเป็นแรงที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้ำกับอนุภาคดินที่เสมือนกับเป็นผนังภาชนะในช่องแคบขนาดเล็ก แรงดึงดูดพื้นจะทำให้อิสระในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำลดลง สภาพเช่นนี้ทำให้เกิดศักย์น้ำเรียกว่า ศักย์วัสดุพื้น (Matric Potential) สำหรับในดินที่มีความชื้นแตกต่างกันบริเวณที่มีความชื้นสูงย่อมมีโมเลกุลของน้ำแทรกตัวอยู่ในดินสูงกว่าบริเวณที่มีความชื้นต่ำกว่า ดินที่มีความชื้นสูงจะมีศักย์วัสดุพื้นสูง(เป็นลบน้อย) นั่นคือศักย์วัสดุพื้นจะแปรผันตรงกับความชื้นในดิน เทนซิโอมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดินประกอบด้วยกระเปาะพรุณซึ่งต่อกับท่อที่มีฝาปิดสนิทและมาตรวัดความดัน เมื่อกระเปาะพรุณสัมผัสกับดินผลของศักย์น้ำในดิน (ซึ่งศักย์น้ำในดินต่ำกว่าศักย์น้ำของกระเปาะพรุณที่อิ่มตัว) จะทำให้น้ำในท่อไหลผ่านกระเปาะพรุณออกไปยังดินทำให้ระดับน้ำในท่อลดลงเกิดเป็นช่องอากาศที่มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ สามารถอ่านค่าความดันจากการเปลี่ยนตำแหน่งของระดับปรอทในหลอดแก้ว หรืออ่านค่าความดันด้วยมาตรวัดความดันเกจ (Pressure Gauge) อยู่ในช่วงประมาณ 0 ถึง -0.8 บาร์¹

ปัจจุบันเทนซิโอมิเตอร์ได้รับการออกแบบให้มาตรวัดความดันเกจทำงานร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเปิดปิดวงจรน้ำเพื่อควบคุมปริมาณน้ำในดิน แนวคิดในการประดิษฐ์เทนซิโอมิเตอร์ครั้งนี้เพื่อให้สามารถอ่านค่าตัวเลขซึ่งสัมพันธ์กับความดันสุญญากาศและเก็บบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการวิจัย ที่เกี่ยวกับความต้องการปริมาณน้ำในดินหรือการนำของน้ำในดิน รวมไปถึงการนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ในระดับมัธยมศึกษา อุดมศึกษา ตลอดจนใช้กับงานวิเคราะห์และการวิจัยทางปฐพีที่ต้องการเก็บบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินอย่างต่อเนื่องได้

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

เพื่อให้ได้เทนซิโอมิเตอร์สำหรับวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน ซึ่งมีช่วงการวัดความดันเกจระหว่าง 0 ถึง -0.8 บาร์ โดยแสดงผลการวัดเป็นตัวเลขและเก็บข้อมูลไว้ในหน่วยความจำ

¹Brady,N.C.& Weil,R.R. (2000). *Element of The Nature and Properties of Soils*.p.143.

ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างเทนซิโอมิเตอร์ที่อ่านค่าเป็นตัวเลขและสามารถเก็บค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดินที่เวลาต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง
2. เทนซิโอมิเตอร์มีช่วงการวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดินระหว่าง 0 ถึง -0.8 บาร์

ความสำคัญของการวิจัย

ปัจจุบันได้มีการออกแบบเทนซิโอมิเตอร์ให้มาตรวัดความดันเกจทำงานร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเปิดปิดวาล์วน้ำเพื่อควบคุมปริมาณน้ำในดิน สำหรับเทนซิโอมิเตอร์ที่ผู้วิจัยออกแบบได้มีการนำอิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ใช้กับเทนซิโอมิเตอร์ทำให้เทนซิโอมิเตอร์สามารถอ่านค่าตัวเลขซึ่งสัมพันธ์กับความดันสุญญากาศ สามารถเก็บค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดินที่เวลาต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง ตลอด 24 ชั่วโมง สามารถกำหนดช่วงเวลาในการจัดเก็บข้อมูล และกำหนดจำนวนข้อมูลที่ต้องการเก็บได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาความต้องการปริมาณน้ำในดินหรือการนำน้ำในดิน รวมไปถึงการนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ทั้งในระดับมัธยมศึกษาและระดับอุดมศึกษา สามารถใช้งานด้านการวิเคราะห์วิเคราะห์และการวิจัยทางปฐพีที่ต้องการเก็บบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินอย่างต่อเนื่อง

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

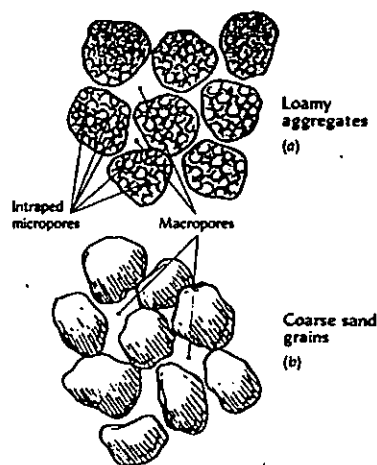
ในการทำวิจัยเกี่ยวกับการวัดศักยภาพของน้ำในดินมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 2 ส่วนดังนี้คือ

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของดิน
2. ทฤษฎีทางอิเล็กทรอนิกส์

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของดิน

1.1 โครงสร้างของดิน

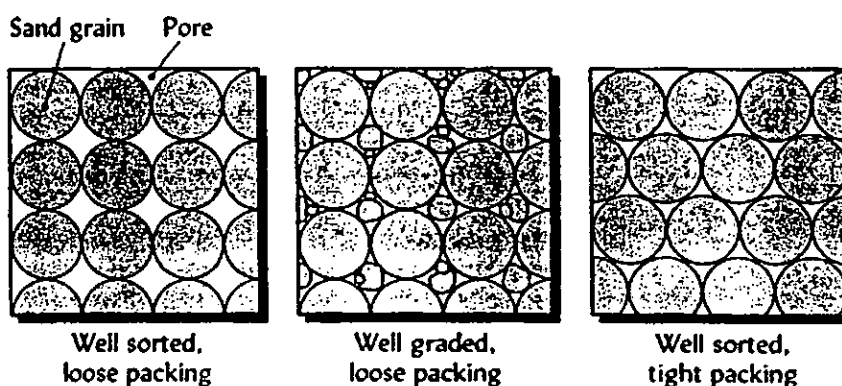
โครงสร้างของดิน (Structure of Soils) เป็นการศึกษาการจัดเรียงตัวของอนุภาคพื้นฐานที่รวมตัวกันเป็นกลุ่ม เรียกว่า แอกริกเกต (Aggregate) เมื่อเปรียบเทียบขนาดของแอกริกเกต ในดินเหนียวและดินทราย พบว่าลักษณะของดินเหนียวมีรูพรุนเล็กๆอยู่ภายในแต่ดินทรายจะไม่มีรูพรุนภายในส่งผลให้ดินทรายมีความหนาแน่นมากกว่าดินเหนียว ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างของดินเหนียวและดินทราย

ที่มา: Brady, N.C (1999). *Elements of The Nature and Properties of Soils*. p.109.

โครงสร้างของดินเกิดจากการอัดตัวของแอกกริเกตขนาดต่าง ๆ เมื่อแอกกริเกตเรียงตัวกันย่อมมีช่องเกิดขึ้น เรียกว่า “ช่องในดินหรือความพรุนของดิน” (Soil Pore) ช่องในดินมีขนาดใหญ่หรือเล็กแตกต่างกันตามขนาดของ แอกกริเกต และการอัดตัวของดินทำให้โครงสร้างของดินแต่ละแบบมีลักษณะหยาบ ละเอียดแตกต่างกัน ดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 การเรียงตัวของอนุภาคของดิน

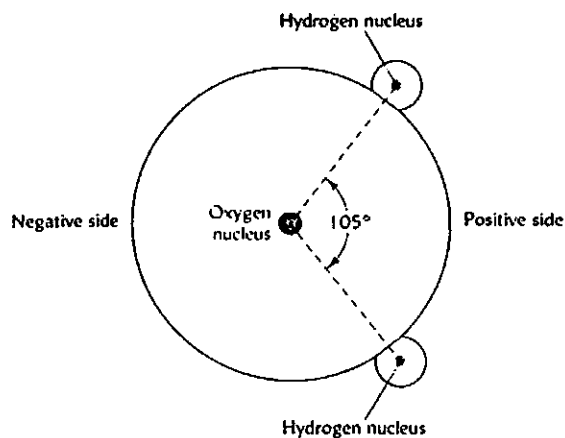
ที่มา: Brady, N.C. (1999). *Elements of The Nature and Properties of Soils*. p.109.

1.2 การขังน้ำไว้ในดิน

ดินขังน้ำเอาไว้ในดินได้เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้ำกับอนุภาคดิน แรงดึงดูดที่กระทำต่อโมเลกุลของน้ำมีดังนี้

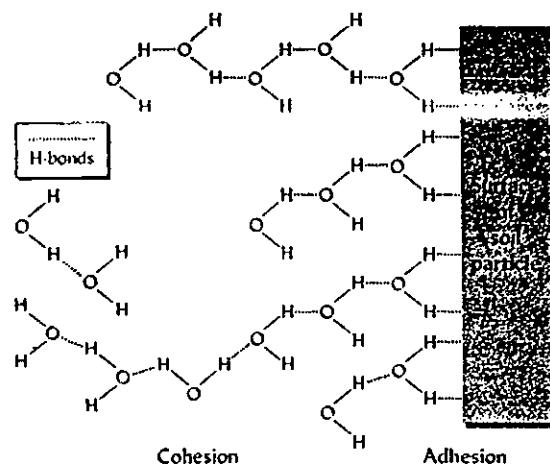
1.2.1 แรงดูดซับ (Adsorption Force) คือ แรงดึงดูดที่ผิวของอนุภาคดินกระทำต่อโมเลกุลน้ำ การที่โมเลกุลของน้ำสามารถเกาะติดกับอนุภาคของดินได้นั้นจะพิจารณาได้จากสมบัติของโมเลกุลน้ำซึ่งเป็นแบบขั้วตรงข้าม (Polarity) คือ โมเลกุลของน้ำประกอบด้วย อะตอมไฮโดรเจน 2 อะตอม มีประจุเป็นบวก และอะตอมออกซิเจน 1 อะตอม มีประจุเป็นลบ เกาะตัวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) $H - O - H$ ทำมุมประมาณ 105 องศา โดยอิเล็กตรอนในพันธะจะอยู่ก่อนไปทางด้านออกซิเจนทำให้เห็นว่า ไฮโดรเจน 2 อะตอม อยู่ตรงข้ามกับออกซิเจน ดังภาพประกอบ 3 การที่อะตอมของไฮโดรเจนอยู่ตรงข้ามกับอะตอมออกซิเจนจะทำให้เกิดขั้วไฟฟ้าบวกและขั้วไฟฟ้าลบคนละด้าน เรียกโมเลกุลแบบนี้ว่า โมเลกุลแบบโพลาร์

โมเลกุลแบบโพลาร์ของน้ำทำให้ด้านลบของโมเลกุลน้ำออกแรงดึงดูดอะตอมไฮโดรเจนของโมเลกุลน้ำอีกโมเลกุลหนึ่งต่อกันเป็นทอดๆ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดพันธะที่เกี่ยวเนื่องกับไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) ซึ่งแสดงให้เห็นเป็นเส้นประ ดังภาพประกอบ 4 พันธะที่เกี่ยวเนื่องกับไฮโดรเจนจะส่งผลทำให้เกิดแรงสองแรงที่มีผลต่อการกักเก็บน้ำในดินและการเคลื่อนที่ของน้ำในดินนั้นคือ แรงที่ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำดึงดูดกันเอง เรียกว่า ความเชื่อมแน่น (Cohesion) และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำกับผิวอนุภาค เรียกว่า การยึดติด (Adhesion) หรือบางครั้งเรียกว่า การดูดซับ (Adsorption) ผลของกระบวนการดึงดูดโมเลกุลน้ำด้วยกันเองทำให้เกิดความตึงผิว (Surface Tension)



ภาพประกอบ 3 การจับตัวของไฮโดรเจน 2 อะตอมกับออกซิเจน 1 อะตอมของโมเลกุลน้ำ

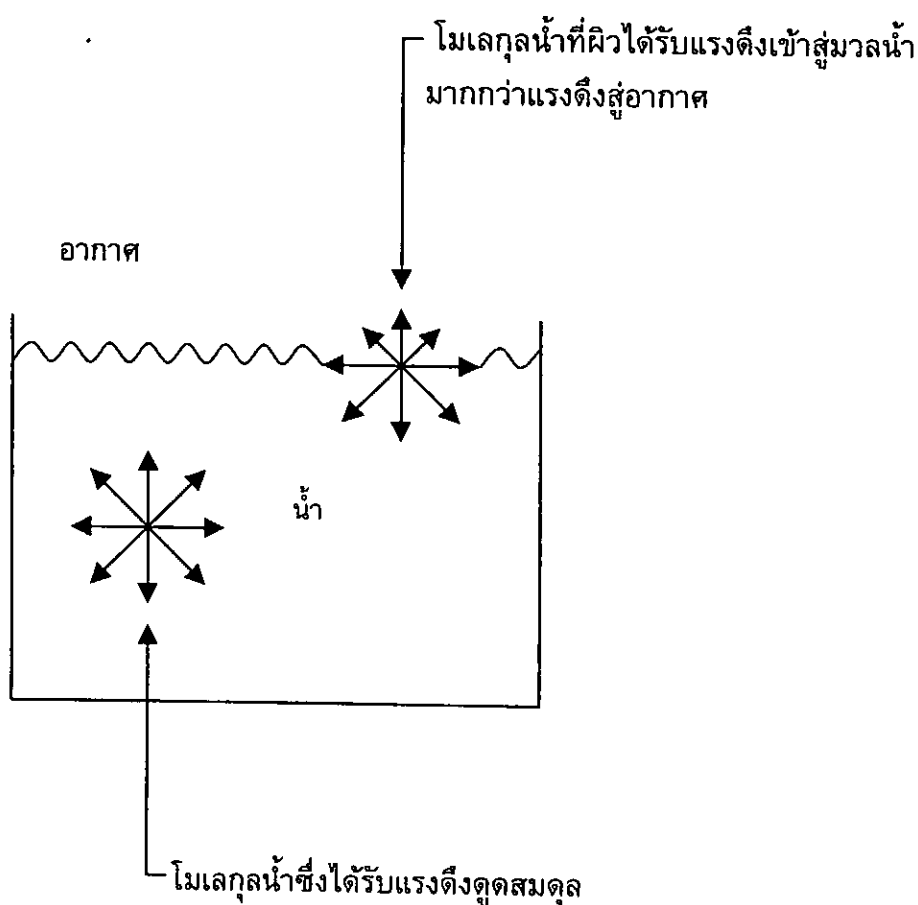
ที่มา: Brady, N.C. (1974). *The Nature and Properties of Soils Tenth Edition*. p 124.



ภาพประกอบ 4 แรงต่างๆที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจน

ที่มา: Brady, N.C & Weil, R.R.(2000). *Element of the Nature and Properties of Soils*. p.133.

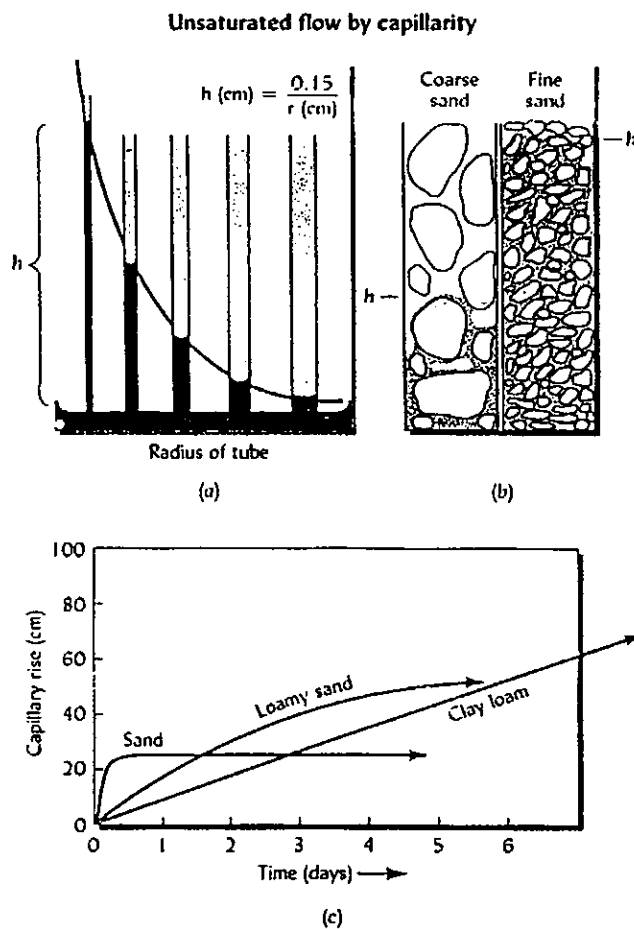
ความตึงผิว เป็นปรากฏการณ์ที่ผิวน้ำมีลักษณะคล้ายเยื่อที่ขึงตึงซึ่งเป็นผลเนื่องจากแรงดึงดูดของโมเลกุลน้ำ โมเลกุลน้ำที่อยู่ตรงผิวน้ำจะมีแรงดึงดูดมากกระทำรอบทุกทิศทาง ด้านข้างและด้านล่างจะเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้ำด้วยกันเอง ส่วนด้านบนจะเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้ำกับโมเลกุลอากาศ แรงลัพธ์มีทิศพุ่งเข้าสู่มวลน้ำส่งผลทำให้เกิดแรงตึงเข้าหากันที่ผิว ดังภาพประกอบ 5 ซึ่งแรงตึงผิวนี้มีความสำคัญต่อการดูดยืมน้ำในช่องเล็ก ๆ ของดินด้วย



ภาพประกอบ 5 สภาพไม่สมดุลของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่กระทำต่อโมเลกุลตรงผิวน้ำ

1.2.2 แรงดึงน้ำในช่องรูเล็กหรือแรงดึงคาปิลลารี

อนุภาคดินที่อัดตัวกันจะมีช่องว่างระหว่างอนุภาค เรียกว่า ช่องในดิน ช่องในดินมีทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็ก เกิดขึ้นตามการกระจายขนาดของอนุภาคและการบีบอัดตัวของดิน ช่องว่างในดินเป็นทางผ่านของน้ำและอากาศ น้ำที่ขังตัวอยู่ในช่องรูเล็กของดินเปรียบได้กับน้ำที่ขังอยู่ในหลอดรูเล็ก (Capillary Tube) น้ำจะถูกดึงขึ้นไปในหลอดด้วยแรงยึดติดกับผนังหลอด และแรงตึงผิว ระดับความสูงของน้ำในหลอดจะขึ้นอยู่กับขนาดของหลอด ดังภาพประกอบ 6 a ระดับของน้ำที่ขังตัวในช่องดินจะอยู่ภายใต้แรงดึงของน้ำในช่องรูเล็กของดินและลักษณะของเนื้อดินชนิดต่างๆ ดังภาพประกอบ 6 รูป b และ c



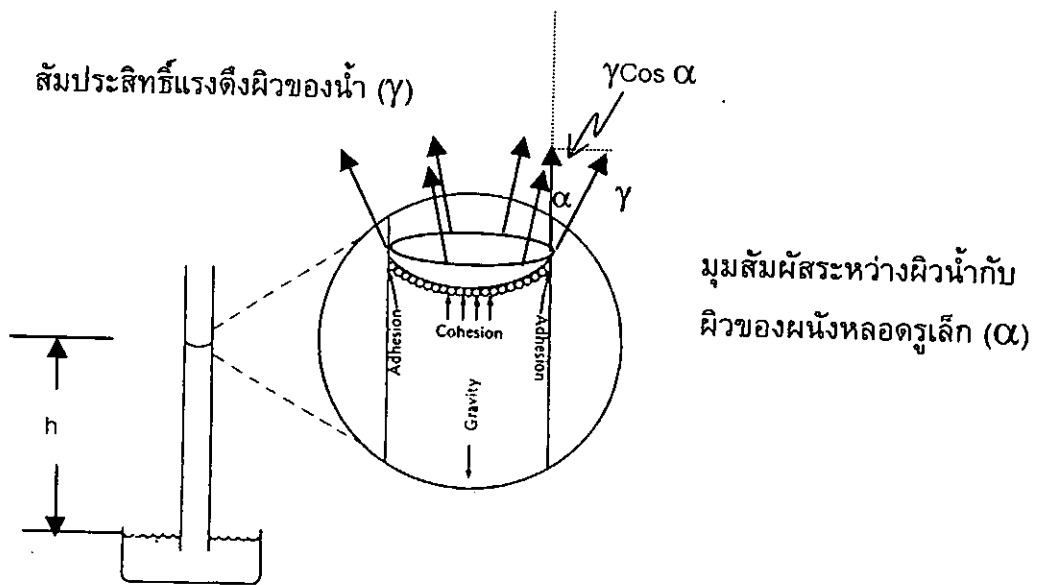
ภาพประกอบ 6 การเปรียบเทียบน้ำในหลอดรูเล็กกับน้ำในช่องว่างในดิน

ที่มา: Brady, N.C. & Weil, R.R. (2000). *Element of the Nature and Properties of Soils*. p.135.

การขังน้ำในหลอดรูเล็กเกิดจากมวลน้ำถูกดึงขึ้นไปขังในหลอดด้วยสมบัติความตึงผิวของน้ำ ร่วมกับแรงดึงดูดของโมเลกุลน้ำในการยึดติด (Adhesion) กับผนังของหลอดรูเล็ก ภาพประกอบ 7 การคำนวณปริมาณมวลน้ำที่ถูกดึงขึ้นไปในหลอดพิจารณาสมดุลของแรงที่ดึงน้ำในทิศขึ้น (ซึ่งในกรณีนี้ คือ แรงองค์ประกอบในแนวตั้งของแรงตึงผิว) กับแรงโน้มถ่วงที่กระทำต่อมวลน้ำ ถ้าให้สัมประสิทธิ์แรงตึงผิวของน้ำเป็นแรงตึงผิวที่กระทำต่อหน่วยความยาว ใช้สัญลักษณ์ (γ) ดังนั้นภายในหลอดรูเล็กที่มีรัศมีภายใน r มวลน้ำจะถูกดึงขึ้นไปด้วยแรงตึงผิวเท่ากับ $2\pi r\gamma$ และเนื่องจากมวลน้ำที่ถูกดึงขึ้นไปในหลอดมีมุมสัมผัส (Contact Angle) ระหว่างผิวน้ำกับผนังของหลอดรูเล็กเท่ากับ มุม α จะได้องค์ประกอบในแนวตั้งของแรงตึงผิวที่ดึงมวลน้ำขึ้นไปในหลอดรูเล็กเท่ากับ $2\pi r\gamma \cos\alpha$ และน้ำหนักของน้ำในท่อมมีค่าเท่ากับ $\pi r^2 h \rho g$ เมื่อ h คือ ความสูงของระดับน้ำที่ขังในหลอดรูเล็ก

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก



ภาพประกอบ 7 มวลน้ำถูกดึงขึ้นไปขังในหลอดรูเล็กด้วยแรงตึงน้ำในช่องขนาดเล็ก

ที่มา: Brady, N.C. (1974). *The Nature and Properties of Soils Tenth Edition*. p.126.

ด้วยเงื่อนไขสมดุล แรงที่ดึงมวลน้ำขึ้นไปข้างในหลอดจะเท่ากับน้ำหนักของน้ำในหลอด จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$2\pi r\gamma \cos\alpha = \pi r^2 h \rho g \quad (1)$$

จัดรูปใหม่ จะได้ความสูงของน้ำที่ข้างในหลอดเป็น

$$h = \frac{2r\pi\gamma \cos\alpha}{\pi r^2 g\rho} = \frac{2\gamma \cos\alpha}{r g\rho} \quad (2)$$

จากสมการ (2) ความสูงของน้ำในหลอดรูเล็ก (h) จะแปรผกผันกับรัศมี (r) ของหลอดรูเล็ก

1.3 ศักย์น้ำในดิน

ศักย์น้ำมีนิยามว่าเป็นปริมาณงานที่ใช้ในการเคลื่อนน้ำหนึ่งหน่วยจากแหล่งน้ำที่เป็นสถานะอ้างอิงมายังตำแหน่งที่พิจารณา โดยกระบวนการผันกลับและมีอุณหภูมิคงที่

ศักย์น้ำเป็นปริมาณเชิงเปรียบเทียบอาจจำแนกได้เป็นแบบต่างๆหลายรูปแบบ ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาศักย์น้ำ 3 ชนิด คือ ศักย์วัสดุพื้น (Matric Potential : ψ_m), ศักย์ออสโมติก (Osmotic Potential : ψ_o) และ ศักย์โน้มถ่วง (Gravitational Potential : ψ_g), เขียนผลรวมของศักย์น้ำในดินได้เป็น

$$\psi = \psi_m + \psi_o + \psi_g \quad (3)$$

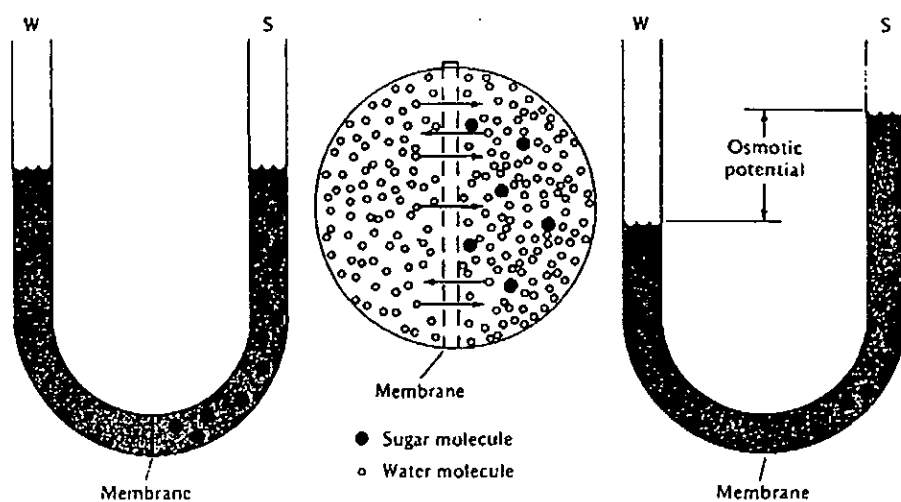
ปริมาณศักย์น้ำนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นอิสระในการเคลื่อนที่ของน้ำ โดยน้ำจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีศักย์น้ำสูงไปยังบริเวณที่มีศักย์น้ำต่ำกว่า

1.3.1 ศักย์วัสดุพื้น

น้ำที่ขังตัวอยู่ในช่องว่างในดินจะอยู่ภายใต้แรงดึงวัสดุพื้น แรงดึงวัสดุพื้นเป็นแรงที่เกิดจากแรงดูดซับและแรงดึงคาปิลลารี แรงดึงวัสดุพื้นจะทำให้ความเป็นอิสระในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำที่ขังในดินลดลง ลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดศักย์น้ำในดินขึ้น ศักย์น้ำที่เกิดจากแรงดึงวัสดุพื้น เรียกว่า ศักย์วัสดุพื้น (Matric Potential : ψ_m) ขึ้น ค่าของศักย์วัสดุพื้นจะมีเครื่องหมายเป็นลบเพราะงานที่ต้องทำในการนำน้ำผ่านช่องในดินและขังตัวอยู่ในช่องเล็กๆในดินจะเป็นงานของแรงที่มีทิศตรงข้ามกับทิศของการเคลื่อนที่ของน้ำในช่องดิน ศักย์วัสดุพื้นจะแปรผันตรงกับความชื้นในดิน ดินที่มีความชื้นสูงจะมีศักย์วัสดุพื้นสูง (มีค่าติดลบน้อย)

1.3.2 ศักย์ออสโมติก

น้ำในดินเป็นน้ำที่มีไอออนหรือโมเลกุลของสารละลายประเภทเกลืออินทรีย์หรือสารประกอบอินทรีย์ปะปนอยู่ โดยความเข้มข้นของสารละลายที่บริเวณต่างๆจะไม่เท่ากัน จึงเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า กระบวนการออสโมติก กระบวนการออสโมติกเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดแรงดึงน้ำ เรียกว่า แรงดึงออสโมติก (Osmotic Force) ซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล จากภาพประกอบ 8 แสดงการแพร่ของโมเลกุลน้ำผ่านเยื่อกึ่งซึม (Semipermeable Membrane) ในสองทิศทาง คือ จากซ้ายไปขวา และจากขวาไปซ้ายแต่โมเลกุลน้ำตาลที่มีขนาดใหญ่กว่าโมเลกุลน้ำถูกเยื่อกึ่งซึมกรองทำให้ไม่สามารถผ่านจากด้านขวาไปซ้าย สารละลายด้านขวาของเยื่อกึ่งซึมมีความเข้มข้นมากกว่าด้านซ้าย ทำให้จำนวนโมเลกุลด้านขวาของเยื่อกึ่งซึมมากกว่าด้านซ้าย แรงลัพธ์ของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลในแนวนอนจึงมีทิศทางจากซ้ายไปขวา เกิดเป็นแรงดึงออสโมติก แรงดึงนี้มีผลให้ความเป็นอิสระในการเคลื่อนตัวของโมเลกุลน้ำลดลง เกิดศักย์น้ำเรียกว่า ศักย์ออสโมติก (Osmotic Potential : ψ_o) ค่าของศักย์ออสโมติกจะเป็นค่าลบเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น แรงดึงออสโมติกจึงแปรผันตรงกับความเข้มข้นของตัวละลายในน้ำ



ภาพประกอบ 8 กระบวนการซึมซับโมเลกุลของน้ำผ่านเยื่อกึ่งซึม(Semipermeable Membrane) ไปยังสารละลายของน้ำตาล

ที่มา: Brady,N.C. (1974). *The Nature and Properties of Soils Tenth Edition*. p. 131.

1.3.3 ศักย์โน้มถ่วง

วัตถุทุกชนิดบนโลกจะถูกแรงดึงดูดระหว่างมวลวัตถุกับมวลโลกกระทำ โดยขนาดของแรงที่กระทำจะขึ้นกับขนาดของวัตถุและระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางมวลวัตถุกับจุดศูนย์กลางมวลโลก แรงดึงดูดของโลกจะมีทิศในแนวตั้งพุ่งลงสู่ศูนย์กลางมวลโลกเสมอ เรียกแรงนี้ว่าแรงโน้มถ่วง แรงโน้มถ่วงของโลกทำให้เกิดศักย์น้ำ ที่เรียกว่า ศักย์โน้มถ่วง (Gravitational Potential : ψ_g) การถ่ายเทน้ำจากตำแหน่งหนึ่งไปยังตำแหน่งอื่นจะเกิดงานของแรงโน้มถ่วงเฉพาะเมื่อระยะทางการเคลื่อนที่ของน้ำอยู่ในแนวตั้ง ดังนั้นศักย์โน้มถ่วงเป็นค่าบวกสำหรับตำแหน่งที่อยู่สูงกว่าระดับอ้างอิง ศักย์โน้มถ่วงเป็นค่าลบเมื่อตำแหน่งที่พิจารณาอยู่ต่ำกว่าระดับอ้างอิง และศักย์โน้มถ่วงเป็นศูนย์เมื่อตำแหน่งที่พิจารณาดตรงระดับอ้างอิง โดยค่าศักย์โน้มถ่วงของน้ำจะแปรผันตรงกับความสูงจากระดับอ้างอิง (Reference Level)

$$\psi_g = \rho gh \quad (4)$$

- เมื่อ
- h คือ ความสูงของระดับน้ำในดินจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง
 - g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
 - ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ

1.4 หน่วยวัดศักย์ของน้ำในดิน

หน่วยที่ใช้บอกค่าของศักย์น้ำในดินเป็นหน่วยของงานที่ทำต่อน้ำหนึ่งหน่วย ในกรณีนี้ คำว่า ต่อน้ำหนึ่งหน่วย หมายถึง เป็นงานที่ทำต่อน้ำหนึ่งหน่วยได้แก่ ต่อมวลของน้ำ ศักย์น้ำมีหน่วยเป็นจูลต่อกิโลกรัม (J/kg), ต่อน้ำหนึ่งหน่วยปริมาตร ศักย์น้ำมีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือ Pascal หรือ บาร์ และ ต่อน้ำหนักของน้ำ ศักย์น้ำมีหน่วยเป็นความสูงของน้ำ คือ เมตร (m) หรือเซนติเมตร (cm) หน่วยของศักย์น้ำในดินสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังตาราง 1

ตาราง 1 แสดงหน่วยที่ใช้บอกค่าของศักย์น้ำในดิน

ระดับความสูงในแนวตั้งของน้ำ หน่วย เซนติเมตร (cm)	ศักย์ของน้ำในดิน หน่วย บาร์ (bars)	ศักย์ของน้ำในดิน หน่วย เมกะปาสคาล (megapascal:MPa)
0	0	0
10.2	-0.01	-0.001
102	-0.1	-0.01
306	-0.3	-0.03
1,020	-1.0	-0.1
15,300	-15	-1.5
31,700	-31	-3.1
102,000	-100	-10.0

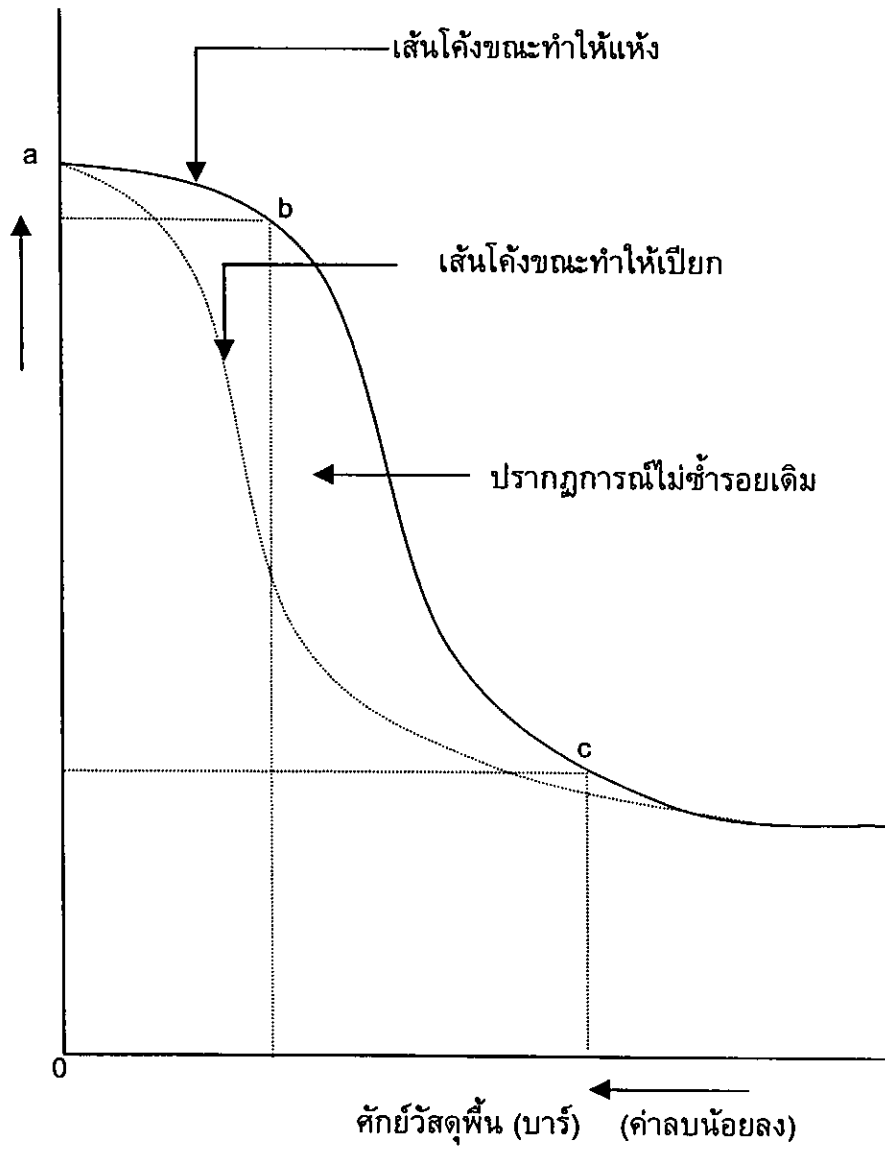
ที่มา: Brady,N.C (1974). *The Nature and Properties of Soils Tenth Edition*. p. 131.

โดยที่	1 bar	เท่ากับ	ระดับความสูงของน้ำ 1020 cm 0.987 ความดันบรรยากาศ (atm) 0.1 MPa หรือ 100 kPa
	1 atm	เท่ากับ	ระดับความสูงของน้ำ 1033 cm (Height)
	1 millibar	เท่ากับ	ระดับความสูงของน้ำ 1.020 cm (Height) 0.1 kPa

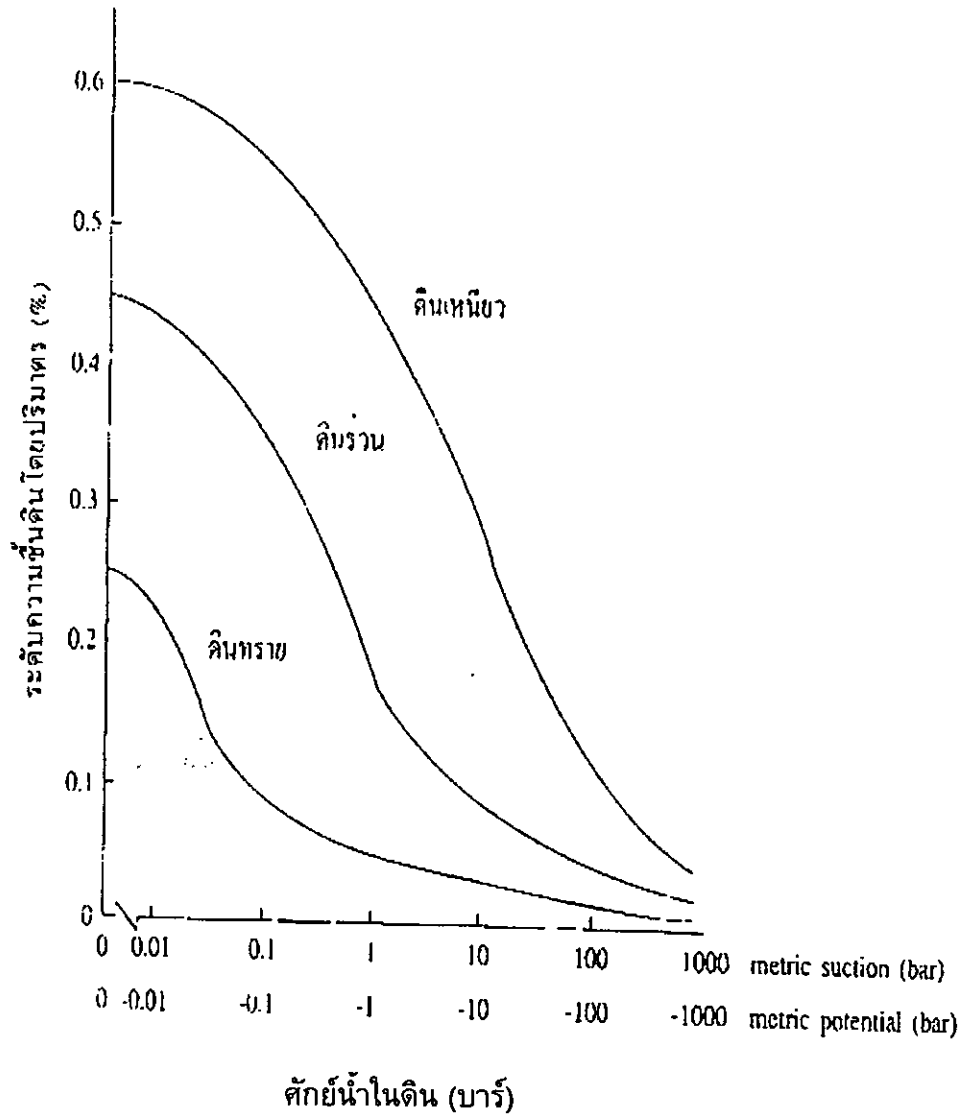
1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นกับศักย์น้ำในดิน

ศักย์วัสดุพื้น เป็นศักย์องค์ประกอบชนิดเดียวของศักย์น้ำที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับความชื้นของดิน ดินที่มีระดับความชื้นต่ำศักย์วัสดุพื้น (Ψ_m) จะมีค่าต่ำ (มีค่าติดลบมากขึ้น) ถ้านำดินชนิดเดียวกันจำนวนเท่ากันมาศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับและการปลดปล่อยน้ำในดิน พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นกับศักย์วัสดุพื้นของน้ำจะเป็นลักษณะเฉพาะตัวของดินความสัมพันธ์ดังกล่าว แสดงเป็นกราฟ เรียกว่า เส้นโค้งลักษณะความชื้นของดิน (Soil Moisture Characteristic Curve) โดยแกนตั้งเป็นระดับความชื้น และแกนนอนเป็นศักย์วัสดุพื้น ดังภาพประกอบ 9 เส้นโค้งลักษณะความชื้นดิน ตรงจุดซึ่งเส้นโค้งตัดแกนตั้ง ศักย์วัสดุพื้นมีค่าสูงสุด เท่ากับศูนย์นั่นคือดินมีระดับความชื้นเท่ากับจุดอิ่มตัว ถ้าพิจารณากราฟที่แสดงความชื้นของดินขณะทำให้ดินแห้ง (Drying Curve) ช่วง a ถึง b ช่วงนี้ความชื้นในดินลดลงเล็กน้อย ส่วนศักย์วัสดุพื้นจะเปลี่ยนแปลงมาก เมื่อเข้าสู่ช่วง b ถึง c ช่วงนี้กราฟจะมีความชันมาก การลดลงของความชื้นของดินช่วง b ถึง c มีค่ามากกว่าช่วง a ถึง b อย่างมาก แต่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงศักย์วัสดุพื้นใกล้เคียงกับช่วง a ถึง b แสดงว่าดินจะขังน้ำไว้ในช่องว่างในดินที่มีค่าศักย์วัสดุพื้นในช่วง b ถึง c และหลังจากนั้นจะเข้าสู่ช่วง c ซึ่งเป็นบริเวณช่วงดินแห้ง (ดินมีความชื้นน้อยมาก) การลดความชื้นของดินในช่วงเลย c ออกไปจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงศักย์วัสดุพื้นเป็นอย่างมาก ในด้านกลับกัน เส้นโค้งขณะทำให้เปียก (Wetting Curve) เกิดขึ้นจากการเพิ่มศักย์วัสดุพื้นโดยการให้น้ำจากภายนอกไหลเข้าไปในดินที่แห้ง ตามปกติเส้นโค้งขณะเปียกจะไม่ทับเป็นเส้นเดียวกับเส้นโค้งขณะแห้ง คือ เส้นโค้งขณะเปียกจะมีระดับความชื้นต่ำกว่าเส้นโค้งขณะแห้งเมื่อมีศักย์วัสดุพื้นเท่ากัน ทั้งนี้เป็นไปตามปรากฏการณ์ไม่ซ้ารอย (Hysteresis Phenomenon) ซึ่งเป็นพฤติกรรมของวัสดุพูนทุกชนิด จากภาพประกอบ 10 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับศักย์น้ำในดิน ของลักษณะเนื้อดิน 3 ชนิด คือ ดินเหนียว ดินร่วน และดินทราย เส้นกราฟจะเป็นไปในลักษณะของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำแล้วปล่อยให้แห้ง หรือเรียกว่า เป็นลักษณะของเส้นโค้งขณะแห้ง เมื่อพิจารณาจากจุดที่มีศักย์วัสดุพื้นเท่ากัน ดินเหนียวสามารถขังน้ำได้ดีกว่าดินร่วนและดินทรายตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจาก ดินเหนียวมีลักษณะเนื้อดินที่ละเอียดกว่ามีความพูนสูงกว่า มีช่องว่างในดินขนาดเล็กกว่า ทำให้สามารถเก็บกักน้ำได้ดีกว่านั่นเอง

ระดับความชื้นดินโดยปริมาตร (%)



ภาพประกอบ 9 เส้นโค้งลักษณะความชื้น



ภาพประกอบ 10 เส้นโค้งการปล่อยความชื้นของดินที่มีลักษณะเนื้อดินแตกต่างกัน

ที่มา: คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2541).
ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. หน้า 129.

1.6 วิธีการวัดความชื้นในดิน

การวัดความชื้นในดินมีหลายวิธี จำแนกได้ดังนี้

1.6.1 การวัดความชื้นโดยการชั่งน้ำหนัก

การวัดความชื้นโดยการชั่งน้ำหนักเป็นการชั่งน้ำหนักดินเพื่อหาน้ำหนักในดินโดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างดินแล้วนำดินตัวอย่างไปใส่อบความชื้นออกที่อุณหภูมิ 105–110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ถึง 36 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในตู้ป้องกันความชื้นแล้วนำมาชั่งน้ำหนักดินหลังการอบ นำน้ำหนักดินทั้งสองครั้งมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น จากสูตร

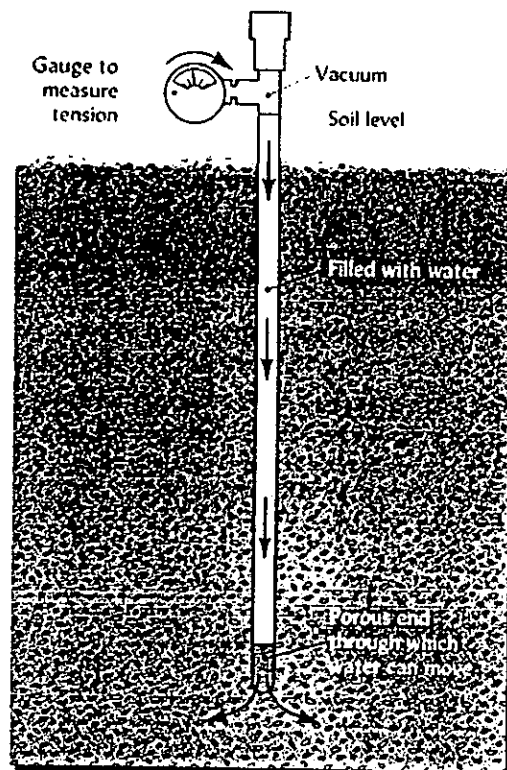
$$\text{ความชื้นของดิน (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของดินก่อนอบ} - \text{น้ำหนักของดินหลังอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักของดินหลังอบแห้ง}} \times 100$$

1.6.2 การวัดความชื้นจากความต้านทานไฟฟ้า

วิธีการวัดความต้านทานไฟฟ้าเป็นวิธีวัดความชื้นในดินวิธีหนึ่ง เครื่องมือวัดความชื้นในดินชนิดนี้อาศัยหลักการทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทาน แห่งวัดความต้านทานไฟฟ้าประกอบด้วย แห่งความต้านทาน (Block Resistance) ทำจากยิปซัม,ไฟเบอร์กลาส หรือ ไนลอน ซึ่งแห่งความต้านทานนี้จะมีสมบัติในการดูดซับน้ำ แห่งความต้านทานมีขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วฝังอยู่ภายใน เมื่อนำแห่งความต้านทานไปฝังไว้ในดิน ถ้าดินมีความชื้นมากกว่าแห่งความต้านทาน น้ำในดินจะซึมเข้าไปในแห่งความต้านทาน ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของแห่งความต้านทานลดลง เมื่อศักย์วัสดุพื้นในดินเท่ากับศักย์วัสดุพื้นในแห่งความต้านทานจะทำให้เกิดสมดุลการไหลของน้ำ ค่าความต้านทานของแห่งความต้านทานจะมีค่าคงตัว นั่นคือ ความต้านทานไฟฟ้าจะแปรผกผันกับความชื้นในดิน ศักย์น้ำในดินจะแปรผันตรงกับความชื้นในดิน การใช้แห่งวัดความต้านทานไฟฟ้านี้สามารถอ่านค่าศักย์น้ำในดินได้ในช่วง -1 ถึง -15 บาร์

1.6.3 การวัดความชื้นโดยใช้เทนซิโอมิเตอร์

เทนซิโอมิเตอร์ เป็นเครื่องมือวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน ซึ่งแปรผันตรงกับความชื้นในดิน อาศัยหลักการวัดศักย์วัสดุพื้นที่เกิดจากแรงดึงวัสดุพื้น เทนซิโอมิเตอร์ ประกอบด้วย กระจาปะพรุนต่อกับท่อที่มีฝาปิดสนิทและมาตรวัดความดัน ภายในท่อบรรจุน้ำไว้เต็มท่อจนถึงมาตรวัดความดัน ก่อนใช้งานต้องทำให้กระจาปะพรุนอ้อมตัวด้วยน้ำก่อนแล้วจึงนำไปฝังดินโดยให้กระจาปะพรุนสัมผัสแนบสนิทกับดิน ในขณะที่ดินไม่อ้อมตัวด้วยน้ำหรือดินมีศักย์วัสดุพื้นต่ำกว่าศักย์วัสดุพื้นของกระจาปะพรุน จะทำให้เกิดแรงดึงวัสดุพื้นกระทำต่อน้ำ ทำให้น้ำไหลจากเทนซิโอมิเตอร์ผ่านกระจาปะพรุนไปยังดินที่ไม่อ้อมตัวด้วยน้ำจนกระทั่งเทนซิโอมิเตอร์กับดินมีศักย์วัสดุพื้นเท่ากัน น้ำจึงหยุดไหล การไหลของน้ำจากท่อผ่านกระจาปะพรุนจะทำให้ระดับน้ำในท่อลดลงเกิดเป็นช่องอากาศที่มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ สามารถอ่านค่าความดันด้วยเกจวัดความดัน (Pressure Gauge) การใช้เทนซิโอมิเตอร์สามารถอ่านค่าความดันอยู่ในช่วงประมาณ 0 ถึง -0.80 บาร์ ดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 ลักษณะของเทนซิโอมิเตอร์ใช้วัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน

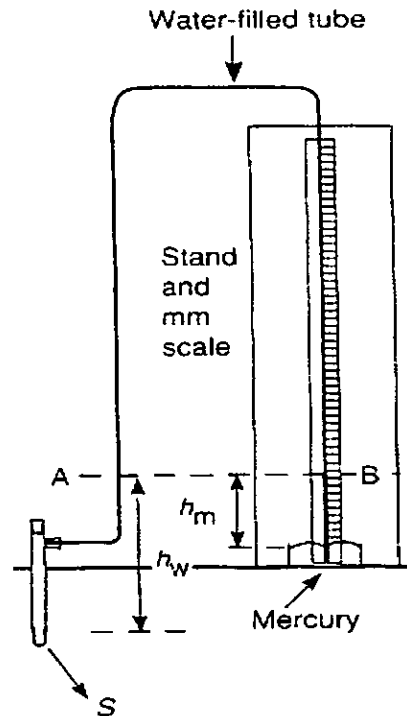
ที่มา: Brady, N.C. & Weil, R.R. (2000). *Element of The Nature and Properties of Soils*. p.143.

1.6.4 การวัดความชื้นด้วยนิวตรอน

เครื่องวัดความชื้นด้วยนิวตรอนเป็นเครื่องมือวัดความชื้นในดินชนิดหนึ่งที่สำคัญหลัก การที่ธาตุกัมมันตรังสีซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดอนุภาคนิวตรอนความเร็วสูง (Fast Neutrons) เมื่อแหล่งกำเนิดปล่อยอนุภาคนิวตรอนความเร็วสูงออกมา อนุภาคนิวตรอนความเร็วสูงชนกับอะตอมของไฮโดรเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของน้ำในดิน ทำให้อนุภาคนิวตรอนความเร็วสูงสูญเสียพลังงานกลายเป็นอนุภาคนิวตรอนความเร็วต่ำ (Slow Neutrons) เครื่องวัดความชื้นด้วยนิวตรอนมีตัวตรวจจับ (Detector) นิวตรอนความเร็วต่ำ พบว่าจำนวนนับของนิวตรอนความเร็วต่ำจะแปรผันตรงกับระดับความชื้นในดิน ดินที่มีความชื้นมากจะทำให้เครื่องตรวจจับนิวตรอนความเร็วต่ำตรวจจับนิวตรอนความเร็วต่ำได้มาก

1.6.5 การวัดความชื้นโดยการใช้นิวตริโอมิเตอร์ที่ใช้มาโนมิเตอร์ปรอท

นิวตริโอมิเตอร์ที่ใช้มาโนมิเตอร์ปรอท (Tensiometer with Mercury Manometer) เป็นเครื่องมือวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดินซึ่งเกิดจากแรงดึงวัสดุพื้น นิวตริโอมิเตอร์ที่ใช้มาโนมิเตอร์แบบปรอท ประกอบด้วยกระเปาะพรุณ ต่อจากกระเปาะพรุณจะเป็นท่อที่มีฝาปิดสนิทและด้านข้างจะเป็นหลอดเล็กซึ่งจุ่มอยู่ในอ่างปรอท ดังภาพประกอบ 12 ภายในท่อบรรจุน้ำไว้เต็ม ท่อก่อนที่ใช้งานต้องให้กระเปาะพรุณอ้อมตัวด้วยน้ำก่อนแล้วจึงนำไปฝังดินโดยให้กระเปาะพรุณสัมผัสแนบสนิทกับดิน ในขณะที่ดินไม่อ้อมตัวด้วยน้ำหรือดินมีศักย์วัสดุพื้นต่ำ จะทำให้น้ำไหลจากท่อผ่านกระเปาะพรุณออกไปสู่ดินทำให้ระดับน้ำในท่อลดลงความดันภายในท่อจะต่ำกว่าความดันบรรยากาศภายนอก ส่งผลทำให้ปรอทเคลื่อนที่เข้าไปในหลอดสูงเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสมดุล สามารถวัดความสูงของปรอทและน้ำได้แล้วคำนวณหาความแตกต่างระหว่างความดันของปรอทกับความดันของน้ำ ซึ่งความแตกต่างนี้จะทำให้ทราบถึงแรงดึงของน้ำในดิน ดังนี้



ภาพประกอบ 12 ลักษณะของเทนซิโอมิเตอร์ที่ใช้มาโนมิเตอร์ปรอท

ที่มา: Rowell, D.L. (1994). *Soil Science Methods and Application*. p.89.

$$S = h_m \rho_m g - h_w \rho_w g \quad (5)$$

$$S = 1.33 \times 10^5 h_m - 9810 h_w$$

เมื่อ

ρ_m คือ ความหนาแน่นของปรอท

ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

S คือ ความแตกต่างระหว่างความดันของปรอทกับความดันของน้ำ (ความดันที่กระเปาะพรุนหรือศักย์วัสดุพื้น)

h_m คือ ความสูงของปรอทในมาโนมิเตอร์

h_w คือ ความสูงของน้ำในเทนซิโอมิเตอร์

1.7 การวัดความดันสุญญากาศ

ความดันสุญญากาศ (Vacuum Pressure) คือ ค่าความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศจะมีค่าเป็นลบเทียบกับความดันบรรยากาศ มีหน่วยวัดความดันเป็น Torr (mmHg), Pascal (Pa), Millibar(mbar), Bar หรือ Atm, Psia แสดงดังตาราง 2 การแปลงค่าหน่วยดังนี้

ตาราง 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความดันบรรยากาศ

		torr	mbar	bar	pascal	atm
1 torr	=	1	1.333	1.33×10^{-3}	133.3	1.316×10^{-3}
1 mbar	=	0.75	1	0.001	100	9.87×10^{-4}
1 bar	=	750	1000	1	1×10^5	9.87×10^{-1}
1 pascal	=	0.0075	0.01	1×10^{-5}	1	9.87×10^{-6}
1 atm	=	760	1.013×10^3	1013	101325	1

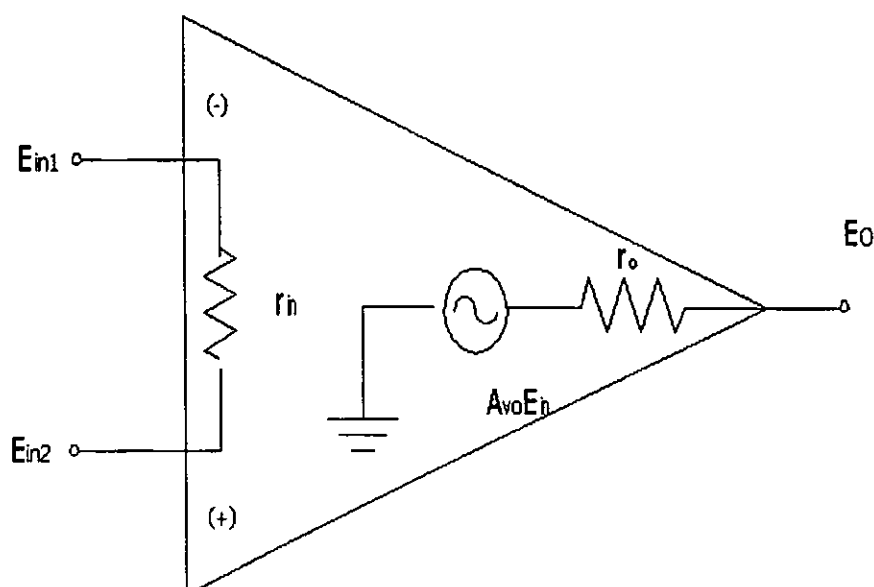
ที่มา: ชัยวิทย์ ศิลาว์ชนาไทย.(2526). ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของระบบสุญญากาศ. หน้า49
สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น).

ความดันสุญญากาศสัมบูรณ์ (Absolute Vacuum Pressure) จะมีค่าความดันเท่ากับศูนย์ความดันบรรยากาศหรือ 0 atm (Atmospheric Pressure) ซึ่งอ่านจากหัววัดความดันสุญญากาศได้เท่ากับศูนย์ปอนด์ต่อตารางนิ้วหรือ 0 psia (Pound Per Square Inch Absolute) ความดันสัมบูรณ์ของบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเลจะมีค่าเท่ากับ 14.7 psia

2. ทฤษฎีทางอิเล็กทรอนิกส์

2.1 เครื่องขยายสัญญาณกระทำการ

เครื่องขยายสัญญาณกระทำการ (Operational Amplifier) หรือ “ออปแอมป์” เป็นเครื่องขยายสัญญาณที่ใช้ขยายสัญญาณความต่างศักย์ วงจรของออปแอมป์ที่ใช้งานโดยทั่วไปในปัจจุบันจะเป็นวงจรรวม เรียกสั้น ๆ ว่า ไอซี (Integrated Circuits) ภาพประกอบ 13 เป็นวงจรมูลของออปแอมป์ ออปแอมป์ประกอบด้วยขั้วทางเข้าสองขั้ว ขั้วทางออกหนึ่งขั้ว ระหว่างขั้วทางเข้าจะมีความต้านทาน เรียกว่า ความต้านทานทางเข้า ทางด้านออกจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าอนุกรมกับความต้านทานตัวหนึ่งเรียกว่าความต้านทานทางออก แรงเคลื่อนไฟฟ้าทางออกเท่ากับ $A_{vo} E_{in}$ โดยที่ A_{vo} คือ อัตราขยายของเครื่องขยายสัญญาณ E_{in} เป็นความแตกต่างของสัญญาณที่ทางเข้า โดยเครื่องขยายจะขยายเฉพาะผลต่างของสัญญาณที่ทางเข้าทั้งสอง E_o เป็นศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกเทียบกับศักย์ดินของวงจร การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ทางเข้ากลับทาง (-) ในทิศทางเพิ่มขึ้นทำให้สัญญาณที่ทางออกเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ลดลง และที่ทางเข้า (+) การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้าในทิศทางที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สัญญาณที่ทางออกเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่เพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 13 วงจรมูลของออปแอมป์

ออปแอมป์อุดมคติมีสมบัติ 5 ข้อ คือ

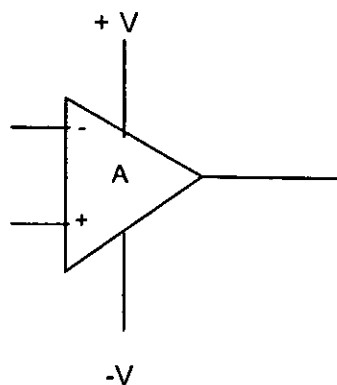
1. อัตราขยายความต่างศักย์วงเปิดเท่ากับอนันต์ $A_{vo} = \infty$
2. ความต้านทานทางเข้าเท่ากับอนันต์ $r_{in} = \infty$
3. ความต้านทานทางออกเท่ากับศูนย์ $r_o = 0$
4. แบนด์วิดท์เท่ากับอนันต์ $Bw = \infty$
5. ความต่างศักย์ออฟเซตเท่ากับศูนย์ คือ $E_o = 0$ เมื่อ $E_{in} = 0$

จากสมบัติของออปแอมป์อุดมคติ 5 ข้อนำไปสู่สมบัติอีก 2 ข้อ คือ

1. จากการที่อัตราขยายของออปแอมป์มีค่าเท่ากับอนันต์ สัญญาณไฟฟ้าใด ๆ ที่ทางออกเป็นผลมาจากสัญญาณทางเข้าที่มีขนาดเล็ก จนกล่าวได้ว่าสัญญาณระหว่างขั้วทางเข้าของออปแอมป์เท่ากับศูนย์

2. การที่ความต้านทานทางเข้าของออปแอมป์ในอุดมคติมีค่าเท่ากับอนันต์ กล่าวได้ว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ออปแอมป์ที่ขั้วทางเข้าเท่ากับศูนย์

สัญลักษณ์ของออปแอมป์จะเป็นรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว มีทางเข้าสองขั้วที่ฐานของสามเหลี่ยม ได้แก่ ขั้วทางเข้ากลับทางแสดงด้วยเครื่องหมายลบ และขั้วทางเข้าไม่กลับทางแสดงด้วยเครื่องหมายบวก เครื่องหมายของขั้วทางเข้าจะเขียนในสามเหลี่ยมตรงตำแหน่งทางเข้า ขั้วไฟฟ้าสำหรับต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะเขียนต่อจากด้านล่างและด้านบน หมายเลขของออปแอมป์จะเขียนไว้กึ่งกลางของสามเหลี่ยมตรงตำแหน่งอักษร A ดังภาพประกอบ 14



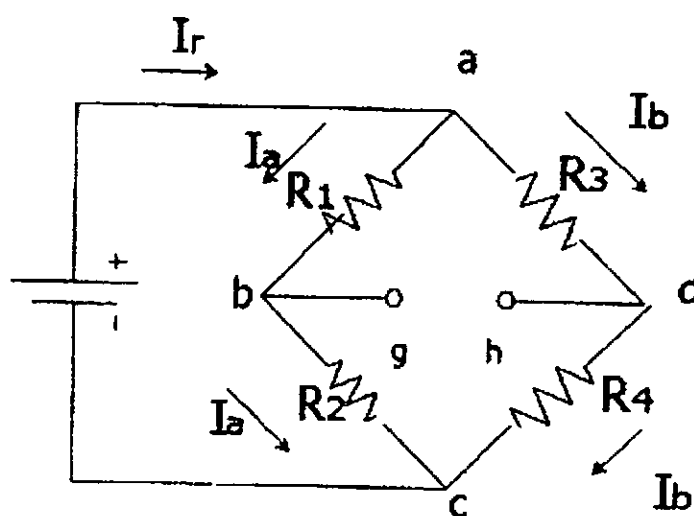
ภาพประกอบ 14 สัญลักษณ์ของออปแอมป์

2.2 วงจรบริดจ์

วงจรบริดจ์ (Bridge Circuit) เป็นวงจรที่มีการเชื่อมกันระหว่างการต่อแบบอนุกรมกับการต่อแบบขนาน วงจรบริดจ์ที่พบบ่อยในวงจรไฟฟ้ากระแสตรงและเป็นวงจรพื้นฐาน เรียกว่า วีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone-bridge) ภาพประกอบ 15 วงจรบริดจ์แบ่งได้เป็นสองลักษณะ¹ คือ วงจรบริดจ์ที่อยู่ในสภาวะสมดุล และวงจรบริดจ์ที่อยู่ในสภาวะไม่สมดุล

2.2.1 วงจรบริดจ์ที่อยู่ในสภาวะสมดุล

วงจรบริดจ์ที่อยู่ในสภาวะสมดุล คือ วงจรบริดจ์ที่มีความต่างศักย์ระหว่างจุดปลายสองจุดคือ จุด g และ จุด h มีค่าเท่ากับศูนย์ การวิเคราะห์ทำได้โดยพิจารณาจากเส้นทางสองเส้นทาง คือ เส้นทาง gbadh และเส้นทาง gbc dh ซึ่งทั้งสองเส้นทางมีสมการความต่างศักย์ V_{gh} เป็น



ภาพประกอบ 15 วีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone-bridge)

ที่มา: Hubert, C.L. (1982). *Electric Circuits AC/DC An Integrated*. p.88.

¹ไมตรี วรวิจิตรยากุล.(2530). *ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า เล่ม 1*. หน้า 45.

V_{gh} = ผลรวมของความต่างศักย์ไฟฟ้าขั้วเคลื่อน—ผลรวมของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่คร่อมบนวัสดุ

สำหรับเส้นทาง gbadh ความต่างศักย์ระหว่างจุดปลายสองจุด (V_{gh}) คือ

$$V_{gh} = 0 - [(-I_a)R_1 + I_b R_3] \quad (6)$$

สำหรับเส้นทาง gbcdh ความต่างศักย์ระหว่างจุดปลายสองจุด (V_{gh}) คือ

$$V_{gh} = 0 - [I_a R_2 + (-I_b)R_4] \quad (7)$$

เมื่อวงจรบริดจ์อยู่ในสภาวะสมดุล ($V_{gh} = 0$) จะทำให้ได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมที่ตัวต้านทาน R_1 กับ R_3 มีค่าเท่ากัน และความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมที่ตัวต้านทาน R_2 กับ R_4 มีค่าเท่ากัน จะได้

$$I_a R_1 = I_b R_3 \quad (8)$$

$$I_a R_2 = I_b R_4 \quad (9)$$

สมการ (8) หารด้วยสมการ (9) จะได้

$$\frac{I_a R_1}{I_a R_2} = \frac{I_b R_3}{I_b R_4} \quad (10)$$

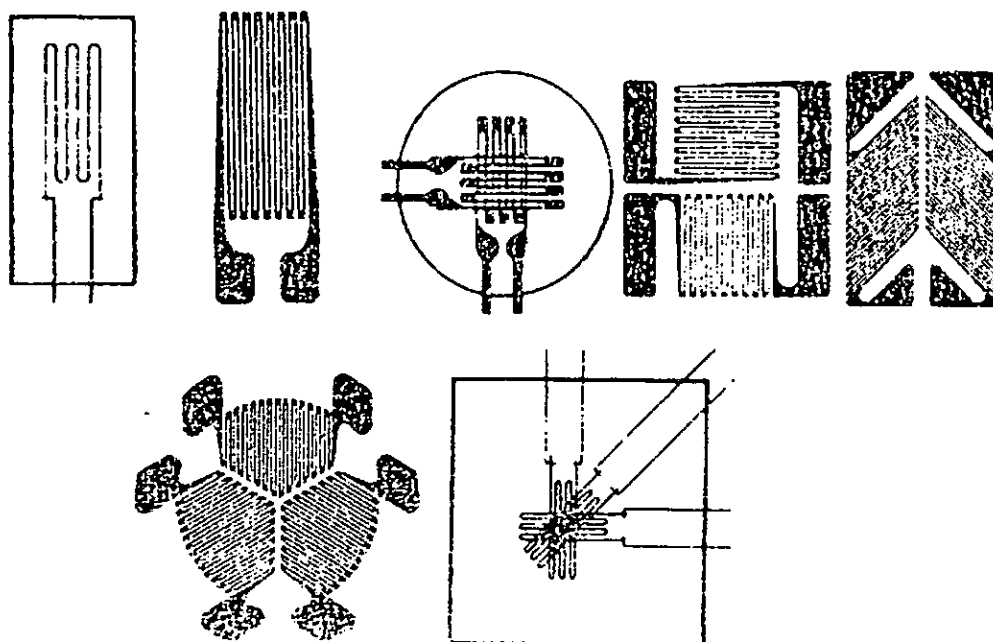
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (11)$$

2.2.2 วงจรบริดจ์ในภาวะไม่สมดุล

วงจรบริดจ์จะอยู่ในภาวะไม่สมดุล เมื่ออัตราส่วนระหว่าง R_1 / R_2 ไม่เท่ากับ R_3 / R_4 ความต่างศักย์ตกคร่อมที่ความต้านทาน R_1 ไม่เท่ากับความต่างศักย์ตกคร่อมที่ความต้านทาน R_3 หรือความต่างศักย์ตกคร่อมที่ความต้านทาน R_2 ไม่เท่ากับความต่างศักย์ตกคร่อมที่ความต้านทาน R_4

2.3 สเตรนเกจ

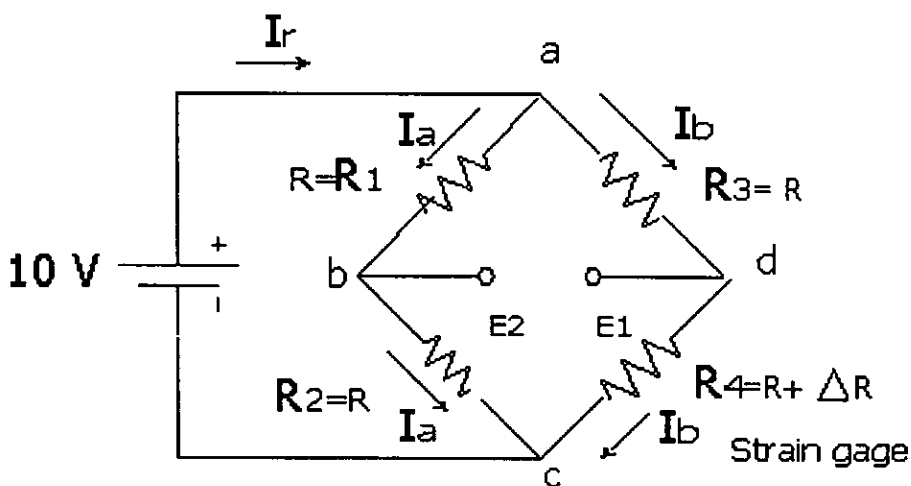
สเตรนเกจ (Strain Gage) เป็นเส้นลวดความต้านทานที่จะเปลี่ยนความต้านทานเมื่อมีแรงกระทำให้ความยาวของเส้นลวดเปลี่ยนไป สเตรนเกจมีโครงสร้างเป็นเส้นลวดวางตัวในลักษณะต่างๆ ดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 ลักษณะการวางตัวของสเตรนเกจ แบบต่างๆ

ที่มา: Cooper, W.D & Helfrick, A.D. (1989). *Electronic Instrumentation and Measurement Techniques Third Edition*. p.356.

เมื่อนำ สเตรนเกจ มาประกอบในวงจรบริดจ์ เมื่อ E_1 กับ E_2 คือความต่างศักย์ทางออกที่จุดที่ 1 และจุดที่ 2 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 17 ขณะที่มีความกดทับหรือมากกระทำต่อโครงสร้างของเส้นลวดจะทำให้ตัวต้านทานที่เป็นเส้นลวดเกิดการโค้งงอ ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของสเตรนเกจ การเปลี่ยนแปลงของสเตรนเกจทำให้วงจรบริดจ์เสียสมดุลมีผลให้ความต่างศักย์ระหว่าง E_1 กับ E_2 เปลี่ยนไปจากความต่างศักย์ปกติ จากภาพประกอบ 20 เป็นวงจรบริดจ์ที่ความต้านทาน R_1 , R_2 และ R_3 เท่ากับ R ความต้านทาน R_4 เป็นสเตรนเกจมีค่าเท่ากับ $R + \Delta R$ ซึ่งอาจจะกำหนดตัวต้านทาน R_4 ไว้สูงหรือต่ำกว่าตัวต้านทาน R แล้วแต่การใช้งาน โดยเริ่มต้นเราสามารถวัดความต่างศักย์ระหว่าง E_1 กับ E_2 ได้ เมื่อมีความกดทับหรือมากกระทำต่อโครงสร้างของเส้นลวดจะทำให้ความต่างศักย์ระหว่าง E_1 กับ E_2 เปลี่ยนไปจากเดิม ซึ่งเราสามารถคำนวณความต่างศักย์ระหว่าง E_1 กับ E_2 ได้ดังนี้



ภาพประกอบ 17 วงจรบริดจ์แบบที่มีแขนหนึ่งของบริดจ์เป็นสเตรนเกจ

ที่มา: Uffenbeck, J.E. (1982). *Introduction to Electronics, Prentice Hall, Inc, Englewood Cliff.*

เมื่อ

$$E_1 = \left[\frac{(R + \Delta R)}{R + (R + \Delta R)} \right] \cdot E = \left(\frac{R + \Delta R}{2R + \Delta R} \right) \cdot E \tag{12}$$

และ

$$E_2 = \frac{E}{2} \tag{13}$$

สมการ (12)ลบสมการ (13)

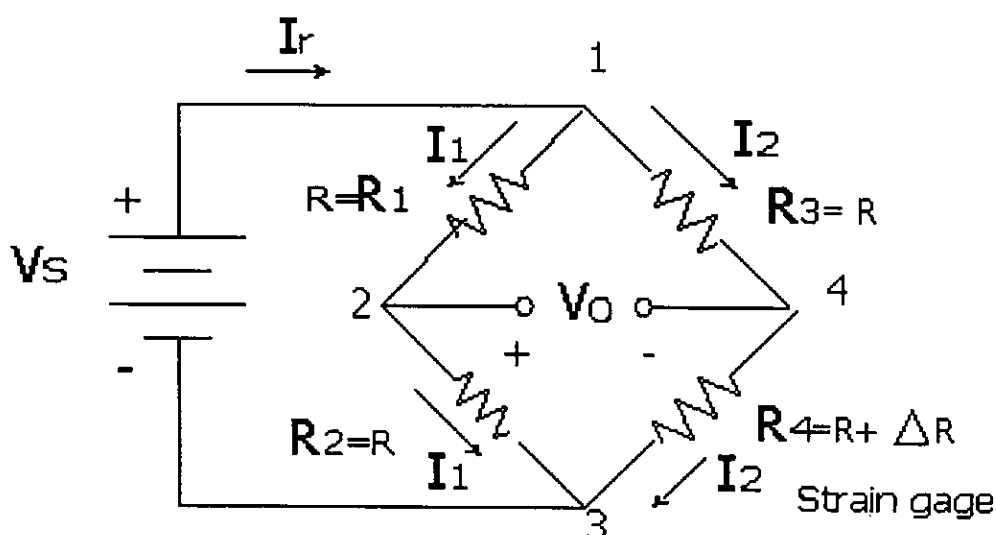
$$\begin{aligned} E_1 - E_2 &= \left(\frac{R + \Delta R}{2R + \Delta R} \right) E - \frac{E}{2} \\ &= E \left(\frac{R + \Delta R}{2R + \Delta R} - \frac{1}{2} \right) \\ &= E \left(\frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} \right) \end{aligned}$$

$$E_1 - E_2 \cong E \left(\frac{\Delta R}{4R} \right) \quad (14)$$

ความต่างศักย์ระหว่าง E_1 กับ E_2 ขึ้นกับ ΔR ซึ่งเป็นผลจากแรงกระทำบนสเตรนเกจ เราจึงสามารถใช้วงจรบริดจ์นี้ในการวัดแรงที่กระทำบนสเตรนเกจได้

2.4 เครื่องรับรู้ความดัน

เครื่องรับรู้ความดัน (Pressure Sensors) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดความดันสัมบูรณ์ เทียบกับสูญญากาศซึ่งเครื่องรับรู้ความดันอาศัยหลักการเสียสมดุลของวงจบริดจ์ที่เกิดจากแรงกดทับสเตรนเกจ ภายในเครื่องรับรู้ประกอบด้วยตัวต้านทาน จำนวน 4 ตัวต่อกันเป็นวงจบริดจ์ ดังภาพประกอบ 18 เมื่อมีความดันต่างกันส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ (V_0) ที่ทางออกเปลี่ยนไปจากเดิม ในลักษณะที่ค่าความต่างศักย์แปรผันตรงกับขนาดของความดันที่กระทำ

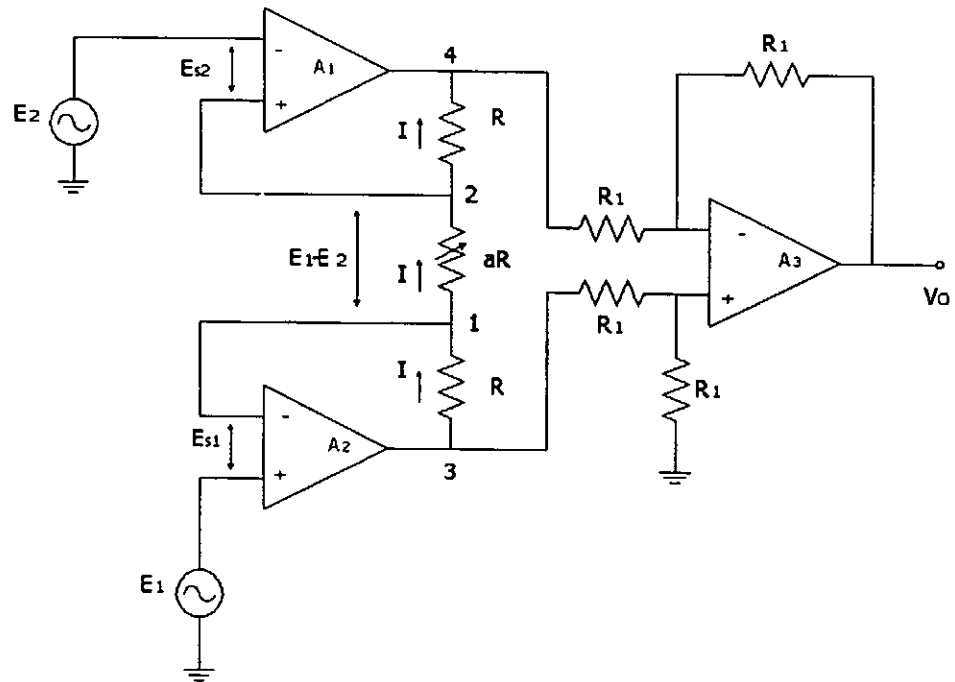


ภาพประกอบ 18 วงจรบริดจ์แบบสเตรนเกจที่อยู่ภายในเครื่องรับรู้ความดัน

ที่มา: เอกสารประกอบคำอธิบายของ Pressure Sensors จาก Honeywell Inc.

2.5 เครื่องขยายสัญญาณสำหรับเครื่องมือ

เครื่องขยายสัญญาณสำหรับเครื่องมือ (Instrumentation Amplifier) เป็นเครื่องขยายสัญญาณที่ให้ความแม่นยำและสามารถประยุกต์ใช้ได้หลายด้าน วงจรของเครื่องขยายสัญญาณประกอบด้วยออปแอมป์ 3 ตัวและตัวต้านทาน 7 ตัว ดังภาพประกอบ 19 ออปแอมป์ A_1 และ A_2 ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายเพิ่มความเข้มของสัญญาณ (Buffer Amplifier) ส่วน A_3 และตัวต้านทาน R_1 ประกอบกันเป็นวงจรขยายสัญญาณความแตกต่าง ที่ให้อัตราขยายเท่ากับหนึ่ง จากคุณสมบัติของออปแอมป์ E_{s1} และ E_{s2} เท่ากับศูนย์ เพราะออปแอมป์มีอัตราขยายที่สูงมาก ศักย์ไฟฟ้าที่จุด 1 เท่ากับ E_1 และศักย์ไฟฟ้าที่จุด 2 เท่ากับ E_2 ความต่างศักย์ระหว่างสองจุดนี้เท่ากับ $E_1 - E_2$ และความต้านทานที่อยู่ระหว่างจุดสองจุดคือ aR กระแส I ที่ไหลผ่าน aR จะเป็นไปตามสมการ 15 ซึ่งปริมาณ a จะขึ้นกับการปรับค่าตัวต้านทาน



ภาพประกอบ 19 วงจรขยายสัญญาณเครื่องมือ

$$I = \frac{E_1 - E_2}{aR} \quad (15)$$

กระแสที่ไหลผ่าน aR จะเป็นกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R ที่อยู่ระหว่างจุด 3 กับจุด 1 และจุด 2 กับจุด 4 ทำให้เกิดความต่างศักย์คร่อมบนตัวต้านทาน R ซึ่งแต่ละตัวจะมีเท่ากับ IR จะได้

$$IR = \frac{(E_1 - E_2)R}{aR} = \frac{E_1 - E_2}{a} \quad (16)$$

เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่จุด 3 สูงกว่าที่จุด 1 อยู่ $(E_1 - E_2)/a$ ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่จุด 3 เท่ากับ

$$E_3 = E_1 + \frac{(E_1 - E_2)}{a} \quad (17)$$

ส่วนจุด 4 มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าที่จุด 2 อยู่ $(E_1 - E_2)/a$ ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่จุด 4 เท่ากับ

$$E_4 = E_2 - \frac{(E_1 - E_2)}{a} \quad (18)$$

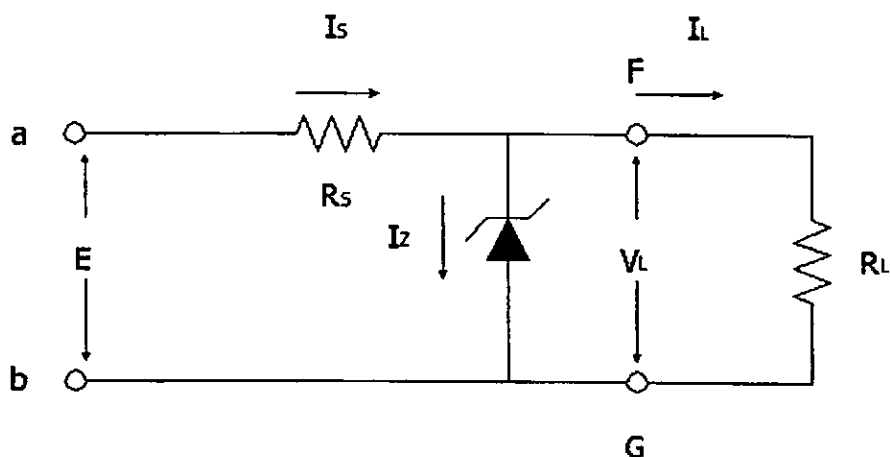
ศักย์ไฟฟ้า E_3 และ E_4 จะปรากฏที่ทางเข้าของวงจรรขยายสัญญาณความแตกต่างที่ประกอบด้วย ออปแอมป์ A_3 จากการที่อัตราขยายของวงจรรความแตกต่างเท่ากับหนึ่ง ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออก V_0 จึงเท่ากับความต่างศักย์ไฟฟาระหว่างทางเข้า ซึ่งเท่ากับความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้า E_3 กับ E_4 ดังนั้น จากสมการ 17 และ 18 จะได้

$$V_0 = E_3 - E_4 = (E_1 - E_2) \left(1 + \frac{2}{a} \right) \quad (19)$$

จากสมการ 19 จะเห็นว่าศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรรขยายสัญญาณเครื่องมือได้มาจากการขยายสัญญาณความแตกต่างของสัญญาณทางเข้า E_1 และ E_2 โดยมีอัตราขยายเท่ากับ $1 + 2/a$ ซึ่งสามารถกำหนดอัตราขยายของเครื่องขยาย ด้วยการปรับค่าตัวต้านทานปรับค่า ที่อยู่ระหว่างจุด 1 และจุด 2 วงจรรขยายสัญญาณเครื่องมือมีความต้านทานทางเข้าสูงเท่ากับความต้านทานทางเข้าของออปแอมป์โดยตรงทำให้มีความไวสูงเหมาะที่จะใช้ในการวัดความต่างศักย์ที่เกิดจากต้นกำเนิดที่มีความต้านทานทางออกสูง

2.6 วงจรควบคุมความต้งศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ชนิดซีเนอร์ไดโอด

วงจรควบคุมความต้งศักย์ให้คงที่ (Voltage Regulator Circuit) เป็นวงจรที่อาศัยสมบัติการนำกระแสของซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode) ภาพประกอบ 20 วงจรควบคุมความต้งศักย์ให้คงที่ แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงจากเรกติไฟเออร์ ที่ผ่านการกรองด้วยวงจรกรองแล้ว หรือจากแหล่งอื่น จะต่อเข้าระหว่างขั้ว a b แรงเคลื่อนนี้จะต้งให้ความต้งศักย์สูงกว่าความต้งศักย์ซีเนอร์ของซีเนอร์ไดโอด ความต้งศักย์คร่อมบน R_L จะถูกควบคุมให้มีค่าคงที่เท่ากับ ความต้งศักย์ซีเนอร์ ความต้งศักย์ที่คร่อมบน R_S จะเท่ากับผลต่างของความต้งศักย์ E กับ V_Z ขณะที่ I_L เพิ่มขึ้น I_Z จะลดลง และขณะที่ I_L ลดลง I_Z จะเพิ่มขึ้น โดยที่ความต้งศักย์กระแสตรง V_L ที่คร่อมบนภาระ R_L จะมีค่าคงที่ เท่ากับ V_Z แม้ว่า E จะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของภาระ (Load)

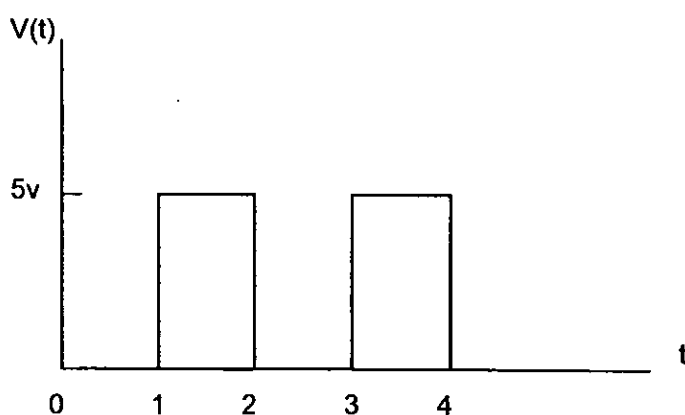


ภาพประกอบ 20 วงจรควบคุมความต้งศักย์ให้คงที่ ชนิดซีเนอร์ไดโอด

ระบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นระบบที่มีการรวบรวมเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Devices) มาประกอบต่อเข้าด้วยกันเพื่อทำหน้าที่ตามที่กำหนดให้ ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบ่งออกเป็น 2 ระบบ ดังนี้ คือ

2.7 ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบแอนะล็อก (Analog Electronic System) คือ ระบบการทำงานต่อปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องโดยตลอด (Continuous Varying Quantities) เช่น อุณหภูมิ ความต่างศักย์ไฟฟ้า ปริมาณดังกล่าว เรียกว่า ปริมาณแอนะล็อก (Analog Quantity) ซึ่งสามารถแทนค่าได้ด้วยตัวเลขจำนวนจริง ได้แก่ ปริมาณทางฟิสิกส์ เช่น ความต่างศักย์ไฟฟ้า ความยาว เวลา

2.8 ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบดิจิทัล (Digital Electronic System) คือ ระบบการทำงานต่อปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่ต่อเนื่องกัน (Discrete) สัญญาณจะมีค่าได้เฉพาะค่าที่กำหนดไว้เท่านั้น ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบดิจิทัลจะใช้สัญญาณของระบบเลขฐานสอง (Binary System) หรือระบบสองสถานะ (Two-State System) เป็นพื้นฐาน ระบบเลขฐานสองมีขีดจำกัดการนับอยู่สองสถานะ คือ 0 และ 1 ซึ่งอาจจะแทนด้วยระดับของศักย์ไฟฟ้าเช่น 0 คือความต่างศักย์ 0 โวลต์ และ 1 คือ ความต่างศักย์ 5 โวลต์ เป็นต้น ลักษณะของสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณที่มีความต่างศักย์ต่างกันสองระดับดังภาพประกอบ 21 สัญญาณนี้มีความต่างศักย์ที่กำหนดไว้สองระดับ คือ 0 โวลต์ กับ 5 โวลต์ สัญญาณมีค่า 5 โวลต์ในช่วงเวลาระหว่าง $t = 1$ ถึง 2 กับในช่วงเวลาระหว่าง $t = 3$ ถึง 4 นอกจากช่วงเวลาที่ทั้งสองนี้สัญญาณมีค่าเป็น 0 โวลต์¹



ภาพประกอบ 21 ลักษณะของสัญญาณดิจิทัล

ที่มา: ถวัลย์วงศ์ ไกรโรจนานนท์. (2542). *อิเล็กทรอนิกส์ ระบบดิจิทัล*. หน้า18.

¹ถวัลย์วงศ์ ไกรโรจนานนท์. (2542). *อิเล็กทรอนิกส์ ระบบดิจิทัล*. หน้า18.

การจัดการกับสัญญาณในทางดิจิทัลอิเล็กทรอนิกส์ใช้ระบบเลขฐานต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.8.1 ระบบเลขฐานสิบ

?

ระบบเลขฐานสิบ (Decimal System) เป็นระบบที่มีค่าประจำหลัก 10^n คือ 10^0 , 10^1 , 10^2 ... 10^n ซึ่งเลขหลักต่าง ๆ เรียกว่า หลักหน่วย หลักสิบ หลักร้อย หลักพัน ฯลฯ แต่ละหลักมีตัวเลขที่ใช้คือ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 รวม 10 ตัว ตัวเลขนี้ใช้เป็นตัวเลขของหลักนั้น ๆ เพื่อให้ได้ค่าเป็นจำนวนแทนของค่าประจำหลัก ตัวอย่างเช่น จำนวน 2373 มีความหมายว่า

	หลักพัน	หลักร้อย	หลักสิบ	หลักหน่วย
ค่าประจำหลัก	10^3	10^2	10^1	10^0
ตัวคูณ	2	3	7	3
ค่า	(2×1000)	(3×100)	(7×10)	(3×1)

ผลรวมของค่าทั้งหมด คือ $(2 \times 1000) + (3 \times 100) + (7 \times 10) + (3 \times 1) = 2373$

2.8.2 ระบบเลขฐานสอง

ระบบเลขฐานสอง (Binary System) เป็นระบบที่มีค่าประจำหลัก 2^n ระบบเลขฐานสองมีตัวเลขให้ใช้สองตัวคือ 0 กับ 1 ซึ่งตัวเลขเหล่านี้จะแสดงถึงสถานะของระบบ ปัจจุบันระบบเลขฐานสองเป็นระบบพื้นฐานของระบบดิจิทัล จำนวนหลักของเลขฐานสองเรียกว่า บิต (Bit) ย่อมาจาก Binary Digital เช่น เลขฐานสอง 8 หลัก เรียกว่า เลข 8 บิต ตัวอย่าง จำนวนเลข 1101 มีความหมายว่า

	บิตสูงสุด	...	บิตต่ำสุด	
ค่าประจำหลัก	$2^3 = (8)$	$2^2 = (4)$	$2^1 = (2)$	$2^0 = (1)$
ตัวคูณ	1	1	0	1
ค่า	(1×8)	(1×4)	(0×2)	(1×1)

ผลรวมของค่าทั้งหมด คือ $(1 \times 8) + (1 \times 4) + (0 \times 2) + (1 \times 1) = 8+4+0+1 = 13$

ค่ารวมของจำนวนเลข 1101 คือ 13 ของจำนวนเลขฐานสิบ

ระบบเลขฐานสอง	4 บิต (หลัก)	มีจำนวน	16	จำนวน
	8 บิต	“	64	จำนวน
	16 บิต	“	256	จำนวน
	:	“	:	จำนวน
	n บิต	“	2^n	จำนวน

2.9. ปฏิบัติการตรรกะ

ปฏิบัติการตรรกะ (Logic Operation) เป็นกระบวนการที่อาศัยทฤษฎีบทของพีชคณิตแบบบูลีน(Theorems in Boolean Algebra) ซึ่งเป็นทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ซึ่งนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างของวงจรดิจิทัลโดยอาศัยตัวแปร A,B หรืออื่นๆ เรียกว่าตัวแปรแบบบูลีน (Boolean Variables) ตัวแปรแต่ละตัวมีค่าได้เพียง 2 ค่า คือ 0 กับ 1 ซึ่งค่า 0 คือ ผิด (False) และ ค่า 1 คือ ถูก (True) ตัวแปรแบบบูลีนจะเป็นฟังก์ชันที่แสดงความสัมพันธ์ในเชิงตรรกะระหว่างตัวแปรแบบบูลีนแต่ละกลุ่ม ในการเขียนฟังก์ชันที่แสดงความสัมพันธ์เชิงตรรกะจะใช้เครื่องหมาย คูณ บวก ตรงข้าม แทนกระบวนการตรรกะขั้นพื้นฐาน 3 ตัว คือ AND, OR และ NOT ดังนี้

2.9.1 กระบวนการตรรกะ AND

กระบวนการตรรกะ AND ใช้สัญลักษณ์คือ \bullet แทน AND เขียนสมการได้ว่า $F = A \bullet B$ อ่านว่า $F = A \text{ AND } B$ หมายความว่า ถ้า $A = 1$ และ $B = 1$ จะได้ $F = 1$ และถ้า A,B ตัวใดตัวหนึ่งหรือทั้งคู่เท่ากับ 0 จะได้ $F = 0$ ในทางปฏิบัติให้ตัวแปร A,B เป็นตัวแปรที่แทนสถานะทางเข้า และตัวแปร F เป็นตัวแปรที่แทนสถานะทางออก ซึ่งสถานะทางเข้าจะเป็นตัวบอกสถานะที่แน่นอนของทางออกและสามารถเขียนสถานะที่เป็นไปได้ของสถานะทางเข้าและสถานะทางออกออกมาในรูปของตารางความจริง (Truth Table) ดังภาพประกอบ 22 ก.

2.9.2 กระบวนการตรรกะ OR

กระบวนการตรรกะขั้นพื้นฐาน OR ใช้สัญลักษณ์ $+$ แทน OR เขียนสมการได้ว่า $F = A + B$ อ่านว่า $F = A \text{ OR } B$ หมายความว่า ถ้า A,B ตัวใดตัวหนึ่งหรือทั้งคู่เท่ากับ 1 จะได้ $F = 1$ ถ้า $A = 0$ และ $B = 0$ จะได้ $F = 0$ และสามารถเขียนสถานะที่เป็นไปได้ของสถานะทางเข้าและสถานะทางออกในรูปของตารางความจริง (Truth Table) ดังภาพประกอบ 22 ข.

2.9.3 กระบวนการตรรกะ NOT (Invert)

กระบวนการตรรกะขั้นพื้นฐาน NOT (Invert) เป็นกระบวนการผกผันของตัวแปร ใช้สัญลักษณ์ – วางไว้บนตัวแปรนั้น สามารถเขียนสมการได้ว่า $F = \bar{A}$ หมายความว่า ถ้า $A = 0$ จะได้ $F = 1$ และถ้า $A = 1$ จะได้ $F = 0$ กล่าวคือ F และ A มีค่าตรงข้ามกัน และสามารถเขียนเป็นตารางความจริง (Truth Table) ดังภาพประกอบ 22 ค.

AND : $F = A.B$		
A	B	F
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

ก.

OR : $F = A + B$		
A	B	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

ข.

INVERT $C = \bar{A}$	
A	C
0	1
1	0

ค.

ภาพประกอบ 22 ตารางความจริงของฟังก์ชันตรรกะพื้นฐาน AND, OR และ INVERT

นอกจากนี้ยังมีฟังก์ชันที่เป็นผลสืบเนื่องมาจากฟังก์ชันพื้นฐานอีก 3 ชนิด¹ ได้แก่ NAND, NOR และ XOR (Exclusive OR) นั่นคือ

$$\text{NAND : } F = \overline{A.B}$$

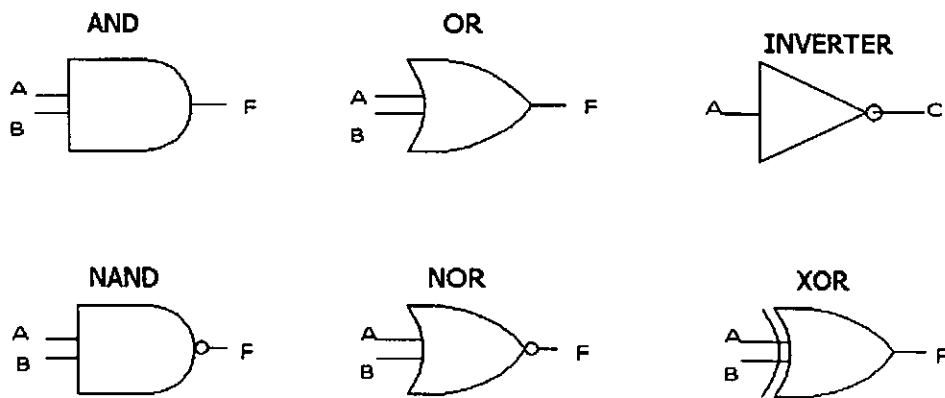
$$\text{NOR : } F = \overline{A+B}$$

XOR : $F = A \oplus B$ หมายถึง $F = 1$ เมื่อ $A = 1$ หรือ $B = 1$ (ตัวใดตัวหนึ่งเท่านั้น) แต่ถ้า $A = B = 1$ จะให้ $F = 0$

¹ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ (2542). อิเล็กทรอนิกส์ ระบบดิจิทัล. หน้า 37.

2.9.4 รากฐานสำคัญของเกท

เกท (Gates) เป็นอุปกรณ์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการตัดสินใจระบบเลขฐานสองของวงจรดิจิทัล เกทเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เฉพาะอย่างตามฟังก์ชันตรรกะ โดยอาศัยหลักการตามกระบวนการพื้นฐานของพีชคณิตแบบบูลีน เกทมี 6 แบบ ดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 เกทแบบต่างๆ

ที่มา: ถวัลย์วงศ์ ไกรโรจนานนท์.(2542). *อิเล็กทรอนิกส์ ระบบดิจิทัล*.หน้า 39.

วงจรตรรกะที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายตระกูล ดังนี้

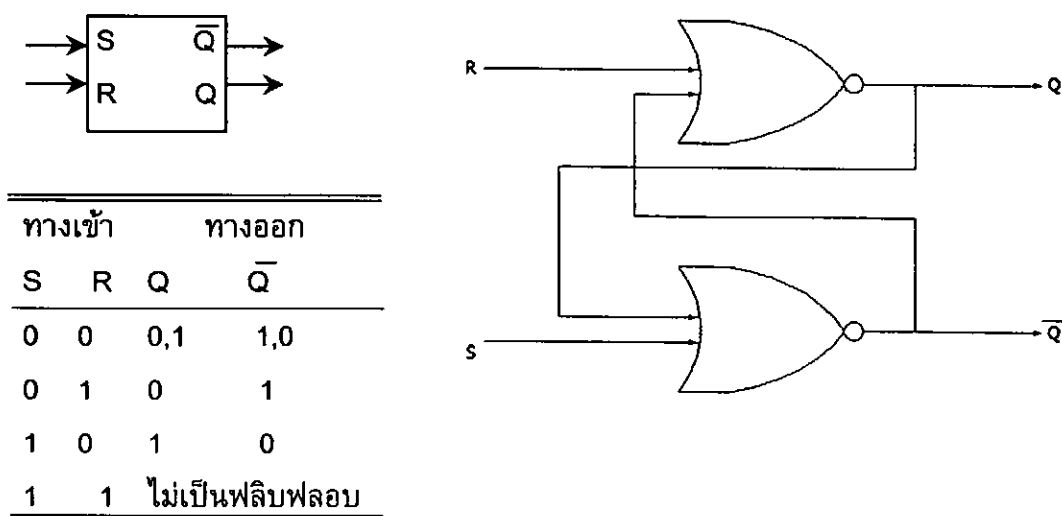
- RLT -Resistor-transistor Logic
- DTL -Diode-Transistor Logic
- TTL -Transistor –Transistor Logic
- ECL -Emitter Coupled Logic
- MOS -Metal-Oxide-Semiconductor Logic
- CMOS -Complementary Metal-Oxide-Semiconductor-Logic
- I²L -Integrated Injection Logic

ตระกูลหนึ่งของวงจรรวมที่ใช้ในการทดลองคือ ตระกูล Complementary Metal-Oxide-Semiconductor-Logic หรือเรียกอีกอย่างว่า ซีมอส (CMOS) ตระกูลนี้มีโครงสร้างเป็นแบบ P-channel และ N-channel ต่ออนุกรมกันตัวอยู่บนชิปซิลิคอนเดียวกัน ซีมอสมีวงจรรวมเป็นแบบ อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ซึ่ง P-channel และ N-channel จะทำงานตรงข้ามกันตลอดเวลา คือ ถ้า P-channel นำกระแส N-channel จะไม่นำกระแส ซีมอสมีกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในเกทต่ำมากทำให้ซีมอสมีความเร็วในการเปลี่ยนสถานะทางออกสูงและกินไฟน้อย

2.9.5 แลตช์และฟลิปฟลอป

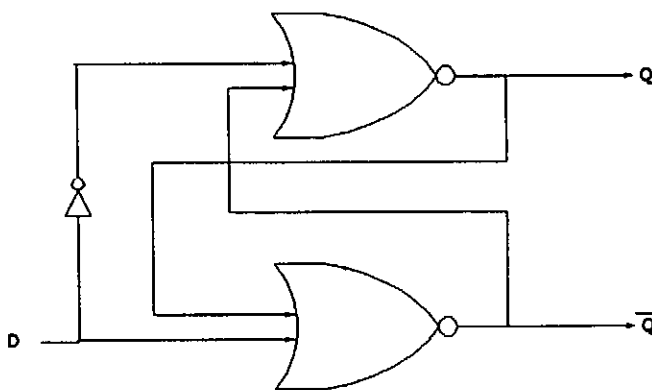
2.9.5.1 แลตช์ (Latches) เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานบนหลักการขั้นพื้นฐานของฟลิปฟลอป ซึ่งประกอบด้วยวงจรรวมที่ใช้เกทแบบต่างๆมาต่อรวมกัน แลตช์ มีสถานะทางออกที่เสถียรสองสถานะ การเปลี่ยนสถานะของทางออกเกิดจากการกระตุ้นของสัญญาณทางเข้า แลตช์มีหลายแบบดังนี้

2.9.5.1.1 เอสอาร์ แลตช์ (SR Latch) เป็นวงจรรวมพื้นฐานประกอบด้วยฟลิปฟลอปมีทางเข้าสองทาง คือ S กับ R และทางออกสองทาง คือ \bar{Q} กับ Q อาร์เอส แลตช์ใช้ ฟลิปฟลอปที่ประกอบขึ้นจาก นอร์เกท (NOR gate) มีสัญญาณที่เป็นไปได้ของทางเข้าและทางออกแสดงด้วยตารางความจริง ดังภาพประกอบ 24



ภาพประกอบ 24 ลักษณะของ อาร์เอส แลตช์ และตารางความจริง

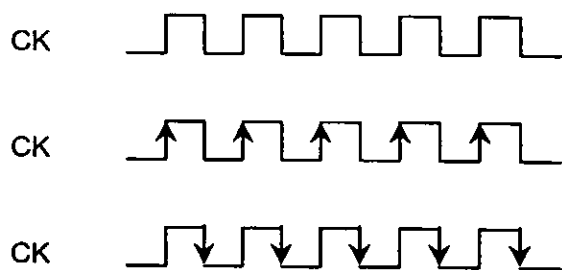
2.9.5.1.2 ดีเลย์ แลตช์ (Delay Latch) เกิดจากการนำอาร์เอส แลตช์ มาดัดแปลงโดยการนำอินเวอร์เตอร์มาต่อเชื่อมระหว่างนอร์เกทที่มีสัญญาณที่เป็นไปได้ของทางเข้าและทางออกแสดงด้วยตารางความจริง ดังภาพประกอบ 25 ลักษณะของ ดีเลย์ แลตช์ และตารางความจริง



ทางเข้า	ทางออก	
D	Q	\overline{Q}
0	0	1
1	1	0

ภาพประกอบ 25 ลักษณะของดีเลย์ แลตช์ และตารางความจริง

2.9.5.2 ฟลิปฟลอป (Flip Flop) เป็นวงจรรีเลย์ทรอนิกส์พื้นฐานที่มีการประยุกต์ใช้ในกระบวนการเก็บข้อมูลของระบบดิจิทัล ฟลิปฟลอปประกอบด้วยวงจรรรเกที่ใช้เกทแบบต่างๆมาต่อกัน ฟลิปฟลอปมีสถานะทางออกที่เสถียรสองสถานะ การเปลี่ยนสถานะของทางออกเกิดจากการกำหนดสถานะของสัญญาณทางเข้า ฟลิปฟลอปบางชนิดเปลี่ยนสถานะโดยอาศัยสัญญาณนาฬิกาเป็นสัญญาณกระตุ้นที่ขา CK สัญญาณนาฬิกาจะเป็นพัลส์ที่มีลักษณะสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งการกระตุ้นมีสองลักษณะ คือ การกระตุ้นแบบขอบขาขึ้น (Rising Edges, Positive Edges) และการกระตุ้นด้วยขอบขาลง (Falling Edges, Negative Edges) ดังภาพประกอบ 26 ซึ่งแสดงลักษณะของสัญญาณนาฬิกาที่เป็นารกระตุ้นด้วยขอบขาขึ้นและการกระตุ้นด้วยขอบขาลง

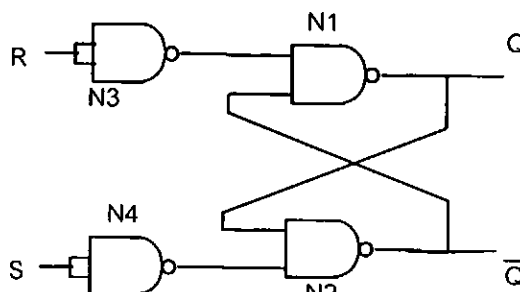


ภาพประกอบ 26 ลักษณะของสัญญาณนาฬิกาที่มีการกระตุ้นด้วยขอบขาขึ้นและการกระตุ้นด้วยขอบขาลง

ฟลิปฟลอปมีหลายชนิดซึ่งแตกต่างกันตามการตอบสนองต่อการกำหนดสถานะทางเข้าและจุดมุ่งหมายในการใช้งาน

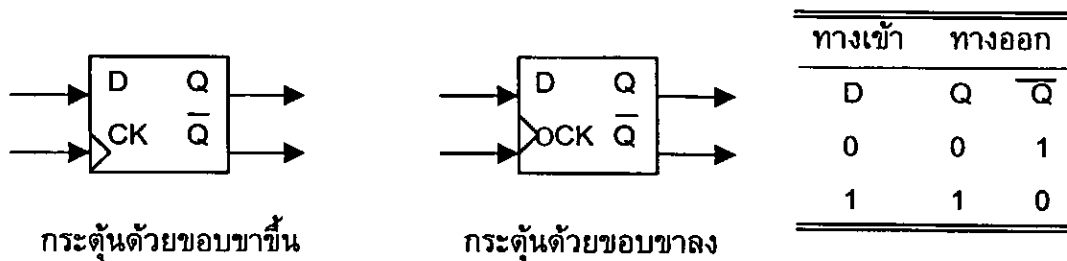
2.9.5.2.1 อาร์เอส ฟลิปฟลอป (RS Flip Flop) เป็นวงจรตามที่แสดงในภาพประกอบ 27 มี N_1, N_2 เป็น แนนด์ เกท (NAND gate) แบบสองทางเข้า ทางเข้าหนึ่งใช้สำหรับการป้อนกลับสัญญาณ ส่วนอีกทางเข้าหนึ่งใช้รับสัญญาณจากภายนอกที่ผ่าน N_3 และ N_4 ซึ่งทำหน้าที่เป็นอินเวอร์เตอร์ ทางเข้าของ N_3, N_4 คือ S : Set และ R : Rest ตามลำดับ สมมติให้ $S = 1, R = 0$ ซึ่งให้ $Q = 1$ กล่าวได้ว่า การกำหนดให้ทางออก Q เป็น 1 เรียกว่า การทำให้ฟลิปฟลอปอยู่ในสถานะ Set ซึ่งทำได้โดยการป้อนทางเข้า $S = 1, R = 0$ และการทำให้ $Q = 0$ เรียกว่า การทำให้ฟลิปฟลอปอยู่ในสถานะ Reset ทำโดยการป้อนทางเข้า $S = 0, R = 1$ สำหรับกรณี $S = R = 0$ ฟลิปฟลอปจะคงสถานะเดิม ส่วนกรณี $S = R = 1$ จะทำให้ทางออกไม่แน่นอน เรียกว่าอยู่ในสถานะ Indeterminate หรือ Forbidden ถือว่าไม่เป็นฟลิปฟลอป ซึ่งค่าของทางเข้าและทางออกแสดงด้วยตารางความจริง ดังภาพประกอบ 27

ทางเข้า		ทางออก	
R	S	Q	\bar{Q}
0	0	0,1	1,0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	ไม่เป็นฟลิปฟลอป	



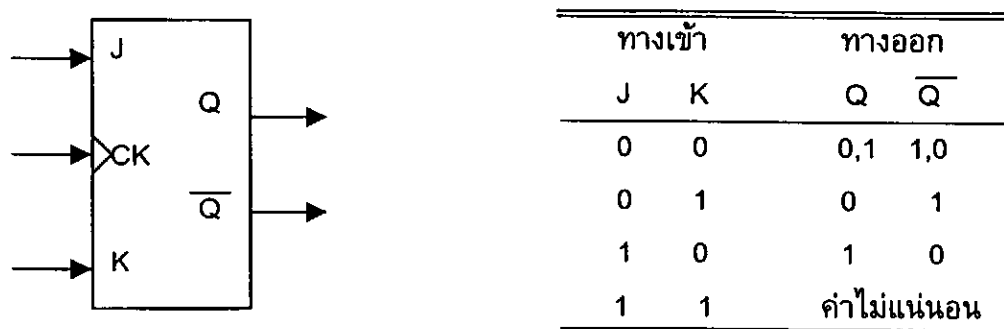
ภาพประกอบ 27 วงจร RS Flip-flop

2.9.5.2.2 ดี ฟลิปฟลอป (D Flip Flop) เป็นลักษณะของฟลิปฟลอปที่มีการกระตุ้นด้วยสัญญาณนาฬิกาแบบกระตุ้นขอบขาขึ้นและกระตุ้นด้วยขอบขาลง แสดงค่าตารางความจริง ดังภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 ลักษณะของดีฟลิปฟลอปที่มีการกระตุ้นแบบกระตุ้นขอบขาขึ้นและกระตุ้นด้วยขอบขาลง

2.9.5.2.3 เจเค ฟลิปฟลอป (JK Flip Flop) เป็นฟลิปฟลอปที่มีการเปลี่ยนสถานะของทางออกเกิดจากการกระตุ้นของสัญญาณทางเข้าโดยอาศัยสัญญาณนาฬิกากระตุ้นที่ขา CK สถานะที่เป็นไปได้ของทางเข้าและทางออกสามารถเขียนในรูปของตารางความจริงดังภาพประกอบ 29 ลักษณะของเจเคฟลิปฟลอป และตารางความจริง



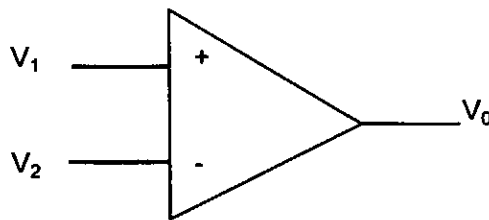
ภาพประกอบ 29 ลักษณะของเจเคฟลิปฟลอป และตารางความจริง

2.10 หน่วยความจำเก็บรักษาข้อมูล

หน่วยความจำเก็บรักษาข้อมูลมีหลายประเภท ได้แก่ หน่วยความจำชนิดสแตทิก (Static RAM) เป็นหน่วยความจำที่สามารถเก็บข้อมูลและข้อมูลคงอยู่ได้เมื่อมีไฟฟ้าให้กับวงจร วงจรภายในประกอบด้วยวงจรฟลิปฟล็อปที่เป็นแบบ MOS หรือ CMOS หน่วยความจำชนิดไดนามิก (Dynamic RAM) เป็นหน่วยความจำที่สามารถเก็บข้อมูลได้และข้อมูลค่อยๆเลือนหายไปแล้วมีการกลับสู่สภาพเดิมมีการอ่านและเขียนค่าเดิมกลับเข้ามาใหม่อีกครั้ง เรียกว่า รีเฟรช (Refresh) หน่วยความจำรอม (ROM : Read Only Memory) เป็นหน่วยความจำที่เก็บข้อมูลได้ครั้งเดียวเป็นการเก็บข้อมูลอย่างถาวร นอกจากนี้ยังมีหน่วยความจำชนิดอีอีพรอม สามารถเก็บข้อมูลไว้ได้ในขณะที่ไม่มีไฟฟ้าเลี้ยงวงจร หน่วยความจำนี้เป็นหน่วยความจำที่ใช้สำหรับเก็บโปรแกรมหรือข้อมูลที่ไม่ต้องการให้สูญหายเมื่อไม่มีไฟฟ้าเลี้ยงวงจร สามารถบันทึกข้อมูลซ้ำได้

2.11 การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

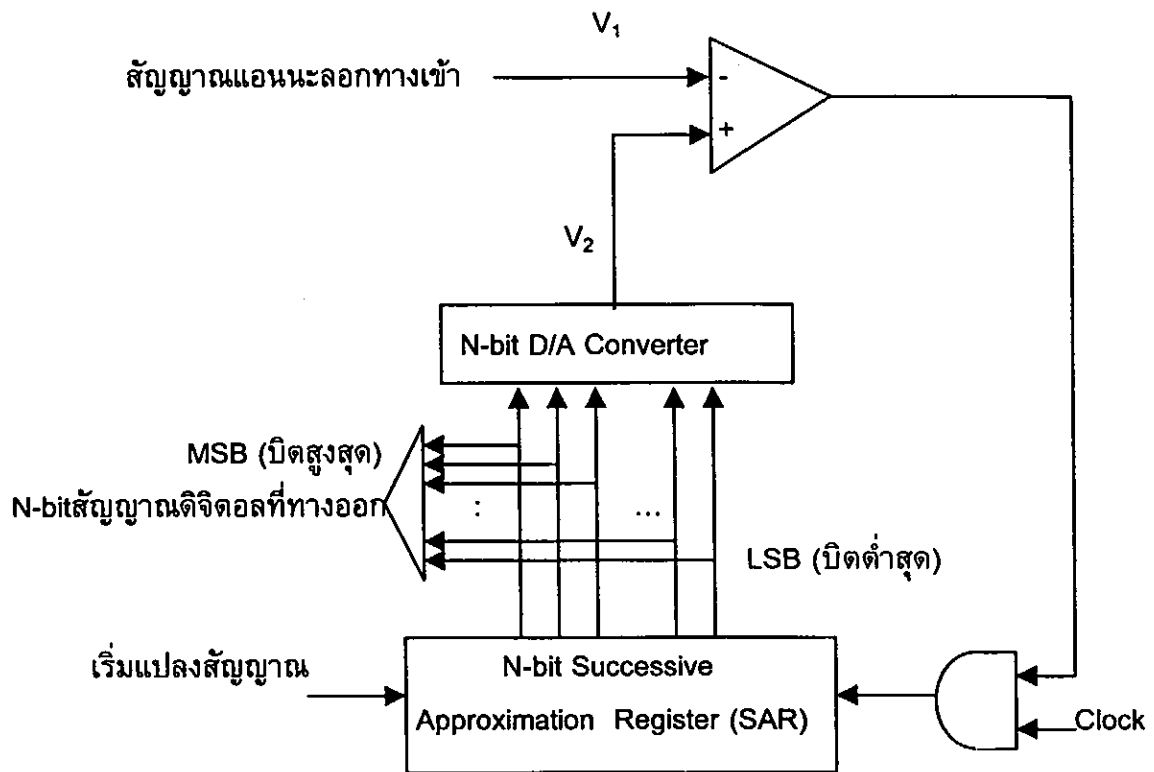
การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter) หรือ A/D Converter กระทำได้โดยใช้วงจรที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกซึ่งเป็นสัญญาณที่เป็นปริมาณต่อเนื่องไปเป็นสัญญาณเชิงตัวเลขหรือดิจิทัล ภาพประกอบที่ 30 เป็นการใช้ออปแอมป์เพื่อเปรียบเทียบความต่างศักย์แอนะล็อก โดยที่ออปแอมป์จะทำการเปรียบเทียบความต่างศักย์แอนะล็อกที่ทางเข้าบวก (V_1) กับความต่างศักย์ที่ทางเข้าลบ (V_2) ซึ่งการเปรียบเทียบความต่างศักย์นี้เป็นส่วนหนึ่งของวงจรการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบการประมาณอย่างเป็นลำดับ (Successive Approximation A/D Converter)



ภาพประกอบ 30 วงจรออปแอมป์เปรียบเทียบความต่างศักย์

ปัจจุบันมีการสร้างวงจรรวมให้ทำหน้าที่เป็นวงจรการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งมีไม่น้อยกว่า 300 หมายเลข แต่ละหมายเลขมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน¹ การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล มีหลายแบบทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแม่นยำ ความเร็วที่ต้องการและราคา แต่ที่จะกล่าวในที่นี้ คือ การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบการประมาณอย่างเป็นลำดับ (Successive Approximation A/D Converter) ดังภาพประกอบ 31 วงจรนี้ใช้ วงจรการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (Digital to Analog Converter) หรือ D/A Converter ทำหน้าที่ในการแปลงปริมาณดิจิทัลเป็นปริมาณแอนะล็อกเพื่อใช้เป็นความต่างศักย์ในการเปรียบเทียบกับสัญญาณแอนะล็อกที่ทางเข้าว่า ความต่างศักย์ของสัญญาณแอนะล็อกที่ทางเข้าสูงกว่าหรือต่ำกว่าความต่างศักย์เปรียบเทียบที่เกิดจาก D/A Converter ถ้าความต่างศักย์เปรียบเทียบจาก D/A Converter ต่ำกว่าสัญญาณความต่างศักย์แอนะล็อกที่ทางเข้า จะได้สัญญาณที่ทางออกมีสถานะเป็น Low (0) แต่ถ้าความต่างศักย์เปรียบเทียบจาก D/A Converter สูงกว่าสัญญาณความต่างศักย์แอนะล็อกที่ทางเข้า จะได้สัญญาณออกทางออกมีสถานะเป็น High (1)

¹จิววัฒน์ โจอ่อนน้อม และ นักทร วัจนเทพินทร์. (2541). วงจรดิจิทัลภาคปฏิบัติ รหัส 3104-2003 .หน้า 195-196.



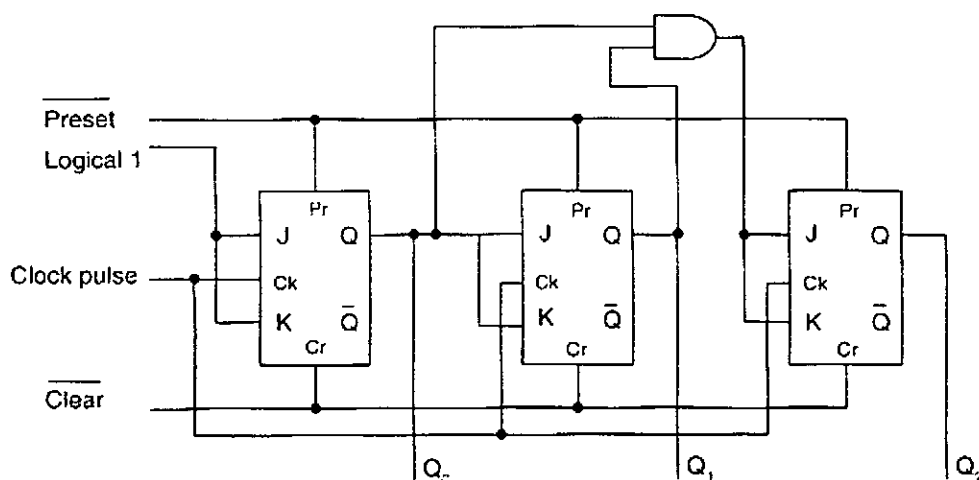
ภาพประกอบ 31 ลักษณะวงจรการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบการประมาณอย่างเป็นลำดับ

ที่มา: Peebles Peyton, Z,Jr. Giama Tayeb,A. (1991). *Principles of Electrical Engineering*.

2.12 วงจรนับ

วงจรถับ (Counter Circuits) เป็นวงจรถับที่นำฟลิปฟลอปมาใช้ประกอบในการทำหน้าที่นับจำนวนเหตุการณ์หรือปรากฏการณ์ของค่าที่ทำการนับอยู่ ซึ่งจะแสดงค่าผลลัพธ์ของการนับออกมาเป็นข้อมูลทางดิจิทัล วงจรถับแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ วงจรถับแบบซิงโครนัส และ วงจรถับแบบอะซิงโครนัส

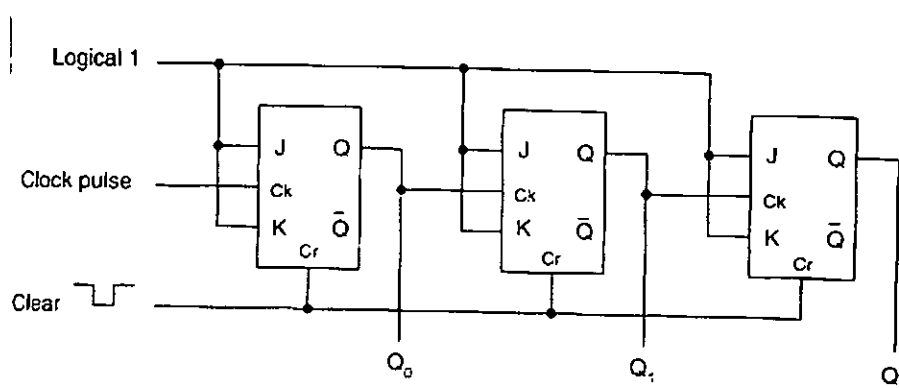
2.12.1 วงจรถับแบบซิงโครนัส (Synchronous Counters) คือ เป็นวงจรถับที่ทำการนับจำนวนเหตุการณ์โดยอาศัยการกระตุ้นของสัญญาณนาฬิกาเพื่อทำหน้าที่กำหนดจังหวะของการเปลี่ยนแปลงสถานะของฟลิปฟลอปทุกตัวพร้อมกัน โดยที่สัญญาณนาฬิกาจะต่อเชื่อมกับขั้ว CK ของฟลิปฟลอปทุกตัว ฟลิปฟลอปแต่ละตัวจะมีการเปลี่ยนสถานะได้ก็ต่อเมื่อสัญญาณนาฬิกามีการเปลี่ยนสถานะจาก 1 เป็น 0 เท่านั้น ไม่ว่าที่ขั้ว J และ K ของฟลิปฟลอปมีการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างไร วงจรถับแบบซิงโครนัสมีความแม่นยำในการทำงานสูงกว่าวงจรถับแบบอะซิงโครนัส เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของฟลิปฟลอปแต่ละครั้งจะขึ้นกับจังหวะของการเปลี่ยนสัญญาณนาฬิกาเดียวกัน ดังภาพประกอบ 32 ลักษณะของวงจรถับแบบซิงโครนัส



ภาพประกอบ 32 วงจรถับเลขฐานสองแบบซิงโครนัส โดยใช้เจเคฟลิปฟลอป

ที่มา: ถวัลย์วงศ์ ไกรโรจนานนท์. (2542). อิเล็กทรอนิกส์ ระบบดิจิทัล. หน้า 168.

2.12.2 วงจรนับแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous Counters) หรือบางครั้งเรียกว่า วงจรนับแบบริปเปิล (Ripple Counter) วงจรนับแบบอะซิงโครนัสเป็นการนับจำนวนเหตุการณ์ที่เข้ามาโดยการเปลี่ยนสถานะของฟลิปฟลอปแต่ละตัวจะขึ้นอยู่กับสถานะของฟลิปฟลอปตัวที่อยู่ก่อนหน้าเพียงตัวเดียว วงจรนับแบบอะซิงโครนัส ได้แก่ วงจรนับเลขฐานสอง (Binary Counter Circuit), วงจรนับแบบ BCD (Binary Coded Decimal Counter Circuits), วงจรนับแบบขึ้น / ลง เป็นต้น ซึ่งวงจรนับเหล่านี้จะให้ผลลัพธ์เป็นรหัสแบบต่างๆ เช่น รหัสแบบเลขฐานสอง , รหัสเลขแบบ BCD เป็นต้น จากภาพประกอบ 33 วงจรนับเลขฐานสองแบบอะซิงโครนัส วงจรนับเลขฐานสองนี้ เป็นวงจรนับที่ใช้อาศัยคุณสมบัติของ JK Flip-Flop จำนวน 3 ตัว วงจรนับทำการนับจำนวนลูกคลื่นนาฬิกา (Clock Pulse) โดยแสดงผลลัพธ์ของการนับเป็นค่าตัวเลขฐานสอง ที่ขั้ว Q_0 , Q_1 , Q_2 ตามลำดับ การทำงานของวงจรนับเมื่อป้อนสัญญาณสถานะ 1 เข้าที่ขั้ว J และ K พร้อมกับสัญญาณนาฬิกาเข้าที่ขั้ว CK ฟลิปฟลอปจะทำการเปลี่ยนแปลงสถานะของตัวเองแบบกลับไปกลับมา (Toggle) ทุกครั้งที่มีสัญญาณนาฬิกาป้อนเข้ามา 1 ลูก โดยก่อนที่จะเริ่มทำการนับกำหนดให้สถานะฟลิป ฟลอปทุกตัวเป็น 0 เมื่อสัญญาณ CK ของฟลิปฟลอปตัวแรกเปลี่ยนจากสถานะ 1 มาเป็น 0 แล้วเปลี่ยนกลับเป็น 1 จะทำให้ Q_0 ของฟลิปฟลอปตัวแรกเปลี่ยนจากสถานะ 0 เป็น 1 โดยที่ ฟลิปฟลอปตัวอื่นๆยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ การเปลี่ยนสถานะของฟลิปฟลอปแต่ละตัวจะเกิดขึ้นทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนสถานะ CK จาก 0 เป็น 1



ภาพประกอบ 33 วงจรนับเลขฐานสองแบบอะซิงโครนัส

ที่มา: ถวัลย์วงศ์ ไกรโรจนานนท์. (2542). อิเล็กทรอนิกส์ ระบบดิจิทัล. หน้า 161.

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

จากการรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการศึกษาเอกสารต่าง ๆ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรต่าง ๆ ที่ใช้ร่วมกับเทนซีโอมิเตอร์ ผู้วิจัยได้ออกแบบเทนซีโอมิเตอร์ รวมทั้งวงจรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบการวัดและระบบแสดงผลความดันสัญญาณภาคในการทดลองการทำงานดังรายละเอียดตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. การออกแบบเทนซีโอมิเตอร์วัดค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน
2. การทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล
3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. การออกแบบเทนซีโอมิเตอร์ วัดค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน

การออกแบบเทนซีโอมิเตอร์ วัดค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน มี 3 ขั้นตอน คือ

- 1.1 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างเทนซีโอมิเตอร์
- 1.2 ขั้นตอนการออกแบบวงจรระบบวัดและแสดงผลการวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน
- 1.3 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมเพื่อทำการเก็บค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน

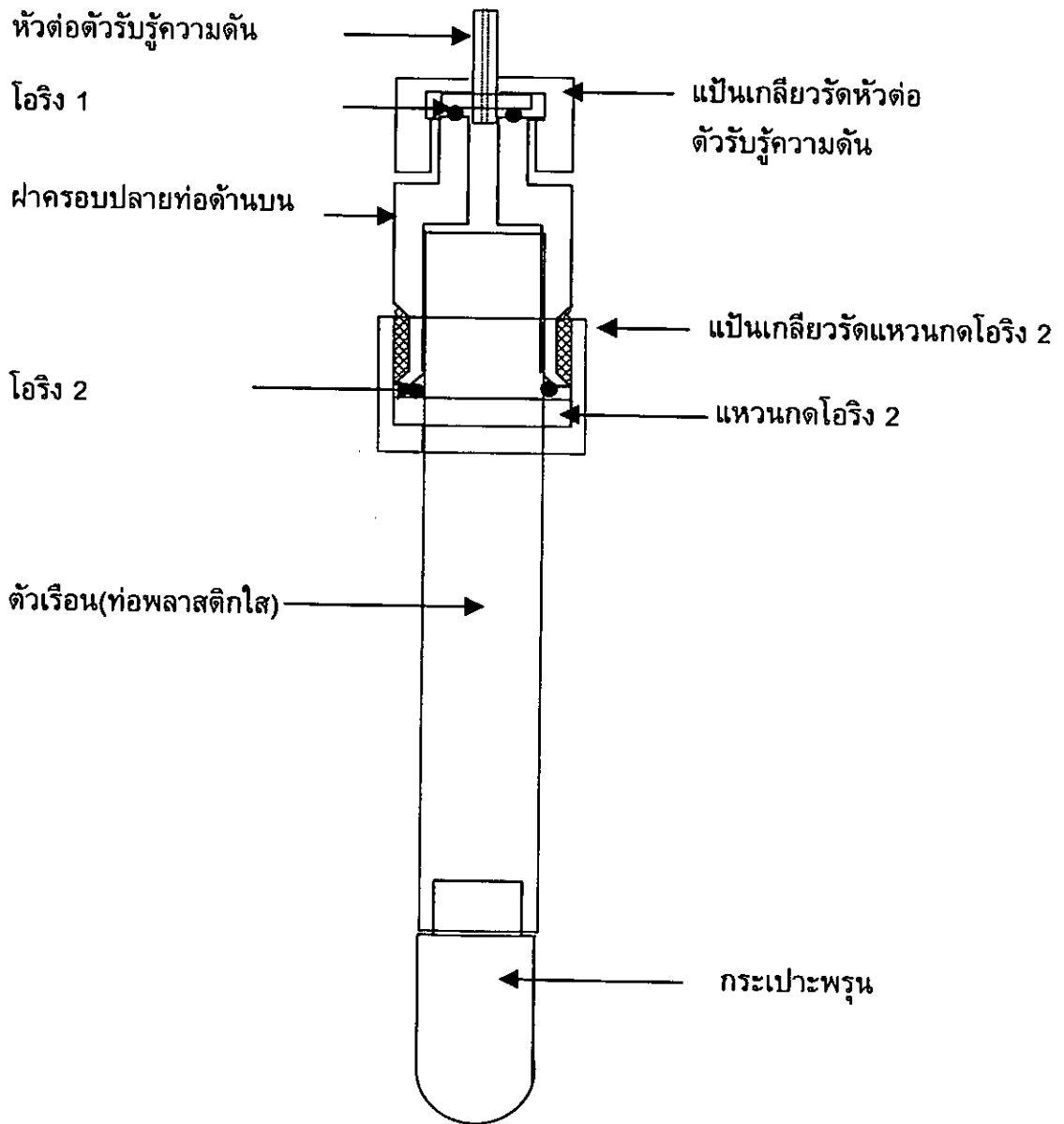
1.1 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างเทนซีโอมิเตอร์

ผู้วิจัยออกแบบและสร้างเทนซีโอมิเตอร์ ดังภาพประกอบ 34 มีส่วนประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1.1.1 ตัวเรือนเป็นท่อพลาสติกที่มีความเหนียว ใส มองเห็นระดับน้ำมีความยาวทั้งหมด 26.00 เซนติเมตร ความหนา 0.25 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.28 เซนติเมตร

1.1.2 ฝาปิดสัญญาณทำจากพลาสติกที่มีความเหนียวมีการฉีกแบบป้องกันการรั่วซึมของอากาศ ฝาปิดสัญญาณประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

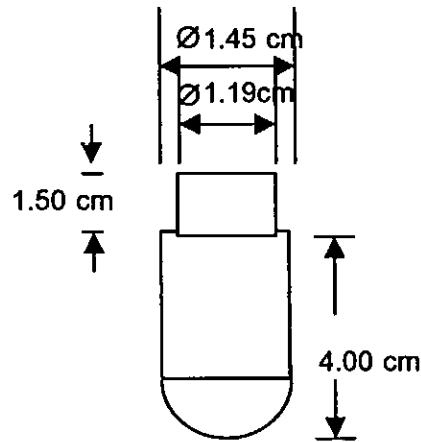
- 1.1.2.1 หัวต่อตัวรับรู้ความดัน
- 1.1.2.2 โอริง 1
- 1.1.2.3 ฝาครอบปลายท่อด้านบน
- 1.1.2.4 โอริง 2
- 1.1.2.5 แป้นเกลียวรัดหัวต่อตัวรับรู้ความดัน
- 1.1.2.6 แป้นเกลียวรัดแหวนกดโอริง 2
- 1.1.2.7 แหวนกดโอริง 2



ภาพประกอบ 34 ลักษณะของเทนซิโอมิเตอร์ที่ผู้วิจัยออกแบบ

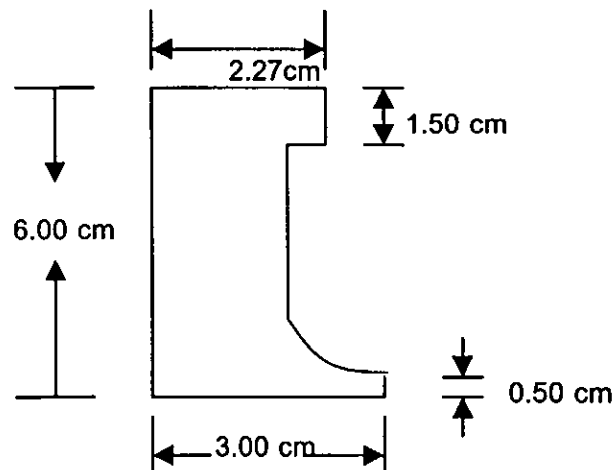
1.1.3 กระเปาะพรุณมีความพรุณเหมาะสมแก่การวัดศักย์วัสดุพื้นโดยสามารถใช้วัดความดันต่ำสุดในช่วงประมาณ -0.70 ถึง -0.80 บาร์ มีขั้นตอนการสร้าง ดังนี้

1.1.3.1 สร้างแบบพลาสติกอร์โดยการนำพลาสติกที่มีความเหนียวไปกลิ้งให้มีลักษณะรูปร่างเหมือนกระเปาะที่ผู้วิจัยออกแบบไว้ ดังภาพประกอบ 35

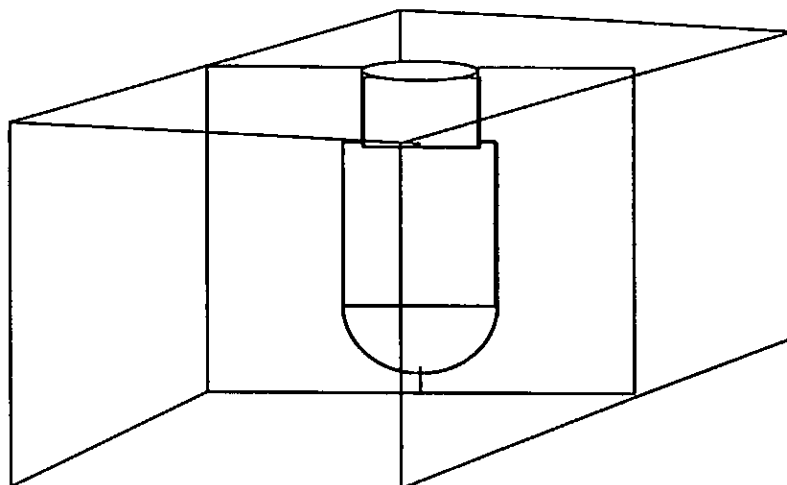


ภาพประกอบ 35 รูปร่างลักษณะของกระเปาะพรุณ

1.1.3.2 ตัดกระดาษแข็ง ดังภาพประกอบ 36 จำนวน 2 แผ่น เพื่อสร้างแบบพลาสติกอร์ที่สามารถแยกส่วนได้แล้วนำกระเปาะใส่ลงไปในกลุ่มกระดาษสี่เหลี่ยมเปิดด้านบน ขนาดความกว้าง 6.00 เซนติเมตร ความยาว 6.00 เซนติเมตร ความสูง 6.00 เซนติเมตร พร้อมกับเสียบกระดาษแข็งลงไปในกลุ่ม 2 แผ่น ด้านละแผ่น ดังภาพประกอบ 37



ภาพประกอบ 36 ลักษณะการตัดกระดาษแข็งจำนวน 2 แผ่น



ภาพประกอบ 37 ลักษณะการจัดกล่องสำหรับทำเป็นแบบพลาสติก

1.1.3.3 นำน้ำผสมกับปูนปลาสเตอร์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1.5 คนให้เข้ากัน แล้วเทปูนปลาสเตอร์ลงในกล่องสี่เหลี่ยมที่จัดเตรียมไว้ ดังภาพประกอบ 37 หลังจากนั้นทิ้งไว้ 1 วัน ให้ปูนปลาสเตอร์แข็งตัวและแห้ง

1.1.3.4 แกะแบบออกก็จะได้แบบพลาสติกที่สามารถแยกส่วนได้

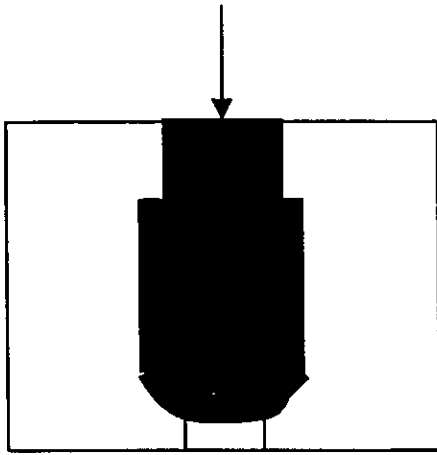
1.1.3.5 นำดินขาวสำปางผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 คนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้ดินตกตะกอนซึ่งใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง แล้วเทน้ำด้านบนออกเหลือเฉพาะน้ำดินที่ตกตะกอนแล้วนำไปเทในแบบพลาสติกที่ประกอบแบบเตรียมไว้จนเต็ม ทิ้งไว้ 1 นาที เพื่อให้ดินขาวเกาะติดแบบพลาสติก ดังภาพประกอบ 38 รูป ก จากนั้นเทน้ำดินออกจากแบบพลาสติก ดังภาพประกอบ 38 รูป ข

1.1.3.6 แต่งปากกระเปาะให้เรียบตามต้องการ ดังภาพประกอบ 38 รูป ค หลังจากนั้นทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เพื่อให้ดินขาวแห้ง

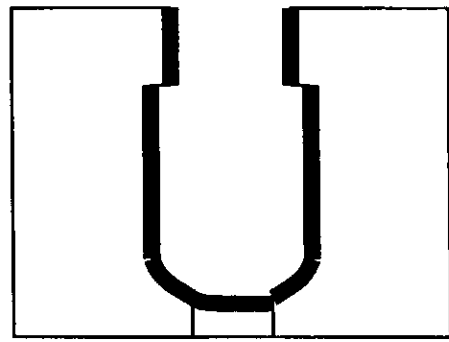
1.1.3.7 แกะแบบพลาสติกออกก็จะได้กระเปาะที่ทำจากดินขาวตามที่ออกแบบ ดังภาพประกอบ 38 รูป ง

1.1.3.8 นำกระเปาะดินขาวเข้าเตาเผาไฟฟ้า ตั้งอุณหภูมิของเตาเผาไฟฟ้าไว้ที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเตาเผาไฟฟ้าครั้งละ 200 องศาเซลเซียส ทุก 1 ชั่วโมง จนอุณหภูมิเตาเผาไฟฟ้าถึง 1050 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 2 ชั่วโมง ปรับลดอุณหภูมิเตาเผาไฟฟ้าเป็น 25 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 1 คืน จะได้กระเปาะพูนที่ออกแบบให้ความเหมาะสมกับการวัดศักย์วัสดุพื้น สามารถใช้วัดความดันต่ำสุดในช่วงประมาณ -0.7 ถึง -0.8 บาร์

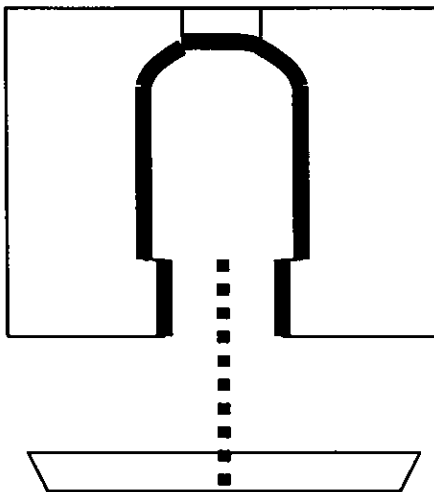
น้ำดินที่ตกลงในแบบพลาสติก



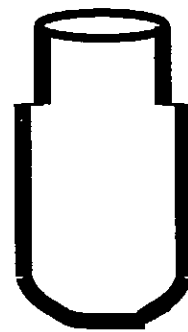
รูป ก น้ำดินที่ตกลงในแบบพลาสติก



รูป ค ตกแต่งขอบให้เรียบ



รูป ข เทน้ำดินออกจากแบบพลาสติกเหลือดินที่เกาะติดผนัง

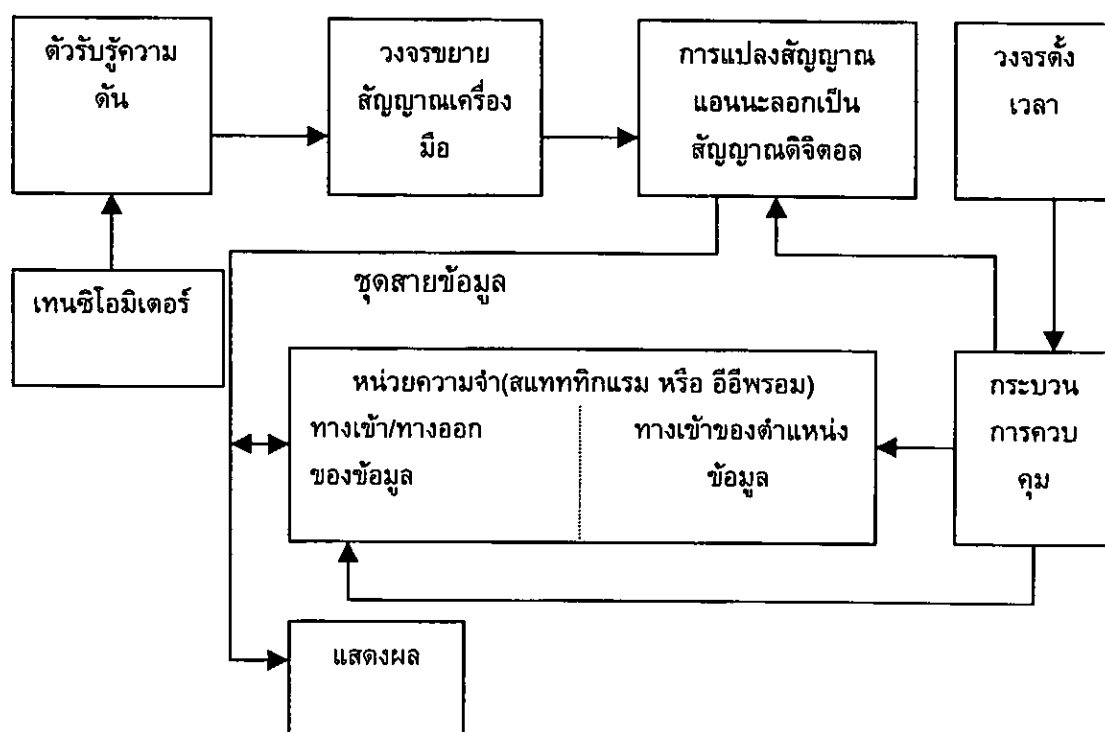


รูป ง กระเปาะที่ได้จากการแกะแบบพลาสติก

ภาพประกอบ 38 ลักษณะการเทน้ำดินขาวลงในแบบพลาสติก

1.2 ขั้นตอนการออกแบบวงจรระบบวัดและแสดงผลการวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน

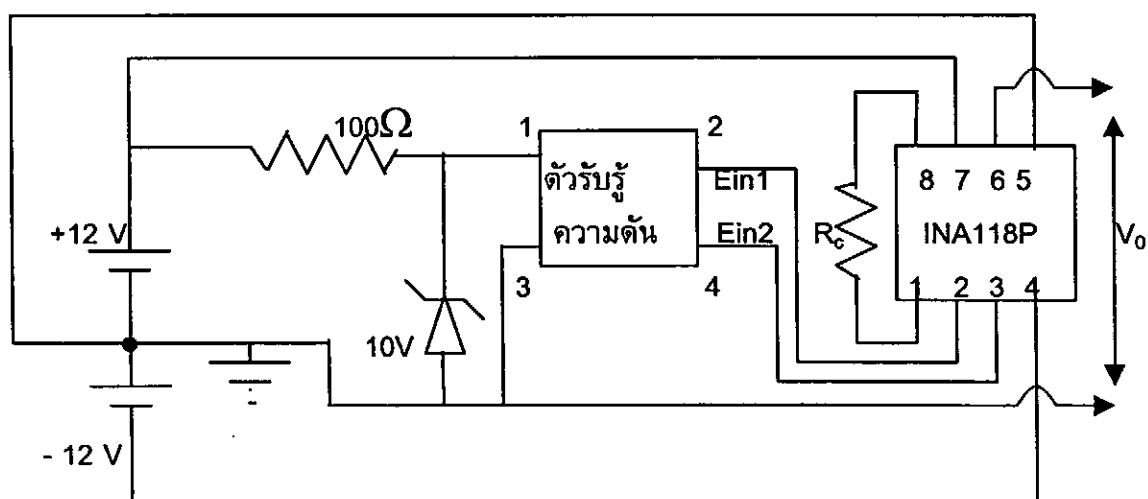
ระบบการวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน ได้ออกแบบให้มีแผนภาพแสดงการทำงานดังภาพประกอบ 39 การทำงานของเทนซิโอมิเตอร์ เริ่มจากเมื่อน้ำเคลื่อนที่จากกระเปาะพรุนของเทนซิโอมิเตอร์ผ่านไปยังดิน ส่งผลทำให้เกิดความดันสุญญากาศเหนือระดับน้ำภายในท่อพลาสติกใส ตัวรับรู้ความดันจะวัดความดันสุญญากาศเหนือระดับน้ำภายในท่อพลาสติกใสออกมาในรูปของสัญญาณไฟฟ้า มีขนาดความต่างศักย์ไฟฟ้าในหน่วยมิลลิโวลต์ สัญญาณไฟฟ้าจะถูกขยายสัญญาณเครื่องมือกระทำการขยายสัญญาณ 19.5 เท่า จะได้ขนาดความต่างศักย์ไฟฟ้าในหน่วยโวลต์ สัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณแอนะล็อก หลังจากนั้นสัญญาณแอนะล็อกที่ได้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยวงจรการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ข้อมูลที่ได้จากการแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลจะไปปรากฏบนชุดสายข้อมูล (Bus) เพื่อที่จะรอคำสั่งจากกระบวนการควบคุมในการสั่งเก็บบันทึกข้อมูล ในขณะที่เดียวกันวงจรตั้งเวลาจะสร้างสัญญาณนาฬิกาแล้วป้อนสัญญาณนาฬิกาเข้ามาที่กระบวนการควบคุมทำให้กระบวนการควบคุมรับรู้ช่วงเวลาในการเก็บบันทึกข้อมูลหลังจากนั้นกระบวนการควบคุมจะสร้างแอดเดรสและป้อนแอดเดรสส่งไปที่หน่วยความจำทำให้ข้อมูลถูกบันทึกลงในหน่วยความจำ เมื่อข้อมูลถูกบันทึกลงในหน่วยความจำข้อมูลที่ถูกรับบันทึกจะมีแอดเดรสกำกับอยู่ เมื่อต้องการที่จะอ่านข้อมูลกระบวนการควบคุมจะสร้างคำสั่งในการอ่านข้อมูลตามแอดเดรสที่ข้อมูลถูกจัดเก็บในหน่วยความจำเพื่อให้มีการแสดงผล ซึ่งการแสดงผลจะแสดงเป็นตัวเลข LED (Light Emitting Diode)



ภาพประกอบ 39 แผนภาพการทำงานของเทนซิโอมิเตอร์ ที่ผู้วิจัยออกแบบขึ้น

1.2.1 วงจรแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

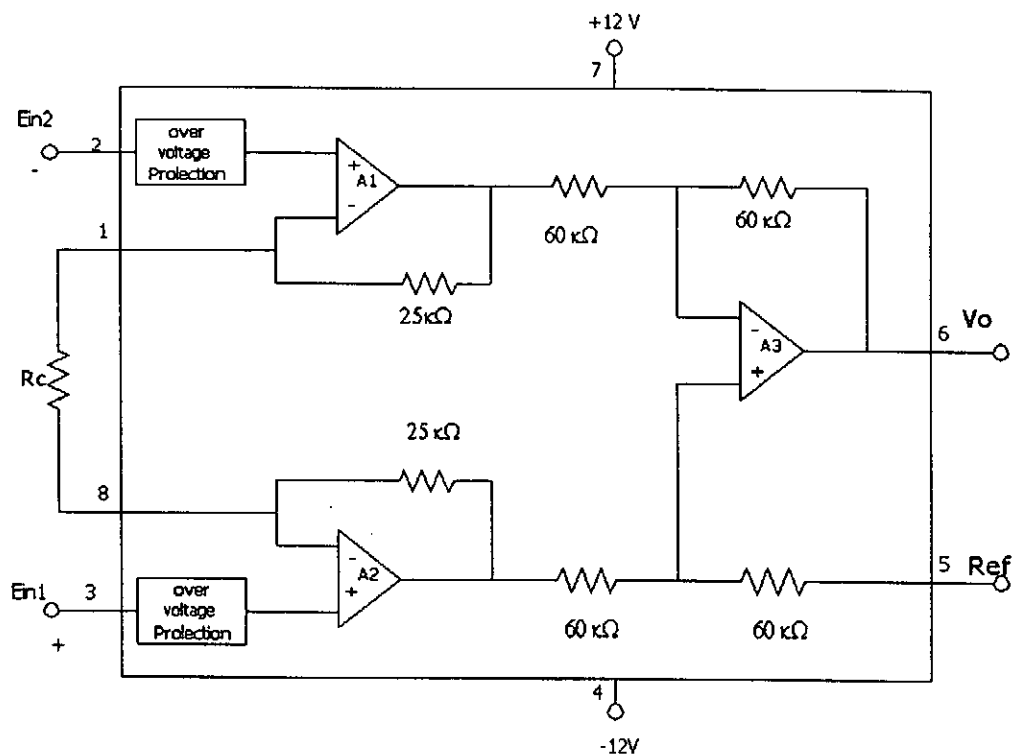
การทำงานของวงจรแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (Power Supply) ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้า ± 12 โวลต์ ทำหน้าที่จ่ายศักย์ไฟฟ้าให้กับวงจรต่างๆ คือ ส่วนแรกจะป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้าขนาด 10 โวลต์ ให้กับวงจรบริดจ์ซึ่งอยู่ในตัวรับรู้ความดัน โดยที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าขนาด 10 โวลต์ได้มาจากการใช้วงจรควบคุมความต่างศักย์ให้คงที่ และส่วนที่สองจะป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้า ± 12 โวลต์ ให้กับเครื่องขยายสัญญาณเครื่องมือ ดังภาพประกอบ 40



ภาพประกอบ 40 วงจรแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

1.2.2 วงจรขยายสัญญาณสำหรับเครื่องมือ

วงจขยายสัญญาณสำหรับเครื่องมือหมายเลข INA118P ประกอบด้วยออปแอมป์ 3 ตัว และตัวต้านทาน 7 ตัว วงจรนี้จะขยายสัญญาณไฟฟ้า โดยสัญญาณไฟฟ้าที่ถูกขยายจะออกมาในรูปของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทางออก (V_o) ดังภาพประกอบ 41



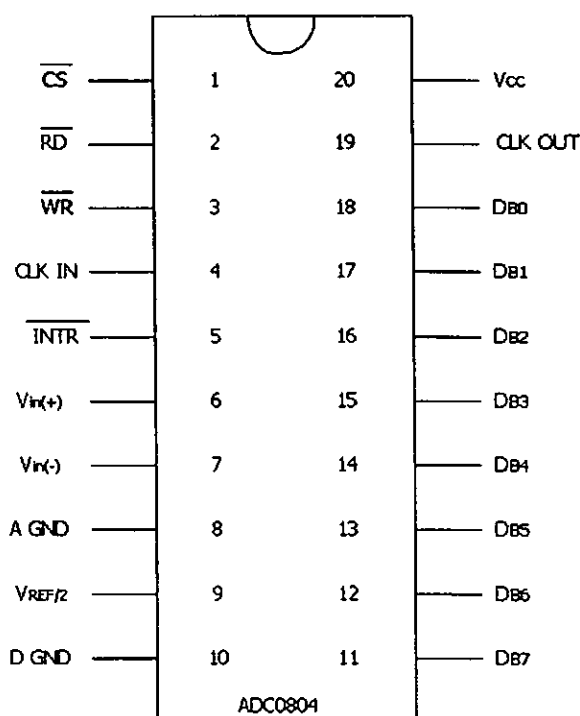
ภาพประกอบ 41 วงจรขยายสัญญาณสำหรับเครื่องมือ

$$V_o = (E_{in1} - E_{in2}) \left[1 + \frac{50k\Omega}{R_c} \right] \quad (20)$$

จากสมการ 20 แสดงให้เห็นว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทางออก (V_o) ของวงจรขยายสัญญาณเครื่องมือได้มาจากการขยายสัญญาณความแตกต่างของสัญญาณไฟฟ้าทางเข้า E_{in1} และ E_{in2} โดยมีอัตราขยายเท่ากับ $\left[1 + \frac{50k\Omega}{R_c} \right]$

1.2.3 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล หมายเลข ADC0804LCN แบบ CMOS 8 Bit ดังภาพประกอบ 42



ภาพประกอบ 42 ลักษณะของไอซีหมายเลข ADC0804LCN

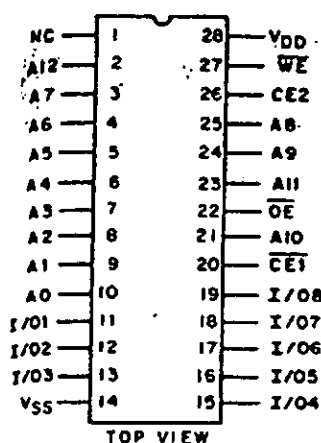
ที่มา: National Semiconductor Corporation. เอกสารประกอบคำอธิบายของไอซีหมายเลข ADC0804LCN แบบ CMOS 8 Bit.

การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล เป็นการแปลงสัญญาณแอนะล็อกที่ได้รับมาจากวงจรมอนิเตอร์สัญญาณสำหรับเครื่องมือ ซึ่งวงจรมอนิเตอร์สัญญาณเครื่องมือจะส่งสัญญาณแอนะล็อกที่ทางออกเข้าสู่ $V_{in(+)}$, $V_{in(-)}$ ของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยที่วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลหมายเลข ADC0804LCN มีหลักการทำงานในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบการประมาณอย่างเป็นลำดับ

1.2.4 หน่วยความจำ

หน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลในงานวิจัย เป็นหน่วยความจำสำหรับโปรแกรม ภายในตัวควบคุมเบสิกแอสตมป์ ซึ่งเป็นหน่วยความจำชนิดอีพรอม สามารถเก็บข้อมูลไว้ได้ในขณะที่ไม่มีไฟฟ้าเลี้ยงวงจร หน่วยความจำนี้เป็นหน่วยความจำที่ใช้สำหรับเก็บโปรแกรมหรือข้อมูลที่ไม่ต้องการให้สูญหายเมื่อไม่มีไฟฟ้าเลี้ยงวงจร สามารถบันทึกข้อมูลเข้าได้ ขนาดของหน่วยความจำชนิดนี้ในเบสิกแอสตมป์มีจำนวน 16 กิโลไบต์

หน่วยความจำสแตททิกรัม เป็นหน่วยความจำที่ใช้ในการอ่านและการบันทึกข้อมูล ซึ่งข้อมูลนี้เป็นข้อมูลที่สูญหายได้เมื่อไม่มีไฟฟ้าเลี้ยงวงจร ขนาดความจุของหน่วยความจำที่บรรจุอยู่ในสแตททิกรัมจะระบุเป็นจำนวนตำแหน่ง ซึ่งแต่ละตำแหน่งเรียกว่า แอดเดรส (Address) สแตททิกรัมจะถูกควบคุมโดยตรรกะการควบคุม (Control Logic) เช่นสแตททิกรัมหมายเลข CDM6264 แบบ CMOS 8 Bit มีขั้วไฟฟ้าระบุตำแหน่งแอดเดรสทั้งหมด 13 ขั้วไฟฟ้า คือ A_0 ถึง A_{12} ซึ่งตรรกะการควบคุม มีทั้งหมด 4 ตัว คือ \overline{CE}_1 (Chip Enable 1) , \overline{CE}_2 (Chip Enable 2) , \overline{OE} (Output Enable), \overline{WE} (Write Enable) มีตารางความจริงดังตาราง 3 โดยที่เมื่อ \overline{WE} ซึ่งเป็นสัญญาณที่ใช้ควบคุมการอ่านและการเก็บบันทึกข้อมูลเป็น High ข้อมูลจากแอดเดรสที่ระบุจะถูกส่งผ่านออกมาจากที่พิกัดข้อมูลขึ้นสู่ชุดสายข้อมูลแสดงผลบนหน่วยแสดงผล ถ้าให้ \overline{WE} เป็น Low ข้อมูลที่อยู่บนชุดสายข้อมูลจะถูกบันทึกเข้าไปในหน่วยความจำตรงตำแหน่งที่กำหนดโดยแอดเดรส ซึ่งที่พิกัดข้อมูลชุดเดียวกันนี้จะทำหน้าที่เป็นทั้งทางเข้าและทางออกของข้อมูล



ภาพประกอบ 43 ลักษณะของสแตททิกรัม หมายเลข CDM6264 แบบ CMOS 8 Bit

ที่มา: คู่มือไอซี ชิพซัพพอร์ตและหน่วยความจำ (Chip Support And Memory Data Book).

(2519). p. 465.

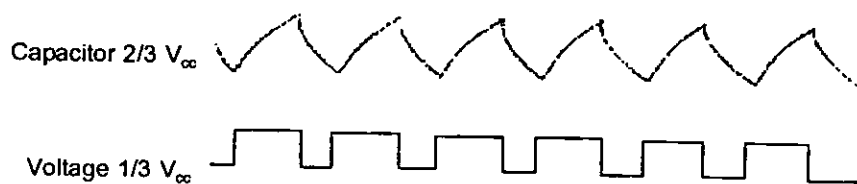
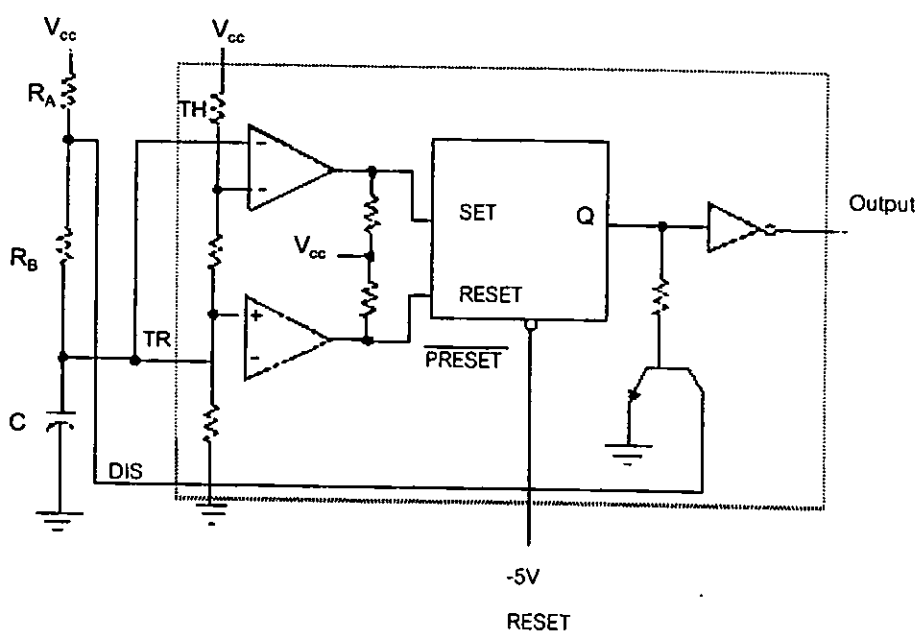
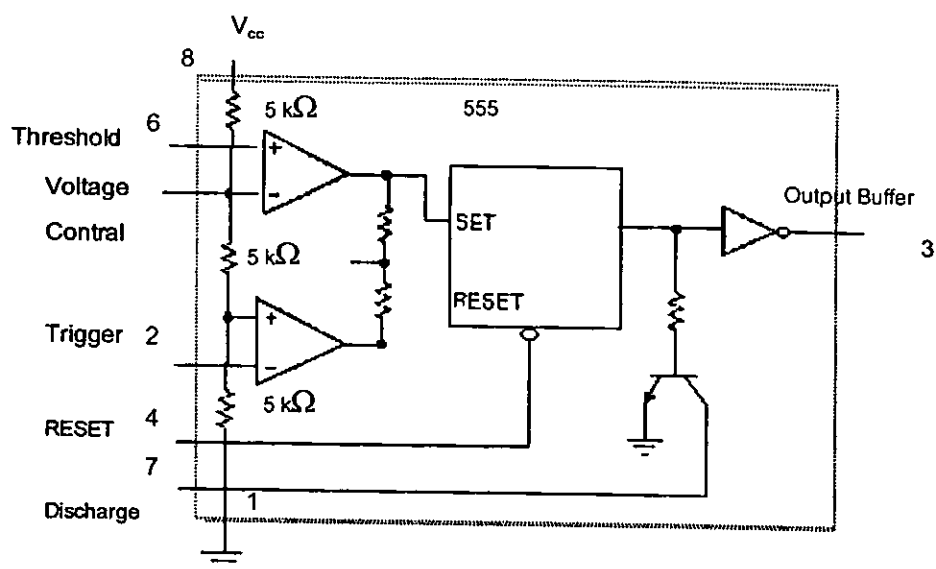
ตาราง 3 ตารางความจริง ของสแตททิกแกรม

CE1	CE2	OE	WE	A0 To A12	MODE	DATA I/O	DEVICE CURRENT
H	X	X	X	X	NOT SELECTED	HIGH Z	STANDBY
X	L	X	X	X	NOT SELECTED	HIGH Z	STANDBY
L	H	L	H	STABLE	READ	DATA OUT	ACTIVE
L	H	X	L	STABLE	WRITE	DATA IN	ACTIVE
L	H	H	H	STABLE	OUTPUT DISABLE	HIGH Z	ACTIVE

ที่มา: คู่มือไอซี ชิพซัพพอร์ตและหน่วยความจำ *Chip Support And Memory Data Book*.
(2519). p. 465.

1.2.5 วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาสำหรับการตั้งเวลา

วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาสำหรับการตั้งเวลาเป็นวงจรที่สร้างสัญญาณนาฬิกาเพื่อทำหน้าที่ในการกำหนดช่วงเวลาในการเก็บบันทึกข้อมูล วงจรนี้สร้างขึ้นจากไอซี 555 ภายในตัวไอซีประกอบด้วยวงจรเปรียบเทียบความต่างศักย์ (Voltage Comparator) จำนวน 2 วงจร วงจรฟลิปฟลอป (Flip Flop Circuit) จำนวน 1 วงจร วงจรแบ่งความต่างศักย์ (Voltage Divider) ซึ่งใช้ตัวต้านทานขนาด $5\text{ k}\Omega$ 3 ตัว ทรานซิสเตอร์ (Transistor Circuit) ซึ่งทำหน้าที่ที่ประจุและคายประจุจำนวน 1 ตัว และวงจรภาคขยายทางออกซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 200 มิลลิแอมแปร์ จำนวน 1 วงจร มีหลักการทำงาน คือ ตัวต้านทาน $5\text{ k}\Omega$ 3 ตัว จะกำหนดจุดของ Threshold Comparator ไว้ที่ $2/3V_{cc}$ และของ Trigger Comparator ไว้ที่ $1/3V_{cc}$ ซึ่งค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (V_{cc}) ใช้ได้ตั้งแต่ 5 โวลต์ ถึง 18 โวลต์ เมื่อให้แรงเคลื่อนไฟฟ้า (V_{cc}) แก่วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาสำหรับการตั้งเวลาตัวเก็บประจุจะทำการเก็บประจุจนกระทั่งความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุ (V_c) สูงกว่า $2/3V_{cc}$ ฟลิปฟลอปจะทำการเซต (Set) ให้ Q เป็น High (1) ทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสไฟฟ้าและตัวเก็บประจุจะคายประจุลงดินทำให้ประจุลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุต่ำกว่า $1/3V_{cc}$ ฟลิปฟลอปจะทำการรีเซต (Reset) ให้ Q เป็น Low (0) ทำให้ทรานซิสเตอร์ไม่นำกระแส (ทรานซิสเตอร์ถูกตัดออกจากวงจร) ทำให้ตัวเก็บประจุมีการเก็บประจุเข้าอีกครั้งหนึ่ง ดังภาพประกอบ 44 ซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างภายในและการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาสำหรับการตั้งเวลา

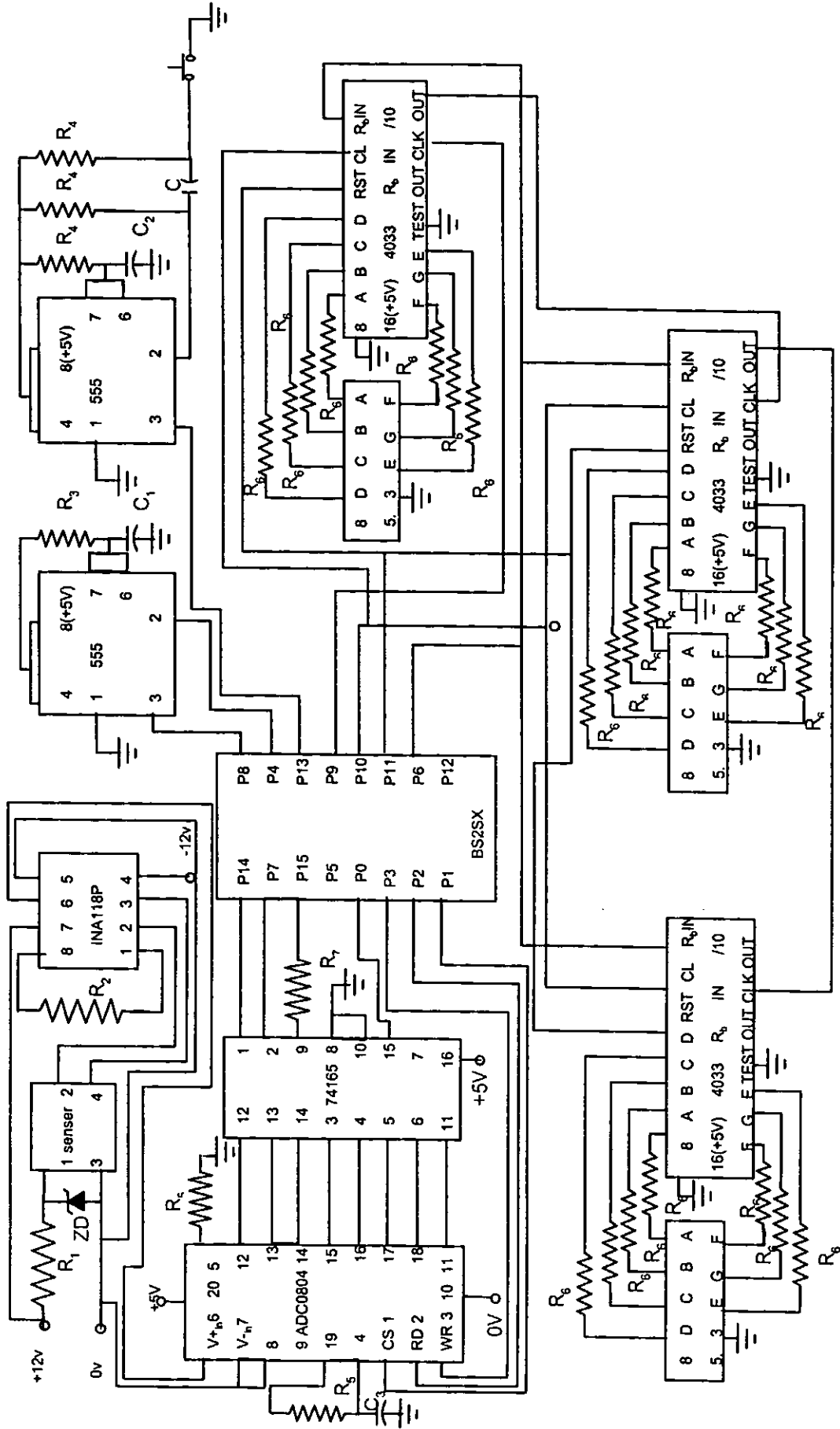


ภาพประกอบ 44 ลักษณะโครงสร้างภายในและการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา สำหรับการตั้งเวลา

ที่มา: Bignell James. & Donovan Robert. (2000). *Digital Electronics Fourth Edition*. p.447.

วงจรรบบวัดและแสดงผลการวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดินที่สมบูรณ์จะเป็นดังภาพประกอบ 45 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังนี้

1. ไอซี หมายเลข ADC0804LCN	1	ตัว
2. ตัวรับรู้ความดัน หมายเลข PCCFD6A ของบริษัท Honeywell	1	ตัว
3. ไอซี หมายเลข INA118P	1	ตัว
4. ไอซี 555	2	ตัว
5. ไอซี หมายเลข 74165	1	ตัว
6. 7 – SEGMENT	3	ตัว
7. ไอซี 4033	3	ตัว
8. ตัวต้านทาน (R_1) ขนาด 100 โอห์ม	1	ตัว
9. ตัวต้านทาน (R_2) ขนาด 2.7 กิโลโอห์ม	1	ตัว
10. ตัวต้านทาน (R_3) ขนาด 2 เมกะโอห์ม	1	ตัว
11. ตัวต้านทาน (R_4) ขนาด 4 เมกะโอห์ม	3	ตัว
12. ตัวต้านทาน (R_5) ขนาด 10 กิโลโอห์ม	2	ตัว
13. ตัวต้านทาน (R_6) ขนาด 300 โอห์ม	21	ตัว
14. ตัวต้านทาน (R_7) ขนาด 22 กิโลโอห์ม	1	ตัว
15. ตัวเก็บประจุ (C_1) ขนาด 100 ไมโครฟารัด	1	ตัว
16. ตัวเก็บประจุ (C_2) ขนาด 150 พิโกฟารัด	1	ตัว
17. ตัวเก็บประจุ (C_3) ขนาด 10 ไมโครฟารัด	2	ตัว
18. ซีเนอร์ไดโอด (ZD) ขนาด 10 โวลต์	1	ตัว
19. เบสิกแอสตมปี (JX 2SX)	1	ชุด

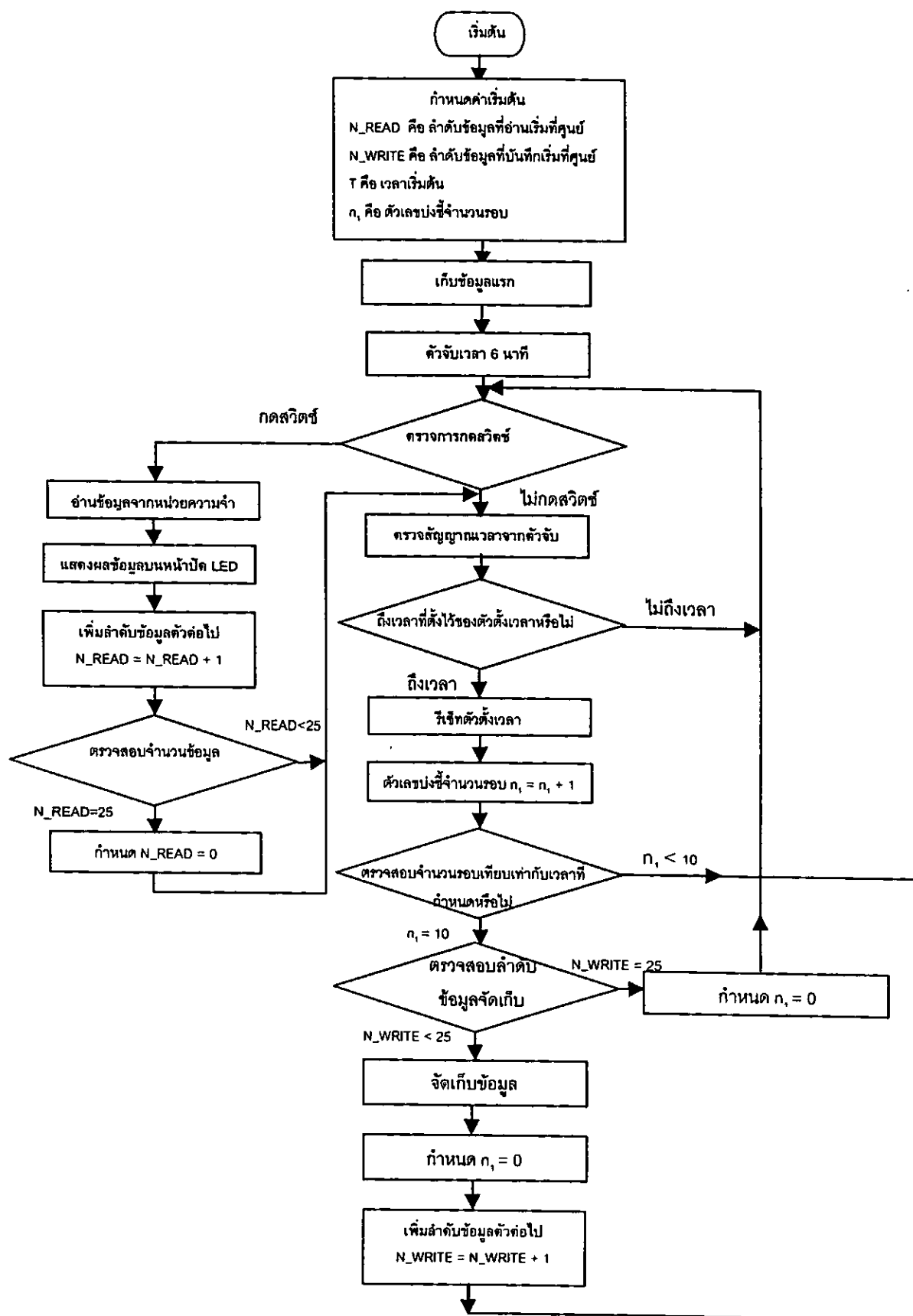


ภาพประกอบ 45 วงจรของระบบวัดและแสดงผลการวัดด้วยวัสดุพินของน้ำในดิน

1.3 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมเพื่อทำการเก็บค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้ชุดคำสั่งภาษาเบสิก ที่เรียกว่า พีเบสิก (PBASIC) เขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของเบสิกแสตมป์ (BASIC Stamp) รุ่น 2SX โดยผ่านโปรแกรมที่มีชื่อว่า เบสิกแสตมป์เอดิเตอร์ (BASIC Stamp Editor) โปรแกรมนี้ถูกใช้ในการติดต่อระหว่างเบสิกแสตมป์ 2SX กับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตอนุกรม (Serial Port) ผู้วิจัยใช้ภาษาเบสิกเขียนโปรแกรมคำสั่งในการเก็บค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดินที่ชั่วโมงต่างๆ โดยรายละเอียดของโปรแกรมจะรวบรวมส่วนที่เป็นการควบคุมการทำงานในการรับส่งข้อมูล การตั้งเวลาในการเก็บบันทึกค่าศักย์วัสดุพื้น แสดงผลของการเก็บบันทึกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์และแสดงผลการเก็บบันทึกข้อมูลเป็นตัวเลข LED เอาไว้ในโปรแกรมเดียวกัน โดยที่เบสิกแสตมป์ 2SX จะรับสัญญาณจากตัวรับรู้ความดันผ่านทางวงจรถออิเล็กทรอนิกส์

สำหรับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำสั่ง แสดงไว้ในแผนผังการทำงาน (Flow Chart) ดังต่อไปนี้



2. การทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

การทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล แบ่งเป็น 3 ตอน คือ

ตอนที่ 1 การเปรียบเทียบเทนซิโอมิเตอร์เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากหัววัดกับความดันบรรยากาศที่กระเปาะพรุณ

ตอนที่ 2 เพื่อศึกษาการผ่านของก๊าซ (อากาศและไอน้ำ) เข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์

ตอนที่ 3 เพื่อทดสอบการนำน้ำของกระเปาะพรุณ

ตอนที่ 1 การเปรียบเทียบเทนซิโอมิเตอร์เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากหัววัดกับความดันบรรยากาศที่กระเปาะพรุณ

วิธีการทดลอง

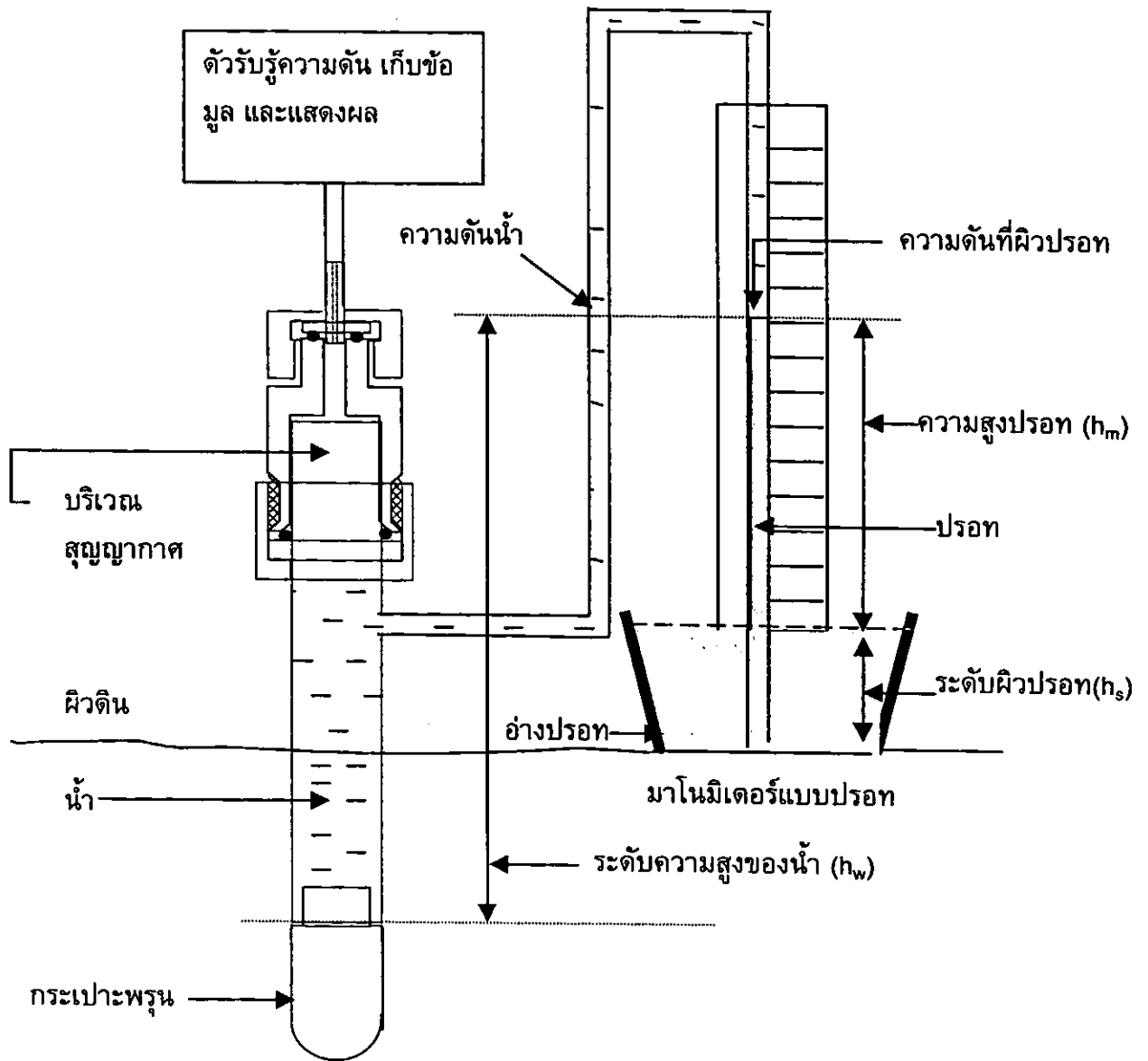
1. เตรียมดินแห้งนำใส่ถังไว้ 1 ถัง (โดยดินแห้งได้จากการนำดินมาอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เพื่อต้องการไล่ไอน้ำที่อยู่ในดินออกและเพื่อต้องการให้ได้ดินแห้งเพียงพอที่จะดึงน้ำจากเทนซิโอมิเตอร์เข้าสู่ดิน) โดยถังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากถัง 25.00 เซนติเมตร สูง 30.00 เซนติเมตร
2. เตรียมดินเป็นช่องขนาดประมาณให้เทนซิโอมิเตอร์ลงไป在地ให้ได้ ความลึก 20.00 เซนติเมตร
3. นำเทนซิโอมิเตอร์ที่สร้างขึ้นพร้อมมาโนมิเตอร์แบบปรอท (มาโนมิเตอร์แบบปรอทนี้ใช้ในการเปรียบเทียบกับเทนซิโอมิเตอร์) ดังภาพประกอบ 46 เติมน้ำเต็มท่อและให้กระเปาะพรุณอึดตัวด้วยน้ำก่อนใช้งานเสมอ (การทำให้กระเปาะพรุณอึดตัวด้วยน้ำทำโดยการนำท่อต่อด้วยกระเปาะพรุณไปแช่น้ำโดยวางไว้ในแนวตั้งทิ้งไว้หนึ่งคืนน้ำจะซึมผ่านกระเปาะพรุณเข้าไปในท่อทำให้กระเปาะพรุณอึดตัว) วิธีการเปิดเทนซิโอมิเตอร์ทำโดยหมุนแป้นเกลียวรัดหัวต่อตัวรับรู้ความดันแล้วดึงหัวต่อตัวรับรู้ความดันออก หลังจากนั้นเติมน้ำให้เต็มท่อแล้วปิดให้สนิทดังเดิม
4. ตั้งเวลาให้เครื่องมือเก็บบันทึกข้อมูลของความต่างศักย์ซึ่งเป็นค่าตัวเลขสัมพันธ์กับความต่างศักย์ที่เกิดจากตัวรับรู้ความดันทุก 1 ชั่วโมง พร้อมทั้งบันทึกการเปลี่ยนของระดับน้ำในเทนซิโอมิเตอร์โดยการอ่านจากไม้บรรทัดและบันทึกระดับความสูงของปรอทในมาโนมิเตอร์
5. นำเทนซิโอมิเตอร์ที่สร้างขึ้นพร้อมมาโนมิเตอร์แบบปรอทไปเสียบไว้ในดินดังภาพประกอบ 47 จากนั้นนำข้อมูลที่เก็บในหน่วยความจำของเทนซิโอมิเตอร์ซึ่งบันทึกเป็นค่าตัวเลขสัมพันธ์กับความต่างศักย์มาเทียบกับค่าความดันบรรยากาศที่วัดได้จากมาโนมิเตอร์ที่เวลา

เดียวกันแล้วคำนวณหาความดันที่ผิวปรอทความดันน้ำที่ระดับผิวปรอทและความดันที่
 กระเปาะของเทอร์มิอมิเตอร์ได้จากสมการ

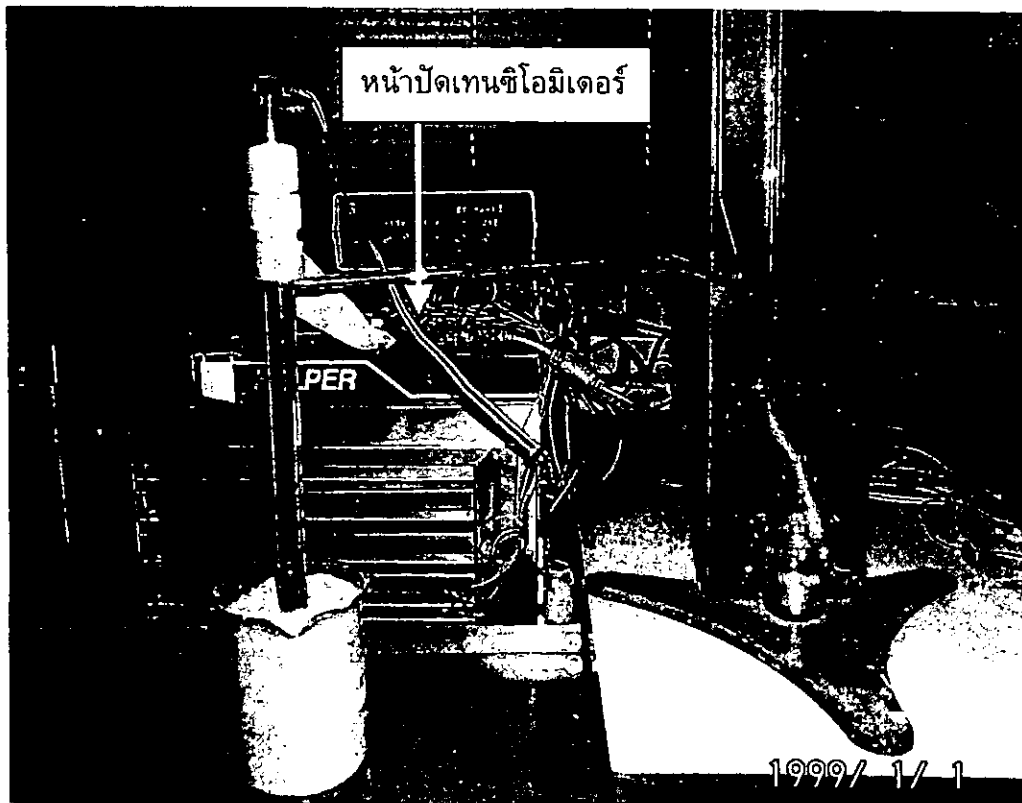
ความดันสุญญากาศที่กระเปาะ = ความดันที่ผิวปรอท + ความดันน้ำ

$$P_{\text{ที่กระเปาะ}} = h_m \rho_m g + h_w \rho_w g \quad (21)$$

6. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสุญญากาศที่กระเปาะกับตัวเลขระดับศักย์
 ไฟฟ้าจากหัววัด โดยให้ความดันสุญญากาศที่กระเปาะอยู่ในแนวแกนตั้งและตัวเลขระดับ
 ศักย์ไฟฟ้าจากหัววัดอยู่ในแนวแกนนอน



ภาพประกอบ 46 ลักษณะการติดตั้งเทนซิโอมิเตอร์ในการปรับเทียบค่ากับมาโนมิเตอร์

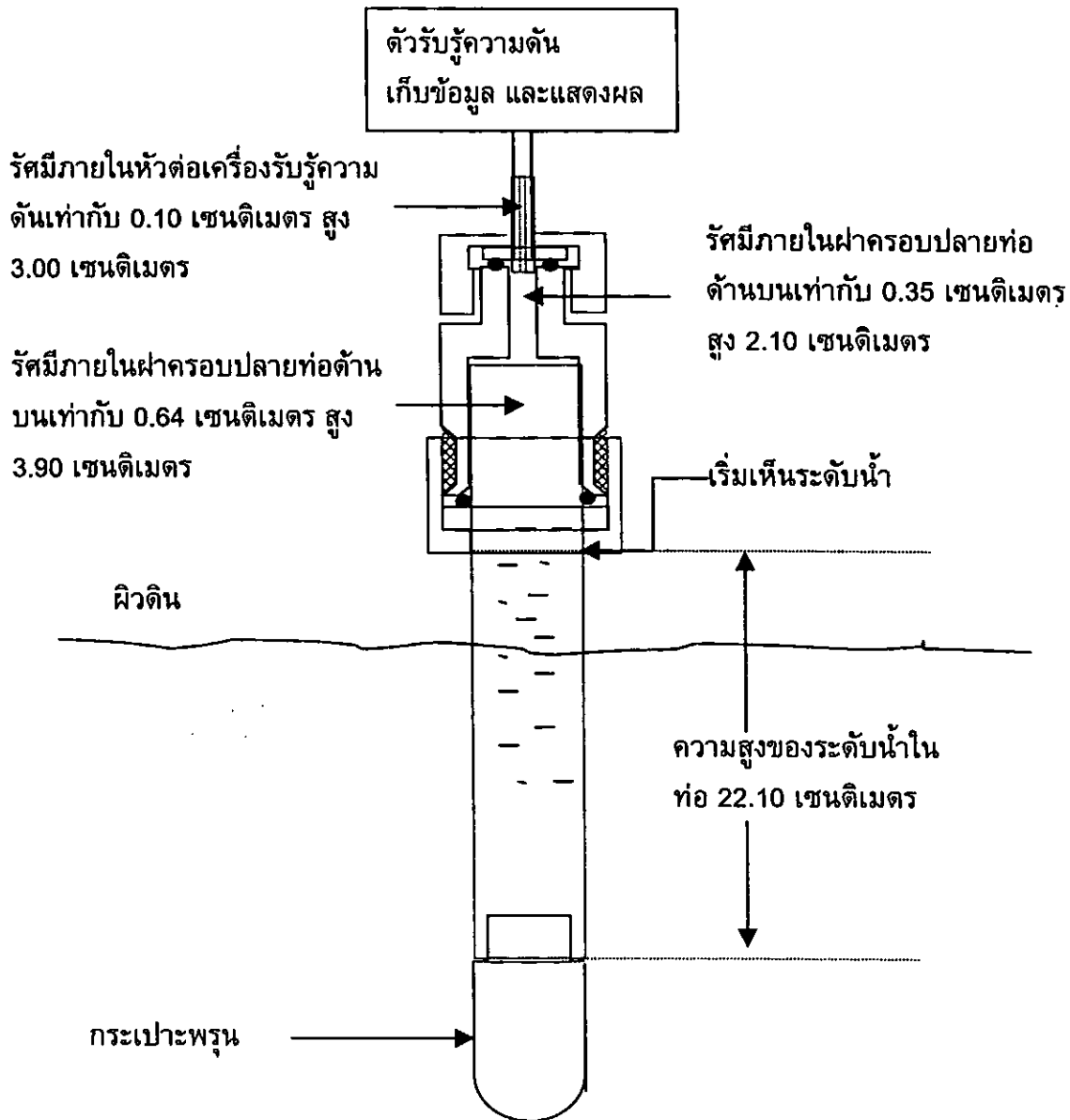


ภาพประกอบ 47 การติดตั้งเทนซิโอมิเตอร์ที่ผู้วิจัยออกแบบสร้างขึ้นมาพร้อมกับมาโนมิเตอร์แบบปรอท

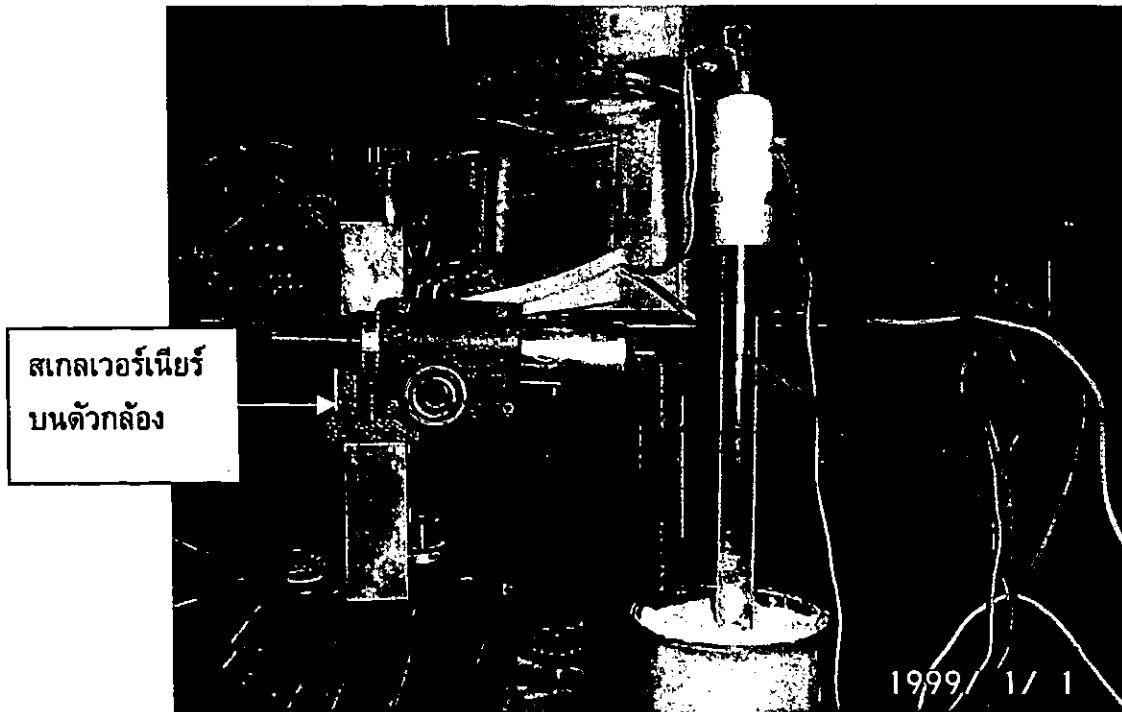
ตอนที่ 2 การศึกษาการผ่านของก๊าซ (อากาศและไอน้ำ)เข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์

วิธีการทดลอง

1. ทำการทดลองเช่นเดียวกับตอนที่ 1 ตั้งแต่ ข้อ 1 ถึง ข้อ 3 โดยไม่ต้องติดตั้งมาโนมิเตอร์แบบปรอท แล้วนำเทนซิโอมิเตอร์ไปเสียบไว้ในดินตามรูที่เจาะไว้ดังภาพประกอบ 48
2. อ่านและบันทึกค่าระดับน้ำตั้งแต่เริ่มเห็นระดับน้ำทุกชั่วโมงจนถึงชั่วโมงที่ 12 หลังจากนั้นบันทึกระดับน้ำทุก 12 ชั่วโมง โดยการอ่านค่าจากสเกลเวอร์เนียของกล้อง ซึ่งสเกลเวอร์เนียมีความละเอียด 0.001 เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 49 ผู้วิจัยทำการอ่านและบันทึกค่าระดับน้ำเป็นเวลา 5 วัน (เมื่อเริ่มทดลองจะมองไม่เห็นระดับน้ำ จึงต้องรอให้ระดับน้ำลดลงจนสามารถเห็นระดับน้ำ)
3. นำข้อมูลค่าตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับรู้ความดันมาหาค่าความดันสุญญากาศที่ชั่วโมงต่างๆ
4. นำข้อมูลจากตารางบันทึกผลไปเขียนกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของผลคูณปริมาตรของก๊าซกับความดันที่ชั่วโมงต่างๆ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของผลคูณปริมาตรก๊าซกับความดันจะแปรผันกับปริมาณก๊าซที่เข้าสู่ระบบที่อุณหภูมิคงที่



ภาพประกอบ 48 การติดตั้งเทนซิโอมิเตอร์สำหรับการทดลองตอนที่ 2

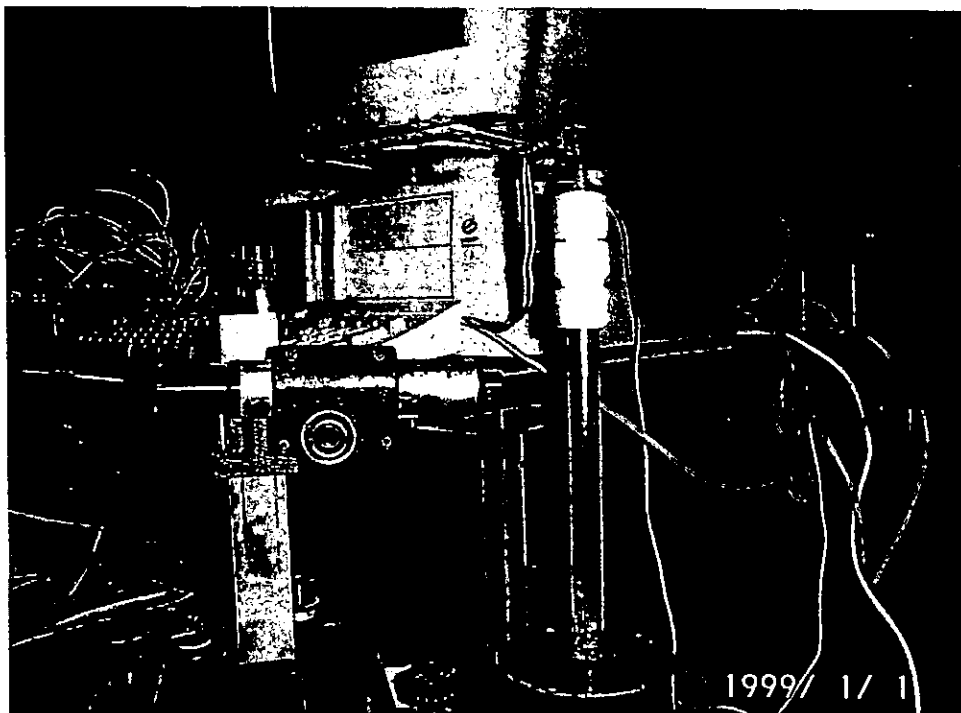


ภาพประกอบ 49 การติดตั้งเทนซิโอมิเตอร์ที่ผู้วิจัยออกแบบสร้างขึ้นสำหรับการทดลองตอนที่ 2 โดยฝังเทนซิโอมิเตอร์ไว้ในภาชนะใส่ดินที่อัดแน่น

ตอนที่ 3 การทดสอบการนำน้ำของกระเปาะพรุน

วิธีการทดลอง

- นำดินแห้งมาทำการทดลองเช่นเดียวกับตอนที่ 1 ตั้งแต่ ข้อ 1 ถึง ข้อ 3 แล้วนำเทนซิโอมิเตอร์ไปเสียบไว้ในดินตามรูที่เจาะไว้ ดังภาพประกอบ 49 พร้อมทั้งตั้งเวลาให้เครื่องมือเก็บบันทึกค่าตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับรู้ความดันทุก 1 ชั่วโมง อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งความดันสูญญากาศที่กระเปาะลดลงอยู่ในช่วง -0.6 ถึง -0.8 บาร์ ซึ่งสังเกตได้จาก การอ่านค่าตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับรู้ความดันที่แสดงเป็นตัวเลข LED บนหน้าปัดของเทนซิโอมิเตอร์ บันทึกค่าความสูงของระดับน้ำในท่อพลาสติกใสทุกชั่วโมง หลังจากนั้น เทน้ำลงไปในดินจนน้ำเสมอกับระดับผิวดินดังภาพประกอบ 50
- บันทึกค่าตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากหัววัดทุก 1 ชั่วโมง บันทึกการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในท่อพลาสติกและบันทึกอุณหภูมิทุกชั่วโมง ลงในตารางบันทึกผล
- นำข้อมูลจากตารางไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์กับเวลา



ภาพประกอบ 50 การเทน้ำลงไป在地面หน้าเสมอกับระดับผิวดินของเทนซิโอมิเตอร์

3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ได้เทนซิโอมิเตอร์ที่อ่านค่าตัวเลขซึ่งสัมพันธ์กับความดันสุญญากาศ สามารถกำหนดช่วงเวลาในการจัดเก็บข้อมูลและกำหนดจำนวนข้อมูลที่ต้องการเก็บด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ และเก็บบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินอย่างต่อเนื่องทุกชั่วโมงในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งคาดว่าจะเป็ประโยชน์ในการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความต้องการปริมาณน้ำในดินหรือการนำน้ำในดินได้ รวมไปถึงการนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ในระดับมัธยมศึกษา อุดมศึกษา สามารถใช้งานด้านการวิเคราะห์และการวิจัยทางปฐพีที่ต้องการเก็บบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของน้ำในดินอย่างต่อเนื่องได้

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การออกแบบและสร้างเทนซิโอมิเตอร์สำหรับเก็บค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน แบ่งผลทดสอบออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. ผลการทดสอบการปรับเทียบเทนซิโอมิเตอร์เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับรู้ความดันกับความดันสุญญากาศของกระเปาะที่เกิดขึ้น
2. ผลการทดลองการศึกษาการผ่านของก๊าซ(อากาศและไอน้ำ)เข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์
3. ผลการทดสอบการนำน้ำของกระเปาะพูน

1. ผลการทดสอบการปรับเทียบเทนซิโอมิเตอร์เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับรู้ความดันกับความดันสุญญากาศของกระเปาะที่เกิดขึ้น

ขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบเทนซิโอมิเตอร์ที่ผู้วิจัยออกแบบสร้างขึ้นมาพร้อมกับมาโนมิเตอร์แบบปรอทเพื่อทำการปรับเทียบความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับรู้ความดัน ซึ่งอ่านได้จากการใช้โปรแกรมควบคุมการทำงานในการรับ-ส่งข้อมูลกับค่าความดันสุญญากาศของกระเปาะพูนที่วัดได้จากมาโนมิเตอร์ ณ เวลาเดียวกัน ได้ผลการทดสอบดังตาราง 4 ค่าความดันสุญญากาศของกระเปาะที่วัดได้จากมาโนมิเตอร์นั้นก็คือ ศักย์วัสดุพื้น

ตาราง 4 แสดงข้อมูลการปรับเทียบเทนซิโอมิเตอร์ที่สร้างขึ้นมาพร้อมกับมาโนมิเตอร์แบบปรอท

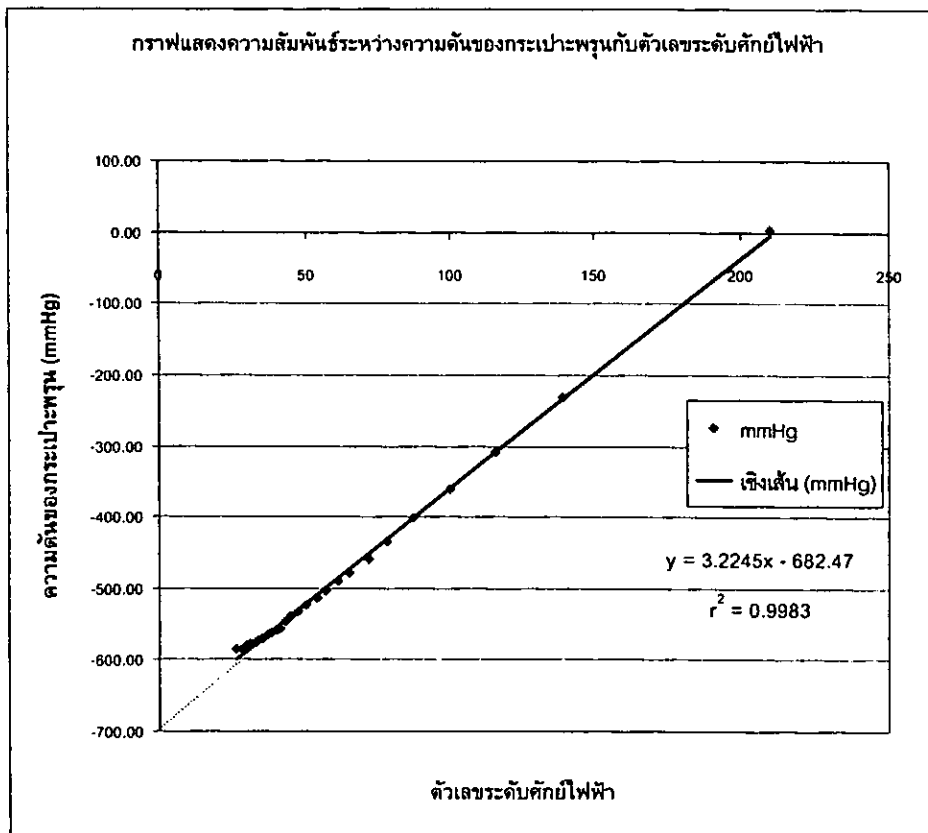
เวลา (ชั่วโมง)	ตัวเลขระดับ ศักย์ไฟฟ้า	ความสูงปรอท h_m (ซ.ม)	ระดับผิวปรอท h_s (ซ.ม)	ระดับความสูง ของน้ำในท่อ h_w (ซม)	ความดันที่ผิว ปรอท (บาร์)	ความดันน้ำ (บาร์)	ความดันของกระเปาะ (บาร์)	mmHg
0.00	210	0.00	2.80	1.25	0.000	0.001	0.001	0.920
1.00	139	25.10	2.80	26.35	-0.335	0.026	-0.309	-231.6
2.00	116	33.55	2.75	34.75	-0.447	0.034	-0.413	-309.9
3.00	100	39.20	2.60	40.25	-0.522	0.039	-0.483	-362.4
4.00	87	43.60	2.40	44.45	-0.581	0.044	-0.538	-403.3
5.00	78	47.00	2.25	47.70	-0.626	0.047	-0.580	-434.9

ตาราง 4 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ตัวเลขระดับ ศักย์ไฟฟ้า	ความสูงปรอท h_m (ซ.ม)	ระดับผิวปรอท h_s (ซ.ม)	ระดับความสูง ของน้ำในท่อ ปรอท h_w (ซม)	ความดันที่ผิว ปรอท (บาร์)	ความดันน้ำ (บาร์)	ความดันของกระเปาะ (บาร์)	mmHg
6.00	72	49.75	2.20	50.40	-0.663	0.049	-0.614	-460.4
9.00	57	54.60	2.20	55.25	-0.728	0.054	-0.674	-505.3
10.00	54	55.65	2.20	56.30	-0.742	0.055	-0.687	-515.1
11.00	50	56.70	2.15	57.30	-0.756	0.056	-0.700	-524.8
12.00	47	57.75	2.15	58.35	-0.770	0.057	-0.713	-534.6
13.00	45	58.45	2.15	59.05	-0.779	0.058	-0.721	-541.0
14.00	43	59.15	2.15	59.75	-0.788	0.059	-0.730	-547.5
15.00	41	60.20	2.15	60.80	-0.802	0.060	-0.743	-557.3
16.00	40	60.45	2.15	61.05	-0.806	0.060	-0.746	-559.6
17.00	38	60.90	2.15	61.50	-0.812	0.060	-0.751	-563.7
18.00	37	61.15	2.10	61.70	-0.815	0.061	-0.755	-566.1
19.00	35	61.60	2.10	62.15	-0.821	0.061	-0.760	-570.3
20.00	34	61.85	2.10	62.40	-0.824	0.061	-0.763	-572.6
21.00	33	62.10	2.10	62.65	-0.828	0.061	-0.766	-574.9
22.00	31	62.55	2.10	63.10	-0.834	0.062	-0.772	-579.1
23.00	30	62.80	2.10	63.35	-0.837	0.062	-0.775	-581.4
24.00	29	63.10	2.10	63.65	-0.841	0.062	-0.779	-584.2
25.00	28	63.30	2.05	63.80	-0.844	0.063	-0.781	-586.0
26.00	28	63.30	2.05	63.80	-0.844	0.063	-0.781	-586.0
27.00	28	63.30	2.05	63.80	-0.844	0.063	-0.781	-586.0
28.00	26	63.35	2.05	63.85	-0.844	0.063	-0.782	-586.5

จากตาราง 4 สามารถคำนวณความดันที่ผิวปรอทได้จาก $(h_m \times 10 \times 1.013) / 760$ หน่วย บาร์ เมื่อ 10 คือ ค่าที่ต้องการเปลี่ยน h_m จากหน่วยเซนติเมตรให้เป็นหน่วยมิลลิเมตร และ 1.013 บาร์ เท่ากับ 760 มิลลิเมตรปรอท คำนวณความดันน้ำได้จาก $(9810 \times (h_w) / 100) / 10^5$ หน่วยบาร์ เมื่อ 9810 คือ ค่าของ ρg , 100 คือ ค่าที่ต้องการเปลี่ยน h_w จากหน่วยเซนติเมตรให้เป็นหน่วยเมตร และ 10^5 ปาสคาล (Pa) เท่ากับ 1 บาร์ คำนวณความดันที่กระเปาะพรุนใน

หน่วยบาร์ได้จากความดันที่ผิวปรอทบวกกับความดันน้ำ หรือคำนวณความดันที่กระเปาะพรุน ในหน่วยมิลลิเมตรปรอทได้จาก $[(\text{ความดันที่ผิวปรอท} + \text{ความดันน้ำ}) \times 760] / 1.013$ ตัวเลขระดับ ศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับรู้ความดันที่อ่านได้จากโปรแกรมที่เขียนขึ้นสำหรับเทนซิโอมิเตอร์ เป็นข้อมูลที่ถูกเก็บบันทึกไว้ในหน่วยความจำของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ หน่วยความจำของโปรแกรม จะแสดงผลของตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับรู้ความดันออกมาเป็นตัวเลขแสดงด้วย LED ซึ่ง จะอยู่บนหน้าปัดของเทนซิโอมิเตอร์ เทนซิโอมิเตอร์สามารถอ่านค่าตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจาก ตัวรับรู้ความดันอยู่ในช่วง 210 ถึง 28 และความดันสุญญากาศของกระเปาะที่วัดได้จากมาโน มิเตอร์อยู่ในช่วง 0 ถึง -0.781 บาร์ เมื่อนำค่าตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับรู้ความดันนี้มา เปรียบเทียบกับความดันสุญญากาศของกระเปาะที่วัดได้จากมาโนมิเตอร์ จะได้เทนซิโอมิเตอร์ที่ สามารถวัดศักย์วัสดุพื้นอยู่ในช่วง 0.920 ถึง -586.0 มิลลิเมตรปรอท ข้อมูลระดับศักย์ไฟฟ้าจาก ตัวรับรู้ความดันและความดันสุญญากาศที่กระเปาะ เมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้ดังภาพประกอบ 51 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับรู้ความดันกับความดัน สุญญากาศของกระเปาะ โดยกราฟเป็นเส้นตรง $y = 3.2245x - 682.47$ ให้สัมประสิทธิ์การตัด สินใจมีค่า $r^2 = 0.9983$



ภาพประกอบ 51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับรู้ความดัน กับความดันสุญญากาศของกระเปาะพรุน

2. การศึกษาการผ่านของก๊าซ(อากาศและไอน้ำ)เข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์

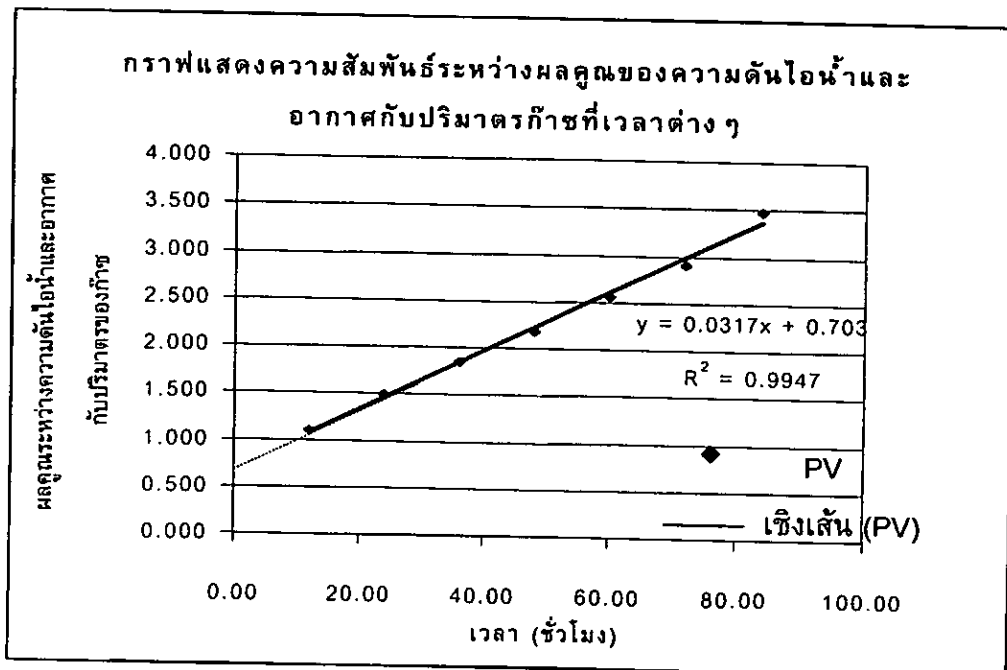
ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาการผ่านของก๊าซเข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์ โดยฝังเทนซิโอมิเตอร์ไว้ในถังใส่ดินที่อัดแน่น การทดลองในครั้งนี้กระเปาะของเทนซิโอมิเตอร์อยู่ลึกจากผิวดิน 9.60 เซนติเมตร หลังจากนั้นปล่อยให้ดินดูดน้ำออกจากกระเปาะในขณะเดียวกันเทนซิโอมิเตอร์จะทำการเก็บบันทึกข้อมูลศักย์วัสดุพื้นไว้ในหน่วยความจำของโปรแกรมและจะแสดงผลข้อมูลศักย์วัสดุพื้นออกมาเป็นตัวเลขบนหน้าปัดเทนซิโอมิเตอร์ ผู้วิจัยจะทำการวัดระดับน้ำในเทนซิโอมิเตอร์ตั้งแต่เริ่มเห็นระดับน้ำและหลังจากนั้นจะวัดระดับน้ำทุกชั่วโมงได้ผลการทดสอบดังตาราง 5

ตาราง 5 แสดงผลการทดสอบการผ่านของก๊าซ(อากาศและไอน้ำ)เข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์

เวลา (ชั่วโมง)	ตัวเลขระดับ ศักย์ไฟฟ้า	ปริมาตรก๊าซ ในท่อ(V) (ลบ.ซม)	ระดับความสูง ของน้ำในท่อ h_w (ซม)	ความดันน้ำ (บาร์)	ความดันที่กระเปาะพรุน มิลลิเมตรปรอท	ความดันไอน้ำ และอากาศ บาร์	ความดันไอน้ำ ในท่อ (บาร์)	PV บาร์.ซม ³
12.00	27	5.92	22.100	0.022	-595.4	0.206	0.185	1.094
24.00	18	10.03	18.912	0.019	-624.4	0.168	0.149	1.496
36.00	15	13.37	16.313	0.016	-634.1	0.155	0.139	1.857
48.00	13	16.49	13.890	0.014	-640.6	0.146	0.133	2.187
60.00	12	19.58	11.490	0.011	-643.8	0.142	0.131	2.559
72.00	11	22.59	9.150	0.009	-647.0	0.138	0.129	2.907
84.00	12	25.64	6.780	0.007	-643.8	0.142	0.135	3.469

จากข้อมูลในตาราง 5 หาปริมาตรของก๊าซได้จาก $5.92 + \pi r^2 (22.1 - h_w)$ เมื่อ 5.92 คือ ปริมาตรของก๊าซที่ได้จากการคำนวณในช่วงเริ่มต้นจนกระทั่งสามารถมองเห็นระดับน้ำ โดยมีรัศมีของหัวต่อตัวรับรู้ความดันเท่ากับ 0.10 เซนติเมตร สูง 3.00 เซนติเมตร รัศมีของฝาครอบปลายท่อด้านบน 0.35 เซนติเมตร สูง 2.10 เซนติเมตร รัศมีของฝาครอบปลายท่อด้านล่าง) 0.64 เซนติเมตร สูง 3.90 เซนติเมตร ความดันน้ำคำนวณจาก $(9810 \times (h_w) / 100) / 10^5$ หน่วยบาร์ เมื่อ 9810 คือ ค่าของ ρg , 100 คือ ค่าที่ต้องการเปลี่ยน h_w จากหน่วยเซนติเมตรให้เป็นหน่วยเมตร และ 10^5 ปาสคาล (Pa) เท่ากับ 1 บาร์ และคำนวณความดันที่กระเปาะในหน่วยมิลลิเมตรปรอทได้จากสมการ $(3.224 \times \text{ตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับรู้ความดัน}) - 682.47$ หรือ

คำนวณความดันที่กระเปาะในหน่วยบาร์ได้จาก $1 + [\text{ความดันที่กระเปาะพรุนในหน่วยมิลลิเมตรปรอท} \times 1.013] / 760$ และคำนวณหาความดันไอน้ำและอากาศในท่อได้จาก ความดันที่กระเปาะพรุนในหน่วยบาร์ - ความดันน้ำในหน่วยบาร์ ความดันที่ในช่วงเริ่มต้นจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามในช่วงต้นนี้ไม่สามารถวัดปริมาตรก๊าซได้ เนื่องจากยังไม่เห็นระดับน้ำในเทนซิโอมิเตอร์ จนหลังจาก 12 ชั่วโมง จึงจะเห็นระดับน้ำ และเริ่มทำการวัดระดับเพื่อคำนวณปริมาตรก๊าซได้ ดังแสดงในตาราง ซึ่งข้อมูลแรกมีความดันที่กระเปาะพรุนเท่ากับ 0.206 บาร์ หรือ -595.4 มิลลิเมตรปรอท มีปริมาตรของก๊าซในเทนซิโอมิเตอร์เท่ากับ 5.92 ลูกบาศก์เซนติเมตร นำมาคำนวณเป็นผลคูณระหว่างความดันไอน้ำและอากาศกับปริมาตรก๊าซในเทนซิโอมิเตอร์เท่ากับ 1.094 บาร์ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเก็บบันทึกข้อมูลทุก 12 ชั่วโมง จำนวน 7 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งการวัดความดันสูญญากาศของกระเปาะจะสิ้นสุดที่ 0.142 บาร์ เพราะระดับน้ำลดลงไปถึงผิวดิน จากข้อมูลในตาราง 5 เมื่อนำไปเขียนกราฟการเปลี่ยนแปลงของผลคูณระหว่างความดันไอน้ำและอากาศกับปริมาตรของก๊าซที่เวลาต่างๆได้กราฟประกอบ 52 จะได้กราฟเส้นตรงซึ่งแสดงด้วยสมการ $y = 0.0317x + 0.703$ ซึ่ง y คือ ผลคูณระหว่างความดันไอน้ำและอากาศกับปริมาตรของก๊าซ (PV) และ x คือ เวลา แต่เนื่องจากจำนวนโมเลกุลของก๊าซเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลคูณระหว่างความดันไอน้ำและอากาศกับปริมาตรของก๊าซดังนั้นจากกราฟที่ได้เป็นเส้นตรงจึงอาจแปลความได้ว่าภายในเทนซิโอมิเตอร์มีความดันต่ำกว่าภายนอกเทนซิโอมิเตอร์ จึงทำให้โมเลกุลก๊าซจากภายนอกเข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์ด้วยอัตราคงที่



ภาพประกอบ 52 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของผลคูณระหว่างความดันไอน้ำและอากาศกับปริมาตรของก๊าซที่เวลาต่างๆ

3. ผลการทดสอบการนำน้ำของกระเปาะพรุน

การทดสอบอัตราการคืนกลับของน้ำที่แทรกกลับเข้ามาในเทนซิโอมิเตอร์ โดยฝังเทนซิโอมิเตอร์ไว้ในถังใส่ดินที่อัดแน่น การทดลองในครั้งนี้กระเปาะของเทนซิโอมิเตอร์อยู่ลึกจากผิวดิน 9.80 เซนติเมตรหลังจากนั้นปล่อยให้ดินดูดน้ำออกจากกระเปาะในขณะเดียวกันเทนซิโอมิเตอร์จะทำการเก็บบันทึกข้อมูลศักย์วัสดุพื้นไว้ในหน่วยความจำของโปรแกรมและจะแสดงผลข้อมูลศักย์วัสดุพื้นออกมาเป็นตัวเลขบนหน้าปัดเทนซิโอมิเตอร์ ผู้วิจัยจะทำการวัดระดับน้ำในเทนซิโอมิเตอร์ตั้งแต่เริ่มเห็นระดับน้ำและหลังจากนั้นจะวัดระดับน้ำทุกชั่วโมง ได้ผลการทดสอบแสดงอัตราการซึมออกจากเทนซิโอมิเตอร์ของน้ำก่อนหน้าลงไปบนดินดังตาราง 6

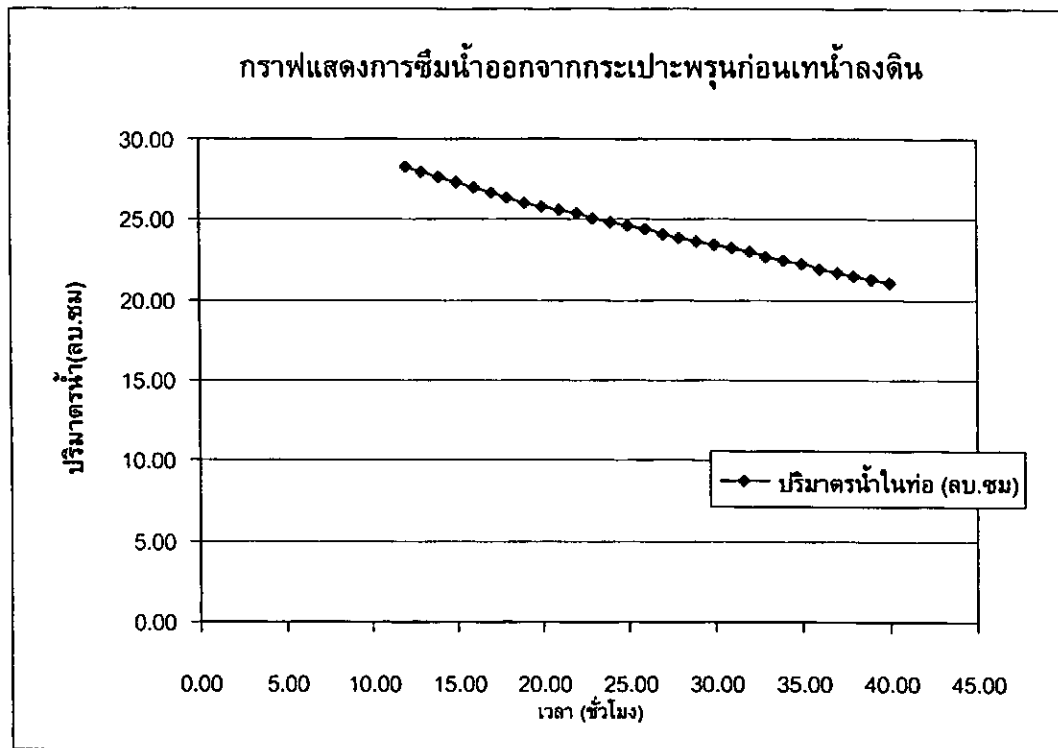
ตาราง 6 แสดงผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำออกจากเทนซิโอมิเตอร์ก่อนหน้าลงไปบนดิน

เวลา (ชั่วโมง)	ตัวเลขระดับ ศักย์ไฟฟ้า	ระดับความสูง ของน้ำในท่อ h_w (ซม)	ความดันที่กระเปาะพรุน (มิลลิเมตรปรอท)	ความดันน้ำ (บาร์)	ความดันน้ำ (บาร์)	ความดันไอน้ำ และอากาศ (บาร์)	ปริมาณน้ำ ในท่อ (ลบ.ซม)
12.00	17	21.999	-627.7	-0.837	0.022	-0.858	28.32
13.00	17	21.733	-627.7	-0.837	0.021	-0.858	27.98
14.00	15	21.466	-634.1	-0.845	0.021	-0.866	27.63
15.00	16	21.200	-630.9	-0.841	0.021	-0.862	27.29
16.00	14	20.955	-637.4	-0.850	0.021	-0.870	26.98
17.00	13	20.718	-640.6	-0.854	0.020	-0.874	26.67
18.00	13	20.449	-640.6	-0.854	0.020	-0.874	26.32
19.00	13	20.238	-640.6	-0.854	0.020	-0.874	26.05
20.00	13	20.053	-640.6	-0.854	0.020	-0.873	25.81
21.00	12	19.853	-643.8	-0.858	0.019	-0.878	25.56
22.00	13	19.669	-640.6	-0.854	0.019	-0.873	25.32
23.00	12	19.458	-643.8	-0.858	0.019	-0.877	25.05
24.00	12	19.303	-643.8	-0.858	0.019	-0.877	24.85
25.00	13	19.113	-640.6	-0.854	0.019	-0.873	24.60
26.00	13	18.924	-640.6	-0.854	0.019	-0.872	24.36
27.00	13	18.735	-640.6	-0.854	0.018	-0.872	24.12

ตาราง 6 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ตัวเลขระดับ ศักย์ไฟฟ้า	ระดับความสูง ของน้ำในท่อ h_w (ซม)	ความดันที่กระเปาะพรุน (มิลลิเมตรปรอท)	ความดันที่กระเปาะพรุน (บาร์)	ความดันน้ำ (บาร์)	ความดันไอน้ำ และอากาศ (บาร์)	ปริมาณน้ำ ในท่อ (ลบ.ซม)
28.00	13	18.546	-640.6	-0.854	0.018	-0.872	23.87
29.00	13	18.366	-640.6	-0.854	0.018	-0.872	23.64
30.00	13	18.181	-640.6	-0.854	0.018	-0.872	23.40
31.00	13	18.003	-640.6	-0.854	0.018	-0.871	23.18
32.00	13	17.848	-640.6	-0.854	0.018	-0.871	22.98
33.00	12	17.637	-643.8	-0.858	0.017	-0.875	22.70
34.00	13	17.448	-640.6	-0.854	0.017	-0.871	22.46
35.00	12	17.237	-643.8	-0.858	0.017	-0.875	22.19
36.00	12	17.042	-643.8	-0.858	0.017	-0.875	21.94
37.00	12	16.853	-643.8	-0.858	0.017	-0.875	21.70
38.00	11	16.653	-647.0	-0.862	0.016	-0.879	21.44
39.00	10	16.498	-650.2	-0.867	0.016	-0.883	21.24
40.00	10	16.323	-650.2	-0.867	0.016	-0.883	21.01

ข้อมูลตาราง 6 คำนวณความดันที่กระเปาะพรุนในหน่วยมิลลิเมตรปรอทได้จากสมการ $(3.224 \times \text{ตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับรู้ความดัน}) - 682.47$ หรือคำนวณความดันที่กระเปาะพรุนในหน่วยบาร์ได้จาก $[\text{ความดันที่กระเปาะพรุนในหน่วยมิลลิเมตรปรอท} \times 1.013] / 760$ และหาปริมาณน้ำในท่อได้จาก $\pi r^2 h_w$ โดยรัศมีของท่อเท่ากับ 0.64 เซนติเมตร จากข้อมูลตาราง 6 สามารถนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำที่ไหลออกจากเทนซิโอมิเตอร์กับเวลาดังภาพประกอบ 53 ความดันที่กระเปาะพรุนที่อ่านได้ในช่วงเริ่มต้นจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เมื่อรอนเห็นระดับน้ำโดยใช้เวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งมีความดันที่กระเปาะพรุนเทียบกับความดันที่ระดับความสูงของปรอทเท่ากับ -627.7 มิลลิเมตรปรอท หรือ -0.837 บาร์ ซึ่งมีปริมาตรของน้ำในเทนซิโอมิเตอร์เท่ากับ 28.32 ลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณน้ำในเทนซิโอมิเตอร์ลดลงเรื่อยๆ จนถึงชั่วโมงที่ 40 ปริมาณน้ำในเทนซิโอมิเตอร์มีปริมาตรเท่ากับ 21.01 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีความดันสูญญากาศที่กระเปาะเทียบกับความดันที่ระดับความสูงของปรอทเท่ากับ -650.2 มิลลิเมตรปรอท หรือ -0.867 บาร์ หลังจากนั้นผู้วิจัยเทน้ำลงไปในดิน ผลการทดสอบได้ข้อมูลดังตาราง 7



ภาพประกอบ 53 กราฟแสดงการซึมน้ำออกจากกระเปาะพรุนก่อนเทน้ำลงไปในดิน

ตาราง 7 แสดงการทดสอบอัตราการคืนกลับของน้ำที่แทรกกลับเข้ามาในเทนซิโอมิเตอร์หลังเทน้ำลงไปในดิน

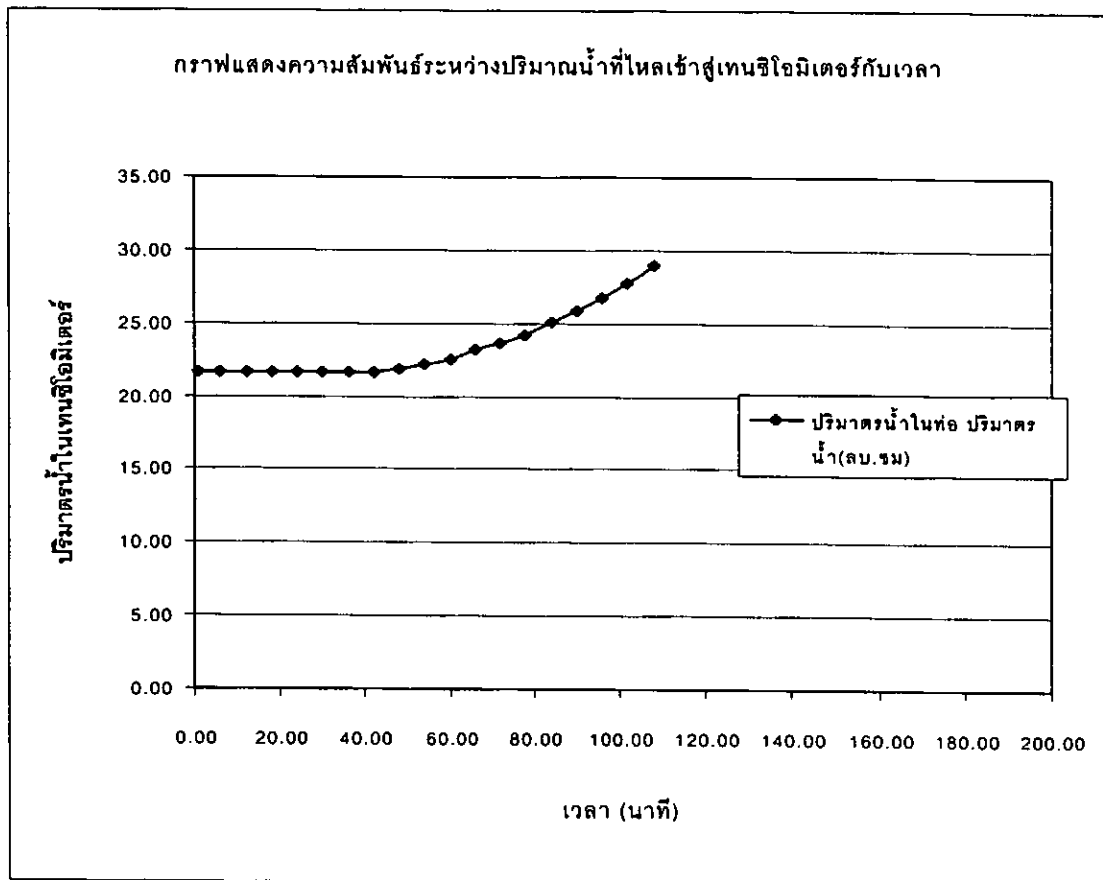
เวลา (นาท)	ตัวเลขระดับ ศักย์ไฟฟ้า	ระดับความสูง ของน้ำในท่อ (h_w)(ซม)	ความดันที่กระเปาะพรุน (มิลลิเมตรปรอท) (บาร์)	ความดันที่ระดับ ผิวน้ำในท่อ (บาร์)	ความดันไอ และอากาศ (บาร์)	ปริมาณน้ำในท่อ (ลบ.ซม)	
1.00	10	16.323	-650.2	-0.867	0.016	-0.883	21.01
6.00	10	16.283	-650.2	-0.867	0.016	-0.883	20.96
12.00	8	16.273	-656.7	-0.875	0.016	-0.891	20.95
18.00	10	16.253	-650.2	-0.867	0.016	-0.883	20.92
24.00	10	16.253	-650.2	-0.867	0.016	-0.883	20.92
30.00	10	16.252	-650.2	-0.867	0.016	-0.883	20.92
36.00	10	16.252	-650.2	-0.867	0.016	-0.883	20.92
42.00	9	16.316	-653.4	-0.871	0.016	-0.887	21.00
48.00	10	16.491	-650.2	-0.867	0.016	-0.883	21.23

ตาราง 7 (ต่อ)

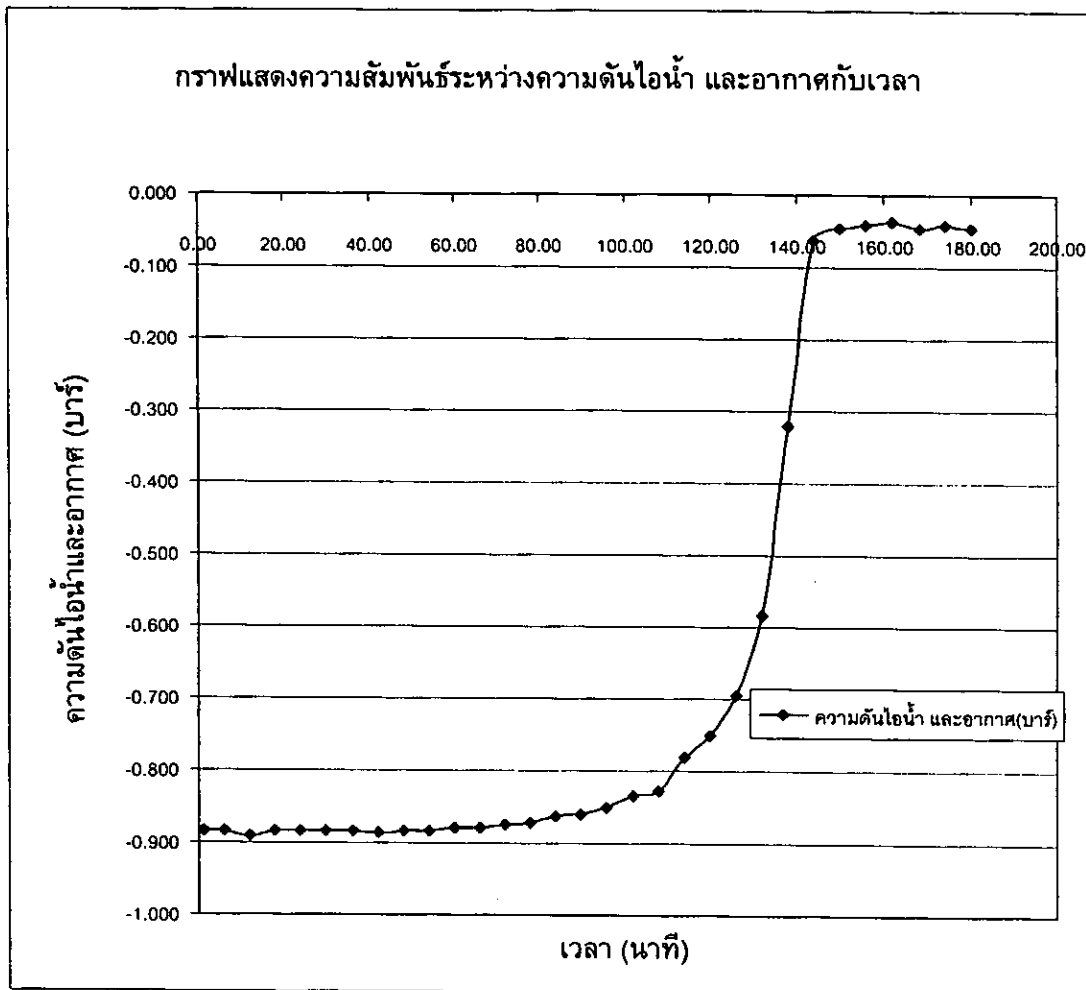
เวลา (นาทีก)	ตัวเลขระดับ ศักย์ไฟฟ้า	ระดับความสูง ของน้ำในท่อ (h_w)(ซม)	ความดันที่กระเปาะพรุน (มิลลิเมตรปรอท)	ความดันที่ระดับ เปาะพรุน (บาร์)	ความดันที่ระดับ ผิวน้ำในท่อ (บาร์)	ความดันไอน้ำ และอากาศ (บาร์)	ปริมาตรน้ำในท่อ (ลบ.ซม)
54.00	10	16.696	-650.2	-0.867	0.016	-0.883	21.49
60.00	11	16.996	-647.0	-0.862	0.017	-0.879	21.88
66.00	11	17.451	-647.0	-0.862	0.017	-0.880	22.46
72.00	12	17.821	-643.8	-0.858	0.017	-0.876	22.94
78.00	13	18.246	-640.6	-0.854	0.018	-0.872	23.49
84.00	15	18.851	-634.1	-0.845	0.018	-0.864	24.27
90.00	16	19.451	-630.9	-0.841	0.019	-0.860	25.04
96.00	18	20.114	-624.4	-0.832	0.020	-0.852	25.89
102.00	22	20.906	-611.5	-0.815	0.021	-0.836	26.91
108.00	24	21.806	-605.1	-0.807	0.021	-0.828	28.07
114.00	30		-585.7	-0.781		-0.781	
120.00	37		-563.2	-0.751		-0.751	
126.00	50		-521.2	-0.695		-0.695	
132.00	76		-437.4	-0.583		-0.583	
138.00	137		-240.7	-0.321		-0.321	
144.00	197		-47.2	-0.063		-0.063	
150.00	201		-34.3	-0.046		-0.046	
156.00	202		-31.1	-0.041		-0.041	
162.00	203		-27.9	-0.037		-0.037	
168.00	201		-34.3	-0.046		-0.046	
174.00	202		-31.1	-0.041		-0.041	
180.00	201		-34.3	-0.046		-0.046	

ข้อมูลในตาราง 7 คำนวณความดันที่กระเปาะพรุนในหน่วยมิลลิเมตรปรอทได้จากสมการ $(3.224 \times \text{ตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับรู้ความดัน}) - 682.47$ หรือคำนวณความดันที่กระเปาะพรุนในหน่วยบาร์ได้จาก $[\text{ความดันที่กระเปาะพรุนในหน่วยมิลลิเมตรปรอท} \times 0.1013] / 760$ และหาปริมาตรน้ำในท่อได้จาก $\pi r^2 h_w$ โดยรัศมีของท่อเท่ากับ 0.64 เซนติเมตร

จากข้อมูลในตาราง 7 สามารถนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่ เทนซิโอมิเตอร์กับเวลา และการเปลี่ยนแปลงของความดันอากาศในเทนซิโอมิเตอร์ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้อัตราการคืนกลับของน้ำที่แทรกกลับเข้ามาในเทนซิโอมิเตอร์หลังเทน้ำลงไปบนดิน ดังภาพประกอบ 54 และภาพประกอบ 55 ปรากฏว่าในช่วงเวลาเริ่มเทน้ำลงไปจนถึงดินที่อัดแน่นจนถึง นาทีที่ 36 นาที ปริมาณน้ำในเทนซิโอมิเตอร์ลดลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดินยังมีค่าต่ำทำให้ดึงน้ำในเทนซิโอมิเตอร์ออกไป หรือน้ำจากผิวดินยังไม่ซึมลงมาถึงบริเวณรอบกระเปาะ ในช่วงเวลาตั้งแต่นาทีที่ 42 ปริมาณน้ำในเทนซิโอมิเตอร์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเริ่มเข้าสู่ นาทีที่ 109 ระดับน้ำจะสูงตรงกับขอบของแป้นเกลียววัดแหวนโอริง 2 มีปริมาณน้ำในเทนซิโอมิเตอร์เท่ากับ 28.07 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีความดันที่กระเปาะพุนเทียบกับความดันที่ระดับความสูงของปรอทเท่ากับ -605.1 มิลลิเมตรปรอท หรือ -0.807 บาร์ หลังจากนั้นผู้วิจัยไม่สามารถมองเห็นระดับน้ำในเทนซิโอมิเตอร์ได้อีก แต่เทนซิโอมิเตอร์ยังบันทึกข้อมูลตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับรู้ความดันเก็บไว้ในหน่วยความจำของโปรแกรม จะเห็นได้ว่าตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับรู้ความดันยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเวลาผ่านไป 150 นาที ความดันสูญญากาศของกระเปาะหรือศักย์วัสดุพื้นของดินมีค่าเท่ากับ -34.3 มิลลิเมตรปรอท หรือ -0.05 บาร์ หลังจากนั้น ความดันสูญญากาศของกระเปาะเริ่มคงที่ เมื่อนำข้อมูลความดันของไอน้ำและอากาศมาทำกราฟเทียบกับเวลา พบว่า ช่วงเวลาที่ความดันเปลี่ยนแปลงมากที่สุดคือในช่วง นาทีที่ 114 ถึง 144 ซึ่งสังเกตเห็นได้จากกราฟการเปลี่ยนแปลงความดันกับเวลา โดยมีการเปลี่ยนแปลงความดันจาก -0.781 บาร์ ถึง -0.063 บาร์ เราอาจกล่าวได้ว่าช่วงเวลานี้เป็นช่วงที่ดินรอบๆกระเปาะเริ่มอึมน้ำทำให้น้ำคืนกลับเข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์ด้วยอัตราเร็วสูงสุด โดยใช้เวลาประมาณ 30 นาทีในการเข้าแทนที่อากาศภายในเทนซิโอมิเตอร์ทำให้ปริมาตรอากาศลดลงและความดันเพิ่มขึ้นจนเกือบเท่ากับความดันบรรยากาศ คือ -0.781 บาร์(ความดันเกจเทียบกับบรรยากาศ โดยความดัน 0 บาร์ เป็นค่าความดันบรรยากาศ)



ภาพประกอบ 54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์กับเวลา



ภาพประกอบ 55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำและอากาศกับเวลา

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างเซนซิโอมิเตอร์สำหรับวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดินและดำเนินการวิจัยดังนี้

1. ออกแบบและสร้างเซนซิโอมิเตอร์ตามแบบที่ผู้วิจัยออกแบบขึ้น
2. ออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ในการวัดและแสดงผลการวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน โดยการนำเซนซิโอมิเตอร์ที่สร้างขึ้นไปเชื่อมต่อหัวรับรู้ความดัน และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานร่วมกับเบสิกสเตมปี 2SX การเขียนโปรแกรมบนเบสิกสเตมปี 2SX จะทำผ่านทางพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์
3. เขียนโปรแกรมเพื่อทำการเก็บค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน ผู้วิจัยใช้ภาษาพีเบสิกเขียนโปรแกรมคำสั่งในการเก็บค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดินที่ชั่วโมงต่างๆ การควบคุมการทำงานในการรับส่งข้อมูล และแสดงผลของข้อมูลที่เก็บบันทึกไว้ทางหน้าจอคอมพิวเตอร์หรือแสดงด้วยตัวเลข LED
4. การเปรียบเทียบและทดสอบเซนซิโอมิเตอร์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ได้ผลการทดสอบดังนี้

4.1 ตอนที่ 1 การเปรียบเทียบเซนซิโอมิเตอร์เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์วัสดุพื้นหรือตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้ากับความดันที่กระเปาะพรุณพบว่า เซนซิโอมิเตอร์ที่สร้างขึ้นสามารถวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดินอยู่ระหว่าง 0 ถึง -0.782 บาร์ โดยเทียบกับความดันที่วัดได้จากมาโนมิเตอร์แบบปรอทซึ่งจากการทดสอบปรอทไม่สามารถขึ้นได้สูงเกินกว่า -586.5 มิลลิเมตรปรอท ทั้งนี้เนื่องจากความดันลดลงส่งผลทำให้เกิดฟองในเซนซิโอมิเตอร์ซึ่งคาดว่าอาจเกิดจากการเป็นไอของน้ำหรือการซึมของอากาศผ่านทางเซนซิโอมิเตอร์ และเมื่อนำข้อมูลจากการทดสอบไปเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์วัสดุพื้นกับความดันที่กระเปาะพรุณ ได้กราฟเส้นตรงที่แทนด้วยสมการ $y = 3.2245x - 682.47$ ผู้วิจัยได้นำสมการนี้ไปใช้ในการเปรียบเทียบผลการวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดินในการทดสอบตอนที่ 2 และผลการทดสอบการนำน้ำของกระเปาะพรุณในตอนที่ 3

4.2 ตอนที่ 2 เมื่อทดสอบการผ่านของก๊าซ(อากาศและไอน้ำ) เข้าสู่เซนซิโอมิเตอร์พบว่า ความดันที่กระเปาะพรุณที่ได้จากการเปรียบเทียบจากตอนที่ 1 สามารถวัดได้ 0.142 บาร์ เมื่อนำความดันไอน้ำและอากาศคูณกับปริมาตรของก๊าซที่อยู่ในเซนซิโอมิเตอร์ที่ชั่วโมงต่างๆและนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลคูณของความดันไอน้ำและอากาศกับปริมาตรของก๊าซที่เวลาต่างๆ ได้กราฟเป็นเส้นตรง มีสมการเส้นตรง $y = 0.0317x + 0.703$ โดยที่ y คือผลคูณความดันไอน้ำและอากาศกับปริมาตรก๊าซ (PV) และ x คือเวลา และจากการที่ผล

คุณสมบัติของดินเหนียวและอากาศกับปริมาตรของก๊าซเป็นสัดส่วนตรงกับจำนวนโมเลกุลก๊าซ จึงกล่าวได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงจำนวนโมเลกุลของก๊าซที่เข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์เพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่ ซึ่งอัตราการผ่านของโมเลกุลก๊าซนี้สามารถคำนวณจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของ ผลคูณ PV อุณหภูมิห้องขณะทำการทดลองและค่าคงที่โบลท์มานน์

4.3 ตอนที่ 3 ทดสอบการนำน้ำของกระเปาะพรุณพบว่า เมื่อนำเทนซิโอมิเตอร์ไปฝังไว้ในดินที่อัดแน่น ความดันสูญญากาศในช่วงเริ่มต้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วแต่ไม่สามารถเห็นระดับน้ำ เนื่องจากระดับน้ำถูกบังโดยส่วนของฝาครอบ จนกระทั่งเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง จึงเริ่มเห็นระดับน้ำครั้งแรก สามารถอ่านค่าความดันที่กระเปาะพรุณเทียบกับความดันที่ระดับความสูงปรอทเท่ากับ -627.7 มิลลิเมตรปรอท หรือ -0.837 บาร์ ปริมาณน้ำในเทนซิโอมิเตอร์มีปริมาตรเท่ากับ 28.32 ลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเวลาผ่านไประดับน้ำในเทนซิโอมิเตอร์ลดลงเรื่อยๆ พร้อมกับการลดลงของความดันที่กระเปาะพรุณจนถึง -0.867 บาร์ ซึ่งมีปริมาณน้ำในเทนซิโอมิเตอร์เท่ากับ 21.01 ลูกบาศก์เซนติเมตร ผู้วิจัยเทน้ำลงไปในถังดิน พบว่า เริ่มแรกระดับน้ำในเทนซิโอมิเตอร์ยังลดลงทั้งนี้เนื่องจากน้ำที่ไหลไปในถังดินยังไหลซึมไม่ถึงกระเปาะพรุณ จนกระทั่งเวลาผ่านไป 36 นาทีระดับน้ำในท่อเริ่มมีระดับสูงขึ้น ปริมาณน้ำในเทนซิโอมิเตอร์เพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งเวลาเข้าสู่หน้าที่ที่ 109 ระดับความสูงของน้ำในเทนซิโอมิเตอร์มีค่าเท่ากับ 21.806 เซนติเมตร มีปริมาณน้ำในเทนซิโอมิเตอร์เท่ากับ 28.07 ลูกบาศก์เซนติเมตร ความดันที่กระเปาะพรุณเทียบกับความดันที่ระดับความสูงปรอทเท่ากับ -605.1 มิลลิเมตรปรอท หรือ -0.807 บาร์ หลังจากนั้นไม่สามารถอ่านระดับน้ำได้เนื่องจากมองไม่เห็นระดับน้ำ อย่างไรก็ตามผู้วิจัยยังคงเก็บข้อมูลความดันด้วยเทนซิโอมิเตอร์ต่อไปจนความดันเริ่มคงที่ เมื่อนำความดันนี้มาเขียนกราฟระหว่างความดันกับเวลา และนำกราฟนี้มาพิจารณาประกอบกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์กับเวลา พบว่าอัตราการคืนกลับของน้ำที่แทรกกลับเข้ามาในเทนซิโอมิเตอร์ มีอัตราเร็วในการเข้าแทนที่อากาศและไอน้ำในเทนซิโอมิเตอร์ เพียงพอที่จะทำให้ความดันเปลี่ยนจาก -0.781 บาร์ไปเป็น -0.063 บาร์ ภายในเวลา 30 นาที ถ้าดินรอบๆกระเปาะอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

อภิปรายผลการวิจัย

1. ในการออกแบบและสร้างเทนซิโอมิเตอร์สำหรับวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน เมื่อทำการวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดินต้องไม่ปล่อยให้แรงดึงน้ำจากดินลดลงต่ำกว่า -0.867 บาร์ เพราะจะทำให้เทนซิโอมิเตอร์บรรจุน้ำสูญเสียน้ำออกมาหมดทำให้อากาศเข้าแทนที่ได้ ทั้งนี้ควรเพิ่มความยาวของเทนซิโอมิเตอร์เพื่อต้องการให้น้ำอยู่ภายในเทนซิโอมิเตอร์นานขึ้น
2. ปัญหาของการใช้เทนซิโอมิเตอร์สำหรับวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดินได้แก่ การรั่ว

ซึมของอากาศที่เข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์ซึ่งสามารถพบได้ 3 จุด คือ แป้นรัดหัวต่อหัวรับรู้ความดัน ซึ่งเป็นจุดที่ใช้เปิดเติมน้ำ หัวต่อตัวรับรู้ความดัน และก่อนทดสอบควรให้กระเปาะพุนอิมตัวด้วยน้ำเสมอ เป็นต้น การรั่วซึมของอากาศมีผลทำให้บริเวณสูญญากาศถูกแทนที่ด้วยอากาศได้

3. จากการทดสอบการเปรียบเทียบเทนซิโอมิเตอร์เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์วัสดุพื้นหรือตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้ากับความดันสูญญากาศที่กระเปาะพบว่าปรอทไม่สามารถขึ้นได้สูงถึง 760 มิลลิเมตรปรอท ทั้งนี้เนื่องจากความดันลดลงส่งผลทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำและการรั่วซึมของอากาศผ่านเข้าสู่ท่อของมาโนมิเตอร์ส่งผลให้เกิดฟองภายในท่อเพิ่มขึ้น

4. ผลการทดสอบการผ่านของก๊าซที่เข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์พบว่าการรั่วซึมของก๊าซ ซึ่งผลคูณระหว่างความดันของกระเปาะกับปริมาตรของก๊าซได้กราฟเป็นเส้นตรงจึงแปลความได้ว่าภายในเทนซิโอมิเตอร์มีความดันต่ำกว่าภายนอกเทนซิโอมิเตอร์ จึงทำให้โมเลกุลก๊าซจากภายนอกเข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์ด้วยอัตราคงที่

ข้อเสนอแนะ

การออกแบบและสร้างเทนซิโอมิเตอร์สำหรับวัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน

1. การกำหนดช่วงเวลาที่จัดเก็บบันทึกข้อมูลให้เร็วหรือช้ากว่านี้ สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนตัวต้านทานหรือตัวเก็บประจุของวงจรตั้งเวลา หรือแก้ไขโปรแกรมในส่วนตั้งเวลาการจัดเก็บ

2. การจัดเก็บข้อมูลสามารถจัดเก็บข้อมูลลงในหน่วยความจำอีอีพรอมได้มากกว่า 24 ข้อมูล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเขียนโปรแกรมของผู้วิจัย

3. ดินที่มีความพรุนมากหรือดินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันไม่เหมาะที่จะใช้เทนซิโอมิเตอร์วัดศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน เนื่องจากการสัมผัสที่ไม่แน่นระหว่างกระเปาะพุนกับดินส่งผลทำให้เมื่อศักย์วัสดุพื้นของดินรอบกระเปาะพุนเพิ่มขึ้น น้ำไม่สามารถกลับเข้าสู่เทนซิโอมิเตอร์ได้ ทำให้ค่าที่วัดได้ไม่ถูกต้อง

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- กัลยา วาริชย์บัญชา. (2544). *การวิเคราะห์สถิติ : สถิติเพื่อการตัดสินใจ*. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2541). *ปฐพีวิทยาเบื้องต้น*. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2539). *ฟิสิกส์ 1*. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จิรวัดน์ ใจอ่อนน้อม และ นภัทร วัจนเทพินทร์. (2541). *วงจรดิจิทัลภาคปฏิบัติ รหัส 3104-2003*. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : สกายบุ๊กส์.
- ชัยวิทย์ ศิลาวัชชาไทย. (2526). *ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของระบบสุญญากาศ*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น).
- ถวัลย์วงศ์ ไกรโรจนานนท์. (2542). *อิเล็กทรอนิกส์ระบบดิจิทัล*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์พิมพ์งาม.
- บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด. (2519). *คู่มือไอซี ชิพซัพพอร์ตและหน่วยความจำ (Chip Support And Memory Data Book)*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- บัญชา ศิลปสกุลสุข. (2539). *ฟิสิกส์และเทคโนโลยีสุญญากาศ*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ Science center.
- ไมตรี วรวิจิตรยากุล. (2530). *ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า เล่ม 1*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ศูนย์การพิมพ์พลชัย.
- วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2540). 6(2).
- วิทย์ เทียงบูรณธรรม. (2541). *พจนานุกรมอังกฤษ-ไทย*. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- สุนทรียังชัชวาลย์ ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน. (2535). *ชลศาสตร์ในระบบดิน-พืช*. นครปฐม : ม.ป.พ.
- สำอังกค์ ศรีนิลทา. (2517). *คู่มือปฏิบัติการปฐพีวิทยาเบื้องต้น*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์สำนักทำเนียบนายกรัฐมนตรี.
- เอกสารประกอบคำอธิบายของไอซี ADC08040LCN แบบ CMOS 8 Bit ของบริษัท National Semiconductor Corporation.
- เอกสารประกอบคำอธิบายของ Pressure Sensors Absolute Unamplified 24PCCFA6A ของบริษัท Honeywell.
- Baner,L.D,Gardner,W.H. & Gardner,E.R. (1901). *Soil Physies Fourth Edition*. New York : Chichester.Brisbane.Toronto : John Wiley Sons,Inc.

- Bignell, James and Donovan, Robert. (2000). *Digital Electronics Fourth Edition*.
- Brady, N.C. (1974). *The Nature and Properties of Soils Tenth Edition*. Macmillan Publishing Co. Inc.
- Brady, N.C. (1999). *Elements of The Nature and Properties of Soils*. Macmillan Publishing Co. Inc.
- Brady, N.C. & Weil, R.R. (2000). *Element of the Nature and Properties of Soils*. Upper Saddle River N.J : Prentice Hall
- Cooper, W.D. & Helfrick, A.D. (1989). *Electronic Instrumentation and Measurement Techniques Third Edition*.
- Greulach, V.A. (1973). *Plant Function and Structure*. New York: Macmillan Publishers.
- Hopkins, W.G. (1999). *Introduction to Plant Physiology*. New York : Wiley, J. & Sons, Inc.
- Hubert, Charles I. (1982). *Electric Circuits AC/DC An Integrated*.
- Jalota, S.K. , Khera, R. & Ghuman, B.S. (1998). *Method in Soil Physics*. New Delhi Madras, Bombay, Calcutta & London : Narosa Publishing House.
- Lenk John D. (1993). *Lenk 's Digital Handbook Design and Troubleshooting*. The United States of America : Mc Graw - Hill, Inc.
- Peebles, Peyton Z, Jr. Giurma Tayeb, A. (1991). *Principles of Electronical Engineering*.
- Rowell, D.L. (1994). *Soil Science Methods and Application*.
- Taiz, Lincoln and Zeiger, Eduardo. (1991). *Plant Physiology* . Benjamin Cummings Publishing Company, Inc.
- Uffenbeck, J.E. (1982). *Introduction to Electronics*. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliff.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

โปรแกรมควบคุมการทำงานของ ตัวควบคุม เบลิกแสดมปี 2SX ในการควบคุมการเก็บข้อมูล
ศักย์วัสดุพื้นและการแสดงผลของวงจรรีเลย์ทรอนิกส์

```

        ' {$STAMP BS2sx}
        'PROGRAM # 0

'MAIN PROGRAM
GOSUB RESET          'Set program new.
N_WRITE VAR WORD
N_1WRITE VAR BIT
N_READ VAR WORD
N1 VAR BYTE          ' n1 is total number clock = n1*10
N_1READ VAR BIT
RRESULT VAR BYTE
RD_ADDRESS VAR WORD
N_WRITE = 0
N_READ = 0
T VAR BIT            ' Check timer 0 or 1.
T = 1

'Address of EEPROM storage locations.
ADD_EEPROM VAR WORD      'Address of EEPROM storage locations.
WR_ADDRESS VAR WORD      'Variable for RESULT in WR_ADDRESS.
HOUR CON 25              'Number of HOUR to get.
MAXHOUR DATA (HOUR)     'Set aside eeprom for hour.
ENDMAXHOUR CON MAXHOUR + HOUR-1      'End of allocated eeprom.
'Finish address of eeprom storage locations.

RECORD1:
    'WR_ONBUS
    HIGH 5
    LOW 1

```

```

PAUSE 10
LOW 3
PAUSE 100
HIGH 3
PAUSE 100
LOW 2
PAUSE 1000

```

```

' DATA ON REGISTER.

```

```

GOSUB RD_DATA      'READ DATA IN REGISTER.

```

```

GOSUB WR_EEPROM   'WRITE DATA IN EEPROM.

```

```

RECORD2:

```

```

TIME VAR BIT

```

```

TIME = IN5          'PIN 5 IS INPUT OF TIMER

```

```

DEBUG IBIN TIME,CR  ' SHOW STATE OF TIMER.

```

```

IF TIME = 1 THEN RECORD4

```

```

DEBUG "TIME = 0 (TO RECORD3 (SAVE))"

```

```

RECORD3:

```

```

n1 = 0

```

```

GOSUB Starttimer

```

```

n1 = n1 +1

```

```

IF n1 < 10 THEN RECORD4      'n1 < 10 CHECK BUTTON AT RECORD4.

```

```

IF N_WRITE = 25 THEN RECORD4

```

```

IF N_WRITE > 25 THEN OVERN_WRITE

```

```

GOSUB RECORD1

```

```

DEBUG "SHOW CLOCK = 1 HOUR"

```

```

n1 = 0

```

```

N_WRITE = N_WRITE +1

```

RECORD4:

GOSUB BUTTON1

IF TARGET = 1 THEN RECORD5 ' BUTTON IS BOUNCE AND GO TO RECORD5

GOSUB SLEPP 'BUTTON IS NOT BOUNCE.

GOTO RECORD2 'CHECK TIMER 0 OR 1.

RECORD5: 'READ DATA IN EEPROM AND DECODE DATA (RRESULT).

GOSUB RD_EEPROM 'READ DATA IN EEPROM.

IF N_READ < 25 THEN RECORD2

N_READ = 0

GOTO RECORD2 'CHECK NUMBER OF DATA.

OVERN_WRITE: 'N_WRITE > 25

DEBUG "N_WRITE > 25"

STOP

RESET:

DIRS = %0100111011011111

LOW 0 'WRITE 0 TO OUTPUT.

HIGH 1 'WRITE 1 TO OUTPUT.

HIGH 2 'WRITE 1 TO OUTPUT.

HIGH 3 'WRITE 1 TO OUTPUT.

HIGH 4 'WRITE 1 TO OUTPUT.

HIGH 6 'WRITE 1 TO OUTPUT.

LOW 7 'WRITE 0 TO OUTPUT.

LOW 9 'WRITE 0 TO OUTPUT.

PAUSE 10

HIGH 11 'WRITE 1 TO OUTPUT.

PAUSE 10

HIGH 10 'WRITE 1 TO OUTPUT.

```

PAUSE 10
    LOW 11                'WRITE 0 TO OUTPUT.
PAUSE 10
    LOW 10                'WRITE 0 TO OUTPUT.
PAUSE 10
    HIGH 14               'WRITE 1 TO OUTPUT.
RETURN
RD_DATA:                 'Parallel load 8 bite Shft Register.
    X VAR BYTE
    RESULT VAR BYTE
    RESULT = 0
    HIGH 0
    LOW 14
    PAUSE 100
    HIGH 14
    PAUSE 100
    LOW 0
    Y = IN15*1
    RESULT = RESULT + Y
    FOR X = 1 TO 7        'COUNTER FOR / NEXT LOOP.
        LOW7
        PAUSE 10
        HIGH 7
        INPUT 15         'MAKE PIN 15 AN INPUT.
        IF X = 1 THEN VALUE2 'SHOW DATA AND DISPLAY IN BINARY.
        IF X = 2 THEN VALUE3
        IF X = 3 THEN VALUE4
        IF X = 4 THEN VALUE5

```

IF X = 5 THEN VALUE6
IF X = 6 THEN VALUE7
IF X = 7 THEN VALUE8

VALUE1: 'VALUE AT FIRST BYTE.

Y = IN15*1

GOTO VALUE

VALUE2: 'VALUE AT 2 BYTE.

Y = IN15*2

GOTO VALUE

VALUE3: 'VALUE AT 3 BYTE.

Y = IN15*4

GOTO VALUE

VALUE4: 'VALUE AT 4 BYTE.

Y = IN15*8

GOTO VALUE

VALUE5: 'VALUE AT 5 BYTE.

Y = IN15*16

GOTO VALUE

VALUE6: 'VALUE AT 6 BYTE.

Y = IN15*32

GOTO VALUE

VALUE7: 'VALUE AT 7 BYTE.

Y = IN15*64

GOTO VALUE

VALUE8: 'VALUE AT 8 BYTE.

Y = IN15*128

GOTO VALUE

VALUE:

RESULT = RESULT + Y 'SHOW DATA AND DISPLAY IN BINARY.

RESULT = RESULE

DEBUG DEC RESULT, CR

NEXT

RETURN

WR_EEPROM: 'WRITEDATA IN EEPROM.

DEBUG "STORING"

DEBUG IBIN RRESULT

WR_ADDRESS = MAXHOUR + N_WRITE "บันทึกข้อมูลในอีอีพรอม"

WRITE WR_ADDRESS,RESULT

PAUSE 100

RETURN

BUTTON1: 'BUTTON1 COMMAND BOUNCE.

TARGET VAR BITE

BTSWITCH VAR BYTE 'WORKSPACE FOR BUTTON INSTRUCTION.

BTSWITCH = 0 'CLEAR THE WORKSPACE VARIABLE.

'TRY CHANGING THE DELAY VALUE (255) IN BUTTON TO SEE THE 'EFFECT OF
'ITS MODES;

'0 = NO AUTOREPEAT (ONE ACTION PER BUTTON PRESS).

BUTTON 13 ,0,255,250,BTSWITCH,1,PRESS 'GO TO PRESS UNLESS..

TARGET = 0 'BUTTON IS BOUNCE.

RETURN

SLEPP:

DEBUG "SLEEP"

SLEEP 3

RETURN

RD_EEPROM:

PAUSE 2000 DELAY TIME EEPROM READ WAIT 2 SECOND.

DEBUG"READING"

DEBUG IBIN8 RRESULT ," ", BINARY =" ,DEC RRESULT," ", "DECIMAL"

RD_ADDRESS = MAXHOUR +N_READ 'RD_ADDRESS IS ADDRESS READ RESULT.

READ RD_ADDRESS , RRESULT

N_READ = N_READ + 1

DEBUG "DATA =", DEC N_READ ,CR 'LABLE DATA N_READ.

DECODE:

PRESULT VAR WORD 'DECODE DATA (RRESULT)

PPRESURE VAR WORD

HIGH 10

HIGH 11

PAUSE 10

LOW 11

PAUSE 10

LOW 10

DDECODE VAR BYTE 'DECODE DATA(RRESULT)

DDECODE = RRESULT

'PRESURE = DDECODE*/\$032E +673

'DEBUG DEC ? PRESURE ,CR

'PPRESURE = 100 - PRESURE 'PRESURE (BAR)

DEBUG DEC ? DDECODE ,CR

IF DDECODE = 0 THEN NDECODE

FOR X = 1 TO DDECODE

HIGH 9 'P9 IS HIGH TO CLOCK FOR DECODE 7 SEGMENT.

PAUSE 10

LOW 9 "P9 IS LOW TO CLOCK FOR DECODE 7 SEGMENT.

NEXT

NDECODE:

RETURN

Starttimer:

LOW 4

PAUSE 5

HIGH 4

RETURN

RECORD1:

'WR_ONBUS

HIGH 5

LOW 1

PAUSE 10

LOW 3

PAUSE 100

HIGH 3

PAUSE 100

LOW 2

PAUSE 1000

'DATA ON REGISTER.

GOSUB RD_DATA

'READ DATA IN REGISTER.

GOSUB WR_EEPROM

'WRITE DATA IN EEPROM.

RETURN

SET6:

N1 = 0

GOSUB RECORD4

```

RETURN
'PROGRAM 2
'PROGRAM #2
RECORD6:      'READ DATA IN EEPROM AND DECODE DATA(RRESULT)
               GOSUB RD_EEPROM          'READ DATA IN EEPROM.
               IF N_READ < 25 THEN RECORD5
               N_READ = 0
               GOTO RECORD7             'RETURN GO TO RECORD2. เช็คนจำนวนข้อมูล
BUTTON2:      'BUTTON1 COMMAND BOUNCE.

               'WORKSPACE FOR BUTTON INSTRUCTION.
               BSWITCH = 0              'CLEAR THE WORKSPACE VARIABLE.
'TRY CHANGING THE DELAY VALUE (255) IN BUTTON TO SEE THE 'EFFECT OF
'ITS MODES;
'0 = NO AUTOREPEAT (ONE ACTION PER BUTTON PRESS).
               BUTTON 13 ,0,255,250,BSWITCH,1,PRESS      'GO TO PRESS UNLESS..
               TARGET = 1                'P12 IS 1.
RETURN
PPRESS:
               TARGET = 0                'BUTTON IS BOUNCE.
RETURN
FINAL:
               GOSUB RD_EEPROM
               N_WRITE = 25
RETURN

```

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาสมการเชิงเส้นด้วยวิธีการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

วิธีการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis) เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว ที่มีความสัมพันธ์อยู่ในรูปเชิงเส้น สำหรับคู่อันดับของข้อมูล X_i, Y_i จะมีความสัมพันธ์กับสมการเชิงเส้น $Y = \beta_0 + \beta_1 X$ ที่ใช้แทนกลุ่มข้อมูลดังนี้

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + e_i \quad , i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

เมื่อ Y คือ ตัวแปรตาม (Dependent Variable) เนื่องจากค่าของ Y ขึ้นอยู่กับค่า X

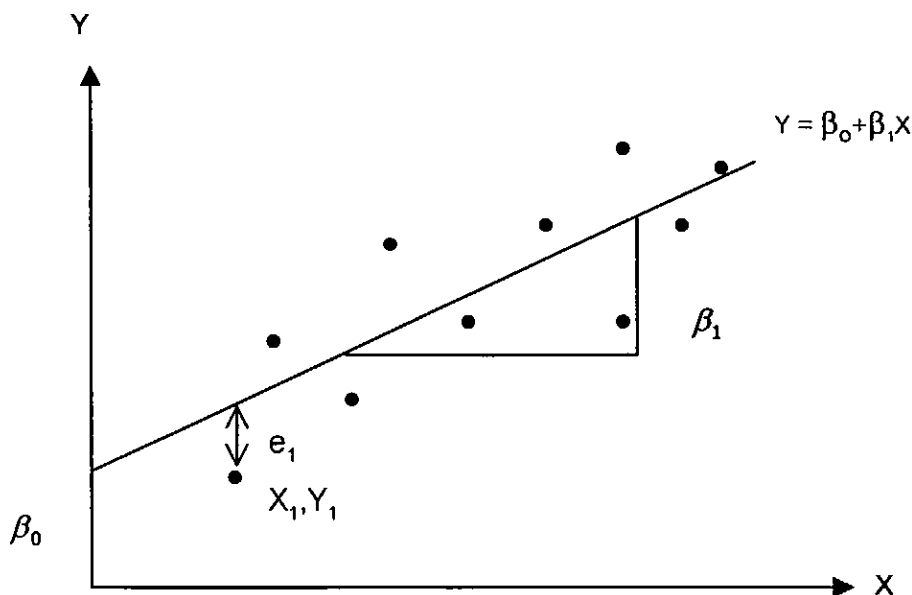
X คือ ตัวแปรอิสระ (Independent Variable)

β_0 คือ ส่วนตัดแกน Y

β_1 คือ ความชัน (Slope) ของเส้นตรง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Y เมื่อ X เปลี่ยนไป 1 หน่วย และเรียก β_1 ว่า สัมประสิทธิ์ความถดถอย (Regression Coefficient)

e คือ ค่าความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม (Random Error)

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว ที่มีความสัมพันธ์อยู่ในรูปเชิงเส้น สามารถหาได้ด้วย การสร้างเส้นตรงของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X กับ ตัวแปร Y ดังภาพประกอบ 56



ภาพประกอบ 56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X กับ ตัวแปร Y

ทำการหาค่า β_0 และ β_1 ที่ให้เส้นตรงที่สอดคล้องกับชุดข้อมูลมากที่สุด โดยการประมาณค่า β_0 และ β_1 ด้วย a และ b ตามลำดับ แล้วหาค่า a และ b ที่ให้ความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าต่ำสุด โดยวิธีที่เรียกว่า วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) วิธีการหาค่า a และ b ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ทำได้ดังนี้

ให้ \hat{Y}_i เป็นค่าของ Y ที่ตำแหน่ง X เท่ากับ X_i ดังนั้นสำหรับสมการเส้นตรงที่กำหนดขึ้น โดยให้ $\beta_0 = a$ และ $\beta_1 = b$ จะได้

$$\hat{Y}_i = a + bX_i \quad (2)$$

นำสมการ (1) – สมการ (2) จะได้

$$Y_i - \hat{Y}_i = e_i$$

ผลบวกของค่าคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง จะมีค่าเท่ากับ $\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$ (3)

หาค่า a และ b ที่ทำให้ $\sum_{i=1}^n e_i^2$ มีค่าต่ำสุด ทำได้โดยการใช้อนุพันธ์เชิงส่วน (Partial Derivative) เทียบกับ a และ b แล้วให้เท่ากับศูนย์ จะได้

$$\frac{\partial}{\partial a} \left[\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \right] = 0 \quad (4)$$

นำสมการ (2) แทน สมการ (4) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial a} \left[\sum_{i=1}^n (Y_i - a - bX_i)^2 \right] = 0$$

จะได้

$$an + b \sum_{i=1}^n X_i = \sum_{i=1}^n Y_i \quad (5)$$

หาค่า b ที่ทำให้ $\sum_{i=1}^n e_i^2$ มีค่าต่ำสุด ทำได้โดยการใช้อนุพันธ์เชิงส่วน (Partial Derivative) เทียบกับ b แล้วให้เท่ากับศูนย์ จะได้

$$\frac{\partial}{\partial b} \left[\sum_{i=1}^n (y_i - y_i')^2 \right] = 0 \quad (6)$$

นำสมการ (2) แทน สมการ (6) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial b} \left[\sum_{i=1}^n (y_i - a - bX_i)^2 \right] = 0$$

จะได้

$$a \sum_{i=1}^n X_i + b \sum_{i=1}^n X_i^2 = \sum_{i=1}^n X_i y_i \quad (7)$$

นำสมการ (5) และ สมการ (7) แก้สมการหาค่า a และ b จะได้

$$b = \frac{\sum X_i y_i - \frac{(\sum X_i)(\sum Y_i)}{n}}{\sum (X_i)^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}} \quad (8)$$

และ

$$a = \frac{\sum Y_i}{n} - b \frac{\sum X_i}{n} \quad (9)$$

ให้

$$SS_{xx} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2}{n} \quad (10)$$

$$SS_{xy} = \sum_{i=1}^n X_i y_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i \right) \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)}{n} \quad (11)$$

นำสมการ (10) และ สมการ (11) แทนในสมการ (8) จะได้ ค่าของ b มีค่าเท่ากับ

$$b = \frac{SS_{xy}}{SS_{xx}} \quad (12)$$

การสร้างเส้นตรงของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้า (X) กับความดันสุญญากาศที่กระเปาะพรุน (Y) ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความถดถอย

ตาราง 8 แสดงข้อมูลการเปรียบเทียบเทนซิโอมิเตอร์ที่สร้างขึ้นมาพร้อมกับมาโนมิเตอร์แบบปรอท

เวลา (ชม.)	ตัวเลขระดับ ศักย์ไฟฟ้า (X)	ความสูง ปรอท h_m (ชม.)	ระดับน้ำ h_w (ชม.)	ความดันที่ผิว ปรอท (บาร์)	ความดันน้ำ (บาร์)	(Y) mmHg	X ²	X*Y	Y ²
0.00	210	0.00	1.25	0.000	0.001	0.920	44100	193.1979	0.846382
1.00	139	25.10	26.35	-0.335	0.028	-231.607	19321	-32193.3	53641.62
2.00	116	33.55	34.75	-0.447	0.034	-309.9	13456	-35951.2	96053.06
3.00	100	39.20	40.25	-0.522	0.039	-362.4	10000	-36237.6	131316.6
4.00	87	43.60	44.45	-0.581	0.044	-403.3	7569	-35085.8	162638.9
5.00	78	47.00	47.70	-0.626	0.047	-434.9	6084	-33921.7	189132.1
6.00	72	49.75	50.40	-0.663	0.049	-460.4	5184	-33149.2	211973.7
7.00	65	51.80	52.45	-0.690	0.051	-479.4	4225	-31160.8	229821.7
8.00	61	53.20	53.85	-0.709	0.053	-492.4	3721	-30034.4	242425.1
9.00	57	54.60	55.25	-0.728	0.054	-505.3	3249	-28804.2	255364.9
10.00	54	55.65	56.30	-0.742	0.055	-515.1	2916	-27813.4	265290.6
11.00	50	56.70	57.30	-0.756	0.056	-524.8	2500	-26241.4	275444.1
12.00	47	57.75	58.35	-0.770	0.057	-534.6	2209	-25124.1	285748.9
13.00	45	58.45	59.05	-0.779	0.058	-541.0	2025	-24346.8	292723.9
14.00	43	59.15	59.75	-0.788	0.059	-547.5	1849	-23543.6	299783
15.00	41	60.20	60.80	-0.802	0.060	-557.3	1681	-22847.3	310529.4
16.00	40	60.45	61.05	-0.806	0.060	-559.6	1600	-22382.7	313116
17.00	38	60.90	61.50	-0.812	0.060	-563.7	1444	-21422	317798.8
18.00	37	61.15	61.70	-0.815	0.061	-566.1	1369	-20945.3	320457.1
19.00	35	61.60	62.15	-0.821	0.061	-570.3	1225	-19959	325194.3
20.00	34	61.85	62.40	-0.824	0.061	-572.6	1156	-19467.5	327841.1

ตาราง 8 (ต่อ)

เวลา (ชม.)	ตัวเลขระดับ ตักยไฟฟ้า (X)	ความสูง ปรอท h_m (ชม.)	ระดับน้ำ h_w (ชม.)	ความดันที่ผิว ปรอท (บาร์)	ความดันน้ำ (บาร์)	(Y) mmHg	X ²	X*Y	Y ²
21.00	33	62.10	62.65	-0.828	0.061	-574.9	1089	-18971.4	330498.6
22.00	31	62.55	63.10	-0.834	0.062	-579.1	961	-17950.8	335309.2
23.00	30	62.80	63.35	-0.837	0.062	-581.4	900	-17441.2	337996.8
24.00	29	63.10	63.65	-0.841	0.062	-584.2	841	-16940.5	341236
25.00	28	63.30	63.80	-0.844	0.063	-586.0	784	-16409.2	343447.2
26.00	28	63.30	63.80	-0.844	0.063	-586.0	784	-16409.2	343447.2
27.00	28	63.30	63.80	-0.844	0.063	-586.0	784	-16409.2	343447.2
28.00	26	63.35	63.85	-0.844	0.063	-586.5	676	-15249.2	343990.3
	1682					-14395.2	143702	-686219	7625668

$$SS_{xx} = 46146$$

$$SS_{xy} = 148707.0$$

$$SS_{yy} = 480014.5$$

ความชัน (b) เท่ากับ 3.222

จุดตัดแกน (a) เท่ากับ -683.2

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9983

จากข้อมูลในตาราง 8 นำค่า SS_{xx} และ SS_{xy} แทนในสมการ (12) จะได้

$$b = \frac{148707.0}{46146} = 3.222$$

นำค่า $b \sum Y_i = -14395.2$, $\sum X_i = 1682$ และ $n = 29$ แทนในสมการ (9) จะได้

$$a = \frac{-14395.276}{29} - 3.222534 \frac{1682}{29} = -683.296$$

นำค่า a และ ค่า b ที่ได้จากการคำนวณ นำไปแทนในสมการ (2) จะได้สมการเชิงเส้นที่มีความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า Y_i ต่ำสุด คือ

$$\hat{Y}_i = 3.222 X_i - 683.296$$

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination : r^2 หรือ R^2) เป็นปริมาณที่แสดงให้เห็นว่าตัวแปร X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร Y ได้ในระดับใด ถ้า r^2 มีค่ามาก แสดงว่า Y และ X มีความสัมพันธ์กันมาก หรือ X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า Y ได้ดี หรืออาจกล่าวได้ว่าสมบัติโดยสรุปของ r^2 คือ

1. r^2 จะไม่มีหน่วย
2. ถ้า r^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าเปอร์เซ็นต์ที่ X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ Y มีค่ามาก หรือ X และ Y มีความสัมพันธ์กันมาก แต่ถ้า r^2 มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าเปอร์เซ็นต์ที่ X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ Y มีค่าน้อย

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ สามารถคำนวณได้จาก

$$R^2 = r^2 = \frac{\text{ความแปรปรวนของ } Y \text{ ที่เกิดจาก } X}{\text{ความแปรปรวนของ } Y \text{ ทั้งหมด}}$$

$$R^2 = r^2 = \frac{b * SS_{xy}}{SS_{yy}} \quad (13)$$

จากข้อมูลตารางที่ 8 คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ได้จากการแทนค่า b , SS_{xy} , SS_{yy} ในสมการ (13)

$$R^2 = r^2 = \frac{3.222 * 148707}{480014.5} = 0.9983$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าใกล้กับ 1 มาก แสดงให้เห็นว่าตัวเลขระดับศักย์ไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับศักย์วัสดุพื้นเป็นอย่างดี ตัวเลขนี้แสดงถึงระดับของความน่าเชื่อถือในการทำนายค่าประมาณหนึ่งจากอีกปริมาณหนึ่ง

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาว ปารีชาติ แนบเนียน
วันเดือนปีเกิด	เกิดวันที่ 4 เดือน กุมภาพันธ์ พุทธศักราช 2519
สถานที่เกิด	สถานที่เกิด อำเภอเขาชัยสน จังหวัดพัทลุง
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	สถานที่อยู่ปัจจุบัน 71 หมู่ที่ 2 ตำบล ควนขนุน อำเภอเขาชัยสน จังหวัดพัทลุง 93130
ตำแหน่งหน้าที่การงานในปัจจุบัน	อาจารย์ 1 ระดับ 4
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สถานที่ทำงานปัจจุบัน โรงเรียนทุ่งสงวิทยา ตำบลควนกรด อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2537	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสตรีพัทลุง จังหวัดพัทลุง
พ.ศ. 2541	กศ.บ. วิทยาศาสตร์ - ฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยทักษิณ
พ.ศ. 2546	กศ.ม. (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ