

รายงานการวิจัย

การออกแบบโพรบตรวจจับความชื้นในผิวดินด้วยวิธีการวัดความนำไฟฟ้า

Designing probe for Moisture in soil by using measure conductivity

โดย

มนตรี ไชยชาญยุทธ์

พิมล ผลพุดกษา

อิทธิพล พจนสัจ

อรรถศาสตร์ นาคเทวัญ

ที่ปรึกษา

ผศ.พลศาสตร์ เลิศประเสริฐ

RCH

TK

7878.6

05280

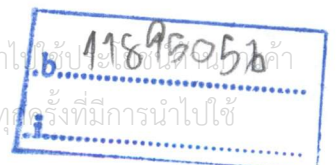
เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 79681

วัน,เดือน,ปี..... 10 เม.ย. 2551

ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2550
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การออกแบบโพรบตรวจจับความชื้นในผิวดินด้วยวิธีการวัดความนำไฟฟ้า

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบโพรบตรวจจับความชื้นในผิวดิน โดยอาศัยหลักการการวัดค่าความนำไฟฟ้า ซึ่งเมื่อความชื้นในผิวดินเปลี่ยนแปลง จะส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าของผิวดินเปลี่ยนแปลงด้วย โพรบที่ออกแบบจะทำมาจากแผ่น PCB สร้างเป็นลวดวงจรที่มีแผ่นตัวนำสองแผ่นวางคู่ขนานกัน มีระยะห่างขนาด 2 เซนติเมตร และมีขนาดความลึกประมาณ 10 เซนติเมตร จากผลการวิจัยจะเห็นได้ว่า Probe มีสมการเป็นสมการยกกำลัง $y = 8.8042x^{-0.2832}$ มีค่า $\% R^2 = 94.97$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณน้ำในดิน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน หรือความนำไฟฟ้าในผิวดิน 94.97 %



Designing probe for Moisture in soil by using measure conductivity

Abstract

This research has presents the Designing probe for Moisture in soil by using measure conductivity. The moisture in soil to change has the effect to conductivity of soil. We design probe for sensor moisture from PCB that design by using two conductor parallel lays the between distance of two conductor are 2 centimeter , depth size about 10 centimeter. , from the research result, Probe has the algebraic equation be the algebraic equation squares, $y = 8.8042x - 0.2832$, be valuable $\% R^2 = 94.97$. The value $\% R^2$ indicates the change of quantity water value in soil which, if change of quantity water value will effect to the resistance or conductivity of soil is 94.97 %.



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความช่วยเหลือ และการสนับสนุนจากบุคคล
หลายๆท่าน ซึ่งผู้เขียนขอขอบคุณทุกๆ ท่านดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ผู้ซึ่งคอยให้การอบรมสั่งสอน เลี้ยงดู สนับสนุนการศึกษาอย่าง
เต็มที่ ตลอดจนใจให้กำลังใจเสมอมา ผู้เขียนขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณไว้
ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ผศ.พลศาสตร์ เลิศประเสริฐ ที่ปรึกษางานวิจัย และคำแนะนำต่าง ๆ เกี่ยวกับการ
ทำงานวิจัย ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความเมตตาของท่านจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณนางวรัญญา พรหมจรัส ที่ช่วยในการสนับสนุนข้อมูลเกี่ยวกับดิน และให้กำลังใจเสมอมา
นอกจากนี้ผู้เขียนใคร่ขอขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิทยาเขตชุมพร ที่ให้ความรู้ และโอกาสในการทำงาน

คุณค่า และประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



มนตรี ไชยชาญยุทธ์

และคณะ

30 กันยายน 2550

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	2
1.5 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความหมายของดิน (Soil).....	3
2.2 ความสำคัญของดิน และการเกิดดิน.....	3
2.3 องค์ประกอบของดิน.....	4
2.4 ความชื้นของดิน (Soil Moisture).....	5
2.5 ความสำคัญของความชื้นของดินต่อการผลิตพืช.....	6
2.6 การหาปริมาณความชื้นในดิน.....	7
2.7 วงจรบริดจ์[6].....	8
2.7.1 บริดจ์กระแสตรง.....	8
2.7.2 บริดจ์กระแสสลับ.....	14
2.8 วีทสโตน บริดจ์ (Wheatstone bridge).....	21

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบโพรบตรวจจับความชื้นในผิวดิน.....	23
3.1 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	23
3.2 การออกแบบส่วนของ Probe.....	23
3.3 การออกแบบส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	25
3.3.1 Power Supply.....	25
3.3.2 Oscillator	26
3.3.3 Driver.....	27
3.3.4 Wheatstone Bridge.....	27
3.3.5 วงจร Microcontroller PIC	28
บทที่ 4 วิธีการทดลอง และผลการทดลอง.....	29
4.1 การทดลองที่ 1 วงจร Wheatstone bridge แบบกระแสตรง.....	29
4.2 การทดลองที่ 2 วงจร Wheatstone bridge แบบกระแสสลับ.....	30
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	38
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	38
5.2 ข้อคิดเห็นเพิ่มเติม.....	39
เอกสารอ้างอิง.....	40
ภาคผนวก.....	41

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 การวัดหาค่าความต้านทานในดินที่มีความชื้นค่าหนึ่ง.....	30
4.2 ผลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น.....	32
4.3 แสดงสมการที่วิเคราะห์ได้จากข้อมูลของโพรบที่ทดลอง.....	35
4.4 การทดลองวัดความชื้นด้วยเครื่องโพรบที่ออกแบบเทียบกับการอบดิน.....	36



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของน้ำ (ความชื้นของดิน) ค่าความเค็มของน้ำ และน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ในดินทรายและดินเหนียว.....	5
2.2 แสดงวงจรบริดจ์แบบวีทสโตน.....	9
2.3 แสดงการวิเคราะห์วงจรบริดจ์ขณะไม่สมดุล.....	10
2.4 แสดงวงจรสมมูลของความต้านทานระหว่างจุดต่อคัลปีวานอมิเตอร์.....	11
2.5 แสดงวงจรสมมูลของวงจรบริดจ์แบบไม่สมดุล.....	12
2.6 แสดงวงจรบริดจ์ไม่สมดุล.....	13
2.7 แสดงวงจรสมมูลสำหรับรูปที่ 2.6.....	13
2.8 แสดงวงจรบริดจ์กระแสสลับ.....	14
2.9 แสดงวงจรบริดจ์สำหรับตัวอย่าง 2.4.....	12
2.10 แสดงวงจรบริดจ์สำหรับตัวอย่าง 2.5.....	16
2.11 แสดงวงจรบริดจ์สำหรับตัวอย่าง 2.6.....	17
2.12 แสดงวงจรบริดจ์กระแสสลับ.....	17
2.13 แสดงวงจรบริดจ์ในตัวอย่าง 2.7.....	19
2.14 การตัดแปลงวงจรรูปที่ 2.13.....	20
2.15 แสดงวงจรแบ่งแรงดัน เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน R_x	22
2.16 วงจรบริดจ์ที่ใช้สำหรับวัดความเปลี่ยนแปลงความต้านทาน R_x	22
3.1 แสดงแนวความคิด และระบบการทำงานของโครงการวิจัย.....	23
3.2 แสดงลักษณะของโพรบที่นำมาใช้ในโครงการวิจัย.....	24
3.3 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรวัดความชื้น.....	25
3.4 แสดงวงจร Power Supply.....	25
3.5 แสดงวงจร Oscillator.....	26
3.6 แสดงวงจร Driver.....	27
3.7 แสดงวงจร Wheatstone bridge (R_x = ความต้านทานของโพรบ).....	27
3.8 แสดงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ และ วงจร Driver Seven Segment.....	28

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แสดงวงจร Wheatstone bridge	29
4.2 รูปแสดงวงจรบริดจ์ (Z3 ตำแหน่งของโพรบ).....	31
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นจากการคำนวณกับปริมาณน้ำที่เติมในดิน ตัวอย่าง.....	32
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ Output ของวงจรบริดจ์ก่อนส่งเข้า A to D กับปริมาณน้ำที่เติมในดินตัวอย่างเพื่อหาสมการที่เหมาะสม (สมการเชิงเส้น).....	33
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ Output ของวงจรบริดจ์ก่อนส่งเข้า A to D กับปริมาณน้ำที่เติมในดินตัวอย่างเพื่อหาสมการที่เหมาะสม (สมการลอการิทึม)	33
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ Output ของวงจรบริดจ์ก่อนส่งเข้า A to D กับปริมาณน้ำที่เติมในดินตัวอย่างเพื่อหาสมการที่เหมาะสม (สมการโพลีโนเมียล)	34
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ Output ของวงจรบริดจ์ก่อนส่งเข้า A to D กับปริมาณน้ำที่เติมในดินตัวอย่างเพื่อหาสมการที่เหมาะสม (สมการยกกำลัง)	34
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ Output ของวงจรบริดจ์ก่อนส่งเข้า A to D กับปริมาณน้ำที่เติมในดินตัวอย่างเพื่อหาสมการที่เหมาะสม (สมการเอ็กซ์โพเนนเชียล) .	35
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ Output ของวงจรบริดจ์ก่อนส่งเข้า A to D กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ตรวจจับได้.....	36
4.10 กราฟแสดงการวัดด้วยโพรบที่ออกแบบ และ การคำนวณความชื้น.....	37

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มา และความสำคัญของโครงการ

ประเทศไทยนับได้ว่าเป็นประเทศแห่งเกษตรกรรม ซึ่งในการประกอบอาชีพทางด้านเกษตร ทรัพยากรอย่างหนึ่งซึ่งที่ถือได้ว่าเป็นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก คือ “ดิน”

ความชื้นของผิวดินเป็นตัวแปรหนึ่ง ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความความอุดมสมบูรณ์ของดินและพิจารณาถึงความเหมาะสมของผิวดินเหมาะกับการผลิตพืชชนิดใด ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดความชื้นของผิวดินในปัจจุบันมีหลายแบบ และหลายวิธี เช่น Tensiometer, Moisture Block, Pressure Cooker, และ อื่น[1] เครื่องมือแต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างออกไป แต่ส่วนใหญ่เครื่องมือเหล่านี้ยังมีความยุ่งยากในการวัด เครื่องมือวัดความชื้นของดินที่มีขายในปัจจุบัน มีราคาแพงมาก และมีลักษณะไม่เหมาะสมที่จะใช้ในงานที่ต้องการวัดความชื้นที่มีจำนวนจุดที่ต้องการวัดมากจุด ต่อการวัดหนึ่งครั้ง จึงจำเป็นที่จะต้องพัฒนา โพรบวัดความชื้นที่เอื้ออำนวยต่อการวัดหลายๆ จุดต่อครั้งและมีราคาถูก

ดังนั้นคณะผู้วิจัยได้ตระหนักถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน จึงได้ถือเป็นเรื่องวิจัยหลักที่จะทำการวิจัย พัฒนาโพรบตรวจวัดความชื้น ให้มีมาตรฐาน และลดต้นทุนการผลิตตลอดจนการรักษาสภาพแวดล้อม โดยใช้ระบบควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถสร้างได้เอง โดยศักยภาพและเทคโนโลยีภายในประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีระบบวัดคุมโดยพัฒนางจรทางอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในการทำงาน ซึ่งมีวัตถุประสงค์ คือ

- 1 เพื่อให้ได้โพรบตรวจวัด อุณหภูมิ และความชื้นผิวดิน ที่มีราคาต้นทุนต่ำ
- 2 เพื่อเพิ่มศักยภาพในการวิจัยทางวิศวกรรมเครื่องมือตรวจวัด
- 3 เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัย เชิงประยุกต์โดยเสนอแนวทางใหม่
- 4 กระตุ้นให้เกิดการวิจัยในเชิงวิศวกรรม และเผยแพร่ต่อสาธารณะ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ภายในปีงบประมาณ 2550 จะดำเนินการวิจัยออกแบบสร้างโพรบ (Probe) ตรวจวัดความชื้นในผิวดิน เพื่อให้ได้ข้อมูลทางเทคนิคของระบบ และขีดจำกัดของการใช้งานซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้ต้องการทราบข้อมูลสำหรับการพัฒนาทางเกษตรกรรมต่อไป โดยโพรบที่ออกแบบจะอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อความชื้นของดินเปลี่ยนแปลงทำให้ความจุไฟฟ้า และความนำไฟฟ้าของดินเปลี่ยนได้ ฉะนั้น ตัวแปรทั้งสองจึงสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ความชื้นของดินได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- จะได้โปรดปรองวัดความชื้นในดินที่ได้มาตรฐาน มีราคาค้นทุนต่ำ
- เพิ่มศักยภาพในการวิจัยสำหรับนักวิจัยรุ่นใหม่
- นำผลงานที่ได้เพื่อจดสิทธิบัตร
- เผยแพร่ผลงานวิจัยในระดับชาติ
- เป็นข้อมูลสนับสนุนให้หน่วยงานอื่นๆ และผู้สนใจได้นำไปใช้ประโยชน์ เพื่อการพัฒนาประเทศ
- กระตุ้นให้เกิดการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากมหาวิทยาลัยสู่ชุมชน

2. หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

- สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร
- กรมพัฒนาที่ดิน
- กรมวิชาการเกษตร
- หน่วยงานภาครัฐ เอกชน และเกษตรกรทั่วไป ที่มีการสำรวจดิน

1.5 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย

เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองในห้องปฏิบัติการแล้ว จะนำผลการทดลองที่ได้นำเสนอในการประชุมวิชาการ และนิทรรศการทางวิชาการต่างๆ พร้อมทั้งจะนำเครื่องต้นแบบไปทดลองในภาคสนามเพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เมื่อพิจารณาสมบัติตามธรรมชาติของดินแล้ว พบว่าดินมีบทบาทเกี่ยวข้องกับการรักษาสมดุลของสภาวะแวดล้อมมาก เนื่องจากอนุภาคของดินมีความสามารถที่จะดูดซับ (absorb) ประจุต่าง ๆ ที่ผ่านเข้ามาในระบบของดินตลอดจนมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุต่างๆ (ion exchange) ที่เข้ามาในระบบอีกด้วย ในกรณีที่มีการปนเปื้อนเกิดขึ้น เช่น การใช้สารเคมีในรูปยาฆ่าแมลง (insecticides) ยาปราบวัชพืช (herbicides) และปุ๋ย (fertilizers) ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีที่สลับซับซ้อน การเปลี่ยนแปลงทางเคมี และกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในดิน จะช่วยลดความเป็นพิษที่เกิดขึ้นจากสารปนเปื้อนได้ในระดับหนึ่ง หากระดับของสารปนเปื้อนสูงขึ้นกว่านั้น จะทำให้เกิดมลพิษขึ้นในดินและสภาพแวดล้อมใกล้เคียงได้ในกรณีที่สารปนเปื้อนอยู่ในรูปของน้ำมัน คุณสมบัติทางกายภาพของดิน เช่น เนื้อดิน ความหนาแน่นของดิน และความพรุนของดิน จะสามารถลดอัตราการแพร่กระจายของน้ำมันที่จะลงสู่ระบบน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำในพื้นที่ใกล้เคียงได้ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเนื้อดิน เช่น ดินเหนียว จะยอมให้น้ำมันซึมผ่านไปสู่อัตราที่ช้ากว่าดินทรายซึ่งเป็นดินที่มีเนื้อหยาบกว่า[2]

2.1 ความหมายของดิน (Soil)

ดิน (Soil) คำจำกัดความของ “ดิน” ที่มีความหมายเกี่ยวข้องอยู่กับทางการเกษตร คือ ดินเป็นเทววัตถุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติรวมกันขึ้นเป็นชั้นโดยเกิดจากการผสมของแร่ธาตุต่าง ๆ ที่สลายตัวผุพังเป็นชั้นเล็กชิ้นน้อยกับอินทรีย์วัตถุที่เน่าเปื่อยผุพังอยู่รวมกันเป็นชั้นบาง ๆ ห่อหุ้มผิวโลก และเมื่อในชั้นดังกล่าวมีอากาศและน้ำอยู่เป็นปริมาณที่เหมาะสมแล้ว ก็จะช่วยบำรุงรวมทั้งช่วยในการยังชีพและการเจริญเติบโตของพืช จากคำจำกัดความของดินดังกล่าวเมื่อพิจารณาในส่วนที่มีความเกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพืชแล้วดินก็เปรียบได้ว่าเป็นแหล่งอาหารพืช[3]

2.2 ความสำคัญของดิน และการเกิดดิน

สิ่งมีชีวิตทั้งหลายต้องอาศัยดินในการยังชีพ และการเจริญเติบโต ถ้าปราศจากดินก็แทบจะกล่าวได้ว่า ไม่มีสิ่งมีชีวิตเหลืออยู่ในโลกนี้เลย ดังนั้นความสำคัญของดินต่อสิ่งมีชีวิตจึงอาจแบ่งได้เป็นข้อ ๆ ดังนี้ [1]

การเกิดดิน เราสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ดังนี้[4]

1.การผุพังสลายตัว (Weathering) ซึ่งประกอบด้วยขบวนการทั้งทางกายภาพและทางเคมี โดยดินมีวัตถุต้นกำเนิดมาจากหิน แหล่งที่มาของหินส่วนใหญ่มาจากหินหนืดเปลือกโลกชั้นใน โดยหินที่ให้กำเนิดดินส่วนใหญ่ คือ หินอัคนี โดยเมื่อเกิดภูเขาไฟระเบิดขึ้นสิ่งที่พ่นออกมาจะถูกกัดกร่อนจากธรรมชาติอัน

ได้แก่ ความร้อน ความชื้น ปฏิกริยาทางเคมีและแรงลม เป็นต้น เมื่อมีการรวมตัวกับสารอินทรีย์ต่าง ๆ กลายเป็นสารกำเนิดดิน (Soil Parent materials) ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นดินในโอกาสต่อไป

2. ขบวนการสร้างดิน (Soil Forming Process) จะเกิดขึ้นต่อเนื่องจากการผุพังสลายตัวของหินและแร่จนกลายเป็นวัตถุต้นกำเนิดดินชนิดต่าง ๆ ผลของขบวนการสร้างดินจะทำให้เกิดการพัฒนารูปหน้าตัดดินในลักษณะต่าง ๆ กัน หลักการทั่วไปของขบวนการนี้มีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกันคือ

2.1 การแยกชั้นดิน (Horizonation) ซึ่งทำให้หน้าตัดของดินเกิดเป็นชั้นต่าง ๆ ได้ เนื่องจากสภาพแวดล้อมของผลรวมของขบวนการสร้างดิน อันได้แก่ขบวนการสูญเสียล้างวัสดุ การเคลื่อนย้ายเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุ การเพิ่มเติมวัสดุแร่ธาตุ ฮิวมัสหรืออินทรีย์วัตถุลงบนผิวดิน ทำให้ดินมีการพัฒนาโครงสร้างดีขึ้น สามารถแยกชั้นเป็นดินชั้นเอ (A-horizon : zone of leaching) , บี (B-horizon : zone of accumulation) , ซี (C-horizon : partially decomposed parent material) , อาร์ (R-Unaltered bedrock)

2.2 การไม่แยกชั้นดิน (Haploidization) ขบวนการสร้างดินทำให้หน้าตัดดินมีลักษณะสม่ำเสมอจนไม่สามารถจะแยกชั้นได้ชัดเจน

2.3 องค์ประกอบของดิน[5]

สัดส่วนดินที่ถือว่ามืองค์ประกอบที่เหมาะสมโดยทั่วไป มักจะประกอบด้วยแร่ธาตुर้อยละ 35-45 อากาศร้อยละ 25-30 น้ำร้อยละ 25-30 และอินทรีย์สารร้อยละ 5

ส่วนประกอบของดินสามารถจำแนกได้ 4 อย่างดังนี้

2.3.1 แร่ธาตุ (อนินทรีย์วัตถุ) เป็นส่วนที่สลายตัวมาจากวัตถุให้กำเนิดดิน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นหินที่ประกอบเป็นเปลือกโลก ส่วนประกอบส่วนนี้จะมีอยู่มากโดยเฉลี่ยจะมีอยู่ครึ่งหนึ่งของเนื้อดินทั้งหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแต่ละท้องถิ่น แร่ธาตุเป็นส่วนประกอบหลักของดินที่ให้ธาตุอาหารที่จำเป็นแต่พืชและจุลินทรีย์ที่ประกอบอยู่ในเนื้อดินมากที่สุด ขนาดของอนุภาคอนินทรีย์เหล่านี้จะแตกต่างกันไปจากขนาดเล็กจนมองด้วยตาเปล่าไม่เห็นจนขนาดที่มองเห็นได้ เช่น ทราย

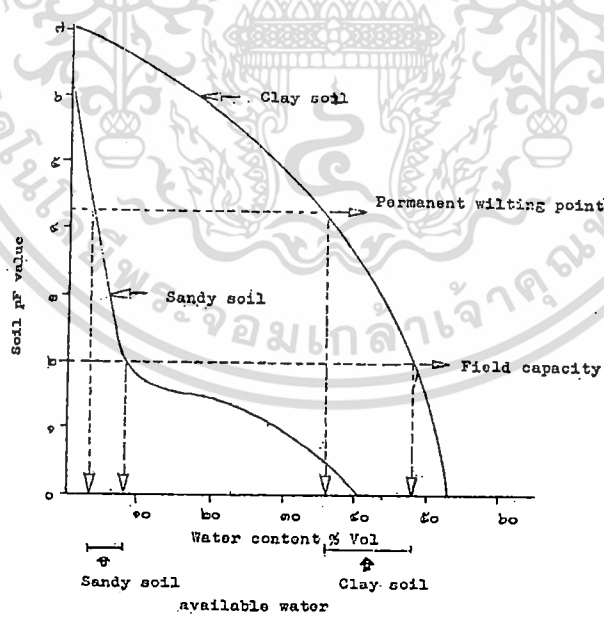
2.3.2 อินทรีย์วัตถุ เป็นส่วนของซากสิ่งมีชีวิตอันได้แก่ พืชและสัตว์ซึ่งตายทับถมอยู่ที่พื้นดิน เช่น ใบไม้ ต้นไม้ รากไม้ ซากสัตว์ ทั้งขนาดเล็ก ขนาดใหญ่ โดยจุลินทรีย์ทั้งที่เป็นพืชและสัตว์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น แบคทีเรีย เห็ด รา ช่วยกันย่อยสลายอินทรีย์วัตถุให้กลายเป็นวัตถุขนาดเล็ก กลายเป็นอนุภาคของดินอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายตัวแล้วและอยู่ในสภาพที่เหมาะสมเรียกว่า ฮิวมัส (humus) อินทรีย์วัตถุเป็นส่วนประกอบที่บอกความอุดมสมบูรณ์ของดิน เพราะนอกจากจะเป็นสารอาหารของพืชแล้ว ยังมีส่วนให้เกิดสภาพกรดอ่อน ๆ ในการช่วยละลายแร่ธาตุในดินให้พืชอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติช่วยเก็บความชื้นไว้ในดินอีกด้วย

2.3.3 น้ำ หรือความชื้น ในดินเป็นส่วนประกอบที่อยู่รอบ ๆ อนุภาคดินและในช่องว่างระหว่างอนุภาคของดิน (pore space) น้ำในดินมีความสำคัญ คือ เป็นแหล่งน้ำสำหรับพืชและจุลินทรีย์ในดิน โดยช่วยในการละลายธาตุต่าง ๆ ในดินให้พืชสามารถนำไปใช้ได้

2.3.4 อากาศ ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน และออกซิเจนซึ่งจะแทรกอยู่ในดิน ในช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน โดยอากาศในดินจะถ่ายเทกับอากาศภายนอกตลอดเวลา ความสำคัญของอากาศในดิน คือ ออกซิเจนจะใช้ในการหายใจของพืช และจุลินทรีย์ในดิน คาร์บอนไดออกไซด์เมื่อรวมกับน้ำจะให้กรดคาร์บอนิก ซึ่งจะไปละลายแร่ธาตุต่าง ๆ ให้แก่พืช ไนโตรเจนในอากาศจะถูกเปลี่ยนเป็นเกลือไนเตรตโดยพวก Nitrogen fixing bacteria เช่น แบคทีเรียที่อยู่ในสกุล Rhizobium ที่อาศัยอยู่ในรากพืชตระกูลถั่ว เป็นต้น

2.4 ความชื้นของดิน (Soil Moisture)

ความชื้นหรือน้ำในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (available water) ได้แก่ ปริมาณน้ำระหว่างระดับความชื้นของดินตรงจุดความชื้นที่สนาม ถึงระดับความชื้นที่ใกล้จุดการเหี่ยวถาวร ซึ่งปริมาณน้ำทั้งหมดที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในช่วงระหว่างระดับความชื้นของดินทั้งสองจุดดังกล่าว จะแตกต่างกันไปตามชนิดของเนื้อดิน ในรูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ (water tention; pF) และปริมาณของน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของดินทรายและดินเหนียว จากเส้นกราฟแสดงว่าทั้งดินทรายและดินเหนียวเมื่อค่าปริมาณของน้ำในดินสูงเพิ่มขึ้นดินจะมีค่าความเครียดของน้ำลดลง ปริมาณของน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดินทั้งสองที่จะดูดซับหรืออุ้มเอาไว้ได้ก็จะแตกต่างกัน โดยในดินเหนียวจะมีปริมาณของน้ำดังกล่าวมากกว่าดินทราย ดังนั้น เมื่อดินทั้งสองประเภทได้รับน้ำในปริมาณที่เท่ากันแล้ว ดินเหนียวดูดซับน้ำไว้ได้เป็นปริมาณที่มากกว่าดินทราย ซึ่งจากเรื่องการสูญเสียน้ำไปจากดินบริเวณนั้นจะเกี่ยวข้องกับการสูญเสียน้ำของธาตุอาหารพืชไปจากดินในรูปของไอออนที่ละลายไปกับน้ำด้วย



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของน้ำ (ความชื้นของดิน) ค่าความเครียดของน้ำ และน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ในดินทรายและดินเหนียว [3]

2.5 ความสำคัญของความชื้นของดินต่อการผลิตพืช

ความชื้นเป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำรงชีพของสิ่งที่มีชีวิตทุกชนิด ไม่ว่าสิ่งมีชีวิตนั้นจะเป็นสัตว์ พืช หรือจุลินทรีย์ ด้วยเหตุที่พืชส่วนใหญ่อาศัยดินเป็นตัวกลางของการเจริญเติบโตและการดำรงชีวิต ความชื้นของดินจึงมีความสำคัญต่อพืชเป็นอย่างมาก [1]

ความสำคัญของความชื้นของดินต่อพืช สามารถแยกกล่าวได้เป็น 4 ประการคือ

1. พืชและจุลินทรีย์ดินทุกชนิดต้องการน้ำเพื่อเป็นส่วนประกอบของส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย

พืชและจุลินทรีย์ดินทุกชนิดต้องการน้ำเพื่อเป็นส่วนประกอบของส่วนต่าง ๆ ของร่างกายเพื่อใช้ในขบวนการ metabolism ต่าง ๆ เช่น ขบวนการแสงสังเคราะห์ของพืชและของจุลินทรีย์ดินบางชนิด เป็นต้น และเพื่อประโยชน์ในด้านอื่น ๆ จึงนับได้น้ำเป็นโภชนะ (nutrient) อย่างหนึ่งของพืชและของจุลินทรีย์ดิน เพราะทั้งธาตุไฮโดรเจน และธาตุออกซิเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบของแต่ละโมเลกุลของน้ำต่างเป็นธาตุที่จำเป็น (essential element) ต่อการยังชีพของพืชและของจุลินทรีย์ดินทุกชนิด น้ำที่พืชและจุลินทรีย์ดินใช้ในการดำรงชีพในธรรมชาติ พืชและจุลินทรีย์ดินได้จากดินเกือบทั้งหมด

2. น้ำเป็นตัวทำละลายที่ดีมาก

น้ำเป็นตัวทำละลาย (Solvent) ที่ดีมาก ความชื้นของดินจึงมีบทบาทที่สำคัญยิ่งในการทำให้ไอออนต่าง ๆ ที่เป็นโภชนะของพืชและของจุลินทรีย์ดินอยู่ในสภาวะละลายในดิน ซึ่งเป็นสภาวะที่ไอออนชนิดต่าง ๆ พร้อมมากที่สุดที่จะให้พืชประโยชน์ เพราะพืชดูดส่วนใหญ่ของไอออนชนิดต่าง ๆ ไปจากดินในรูปที่ละลาย (dissolved form)

3. น้ำเป็นตัวกลางที่ดีในการเคลื่อนย้ายสิ่งต่าง ๆ

ในธรรมชาติ ความชื้นของดินจึงมีบทบาทที่สำคัญในการเคลื่อนย้ายของไอออนและของส่วนประกอบอื่น ๆ ของดินจากส่วนหนึ่งไปยังอีกส่วนหนึ่งของหน้าตัดดิน ทั้งจากบริเวณที่ห่างไกลจากรากพืชไปยังบริเวณใกล้รากพืชและจากบริเวณใกล้รากพืชไปยังบริเวณที่ห่างไกลจากรากพืช ตลอดจนการเคลื่อนย้ายของไอออนและสารอื่น ๆ จากดินเข้าไปในพืชและในจุลินทรีย์ดิน และจากส่วนหนึ่งไปยังอีกส่วนหนึ่งของพืชและของจุลินทรีย์ดิน

4. น้ำมีความร้อนจำเพาะและความร้อนแฝงที่สูง

น้ำมีความร้อนจำเพาะ (specific heat) และความร้อนแฝง (latent heat) ที่สูงจึงเปลี่ยนอุณหภูมิยาก ดังนั้น ความชื้นของดินจึงมีบทบาทสำคัญในการป้องกันสภาวะอุณหภูมิจัด (extreme temperature) ของดิน คือ ป้องกันไม่ให้อุณหภูมิของดินสูงหรือต่ำจนเกินไปจนพืชที่ขึ้นอยู่บนผิวดินและจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดินทนไม่ได้ และป้องกันความผันแปร (variation หรือ fluctuation) ที่มากเกินไปของอุณหภูมิของดินในรอบวันหนึ่ง ๆ ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะต่อการเจริญเติบโตและการประกอบกิจกรรมอย่างเต็มที่ของทั้งพืชและจุลินทรีย์ด้วยเหมือนกัน[1]

2.6 การหาปริมาณความชื้นในดิน

การหาปริมาณความชื้นในดิน ถึงแม้ว่าเป็นงานที่ต้องใช้เวลาและสิ้นเปลืองมากแต่ก็เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในงานชลประทาน การหาปริมาณความชื้นตามปกติจะทำได้โดยการเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึกที่ต้องการแล้วบรรจุในกระป๋องเก็บตัวอย่างซึ่งมีฝาปิดมิดชิด โดยน้ำหนักดินจะต้องไม่น้อยกว่า 100 กรัม จากนั้นนำดินมาชั่งและอบแห้งในเตาซึ่งมีอุณหภูมิ 105 ถึง 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมงหรือจนกว่าดินจะแห้งทั่วถึงกัน นำมาชั่งใหม่ น้ำหนักที่หายไปคือน้ำหนักของน้ำที่อยู่ในดิน

หน่วยวัดปริมาณความชื้นในดินมี 2 อย่าง คือ 1. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของดินแห้ง 2. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของดินแห้ง

1. เปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยน้ำหนัก เหมาะสำหรับการหาปริมาณความชื้นเมื่อไม่ทราบปริมาตรของตัวอย่างดินที่เก็บมา หรือเมื่อทราบความถ่วงจำเพาะปรากฏของดินแล้วการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยน้ำหนักทำได้โดยใช้สมการ

$$P_w = (W_w / W_s) * 100 \quad \dots\dots\dots(2.6.1)$$

เมื่อ P_w = เปอร์เซ็นต์ความชื้น โดยเทียบกับน้ำหนักของดินแห้ง

W_w = น้ำหนักของน้ำในดิน

W_s = น้ำหนักของดินอบแห้ง

2. เปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยปริมาตร จะต้องรู้ปริมาตรของดิน โดยอาจใช้กระบอกเก็บตัวอย่างดิน (Soil Core Sampler) ก็ได้ แล้วใช้สมการ

$$P_v = (V_w / V_s) * 100 \quad \dots\dots\dots(2.6.2)$$

เมื่อ P_v = เปอร์เซ็นต์ความชื้น โดยเทียบกับปริมาตรของดินทั้งก้อน

V_w = ปริมาตรของน้ำในดิน

V_s = ปริมาตรของก้อนหิน

ถ้าหากเก็บตัวอย่างทำโดยการใช้กระบอกเก็บตัวอย่างซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอเท่ากับ A ดังนั้น ปริมาตรของน้ำในดินจะเท่ากับ $d \cdot A$ และปริมาตรก้อนดินเท่ากับ $D \cdot A$ เมื่อ d และ D คือความลึกของน้ำที่อยู่ในดินและความลึกของแท่งดินตามลำดับ จากสมการ (2) จะได้ว่า

$$P_v = ((d \cdot A) / (D \cdot A)) * 100$$

$$\text{หรือ } d = (P_v / 100) * D \quad \dots\dots\dots(2.6.3)$$

ในกรณีที่ทราบว่าค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏหรือ Bulk Density ของดินแล้ว การหาปริมาณความชื้นของดินเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรจะง่ายขึ้นโดยทำการหาความชื้นเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักซึ่งสะดวกกว่าเสียก่อน แล้วใช้สูตร

$$P_v = P_w * A_s \quad \dots\dots\dots(2.6.4)$$

เมื่อ A_s เป็นความถ่วงจำเพาะปรากฏของดิน หรือเมื่อต้องการหาความลึกของน้ำในดิน ก็แทนค่า P_v ในสมการ (4) ลงในสมการ (3) ก็จะได้

ในงานชลประทานบนแปลงเพาะปลูก ปริมาณความชื้นที่พืชเอาไปใช้ได้มักจะใช้หน่วยเป็นความลึกของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความลึกของดิน เมื่อต้องการทราบปริมาณน้ำที่ต้องให้แก่พืชเป็นปริมาณเท่าไรก็เอาความลึกของเขตราก คูณกับค่าปริมาณความชื้นที่ต้องการ ก็จะทราบความลึกของน้ำที่ต้องให้แก่พืช

กรณีที่ดินในเขตรากมีเนื้อดินไม่สม่ำเสมอหมด (มีความถ่วงจำเพาะต่างกัน) การคำนวณหาความชื้นต้องกระทำเป็นชั้น ๆ แล้วจึงนำเอาความลึกของน้ำที่จะต้องให้แก่ดินในแต่ละชั้นมารวมกัน

2.7 วงจรบริดจ์[6]

เครื่องแบบบริดจ์จะมีโครงสร้างหลักประกอบด้วย ส่วนประกอบของวงจร (R, L, C) 4 ต่อเป็นวงจรปิด แต่ละค่าหรือสาขาของวงจรปิดเรียกว่า แขนขอบริดจ์ (Bridge Arm) โดยมีแหล่งกำเนิดกระแสอยู่ที่โหนดตรงข้ามกัน และมีตัวตรวจจับกระแสต่ออยู่ที่คู่ของโหนดตรงข้ามที่เหลือ เราสามารถออกแบบบริดจ์ได้เป็น 2 แบบ คือ

- ก) บริดจ์กระแสตรง
- ข) บริดจ์กระแสสลับ

2.7.1 บริดจ์กระแสตรง

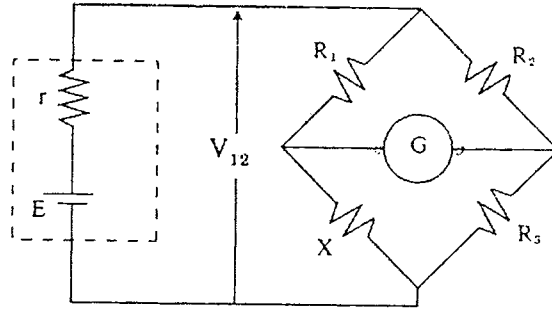
บริดจ์กระแสตรงอาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า *บริดจ์ความต้านทาน* ซึ่งประดิษฐ์โดยศาสตราจารย์ Jame Christy อย่างไรก็ตาม วงจรดังกล่าวไม่ได้รับความสนใจนักจนกระทั่ง เซอร์ Charles Wheatstone ได้แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของมัน หลังจากนั้นบริดจ์ดังกล่าวจึงมีชื่อเรียกว่า บริดจ์แบบวิทสโตนบริดจ์

โครงสร้างอย่างง่ายของบริดจ์แบบวิทสโตนเป็นดังรูป ซึ่งแต่ละแขนของบริดจ์เป็นตัวต้านทาน และแหล่งกำเนิดอาจเป็นแหล่งกำเนิดความดันคงที่หรือแหล่งกำเนิดกระแสคงที่ในการประยุกต์ใช้จะใช้ในสองลักษณะซึ่งจะได้กล่าวถึงหลักการทํางาน ลักษณะจำเพาะ และการประยุกต์ ดังต่อไปนี้

1. บริดจ์สมดุล (Balanced Bridge)
2. บริดจ์ไม่สมดุล (Unbalanced Bridge)

2.7.1.1 บริดจ์สมดุล (Balanced Bridge)

เป็นวงจรวัดความต้านทาน โดยการเปรียบเทียบความต้านทานที่ไม่ทราบค่า (X) กับความต้านทานมาตรฐาน (R_s) วงจรวัดพื้นฐานแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงวงจรบริดจ์แบบวีทสโตน

ถ้ากระแสไหลผ่านกัลป์วานอมิเตอร์ (G) เป็นศูนย์ หมายความว่า ความต่างศักย์ระหว่างจุด 3, 4 เป็นศูนย์เรียกว่า บริดจ์อยู่ในภาวะสมดุล ขณะนี้แรงดันคร่อม (R₃) จะเท่ากับแรงดันคร่อม X (ความต้านทานที่ต้องการทราบค่า) และแรงดันคร่อม R₁ จะเท่ากับแรงดันคร่อม R₂

$$\text{แรงดันคร่อม } R_3 = \{ R_3 / (R_2 + R_3) \} (V_{12}) \dots\dots\dots(2.7.1)$$

$$\text{แรงดันคร่อม } X = \{ X / (R_1 + X) \} (V_{12}) \dots\dots\dots(2.7.2)$$

เมื่อบริดจ์สมดุล สมการ (2.10.1) เท่ากับ (2.10.2) จะได้

$$\begin{aligned} R_3 / (R_2 + R_3) &= X / (R_1 + X) \\ R_2 X &= R_1 R_3 \dots\dots\dots (2.7.3) \end{aligned}$$

ดังนั้นในสภาวะสมดุล (กระแสไหลผ่านกัลป์วานอมิเตอร์เท่ากับศูนย์) ผลคูณของความต้านทานที่อยู่ด้านตรงข้ามกันจะเท่ากัน ในทางปฏิบัติ ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าจะเป็นสัดส่วนกับค่า R₃ ที่ปรับ โดยมีค่าคงตัวของสัดส่วนคือ (R₁ + R₂) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่ต้องการทราบค่ากับความต้านทานมาตรฐานได้เป็น

$$X = (R_1 / R_2) R_3 \dots\dots\dots(2.7.4)$$

แม้ว่าสภาวะสมดุลจะไม่เกิดขึ้นกับค่าแรงดันที่ป้อนแก่วงจรและค่ากระแสที่ไหลผ่านแต่ละแขนของบริดจ์แต่อย่างไรก็ตาม ค่าแรงดันที่ป้อนแก่วงจรและความไวของกัลป์วานอมิเตอร์ควรจะสูงพอที่จะสามารถตรวจจับการ ไม่สมดุลได้ถึงระดับที่ต้องการ

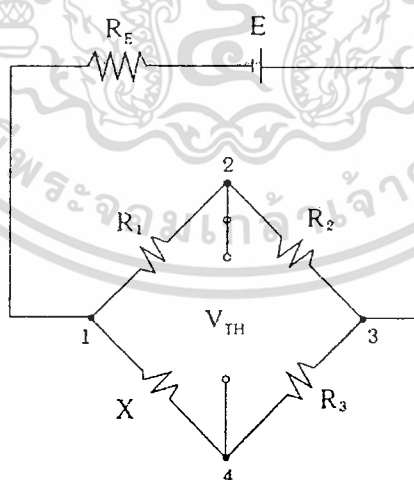
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การป้อนแรงดันค่าสูงให้แก่วงจร จะทำให้ความไวของบริดจ์สูงขึ้น ค่าที่ป้อนแก่วงจรจะจำกัดโดยอัตรากำลัง (Power Rating) ของตัวต้านทานที่นำมาหาค่าและตัวต้านทานที่อยู่ในวงจรบริดจ์ ค่ากำลังสูงสุด (Maximum Power) ที่ไปยังตัวตรวจจับ (ในกรณีนี้คือ กัลป์วานอมิเตอร์) จะเกิดขึ้นเมื่ออิมพีแดนซ์ของตัวตรวจจับเท่ากับอิมพีแดนซ์ทางด้านเอาต์พุตของบริดจ์ แม้สถานะสมดุลยังคงไม่เปลี่ยนแปลงขณะที่มีการสลับที่กันระหว่างแหล่งกำเนิดกระแส และกัลป์วานอมิเตอร์ แต่ความไวของบริดจ์จะเปลี่ยนไป

ความถูกต้องของวงจรบริดจ์จะถูกจำกัดโดยความถูกต้องของอัตราส่วน ($R_1 + R_2$) ความถูกต้องของตัวต้านทานมาตรฐาน (R_3) และความไวของตัวตรวจจับ อัตราส่วน ($R_1 + R_2$) ที่พบในเครื่องวัดแบบบริดจ์แบบที่มีความละเอียดสูงจะมีค่าจาก 0.0001 ถึง 10000 ในวงจรบริดจ์ที่มีความถูกต้อง ± 0.1 เปอร์เซ็นต์ ค่าของอัตราส่วนจะเป็น 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100, และ 1,000

2.7.1.2 บริดจ์แบบไม่สมดุล (Unbalanced Bridge)

ในทางปฏิบัติ จะเป็นการไม่สะดวกที่จะต้องทำการปรับสมดุลของวงจรบริดจ์ทุกครั้งทีค่าความต้านทานที่ถูกวัดเปลี่ยนไป ดังนั้นอาจทำได้โดยการป้อนกระแสที่ถูกปรับมาตรฐานผ่านบริดจ์ และวัดกระแสไม่สมดุลด้วยตัวตรวจจับ (เช่น ไมโครแอมมิเตอร์) ความถูกต้องของการวัดวิธีนี้จะถูกจำกัดโดยความถูกต้องในการปรับเทียบมิเตอร์และความเที่ยงในการรักษากระแสที่ถูกปรับมาตรฐานไม่ให้แปรไป มิเตอร์ที่อยู่ในวงจรจะใช้ทั้งสำหรับการปรับกระแสมาตรฐาน และวัดกระแสเนื่องจากการไม่สมดุลในบริดจ์ กระแสที่ไหลผ่านตัวตรวจจับ (I_x) ในบริดจ์แบบไม่สมดุลจะสามารถคำนวณได้ โดยอาศัยหลักการ Thevenin หาค่าแรงดันที่คร่อมจุด 2, 4 รูปที่ 2.4 ขณะที่ไม่ต่อตัวตรวจจับ ค่านี้ถูกแทนด้วย V_{TH} แล้วหารค่า V_{TH} นี้ด้วยความต้านทาน R_m ของกัลป์วานอมิเตอร์ G บวกความต้านทาน R_{TH} ของบริดจ์ที่วัดระหว่างขั้วของตัวตรวจจับ (รูปที่ 2.3)



รูปที่ 2.3 แสดงการวิเคราะห์ห้วงจรบริดจ์ขณะไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 2.3 ค่าของ V_{TH} จะเป็นตามสมการ

$$V_{TH} = \frac{E (R_2 X - R_1 R_3)}{R_E (R_1 + R_2 + R_3 + X) + (R_1 + R_2) (R_3 + X)} \dots\dots\dots(2.7.5)$$

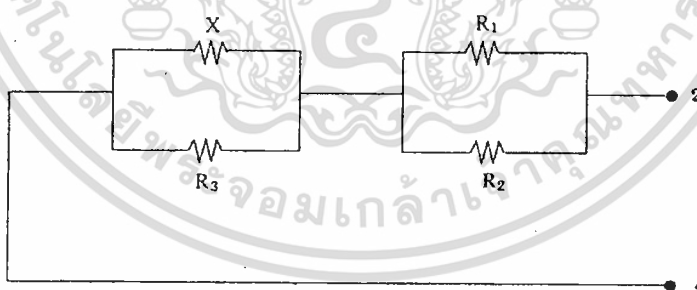
เมื่อ R_1, R_2, R_3, X คือความต้านทานในแต่ละแขนของบริดจ์ E คือ แหล่งจ่ายแรงดันให้วงจร R_E คือความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายแรงดัน

จากการคำนวณ ถ้า X มีค่าต่างไปจากค่าที่ทำให้บริดจ์สมดุลไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ ถ้าให้ $R_E = 0$ จะให้ค่า R_{TH} ขณะ $R_E = \infty$ ไม่เกิน 0.25 เปอร์เซ็นต์ ในทำนองเดียวกันสำหรับวงจรบริดจ์ที่มีแขนทั้งสามเหมือนกัน และแขนข้างหนึ่งต่างไปประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ค่า R_{TH} แปรไปในน้อยกว่า 0.001 เปอร์เซ็นต์ เมื่อ R_E เปลี่ยนจาก 0 เป็น ∞ ดังนั้นจะสามารถสมมุติได้ว่า $R_E = 0$ เพื่อให้สะดวกในการคำนวณค่าความต้านทาน

เมื่อ $R_E = 0$ ความต่างศักย์ระหว่างจุด 2 กับจุด 4 ในสมการ (2.10.5) จะกลายเป็น

$$V_{TH} = V_2 - V_4 = \left\{ \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right\} E - \left\{ \frac{X}{R_3 + X} \right\} E \dots\dots\dots(2.7.6)$$

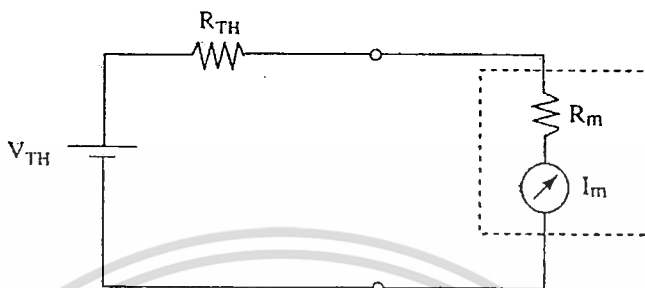
ความต้านทาน R_{TH} ที่มองเข้าไปในบริดจ์ผ่านทางขั้วต่อกัลป์วานอมิเตอร์ เมื่อ $R_E = 0$ และลัดวงจร E จะเป็นไปตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงวงจรสมมูลของความต้านทานระหว่างจุดต่อกัลป์วานอมิเตอร์

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 R_{TH} &= R_1 // R_2 + X // R_3 \\
 &= \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{X R_3}{X + R_3}
 \end{aligned}
 \dots\dots\dots(2.7.7)$$



รูปที่ 2.5 แสดงวงจรสมมูลของวงจรบริดจ์แบบไม่สมดุล

เมื่อรู้ค่า V_{TH} และ R_{TH} ตามวงจรรูปที่ 2.5 จะสามารถหากระแสที่ไหลผ่านตัวตรวจจ็ับ I_g ได้จากสมการ

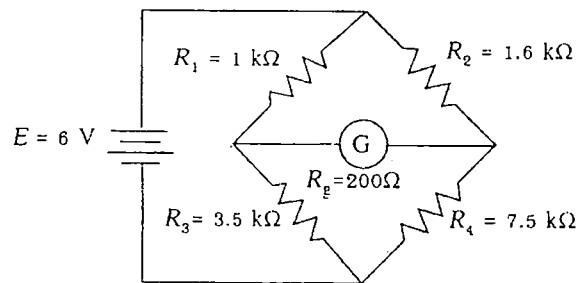
$$I_g = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_m}
 \dots\dots\dots(2.7.8)$$

เมื่อ R_m = ความต้านทานของตัวตรวจจ็ับ (กัลป์วานอมิเตอร์)

ดังนั้นถ้ารู้ขอบเขตการเปลี่ยนแปลงของค่า X และค่าความต้านทานในแขนอื่นของบริดจ์ จะสามารถคำนวณค่ากระแสไม่สมดุล (I_g) ได้ โดยค่าที่อ่านได้อาจปรับเป็นค่า X หรือปริมาณทางฟิสิกส์อื่นที่สามารถถูกแทนในรูป X เป็นต้น

ในกรณีที่ต้องการเลือกกัลป์วานอมิเตอร์เพื่อมาใช้ในวงจร จะต้องคำนวณหาการเบี่ยงเบนสูงสุดของกัลป์วานอมิเตอร์ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ จะเลือกให้แขนทั้งสี่ของบริดจ์มีค่าความต้านทานเริ่มแรกเท่ากัน (เท่ากับ R) และสมมุติให้ $R_e = 0$ จากนั้นต้องกำหนดขอบเขตการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่ต้องการตรวจจ็ับ (X) หากค่า V_{TH} , R_{TH} เมื่อ X เปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด โดยวงจรรูปที่ 2.7 ถ้ารู้ค่าความต้านทานภายใน รู้ค่าความไวของกัลป์วานอมิเตอร์ที่ใช้ จะสามารถเลือกกัลป์วานอมิเตอร์ได้อย่างเหมาะสม

ตัวอย่าง 2.1 จากวงจรรูปที่ 2.6 จงคำนวณค่ากระแสที่ไหลผ่านกัลป์วานอมิเตอร์



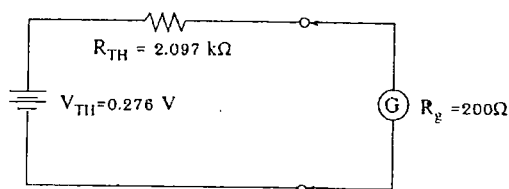
รูปที่ 2.6 แสดงวงจรบริดจ์ไม่สมดุล

วิธีทำ วิธีที่ง่ายที่สุดคือ หาวงจรสมมูล Thevinin ซึ่งจะได้

$$\begin{aligned}
 V_{TH} &= E \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) - E \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \\
 &= 6 \text{ V} \times \left(\frac{3.5 \text{ k}\Omega}{(3.5 + 1) \text{ k}\Omega} - \frac{7.5 \text{ k}\Omega}{(7.5 + 1.6) \text{ k}\Omega} \right) \\
 &= 6 \text{ V} (0.778 - 0.824) = 0.276 \text{ V} \\
 R_{TH} &= \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} \\
 &= \frac{1 \text{ k}\Omega \times 3.5 \text{ k}\Omega}{(1 + 3.5) \text{ k}\Omega} + \frac{1.6 \text{ k}\Omega \times 7.5 \text{ k}\Omega}{(1.6 + 7.5) \text{ k}\Omega} \\
 &= 2.097 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

ซึ่งจะได้วงจรสมมูล Thevinin ดังรูปที่ 2.7 ขณะนี้จะสามารถคำนวณกระแสผ่านกัลป์วานอมิเตอร์ได้

$$\begin{aligned}
 I_g &= \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_g} \\
 &= \frac{0.276 \text{ V}}{(2.097 \text{ k} + 200) \Omega} \\
 &= 120 \mu\text{A}
 \end{aligned}$$

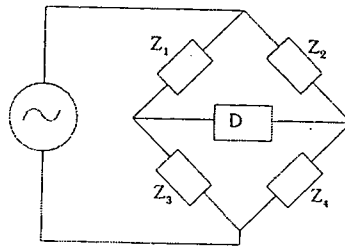


รูปที่ 2.7 แสดงวงจรสมมูลสำหรับรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 บริดจ์กระแสสลับ

2.7.2.1 เงื่อนไขการปรับปรุงสมดุล

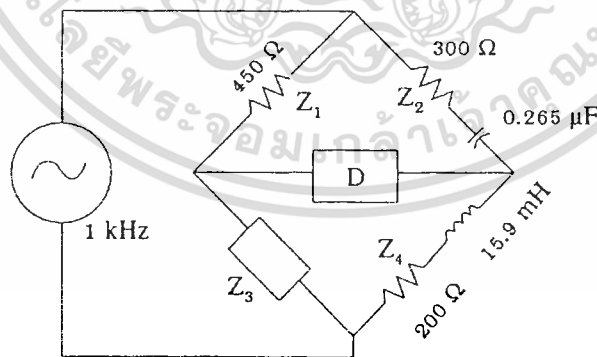


รูปที่ 2.8 แสดงวงจรบริดจ์กระแสสลับ

ในวงจรวิทสตันบริดจ์ แขนทุกด้านเป็นความต้านทานอย่างเดียวนั้น เมื่อป้อนด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ ในสภาวะสมดุล กระแสที่ไหลผ่านตัวตรวจจذب D จะเป็นศูนย์ เช่นเดียวกับเมื่อป้อนด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง อย่างไรก็ตาม โดยปกติสำหรับบริดจ์กระแสสลับ แต่ละด้านของบริดจ์จะเป็นอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Complex Impedance) โดยแทนตัวต้านทาน R ด้วยอิมพีแดนซ์ Z ตามรูปที่ 2.8 ขณะที่สมดุลจะได้

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \tag{2.7.9}$$

ตัวอย่าง 2.4 กำหนดค่าต่างๆในวงจรบริดจ์ ดังรูปที่ 2.9 จงหาค่า Z_3 ที่ทำให้วงจรนี้สมดุล



รูปที่ 2.9 แสดงวงจรบริดจ์สำหรับตัวอย่าง 2.4

วิธีทำ จาก $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$ (2.7.10)

$$\begin{aligned} Z_1 &= R = 450 \Omega \\ Z_2 &= R - jX_c = (300 - j600) \Omega \\ Z_4 &= R + jX_L = (200 + j100) \Omega \end{aligned}$$

เมื่อ

แทน Z_1, Z_2, Z_4 ลงใน (2.7.10) จะได้

$$Z_3 = \frac{Z_1 Z_4}{Z_2} = \frac{(450)(200 + j100)}{(300 - j600)} = +j150 \Omega$$

ฉะนั้น ถ้าต้องให้วงจรนี้สมดุล Z_4 จะต้องเป็นค่าความเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว (Pure Inductance) ซึ่งมีค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ 150Ω ที่ความถี่ 1 kHz

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL = 150 \Omega \\ L &= \frac{150 \Omega}{2\pi (1000)} = 23.9 \text{ mH} \end{aligned}$$

เราสามารถวิเคราะห์เงื่อนไขการสมดุลในสมการ (2.7.9) ให้ละเอียดขึ้น โดยการแทนอิมพีแดนซ์ในรูปโพลลา

$$Z = |Z| \angle \theta \text{(2.7.11)}$$

เมื่อ $|Z|$ คือขนาด และ θ คือมุมที่ $|Z|$ ทำกับแกนนอน โดยแทนค่า Z จากสมการ (2.7.12) ลงใน (2.12.1)

$$\begin{aligned} (|Z_1| \angle \theta_1) (|Z_4| \angle \theta_4) &= (|Z_2| \angle \theta_2) (|Z_3| \angle \theta_3) \\ |Z_1| |Z_4| \angle (\theta_1 + \theta_4) &= |Z_2| |Z_3| \angle (\theta_2 + \theta_3) \end{aligned} \text{(2.7.13)}$$

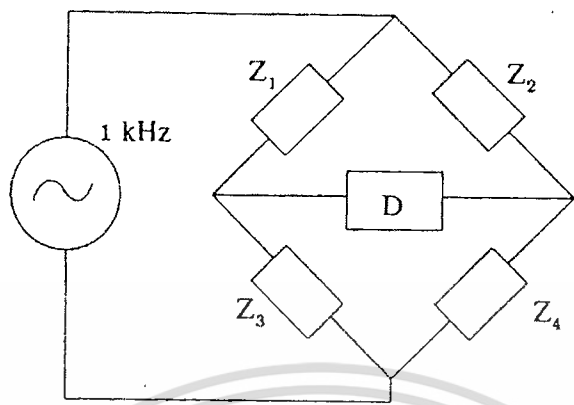
สมการ (2.7.13) แสดงว่า ในกรณีที่บริดจ์จะสมดุลจะต้องเกิดทั้งสองเงื่อนไขพร้อม ๆ กัน คือ
 (1) ผลคูณของขนาดของอิมพีแดนซ์ที่อยู่ด้านตรงข้ามกันของบริดจ์ต้องเท่ากัน

$$|Z_1| |Z_4| = |Z_2| |Z_3| \text{(2.7.14)}$$

(2) ผลบวกของมุมของอิมพีแดนซ์ที่อยู่ด้านตรงข้ามกันของบริดจ์ต้องเท่ากัน

$$\theta_1 + \theta_4 = \theta_2 + \theta_3 \text{(2.7.15)}$$

ตัวอย่าง 2.5 จากรูปที่ 2.10 กำหนด $Z_1 = 100 \angle 80^\circ \Omega$; $Z_2 = 250 \Omega$; $Z_3 = 400 \angle 30^\circ \Omega$ จงหาค่า Z_4 ที่ทำให้วงจรบริดจ์นี้สมดุล



รูปที่ 2.10 แสดงวงจรบริดจ์สำหรับตัวอย่าง 2.5

วิธีทำ จากสมการ (2.7.10)

$$\begin{aligned}
 |Z_1| |Z_4| &= |Z_2| |Z_3| \\
 |Z_4| &= \frac{250 (400)}{100} \\
 &= 1000 \Omega
 \end{aligned}$$

จากสมการ (2.7.11)

$$\begin{aligned}
 \theta_1 + \theta_4 &= \theta_2 + \theta_3 \\
 \theta_4 &= \theta_2 + \theta_3 - \theta_1 \\
 &= 0^\circ + 30^\circ - 80^\circ = -50^\circ
 \end{aligned}$$

ดังนั้น หากต้องการให้วงจรบริดจ์นี้สมดุล แชน Z_4 จะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์

$$\begin{aligned}
 &= 1000 \angle -50^\circ \Omega \\
 &= 642.8 - j 766 \Omega \\
 &= R - j X_c \Omega
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

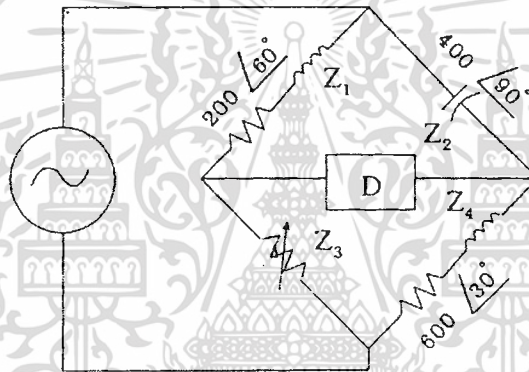
ตัวอย่าง 2.6 พิจารณาวงจรบริดจ์รูปที่ 2.11 ว่าสามารถปรับ Z_3 ให้วงจรสมดุลได้หรือไม่
วิธีทำ ในการปรับเพื่อให้วงจรสมดุล พิจารณาเงื่อนไขแรก สมการ (2.7.10)

$$|Z_3| = \frac{|Z_1||Z_4|}{|Z_2|} = \frac{200 \times 600}{400} = 300 \Omega$$

เมื่อปรับ $R_3 = 300 \Omega$ สภาวะแรกจะสมดุลซึ่งเมื่อพิจารณาเงื่อนไขที่สอง (2.7.11) จะได้

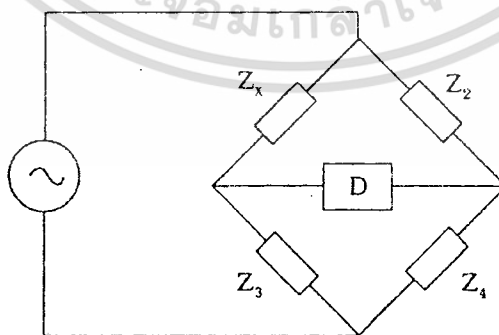
$$\begin{aligned} \theta_1 + \theta_4 &= 60^\circ + 30^\circ = 90^\circ \\ \theta_2 + \theta_3 &= -90^\circ \\ \theta_1 + \theta_4 &\neq \theta_2 + \theta_3 \end{aligned}$$

ฉะนั้น วงจรบริดจ์นี้ไม่สามารถปรับให้สมดุลได้



รูปที่ 2.11 แสดงวงจรบริดจ์สำหรับตัวอย่าง 2.6

2.7.2.2 บริดจ์อัตราส่วนและบริดจ์ผลคูณ



รูปที่ 2.12 แสดงวงจรบริดจ์กระแสสลับ

จากรูปที่ 2.12 สภาวะสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$Z_x Z_4 = Z_2 Z_3 \dots\dots\dots(2.7.16)$$

ซึ่งหมายถึง จะจัดรูปความสัมพันธ์เพื่อหาค่า Z_x ได้สองลักษณะ คือ

$$\begin{aligned} Z_x &= \left(\frac{Z_2}{Z_4} \right) Z_3 \\ &= \left(\frac{Z_3}{Z_4} \right) Z_2 \dots\dots\dots(2.7.17) \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned} Z_x &= (Z_2 Z_3) \frac{1}{Z_4} \\ &= (Z_2 Z_3) Y_4 \dots\dots\dots(2.7.18) \end{aligned}$$

ก. บริดจ์อัตราส่วน จากสมการ (2.7.17) ถ้าให้อัตราส่วน (Ratio) ของ Z_2 ต่อ Z_4 เป็นปริมาณจริง (โดยการตั้ง Z_2 และ Z_4 ความเป็นตัวต้านทานอย่างเดียวหรือรีแอคทีฟบริสุทธิ์) จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูป

$$Z_x = K Z_3 \dots\dots\dots(2.7.19)$$

ขณะนี้บริดจ์จะเปรียบเทียบกับอิมพีแดนซ์ที่คล้ายกันในแขนที่ตำแหน่งติดกันกับแขนของอิมพีแดนซ์ที่ต้องการทราบค่า

ข. บริดจ์ผลคูณ จากสมการ (2.7.18) ถ้าให้ผลคูณของ Z_2 กับ Z_4 เป็นปริมาณจริง จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูป

$$Z_x = K_2 Y_4 \dots\dots\dots(2.7.20)$$

$$\begin{aligned} Y &= \frac{1}{Z} = G + j B \text{ โดยที่ถ้า} \\ Z &= R + j X \dots\dots\dots(2.7.21) \end{aligned}$$

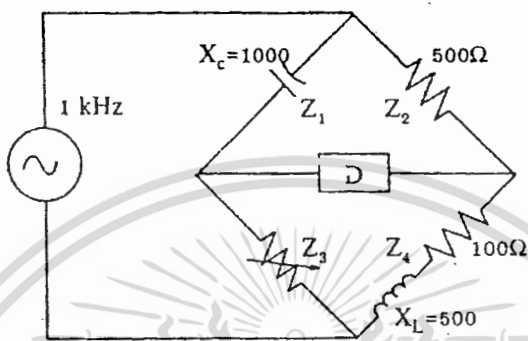
จะได้

$$Y = \frac{R}{R^2 + X^2} + j \left(\frac{\pm X}{R^2 + X^2} \right) \dots\dots\dots(2.7.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งหมายความว่า ถ้าหาก Z_x อยู่ในรูป R กับ C ต่ออนุกรมกัน $Z_x = (R_x - j X_x)$ Z_4 ซึ่งเป็นอิมพีแดนซ์ที่อยู่ด้านตรงข้าม จะต้องเป็น R กับ L อนุกรมกัน $Z_4 = (R_4 + j X_4)$

ตัวอย่าง 2.7 พิจารณาบริดจ์ในรูปที่ 2.13 ที่สมมุติว่า $Z_1 = Z_x$ ที่เราต้องการทราบค่า การปรับ Z_3 อย่างเดียวจะสามารถปรับสมดุลได้หรือไม่



รูปที่ 2.13 แสดงวงจรบริดจ์ในตัวอย่าง 2.7

วิธีทำ ถ้าพิจารณาเงื่อนไขแรกของการสมดุล (2.7.10)

$$|Z_3| = \frac{|Z_1| |Z_4|}{|Z_2|}$$

$$= \frac{1000 (509.9)}{500}$$

$$= 1019.8 \Omega$$

โดยการปรับ $R_3 = 1019.8$ สภาวะแรกจะสมดุล และถ้าพิจารณาเงื่อนไขที่สองของการสมดุล (2.7.11) ขณะนี้

$$\theta_1 = -90^\circ$$

$$\theta_2 = \theta_3 = 0^\circ$$

$$\theta_4 = 78.69^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะนี้ $\theta_1 + \theta_4 = -11.31^\circ$, $\theta_2 + \theta_3 = 0^\circ$ จะเห็นได้ว่าขณะนี้จะไม่สามารถปรับเปลี่ยนเฟสได้
 ดังนั้นจึงจะไม่สามารถปรับเปลี่ยนเฟสได้

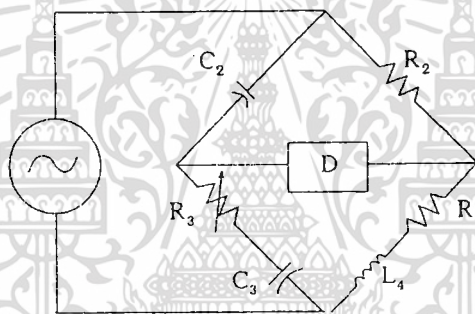
- 1) แก้มุมของ Z_4 ให้เป็น 90° ซึ่งปกติจะเป็นความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำด้วย
- 2) แก้มุมของ Z_2 หรือ Z_3 เช่นให้

$$\begin{aligned} Z_2 &= 500 \angle -11.31 \\ &= 490.29 - j 98.06 = R_2 - j X_2 \end{aligned}$$

หรือให้

$$\begin{aligned} Z_3 &= 1019.8 \angle -11.31 \\ &= 1000 - j 200 \end{aligned}$$

เพราะว่า ความถี่ของแรงกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีความถี่ 1kHz ดังนั้นเราแก้มุมเฟสโดยต่อ $C_2 = 1.623 \mu\text{F}$ อนุกรมกับ R_2 และต้องปรับ R_2 เป็น 490.29Ω หรือต่อ $C_3 = 0.796 \mu\text{F}$ อนุกรมกับ R_3 และต้องปรับ R_3 เป็น 4000Ω ด้วย สมมุติว่าเราเลือกใส่ C_3 เข้าไปอนุกรมกับ R_3 ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.14 การตัดแปลงวงจรรูปที่ 2.13

เราจะเห็นว่า ส่วนประกอบวงจรที่เราปรับทั้งขนาดและมุมจะอยู่ในแขนเดียวกัน ซึ่งหมายถึงถ้าเราปรับขนาดมันจะส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขที่สองของการสมดุล หรือถ้าเราปรับมุมจะเกิดผลกระทบต่อเงื่อนไขแรกของการสมดุล

วงจรรูปที่ 2.14 จะมีรูปแบบที่ไม่ใช่บริดจ์อัตราส่วนหรือบริดจ์ผลคูณ จะเห็นว่าการมีอิมพีแดนซ์ในหลาย ๆ แขนก่อให้เกิดความยุ่งยากในการปรับสมดุลมากกว่า ถ้าเรามองย้อนไปในรูปที่ 20 ขณะนี้บริดจ์เป็นแบบบริดจ์ผลคูณ ถ้าเราใช้ R_3 เป็นตัวปรับขนาดตามเงื่อนไขแรกของการสมดุล เราจะมีตัวปรับมุมอยู่ในแขนนี้ เราอาจใช้การปรับ R_4 ก็ได้แต่ปัญหาคือ จะลดความต้านทานได้ต่ำสุดขนาดไหนที่จะทำให้มุมเป็น 90° การลดความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำจะทำให้ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่มาก อย่างไรก็ตาม เมื่อเราปรับ R_4 จะทำให้อิมพีแดนซ์หรือเงื่อนไขแรกของการสมดุลเปลี่ยนไป ดังนั้นปกติจึงควรปรับเงื่อนไขของเฟสก่อนแล้วจึงปรับเงื่อนไขของขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้วงจรบริดจ์เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการ จะพบว่าสามารถต่อวงจรบริดจ์ได้หลายแบบ แต่ในการพิจารณาเลือกใช้วงจรบริดจ์แบบใดนั้น เราจะพิจารณาหลาย ๆ แฟกเตอร์ เช่น

(1) ควรเลือกวงจรบริดจ์แบบที่สภาวะสมดุลเป็นอิสระต่อความถี่ เพราะว่าจะสามารถใช้บริดจ์ที่ความถี่ใด ๆ ได้ (อย่างน้อยภายในช่วงความถี่หนึ่ง)

(2) เมื่อต้องการทำให้บริดจ์สมดุล อิมพีแดนซ์บางครั้งจะต้องแปรค่าได้ (Variable) การเปลี่ยนแปลงค่า ปกติจะทำได้โดยการเปลี่ยนค่าส่วนประกอบในวงจรที่มีค่าคงที่เป็นขั้น และส่วนประกอบในวงจรบางตัวจะต้องสามารถแปรค่าได้อย่างต่อเนื่อง ในทางปฏิบัติ ตัวอินดักเตอร์แบบแปรค่าได้อย่างต่อเนื่องจะสร้างยากมาก ดังนั้นเราจะหลีกเลี่ยงวงจรบริดจ์แบบที่อาศัยการแปรค่าอินดักเตอร์ แม้ว่าตัวต้านทานแบบแปรค่าอย่างต่อเนื่องจะสร้างง่ายกว่า (แต่ยากที่จะทำให้ความผิดพลาดเนื่องจากความถี่ต่ำและเป็นอิสระต่อการปรับ) โดยปกติจะใช้ตัวเก็บประจุแบบแปรค่าได้อย่างต่อเนื่องเป็นส่วนประกอบหลักที่สามารถปรับค่าได้ การพัฒนาส่วนประกอบค่าคงที่และแปรค่าได้ที่มีความผิดพลาดเนื่องจากความถี่ต่ำ ตลอดช่วงความถี่กว้าง ๆ เป็นส่วนที่ยากในการออกแบบวงจรบริดจ์

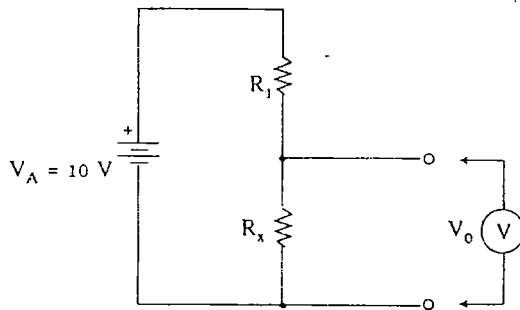
(3) เมื่ออิมพีแดนซ์ที่ต้องการทราบค่าเป็นเชิงซ้อน (คือ มีทั้งส่วนที่เป็นจริงและจินตภาพ) จะต้องมีอย่างน้อยด้านหนึ่งที่เป็นเชิงซ้อน และจะต้องมีตัวปรับ 2 ตัวเพื่อปรับให้เกิดสมดุลทั้งส่วนจริงและจินตภาพของสมการข้างต้น ควรเลือกวงจรที่ปรับค่าของตัวปรับทั้งสองเป็นไปอย่างต่อเนื่องและเป็นอิสระต่อกัน เพื่อให้การปรับแต่ละตัวมีผลเพียงสภาวะสมดุลเดียว

2.8 วิทสโตน บริดจ์ (Wheatstone bridge)

เครื่องวัดแบบนี้ จะอาศัยการเปลี่ยนเทียบความต้านทานที่ต้องการทราบค่ากับความต้านทานมาตรฐาน เครื่องนี้ใช้สำหรับวัดค่าความต้านทานจาก 0.1Ω ถึง $10 M\Omega$ โดยมีความถูกต้อง 0.01 ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ หลักการของเครื่องวัดแบบนี้ อธิบายอยู่ในหัวข้อ โครงสร้างและหลักการทํางานของโพเทนชิโอมิเตอร์ และดังที่ได้กล่าวไว้ใน เรื่องเครื่องวัดแบบชี้ค่าศูนย์ว่า การประยุกต์ที่สำคัญของวิทสโตนบริดจ์ จะเกี่ยวข้องกับการตรวจจับค่าความต้านทานของทรานซิสเตอร์แบบความต้านทาน ข้อได้เปรียบของการใช้บริดจ์ในงานลักษณะนี้มี 2 ประการ คือ ก) การสมดุลของบริดจ์จะไม่ถูกกระทบกระเทือนโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันกระตุ้น และ ข) จะสามารถรักษาสัญญาณขณะบริดจ์ไม่สมดุลให้มีความเป็นเชิงเส้นอย่างพอเพียง ทำให้การวัดในงานหลาย ๆ ลักษณะมีความสะดวก

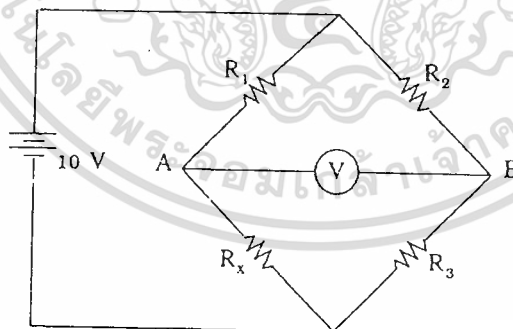
ลองพิจารณาการวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน R_x ในวงจรรูปที่ 2.15 แรงดันกระตุ้น V_A เท่ากับ $10.0 V$ R_i คือ ความต้านทานค่าคงที่ ถ้า $R_1 = R_x$ แรงดันเอาต์พุต $V_0 = 5.0V$ ขณะนี้ถ้าพารามิเตอร์ที่ต้องการตรวจจับ เช่น อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงทำให้ R_x เปลี่ยนแปลง อันจะทำให้ V_0 เปลี่ยนแปลงไปด้วย ในรูปนี้ ถ้า R_x เปลี่ยนแปลงไป 0.1 เปอร์เซ็นต์ V_0 จะเปลี่ยนไป 5 mV โดยการใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีความถูกต้องสูง และไม่ผลกรร โทลควงจรมาวัด จะได้ค่า $V_0 = 5.005 V$ มีการเปลี่ยนแปลงออกไปทางบวก 0.005 โวลต์ ขณะนี้ถ้าหากแรงดันกระตุ้นเปลี่ยนไปเท่ากับ +0.02 เปอร์เซ็นต์ หรือถ้าความผิดพลาดของมิเตอร์เป็น 0.02 เปอร์เซ็นต์ ค่า V_0 ที่แสดงจะเปลี่ยนแปลงไป 1 mV ดังนั้นค่าที่วัดได้จะมีความผิดพลาด 20 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงวงจรแบ่งแรงดัน เพื่อวัดการเปลี่ยนความต้านทาน R_x

ในตัวอย่างที่เพิ่งกล่าวไป ให้ R_x เปลี่ยนแปลง 0.1 เปอร์เซ็นต์ เราหมายความว่า แรงดันเอาต์พุตของบริดจ์จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างเป็นเชิงเส้นกับการเปลี่ยนของ R_x อย่างไรก็ตาม สัญญาณขณะไม่สมดุลของวงจรบริดจ์ จะมีลักษณะค่อนข้างจะเป็นเชิงเส้นกับการเปลี่ยน R_x ถ้าการเปลี่ยนแปลงของ R_x ยังคงน้อยกว่า ± 10 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างเช่น ถ้าตัวต้านทานทุกตัวในบริดจ์มีค่าความต้านทานเท่ากับ 100Ω ขณะสมดุลโดย R_x แปรค่าไปจาก 90 ถึง 110Ω รูปที่ 2.16 แสดงการพล็อตกระแสและแรงดันที่คร่อมโวลต์มิเตอร์จะเห็นได้ว่า โดยการสมมติว่าการเปลี่ยนแปลง R_x สัมพันธ์อย่างเป็นเชิงเส้นกับการเปลี่ยนแปลงใน V_{AB} หรือ I_m (กระแสในสาขา AB) จะให้ข้อมูลที่มีความผิดพลาดน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ (เมื่อ R_x เปลี่ยนไปไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์จากค่าที่สมดุล) ผลจากความจริงนี้ เราสามารถใช้สัญญาณขณะไม่สมดุลของวงจรบริดจ์ในการตรวจับการเปลี่ยนแปลงของ R_x ได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 2.16 วงจรบริดจ์ที่ใช้สำหรับวัดความเปลี่ยนแปลงความต้านทาน R_x

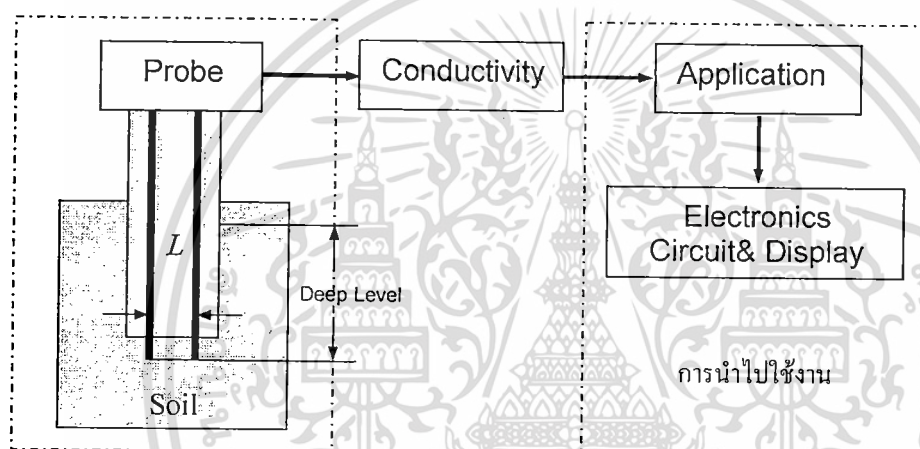
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบโพรบตรวจวัดความชื้นในผิวดิน

3.1 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

ดินแห้ง และสารอินทรีย์ในดินจะส่งผลต่อให้ค่า Permittivity ต่ำ และความชื้นซึ่งคือน้ำในดินมีค่า permittivity สูง ค่า permittivity มีผลสำคัญต่อความจุไฟฟ้า และ ความนำไฟฟ้า เมื่อความชื้นของดินเปลี่ยน ทำให้ความจุไฟฟ้า และ ความนำไฟฟ้าของดินเปลี่ยนได้ ฉะนั้น ตัวแปรทั้งสอง จึงสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ความชื้นของดินได้ ซึ่งสำหรับแนวความคิดของโครงการวิจัยแสดงดังไดอะแกรมรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงแนวความคิดและระบบการทำงานของโครงการวิจัย

3.2 การออกแบบส่วนของ Probe

จากไดอะแกรมในรูปที่ 3.1 จะทำการออกแบบโพรบโดยใช้แผ่นตัวนำสองแผ่น (ซึ่งจะเลือกตัวนำที่ทำปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของดินน้อย และมีสภาพความนำไฟฟ้าสูง) วางคู่ขนานกันระยะห่างขนาด 2 เซนติเมตร ขนาดความลึกประมาณ 10 เซนติเมตร

พื้นที่ทั้งหมด ลักษณะหัววัดความชื้น กว้าง 4 cm ยาว 14 cm จะมีพื้นที่ทั้งหมด

$$\text{พ.ท.}\triangle = 1/2 * \text{สูง} * \text{ฐาน} = 1/2 * 2 * 4 = 4 \text{ cm}^2$$

$$\text{พ.ท.}\square = \text{กว้าง} * \text{ยาว} = 4 * 12 = 48 \text{ cm}^2$$

$$\text{พ.ท. รวม} = 48 + 4 = 52 \text{ cm}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่ของขั้วทองแดง

พ.ท.ของขั้วทองแดงขั้วบวก

$$\text{พ.ท. } \Delta = 1/2 * \text{สูง} * \text{ฐาน} = 1/2 * 0.7 * 1.3 = 0.455 \text{ cm}^2$$

$$\text{พ.ท. } \square = \text{กว้าง} * \text{ยาว} = 1 * 4 = 4 \text{ cm}^2$$

$$\text{พ.ท. รวม} = 4.455 \text{ cm}^2$$

พ.ท. ของขั้วทองแดงขั้วลบ

$$\text{พ.ท. } \Delta = 1/2 * \text{สูง} * \text{ฐาน} = 1/2 * 0.7 * 1.3 = 0.455 \text{ cm}^2$$

$$\text{พ.ท. } \square = \text{กว้าง} * \text{ยาว} = 1 * 4 = 4 \text{ cm}^2$$

$$\text{พ.ท. รวม} = 4.455 \text{ cm}^2$$

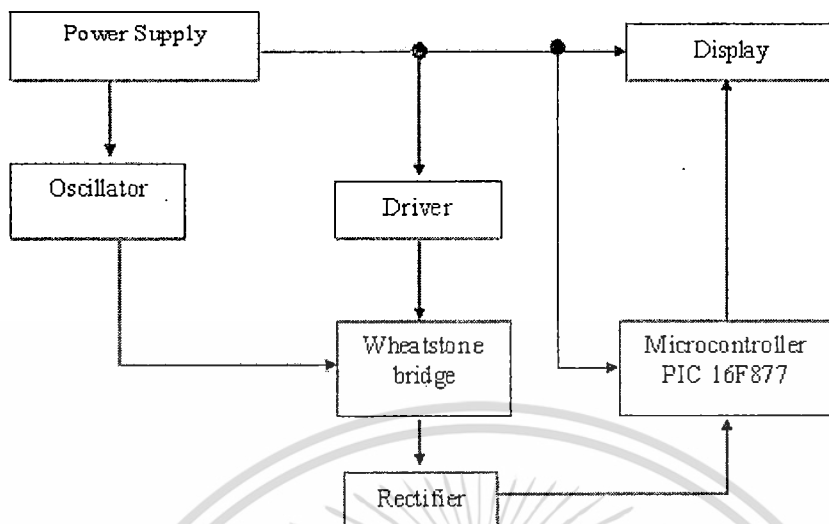


รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของโพรบที่นำมาใช้ในโครงการวิจัย

จากรูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของโพรบที่ใช้ในการตรวจจับความนำไฟฟ้าในดินโดยเป็นออกแบบมาจากแผ่น PCB ซึ่งมีตัวนำวางคู่ขนานกันระยะห่างขนาด 2 เซนติเมตร ขนาดความลึกประมาณ 10 เซนติเมตร

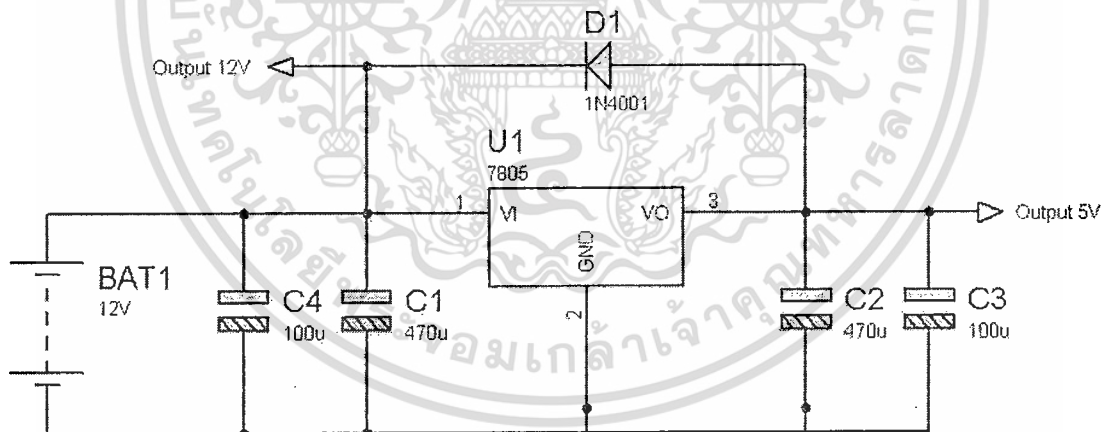
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรวัดความชื้น

3.3.1 Power Supply วงจรแหล่งจ่ายกระแสจะประกอบไปด้วย แบตเตอรี่ 12V 7A และ โดยใช้ วงจร Regulate 7805 ดังนี้



รูปที่ 3.4 แสดงวงจร Power Supply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 Oscillator วงจรนี้จะนำไปเข้าภาค driver เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแสกลับ

ประกอบด้วยวงจร Astable สร้างสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมด้วย ไอซี 555 timer มีการคำนวณดังนี้ ออกแบบให้มีความถี่ 1 KHz , C = 0.1 uF

จะได้
$$F = 1.44 / [(Ra + Rb) \times C]$$

หา Fall time คือ $T2 = \text{Discharge time (output low)}$

$$T2 = 0.5 \text{ ms}$$

จากสมการ $T2 = 0.693 \times (Rb) \times C$

$$0.5 \times 10^{-3} = 0.693 \times (Rb) \times 0.1 \times 10^{-6}$$

$$R2=Rb = 7824 \Omega \text{ เลือกใช้ } 7.5K\Omega$$

ที่ความถี่ F = 1 KHz

$$(Ra + 2Rb) = 1.44 \times 10^3$$

$$R1=Ra = 14400 - 15000 = -600 \text{ เลือกใช้ } R = 620 \Omega$$

ลองคำนวณกลับ

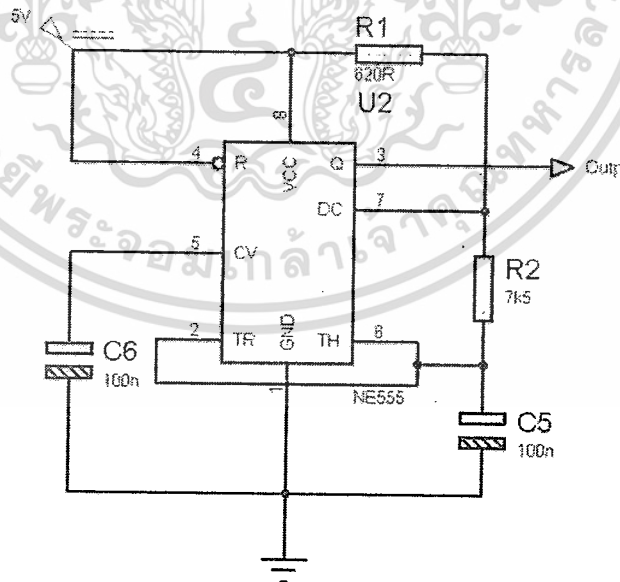
$$F = 1.44 / (620 + 2 \times 7.5 \times 10^3) \times 0.1 \times 10^{-6} = 922 \text{ Hz}$$

เมื่อ Ra = R1 , Rb = R2

ค่า duty cycle

$$D = Rb / (Ra + 2Rb)$$

$$D = 7.5 \times 10^3 / (620 + 2 \times 7.5 \times 10^3) = 0.48$$

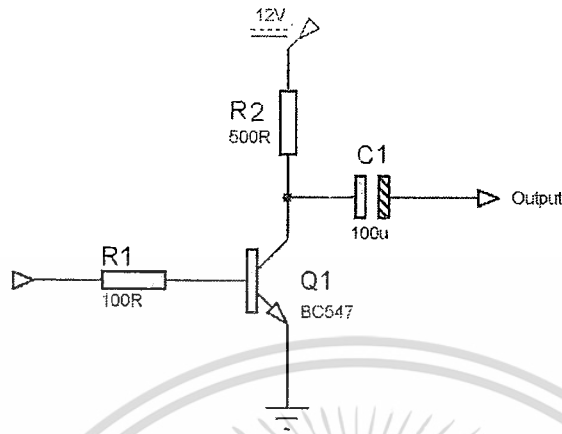


รูปที่ 3.5 แสดงวงจร Oscillator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 Driver

วงจร Driver ขับกระแสให้วงจร Wheatstone Bridge จะให้ Output Pulse AC จาก Input Pulse แบบ TTL โดยมีซีกบวกรว +6V และ ซีกลบ -6V



รูปที่ 3.6 แสดงวงจร Driver

จาก Input วัดกระแสได้ 13.5mA จาก Data Sheet TR มีค่า $h_{FE} = 110$ ฉะนั้น $\beta = 110$

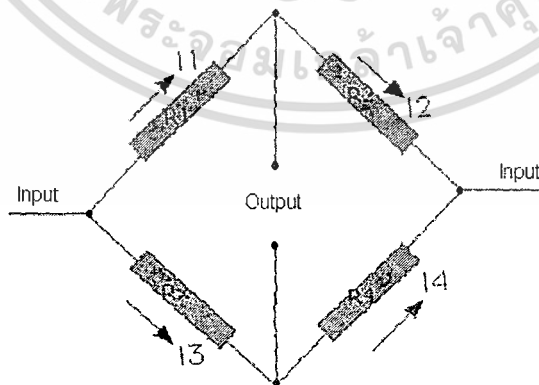
$$I_c = \beta I_B$$

$$= (110)(13.5\text{mA}) = 1.485\text{A}$$

จากวงจร $I_c = 12 / 500 = 24\text{mA}$ ดังนั้นเมื่อ Transistors On จะมีกระแสไหล 24mA

3.3.4 Wheatstone Bridge

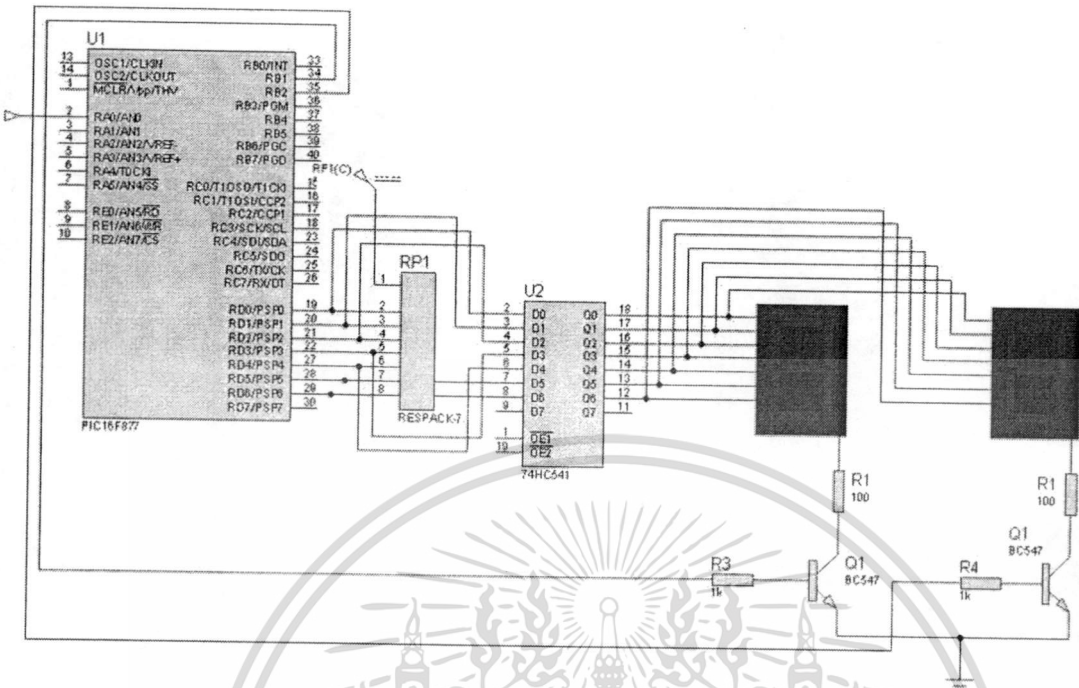
จากรูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของวงจร Wheatstone bridge ที่ใช้ในการทดสอบ โดยอาจจะมี VR เพิ่มเข้าไปในวงจรเพื่อเป็นตัวที่ใช้ในการปรับให้วงจร Wheatstone Bridge เข้าสู่สภาวะสมดุล และ R_x คือ ตำแหน่งของ Sensor



รูปที่ 3.7 แสดงวงจร Wheatstone bridge (R_x = ความต้านทานของโพรบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 วงจร Microcontroller PIC ซึ่งต่อกับ seven segment มีดังนี้



รูปที่ 3.8 แสดงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ และ วงจร Driver Seven Segment

วงจรการแสดงผลแบบ Seven segment มี IC 74HC541 เป็นตัวขับกระแสให้ seven segment และมีทรานซิสเตอร์ BC 547 เป็นสวิทช์สลับการแสดงผลของแต่ละ Segment

Input ของ 74HC541 ต่อกับ Port D ของ PIC

Port RB1 และ RB2 เป็นสวิทช์สลับการทำงานของ seven segments

Port RA0 เป็น A/D รับสัญญาณแรงดันจากวงจร Bridge ให้ PIC ประมวลผลเพื่อผลออก seven segment ต่อไป

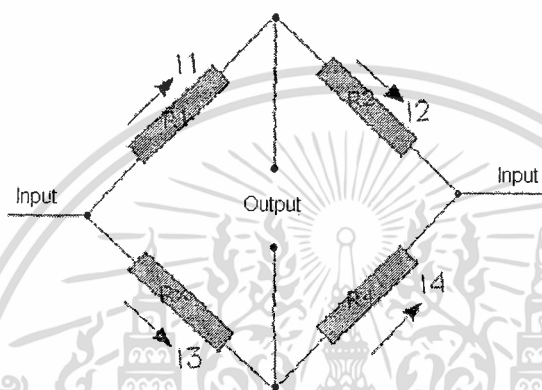
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วิธีการทดลอง และผลการทดลอง

4.1 การทดลองที่ 1 วงจร Wheatstone bridge แบบกระแสตรง

1. ทำการทดลองเพื่อวัดค่าความต้านทานของดินในขณะที่มีค่าความชื้นสูงสุด และต่ำสุดโดยเมื่อเสียบโพรบที่ออกแบบในดินที่เตรียมไว้ แล้วทำการปรับค่า VR (R_4 ในรูปที่ 4.1) จนทำให้เข็มมิเตอร์ที่ต่อจุด output ซึ่งที่ค่า 0 ซึ่งหมายถึงบริดจ์เข้าสู่สภาวะสมดุล



รูปที่ 4.1 แสดงวงจร Wheatstone bridge

- จากวงจร Wheatstone Bridge สมการ $R_X = (R_1/R_2) \cdot R_4$ เมื่อ $R_1 = 30\text{k}\Omega$ และ $R_2 = 150\Omega$ และ $VR\ 1\text{M}\Omega = 1\text{M}\Omega$ ทดลองจ่ายบริดจ์กระแสตรงโดยกำหนดแหล่งจ่าย 12 V ที่ Input
- ทดลองค่าความต้านทานในดินที่มีความชื้นสูงสุด (45%) ได้ค่าความต้านทานเท่ากับ $10\text{k}\Omega$
- ทดลองค่าความต้านทานในดินแห้งได้ค่าความต้านทานประมาณ $26\text{M}\Omega$
- ทดลองวัดความต้านทานในดินทั่วไปที่ไม่ทราบความชื้น โดยยังคงแหล่งจ่าย เป็น 12V

$$R_1 = 30\text{k}\Omega, R_2 = 150\Omega, R_4 = VR\ 1\text{M}\Omega$$

$$\text{ครั้งที่ 1 วัดค่า } R_4 = 200\text{k}\Omega$$

$$\text{ครั้งที่ 2 วัดค่า } R_4 = 170\text{k}\Omega$$

$$\text{ครั้งที่ 3 วัดค่า } R_4 = 383\text{k}\Omega$$

$$\text{ครั้งที่ 4 วัดค่า } R_4 = 190\text{k}\Omega$$

$$\text{ครั้งที่ 5 วัดค่า } R_4 = 200\text{k}\Omega$$

$$\text{ค่าเฉลี่ย} = 190\text{k}\Omega$$

$$\text{ค่าความต้านทานในดิน } R_X = 38\text{M}\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทดลองวัดความต้านทานในดินทั่วไปที่ไม่ทราบค่าความชื้นเช่นกัน โดยเพิ่มแหล่งจ่ายเป็น 60V จาก Supply +30 และ -30

$$R1 = 30k\Omega, R2 = 150\Omega, R4 = VR \ 1M\Omega$$

$$\text{ครั้งที่ 1 วัดค่า } R4 = 340k\Omega$$

$$\text{ครั้งที่ 2 วัดค่า } R4 = 340k\Omega$$

$$\text{ค่าความต้านทานในดิน } RX = 68M\Omega$$

7. ต่อวงจร Drive และ วงจร Bridge แล้วต่อเซ็นเซอร์วัดความต้านทานในดิน และปรับจน Bridge สมดุล จากสมการ $R_x = (R_1 + R_2) * R_4$ ตั้งย่านวัดมิเตอร์ AC 10V

ตารางที่ 4.1 การวัดค่าความต้านทานในดินที่มีความชื้นค่าหนึ่ง

วัดค่าครั้งที่	VR 100k Ω	Rx
1.	1.7k Ω	340k Ω
2.	1.8k Ω	360k Ω
3.	2k Ω	400k Ω
4.	1.6k Ω	320k Ω
5.	1.9k Ω	380k Ω
6.	1.6k Ω	320k Ω
7.	1.65k Ω	330k Ω
8.	1.65k Ω	330k Ω
9.	1.8k Ω	360k Ω
10.	1.8k Ω	360k Ω
เฉลี่ย	1.75 k Ω	350k Ω

จากผลการทดลองในตารางที่ 1 เป็นการวัดค่าความต้านทานซ้ำ ๆ ในดินตัวอย่างเดิมที่มีค่าความชื้นค่าหนึ่งเพื่อสังเกตระดับความผิดพลาดซึ่งค่าที่ได้ก็ใกล้เคียงกันในทุกครั้งที่ทำการวัด

4.2 การทดลองที่ 2 วงจร Wheatstone bridge แบบกระแสสลับ

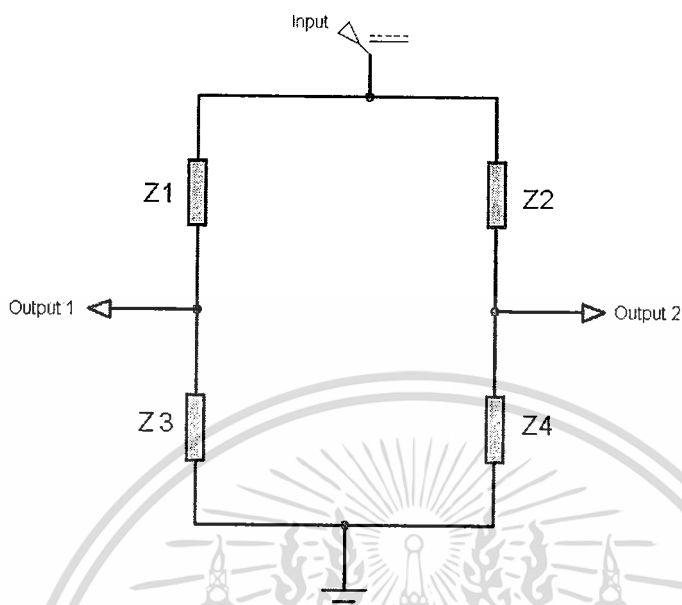
1. ทดลองจ่ายไฟกระแสสลับจากวงจร Oscillator และ Driver ซึ่งจะช่วยให้หัววัดมีคุณสมบัติของ Capacitor แผลง และเมื่อทำวัดค่า Capacitor จะได้ค่าความจุไฟฟ้า = 850pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉะนั้น จากวงจรบริดจ์จึงต้องเป็นบริดจ์กระแสลับด้วย

จากสมการ

$$Z_1 * Z_4 = Z_2 * Z_3$$



รูปที่ 4.2 รูปแสดงวงจรบริดจ์ (Z3 ตำแหน่งของโพรบ)

จากวงจร Oscillator ได้ความถี่ 976Hz

ฉะนั้น Sensor จะมีความต้านทาน $X_c = 1 / 2\pi f C$

$$X_c = 1 / (2 * \pi * (976\text{Hz}) * (850\text{pF})) = 192 \text{ k}\Omega \angle -90^\circ$$

จากวงจร Bridge

$$Z_1 = 500\Omega \quad Z_2 = 150\Omega \quad Z_3 = \text{Sensor} \quad Z_4 = C?$$

ฉะนั้น

$$Z_4 = Z_2 * Z_3 / Z_1$$

$$Z_4 = (192 \text{ k}\Omega \angle -90^\circ * 150) / 500 = 57.6 \text{ k}\Omega \angle -90^\circ$$

$$C = 1 / (2\pi f X_c) = 1 / (2 * \pi * (976\text{Hz}) * (57.6 \text{ k}\Omega \angle -90^\circ))$$

$$C = 2.8 \text{ nF}$$

จะได้ค่าของ $Z_4 = C = 2.2\text{nF} + 680 \text{ pF} + 47 \text{ pF} = 2.927 \text{ nF}$ วงจร Wheatstone Bridge จึงสมดุล

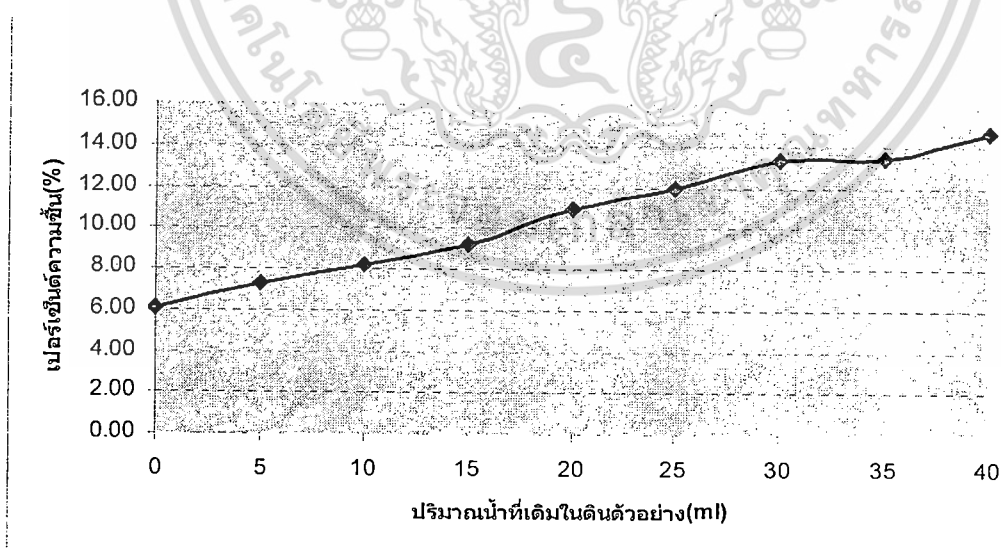
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทดลองวัดค่าความต้านทานเช่นเดียวกับข้อ 7 และต่อ output เข้ากับ Microcontroller PIC โดยใช้ A to D ในการทดลองรับและแปลงค่าแรงดันเป็นดิจิตอล พร้อมทั้งคำนวณความชื้นจากการอบดินตัวอย่าง (สมการที่ 2.6.1)

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น

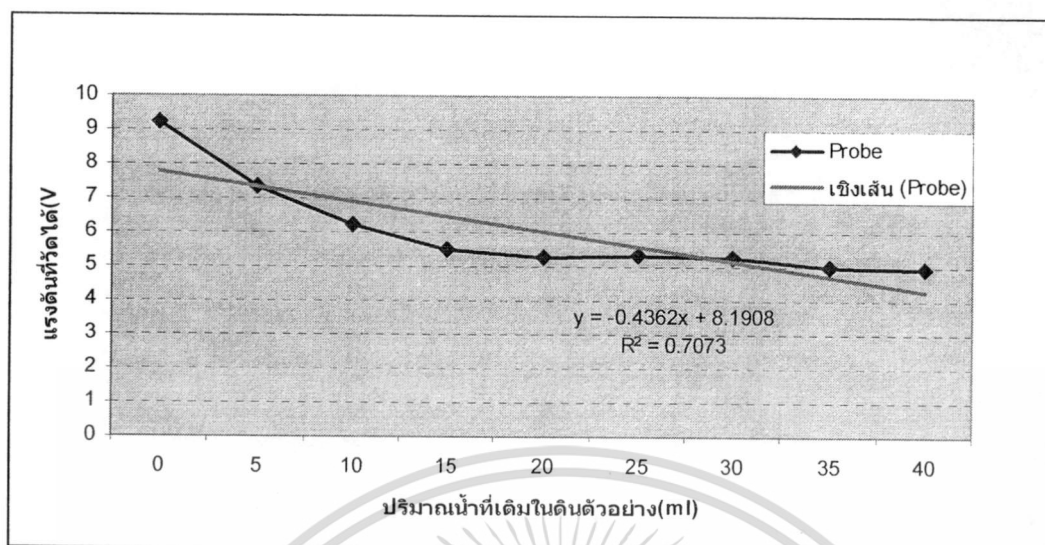
ลำดับที่	เติมน้ำ ml	นน ก่อนอบ	นน หลังอบ	ความต้านทาน	% ความชื้น	แรงดัน V	อันดับ A/D
1	0	659.83	632.34	94 k Ω	6.07	9.23	218
2	5	691.64	656.93	85 k Ω	7.22	7.33	187
3	10	684.98	649.52	50 k Ω	8.18	6.23	191
4	15	712.9	667.94	26 k Ω	9.22	5.49	185
5	20	666.36	617.92	27 k Ω	10.96	5.27	169
6	25	705.34	653.24	30 k Ω	11.91	5.31	164
7	30	735.49	675.93	30 k Ω	13.34	5.27	166
8	35	756.02	689.7	26 k Ω	13.45	5	144
9	40	711.09	642.46	20 k Ω	14.63	4.96	134

เมื่อมีการเติมน้ำลงไปดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะส่งผลต่อความชื้น เมื่อความชื้นเปลี่ยนค่าความต้านทาน และ ค่าแรงดันที่ A to D ได้รับ ก็เปลี่ยนตามในแบบผกผัน คือ ความชื้นสูงขึ้นค่าความต้านทาน ค่าแรงดัน ค่า A to D จะลดลง

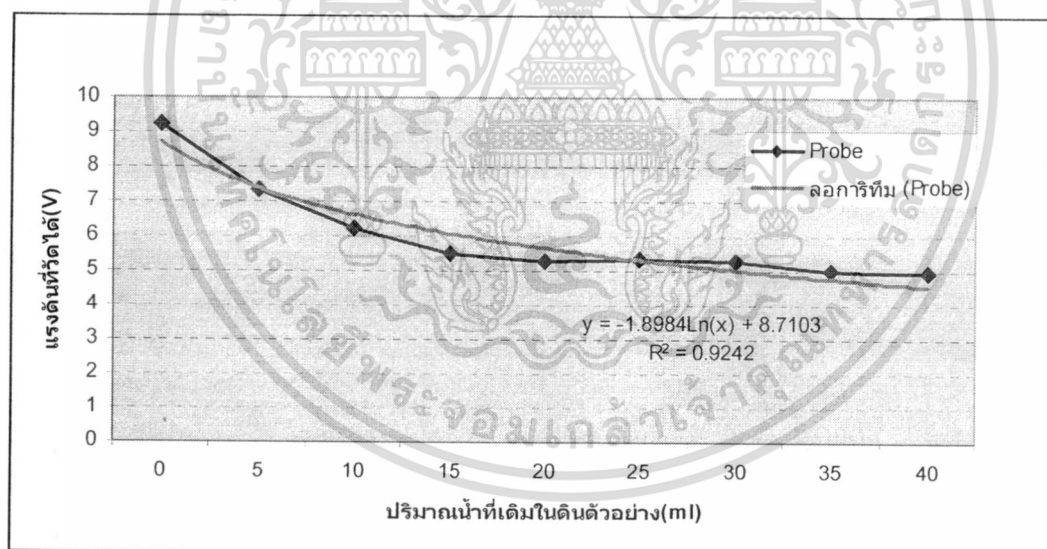


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นจากการคำนวณกับปริมาณน้ำที่เติมในดินตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

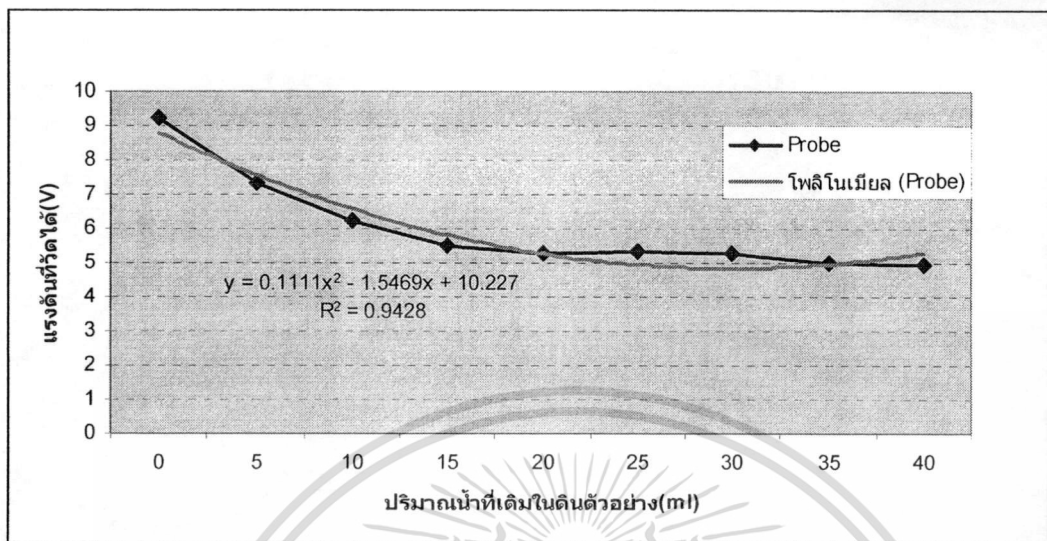


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ Output ของวงจรบริดจ์ก่อนส่งเข้า A to D กับ ปริมาณน้ำที่เติมในดินตัวอย่างเพื่อหาสมการที่เหมาะสม

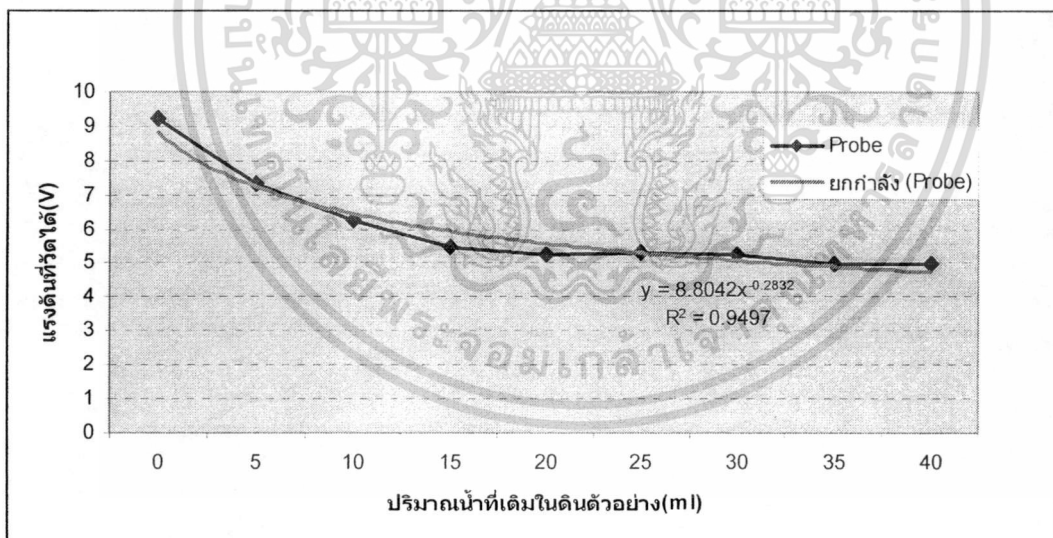


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ Output ของวงจรบริดจ์ก่อนส่งเข้า A to D กับ ปริมาณน้ำที่เติมในดินตัวอย่างเพื่อหาสมการที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

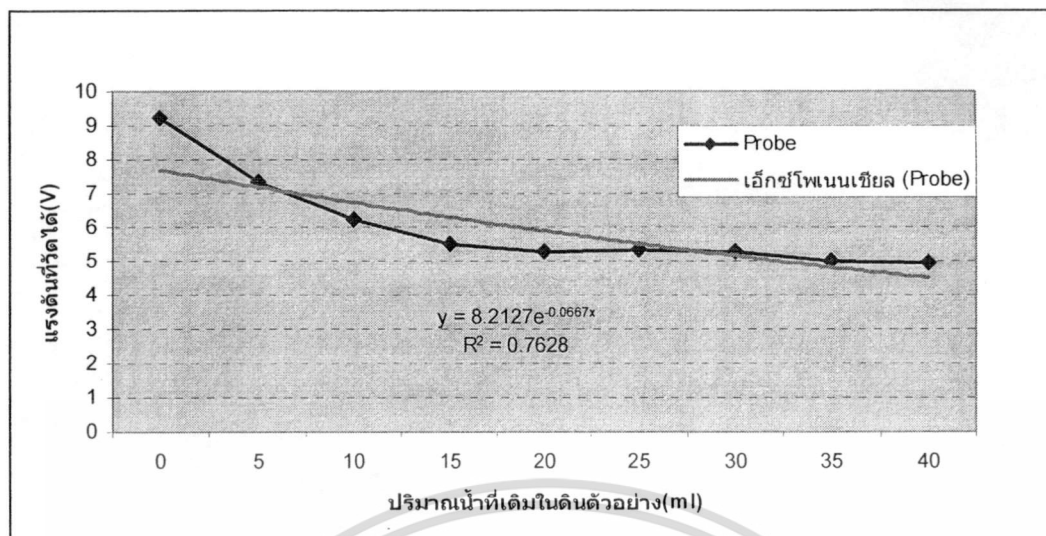


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ Output ของวงจรบริดจ์ก่อนส่งเข้า A to D กับ ปริมาณน้ำที่เติมในดินตัวอย่างเพื่อหาสมการที่เหมาะสม



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ Output ของวงจรบริดจ์ก่อนส่งเข้า A to D กับ ปริมาณน้ำที่เติมในดินตัวอย่างเพื่อหาสมการที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ Output ของวงจรบริดจ์ก่อนส่งเข้า A to D กับ ปริมาณน้ำที่เติมในดินตัวอย่างเพื่อหาสมการที่เหมาะสม

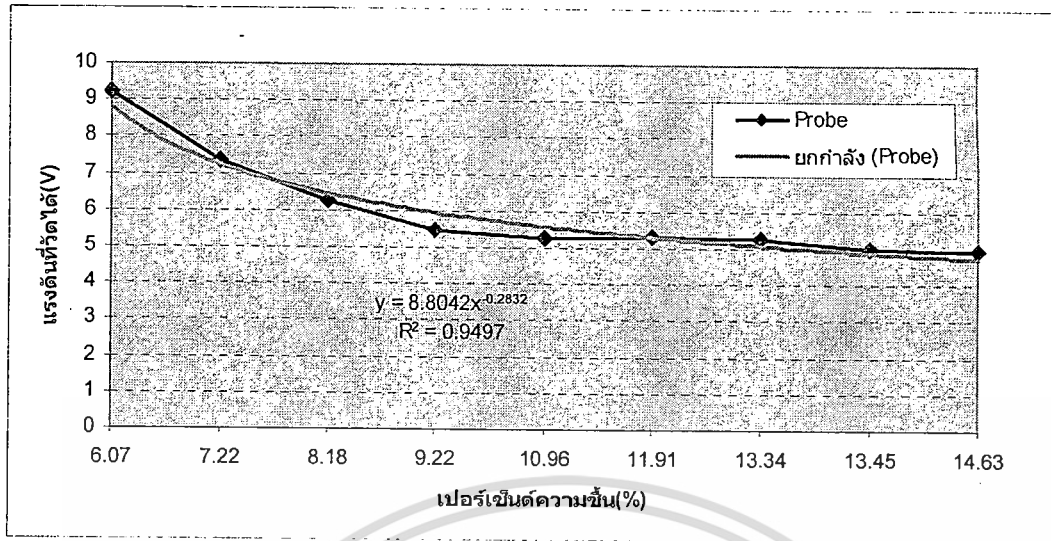
ตารางที่ 4.3 แสดงสมการที่วิเคราะห์ได้จากข้อมูลของโพรบที่ทดลอง

เส้นแนวโน้ม	สมการ	R ²
สมการเชิงเส้น	$y = -0.4362x + 8.1908$	R ² = 0.7073
สมการลอการิทึม	$y = -1.8984 \ln(x) + 8.7103$	R ² = 0.9242
สมการพหุนาม	$y = 0.1111x^2 - 1.5469x + 10.227$	R ² = 0.9428
สมการยกกำลัง	$y = 8.8042x^{-0.2832}$	R ² = 0.9497
สมการเอ็กซ์โพเนนเชียล	$y = 8.2127e^{-0.0667x}$	R ² = 0.7628

จากรูปที่ 4.4-4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ Output ของวงจรบริดจ์ก่อนส่งเข้า A to D กับปริมาณน้ำที่เติมในดินตัวอย่างเพื่อหาสมการที่เหมาะสมสำหรับการหาค่าความชื้นในผิวดิน

เมื่อนำข้อมูลที่นำมาพล็อตกราฟและพิจารณาตามเส้นแนวโน้มของสมการต่างๆ ได้แก่ สมการเชิงเส้น, สมการลอการิทึม, สมการพหุนาม, สมการยกกำลัง และสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า Probe มีสมการเป็นสมการยกกำลัง $y = 8.8042x^{-0.2832}$ มีค่า % R² = 94.97 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณน้ำในดิน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความความต้านทาน หรือความนำไฟฟ้า 94.97 % และค่า % R² นั้นเป็นตัวที่ทำให้เราทราบว่าปริมาณน้ำในดินมีผลต่อค่าความต้านทานหรือความนำไฟฟ้า ดังนั้น เมื่อความต้านทานในวงจรบริดจ์เปลี่ยนจะทำให้บริดจ์เข้าสู่สถานะไม่สมดุล แรงดันที่วัดที่จุด output ของวงจรบริดจ์จะไม่เท่ากับ 0 แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



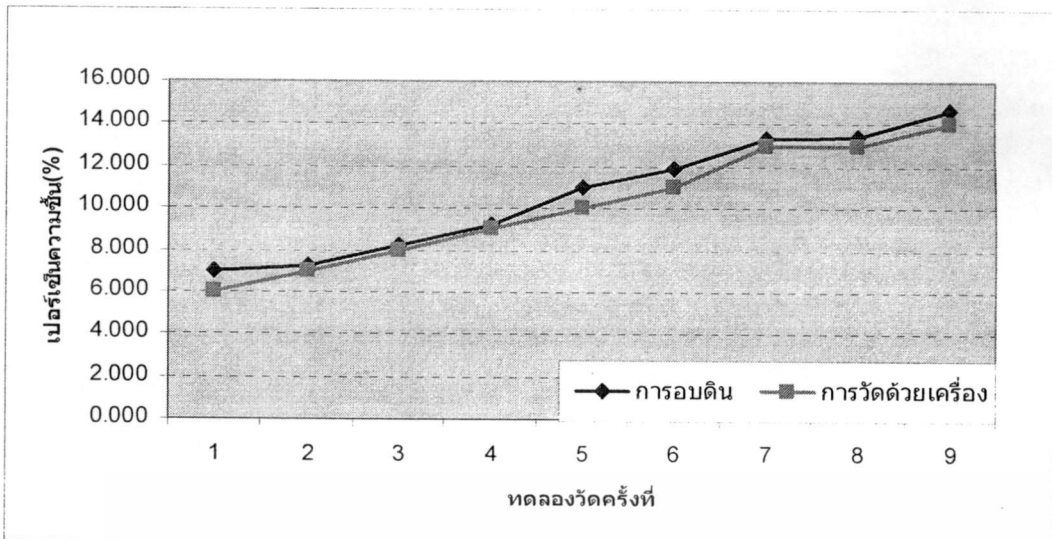
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ Output ของวงจรบริดจ์ก่อนส่งเข้า A to D กับ เปอร์เซ็นต์ความขึ้นที่ตรวจจับได้

ตารางที่ 4.4 การทดลองวัดความขึ้นด้วยเครื่อง โพรบที่ออกแบบเทียบกับการอบดิน

อันดับ	นน. ก่อนอบ	นน. หลังอบ	เปอร์เซ็นต์ความขึ้น	วัดได้
1	484.37	452.88	6.953	6
2	515.52	480.81	7.219	7
3	468.8	433.34	8.183	8
4	532.5	487.54	9.222	9
5	490.48	442.04	10.958	10
6	489.48	437.38	11.912	11
7	506.19	446.63	13.335	13
8	559.37	493.05	13.451	13
9	537.71	469.08	14.631	14

* นน. หมายถึง น้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการวัดด้วยโพรบที่ออกแบบ และ การคำนวณความชื้น

จากตารางที่ 4.4 เป็นการทดลองวัดความชื้นเทียบกันระหว่างใช้โพรบที่ออกแบบตรวจจับความชื้นในดิน กับใช้การอบดินตัวอย่างแล้วหาค่าความชื้นโดยน้ำหนักของดินตัวอย่างซึ่งจะเห็นว่ามีความผิดพลาดกันบ้าง เนื่องจากในการแสดงผลของเครื่องที่ออกแบบทดลองไม่สามารถแสดงจุดทศนิยมได้ ค่าความชื้นจริงกับค่าความชื้นที่วัดได้จึงแตกต่างกัน ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ และออกแบบโพรบสำหรับตรวจจับความชื้นในผิวดินโดยอาศัยหลักการที่ว่าเมื่อความชื้นในผิวดินเปลี่ยนแปลง จะส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าของผิวดินเปลี่ยนแปลงด้วย โดยโพรบที่ออกแบบจะใช้แผ่นตัวนำสองแผ่น (ซึ่งจะเลือกตัวนำที่ทำปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของดินน้อย และมีสภาพความนำไฟฟ้าสูง) วางคู่ขนานกันระยะห่างขนาด 2 เซนติเมตร ขนาดความลึกประมาณ 10 เซนติเมตร

ในการวิจัยนี้ได้ออกแบบส่วนของโพรบโดยอาศัยทองแดงจากแผ่น PCB เพื่อใช้เป็นตัวนำตรวจจับค่าชื้นในผิวดิน ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า หลักการดังกล่าวมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการตรวจจับความชื้นในผิวดินแต่ทั้งนี้คณะผู้วิจัยก็สังเกตเห็นถึงก็มีข้อจำกัด และมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ส่วนของตัวนำที่ใช้ในการทำโพรบ ผู้วิจัยได้เลือกตัวนำสามชนิด คือ ทองแดง ทองเหลือง และ สแตนเลส ตัวนำทั้งสามชนิดนี้ ทองแดงมีสภาพความนำไฟฟ้าดีที่สุด แต่เมื่อนำมาทดลองเทียบในผิวดิน หรือทิ้งไว้ในอากาศ ตัวนำทั้งสามจะทำปฏิกิริยากับดินหรือเกิดปรากฏการออกซิเดชัน ซึ่งทองแดง และ ทองเหลืองจะเกินขึ้นเขียวส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าของตัวนำลดลง ส่วนสแตนเลสจะไม่มีผลของออกซิเดชันมาเกี่ยวข้องแต่ทั้งนี้สแตนเลสจะมีความนำไฟฟ้าน้อย ทำให้การตรวจจับแรงดันเพื่อนำมาประมวลผลเป็นความชื้นทำได้ยากดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ทองแดงมาทำโพรบเพราะมีความนำไฟฟ้ามากที่สุด

2. การนำเอา PCB มาใช้ในการทำโพรบนั้นถึงแม้ว่าจะออกแบบให้มีลักษณะเหมือนกัน ขนาดเท่ากัน เมื่อพิจารณาเรื่องประจุไฟฟ้า และความต้านทานของโพรบจะมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นต้องมีการออกแบบวงจรบริดจ์ให้สามารถ Calibrate ให้บริดจ์อยู่ในสภาวะสมดุล

3. ส่วนของวงจรที่ใช้ในการตรวจจับ ถ้าใช้วงจรบริดจ์กระแสตรงจะมีผลทำให้โพรบทำปฏิกิริยากับผิวดินหรือทำให้เกิดขึ้นเขียวเร็วกว่าการใช้วงจรบริดจ์กระแสสลับ

จากผลการวิจัยจะเห็นได้ว่า Probe มีสมการเป็นสมการยกกำลัง $y = 8.8042x^{-0.2832}$ มีค่า $\% R^2 = 94.97$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในดินจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน หรือความนำไฟฟ้า 94.97 % และค่า $\% R^2$ นั้นเป็นตัวที่ทำให้เราทราบว่าปริมาณน้ำในดินมีผลต่อค่าความต้านทานหรือความนำไฟฟ้า ดังนั้น เมื่อความต้านทานในวงจรบริดจ์เปลี่ยนจะทำให้บริดจ์เข้าสู่สภาวะไม่สมดุล แรงดันที่วัดที่จุด output ของวงจรบริดจ์จะไม่เท่ากับ 0 แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองวัดความชื้นในดินด้วยโพรบที่ออกแบบนอกเหนือจากที่บันทึกในตารางที่ 3 ของบทที่ 4 จะมีค่าความผิดพลาดไปบ้างซึ่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอาจเป็นเนื่องมาจากวัสดุที่นำมาสร้าง Probe นั้นมีคุณสมบัติที่ทำปฏิกิริยากับดินเมื่อเสียบโพรบไว้ในดินนาน ๆ หรือเกิดการออกซิเดชันทำให้การนำไฟฟ้าของโพรบลดลงการตรวจจับจึงมีความผิดพลาด นอกจากนั้นยังมีปัจจัยอื่นอีก ที่ทำให้การวัดนั้นผิดพลาดได้ ไม่ว่าจะเป็น ความหนาแน่นของดิน ปริมาณน้ำที่ซึมลงสู่ดินไม่เท่ากัน อุณหภูมิขณะทำการวัด และปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่ทราบค่าแน่นอน ซึ่งต้องอาศัยการศึกษาและค้นคว้าเพิ่มเติม เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการปรับปรุงและคิดค้นหาวิธีที่เหมาะสมในการวัด

5.2 ข้อคิดเห็นเพิ่มเติม

เครื่องวัดความชื้น และโพรบที่ที่จัดสร้างขึ้นมา นี้ สามารถใช้กับตัวเซ็นเซอร์วัดความชื้นแบบที่สร้างขึ้นมาเพียงอย่างเดียวเท่านั้น การปรับปรุงเบื้องต้นเมื่อมีการออกแบบโพรบขึ้นมาใหม่อาจจะทำการ Calibrate ปรับปรุงแก้ไขในตัวโปรแกรมได้ โดยการวัดเทียบกับเครื่องมาตรฐานแล้วแก้ไขในตัวโปรแกรม ซึ่งจะง่ายกว่าแก้ไขในส่วนของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, “ปฐพีวิทยาเบื้องต้น”, คณะเกษตรมหาวิทาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2535
- [2] <http://www.environnet.in.th/evdb/info/soil/soil.html>
- [3] ชัยฤกษ์ สุวรรณรัตน์, “ความอุดมสมบูรณ์ของดิน”, ภาควิชาปฐพีวิทยา, คณะเกษตรมหาวิทาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2536
- [4] กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม (www.environnet.in.th)
- [5] ราตรี ภารา, “มูลนิธิโลกสีเขียว”, ม.ป.ป.: 10, 2538: 43
- [6] รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์, “การวัดและเครื่องวัดไฟฟ้า”, สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่ใช้ในการรับข้อมูลจากตัวโพรบเพื่อส่งข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์

```

/*
Filename      T_H_15.C
Description    SHT15 HUMIDITY & TEMPERATURE EXAMPLE PROGRAM
Hardware       START-C51
Clock          AT89S55 + 11.0592 MHz (Speed x2)
Compiler       Keil CA51 V7.0
Project        T_H_15.C + STARTC51.A51
Operate        Send data to RS232 use Terminal program (Hyper-Term,Telix,Netterm) on PC Baudrate = 9600
*/

#include <AT89s53.h>
#include <intrins.h>
#include <math.h>
#include <stdio.h>

typedef union
{
    unsigned int i;
    float f;
} value;

/***** modul-var *****/

enum {TEMP,HUMI};

#define DATA P1_1
#define SCK P1_0
#define noACK 0
#define ACK 1

//adr command r/w

#define STATUS_REG_W 0x06 //000 0011 0
#define STATUS_REG_R 0x07 //000 0011 1
#define MEASURE_TEMP 0x03 //000 0001 1
#define MEASURE_HUMI 0x05 //000 0010 1
#define RESET 0x1e //000 1111 0

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

***** writes a byte on the I2C-bus and checks the acknowledge *****/

```
char s_write_byte(unsigned char value)
```

```
{
    unsigned char i,error=0;
    for (i=0x80;i>0;i/=2)           //shift bit for masking
    { if (i &value) DATA=1;        //masking value with i , write to I2C-BUS
      else DATA=0;
      SCK=1;                        //clk for I2C-BUS
      _nop_();                      //pulswidth approx. 5 us
      _nop_();
      _nop_();
      _nop_();
      _nop_();
      _nop_();
      SCK=0;
    }
    DATA=1;                        //release DATA-line
    SCK=1;                          //clk #9 for ack
    error=DATA;                    //check ack (DATA will be pulled down by SHT11)
    SCK=0;
    return error;                  //error=1 in case of no acknowledge
}
```

***** reads a byte form the I2C-bus and gives an acknowledge in case of "ack=1" *****/

```
char s_read_byte(unsigned char ack)
```

```
{
    unsigned char i,val=0;
    DATA=1;                        //release DATA-line
    for (i=0x80;i>0;i/=2)           //shift bit for masking
    { SCK=1;                        //clk for I2C-BUS
      if (DATA) val=(val | i);      //read bit
      SCK=0;
    }
    DATA=!ack;                    //in case of "ack==1" pull down DATA-Line
    SCK=1;                          //clk #9 for ack
    _nop_();                        //pulswidth approx. 5 us
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

_nop_();
_nop_();
_nop_();
_nop_();
_nop_();
SCK=0;
DATA=1;           //release DATA-line
return val;
}

```

/***** generates a transmission start *****/

```
void s_transstart(void)
```

```

{
DATA=1; SCK=0;           //Initial state
_nop_();
SCK=1;
_nop_();
DATA=0;
_nop_();
SCK=0;
_nop_();
_nop_();
_nop_();
_nop_();
_nop_();
_nop_();
SCK=1;
_nop_();
DATA=1;
_nop_();
SCK=0;
}

```

/** communication reset: DATA-line=1 and at least 9 SCK cycles followed by transstart ***/

```
void s_connectionreset(void)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
  unsigned char i;
  DATA=1; SCK=0;          //Initial state
  for(i=0;i<9;i++)        //9 SCK cycles
  { SCK=1;
    SCK=0;
  }
  s_transstart();        //transmission start
}

/**reset the sensor by softreset*/
char s_softreset(void)
{
  unsigned char error=0;
  s_connectionreset();
  error+=s_write_byte(RESET);
  return error;
}

/**read the status register with checksum (8 bit)*/
char s_read_statusreg(unsigned char *p_value, unsigned char *p_checksum)
{
  unsigned char error=0;
  s_transstart();
  error=s_write_byte(STATUS_REG_R);
  *p_value=s_read_byte(ACK);
  *p_checksum=s_read_byte(noACK);
  return error;
}

/**writes the status register with checksum (8 bits)*/
char s_write_statusreg(unsigned char *p_value)
{
  unsigned char error=0;
  s_transstart();
  error+=s_write_byte(STATUS_REG_W);
  error+=s_write_byte(*p_value);
  return error;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

**** makes a measurement (humidity/temperature) with checksum ****/

char s_measure(unsigned char *p_value, unsigned char *p_checksum, unsigned char mode)
{
    unsigned error=0;
    unsigned int i;

    s_transstart();                //transmission start
    switch(mode){                  //send command to sensor
        case TEMP    : error+=s_write_byte(MEASURE_TEMP); break;
        case HUMI    : error+=s_write_byte(MEASURE_HUMI); break;
        default      : break;
    }

    for (i=0;i<65535;i++) if(DATA==0) break; //wait until sensor has finished the measurement
    if(DATA) error+=1;              // or timeout (~2 sec.) is reached
    *(p_value) =s_read_byte(ACK);    //read the first byte (MSB)
    *(p_value+1)=s_read_byte(ACK);   //read the second byte (LSB)
    *p_checksum =s_read_byte(noACK); //read checksum
    return error;
}

***** SET RS232 PARAMETER *****/

void init_uart()
{SCON = 0x52;           //9600 bps @ 11.059 MHz
  TMOD = 0x20;
  TCON = 0x69;
  TH1 = 0xfd;
  TL1 = 0xfd;
  TR1 = 1;
}

***** calculate humidity & temperature *****/

// input : humi [Ticks] (12 bit)
// temp [Ticks] (14 bit)
// output: humi [%RH]
// temp [°C]

void calc_sht11(float *p_humidity ,float *p_temperature)
{ const float C1=4.0;           // for 12 Bit

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

const float C2= 0.0405; // for 12 Bit
const float C3=-0.0000028; // for 12 Bit
const float T1=-0.01; // for 14 Bit
const float T2=0.00008; // for 14 Bit

float rh=*p_humidity; // rh: Humidity [Ticks] 12 Bit
float t=*p_temperature; // t: Temperature [Ticks] 14 Bit
float rh_lin; // rh_lin: Humidity linear
float rh_true; // rh_true: Temperature compensated humidity
float t_C; // t_C : Temperature [?C]

t_C=t*0.01 - 40; //calc. temperature from ticks to [?C]
rh_lin=C3*rh*rh + C2*rh + C1; //calc. humidity from ticks to [%RH]
rh_true=(t_C-25)*(T1+T2*rh)+rh_lin; //calc. temperature compensated humidity [%RH]

*p_temperature=t_C; //return temperature [?C]
*p_humidity=rh_true; //return humidity[%RH]
}

/***** calculate dewpoint *****/
// calculates dew point
// input: humidity [%RH], temperature [?C]
// output: dew point [?C]

float calc_dewpoint(float h,float t)
{ float logEx,dew_point;
logEx=0.66077+7.5*t/(237.3+t)+(log10(h)-2);
dew_point = (logEx - 0.66077)*237.3/(0.66077+7.5-logEx);
return dew_point;
}

/***** MAIN *****/
// sample program that shows how to use SHT11 functions
// connection reset
// measure humidity [ticks](12 bit) and temperature [ticks](14 bit)
// calculate humidity [%RH] and temperature [?C]

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// calculate dew point [°C]
// print temperature, humidity, dew point to rs232
void main()

{ value humi_val,temp_val;
  float dew_point;
  unsigned char error, checksum;
  unsigned int i;
  init_uart();
  s_connectionreset();
  while(1)
  {
    error=0;
    error+=s_measure((unsigned char*)& humi_val.i,&checksum,HUMI); //measure humidity
    error+=s_measure((unsigned char*)& temp_val.i,& checksum,TEMP); //measure temperature
    if(error!=0) s_connectionreset();
      else
      {
        humi_val.f=(float)humi_val.i; //converts integer to float
        temp_val.f=(float)temp_val.i; //converts integer to float
        calc_sht11(&humi_val.f,&temp_val.f); //calculate humidity, temperature
        dew_point=calc_dewpoint(humi_val.f,temp_val.f); //calculate dew point
        printf("temp:%5.1fC humi:%5.1f%% dew point:%5.1fC\n",temp_val.f,humi_val.f,dew_point);
      }
  }
  /*** wait approx 0.8s*/
  for(i=0;i<40000;i++);
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้