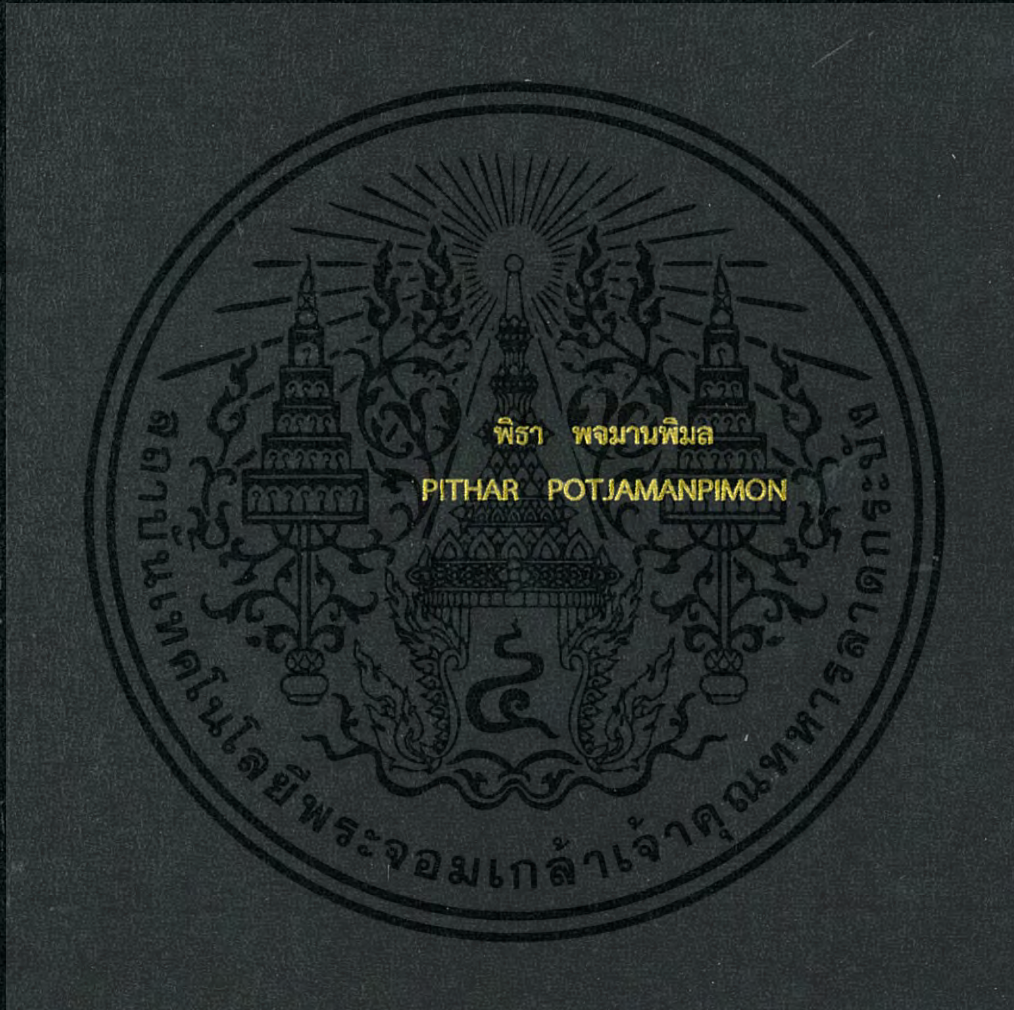


การหาความชื้นดินด้วยอัตราส่วนการหน่วงโดยใช้วิธี
การระบุเอกลักษณ์ของระบบ

MOISTURE MEASUREMENT BY DAMPING RATIO USING
SYSTEM IDENTIFICATION METHOD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-D-020-044

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การหาความชื้นดินด้วยอัตราส่วนการหน่วงโดยใช้วิธี
การระบุเอกลักษณ์ของระบบ

MOISTURE MEASUREMENT BY DAMPING RATIO USING
SYSTEM IDENTIFICATION METHOD



T148804

พิธา พจมานพิมล
PITHAR POTJAMANPIMON

เลขหมู่ 148804
เลขทะเบียน
ในเดือนปี 23 พ.อ. 2560

00267620

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-020-044

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MOISTURE MEASUREMENT BY DAMPING RATIO USING
SYSTEM IDENTIFICATION METHOD



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017
KMITL-2017-EN-M-020-044

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

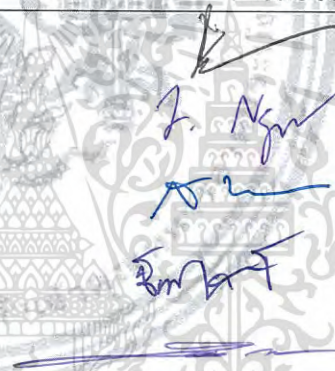
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การหาความชื้นดินด้วยอัตราส่วนการหน่วงโดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ
Thesis Title Moisture Measurement by Damping Ratio Using System Identification Method
นักศึกษา นายพิธา พจมานพิมล
รหัสประจำตัว 58601257
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-044

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วุฒิมิพล	ธราธิ์เรศษรฐ์	
ศ.ดร.อิสระชัย	งามหรุ	
รศ.ดร.สมยศ	เกียรติวินชวิไล	
ผศ.ดร.ชัยยันต์	เจตนาเสน	
ผศ.ดร.วรชาติ	สุวรรณงาม	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

ณบตี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
วันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2560
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาความขึ้นดินด้วยอัตราส่วนการหน่วงโดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ
นักศึกษา	นายพิธา พจมานพิมล
รหัสประจำตัว	58601257
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)	รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จะเสนอการพัฒนาเทคนิคการวัดความขึ้นดินโดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (system identification) และนำไปสร้างเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) เพื่อใช้หาค่าพารามิเตอร์ทางพลศาสตร์ ได้แก่ เวลาขาขึ้น (rise time) และอัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) เมื่อความขึ้นดินเปลี่ยนไป การทดลองจะทำการป้อนสัญญาณพัลส์ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 500 กิโลเฮิร์ตซ์เข้าไปในดินผ่านอิเล็กโทรดโลหะ โดยพิจารณาให้ดินเป็นส่วนประกอบหนึ่งในวงจรสมมูลของวงจรอนุกรมอันดับสอง จากการทดลองพบว่า คุณสมบัติทางไฟฟ้าและผลตอบสนองของระบบจะขึ้นอยู่กับค่าความขึ้นในดินด้วย นอกจากนี้อัตราส่วนการหน่วงเป็นค่าที่ดีที่สุดที่นำไปประมาณค่าฟังก์ชันความสัมพันธ์กับความขึ้นดินเพื่อใช้ในการทำนายต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Moisture Measurement by damping ratio using system identification method
Student	Mr.Pithar Potjamanpimon
Student ID.	58601257
Degree	Master Degree of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Warachart Suwan-ngam
Thesis Co-advisor	Assoc.Prof.Dr.Somyot Kiatwanidvilai

Abstract

This research proposes a new technique for measuring soil moisture by using the system identification method to formulate the transfer function. The dynamic parameters such as rise time and damping ratio varying by changing in soil moisture were evaluated. In the experiment, the pulses with 1 kHz, 100 kHz and 500 kHz were fed into the soil via the metal electrode; in the proposed technique, the soil is considered as a component in second order series circuit. As result indicated, the electrical properties and system response are depended on the moisture in the soil. In addition, the damping ratio is the best parameter for approximating the prediction function of the soil moisture.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเป็นอย่างดีได้ด้วยการชี้แนะคำปรึกษาและการเอาใจใส่เป็นอย่างดีจาก ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้า รู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่าน

ขอขอบคุณเงินทุนงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก กองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หมายเลขทุนวิจัย KREF055706

ขอขอบคุณเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการ ECC305 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคนที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาต่างๆที่ดี รวมถึงคอยให้กำลังใจในเวลาที่เราเจออุปสรรคต่างๆ

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณพระคุณของบิดา มารดา ที่คอยเป็นทุกสิ่งทุกอย่างคอยให้คำปรึกษาที่ดีมา โดยตลอด เป็นผู้สนับสนุนทุกสิ่งแก่ผู้จัดทำ

พิธา พจมานพิมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ	10
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	10
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	13
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	13
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	13
1.5 แผนการดำเนินโครงการ.....	14
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
2.1 ความชื้นในดิน.....	15
2.1.1 ระดับความชื้นที่สำคัญของดิน	15
2.1.2 ระดับความชื้นที่สำคัญของดิน	16
2.1.3 การตรวจวัดความชื้นในดิน	17
2.2 แบบจำลองวงจรรดับสองของดิน	18
2.3 การสร้างฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function).....	19
2.4 สมรรถนะเชิงเวลาของระบบอันดับสอง	20
2.5 เทคนิคการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification).....	23
บทที่ 3 การออกแบบและการหาฟังก์ชันถ่ายโอน	28
3.1 ชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	28
3.1.1 การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ	28
3.1.2 โพรบแสดนเลส.....	29
3.1.3 การออกแบบวงจรจริงในการทดลอง	29
3.1.4 บอร์ดประมวลผล (Arduino UNO).....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.5 โมดูล MicroSD Card Adapter (Catalex).....	31
3.2 วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification).....	31
3.2.1 ขั้นตอนการบันทึกข้อมูลกราฟสัญญาณ	31
3.2.2 การประมวลผลด้วยทฤษฎีการหาพารามิเตอร์ระบบ (System identification).....	32
3.3 สมรรถนะเชิงเวลาของระบบอันดับสอง	39
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	40
4.1 ความชื้น 0% (w/w)	40
4.1.1 กราฟอินพุตและเอาต์พุตที่ความชื้นดิน 0% (w/w).....	40
4.1.2 ตารางแสดงค่าที่วัดได้ที่ความชื้นดิน 0% (w/w)	41
4.2 ความชื้น 10% (w/w) ; เติมน้ำ 15 มิลลิลิตร	43
4.2.1 กราฟอินพุตและเอาต์พุตที่ความชื้นดิน 10% (w/w)	43
4.2.2 ตารางแสดงค่าที่วัดได้ที่ความชื้นดิน 10% (w/w) ; เติมน้ำ 15 มิลลิลิตร	44
4.3 ความชื้น 20% (w/w) ; เติมน้ำ 30 มิลลิลิตร	46
4.3.1 กราฟอินพุตแล้วเอาต์พุตที่ความชื้นดิน 20% (w/w)	46
4.3.2 ตารางแสดงค่าที่วัดได้ที่ความชื้นดิน 20% (w/w) ; เติมน้ำ 30 มิลลิลิตร	47
4.4 ความชื้น 30% (w/w) ; เติมน้ำ 45 มิลลิลิตร	49
4.4.1 กราฟอินพุตแล้วเอาต์พุตที่ความชื้นดิน 30% (w/w)	49
4.4.2 ตารางแสดงค่าที่วัดได้ที่ความชื้นดิน 30% (w/w) ; เติมน้ำ 45 มิลลิลิตร	50
4.5 ความชื้น 40% (w/w) ; เติมน้ำ 60 มิลลิลิตร	52
4.5.1 กราฟอินพุตแล้วเอาต์พุตที่ความชื้นดิน 40% (w/w)	52
4.5.2 ตารางแสดงค่าที่วัดได้ที่ความชื้นดิน 40% (w/w) ; เติมน้ำ 60 มิลลิลิตร	53
4.6 ความชื้น 50% (w/w) ; เติมน้ำ 75 มิลลิลิตร	55
4.6.1 กราฟอินพุตแล้วเอาต์พุตที่ความชื้นดิน 50% (w/w)	55
4.6.2 ตารางแสดงค่าที่วัดได้ที่ความชื้นดิน 50% (w/w) ; เติมน้ำ 75 มิลลิลิตร	56
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นดินกับเวลาขาขึ้นและอัตราส่วนการหน่วง	58
4.8 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล	61
4.9 เปรียบเทียบความชื้นดินที่ได้จากวิธีการหาเอกลักษณ์ระบบกับเครื่องวัดความชื้นดิน Nap.NPK.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	65
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	65
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	66
เอกสารอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก.....	69
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการ.....	70
ประวัติผู้เขียน.....	79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง อัตราการห้วงและเวลาขาขึ้นที่ความชัน 0%.....	41
4.2 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง อัตราการห้วงและเวลาขาขึ้นที่ความชัน 10%.....	44
4.3 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง อัตราการห้วงและเวลาขาขึ้นที่ความชัน 20%.....	47
4.4 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง อัตราการห้วงและเวลาขาขึ้นที่ความชัน 30%	50
4.5 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง อัตราการห้วงและเวลาขาขึ้นที่ความชัน 40%	53
4.6 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง อัตราการห้วงและเวลาขาขึ้นที่ความชัน 50%	56
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชันดินกับเวลาขาขึ้นและอัตราส่วนการห้วง.....	58
4.8 แสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการห้วงในแต่ละความถี่.....	61
4.9 แสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวลาขาขึ้นในแต่ละความถี่.....	61
4.10 เปรียบเทียบค่าความชันดินที่วัดได้จากวิธีการหาเอกลักษณ์ของระบบกับเครื่องวัดความชันดิน Nap.NPK.....	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แท่งวัดความชื้น	10
1.2 แสดงองค์ประกอบของ เทนซิโอมิเตอร์	11
1.3 เครื่องมือวัดการแผ่รังสีนิวตรอน	12
2.1 วงจรอนุกรมอันดับสอง	18
2.2 ผลตอบสนองของระบบแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย	21
2.3 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลอง OE	24
2.4 เวกเตอร์ของค่าเอาต์พุตและค่าความผิดพลาดใน Column space ของ ϕ^T	27
3.1 ตัวเหนี่ยวนำในวงจร	28
3.2 โพรบแอสแตนเลสที่ใช้วัดความชื้น	29
3.3 วงจรอนุกรมอันดับสอง	29
3.4 Arduino UNO R3	30
3.5 MicroSD Card Adapter	31
3.6 วงจรที่พัฒนาขึ้นใช้ในการทดลอง	32
3.7 นำข้อมูลเข้ามาในโปรแกรม MATLAB	34
3.8 หน้าต่างเมนูของเครื่องมือการหาพารามิเตอร์ระบบในโปรแกรม MATLAB	34
3.9 วิธีการกำหนดค่าต่างๆใน System Identification Toolbox	35
3.10 วิธีการกำหนดค่าต่างๆใน System Identification Toolbox (ต่อ)	37
3.11 Output Signal และเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง	38
3.12 ค่าของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ผ่านการหาพารามิเตอร์ของระบบ	38
4.1 กราฟสัญญาณอินพุต,เอาต์พุตที่ความชื้นดิน 0% (w/w)	40
4.2 แสดงผลตอบสนองทางเวลาเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากการคำนวณ	42
4.3 กราฟสัญญาณอินพุต,เอาต์พุตที่ความชื้นดิน 10% (w/w)	43
4.4 แสดงผลตอบสนองทางเวลาเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากการคำนวณ	45
4.5 กราฟสัญญาณอินพุต,เอาต์พุตที่ความชื้นดิน 20% (w/w)	46
4.6 แสดงผลตอบสนองทางเวลาเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากการคำนวณ	48
4.7 กราฟสัญญาณอินพุต,เอาต์พุตที่ความชื้นดิน 30% (w/w)	49
4.8 แสดงผลตอบสนองทางเวลาเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากการคำนวณ	51
4.9 กราฟสัญญาณอินพุต,เอาต์พุตที่ความชื้นดิน 40% (w/w)	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 แสดงผลตอบสนองทางเวลาเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากการคำนวณ	54
4.11 กราฟสัญญาณอินพุต,เอาต์พุตที่ความขึ้นดิน 40% (w/w).....	55
4.12 แสดงผลตอบสนองทางเวลาเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากการคำนวณ	57
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขึ้นดินกับเวลาขาขึ้น	59
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขึ้นดินกับอัตราการแห้ง	60
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนเปียกเบนมาตรฐานของอัตราการแห้งกับความขึ้น	62
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนเปียกเบนมาตรฐานของเวลาขาขึ้นกับความขึ้น	63
5.1 แสดงผลตอบสนองที่เปลี่ยนไปเมื่อความขึ้นดินเปลี่ยนไป.....	65



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบัน น้ำมีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชทุกชนิด น้ำยังเป็นปัจจัยสำคัญในการปรับอุณหภูมิในดินและลำต้นให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสม ไม่สูงมากจนเกินไปในเวลากลางวัน นอกจากนี้ยังเป็นตัวกลางในการลำเลียงสารอาหารไปยังส่วนต่างๆของพืช และช่วยให้รักษาสมดุลความเป็นกรด-ด่างและทำให้ความเค็มของดินมีค่าลดลงได้ การรดน้ำให้แก่พืชจึงควรคำนึงถึงเวลาที่พืชต้องการรวมไปถึงหากพืชขาดน้ำนานๆ จะเป็นผลเสียต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ การพิจารณาหาค่าความชื้นดินสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป โดยปัจจุบันเครื่องมือที่ใช้วัดความชื้นในดินที่มีอยู่ในปัจจุบันมีด้วยกันหลายชนิด อาทิเช่น



รูปที่ 1.1 แท่งวัดความชื้น

ก.แท่งวัดความชื้น [1] (Moisture block) หลักการทำงานของแท่งวัดความชื้น คือ อาศัยการวัดเอกสควมที่สามารถในการนำไฟฟ้าของตัวกลางในการนำไฟฟ้าโดยจะพิจารณาให้อยู่ในรูปความต้านทานค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้า ซึ่งตัวกลางในการนำไฟฟ้าจะทำมาจากวัสดุที่สามารถดูดซึมความชื้นได้ เช่น แทงยิบซัม เป็นต้น โดยจะอาศัยความชื้นของดินที่จะทำให้ตัวกลางการนำไฟฟ้าได้รับความชื้น เมื่อดินมีความชื้นมากจะส่งผลให้ตัวกลางมีความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและมีความต้านทานลดลง ในทางกลับกัน เมื่อดินมีความชื้นน้อยจะส่งผลให้ตัวกลางมีความนำไฟฟ้าลดลงและมีความต้านทานเพิ่มขึ้นโดยการวัดด้วยวิธีนี้จะใช้เวลามากกว่าในการวัดความชื้นดินแต่ละครั้ง

ข. เทนซิโอมิเตอร์[2] (Tensiometer) เป็นอีกวิธีหนึ่งโดยอาศัยอุปกรณ์ที่ใช้วัดความชื้นของดิน จะมีลักษณะเป็นท่อพลาสติกปลายด้านล่างจะเป็นกระเปาะเซรามิก ซึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุนและด้านบนจะมี Vacuum gauge เอาไว้วัดค่าความดันสุญญากาศ หลักการทำงานคือ ระบบมีการเติมน้ำลงไป ในหลอดพลาสติกให้เต็ม หลังจากนั้นจะเอาตัวเทนซิโอมิเตอร์ไปเสียบในดินที่ต้องการวัด หากพบดินที่มีความชื้นต่ำจะทำให้ น้ำที่อยู่ในเทนซิโอมิเตอร์ค่อยๆ แพร่ออกมาผ่านตัวกระเปาะเซรามิกส่งผลให้ระดับน้ำในท่อพลาสติกลดลงจึงทำให้เกิดความดันสุญญากาศขึ้นบริเวณด้านบนของท่อพลาสติกทำให้ Vacuum gauge วัดความดันสุญญากาศได้สูง ในทางกลับกัน ถ้านำเทนซิโอมิเตอร์ไปเสียบในดินที่มีความชื้นสูงจะทำให้ น้ำที่อยู่ในดินค่อยๆ แพร่เข้าไปในท่อพลาสติกผ่านตัวกระเปาะเซรามิกส่งผลให้ระดับน้ำในท่อพลาสติกสูงขึ้นจึงทำให้ไม่มีความดันสุญญากาศ ทำให้ Vacuum gauge วัดความดันสุญญากาศได้ต่ำ



รูปที่ 1.2 แสดงองค์ประกอบของ เทนซิโอมิเตอร์

ค. เครื่องมือวัดการแผ่รังสีนิวตรอน [3] (Neutron moisture gauge) ลักษณะภายนอกจะเป็นกล่องและจะมีท่อลูมิเนียมเสียบลงไป ในดินภายในกล่องซึ่งบรรจุอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ผลิตรังสีนิวตรอนที่มีพลังงานและความเร็วสูง และทำการยิงนิวตรอนลงไป ในดิน จากนั้นนิวตรอนจะไปชนกับไฮโดรเจนที่อยู่ในโมเลกุลของน้ำและทำให้นิวตรอนสูญเสียพลังงานไป โดยจำนวนของนิวตรอนที่สูญเสีย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานจะมีความสัมพันธ์กับความชื้นในดิน หากดินมีความชื้นมากจำนวนนิวตรอนที่สูญเสียพลังงานก็จะมาก ในทางกลับกันถ้าดินมีความชื้นน้อยจำนวนนิวตรอนที่สูญเสียพลังงานจะมีจำนวนน้อยเช่นกัน



รูปที่ 1.3 เครื่องมือวัดการแผ่รังสีนิวตรอน

ง. เกจวัดแบบทีดีอาร์ [4] (TDR sensor) ลักษณะการทำงานของทีดีอาร์คือวัดเวลาในการสะท้อนของสัญญาณพัลส์ในความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งจะเป็นความถี่สูงมาก เมื่อสัญญาณไปกระทบกับโมเลกุลน้ำจะสะท้อนสัญญาณกลับมาอย่างรวดเร็วที่หน้าผิวที่วัดระดับสัญญาณ โดยจะเปรียบเสมือนว่าน้ำในดินมีความสามารถในการนำสนามไฟฟ้าเชิงซ้อนจึงทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณ[5] โดยหลักการถ้าไปวัดในดินที่มีความชื้นสูงจะทำให้ได้เวลาในการตอบสนองสั้น แต่ในทางกลับกันถ้าเป็นดินที่ความชื้นต่ำจะได้เวลาในการตอบสนองช้าลง

ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแนวคิดในการวัดความชื้นดินโดยพิจารณาจากอัตราส่วนการหน่วงของผลตอบสนอง ที่คำนวณมาจากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ โดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนในแต่ละค่าความชื้น [6]เนื่องจากในดินมีคุณสมบัติคล้ายตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ จึงสมมติฐานได้ว่าเมื่อดินมีความชื้นเปลี่ยนแปลงจะส่งผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของดินเปลี่ยนไป และเมื่ออิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของดินเปลี่ยนก็จะส่งผลให้ฟังก์ชันเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวางนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่ายโอนเปลี่ยนไปในแต่ละความถี่ นั่นก็หมายความว่าอัตราส่วนการหน่วงและเวลาขาขึ้นที่หามาได้ ในแต่ละความถี่ก็จะมีค่าเปลี่ยนไปเช่นกัน

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบการวัดความถี่ดินทฤษฎีใหม่
- 1.2.2 ศึกษาและสามารถวัดความถี่ดินโดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ
- 1.2.3 ศึกษาแนวโน้มของผลตอบสนองทางเวลากับค่าความถี่ดินที่เปลี่ยนไป
- 1.2.4 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ดินกับอัตราส่วนการหน่วงและเวลาขาขึ้นของผลตอบสนองทางเวลา พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพ
- 1.2.5 สามารถทำนายค่าความถี่ได้จากค่าพารามิเตอร์ที่หามาได้

1.3 สมมติฐานการวิจัย

จากข้อมูลที่ได้ศึกษาเรื่องสมบัติทางไฟฟ้าของดินและการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ จึงเห็นความเป็นไปได้ในการให้วงจรอนุกรมอันดับสอง เป็นวงจรสมมูลในการวัดความถี่ดิน เนื่องจากดินมีสมบัติที่คล้ายกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ดังนั้นถ้าเราเพิ่มตัวเหนี่ยวนำเข้าไปในระบบ ก็จะทำให้เป็นวงจรอนุกรมอันดับสองได้ โดยสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่สูงและวัดสัญญาณเอาต์พุตคร่อมดิน และเมื่อสมบัติทางไฟฟ้าของดินเปลี่ยนไปก็จะส่งผลให้ผลตอบสนองเชิงเวลาและฟังก์ชันถ่ายโอนเปลี่ยนไป

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาวงจรอนุกรมอันดับสอง RLC เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบโดยใช้กฎของแรงดันไฟฟ้าเคอร์ชอฟฟ์
- 1.4.2 ศึกษารูปแบบต่างๆและวิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ
- 1.4.3 ศึกษาการใช้ Arduino Uno R3 และ Micro sd card module
- 1.4.4 ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

1.5.1 ศึกษาหาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางไฟฟ้าของดินและวิธีการวัดความชื้นในดิน

1.5.2 ศึกษาและจำลองวงจรอนุกรมอันดับสองที่ใช้กับดิน

1.5.3 สร้างวงจรสมมูลอนุกรมอันดับสองกับดินที่เตรียมไว้

1.5.4 ทำการทดลองเก็บข้อมูลที่ได้จากการยิงสัญญาณผ่านดิน

1.5.5 นำข้อมูลเข้าที่ได้โปรแกรม MATLAB เพื่อฟังก์ชันถ่ายโอน

1.5.6 สร้างวงจร sampling ข้อมูลเพื่อรับค่าเข้า MATLAB

1.5.7 สรุปผลงานและนำเสนอโครงการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัยและวิธีการวัดความชื้นแบบต่างๆ วัตถุประสงค์ สมมติฐาน ขอบเขตในงานวิจัย และ ขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการวัดความชื้นดิน แบบจำลองและวิธีการสร้าง ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรอนุกรมอันดับสอง สมรรถนะเชิงเวลาของระบบอันดับสอง และเทคนิคการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification)

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบวงจรสมมูลที่ใช้ในการวัดความชื้น การออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ เพื่อให้เป็นวงจรอนุกรมอันดับ 2 และขั้นตอนในการระบุเอกลักษณ์ของระบบรวมถึงการหาค่าเวลา ขาขึ้น

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองในแต่ละค่าความชื้น จะพูดถึงฟังก์ชันถ่ายโอนและค่าความ ถูกต้องที่ได้จากการประมาณ รวมไปถึง อัตราการหน่วง และเวลาขาขึ้นของผลตอบสนองเชิงเวลาใน แต่ละความชื้น

บทที่ 5 บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความชื้นในดิน[7]

ความชื้นในดินเป็นสัดส่วนระหว่างมวลของน้ำในดินกับมวลของดินแห้ง การวัดความชื้นในดินช่วยบอกสภาพของดินที่อยู่ในบริเวณระบบนิเวศนั้น และยังใช้อธิบายความสามารถของดินในการให้ธาตุอาหารและน้ำสู่พืชซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตและการอยู่รอดของพืช ความชื้นของดินประกอบด้วย 2 สถานะ คือ สถานะที่เป็นของเหลว เราเรียกว่า น้ำในดิน และสถานะที่เป็นก๊าซ เราเรียกว่า ไอน้ำในดิน ในประเทศที่มีอากาศหนาวจัด ความชื้นของดินอาจจะอยู่ในรูปของน้ำแข็ง ส่วนประเทศในเขตร้อน ส่วนใหญ่น้ำในดินจะอยู่ในรูปของของเหลว ดังนั้นความชื้นของดิน กับน้ำในดินจึงมีความหมายเดียวกัน คือ ส่วนที่อยู่ในสถานะที่เป็นของเหลว ถ้าในส่วนของช่องว่างในดินมีน้ำอยู่เต็มไม่มีก๊าซอยู่เลยเรียกว่า ดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated soil) แต่ถ้าในช่องว่างของดินมีทั้งน้ำและก๊าซอยู่ด้วยเรียกว่า ดินที่ไม่อิ่มตัว (unsaturated soil) ดังนั้น ดินที่ใช้ในการทำการเกษตรส่วนใหญ่คือดินที่ไม่อิ่มตัว ความชื้นในดินมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับสิ่งมีชีวิตในดิน ได้แก่ สัตว์ พืช หรือจุลินทรีย์ เนื่องจากน้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของพืชและสัตว์ เพื่อใช้ในขบวนการเมแทบอลิซึม (metabolism) ต่าง ๆ เช่น ขบวนการสังเคราะห์แสงของพืชและจุลินทรีย์ในดินบางชนิด พืชสามารถที่จะนำเอาธาตุอาหารไปใช้ได้ ธาตุอาหารเหล่านั้นจะต้องอยู่ในรูปของสารละลาย น้ำเป็นตัวทำละลายที่ดีและมีปริมาณมาก หาได้ง่ายและสะดวก น้ำเป็นตัวกลางที่ดีในการเคลื่อนย้ายไอออนจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่ง อีกทั้งยังลำเลียงธาตุอาหารที่อยู่ในรูปของไอออนจากดินเข้าสู่ภายในลำต้นของพืช และเข้าไปในจุลินทรีย์ นอกจากนี้น้ำยังมีความร้อนจำเพาะ และความร้อนแฝงที่สูง ทำให้เปลี่ยนอุณหภูมิได้ยาก ทำให้น้ำในดินมีอุณหภูมิไม่สูงหรือต่ำจนเกินไป ทำให้ดินมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช

2.1.1 ระดับความชื้นที่สำคัญของดิน

1.ระดับความชื้นที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (water saturated) คือปริมาณน้ำในดินที่เกิดขึ้นเมื่อช่องว่างระหว่างเม็ดดินทั้งหมดถูกแทนที่ด้วยน้ำ ถ้าดินมีความสามารถในการระบายน้ำได้ดี ปริมาณน้ำที่อยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความชื้นชลประทานหรือความจุความชื้นในสนาม (Field Capacity) หมายถึง ความชื้นของดินที่เหลืออยู่ในดินหลังจากที่น้ำอิสระได้ถูกระบายออกไปจากช่องว่างหมดแล้ว หรือเป็นปริมาณน้ำที่ดินสามารถดูดซับไว้ได้มากที่สุดโดยไม่ไหลลงสู่ด้านล่างตามแรงโน้มถ่วงของโลก น้ำในช่องว่างขนาดเล็กจะมีน้ำขังอยู่เต็ม ส่วนช่องว่างขนาดใหญ่จะมีอากาศอยู่เต็ม

การวัดค่าความชื้นที่ Field Capacity โดยตรงค่อนข้างจะยุ่งยากและไม่สะดวก ในทางปฏิบัติมักจะถือว่า ในดินที่มีการระบายน้ำได้ดี ปริมาณความชื้นหลังจากที่มีฝนตกหนักหรือหยุดให้น้ำแล้ว 2-3 วัน เป็นความชื้นที่ Field Capacity

3. ความชื้นที่จุดเหี่ยวเฉาถาวร (Permanent wilting point) คือความชื้นในดินเมื่อพืชไม่สามารถนำมาใช้ให้เพียงพอกับการคายน้ำและพืชเริ่มมีอาการเหี่ยวเฉาอย่างถาวร อาการเหี่ยวเฉาของพืชนั้นขึ้นอยู่กับหลายๆปัจจัย เช่น สภาพอากาศที่ร้อนจัด ความชื้นของอากาศต่ำ ลมแรง พืชมีใบกว้าง ที่กล่าวมานี้จะทำให้พืชมีการสูญเสียน้ำโดยการคายน้ำออกทางใบมาก และเมื่ออัตราที่พืชดูดน้ำจากดินน้อยกว่าที่คายน้ำออกทางใบพืชก็จะเหี่ยวเฉา ถึงแม้ว่าดินจะมีความชื้นอยู่มากก็ตาม

4. ระดับความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Available moisture content) คือผลต่างระหว่างความชื้นของดินในขณะหนึ่งกับความชื้นที่จุดเหี่ยวเฉาเป็นสิ่งที่แสดงถึงปริมาณความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของดินในขณะนั้น

2.1.2 ระดับความชื้นที่สำคัญของดิน

1. ระดับความชื้นที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (water saturated) คือปริมาณน้ำในดินที่เกิดขึ้นเมื่อช่องว่างระหว่างเม็ดดินทั้งหมดถูกแทนที่ด้วยน้ำ ถ้าดินมีความสามารถในการระบายน้ำได้ดี ปริมาณน้ำที่อยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกได้ง่าย

2. ความชื้นชลประทานหรือความจุความชื้นในสนาม (Field Capacity) หมายถึง ความชื้นของดินที่เหลืออยู่ในดินหลังจากที่น้ำอิสระได้ถูกระบายออกไปจากช่องว่างหมดแล้ว หรือเป็นปริมาณน้ำที่ดินสามารถดูดซับไว้ได้มากที่สุดโดยไม่ไหลลงสู่ด้านล่างตามแรงโน้มถ่วงของโลก น้ำในช่องว่างขนาดเล็กจะมีน้ำขังอยู่เต็ม ส่วนช่องว่างขนาดใหญ่จะมีอากาศอยู่เต็ม

การวัดค่าความชื้นที่ Field Capacity โดยตรงค่อนข้างจะยุ่งยากและไม่สะดวก ในทางปฏิบัติมักจะถือว่า ในดินที่มีการระบายน้ำได้ดี ปริมาณความชื้นหลังจากที่มีฝนตกหนักหรือหยุดให้น้ำแล้ว 2-3 วัน เป็นความชื้นที่ Field Capacity

3. ความชื้นที่จุดเหี่ยวเฉาถาวร (Permanent wilting point) คือความชื้นในดินเมื่อพืชไม่สามารถนำมาใช้ให้เพียงพอกับการคายน้ำและพืชเริ่มมีอาการเหี่ยวเฉาอย่างถาวร อาการเหี่ยวเฉาของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พืชนั้นขึ้นอยู่กับหลายๆปัจจัย เช่น สภาพอากาศที่ร้อนจัด ความชื้นของอากาศต่ำ ลมแรง พืชมีใบกว้าง ที่กล่าวมานี้จะทำให้พืชมีการสูญเสียน้ำโดยการคายน้ำออกทางใบมาก และเมื่ออัตราที่พืชดูดน้ำจากดินน้อยกว่าที่คายน้ำออกทางใบพืชก็จะเหี่ยวเฉา ถึงแม้ว่าดินจะมีความชื้นอยู่มากก็ตาม

4. ระดับความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Available moisture content) คือผลต่างระหว่างความชื้นของดินในขณะหนึ่งกับความชื้นที่จุดเหี่ยวเฉาเป็นสิ่งที่แสดงถึงปริมาณความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของดินในขณะนั้น

2.1.3 การตรวจวัดความชื้นในดิน [8]

การให้น้ำแก่พืชจะต้องเริ่มทำเมื่อความชื้นของดินลดลงเหลือน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความจุความชื้นที่เป็นประโยชน์ต่อพืช แต่ต้องไม่ต่ำกว่าความชื้นที่จุดวิกฤตหรือต่ำกว่า 25% ของความจุความชื้นที่เป็นประโยชน์ต่อพืช โดยเราจะต้องทราบค่าความชื้นที่ Field Capacity และความชื้นที่จุดเหี่ยวเฉาถาวร วิธีการหาความชื้นในดินทำได้ 3 วิธีคือ

1. การวัดความชื้นในดินโดยตรงจากการชั่งน้ำหนักและอบแห้ง

การตรวจวัดความชื้นของดินโดยการชั่งน้ำหนัก ทำได้โดยการเก็บตัวอย่างดินที่มีระดับความลึกต่างๆในเขตรากพืชและที่จุดต่างๆในแปลงเพาะปลูก บรรจุดินตัวอย่างในกระป๋องเก็บตัวอย่างซึ่งมีฝาปิดมิดชิด นำมาชั่งน้ำหนักแล้วอบให้แห้งในเตาอบซึ่งมีอุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือจนกว่าดินนั้นจะแห้งทั่วถึงกัน ตัวอย่างดินที่เก็บควรจะมีน้ำหนักไม่น้อยกว่า 100 กรัม น้ำหนักที่หายไปหลังจากที่อบให้แห้งแล้วก็คือ น้ำหนักของน้ำที่อยู่ในดิน การหาจำนวนความชื้นในดินอาจทำได้ 2 แบบ คือ คำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของดินอบแห้ง และเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

เปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยน้ำหนัก เหมาะสำหรับการหาจำนวนความชื้นเมื่อไม่ทราบปริมาตรของดินตัวอย่าง การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยน้ำหนักทำได้โดยใช้สมการ

$$P_w = (W_w / W_s) \times 100 \quad (2.1)$$

เมื่อ P_w = เปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยเทียบกับน้ำหนักของดินแห้ง

W_w = น้ำหนักของน้ำในดิน

W_s = น้ำหนักของดินที่อบให้แห้งด้วยเตาอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

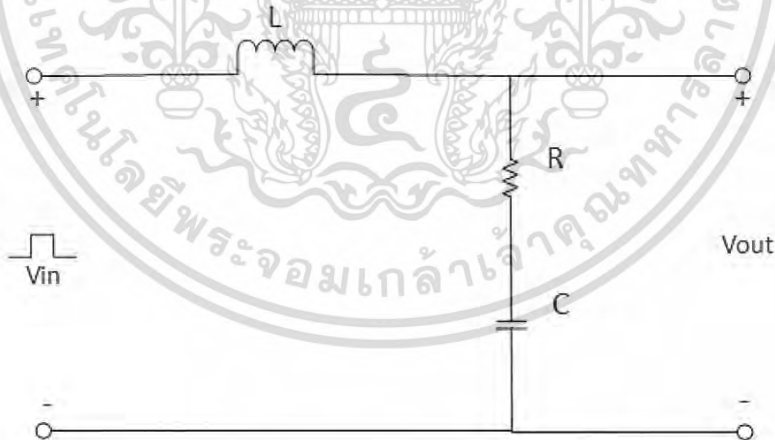
2. การวัดความชื้นในดินโดยทางอ้อมโดยใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์

เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้หาค่าความชื้นในดินจะทำให้ทราบค่าความชื้นในดินได้โดยทันที ที่วัด มีอยู่หลายชนิด เช่น เครื่องเทนซิโอมิเตอร์(tensiometer) เครื่องวัดความชื้นด้วยไฟฟ้า(Electrical resistance instruments) เครื่องวัดความชื้นแบบวัดการแผ่กระจายของนิวตรอน(Neutron moisture meter) เป็นต้น

3. การวัดความชื้นในดินโดยดูลักษณะและความรู้สึกสัมผัส

วิธีนี้เป็นวิธีการตรวจวัดความชื้นในดินอย่างง่าย รวดเร็วและสามารถทำได้ด้วยตนเอง ไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบ ตรวจสอบโดยการขุดเจาะดินด้วยสว่านเจาะดินหรือใช้พลั่วขุดดินที่ระดับความลึกต่างๆในเขตรากพืชและบริเวณแปลงเพาะปลูกจุดอื่นๆที่ต้องการทราบ ตรวจสอบดูโดยใช้ความรู้สึกจากการสัมผัสด้วยมือ ทำให้ทราบค่าความชื้นของดินโดยประมาณว่ามีค่าความชื้นในดินเหลือสำหรับพืชเท่าใด ถ้ามีความชำนาญก็จะสามารถบอกได้ทันทีว่าดินในขณะนั้นควรจะเริ่มให้น้ำได้หรือยัง อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้เป็นเพียงการประมาณค่าความชื้นของดินเท่านั้น แต่ก็สามารถกำหนดการให้น้ำแก่พืชได้พอสมควร

2.2 แบบจำลองวงจรอันดับสองของดิน



รูปที่ 2.1 วงจรอนุกรมอันดับสอง

จากเอกสารอ้างอิงหมายเลข 9 ได้กล่าวถึงคุณสมบัติของดินซึ่งโดยทั่วไปจะมีน้ำและแร่ธาตุต่างๆ เป็นส่วนประกอบหลัก ดังนั้นเมื่อให้ดินเป็นตัวกลางในการนำไฟฟ้าจะทำให้มีคุณสมบัติคล้ายกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ เนื่องจากน้ำมีคุณสมบัติเป็นตัวนำและมีความซึมซับสนามไฟฟ้า โดยที่ จะโมเดลความชื้นในดินเป็นค่าความซึมซับสนามไฟฟ้าเชิงซ้อน(ϵ_c) ซึ่งจะได้สมการที่ 2.2 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีสืบค้นจากเว็บไซต์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์(2.2)ราคา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยความซึมซาบสนามไฟฟ้าจะนิยามจากความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับประจุที่อยู่ในตัวนำนั้นๆ Banalis ได้นิยามความหมายทางฟิสิกส์ของความซึมซาบสนามไฟฟ้าไว้ดังสมการ 2.3 ดังนี้

$$\epsilon_r = 1 + \frac{N_e Q^2}{\epsilon_0 m \omega_0^2} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j\omega \frac{d}{m\omega_0^2} \right)^{-1} \quad (2.3)$$

โดยค่า N_e คือ ความหนาแน่นของประจุ

Q คือ จำนวนประจุที่เคลื่อนที่

m คือ มวลของประจุที่เคลื่อนที่

d คือ ค่าคงที่การสั่น (damping coefficient)

ϵ_0 คือ ค่าซึมซาบสนามไฟฟ้าในสุญญากาศ

ω คือ ความถี่เชิงมุมที่ใช้

ω_0 คือ ความถี่สั่นพ้องของประจุ

ดังนั้นจะได้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดังสมการที่ 2.4

$$V_{out} = V_R + V_C \quad (2.4)$$

2.3 การสร้างฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function)

จากวงจรอนุกรมอันดับสองสามารถสร้างฟังก์ชันถ่ายโอนจากการรวมแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ ซึ่งแสดงดังสมการดังนี้

KVL

$$V_{in} = V_L + V_{out} \quad (2.5)$$

$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{V_L}{V_{out}} + 1 \quad (2.6)$$

โดยจากสมการที่ 2.4 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{V_L}{V_R + V_C} + 1 \quad (2.7)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_R + V_C}{V_L + V_R + V_C} \quad (2.8)$$

$$\frac{V_{out}(t)}{V_{in}(t)} = \frac{IR + V_C}{L \frac{dV}{dt} + IR + V_C} \quad (2.9)$$

จาก $i(t) = C \frac{dV}{dt}$

$$\frac{V_{out}(t)}{V_{in}(t)} = \frac{RC \frac{dV_C}{dt} + V_C}{LC \frac{d^2V_C}{dt^2} + RC \frac{dV_C}{dt} + V_C} \quad (2.10)$$

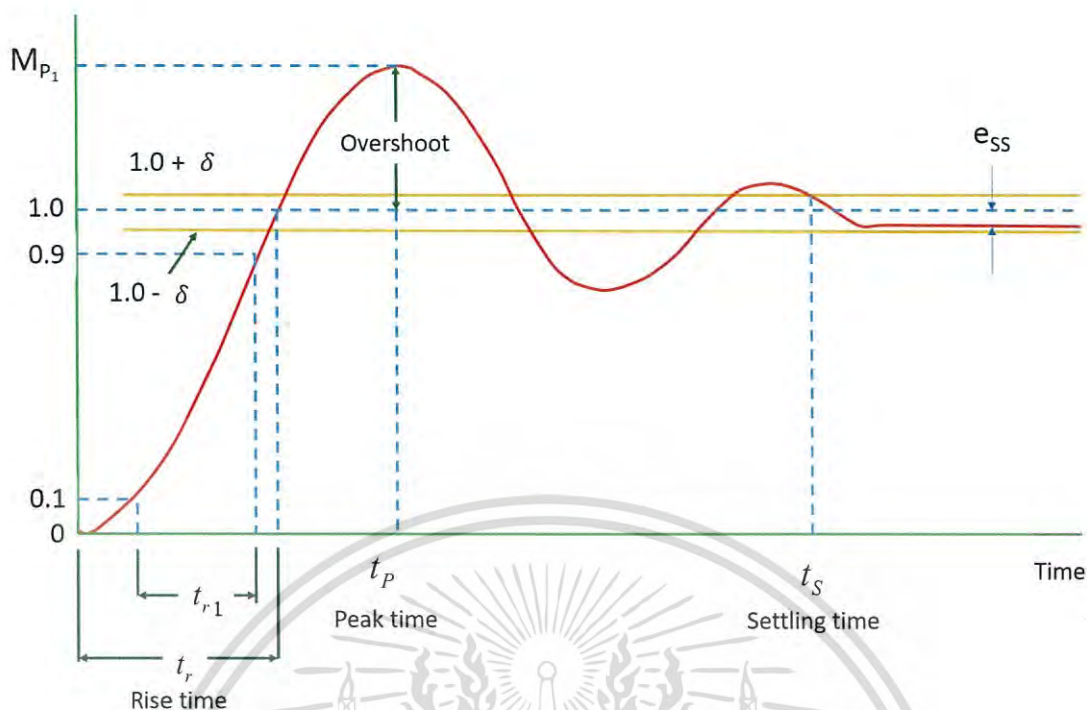
$$\frac{V_{out}(t)}{V_{in}(t)} = \frac{\frac{R}{L} \frac{dV_C}{dt} + \frac{1}{LC} V_C}{\frac{d^2V_C}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dV_C}{dt} + \frac{1}{LC} V_C} \quad (2.11)$$

$$\frac{V_{out}(S)}{V_{in}(S)} = \frac{\left(\frac{R}{L}\right)S + \frac{1}{LC}}{S^2 + \left(\frac{R}{L}\right)S + \frac{1}{LC}} \quad (2.12)$$

2.4 สมรรถนะเชิงเวลาของระบบอันดับสอง[10]

จะกล่าวถึงคุณลักษณะและสมรรถนะของระบบควบคุมในเชิงโดเมนเวลาของระบบอันดับสอง จนไปถึงระบบหลายอันดับ โดยจะทำการวิเคราะห์ในรูปของโดเมนเวลา สมรรถนะที่สำคัญในเชิงเวลา ได้แก่ เวลาขอขึ้น (rise time) เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว(setting time) การเกิดการพุ่งเกิน(overshoot) ความผิดพลาดในสภาวะคงตัว (steady state error) และการเกิดการแกว่ง (oscillator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ผลตอบสนองของระบบแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

จากรูปที่ 2.2 พารามิเตอร์ต่างๆที่สามารถใช้อธิบายสมรรถนะของระบบมีดังต่อไปนี้

ก.เวลาหน่วง (delay time) เป็นเวลาที่ระบบเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเริ่มต้นจนมีค่าเป็น 50% ของค่าสุดท้ายของระบบ

ข.เวลาขาขึ้น (rise time) เวลาที่ระบบเปลี่ยนแปลงไปโดยมีนิยามหลายแบบ อาจนับจาก 10% ไปถึง 90% ของค่าสุดท้ายของผลตอบสนอง หรืออาจนับจาก 0% ถึง 100% ก็ได้

ค.การพุ่งเกินสูงสุด (maximum overshoot) ปริมาณค่าเอาต์พุตที่มีค่ามากที่สุด เทียบกับค่าสุดท้ายของระบบ

ง.เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (setting time) เวลานั้นจากจุดเริ่มต้นจนกระทั่งค่าเอาต์พุตถึงจุดที่เกือบจะเป็นสภาวะคงตัวรูปแบบทั่วไปของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบอันดับสองดังสมการ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} \quad (2.13)$$

ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองเอาต์พุตของระบบนี้จะสามารถพิจารณาได้ 3 กรณี โดยพิจารณา

เฉพาะระบบที่มีเสถียรภาพ คือ $-\omega_n\zeta \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 1 $0 < \zeta < 1$ เรียกว่า การเกิดหน่วงขาด (underdamped) ซึ่งระบบจะมีโพลของระบบเป็นวงรอบปิดเป็นจำนวนเชิงซ้อนที่อยู่ทางซ้ายของระนาบ s

ค่า $\zeta^2 - 1 < 0$ ดังนั้นโพลของระบบ คือ $-\omega_n \zeta \pm j\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\omega_n \zeta s + \omega_n^2} R(s) \quad (2.14)$$

หาฟังก์ชันลาปลาสมผผันของ

$$c(t) = 1 - \frac{e^{-\omega_n \zeta t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\omega_d t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta}) \quad (2.15)$$

กรณีที่ 2 $\zeta = 1$ เรียกว่า การเกิดหน่วงวิกฤติ (critical damping) ระบบจะมีโพลของระบบวงรอบปิดเป็นจำนวนจริงซ้ำกันสองค่าที่อยู่ทางซ้ายของระนาบ s

$$c(t) = 1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t) \quad (2.16)$$

กรณีที่ 3 $\zeta > 1$ เรียกว่า การเกิดการหน่วงเกิน (overdamped) ระบบจะมีโพลของระบบวงรอบปิดเป็นจำนวนจริงที่แตกต่างกันและมีค่าที่อยู่ทางซ้ายของระนาบ s

$$c(t) = 1 + \frac{\omega_n^2}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} \left(\frac{e^{-s_1 t}}{s_1} - \frac{e^{-s_2 t}}{s_2} \right) \quad (2.17)$$

โดยที่

$$s_1 = \omega_n (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}) \quad (2.18)$$

$$s_2 = \omega_n (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}) \quad (2.19)$$

จะได้เวลาขาขึ้นได้ดังสมการนี้

$$t_r = \frac{\pi - \tan^{-1} \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta}}{\omega_d} \quad (2.20)$$

กรณีที่ $\zeta = 0$ ระบบจะมีการแกว่งเป็นรูปคลื่นฟังก์ชันไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 เทคนิคการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (system identification) [11]

เทคนิคการระบุเอกลักษณ์ของระบบ เป็นเทคนิคที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมา เพื่อใช้อธิบายถึงลักษณะของระบบ โดยการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของระบบ ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ต้องการ รูปแบบที่ใช้จำลองจะมีหลายรูปแบบซึ่งจะโดยการหารูปแบบของระบบพลวัตจะมีวิธีประมาณการหรือแบบจำลองหลายแบบ ซึ่งแต่ละแบบจะเหมาะกับการหาพารามิเตอร์ของระบบที่แตกต่างกัน ซึ่งจะมีหลักการหาแบบจำลองได้ 3 วิธีคือ

1. White-box model เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่รู้ทั้งโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบ คือจะรู้ทั้งจำนวนโพลและซีโรของระบบ ซึ่งสามารถทำให้หาฟังก์ชันถ่ายโอน (ของระบบได้) จากนั้นก็ทำการแทนค่าพารามิเตอร์ที่รู้อยู่แล้วเข้าไปก็จะทำให้ได้แบบจำลองของระบบ

2. Gray-box model เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่รู้โครงสร้างของระบบแต่ไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ จะเป็นระบบที่เราจะรู้จำนวนโพลและซีโรของระบบแต่จะไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในฟังก์ชันถ่ายโอน ดังนั้นจึงต้องมีการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีที่เหมาะสม โดยการพิจารณาจากความแตกต่างระหว่างค่าเอาต์พุตจริงที่วัดได้กับค่าเอาต์พุตจริงที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยต้องมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

3. Black-box model เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบที่ไม่รู้ทั้งโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบ วิธีการนี้จะเป็นการที่สุ่มค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของระบบที่เหมาะสมที่สุด จนกระทั่งได้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

สำหรับโครงสร้างของระบบที่เป็นเชิงเส้น (linear structure) : จากวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น จะเป็นการหาในหลายๆกรณี ทั้งแบบที่รู้พารามิเตอร์และไม่รู้พารามิเตอร์ภายในระบบ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการหาค่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมีการป้อนสัญญาณอินพุตเข้าไปในระบบแล้วทำการเก็บเอาต์พุตมาเป็นคู่ลำดับ อินพุต-เอาต์พุต เพื่อนำมาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้รูปแบบ OE (output error)

การประมาณโดยใช้รูปแบบ OE (output error) : แบบจำลองนี้อาศัยการประมาณค่าความผิดพลาดในการสร้างฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบซึ่งรูปแบบโครงสร้างของการประมาณการแบบ OE จะเป็นดังนี้

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t - n_k) + e(t) \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B(q) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb+1} \quad (2.22)$$

$$F(q) = 1 + f_1q^{-1} + \dots + f_{nf}q^{-nf} \quad (2.23)$$

โดยที่ $y(t)$ คือ ค่าเอาต์พุต ณ เวลา t

$u(t)$ คือ ค่าอินพุต ณ เวลา t

n_b คือ จำนวนซีโรบวทหนึ่งของระบบบวทหนึ่ง

n_f คือ จำนวนโพลของระบบ

n_k คือ จำนวนการสุ่มข้อมูล ก่อนที่อินพุตจะมีผลต่อเอาต์พุตของระบบ

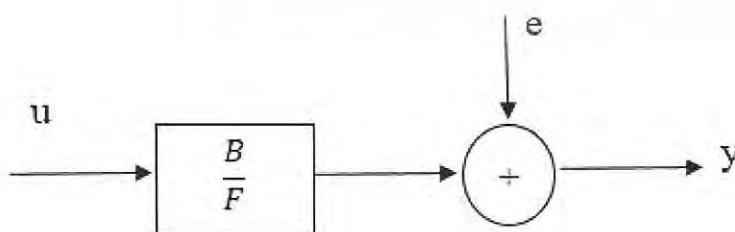
$e(t)$ คือ ค่าความผิดพลาด

b_1, \dots, b_{nb} และ f_1, \dots, f_{nf} คือ ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่เราต้องการทราบ

จากสมการที่ (2.21) เป็นสมการที่อยู่ในรูปของสมการไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete time) จึงต้องการแปลงให้อยู่ในรูปสมการต่อเนื่องของเวลา (continuous time) เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบได้ดังนี้

$$G(s) = \frac{B(s)}{F(s)} = \frac{b_{nb}s^{(nb-1)} + b_{nb-1}s^{(nb-2)} + \dots + b_1}{s^{nf} + f_{nf}s^{(nf-1)} + \dots + f_1} \quad (2.24)$$

จากสมการที่ (18) เขียนในรูปของบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลอง OE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.3 อธิบายได้ว่า อินพุต(u) จะผ่านฟังก์ถ่ายโอน($\frac{B}{F}$) จากนั้นจะบวกเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด(e) เข้าไปจึงจะได้เป็นค่าเอาต์พุต(y) ออกมา

สรุปได้ว่า วิธีการดังกล่าวจะทำการป้อนสัญญาณอินพุตพร้อมทั้งเก็บค่าสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่ได้ของระบบ เนื่องจากระบบที่ใช้งานเป็นวงจรมุมอันดับสอง โดยเก็บสัญญาณเอาต์พุตตกคร่อมดิน ดังนั้นจะทำให้เราสามารถรู้ค่าโพลและซีโรบวกหนึ่งของระบบ ซึ่งในการใส่ค่า n_f (จำนวนโพล) n_b (จำนวนซีโร+1) และ n_k (จำนวนการสุ่มข้อมูล) นั้นจะอาศัยการสุ่มค่าตามแบบของโมเดลกล่องเทา (gray box model) คือ ทราบค่าจำนวนของโพลและซีโรของระบบแต่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ จึงใช้การสุ่มค่าต่างๆ จนกว่าจะได้คำตอบที่ถูกต้องที่สุด ซึ่งคำตอบที่ออกมา นั้นคือค่าพารามิเตอร์ f_1, \dots, f_{n_f} และ b_1, \dots, b_{n_b} ของสมการระบบที่ต้องการ

จากรูปแบบการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยนี้ศึกษาแบบจำลองปริภูมิสถานะของวงจรมุมอันดับสอง และเลือกการประมาณการโดยใช้รูปแบบ OE (output error) เพื่อประมาณการค่าพารามิเตอร์ต่างๆโดยจะไม่สนใจรูปแบบของค่าความผิดพลาดในระบบและอาศัยการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่รู้พารามิเตอร์ต่างๆของระบบ โดยมีการทดสอบหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดโดยเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆของระบบไป จนกระทั่งได้ความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองกับระบบจริงที่แตกต่างน้อยที่สุด วิธีการที่ใช้ประมาณค่าพารามิเตอร์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของระบบที่กำหนด คือ การประมาณค่ากำลังสองต่ำสุด (least squares estimate)

การประมาณค่ากำลังสองต่ำสุด (least squares estimation)

ในการสร้างแบบจำลองของระบบด้วยวิธีการหาพารามิเตอร์ระบบ จะสร้างโดยการใช้เกณฑ์ทางสถิติ เพื่อลดค่าความแปรปรวน (noise dynamic) หรือค่าความผิดพลาด (error) ให้ต่ำที่สุดโดยจะได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ออกมาใช้สร้างแบบจำลองที่ดีที่สุดนั่นเอง เมื่อค่าความผิดพลาดเท่ากับ

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (2.24)$$

โดยที่ $y(t)$ คือ ค่าเอาต์พุตจริงที่วัดมาจากระบบ

$\hat{y}(t)$ คือ ค่าเอาต์พุตที่สร้างขึ้นจากการประมาณการในแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.21) และ (2.24)

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t - n_k) + (y(t) - \hat{y}(t)) \quad (2.25)$$

$$\hat{y}(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t - n_k) \quad (2.26)$$

เมื่อกำหนดให้ค่า

$$\varphi = [-y(t-1), \dots, -y(t-n_a), u(t-n_k), \dots, u(t-n_k - n_b + 1)]^T \quad (2.27)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} a_1, \dots, a_{n_a} \\ b_1, \dots, b_{n_b} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

เมื่อ φ คือ ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่เราวัดมาจากระบบ

θ คือ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบที่เราต้องการทราบค่า

จากสมการที่ (2.26) (2.27) และ (2.28)

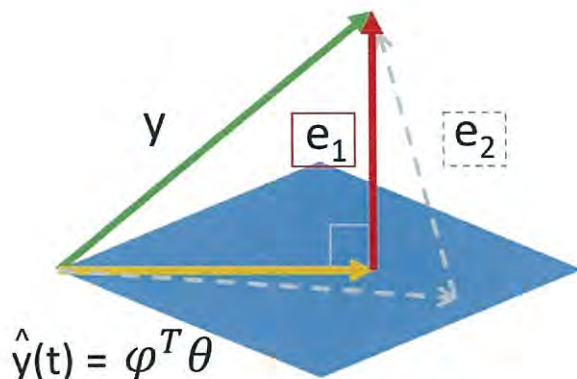
$$\hat{y}(t) = \varphi^T \theta \quad (2.29)$$

นำค่าจากสมการที่ (2.29) แทนลงในสมการ (2.24)

$$e = y - \varphi^T \theta \quad (2.30)$$

จากสมการ (2.30) เขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 เวกเตอร์ของค่าเอาต์พุตและค่าความผิดพลาดใน Column space ของ φ^T

เมื่อ e_1 คือ เวกเตอร์ของค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

e_2 คือ ค่าความผิดพลาดใน Column space ของ φ^T

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าที่ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดเวกเตอร์ของค่าความผิดพลาด (e_1) จะต้องตั้งฉากกันกับ column space ของ φ^T เพราะฉะนั้นจึงนำสมบัติของเวกเตอร์ตั้งฉาก (orthogonal vector) มาใช้

จากสมการที่ (2.30) นำ $(\varphi^T)^T$ มาคูณทั้งสมการ จะได้

$$(\varphi^T)^T \cdot e = \varphi \cdot y - \varphi \cdot \varphi^T \theta \quad (2.31)$$

$$0 = \varphi \cdot y - \varphi \cdot \varphi^T \theta \quad (2.32)$$

$$\hat{\theta} = (\varphi \cdot \varphi^T)^{-1} \cdot \varphi \cdot y \quad (2.33)$$

จากสมการที่ (2.33) จะได้ค่าพารามิเตอร์ของระบบโดยประมาณออกมา ซึ่งจะเป็นค่าที่ใช้ในแบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบนั้นที่สามารถประมาณค่าเอาต์พุตได้ใกล้เคียงกับเอาต์พุตของระบบที่วัดจริงมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการหาฟังก์ชันถ่ายโอน

3.1 ชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ

จะทำการออกแบบตัวเหนี่ยวนำให้อยู่ในช่วง 30 μH เนื่องจากได้ผลตอบสนองชัดเจนที่สุด เมื่อใช้ในช่วงความถี่สูงตั้งแต่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 500 กิโลเฮิร์ตซ์ สาเหตุที่เลือกใช้ความถี่สูงก็เพราะว่า สามารถเห็นผลตอบสนองได้ชัดเจน ดังนั้นจากสูตรการคำนวณตัวเหนี่ยวนำ

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (3.1)$$

- เมื่อ L คือ ค่าการเหนี่ยวนำ
 μ คือ ค่าซึมขามสนามไฟฟ้า
 N คือ จำนวนขดลวด
 A คือ พื้นที่หน้าตัด
 l คือ ความยาวของแกน



รูปที่ 3.1 ตัวเหนี่ยวนำในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 โพรบแสดนเลส

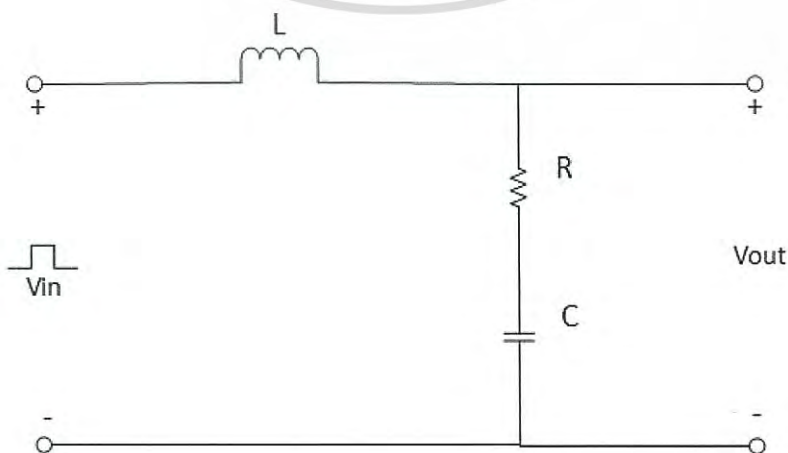
โพรบที่ใช้วัดความชื้นทำมาจากแสดนเลสโดยมีความยาวของโลหะประมาณ 4 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างโพรบวัดความชื้นกว้างประมาณ 2.5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 โพรบแสดนเลสที่ใช้วัดความชื้น

3.1.3 การออกแบบวงจรจริงในการทดลอง

เนื่องจากดินมีสมบัติทางไฟฟ้าคล้ายกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มตัวเหนี่ยวนำเข้าไปในวงจรเพื่อให้กลายเป็นวงจรอนุกรมอันดับสอง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาของระบบ

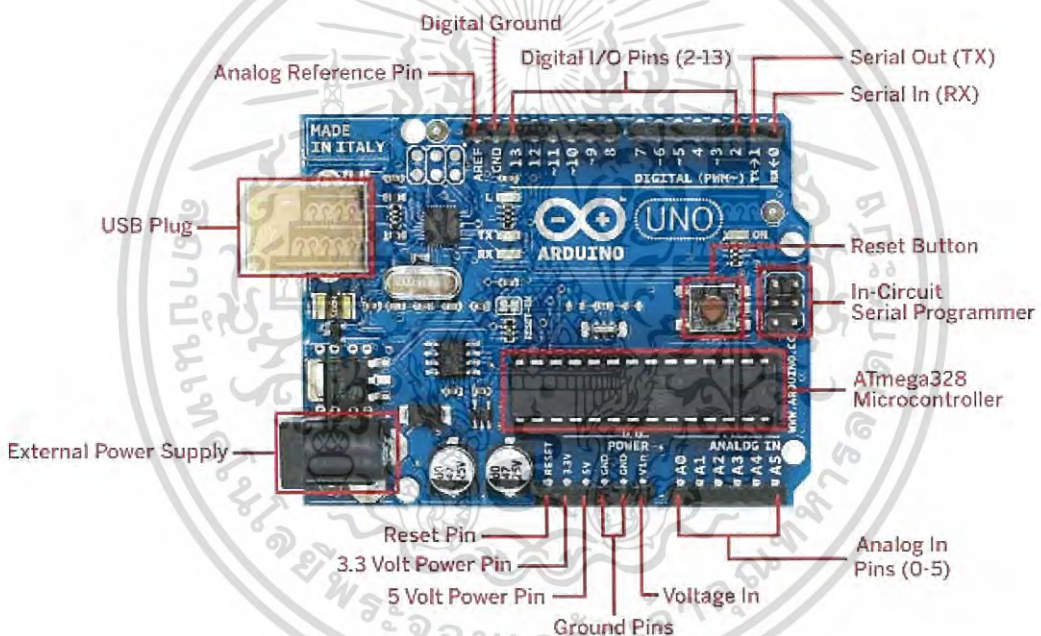


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 บอร์ดประมวลผล (Arduino UNO)

ข้อมูลเบื้องต้นของ Arduino Hardware

Arduino คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นแบบที่เรียกว่า Open Hardware กล่าวคือ Arduino อุปกรณ์ที่มีแบบส่วนประกอบเป็นมาตรฐานที่เปิดเผย ซึ่งหมายความว่า เราสามารถทำเอง โดยใช้แบบที่มีการเปิดเผยทั่วไปก็ได้ หรือสามารถซื้อหากก็ได้ เนื่องจากมีราคาถูก มีซอฟต์แวร์แวร์ให้ใช้งานฟรี สามารถนำไปใช้งานทั่วไปหรือแบบธุรกิจได้โดยไม่ต้องเสียค่าลิขสิทธิ์ เป็นรูปแบบที่มีข้อมูลมากที่สุดบนอินเทอร์เน็ต การพัฒนาสามารถทำได้ง่าย เพราะไม่ต้องเขียนโปรแกรมในรูปแบบ Low Level หมายความว่า เราสามารถใช้คำสั่งเขียนโปรแกรมได้เหมือนโปรแกรมภาษาขั้นสูงทั่วไป



รูปที่ 3.4 Arduino UNO R3

จากรูปที่ 3.4 แสดงส่วนประกอบของ Arduino UNO R3 ประกอบไปด้วย

- Microcontroller board ที่ใช้ ATmega328 (datasheet) เป็น MCU หลัก
- แรงดันไฟ 5 โวลต์
- แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (recommended) 7-12 โวลต์
- แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (limits) 6-20 โวลต์
- ขาดิจิตอล 14 ขา อินพุท/เอาพุท (สามารถทำเป็น PWM ได้ถึง 6 ขา)
- ขาอะนาล็อกอินพุทได้อีก 6 ขา

เอกสารนี้เป็นกระดาษรีไซเคิลและขั้วออก 40 มิลลิแอมป์ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กระแสตรงสำหรับขาแรงดัน 3.3 โวลต์ 50 มิลลิแอมป์
- หน่วยความจำแฟลช 32 กิโลไบต์ (ATmega328) ที่ 0.5 กิโลไบต์
- SRAM 2 กิโลไบต์ (ATmega328)
- EEPROM 1 กิโลไบต์ (ATmega328)
- ทำงานที่ความถี่ 16 เมกะเฮิรตซ์

3.1.5 โมดูล MicroSD Card Adapter (Catalex)

โมดูลสำหรับบันทึกข้อมูลลง Micro SD Card , Micro SD Card Module ยี่ห้อ Catalex สำหรับเพิ่มความสามารถในการบันทึกข้อมูลต่าง ๆ จากบอร์ด Arduino ลงบน Micro SD Card มีอินเตอร์เฟสแบบ SPI ใช้งานง่าย มีไลบรารีสำเร็จรูปให้พร้อมใช้งาน มีวงจรเรกูเลต 3.3V มาให้ในตัว บอร์ด สามารถใช้ไฟได้ในช่วง 4.5V - 5.5V



รูปที่ 3.5 MicroSD Card Adapter

3.2 วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification)

3.2.1 ขั้นตอนการบันทึกข้อมูลกราฟสัญญาณ

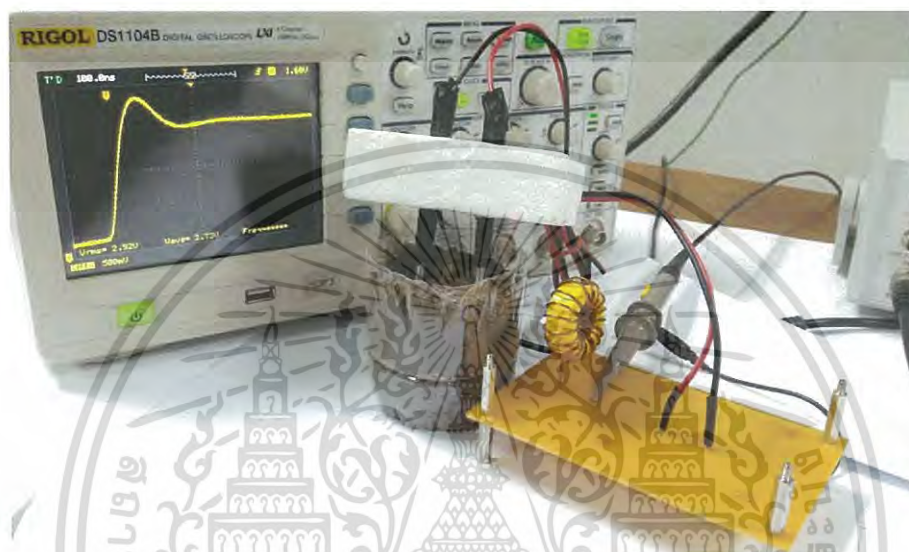
จากการออกแบบวงจรที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ทำการสร้างวงจรและการทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบตามทฤษฎีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) ของวงจรมอดูล อันดับสองมีขั้นตอนดังนี้

- ก. สร้างสัญญาณพัลส์เทรนโดยมีความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ 100 กิโลเฮิรตซ์ และ 500 กิโลเฮิรตซ์
- ข. นำสัญญาณที่ได้มาใช้กับวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง. บันทึกการทดลอง นำข้อมูลสัญญาณที่วัดได้ไปสร้างแบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ทฤษฎีการหาพารามิเตอร์ระบบ (System Identification)

สัญญาณอินพุตของระบบ คือ สัญญาณสี่เหลี่ยม ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 500 กิโลเฮิร์ตซ์



รูปที่ 3.6 วงจรที่พัฒนาขึ้นใช้ในการทดลอง

สัญญาณเอาต์พุตของระบบ คือ สัญญาณแรงดันเอาต์พุตดังรูปที่ 3.2 จากการทดลองได้มีการกำหนดค่าของเครื่องออสซิลโลสโคปที่ 1 volt/div และ 100 ns/div โดยสัญญาณที่วัดมาต้องมีการกำหนดช่วงข้อมูลที่เหมาะสม ให้ค่าที่วัดได้มีการรบกวนน้อยที่สุด หากทำการวัดช่วงของข้อมูลมากเกินไปอาจจะไม่สามารถใช้ข้อมูลได้เนื่องจากออสซิลโลสโคปไม่สามารถจับข้อมูลได้ทั้งหมด แต่ทั้งนี้ก็ควรวัดช่วงของข้อมูลให้มากพอที่จะสร้างแบบจำลองด้วยทฤษฎีการหาพารามิเตอร์ระบบเช่นกัน

3.2.2 การประมวลผลด้วยทฤษฎีการหาพารามิเตอร์ระบบ

เมื่อทำการบันทึกกราฟสัญญาณต่างๆ ที่เป็นพารามิเตอร์ในการประมวลผลด้วยวิธีการหาพารามิเตอร์ระบบแล้วจึงทำการสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบ โดยใช้เครื่องมือการหาพารามิเตอร์ระบบ (System Identification Tool) ในโปรแกรม MATLAB โดยรูปแบบของหน้าต่างเมนูจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.8

สัญญาณอินพุตและค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของวงจรนำไปใช้หาแบบจำลองด้วยวิธีการหาพารามิเตอร์ระบบตามขั้นตอนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.) เลือกข้อมูลสัญญาณอินพุตและค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุตโดยเก็บตัวอย่างข้อมูลมาอย่างละ 600 ข้อมูลโดยกำหนดค่าตัวแปรชื่อ Volt แทนสัญญาณอินพุต และ Volt1 แทนสัญญาณเอาต์พุต ในช่วง 1 คาบของการทำงานของระบบ

2.) เปิดเครื่องมือการหาพารามิเตอร์ระบบในโปรแกรม MATLAB โดยจะมีหน้าต่างเครื่องมือตั้ง จากนั้นป้อนข้อมูลให้กับเครื่องมือ กำหนดค่าการสุ่มข้อมูลในการทำการหาพารามิเตอร์ระบบข้อมูล (sampling interval) ต้องเท่ากับค่าการสุ่มที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการจำลองวงจร (fixed-step sample time) มีค่าเท่ากับ 2 นาโนวินาที ดังรูปที่ รูปที่ 3.19 (ข)

3.) เลือกรูปแบบของแบบจำลองตามทฤษฎีการหาพารามิเตอร์ระบบที่เหมาะสม โดยโมเดลพหุนามและใช้รูปแบบ OE (output-error) มีความเหมาะสมในการหาแบบจำลองระบบที่มีเพียงค่าอินพุตและเอาต์พุตเพียงค่าเดียว มีรายละเอียดของตัวแปรในแบบจำลองดังนี้

3.1) nb คือ จำนวนซีโรของระบบบวกด้วยหนึ่ง

3.2) nf คือ จำนวนโพลของระบบ

3.3) nk คือ จำนวนการสุ่มข้อมูลก่อนที่ค่าอินพุตจะมีผลต่อค่าเอาต์พุตของระบบ

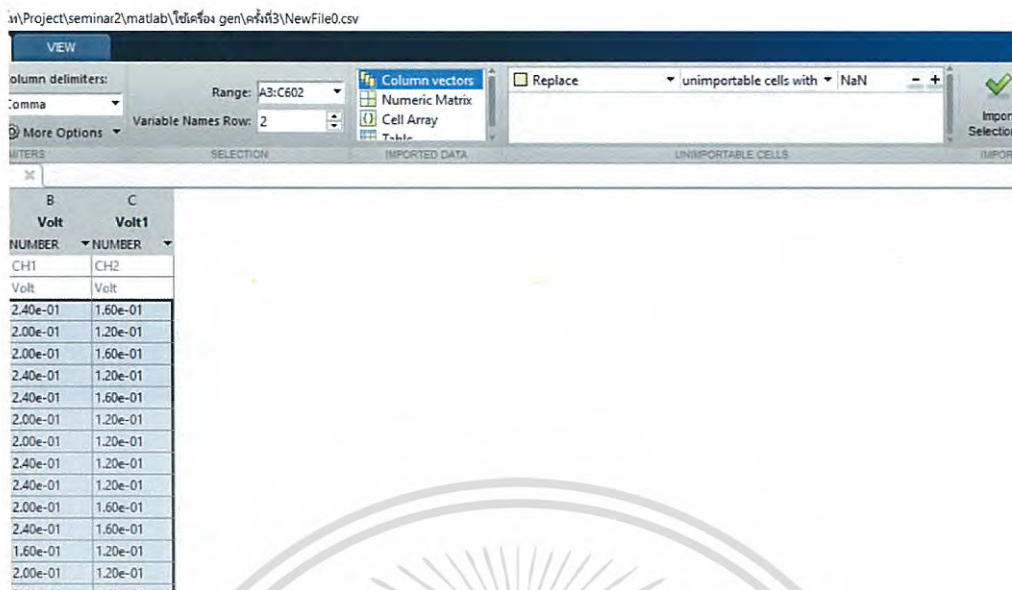
การเลือกตัวแปรของแบบจำลอง อาศัยการเดาสุ่มตามแบบของโมเดลกล่องดำ (Black-Box model) คือไม่สามารถบ่งบอก จำนวนโพล ซีโร ในระบบมาก่อน แล้วทำการสุ่มตัวแปรของแบบจำลองของทฤษฎีการหาพารามิเตอร์ระบบไปจนกว่าจะได้แบบจำลองที่มีค่าความถูกต้องที่สามารถยอมรับได้

4) เมื่อทำการเลือกรูปแบบและตัวแปรของแบบจำลองที่สามารถสร้างแบบจำลองของระบบ คือ OE221 จะได้เอาต์พุตที่สร้างจากแบบจำลอง เปรียบเทียบกับค่าเอาต์พุตจริงที่วัดมาจากการจำลองวงจรอนุกรมอันดับสอง มีหน่วยวัดค่าความถูกต้องเป็นเปอร์เซ็นต์ หากเปอร์เซ็นต์ความเข้ากันได้มีค่าสูง ค่าเอาต์พุตของแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นยิ่งใกล้เคียงกับเอาต์พุตจริงที่วัดมาจากวงจรอนุกรมอันดับสอง

5) สร้างฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบในรูปของโดเมน s เพื่อนำฟังก์ชันถ่ายโอนที่สร้างขึ้นจากทฤษฎีการหาพารามิเตอร์ระบบ

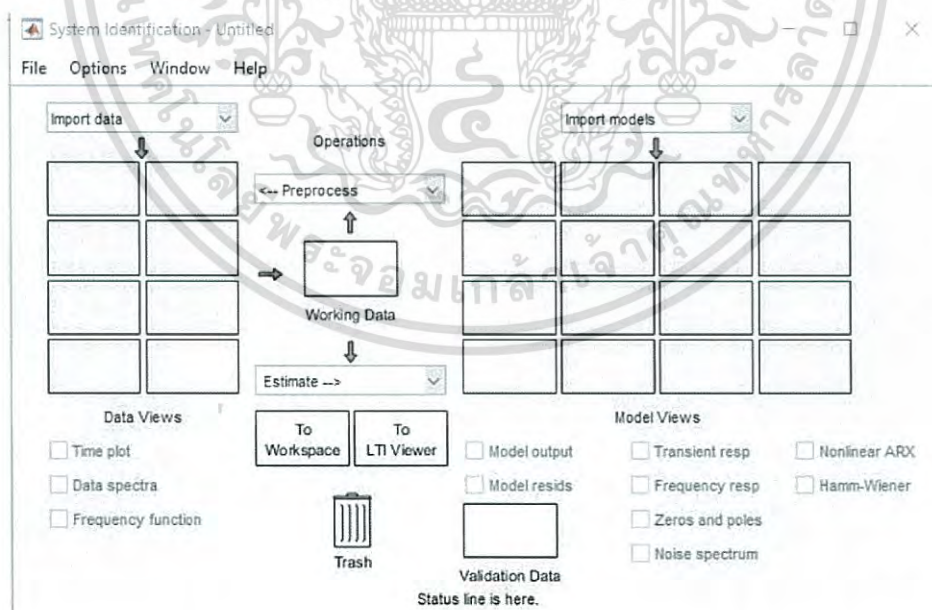
ทำตามขั้นตอน 1) – 5) โดยเปลี่ยนค่าความถี่ของเครื่องสร้างสัญญาณเป็น 100 กิโลเฮิร์ตซ์และ 500 กิโลเฮิร์ตซ์ และเติมน้ำลงไปที่ละ 15 มิลลิลิตร โดยใช้ค่าที่วัดได้จริงจากสัญญาณเอาต์พุต เมื่อประมวลผลด้วยทฤษฎีการหาพารามิเตอร์ระบบ (System identification) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบในรูปของโดเมน s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



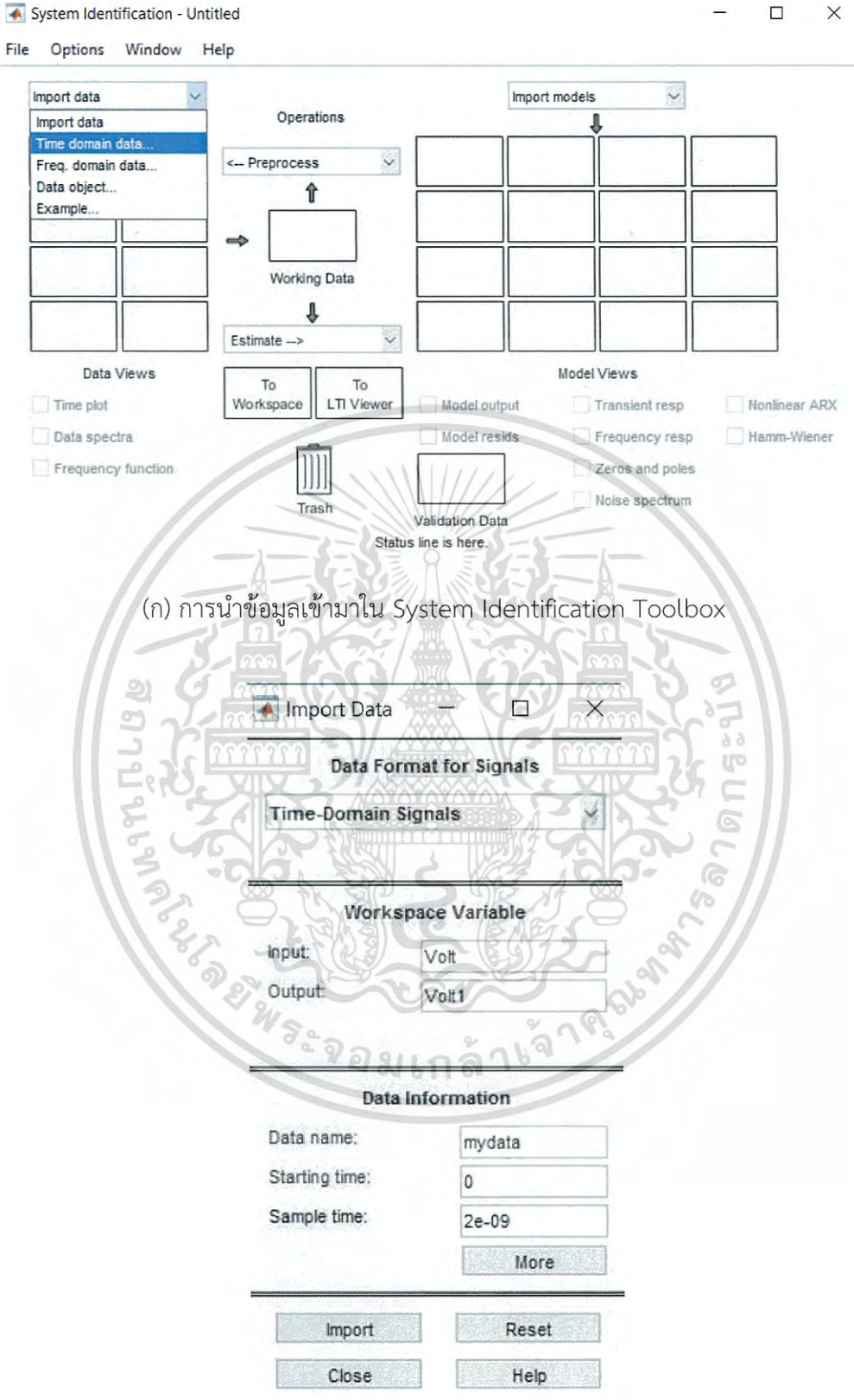
รูปที่ 3.7 นำข้อมูลเข้ามาในโปรแกรม MATLAB

จากรูปที่ 3.7 เป็นการนำข้อมูลเข้าโปรแกรม MATLAB โดยข้อมูลจะเข้ามาในรูปแบบตารางโดยจะให้ตาราง Volt เป็นตารางของค่าอินพุต และจะให้ตาราง Volt1 เป็นตารางของค่าเอาต์พุต สิ่งที่สำคัญก็คือจำนวนของข้อมูลของอินพุตและเอาต์พุตที่เก็บมาจะต้องมีจำนวนเท่ากัน



รูปที่ 3.8 หน้าต่างเมนูของเครื่องมือการหาพารามิเตอร์ระบบในโปรแกรม MATLAB

จากรูปที่ 3.8 เป็นหน้าต่างของ System identification toolbox ซึ่งจะต้องทำการนำข้อมูลเข้ามาเพื่อใช้ในการคำนวณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวจนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 วิธีการกำหนดค่าต่างๆใน System Identification Toolbox

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

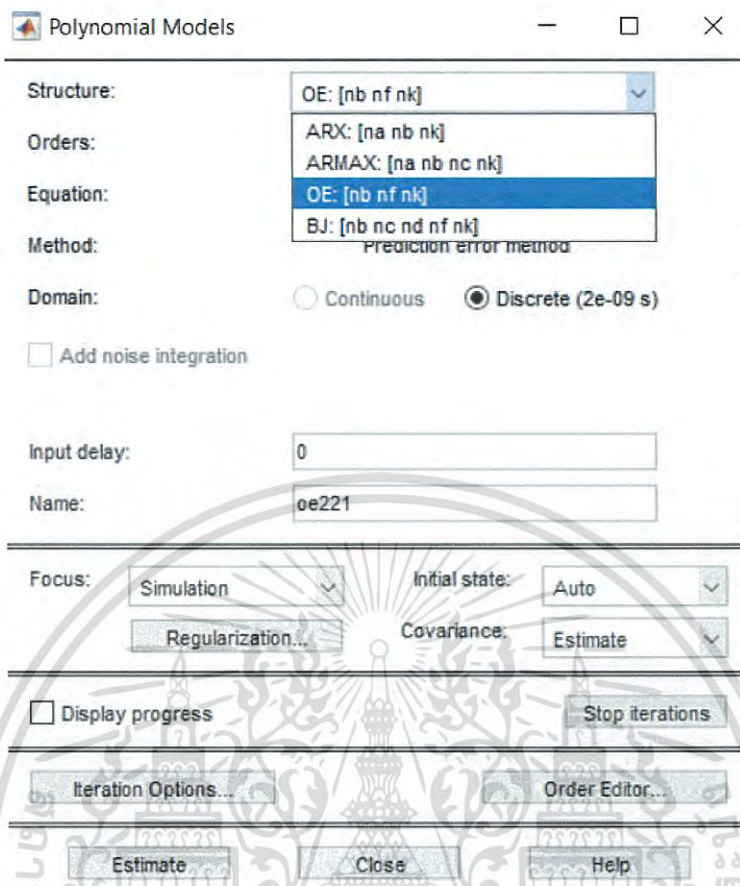
จากรูปที่ 3.9(ก) และ 3.9(ข) แสดงวิธีการนำข้อมูลเข้า System identification toolbox เพื่อใช้ในการหาฟังก์ชันถ่ายโอน โดยจะเลือกชนิดข้อมูลเป็นแบบข้อมูลเวลา (Time domain data) โดยจะให้ตาราง Volt เป็นตารางของค่าอินพุต และจะให้ตาราง Volt1 เป็นตารางของค่าเอาต์พุต เวลาเริ่มต้นจะเริ่มที่ 0 และเวลาในการแซมเปิล (Sample time) จะอยู่ที่ 2×10^{-9} วินาที โดยเวลาในการแซมเปิลจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่เราใช้ด้วย ซึ่งจะต้องมีความสัมพันธ์กัน

The screenshot shows the 'System Identification - Untitled' window. The 'Estimate' menu is open, and 'Polynomial Models...' is selected. The 'Order Editor' dialog box is also visible, showing the transfer function $y = [B/F]u + e$ and various parameters for poles, zeros, and delay.

(ก) เลือกโมเดลของระบบโดยใช้วิธี Polynomial model

(ข) เลือกจำนวนโพล,ซีโร่ และ ดีเลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

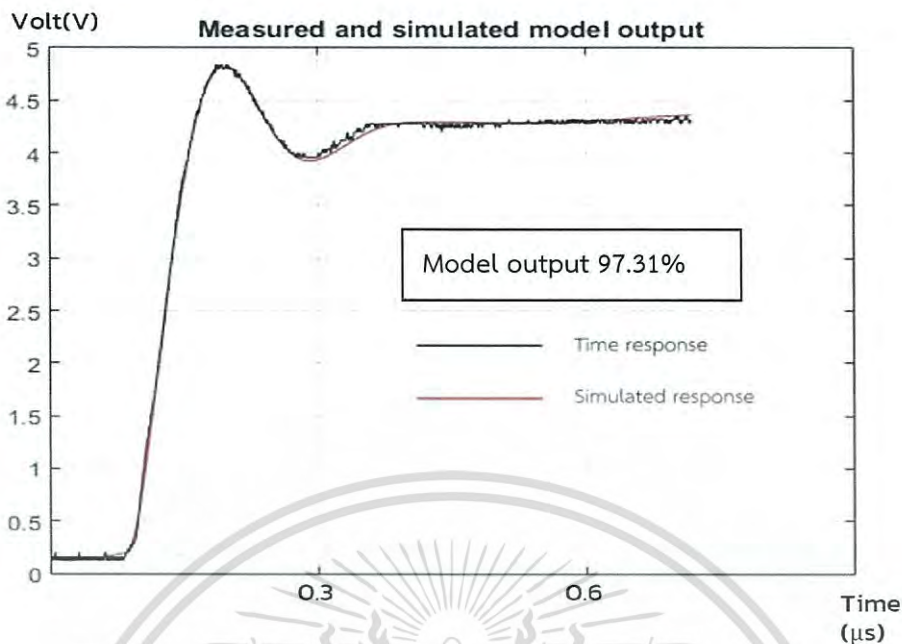


(ค) เลือกโครงสร้างของระบบเป็นแบบ Output Error (OE)

รูปที่ 3.10 วิธีการกำหนดค่าต่างๆใน System Identification Toolbox (ต่อ)

จากรูปที่ 3.10(ก) 3.10(ข) และ 3.10(ค) เมื่อนำข้อมูลเข้ามาใน MATLAB แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็น การเลือกโมเดลของระบบเนื่องจากระบบเราเป็นแบบวงจรมุมอันดับสองจึงต้องเลือกเป็นโมเดล พหุนาม (Polynomial model) ซึ่งระบบมีจำนวนโพลคือ 2 และซีโรคือ 1 และเลือกวิธีในการ ประมาณค่าเป็น Output error model (OE) เนื่องจากเราไม่ทราบโครงสร้างของค่าเอสต์พุด อีกทั้ง ในงานวิจัยนี้ไม่ได้สนใจค่าความผิดพลาดของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 Output Signal และเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง

จากรูปที่ 3.11 แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของผลตอบสนองทางเวลา (Time response) กับผลตอบสนองที่ได้มาจากการคำนวณ (Simulated response) สังเกตได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมีมากถึง 97.31%

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

>> ident
>> oe221

oe221 =
Discrete-time OE model: y(t) = [B(z)/F(z)]u(t) + e(t)
  B(z) = 0.01784 z^-1 - 0.01678 z^-2
  F(z) = 1 - 1.979 z^-1 + 0.9796 z^-2

Name: oe221
Sample time: 2e-09 seconds

Parameterization:
  Polynomial orders: nb=2 nf=2 nk=1
  Number of free coefficients: 4
  Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using PEM on time domain data "mydata".
Fit to estimation data: 96.34% (simulation focus)
FPE: 0.002813, MSE: 0.002752

```

รูปที่ 3.12 ค่าของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ผ่านการหาพารามิเตอร์ของระบบ

จากรูปที่ 3.12 เมื่อทำการหาค่าฟังก์ชันถ่ายโอนแล้วจะต้องแปลงให้อยู่ในรูปแบบความต่อเนื่อง
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ทางการ (Continuous time)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 สมรรถนะเชิงเวลาของระบบอันดับสอง

เมื่อหาค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนแล้ว จะสามารถหาค่า ζ , ω_n ได้ ซึ่งจะนำไปสู่การหาเวลาขาขึ้นและอัตราส่วนการหน่วงต่อไป โดยการเทียบสัมประสิทธิ์และใช้สูตรในการคำนวณเวลาขาขึ้นดังนี้

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.2)$$

$$t_r = \frac{\pi - \tan^{-1} \sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta \omega_d} \quad (3.3)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

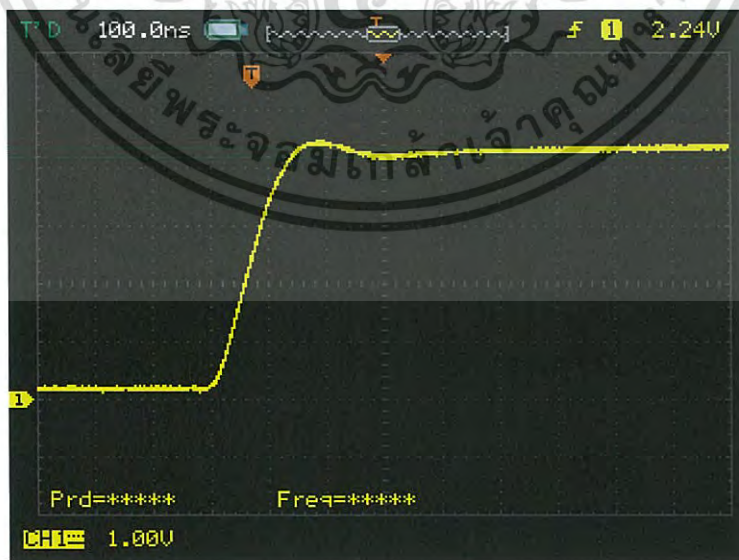
การทดลองและผลการทดลอง

4.1 ความชื้น 0% (w/w)

4.1.1 กราฟอินพุตและเอาต์พุตที่ความชื้นดิน 0% (w/w)



(ก) กราฟสัญญาณอินพุตที่ความชื้นดิน 0% (w/w)



(ข) กราฟสัญญาณเอาต์พุตที่ความชื้นดิน 0% (w/w)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 4.1 กราฟสัญญาณอินพุต,เอาต์พุตที่ความชื้นดิน 0% (w/w) ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

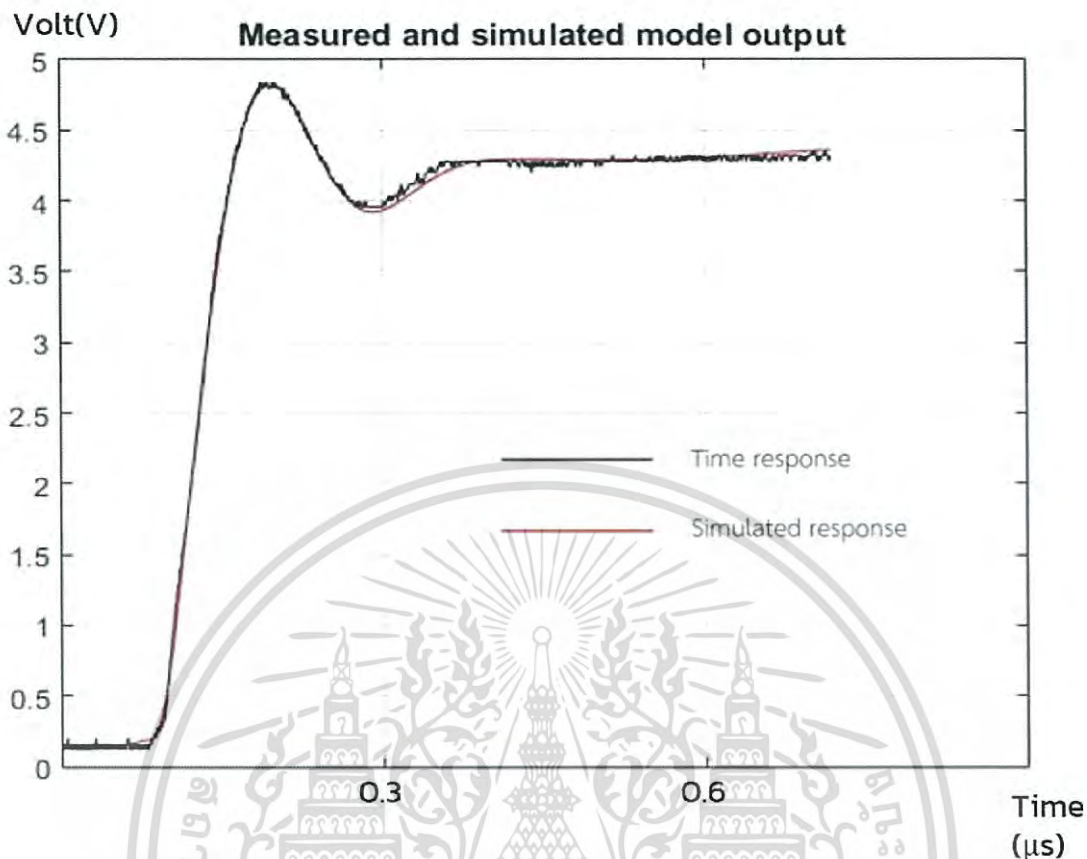
4.1.2 ตารางแสดงค่าที่วัดได้ที่ความชันดิน 0% (w/w)

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง อัตราการหน่วงและเวลาขาขึ้นที่ความชัน 0%

ความถี่ (kHz)	ครั้งที่	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง	อัตราการหน่วง	เวลาขาขึ้น (วินาที)
1	1	$\frac{8.689 \times 10^6 s + 2.588 \times 10^{14}}{s^2 + 1.036 \times 10^7 s + 2.584 \times 10^{14}}$	97.35%	3.22×10^{-1}	7.12×10^{-8}
	2	$\frac{8.583 \times 10^6 s + 2.602 \times 10^{14}}{s^2 + 1.033 \times 10^7 s + 2.595 \times 10^{14}}$	97.35%	3.21×10^{-1}	7.13×10^{-8}
	3	$\frac{8.438 \times 10^6 s + 2.615 \times 10^{14}}{s^2 + 1.033 \times 10^7 s + 2.604 \times 10^{14}}$	97.32%	3.20×10^{-1}	7.16×10^{-8}
	4	$\frac{8.476 \times 10^6 s + 2.615 \times 10^{14}}{s^2 + 1.042 \times 10^7 s + 2.611 \times 10^{14}}$	97.30%	3.22×10^{-1}	7.13×10^{-8}
	5	$\frac{8.629 \times 10^6 s + 2.610 \times 10^{14}}{s^2 + 1.034 \times 10^7 s + 2.604 \times 10^{14}}$	97.23%	3.21×10^{-1}	7.08×10^{-8}
100	1	$\frac{8.818 \times 10^6 s + 2.798 \times 10^{14}}{s^2 + 1.001 \times 10^7 s + 2.787 \times 10^{14}}$	97.52%	3.01×10^{-1}	7.10×10^{-8}
	2	$\frac{8.914 \times 10^6 s + 2.802 \times 10^{14}}{s^2 + 1.010 \times 10^7 s + 2.791 \times 10^{14}}$	97.55%	3.02×10^{-1}	7.11×10^{-8}
	3	$\frac{9.692 \times 10^6 s + 2.801 \times 10^{14}}{s^2 + 1.030 \times 10^7 s + 2.790 \times 10^{14}}$	97.53%	3.08×10^{-1}	7.08×10^{-8}
	4	$\frac{8.917 \times 10^6 s + 2.786 \times 10^{14}}{s^2 + 1.006 \times 10^7 s + 2.777 \times 10^{14}}$	97.50%	3.02×10^{-1}	7.09×10^{-8}
	5	$\frac{8.846 \times 10^6 s + 2.803 \times 10^{14}}{s^2 + 1.001 \times 10^7 s + 2.790 \times 10^{14}}$	97.56%	3.00×10^{-1}	7.06×10^{-8}
500	1	$\frac{9.604 \times 10^6 s + 2.748 \times 10^{14}}{s^2 + 1.031 \times 10^7 s + 2.753 \times 10^{14}}$	96.71%	3.11×10^{-1}	7.13×10^{-8}
	2	$\frac{9.613 \times 10^6 s + 2.763 \times 10^{14}}{s^2 + 1.035 \times 10^7 s + 2.763 \times 10^{14}}$	96.72%	3.11×10^{-1}	7.15×10^{-8}
	3	$\frac{9.605 \times 10^6 s + 2.741 \times 10^{14}}{s^2 + 1.031 \times 10^7 s + 2.745 \times 10^{14}}$	96.70%	3.11×10^{-1}	7.13×10^{-8}
	4	$\frac{9.616 \times 10^6 s + 2.736 \times 10^{14}}{s^2 + 1.025 \times 10^7 s + 2.738 \times 10^{14}}$	96.70%	3.10×10^{-1}	7.10×10^{-8}
	5	$\frac{9.658 \times 10^6 s + 2.731 \times 10^{14}}{s^2 + 1.033 \times 10^7 s + 2.763 \times 10^{14}}$	96.68%	3.12×10^{-1}	7.15×10^{-8}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การคุ้มครองของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



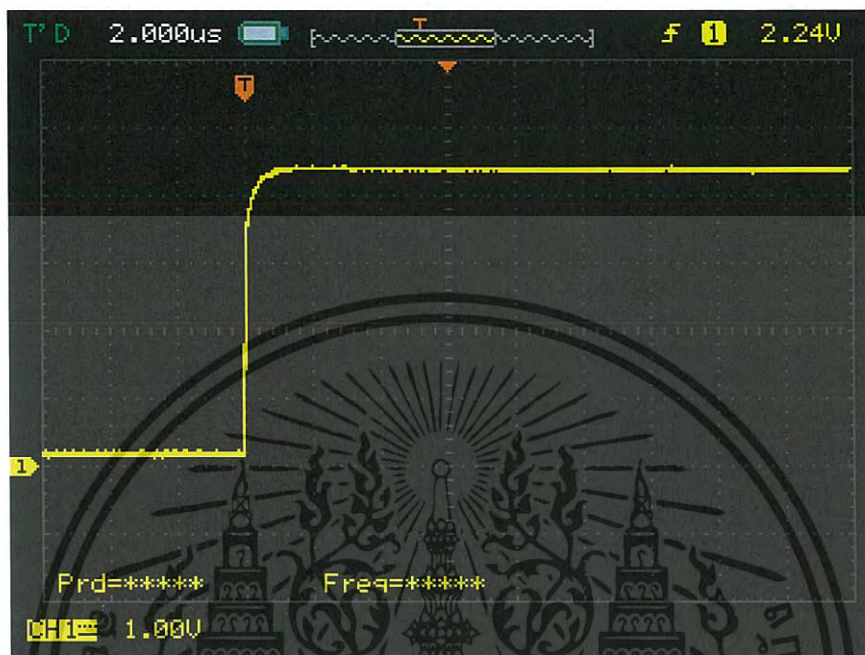
รูปที่ 4.2 แสดงผลตอบสนองทางเวลาเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากการคำนวณ

จากรูปที่ 4.1 (ข) เป็นผลตอบสนองแบบการหน่วงขาด ซึ่งจากตารางที่ 4.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนจะเห็นว่าค่าอัตราส่วนการหน่วงมีค่าประมาณ 0.3 ซึ่งน้อยกว่า 1 มีเวลาขาขึ้นอยู่ที่ 70 นาโนวินาที และผลตอบสนองมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงที่วัดได้ประมาณ 97%

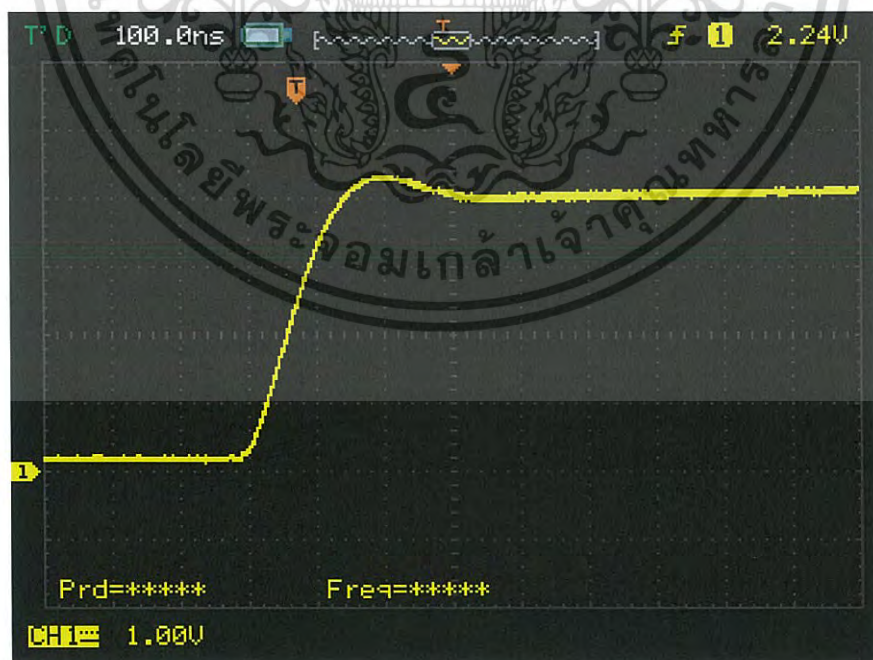
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ความชื้น 10% (w/w) ; เติมน้ำ 15 มิลลิลิตร

4.2.1 กราฟอินพุตและเอาต์พุตที่ความชื้นดิน 10% (w/w)



(ก) กราฟสัญญาณอินพุตที่ความชื้นดิน 10% (w/w)



(ข) กราฟสัญญาณเอาต์พุตที่ความชื้นดิน 10% (w/w)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงจำกัดการศึกษาระดับบัณฑิตยศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.3 กราฟสัญญาณอินพุต,เอาต์พุตที่ความชื้นดิน 10% (w/w)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

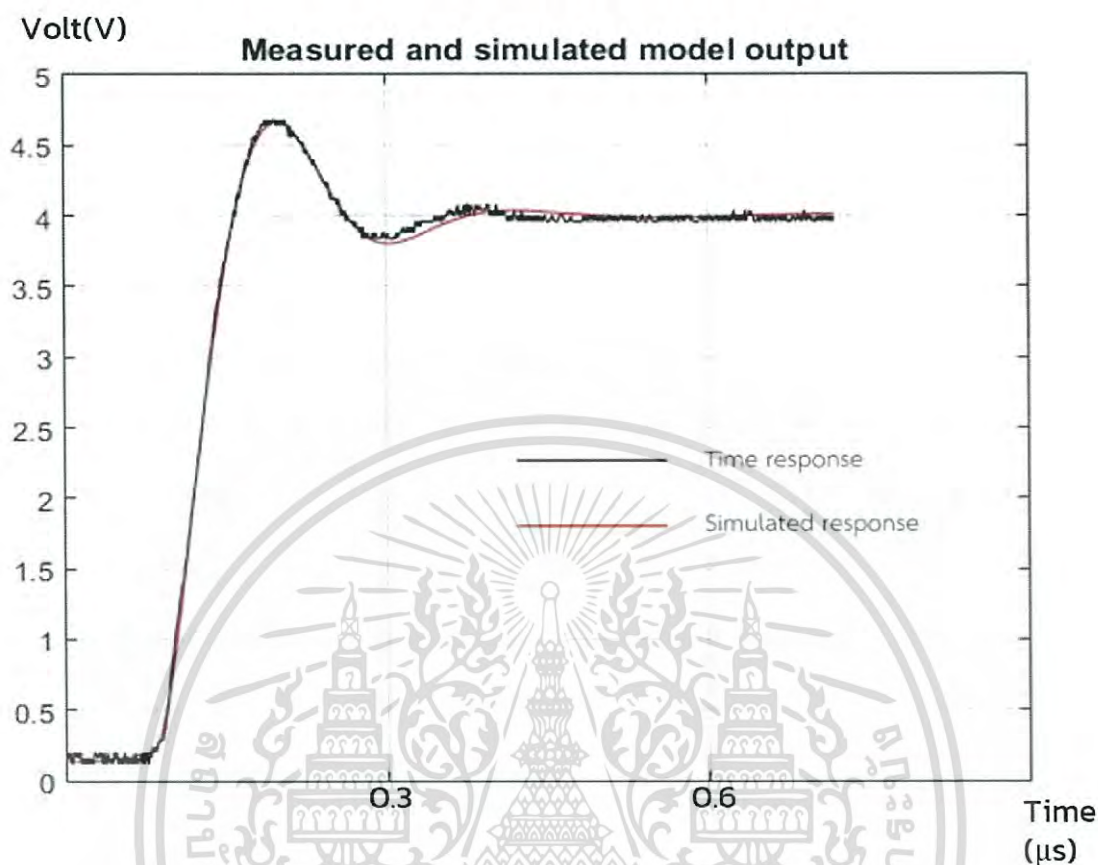
4.2.2 ตารางแสดงค่าที่วัดได้ที่มีความชื้นดิน 10% (w/w) ; เติมน้ำ 15 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซนต์ความถูกต้อง อัตราการหน่วงและเวลาขาขึ้นที่ความชื้น 10%

ความถี่ (kHz)	ครั้งที่	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เปอร์เซนต์ความถูกต้อง	อัตราการหน่วง	เวลาขาขึ้น (วินาที)
1kHz	1	$\frac{7.674 \times 10^6 s + 2.660 \times 10^{14}}{s^2 + 1.375 \times 10^7 s + 2.661 \times 10^{14}}$	97.53%	4.21×10^{-1}	7.18×10^{-8}
	2	$\frac{8.535 \times 10^6 s + 2.627 \times 10^{14}}{s^2 + 1.394 \times 10^7 s + 2.634 \times 10^{14}}$	97.53%	4.29×10^{-1}	7.25×10^{-8}
	3	$\frac{7.681 \times 10^6 s + 2.646 \times 10^{14}}{s^2 + 1.385 \times 10^7 s + 2.651 \times 10^{14}}$	97.56%	4.25×10^{-1}	7.21×10^{-8}
	4	$\frac{7.685 \times 10^6 s + 2.628 \times 10^{14}}{s^2 + 1.386 \times 10^7 s + 2.633 \times 10^{14}}$	97.55%	4.27×10^{-1}	7.20×10^{-8}
	5	$\frac{7.604 \times 10^6 s + 2.656 \times 10^{14}}{s^2 + 1.392 \times 10^7 s + 2.659 \times 10^{14}}$	97.53%	4.27×10^{-1}	7.19×10^{-8}
100kHz	1	$\frac{8.795 \times 10^6 s + 2.715 \times 10^{14}}{s^2 + 1.012 \times 10^7 s + 2.707 \times 10^{14}}$	97.61%	3.07×10^{-1}	7.21×10^{-8}
	2	$\frac{9.871 \times 10^6 s + 2.712 \times 10^{14}}{s^2 + 1.035 \times 10^7 s + 2.705 \times 10^{14}}$	97.45%	3.15×10^{-1}	7.15×10^{-8}
	3	$\frac{9.555 \times 10^6 s + 2.727 \times 10^{14}}{s^2 + 1.029 \times 10^7 s + 2.719 \times 10^{14}}$	97.60%	3.12×10^{-1}	7.16×10^{-8}
	4	$\frac{9.885 \times 10^6 s + 2.711 \times 10^{14}}{s^2 + 1.035 \times 10^7 s + 2.704 \times 10^{14}}$	97.58%	3.15×10^{-1}	7.14×10^{-8}
	5	$\frac{9.138 \times 10^6 s + 2.740 \times 10^{14}}{s^2 + 1.018 \times 10^7 s + 2.729 \times 10^{14}}$	97.61%	3.08×10^{-1}	7.17×10^{-8}
500kHz	1	$\frac{9.924 \times 10^6 s + 2.653 \times 10^{14}}{s^2 + 1.042 \times 10^7 s + 2.660 \times 10^{14}}$	96.68%	3.20×10^{-1}	7.21×10^{-8}
	2	$\frac{9.902 \times 10^6 s + 2.656 \times 10^{14}}{s^2 + 1.049 \times 10^7 s + 2.661 \times 10^{14}}$	96.58%	3.21×10^{-1}	7.26×10^{-8}
	3	$\frac{9.824 \times 10^6 s + 2.664 \times 10^{14}}{s^2 + 1.042 \times 10^7 s + 2.670 \times 10^{14}}$	96.59%	3.19×10^{-1}	7.22×10^{-8}
	4	$\frac{9.796 \times 10^6 s + 2.644 \times 10^{14}}{s^2 + 1.038 \times 10^7 s + 2.652 \times 10^{14}}$	96.61%	3.19×10^{-1}	7.21×10^{-8}
	5	$\frac{9.763 \times 10^6 s + 2.658 \times 10^{14}}{s^2 + 1.041 \times 10^7 s + 2.664 \times 10^{14}}$	96.61%	3.19×10^{-1}	7.23×10^{-8}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงผลตอบสนองทางเวลาเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากการคำนวณ

จากรูปที่ 4.3 (ข) เป็นผลตอบสนองแบบการหน่วงขาด ซึ่งจากตารางที่ 4.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนจะเห็นว่าค่าอัตราส่วนการหน่วงมีค่าประมาณ 0.315 ซึ่งน้อยกว่า 1 มีเวลาขาขึ้นอยู่ที่ 71.5 นาโนวินาที สังเกตว่าอัตราส่วนการหน่วงและเวลาขาขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.4 ผลตอบสนองที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับค่าจริงที่วัดได้ประมาณ 97%

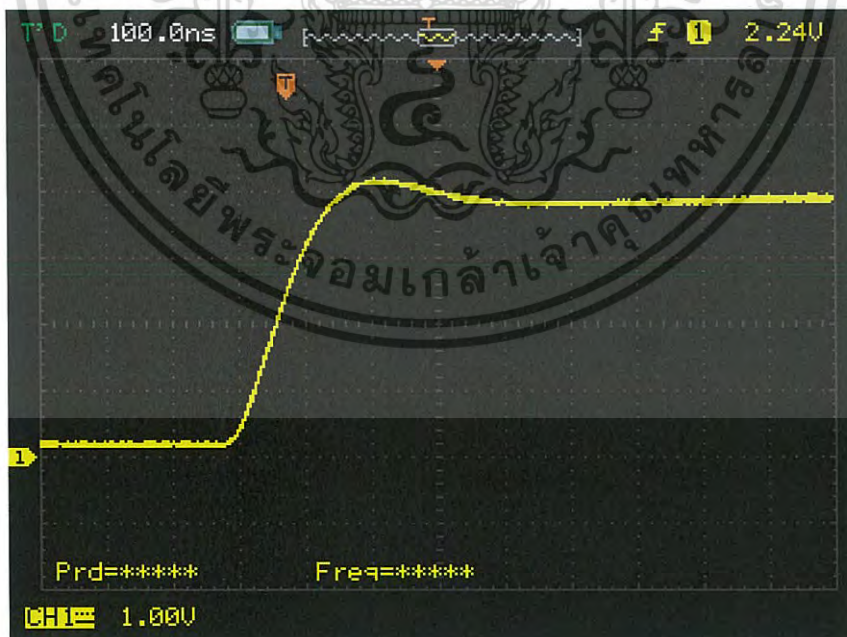
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ความชื้น 20% (w/w) ; เติมน้ำ 30 มิลลิลิตร

4.3.1 กราฟอินพุตแล้วเอาต์พุตที่ความชื้นดิน 20% (w/w)



(ก) กราฟสัญญาณอินพุตที่ความชื้นดิน 20% (w/w)



(ข) กราฟสัญญาณเอาต์พุตที่ความชื้นดิน 20% (w/w)

รูปที่ 4.5 กราฟสัญญาณอินพุต,เอาต์พุตที่ความชื้นดิน 20% (w/w)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำญาติหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

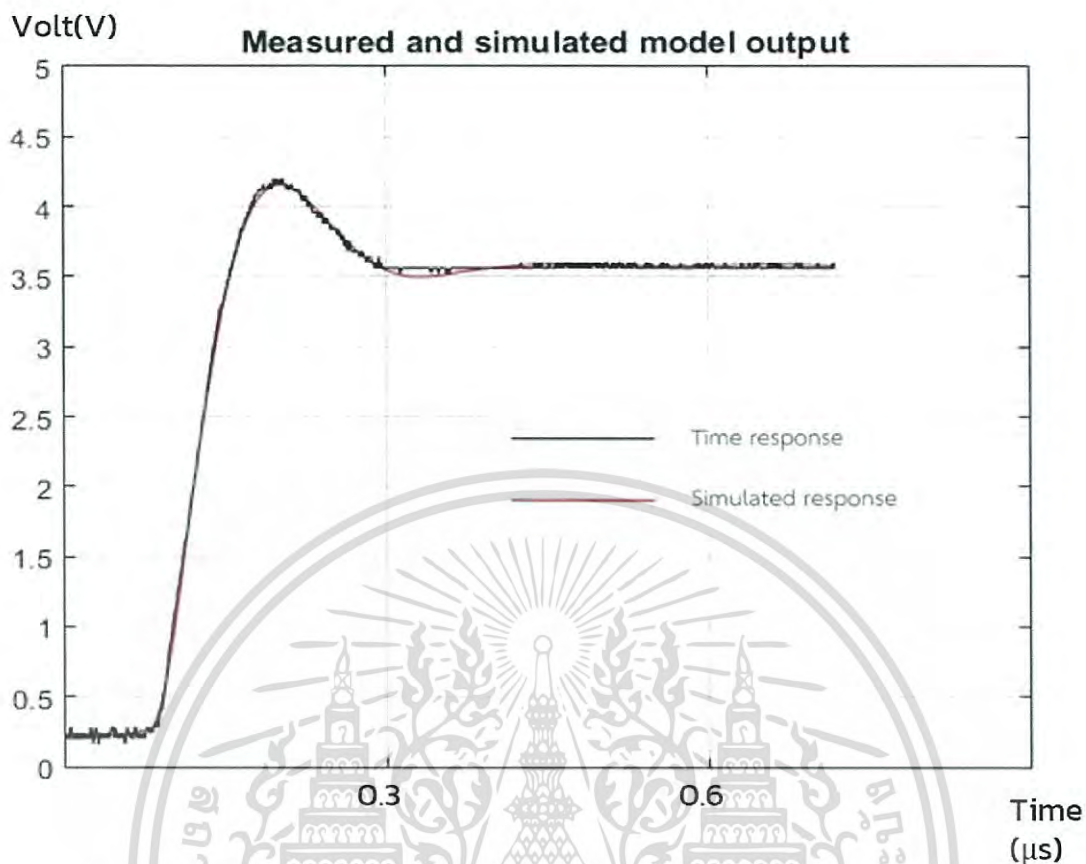
4.3.2 ตารางแสดงค่าที่วัดได้ที่มีความชื้นดิน 20% (w/w) ; เติมน้ำ 30 มิลลิลิตร

ตารางที่ 4.3 เปอร์เซนต์ความถูกต้อง อัตราการหน่วงและเวลาขาขึ้นที่ความชื้น 20%

ความถี่ (kHz)	ครั้งที่	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เปอร์เซนต์ความถูกต้อง	อัตราการหน่วง	เวลาขาขึ้น (วินาที)
1kHz	1	$\frac{6.799 \times 10^6 s + 3.414 \times 10^{14}}{s^2 + 2.554 \times 10^7 s + 3.431 \times 10^{14}}$	96.81%	6.89×10^{-1}	8.49×10^{-8}
	2	$\frac{6.616 \times 10^6 s + 3.510 \times 10^{14}}{s^2 + 2.611 \times 10^7 s + 3.530 \times 10^{14}}$	96.51%	6.95×10^{-1}	8.52×10^{-8}
	3	$\frac{6.653 \times 10^6 s + 3.442 \times 10^{14}}{s^2 + 2.583 \times 10^7 s + 3.462 \times 10^{14}}$	96.75%	6.94×10^{-1}	8.53×10^{-8}
	4	$\frac{8.343 \times 10^6 s + 2.657 \times 10^{14}}{s^2 + 1.127 \times 10^7 s + 2.660 \times 10^{14}}$	96.75%	3.45×10^{-1}	8.54×10^{-8}
	5	$\frac{8.302 \times 10^6 s + 2.658 \times 10^{14}}{s^2 + 1.120 \times 10^7 s + 2.659 \times 10^{14}}$	96.81%	3.43×10^{-1}	8.50×10^{-8}
100kHz	1	$\frac{8.471 \times 10^6 s + 2.676 \times 10^{14}}{s^2 + 1.135 \times 10^7 s + 2.673 \times 10^{14}}$	97.05%	3.47×10^{-1}	8.56×10^{-8}
	2	$\frac{8.570 \times 10^6 s + 2.644 \times 10^{14}}{s^2 + 1.134 \times 10^7 s + 2.642 \times 10^{14}}$	97.03%	3.49×10^{-1}	8.56×10^{-8}
	3	$\frac{9.750 \times 10^6 s + 2.631 \times 10^{14}}{s^2 + 1.178 \times 10^7 s + 2.632 \times 10^{14}}$	97.01%	3.63×10^{-1}	8.86×10^{-8}
	4	$\frac{8.444 \times 10^6 s + 2.654 \times 10^{14}}{s^2 + 1.122 \times 10^7 s + 2.654 \times 10^{14}}$	97.10%	3.44×10^{-1}	8.49×10^{-8}
	5	$\frac{8.501 \times 10^6 s + 2.653 \times 10^{14}}{s^2 + 1.127 \times 10^7 s + 2.651 \times 10^{14}}$	97.08%	3.46×10^{-1}	8.52×10^{-8}
500kHz	1	$\frac{9.122 \times 10^6 s + 2.598 \times 10^{14}}{s^2 + 1.144 \times 10^7 s + 2.608 \times 10^{14}}$	96.82%	3.54×10^{-1}	8.40×10^{-8}
	2	$\frac{9.028 \times 10^6 s + 2.607 \times 10^{14}}{s^2 + 1.139 \times 10^7 s + 2.619 \times 10^{14}}$	96.80%	3.52×10^{-1}	8.50×10^{-8}
	3	$\frac{9.027 \times 10^6 s + 2.596 \times 10^{14}}{s^2 + 1.135 \times 10^7 s + 2.609 \times 10^{14}}$	96.81%	3.51×10^{-1}	8.49×10^{-8}
	4	$\frac{9.057 \times 10^6 s + 2.606 \times 10^{14}}{s^2 + 1.144 \times 10^7 s + 2.617 \times 10^{14}}$	96.81%	3.54×10^{-1}	8.40×10^{-8}
	5	$\frac{9.105 \times 10^6 s + 2.593 \times 10^{14}}{s^2 + 1.142 \times 10^7 s + 2.604 \times 10^{14}}$	96.80%	3.54×10^{-1}	8.39×10^{-8}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกรมการขนส่งทางบก หากท่านใดมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อกรมการขนส่งทางบก โทร. 02-502-1515

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงผลตอบสนองทางเวลาเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากการคำนวณ

จากรูปที่ 4.5 (ข) เป็นผลตอบสนองแบบการหน่วงขาด ซึ่งจากตารางที่ 4.3 ฟังก์ชันถ่ายโอนจะเห็นว่าค่าอัตราส่วนการหน่วงมีค่าประมาณ 0.35 ซึ่งน้อยกว่า 1 มีเวลาขาขึ้นอยู่ที่ 85.1 นาโนวินาที สังเกตว่าอัตราส่วนการหน่วงและเวลาขาขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.6 ผลตอบสนองที่ค่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงที่วัดได้ประมาณ 96.7%

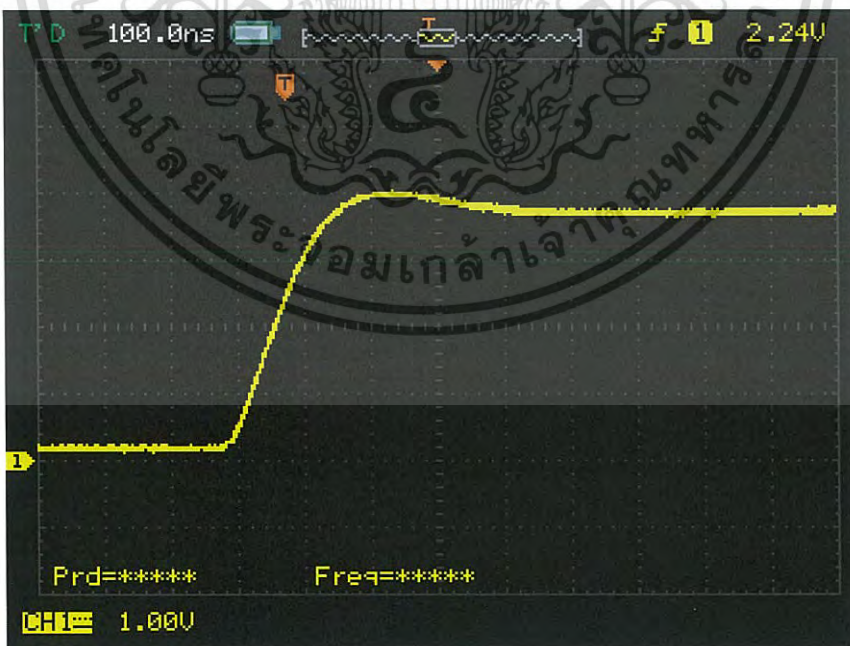
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ความชื้น 30% (w/w) ; เติมน้ำ 45 มิลลิลิตร

4.4.1 กราฟอินพุตแล้วเอาต์พุตที่ความชื้นดิน 30% (w/w)



(ก) กราฟสัญญาณอินพุตที่ความชื้นดิน 30% (w/w)



(ข) กราฟสัญญาณเอาต์พุตที่ความชื้นดิน 30% (w/w)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 4.7 กราฟสัญญาณอินพุต,เอาต์พุตที่ความชื้นดิน 30% (w/w) ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

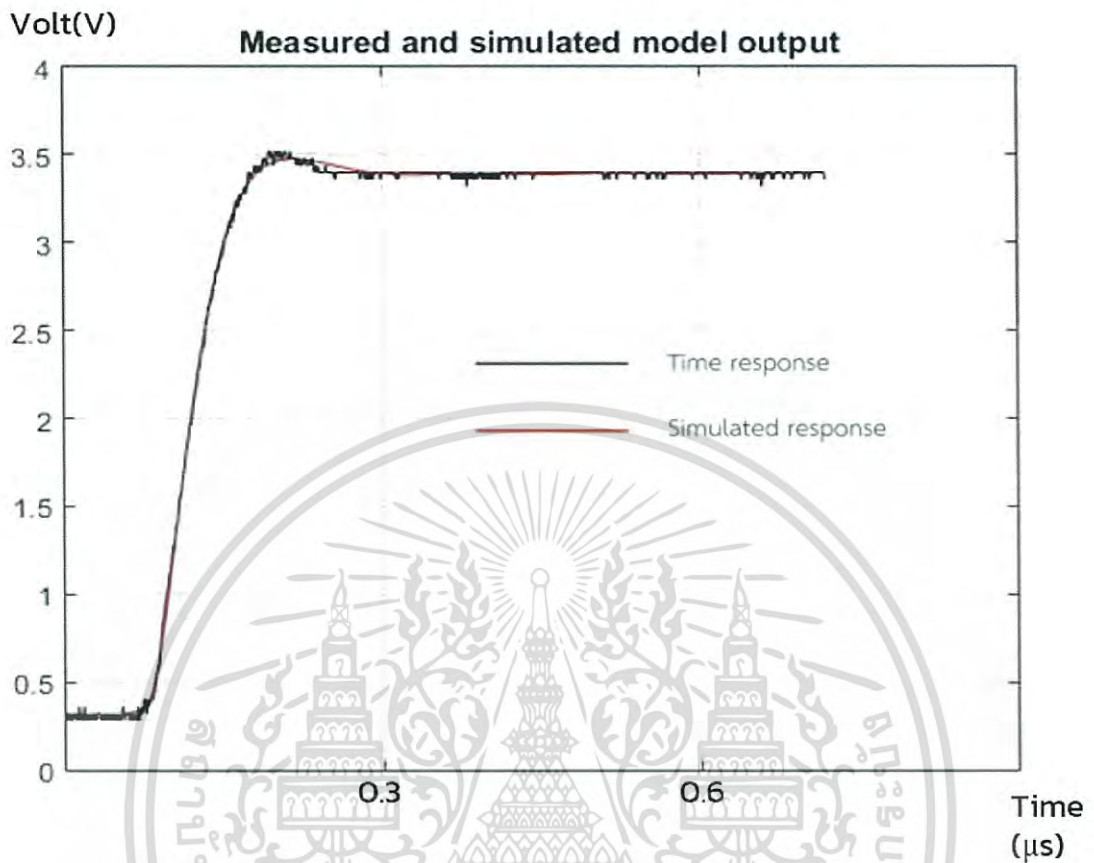
4.4.2 ตารางแสดงค่าที่วัดได้ที่มีความชื้นดิน 30% (w/w) ; เติมน้ำ 45 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.4 เปอร์เซนต์ความถูกต้อง อัตราการหน่วงและเวลาขาขึ้นที่ความชื้น 30%

ความถี่ (kHz)	ครั้งที่	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เปอร์เซนต์ความถูกต้อง	อัตราการหน่วง	เวลาขาขึ้น (วินาที)
1kHz	1	$\frac{7.269 \times 10^6 s + 2.839 \times 10^{14}}{s^2 + 1.541 \times 10^7 s + 2.844 \times 10^{14}}$	97.51%	4.57×10^{-1}	13.58×10^{-8}
	2	$\frac{7.355 \times 10^6 s + 2.832 \times 10^{14}}{s^2 + 1.550 \times 10^7 s + 2.836 \times 10^{14}}$	97.45%	4.60×10^{-1}	13.64×10^{-8}
	3	$\frac{7.367 \times 10^6 s + 2.852 \times 10^{14}}{s^2 + 1.559 \times 10^7 s + 2.833 \times 10^{14}}$	97.48%	4.63×10^{-1}	13.72×10^{-8}
	4	$\frac{7.255 \times 10^6 s + 2.837 \times 10^{14}}{s^2 + 1.554 \times 10^7 s + 2.840 \times 10^{14}}$	97.50%	4.61×10^{-1}	13.71×10^{-8}
	5	$\frac{7.219 \times 10^6 s + 2.860 \times 10^{14}}{s^2 + 1.567 \times 10^7 s + 2.868 \times 10^{14}}$	97.55%	4.63×10^{-1}	13.78×10^{-8}
100kHz	1	$\frac{7.221 \times 10^6 s + 2.842 \times 10^{14}}{s^2 + 1.561 \times 10^7 s + 2.841 \times 10^{14}}$	97.62%	4.63×10^{-1}	13.77×10^{-8}
	2	$\frac{8.093 \times 10^6 s + 2.811 \times 10^{14}}{s^2 + 1.584 \times 10^7 s + 2.841 \times 10^{14}}$	97.58%	4.72×10^{-1}	13.72×10^{-8}
	3	$\frac{8.022 \times 10^6 s + 2.832 \times 10^{14}}{s^2 + 1.587 \times 10^7 s + 2.838 \times 10^{14}}$	97.55%	4.71×10^{-1}	13.09×10^{-8}
	4	$\frac{7.084 \times 10^6 s + 2.837 \times 10^{14}}{s^2 + 1.566 \times 10^7 s + 2.876 \times 10^{14}}$	97.61%	4.62×10^{-1}	13.81×10^{-8}
	5	$\frac{7.192 \times 10^6 s + 2.863 \times 10^{14}}{s^2 + 1.571 \times 10^7 s + 2.868 \times 10^{14}}$	97.62%	4.64×10^{-1}	13.83×10^{-8}
500kHz	1	$\frac{8.084 \times 10^6 s + 2.707 \times 10^{14}}{s^2 + 1.563 \times 10^7 s + 2.730 \times 10^{14}}$	96.92%	4.73×10^{-1}	13.68×10^{-8}
	2	$\frac{8.105 \times 10^6 s + 2.699 \times 10^{14}}{s^2 + 1.570 \times 10^7 s + 2.724 \times 10^{14}}$	96.89%	4.76×10^{-1}	13.10×10^{-8}
	3	$\frac{8.091 \times 10^6 s + 2.673 \times 10^{14}}{s^2 + 1.553 \times 10^7 s + 2.701 \times 10^{14}}$	96.88%	4.72×10^{-1}	13.63×10^{-8}
	4	$\frac{8.099 \times 10^6 s + 2.696 \times 10^{14}}{s^2 + 1.571 \times 10^7 s + 2.720 \times 10^{14}}$	96.91%	4.76×10^{-1}	13.12×10^{-8}
	5	$\frac{8.228 \times 10^6 s + 2.654 \times 10^{14}}{s^2 + 1.564 \times 10^7 s + 2.680 \times 10^{14}}$	96.90%	4.78×10^{-1}	13.74×10^{-8}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สืบค้นจากคลังความรู้ของงานวิจัยของสถาบันเทคโนโลยีพระยาเวรังค์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระยาเวรังค์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองทางเวลาเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากการคำนวณ

จากรูปที่ 4.7 (ข) เป็นผลตอบสนองแบบการหน่วงขาด ซึ่งจากตารางที่ 4.4 ฟังก์ชันถ่ายโอนจะเห็นว่าค่าอัตราส่วนการหน่วงมีค่าประมาณ 0.47 ซึ่งน้อยกว่า 1 มีเวลาขาขึ้นอยู่ที่ 138 นาโนวินาที สังเกตว่าอัตราส่วนการหน่วงและเวลาขาขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.8 ผลตอบสนองที่ค่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงที่วัดได้ประมาณ 96.7%

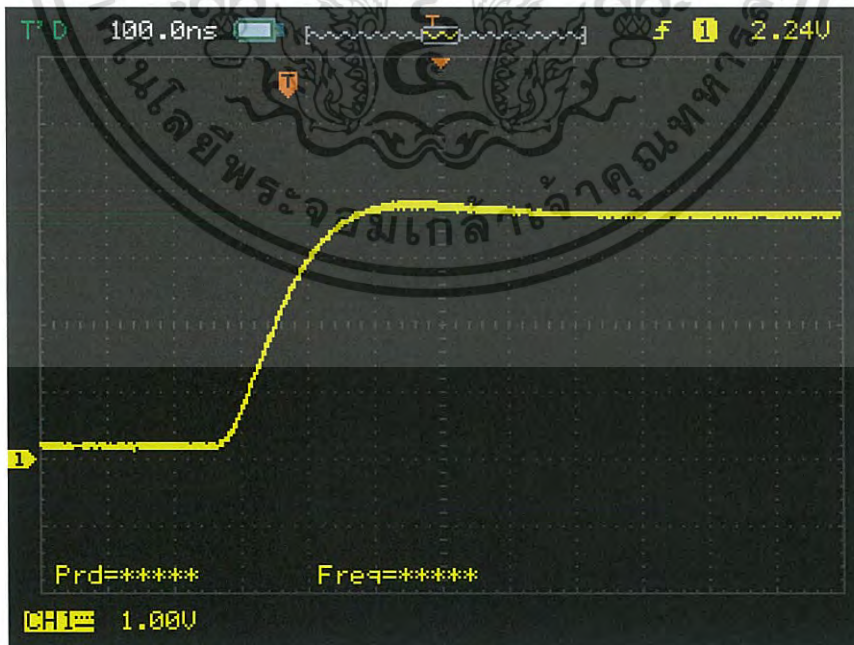
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ความชื้น 40% (w/w) ; เติมน้ำ 60 มิลลิลิตร

4.5.1 กราฟอินพุตแล้วเอาต์พุตที่ความชื้นดิน 40% (w/w)



(ก) กราฟสัญญาณอินพุตที่ความชื้นดิน 40% (w/w)



(ข) กราฟสัญญาณเอาต์พุตที่ความชื้นดิน 40% (w/w)

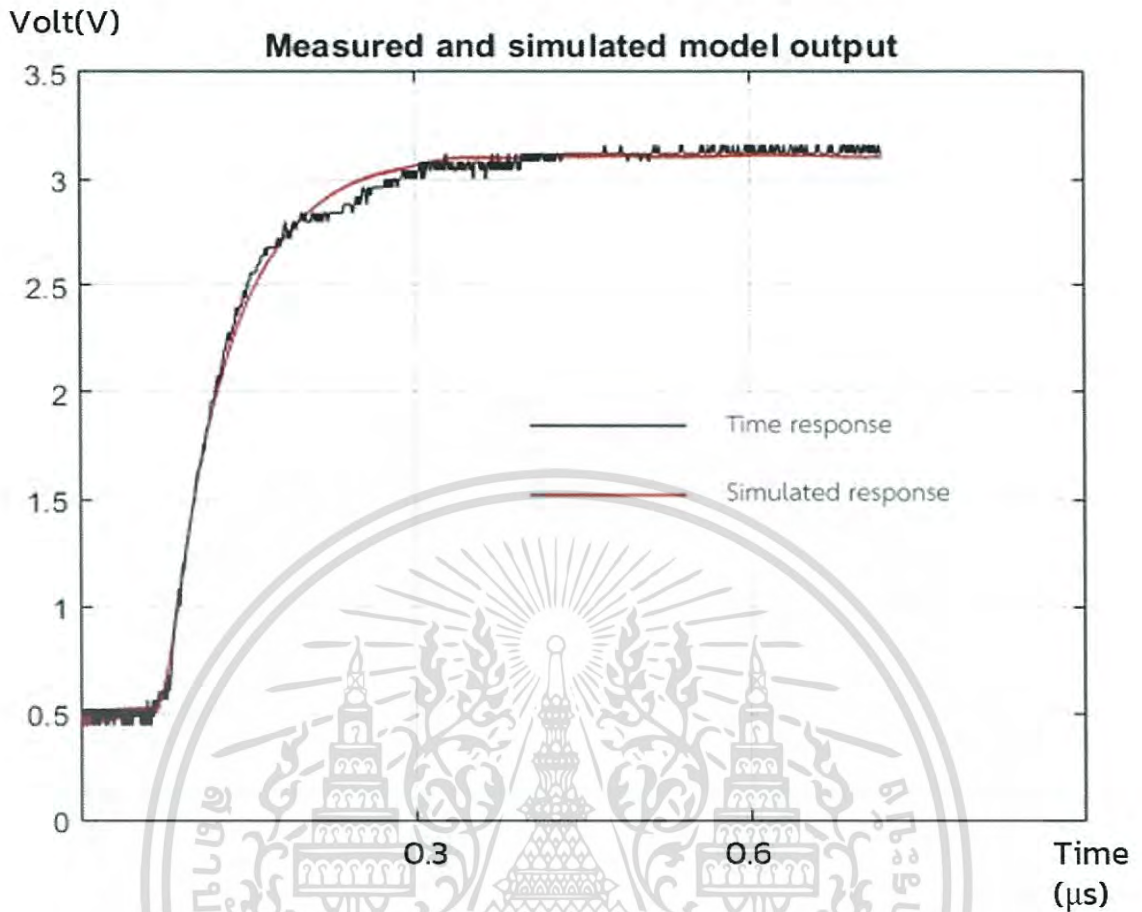
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 4.9 กราฟสัญญาณอินพุต,เอาต์พุตที่ความชื้นดิน 40% (w/w)
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 ตารางแสดงค่าที่วัดได้ที่มีความชื้นดิน 40% (w/w) ; เติมน้ำ 60 มิลลิลิตร

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซนต์ความถูกต้อง อัตราการหน่วงและเวลาขาขึ้นที่ความชื้น 40%

ความถี่ (kHz)	ครั้งที่	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เปอร์เซนต์ความถูกต้อง	อัตราการหน่วง	เวลาขาขึ้น (วินาที)
1kHz	1	$\frac{6.799 \times 10^6 s + 3.414 \times 10^{14}}{s^2 + 2.554 \times 10^7 s + 3.431 \times 10^{14}}$	97.56%	6.89×10^{-1}	28.56×10^{-8}
	2	$\frac{6.616 \times 10^6 s + 3.510 \times 10^{14}}{s^2 + 2.611 \times 10^7 s + 3.530 \times 10^{14}}$	97.61%	6.95×10^{-1}	29.07×10^{-8}
	3	$\frac{6.653 \times 10^6 s + 3.442 \times 10^{14}}{s^2 + 2.583 \times 10^7 s + 3.462 \times 10^{14}}$	97.56%	6.94×10^{-1}	28.96×10^{-8}
	4	$\frac{6.619 \times 10^6 s + 3.515 \times 10^{14}}{s^2 + 2.624 \times 10^7 s + 3.533 \times 10^{14}}$	97.59%	6.98×10^{-1}	29.88×10^{-8}
	5	$\frac{6.543 \times 10^6 s + 3.501 \times 10^{14}}{s^2 + 2.625 \times 10^7 s + 3.521 \times 10^{14}}$	97.58%	6.99×10^{-1}	30.00×10^{-8}
100kHz	1	$\frac{6.301 \times 10^6 s + 4.341 \times 10^{14}}{s^2 + 3.691 \times 10^7 s + 4.427 \times 10^{14}}$	97.01%	8.77×10^{-1}	50.30×10^{-8}
	2	$\frac{6.613 \times 10^6 s + 4.713 \times 10^{14}}{s^2 + 3.557 \times 10^7 s + 4.251 \times 10^{14}}$	96.99%	8.63×10^{-1}	48.56×10^{-8}
	3	$\frac{6.426 \times 10^6 s + 4.237 \times 10^{14}}{s^2 + 3.606 \times 10^7 s + 4.318 \times 10^{14}}$	96.95%	8.68×10^{-1}	49.11×10^{-8}
	4	$\frac{6.519 \times 10^6 s + 4.175 \times 10^{14}}{s^2 + 3.583 \times 10^7 s + 4.258 \times 10^{14}}$	96.98%	8.68×10^{-1}	49.07×10^{-8}
	5	$\frac{6.426 \times 10^6 s + 4.269 \times 10^{14}}{s^2 + 3.647 \times 10^7 s + 4.348 \times 10^{14}}$	97.02%	8.74×10^{-1}	49.90×10^{-8}
500kHz	1	$\frac{7.121 \times 10^6 s + 3.646 \times 10^{14}}{s^2 + 3.272 \times 10^7 s + 3.741 \times 10^{14}}$	96.88%	8.46×10^{-1}	45.56×10^{-8}
	2	$\frac{7.238 \times 10^6 s + 3.686 \times 10^{14}}{s^2 + 3.314 \times 10^7 s + 3.778 \times 10^{14}}$	96.89%	8.53×10^{-1}	46.16×10^{-8}
	3	$\frac{6.997 \times 10^6 s + 3.699 \times 10^{14}}{s^2 + 3.286 \times 10^7 s + 3.791 \times 10^{14}}$	96.88%	8.44×10^{-1}	45.48×10^{-8}
	4	$\frac{6.874 \times 10^6 s + 3.776 \times 10^{14}}{s^2 + 3.328 \times 10^7 s + 3.872 \times 10^{14}}$	96.87%	8.46×10^{-1}	45.84×10^{-8}
	5	$\frac{7.024 \times 10^6 s + 3.617 \times 10^{14}}{s^2 + 3.256 \times 10^7 s + 3.707 \times 10^{14}}$	96.86%	8.45×10^{-1}	45.52×10^{-8}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สอยบ่มและจัดทำขึ้นจากข้อมูลของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยอนุญาตให้ใช้ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้
 ไม่ควรกรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงผลตอบสนองทางเวลาเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากการคำนวณ

จากรูปที่ 4.9 (ข) เป็นผลตอบสนองแบบการหน่วงขาด ซึ่งจากตารางที่ 4.5 ฟังก์ชันถ่ายโอนจะเห็นว่าค่าอัตราส่วนการหน่วงมีค่าประมาณ 0.85 ซึ่งน้อยกว่า 1 มีเวลาขาขึ้นอยู่ที่ 281 นาโนวินาที สังเกตว่าอัตราส่วนการหน่วงและเวลาขาขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.10 ผลตอบสนองที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับค่าจริงที่วัดได้ประมาณ 96.8%

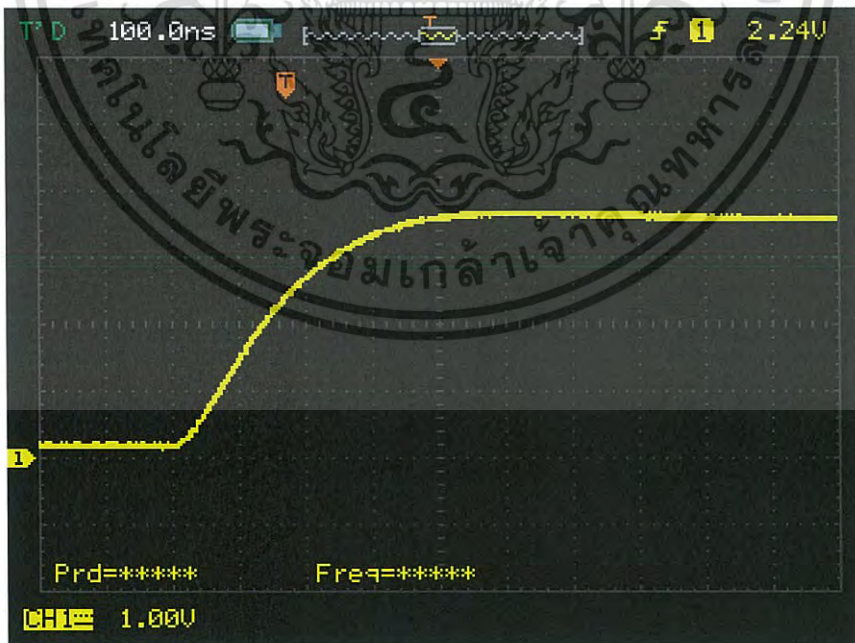
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ความชื้น 50% (w/w) ; เติมน้ำ 75 มิลลิิตร

4.6.1 กราฟอินพุตแล้วเอาต์พุตที่ความชื้นดิน 50% (w/w)



(ก) กราฟสัญญาณอินพุตที่ความชื้นดิน 50% (w/w)



(ข) กราฟสัญญาณเอาต์พุตที่ความชื้นดิน 50% (w/w)

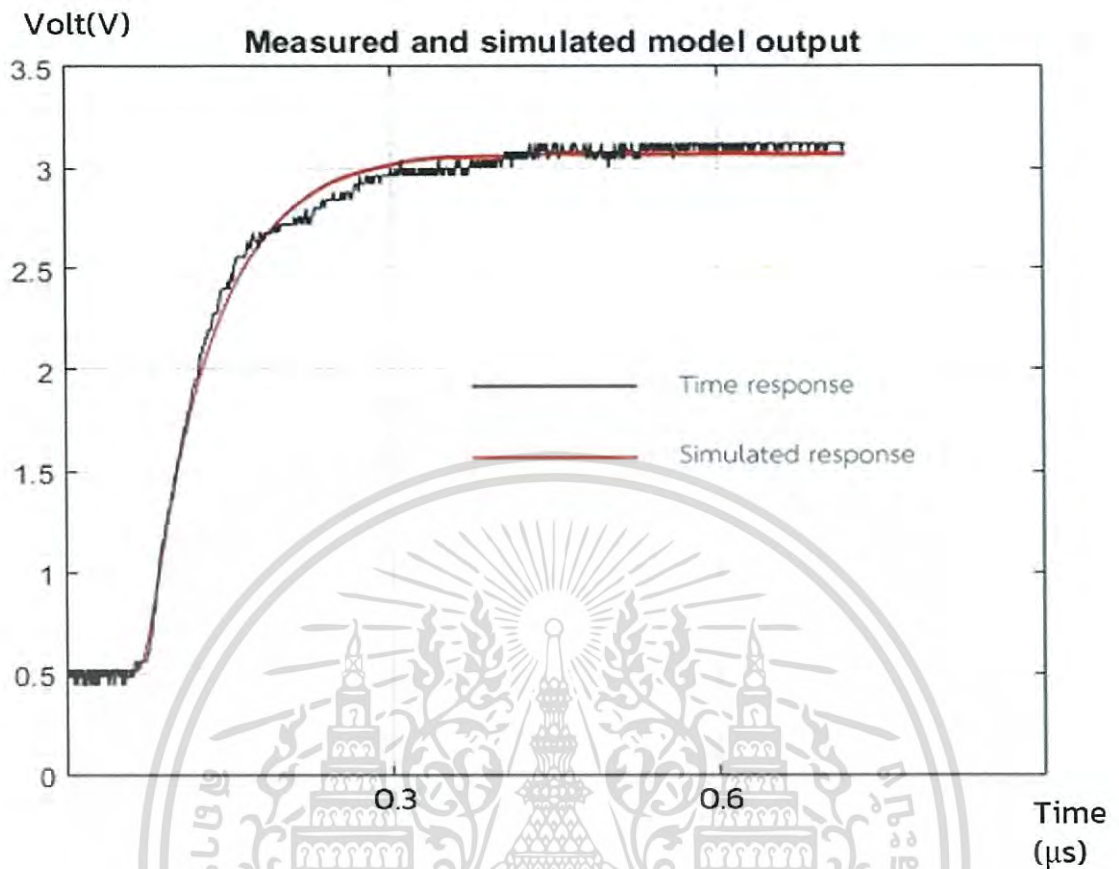
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น มิใช่เอกสารที่เผยแพร่ไปใช้
 ใ้โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 ตารางแสดงค่าที่วัดได้ที่มีความชื้นดิน 50% (w/w) ; เติมน้ำ 75 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซนต์ความถูกต้อง อัตราการหน่วงและเวลาขาขึ้นที่ความชื้น 50%

ความถี่ (kHz)	ครั้งที่	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เปอร์เซนต์ความถูกต้อง	อัตราการหน่วง	เวลาขาขึ้น (วินาที)
1kHz	1	$\frac{1.048 \times 10^7 s + 6.457 \times 10^{13}}{s^2 + 1.884 \times 10^7 s + 6.583 \times 10^{13}}$	96.52%	1.06	47.15×10^{-8}
	2	$\frac{1.089 \times 10^7 s + 7.627 \times 10^{13}}{s^2 + 2.058 \times 10^7 s + 7.765 \times 10^{13}}$	96.49%	1.07	54.29×10^{-8}
	3	$\frac{1.020 \times 10^7 s + 5.321 \times 10^{13}}{s^2 + 1.707 \times 10^7 s + 5.417 \times 10^{13}}$	96.54%	1.06	55.72×10^{-8}
	4	$\frac{1.127 \times 10^7 s + 8.419 \times 10^{13}}{s^2 + 2.185 \times 10^7 s + 8.587 \times 10^{13}}$	96.48%	1.08	56.56×10^{-8}
	5	$\frac{1.030 \times 10^7 s + 5.938 \times 10^{13}}{s^2 + 1.787 \times 10^7 s + 6.051 \times 10^{13}}$	96.53%	1.05	57.31×10^{-8}
100kHz	1	$\frac{1.003 \times 10^7 s + 6.127 \times 10^{13}}{s^2 + 1.798 \times 10^7 s + 6.272 \times 10^{13}}$	96.60%	1.04	47.15×10^{-8}
	2	$\frac{1.010 \times 10^7 s + 5.882 \times 10^{13}}{s^2 + 1.776 \times 10^7 s + 6.013 \times 10^{13}}$	96.55%	1.05	47.15×10^{-8}
	3	$\frac{1.050 \times 10^7 s + 5.321 \times 10^{13}}{s^2 + 1.945 \times 10^7 s + 6.570 \times 10^{13}}$	96.59%	1.00	47.15×10^{-8}
	4	$\frac{1.092 \times 10^7 s + 8.240 \times 10^{13}}{s^2 + 2.135 \times 10^7 s + 8.427 \times 10^{13}}$	96.32%	1.06	47.15×10^{-8}
	5	$\frac{1.020 \times 10^7 s + 6.231 \times 10^{13}}{s^2 + 1.795 \times 10^7 s + 6.385 \times 10^{13}}$	96.54%	1.02	47.15×10^{-8}
500kHz	1	$\frac{1.025 \times 10^7 s + 6.346 \times 10^{13}}{s^2 + 1.835 \times 10^7 s + 6.495 \times 10^{13}}$	96.73%	1.04	49.79×10^{-8}
	2	$\frac{1.078 \times 10^7 s + 6.468 \times 10^{13}}{s^2 + 1.913 \times 10^7 s + 6.614 \times 10^{13}}$	96.72%	1.08	43.36×10^{-8}
	3	$\frac{1.074 \times 10^7 s + 7.458 \times 10^{13}}{s^2 + 2.016 \times 10^7 s + 7.649 \times 10^{13}}$	96.71%	1.05	44.06×10^{-8}
	4	$\frac{1.031 \times 10^7 s + 6.634 \times 10^{13}}{s^2 + 1.873 \times 10^7 s + 6.795 \times 10^{13}}$	96.70%	1.04	40.38×10^{-8}
	5	$\frac{1.160 \times 10^7 s + 9.057 \times 10^{13}}{s^2 + 2.280 \times 10^7 s + 9.289 \times 10^{13}}$	96.72%	1.08	51.18×10^{-8}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สละลิขสิทธิ์ให้กับทางโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ที่ใดก็ได้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงผลตอบสนองทางเวลาเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากการคำนวณ

จากรูปที่ 4.11 (ข) เป็นผลตอบสนองแบบการหน่วงขาด จากตารางที่ 4.6 ฟังก์ชันถ่ายโอนจะเห็นว่าค่าอัตราส่วนการหน่วงมีค่าประมาณ 1.15 ซึ่งมากกว่า 1 มีเวลาขาขึ้นอยู่ที่ 467 นาโนวินาที สังเกตว่าอัตราส่วนการหน่วงและเวลาขาขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.12 ผลตอบสนองที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับค่าจริงที่วัดได้ประมาณ 96%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความขึ้นดินกับเวลาขาขึ้นและอัตราส่วนการหน่วง

จากหัวข้อ 4.1-4.6 ได้นำเวลาขาขึ้นและอัตราส่วนการหน่วงมาพล็อตกราฟในแต่ละความขึ้นต่างๆ พร้อมทั้งประมาณค่าฟังก์ชันความสัมพันธ์และหาเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ได้จากการประมาณค่าโดยตัวแปร y แทนความขึ้นดิน ตัวแปร x แทนเวลาขาขึ้นกับอัตราส่วนการหน่วง โดยแสดงดังกราฟที่ 4.13 และ 4.14 สามารถสรุปได้ดังตาราง

ตารางที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขึ้นดินกับเวลาขาขึ้นและอัตราส่วนการหน่วง

ความถี่ (kHz)	เวลาขาขึ้น		อัตราส่วนการหน่วง	
	ฟังก์ชันความสัมพันธ์	ความถูกต้อง(%)	ฟังก์ชันความสัมพันธ์	ความถูกต้อง(%)
1	$y = 19.961\ln(x) + 343.06$	60.79	$y = 32.833\ln(x) + 49.236$	88.58
100	$y = 22.244\ln(x) + 378.86$	66.22	$y = 31.024\ln(x) + 46.034$	89.79
500	$y = 20.719\ln(x) + 354.75$	65.58	$y = 32.007\ln(x) + 47.074$	89.20

การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดที่ได้จากการประมาณค่ากับข้อมูลจริงที่วัดได้ ในที่นี้ค่า R^2 นิยามจาก

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2} \quad (4.1)$$

โดยที่

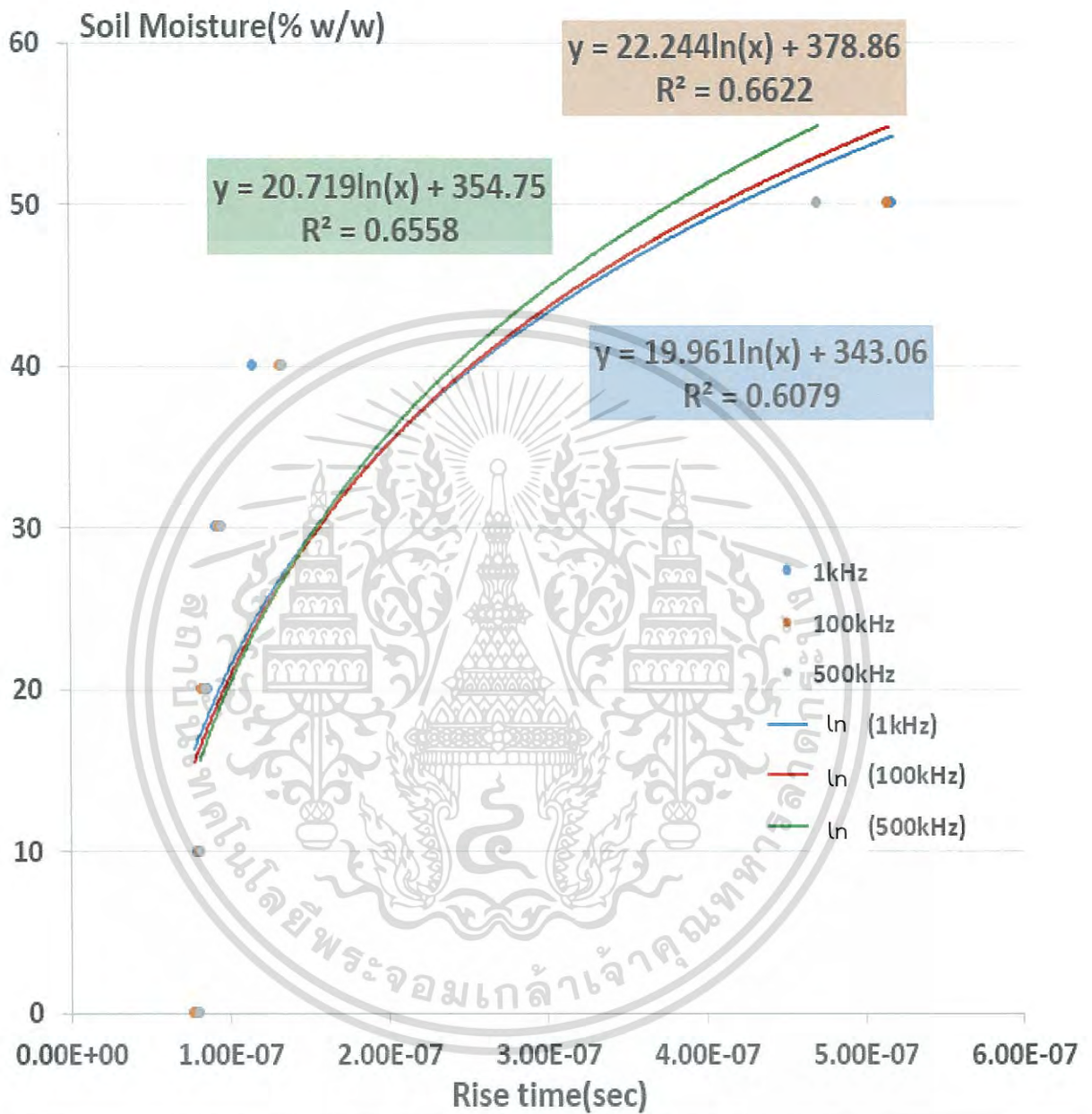
\hat{y} คือ ค่าที่ได้จากการประมาณค่า

\bar{y} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจริง

y คือ ค่าของข้อมูลจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นดินกับเวลาขาขึ้น

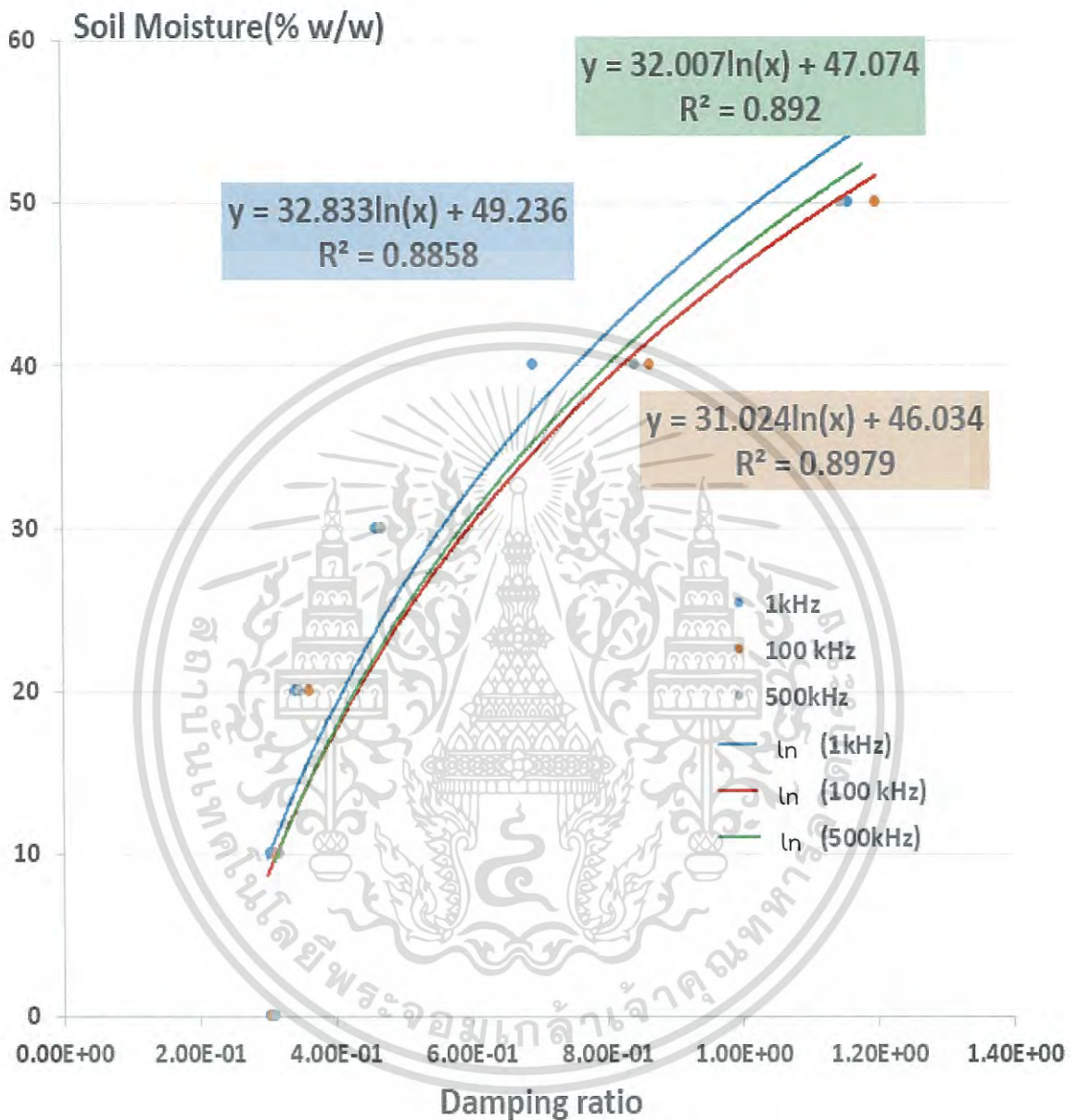


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นดินกับเวลาขาขึ้น

จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นดินกับเวลาขาขึ้นที่ได้ประมาณค่าได้เป็นฟังก์ชัน ln โดยที่ความชื้นมากกว่า 40% จะมีความผิดพลาดค่อนข้างสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นดินกับอัตราการหน่วง



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นดินกับอัตราการหน่วง

จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นดินกับอัตราส่วนการหน่วงที่ได้ ประมาณค่าได้เป็นฟังก์ชัน ln โดยที่ความชื้นมากกว่า 40% จะมีความผิดพลาดค่อนข้างสูง แต่ฟังก์ชันที่ประมาณได้จากอัตราส่วนการหน่วงจะมีความถูกต้องมากกว่าฟังก์ชันที่ประมาณได้จากเวลาขาขึ้นของผลตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการหน่วงในแต่ละความถี่

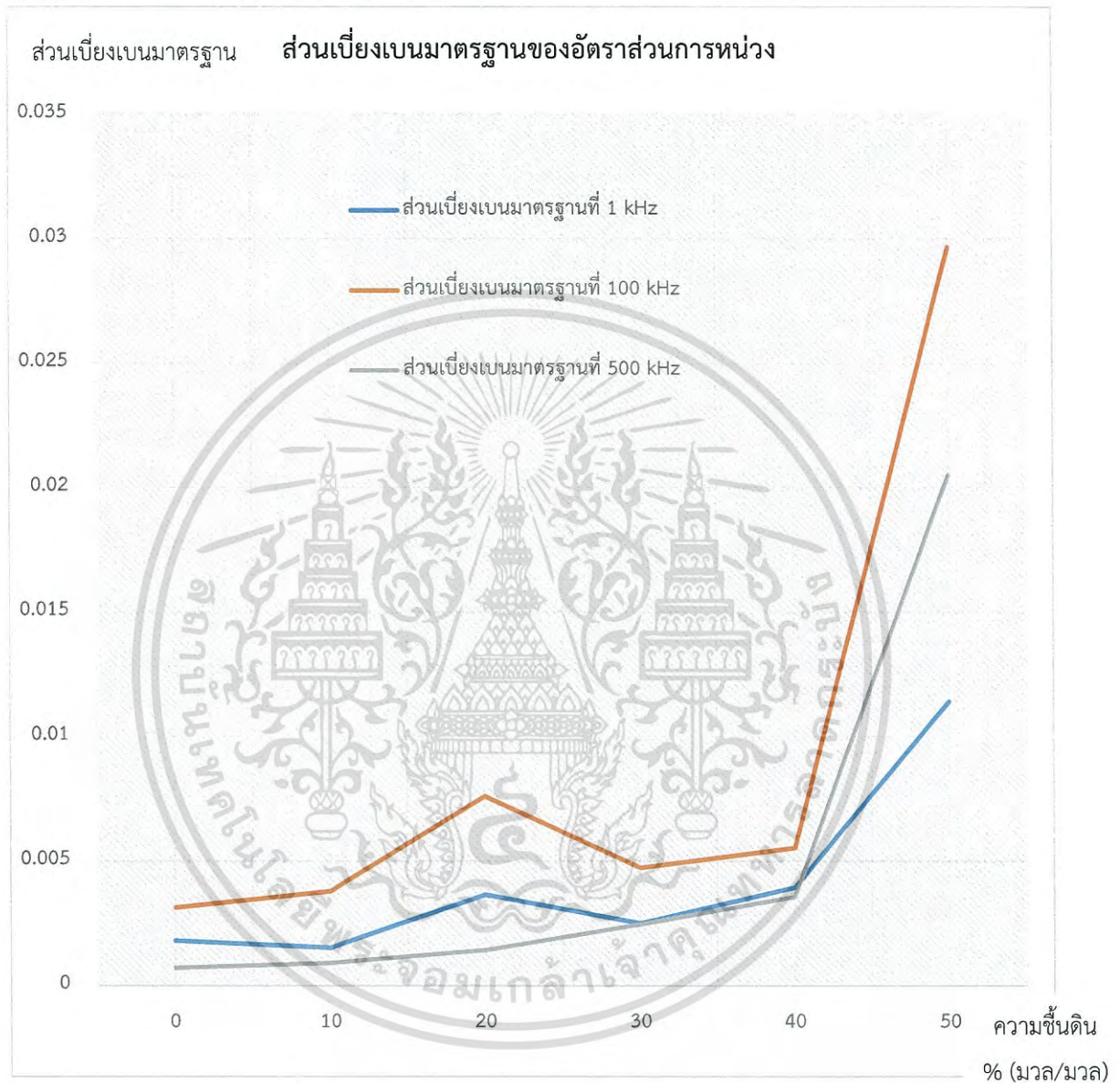
ความชื้น (% w/w)	ความถี่ (kHz)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ความชื้น (%w/w)	ความถี่ (kHz)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
0	1	0.0017889	30	1	0.00249
	100	0.0031305		100	0.0047223
	500	0.0007071		500	0.0024495
10	1	0.0015166	40	1	0.003937
	100	0.0037815		100	0.0055227
	500	0.0008944		500	0.0035637
20	1	0.0036469	50	1	0.0114018
	100	0.0075961		100	0.0296648
	500	0.0014142		500	0.0204939

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวลาขาขึ้นในแต่ละความถี่

ความชื้น (% w/w)	ความถี่ (kHz)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ความชื้น (%w/w)	ความถี่ (kHz)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
0	1	2.51×10^{-10}	30	1	8.37×10^{-11}
	100	4.09×10^{-10}		100	3.05×10^{-10}
	500	2.05×10^{-10}		500	3.13×10^{-10}
10	1	3.27×10^{-10}	40	1	1.92×10^{-9}
	100	3.11×10^{-10}		100	3.85×10^{-9}
	500	1.92×10^{-10}		500	2.95×10^{-9}
20	1	2.24×10^{-10}	50	1	5.24×10^{-8}
	100	1.51×10^{-9}		100	5.07×10^{-8}
	500	5.05×10^{-10}		500	1.88×10^{-8}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการหน่วงกับความชื้นที่เพิ่มขึ้นในความถี่ต่างๆ

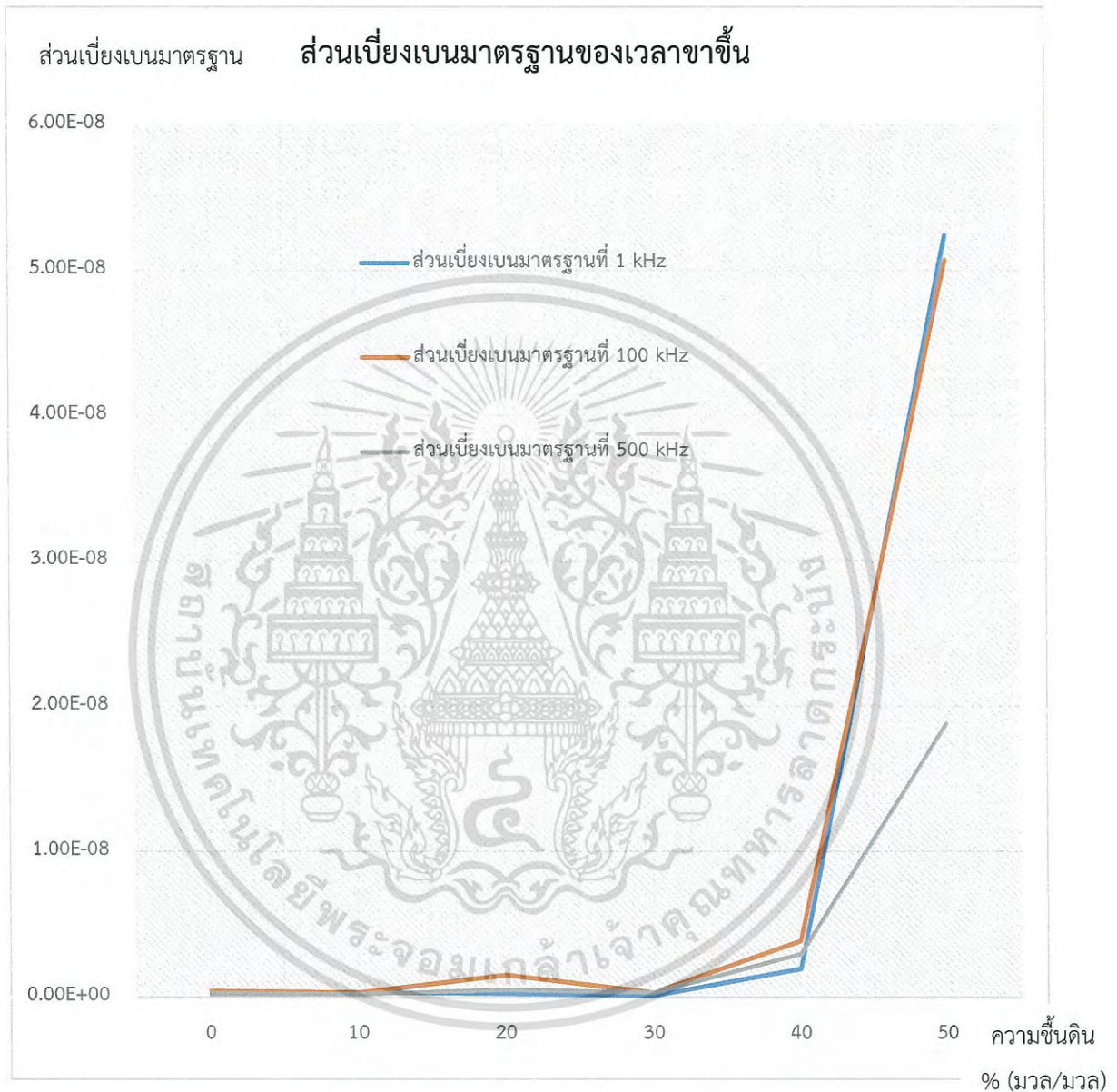


รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการหน่วงกับความชื้น

ในงานวิจัยนี้มีการทำซ้ำในการวัดจำนวน 5 ครั้ง ซึ่งจากผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.8 มาพล็อตเป็นกราฟในรูปที่ 4.15 พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยรวมมีค่าน้อย เมื่อใช้วัดที่ความชื้นต่ำข้อมูลที่ได้จะมีความเกาะกลุ่มกันแต่ที่ความชื้นสูงมากกว่า 40 % ข้อมูลที่ได้จะไม่เกาะกลุ่มกัน แต่ที่ความถี่ 1 kHz ข้อมูลมีการกระจายน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวลาขาขึ้นกับความชื้นที่เพิ่มขึ้นในความถี่ต่างๆ



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวลาขาขึ้นกับความชื้น

ในงานวิจัยนี้มีการทำซ้ำในการวัดจำนวน 5 ครั้ง ซึ่งจากผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.9 มาพล็อตเป็นกราฟในรูปที่ 4.16 พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยรวมมีค่าน้อย เมื่อใช้วัดที่ความชื้นต่ำ ข้อมูลที่ได้จะมีความเกาะกลุ่มกันแต่ที่ความชื้นสูงมากกว่า 40 % ข้อมูลที่ได้จะไม่เกาะกลุ่มกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 เปรียบเทียบความชื้นดินที่ได้จากวิธีการหาเอกลักษณ์ระบบกับเครื่องวัดความชื้นดิน Nap.NPK

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าความชื้นดินที่วัดได้จากวิธีการหาเอกลักษณ์ของระบบกับเครื่องวัดความชื้นดิน Nap.NPK

ความชื้นดิน (% มวล/มวล)	ค่าที่วัดได้จากวิธีการหาเอกลักษณ์ระบบ (% มวล/มวล)	ค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดความชื้นดิน Nap.NPK (% มวล/มวล)
0	1.44	1.50
10	11.35	9.78
20	21.23	20.55
30	30.85	31.41
40	42.14	41.95
50	51.73	51.81

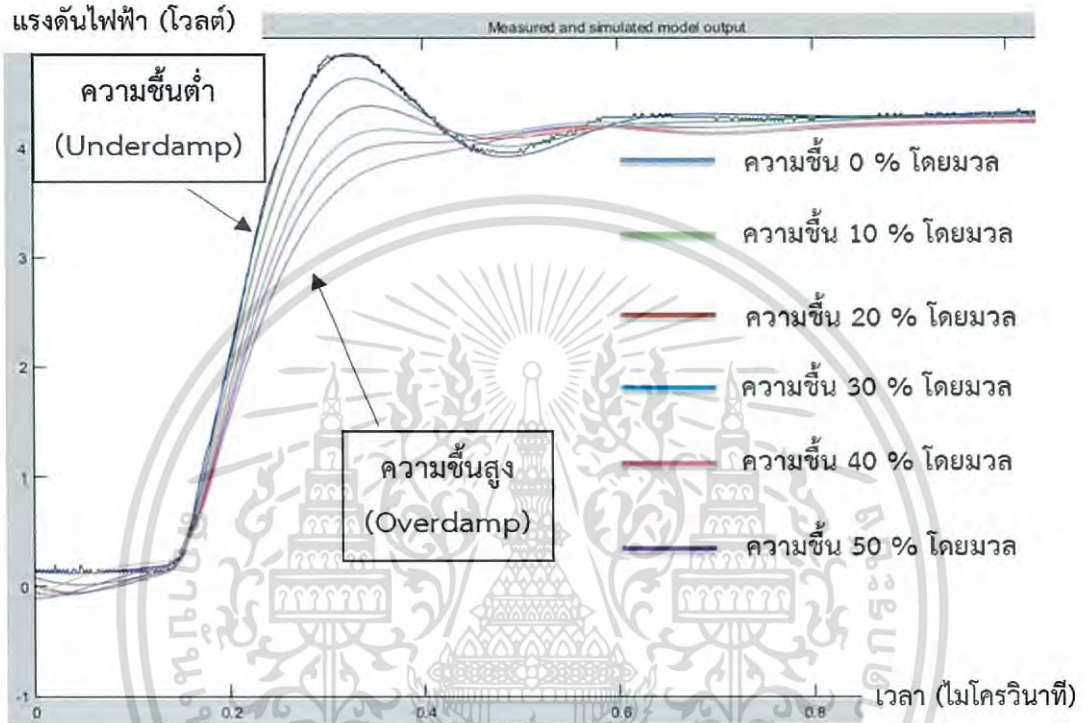
จากผลการทดลองที่ได้ จะสังเกตได้ว่าค่าความชื้นที่วัดได้จากวิธีการหาเอกลักษณ์ระบบกับค่าความชื้นที่วัดได้จากเครื่องวัดความชื้นดิน Nap.NPK มีความใกล้เคียงกันและมีค่าใกล้เคียงกับค่าความชื้นจริงที่ต้องการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง



รูปที่ 5.1 แสดงผลตอบสนองที่เปลี่ยนไปเมื่อความชื้นดินเปลี่ยนไป

จากการทดลองพบว่า เมื่อนำผลตอบสนองทางเวลาที่ได้ในแต่ละความชื้นมาลัดเปรียบเทียบกัน พบว่าที่ความชื้นต่ำจะเกิดการตอบสนองแบบการหน่วงขาด(Underdamp) แต่เมื่อมีความชื้นเพิ่มขึ้นสังเกตอัตราส่วนการหน่วงและเวลาขาขึ้นเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีผลตอบสนองทางเวลาเป็นแบบการหน่วงเกิน(overdamp)

เมื่อประมาณค่าฟังก์ชันของค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้กับความชื้นดินแล้ว พบว่าอัตราส่วนการหน่วงและเวลาขาขึ้นของผลตอบสนองสามารถใช้ในการทำนายความชื้นได้ แต่จะเห็นว่าอัตราส่วนการหน่วงของผลตอบสนองของสัญญาณที่ความถี่ 100 kHz สามารถประมาณค่าของฟังก์ชันความสัมพันธ์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากที่สุด โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง R^2 มากกว่า 80% และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ค่าเวลาขาขึ้นพบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัดและค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมีค่ามากกว่า 80% ในทุกการทดสอบ โดยการทดสอบในการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ย่านความถี่ให้ผลสอดคล้องกัน ต่อมาจะเป็นการเลือกใช้ย่านของความถี่ที่จะสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปใช้ได้จริง โดยทำการทดสอบซ้ำ 5 ครั้งในการวัดพบว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในทุกค่าความถี่มีค่าน้อยในทุกช่วงความชื้นที่วัด จึงมีความซ้ำที่และสามารถนำไปใช้งานจริงได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ก. ควรมีบอร์ดประมวลผลที่สามารถวัดได้ละเอียดกว่านี้ เพื่อจะได้อ่านค่าความชื้นดินได้ละเอียดและแม่นยำ

ข. ควรทำการทดลองโดยใช้สัญญาณหลายความถี่มากกว่านี้ เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ว่าแบบไหนที่ให้ผลตอบสนองดีที่สุด

ค. สามารถนำไปต่อยอดได้ การออกแบบการวัดความชื้นแบบอาศัยอัตราการหน่วงของระบบสามารถนำไปวัดความชื้นดินในแต่ละชั้นของดินได้ โดยสามารถสร้างเป็นโพรบ 3 คู่ ที่มีความยาวแตกต่างกันความชื้นที่วัดได้ก็จะเป็นความชื้นในแต่ละชั้นของดิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

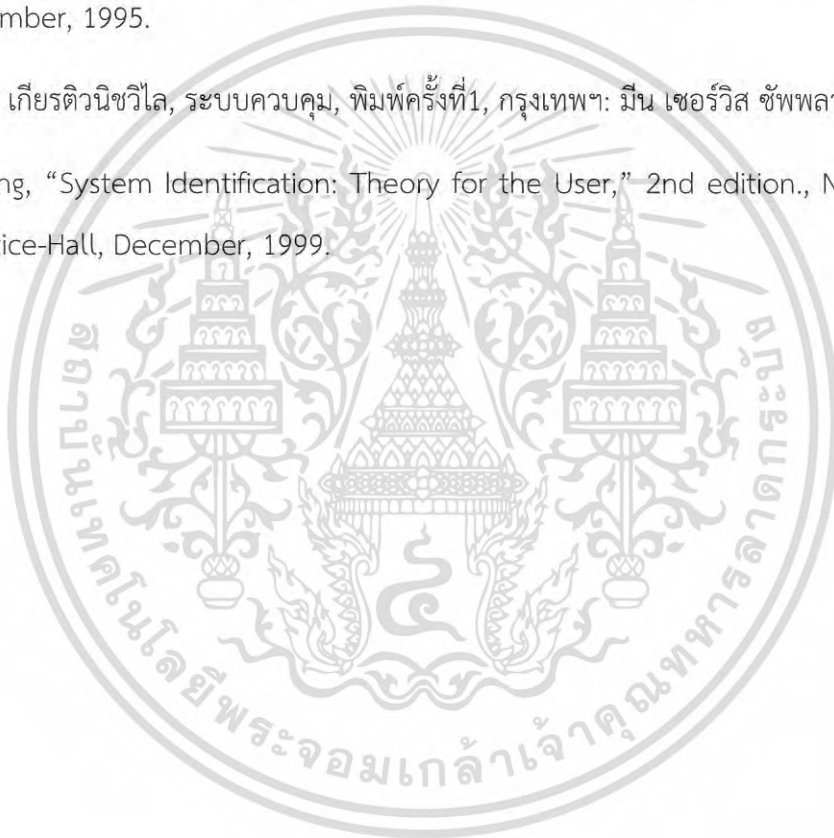
เอกสารอ้างอิง

- [1] Shruti Suriyakumar, Beulah J M Rajkumar and G. Jayanthi Kalaivani, “Fabrication of low cost soil moisture sensor for irrigation water management,” International Journal of Advanced Research, Vol.2, No.8, pp.560-571, August, 2014.
- [2] C. E. Mullins, O. T. Mandiringana, T. R. Nisbet and M. N. Aitken “ The design, limitations, and use of a portable tensiometer,” Journal of Soil Science, Vol.37, No.4, pp.691–700, December, 1986.
- [3] T. E. Franz, M. Zreda, R. Rosolem, and T. P. A. Ferre, “A universal calibration function for determination of soil moisture with cosmicray neutrons,” Hydrol. Earth Syst. Sci., Vol.17, No.2, pp.453–460, February, 2013.
- [4] Joaquin J. Casanova, Member, IEEE, Steven R. Evett, and Robert C. Schwartz” Design of Access-Tube TDR Sensor for Soil Water Content: Theory” iee sensors journal, Vol.12, No.6, pp.1979-1986, June, 2012
- [5] R. Schwartz, S. Evett, M. Pelletier, and J. Bell, “Complex permittivity model for time domain reflectometry soil water content sensing: I. Theory,” Soil Sci Soc. Amer. J.,Vol.73, No.3, pp.886–897, June, 2008.
- [6] Wojciech Skierucha and Andrzej Wilczek, “A FDR Sensor for Measuring Complex Soil Dielectric Permittivity in the 10–500 MHz Frequency Range”, Polish Academy of Sciences, Sensors, Vol.10, No.4, pp.3314-3329, April, 2010
- [7] Susha Lekshmi S.U. , D.N. Singh b, Maryam Shojaei Baghini , “A critical review of soil moisture measurement”, Measurement, Vol.54, pp.92-105, April, 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [8] Pariva Dobriyal, Ashi Qureshi, Ruchi Badola, Syed Ainul Hussain, “A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management.”, Journal of Hydrology, Vol.458, pp.110-117, June, 2012
- [9] Ward E. Patitz, Billy C. Brock, Edward G. Power, “ Measurement of Dielectric and Magnetic Properties of Soil, ” 1st edition., United States Department of Energy., November, 1995.
- [10] สมยศ เกียรติวนิชวิไล, ระบบควบคุม, พิมพ์ครั้งที่1, กรุงเทพฯ: มีน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2554
- [11] L. Jung, “System Identification: Theory for the User,” 2nd edition., New Jersey:, Prentice-Hall, December, 1999.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาความชื้นดินด้วยอัตราส่วนการหน่วงโดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

Measuring of soil moisture by damping ratio using system identification method

พิธา พจมานพิมล* วรชาติ สุวรรณงาม อนรรฆพล แสนทน สมยศ เกียรติวนิชวิไล
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาเทคนิคการวัดความชื้นดินโดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ(system identification) และนำไปสร้างเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) เพื่อใช้หาค่าพารามิเตอร์ทางพลศาสตร์ ได้แก่ เวลาขาขึ้น (rise time) และอัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) เมื่อความชื้นดินเปลี่ยนไป การทดลองจะทำการป้อนสัญญาณพัลส์ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 500 กิโลเฮิร์ตซ์เข้าไปในดินผ่านอิเล็กโทรดโลหะ โดยพิจารณาให้ดินเป็นส่วนประกอบหนึ่งในวงจรสมมูลของวงจรอนุกรมอันดับสอง จากการทดลองพบว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าและผลตอบสนองของระบบจะขึ้นอยู่กับค่าความชื้นในดินด้วย นอกจากนี้อัตราส่วนการหน่วงเป็นค่าที่ดีที่สุดที่นำไปประมาณฟังก์ชันความสัมพันธ์กับความชื้นดินเพื่อใช้ในการทำนายต่อไป

คำสำคัญ : ความชื้นในดิน พารามิเตอร์ทางพลศาสตร์ ผลตอบสนองเชิงเวลา

Abstract

This paper proposes a new technique for measuring soil moisture by using the system identification method to formulate the transfer function. The dynamic parameters e.g. rise time and damping ratio varying by the changing in soil moisture were evaluated. In the experiment, the pulses with 1 kHz, 100 kHz and 500 kHz were fed into the soil via the metal electrode; in the proposed technique, the soil is considered as a component in second order series circuit. As results indicated, the electrical properties and system response are depended on the moisture in the soil. In addition, the damping ratio is the best parameter for approximating the prediction function of the soil moisture.

Key words : soil moisture, dynamic parameters, time domain response.

1. บทนำ

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการปรับอุณหภูมิของดิน และลำดับของพืชให้เหมาะสมตามเวลา นอกจากนี้ยังช่วยรักษาสมดุลกรด-ด่างและลดดินเค็มได้ การรดน้ำให้พืชจึงควรคำนึงถึงเวลาและระวางไม่ให้ขาดน้ำนาน จะเกิดผลเสียต่อการเจริญเติบโต การพิจารณาค่าความชื้นดินมีหลายวิธี ซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป โดยเครื่องมือที่ใช้วัดความชื้นดินมีหลายชนิด เช่น

แท่งวัดความชื้น [1] (Moisture block) หลักการทำงาน คือ วัดความสามารถในการนำไฟฟ้าของตัวกลาง ในรูปความต้านทานไฟฟ้าซึ่งตัวกลางจะเป็นวัสดุที่ดูดซึมความชื้นได้ เช่น แท่งยิบซัม เป็นต้น โดยให้ตัวกลางได้รับความชื้นจากดิน เมื่อดินมีความชื้นมาก ตัวกลางจะมีความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และความต้านทานลดลง ซึ่งวิธีนี้ใช้เวลาานกว่าวัดความชื้นดินแต่ละครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทนซิโอมิเตอร์ [2] (Tensiometer) เป็นอีกวิธีหนึ่ง ใช้อุปกรณ์ที่วัดความชื้นดิน มีลักษณะเป็นท่อพลาสติกปลายด้านล่างเป็นกระเปาะเซรามิก มีรูพรุน และด้านบนมี Vacuum gauge ไว้วัดค่าความดันสุญญากาศ หลักการทำงานคือ เติมน้ำลงไปจนหลอดพลาสติกให้เต็ม แล้วนำไปเสียบในดิน หากดินมีความชื้นต่ำ น้ำในกระเปาะเซรามิกจะค่อยๆ แพร่ออกมา ระดับน้ำในท่อพลาสติกลดลง เกิดความดันสุญญากาศขึ้น ทำให้ Vacuum gauge วัดได้ค่าสูง

เครื่องมือวัดการแผ่รังสีนิวตรอน [3] (Neutron moisture gauge) ลักษณะเป็นกล่อง มีท่ออลูมิเนียมเสียบลงดิน ภายในกล่องบรรจุอุปกรณ์ผลิตรังสีนิวตรอนที่มีพลังงานและความเร็วสูง เมื่อยิงลงไปในดิน นิวตรอนจะไปชนกับไฮโดรเจนในโมเลกุลของน้ำและทำให้นิวตรอนสูญเสียพลังงาน หากดินมีความชื้นมากจำนวนนิวตรอนที่สูญเสียพลังงานก็จะมาก

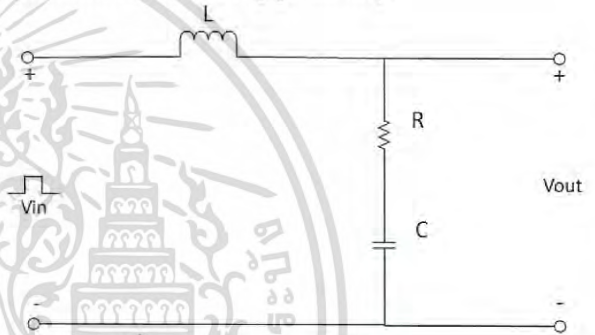
เกจวัดแบบทีดีอาร์ [4] (TDR sensor) หลักการทำงานคือวัดเวลาของสัญญาณพัลส์ เมื่อกระทบกับโมเลกุลน้ำแล้วสะท้อนกลับไปยังวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้วัดระดับสัญญาณ ในความถี่ไมโครเวฟที่สูงมาก โดยเปรียบว่าน้ำในดินสามารถนำสนามไฟฟ้าเชิงซ้อน [5] สัญญาณจึงสะท้อนได้ ซึ่งถ้าวัดในดินที่มีความชื้นสูงจะได้เวลาในการตอบสนองสั้น

ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแนวคิดในการวัดความชื้นดินโดยพิจารณาจากอัตราส่วนการหน่วงของผลตอบสนอง ที่คำนวณมาจากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ โดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนในแต่ละค่าความชื้น [6] เนื่องจากในดินมีคุณสมบัติคล้ายตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ จึงสมมติฐานได้ว่าเมื่อดินมีความชื้นเปลี่ยนแปลงจะส่งผลทำให้ค่า อิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของดินเปลี่ยนไป และเมื่ออิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของดินเปลี่ยนก็จะส่งผลให้ฟังก์ชันถ่ายโอนเปลี่ยนไปในแต่ละค่าความชื้น นั่นก็หมายความว่า

อัตราส่วนการหน่วงและเวลาขาขึ้นที่หามาได้ในแต่ละค่าความชื้นก็จะมีค่าเปลี่ยนไปเช่นกัน

2. แบบจำลองวงจรอันดับสองของดินและการหาพารามิเตอร์ระบบ

[7] โดยทั่วไปแล้ว ดินจะมีองค์ประกอบหลักคือน้ำและแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งจะมีสมบัติทางไฟฟ้าคล้ายตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ ดังนั้นจึงทำการต่อตัวเหนี่ยวนำเข้าไป เพื่อให้เป็นวงจรอนุกรมอันดับสอง RLC โดยจะป้อนแรงดันไฟฟ้าเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณอินพุตและจะทำการวัดสัญญาณที่ตกคร่อมดินเป็นสัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 1 วงจรอนุกรมอันดับสอง

จากนั้นจะทำการแปลงจากรูปการวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าวงรอบของเคอร์เซอร์ อนุกรมอันดับสอง เพื่อหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอน โดยให้แรงดันเอาต์พุตเป็นแรงดันคร่อมตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ จะได้สมการของระบบดังนี้

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{\left(\frac{R}{L}\right)s + \frac{1}{LC}}{s^2 + \left(\frac{R}{L}\right)s + \frac{1}{LC}} \quad (1)$$

โดยผลตอบสนองเชิงเวลาในรูปแบบทั่วไปของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบอันดับสอง โดยแรงดันเอาต์พุตคร่อมตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ แสดงดังสมการนี้

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 1 จะเห็นได้ว่า ค่า $1/LC$ จะมีค่าเทียบเท่ากับค่า ω_n^2 ในสมการที่ 2 ในทำนองเดียวกับค่า R/L ในสมการที่ 1 มีค่าเทียบเท่า $2\zeta\omega_n$ ในสมการที่ 2

โดยอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้จะทำมาจากวัสดุสแตนเลสมีลักษณะเป็นทรงกระบอกปลายแหลม มีส่วนโลหะยาวประมาณ 4 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างโพรบประมาณ 2.5 เซนติเมตร โดยดินที่ใช้จะเป็นดินร่วนมีน้ำหนัก 150 กรัม และจะทำการเติมน้ำที่ละ 15 มิลลิลิตร เพื่อเป็นการเพิ่มความชื้นที่ละ 10% โดยมวล

วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ [8] (system identification) มีโครงสร้างหลายรูปแบบ ยกตัวอย่างเช่น ARX, ARMAX, OE ฯลฯ แต่ในรายงานนี้จะพิจารณาแบบจำลองแบบความผิดพลาดเอาต์พุต OE (output error) เนื่องจากง่ายต่อการคำนวณและไม่ได้ต้องการทราบถึงโมเดลของการรบกวน โดยใช้ MATLAB Toolbox ในการหาค่าพารามิเตอร์ โดยจะเก็บข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่วัดได้จากระบบ พร้อมกับกำหนดจำนวนของโพลและจำนวนซีโรของระบบ โดยจะอาศัยการสุ่มค่าตามแบบของโมเดลกล่องเทา (Gray box model) คือ รู้ค่าจำนวนของโพลและซีโรของระบบแต่ไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ โดยมีการทดสอบหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดโดยเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆของระบบไปจนกระทั่งได้ความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองกับระบบจริงที่แตกต่างน้อยที่สุด มีสมการแบบจำลองแบบความผิดพลาดเอาต์พุต ดังนี้

$$y(t) = \frac{B(q)}{A(q)} u(t - nk) + e(t) \quad (3)$$

$$B(q) = b_1 + b_2 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb+1} \quad (4)$$

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na} \quad (5)$$

โดยที่

$$y(t) \text{ คือ ค่าเอาต์พุต ณ เวลา } t$$

$u(t)$ คือ ค่าอินพุต ณ เวลา t

n_b คือ จำนวนซีโรรอบวงหนึ่ง

n_a คือ จำนวนโพลของระบบ

n_k คือ จำนวนการสุ่มข้อมูล ก่อนที่อินพุต

จะมีผลต่อเอาต์พุตของระบบ

$e(t)$ คือ ค่าความผิดพลาด

b_1, \dots, b_{nb} และ a_1, \dots, a_{na} คือค่าพารามิเตอร์ของระบบ

การหาค่าพารามิเตอร์จะทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันต่อไปนี้มีค่าน้อยที่สุด

$$\begin{aligned} \theta^* &= \arg \min_{\theta} \{e^T e\} \\ &= \arg \min_{\theta} \{(y - Z\theta)^T (y - Z\theta)\} \end{aligned} \quad (6)$$

โดยที่ค่าประมาณหาได้จาก

$$\hat{\theta} = (Z^T Z)^{-1} Z^T y \quad (7)$$

โดยที่

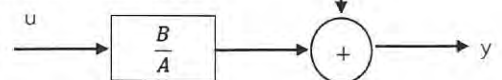
$$Z = [u(1), u(2), \dots, u(N)]$$

$$y = [y(1), y(2), \dots, y(N)]$$

สมการที่ 4 และ 5 เป็นสมการที่อยู่ในรูปของสมการไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete time) เพื่อให้ง่ายจะต้องมีการแปลงให้อยู่ในรูปสมการต่อเนื่องของเวลา (continuous time) โดยใช้วิธี Laplace และ Z transform เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ หรือโดยใช้คำสั่งใน MATLAB คือ d2c (discrete to continuous) จะได้สมการในแบบฟอร์มสมการที่ 8

$$G(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_{nb}s^{(nb-1)} + b_{nb-1}s^{(nb-2)} + \dots + b_1}{s^{na} + a_{na}s^{(na-1)} + \dots + a_1} \quad (8)$$

ตัวอย่างของแบบจำลอง OE เขียนในรูปของบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



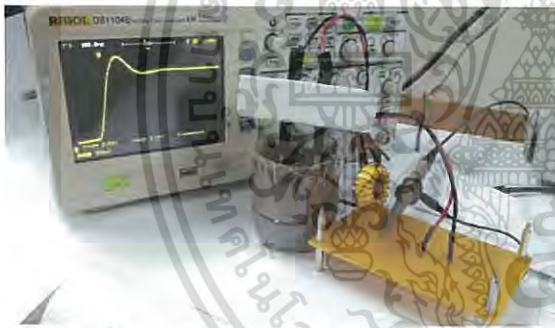
รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลอง OE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลการทดลองและการจำลองค่า

หัวข้อนี้แสดงผลที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (system identification) และขั้นตอนการบันทึกข้อมูลกราฟสัญญาณและการออกแบบการทดลอง ชุดทดสอบและวงจรที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3 โดยขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

1. สร้างสัญญาณพัลส์โดยมีความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 500 กิโลเฮิร์ตซ์
2. นำสัญญาณที่ได้มาป้อนให้กับวงจร
3. นำออสซิลโลสโคปมาบันทึกข้อมูลและกราฟ
4. บันทึกการทดลอง นำข้อมูลสัญญาณที่วัดได้ไปสร้างแบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ทฤษฎีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification)



รูปที่ 3 วงจรที่พัฒนาขึ้นใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ป้อนสัญญาณอินพุทของระบบ คือสัญญาณพัลส์ความถี่ 1, 100 และ 500 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่มี duty cycle 50% และตรวจวัดสัญญาณเอาต์พุทที่ตกคร่อมดิน โดยสัญญาณที่วัดจะถูกกำหนดช่วงข้อมูลและย่านการวัดที่เหมาะสม เพื่อให้ค่าที่วัดได้มีกรรพวงวนของสัญญาณน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามช่วงข้อมูลการวัดจะต้องมากพอที่จะสร้างแบบจำลองเพื่อความแม่นยำของการวัดเช่นกัน

เมื่อทำการบันทึกกราฟสัญญาณต่างๆ จะนำข้อมูลที่ไปสร้างแบบจำลองของระบบ โดยใช้เครื่องมือการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (system

identification tool) ในโปรแกรม MATLAB โดยขั้นตอนดังนี้

1. เลือกข้อมูลสัญญาณ โดยเก็บตัวอย่างข้อมูลมาอย่างละ 600 ข้อมูลที่เวลาในการสุ่มเท่ากับ 2 นาโนวินาที
2. ใช้เครื่องมือ การวิเคราะห์พารามิเตอร์ระบบในโปรแกรม MATLAB โดยเลือกรูปแบบของแบบจำลองในที่นี้ใช้แบบจำลองพหุนามรูปแบบ OE (Output-Error) เนื่องจากมีความเหมาะสมในการหาแบบจำลองระบบที่มีเพียงค่าอินพุทและเอาต์พุทเดียว และไม่ทราบค่าลักษณะของตัวรบกวน โดยมีรายละเอียดของตัวแปรในแบบจำลองดังนี้
 - nb คือ จำนวนซีโรของระบบบวกด้วยหนึ่ง
 - nf คือ จำนวนโพลของระบบ
 - nk คือ จำนวนการสุ่มข้อมูลก่อนที่ค่าอินพุทจะมีผลต่อค่าเอาต์พุทของระบบ

เนื่องจากทราบถึงโครงสร้างแบบจำลองเบื้องต้นในสมการที่ 1 อยู่แล้วจึงพิจารณาใช้แบบจำลองแบบกล่องเทา (Gray-Box model) คือ เป็นแบบจำลองที่กำหนดจำนวนโพลและซีโรในระบบเท่านั้น เนื่องจากพิจารณาให้ระบบเป็นแบบจำลองวงจรรอนุกรมอันดับสองและมีแรงดันเอาต์พุทคร่อมตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ จึงกำหนดให้ระบบมีจำนวนโพลเท่ากับ 2 และจำนวนซีโรเท่ากับ 1

- 4) หาแบบจำลองและเปรียบเทียบผลที่ได้กับค่าเอาต์พุทจริงที่วัดมาได้จากวงจร มีหน่วยวัดค่าความถูกต้องเป็นเปอร์เซ็นต์ดังแสดงในสมการที่ 8

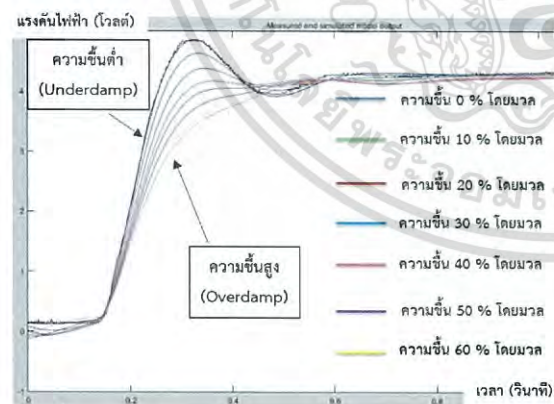
- 5) สร้างฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบในรูปแบบของแบบจำลองต่อเนื่องเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ในระบบ เมื่อทำตามขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นแล้วจะทำซ้ำโดยการเปลี่ยนค่าความถี่ของเครื่องสร้างสัญญาณเป็น 100 กิโลเฮิร์ตซ์และ 500 กิโลเฮิร์ตซ์ตามลำดับ นอกจากนี้ในการปรับความถี่จะมีการเปลี่ยนค่าการเติมน้ำลงไปครั้งละ 15 มิลลิลิตร และวัดเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐานที่ได้จัดซื้อ คือ เครื่องมือวัดรุ่น SPH-KC-300-20C เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ถือว่าผิดกฎหมาย

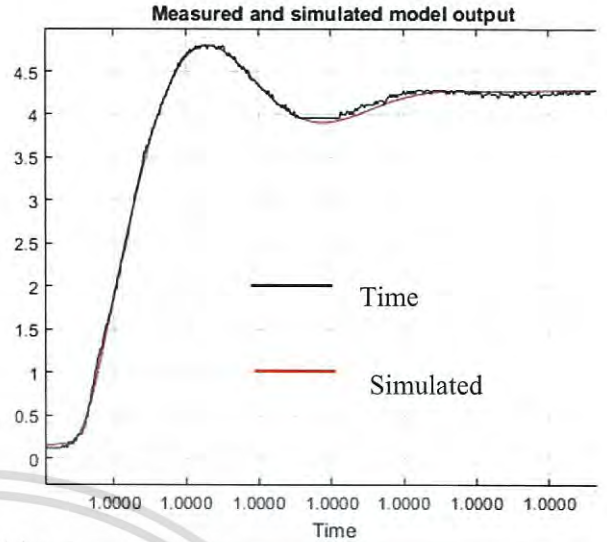
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมวลผลด้วยเทคนิคการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System identification) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบในรูปของแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลาและเมื่อปรับเป็นแบบจำลองต่อเนื่องทางเวลาแล้วจะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ทางพลศาสตร์ได้

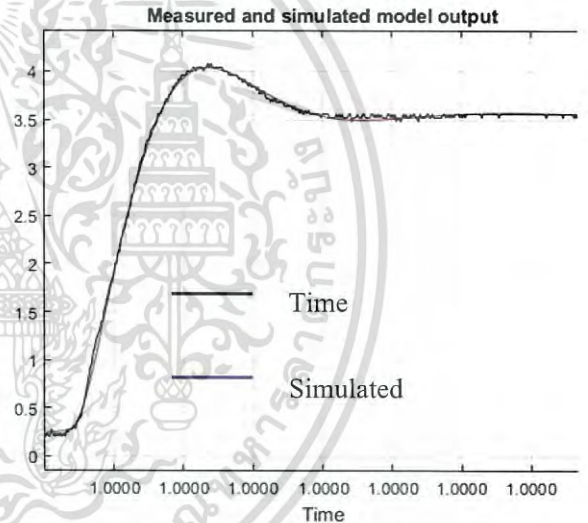
เมื่อหาค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนแล้ว จะสามารถหาค่าอัตราการหน่วงและเวลาขาขึ้นได้ โดยรูปที่ 4 แสดงผลตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงเมื่อความชื้นของดินเปลี่ยนแปลงไป จากรูปจะเห็นได้ชัดเจนว่า ความชื้นมีผลต่อคุณลักษณะของผลตอบสนองเชิงเวลาหรืออีกนัยหนึ่งความชื้นมีผลต่อพารามิเตอร์ทางพลศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ จากผลที่ได้พบว่า การวัดความชื้นในดินที่มีความชื้นน้อยจะมีผลตอบสนองเป็นแบบการหน่วงขาด (underdamped) ซึ่งอัตราการหน่วงน้อยกว่าหนึ่งแต่มากกว่าศูนย์และมีเวลาขาขึ้นที่น้อยจึงทำให้การเข้าสู่เสถียรภาพได้ไว แต่เมื่อดินมีความชื้นเพิ่มขึ้นจะมีผลตอบสนองเป็นแบบหน่วงเกิน (overdamped) ซึ่งมีอัตราการหน่วงมากกว่าหนึ่ง และมีเวลาขาขึ้นที่มากจึงทำให้เข้าสู่เสถียรภาพได้ช้า



รูปที่ 4 แนวโน้มของผลตอบสนองเอาท์พุทเมื่อดินมีความชื้นเปลี่ยนแปลง



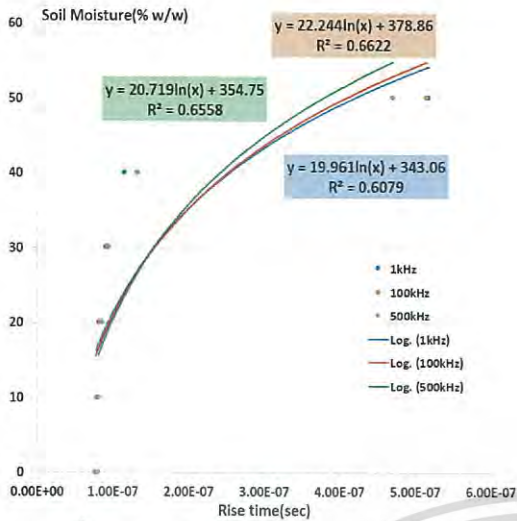
รูปที่ 5 เปรียบเทียบ Time response กับ Simulated response ที่ความชื้น 0% โดยมวล



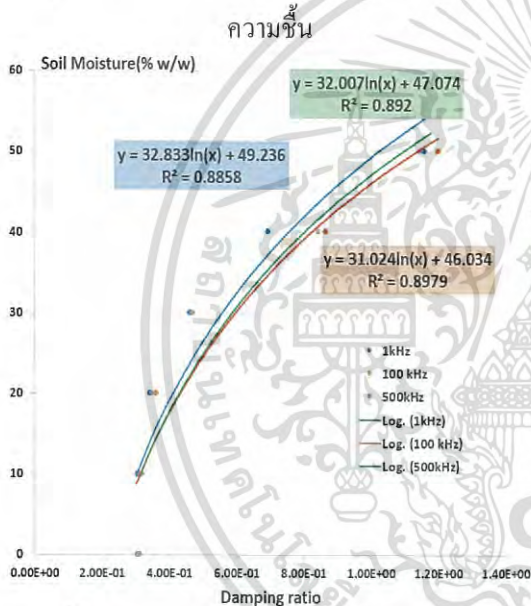
รูปที่ 6 เปรียบเทียบ Time response กับ Simulated response ที่ความชื้น 40% โดยมวล

จากรูปที่ 5 และ 6 แสดงกราฟของ Time response เทียบกับ Simulated response จะสังเกตเห็นได้ว่าผลตอบสนองจากที่วัดจากข้อมูลจริงมีค่าใกล้เคียงกับผลตอบสนองที่ได้จากการ Simulate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้นกับค่า



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นดินกับอัตราส่วนการหน่วงได้

จากรูปที่ 7 และ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นดินกับเวลาขาขึ้นกับอัตราส่วนการหน่วงตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์กับเวลาขาขึ้นที่ทำนายได้จะมีความถูกต้องน้อยกว่า 70% ในทางกลับกันความสัมพันธ์กับอัตราส่วนการหน่วงที่ทำนายได้จะมีค่าสูงถึง 89.79% ที่ความถี่ 100 kHz

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นดินกับเวลาขาขึ้นแสดงในรูปที่ 5 จากรูปจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวค่อนข้างไม่เป็นเชิงเส้นและมีความแตกต่างระหว่างสมการทำนายและค่าจริง

พบว่า ค่าความถูกต้องของแบบจำลองจะมีมากกว่า 75% ในทุกแบบจำลองและเมื่อทำการนำค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่สนใจคือ อัตราส่วนการหน่วงมาเปรียบเทียบและสร้างความสัมพันธ์พบว่า ความถูกต้องของสมการทำนายมีค่ามากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ผลของการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้ ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์

$$y = 32.833 \ln(x) + 49.236$$

ที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์

$$y = 32.007 \ln(x) + 47.074$$

ที่ความถี่ 500 กิโลเฮิร์ตซ์

$$y = 31.024 \ln(x) + 46.034$$

เมื่อ y คือ ความชื้นดิน ในหน่วยเปอร์เซ็นต์และ x คือ ค่าอัตราส่วนการหน่วง

ในรูปที่ 6 และ 7 แสดงให้เห็นว่าสมการการทำนายมีค่าเข้าใกล้ค่าจริงมากขึ้น และค่า R^2 ของอัตราส่วนการหน่วงมีค่าดีขึ้นมากกว่าของเวลาขาขึ้นในทุกความถี่ ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่า R^2 ในการวัดความถูกต้องของสมการความสัมพันธ์ซึ่งเป็นที่ชัดเจนว่า ค่าความถูกต้องของแบบอัตราส่วนการหน่วงเป็นโดเมนจะมีค่ามากกว่าการใช้ค่าอัตราส่วนการหน่วงเป็นชัดเจน ในที่นี้ค่า R^2 นิยามจาก

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2} \quad (3)$$

โดยที่

\hat{y} คือ ค่าที่ได้จากการประมาณค่า

\bar{y} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจริง

y คือ ค่าของข้อมูลจริง

ตารางที่ 1 ค่า R^2 ของการวัดพารามิเตอร์ทางพลศาสตร์กับความชื้นของดิน

ความถี่	เวลาขาขึ้น	อัตราส่วนการหน่วง
1 kHz	60.79%	88.58%
100 kHz	66.22%	89.79%
500 kHz	65.58%	89.20%

ในงานวิจัยนี้มีการทำซ้ำในการวัดจำนวน 5 ครั้ง ซึ่งจากผลที่ได้แสดงในตารางที่ 2 ผลที่ได้พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละช่วงมีค่าน้อยที่สุด แสดงว่าข้อมูลที่ได้ในช่วงความถี่และความชื้นที่วัดมีความเกาะกลุ่มกัน ตารางที่ 2 แสดงค่าระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการแห้งกับความชื้นที่เพิ่มขึ้นในความถี่ต่างๆ

ความชื้น (%w/w)	ความถี่ (kHz)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	1	0.0017889
	100	0.0031305
	500	0.0007071
10	1	0.0015166
	100	0.0037815
	500	0.0008944
20	1	0.0036469
	100	0.0075961
	500	0.0014142
30	1	0.00249
	100	0.0047223
	500	0.0024495
40	1	0.003937
	100	0.0055227
	500	0.0035637
50	1	0.0114018
	100	0.0296648
	500	0.0204939

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองและผลที่ได้พบว่า เมื่อมีความชื้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าลดลงแต่ความสามารถในการเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ ดังนั้นจากสมการที่ 1 และ 2 จะเห็นว่าความถี่ธรรมชาติมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการแห้งและเวลาขาขึ้นมีเพิ่มขึ้นไปด้วย ค่าอัตราการแห้งสามารถใช้ในการทำนายสมการความชื้นได้อย่างถูกต้องแม่นยำ โดยมีค่า R^2 มากกว่า 80% และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ค่าเวลาขาขึ้นพบว่ามีค่า R^2 ต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัดและค่า R^2 มีค่ามากกว่า 80% ในทุกการทดสอบ โดยการทดสอบในการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ย่านความถี่ให้ผลสอดคล้องกัน ต่อมาจะเป็นการเลือกใช้ย่านของความถี่ที่สามารถนำไปใช้ได้จริง โดยทำการทดสอบซ้ำ 5 ครั้งในการวัดพบว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในทุกค่าความถี่มีค่าน้อยในทุกช่วงความชื้นที่วัด จึงมีความซ้ำที่และสามารถนำไปใช้งานจริงได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ภายใต้รหัสโครงการวิจัยเลขที่ KREF055706

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Shruti Suriyakumar, Beulah J M Rajkumar and G. Jayanthi Kalaivani, "Fabrication of low cost soil moisture sensor for irrigation water management," International Journal of Advanced Research, Vol.2, No.8, pp.560-571, August, 2014.
- [2] C. E. Mullins, O. T. Mandiringana, T. R. Nisbet and M. N. Aitken "The design, limitations, and use of a portable tensiometer," Journal of Soil Science, Vol.37, No.4, pp.691-700, December, 1986.
- [3] T. E. Franz, M. Zreda, R. Rosolem, and T. P. A. Ferre, "A universal calibration function for determination of soil moisture with cosmicray

- neutrons,” *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol.17, No.2, pp.453–460, February, 2013.
- [4] Joaquin J. Casanova, Member, IEEE, Steven R. Evett, and Robert C. Schwartz” Design of Access-Tube TDR Sensor for Soil Water Content: Theory” *ieee sensors journal*, Vol.12, No.6, pp.1979-1986, June, 2012
- [5] R. Schwartz, S. Evett, M. Pelletier, and J. Bell, “Complex permittivity model for time domain reflectometry soil water content sensing: I. Theory,” *Soil Sci Soc. Amer. J.*, Vol.73, No.3, pp.886–897, June, 2008.
- [6] Wojciech Skierucha and Andrzej Wilczek, “A FDR Sensor for Measuring Complex Soil Dielectric Permittivity in the 10–500 MHz Frequency Range”, *Polish Academy of Sciences, Sensors*, Vol.10, No.4, pp.3314-3329, April, 2010
- [7] J.E. Campbell, “Dielectrics properties and influence of conductivity in soils at one to 50 MHz,” *Soil Sci. Soc.*, Vol.54, No.2, pp.332-341, April, 1989.
- [8] L. Jung, “System Identification: Theory for the User,” 2nd edition., New Jersey:, Prentice-Hall, December, 1999.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นาย พิธา พจมานพิมล
วัน เดือน ปีเกิด 5 มิถุนายน 2535
ที่อยู่ 629/39 ถนนพิชัย ตำบลปากเพรียว อำเภอเมือง
จังหวัด สระบุรี 18000
ประวัติการศึกษา พ.ศ.2558
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้