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) และอัตราการการหน่วง (damping ratio) เมื่อความชื้นดินเปลี่ยนไป การทดลองจะทำการป้อนสัญญาณพัลส์ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ 100 กิโลเฮิรตซ์ และ 500 กิโลเฮิรตซ์เข้าไปในดินผ่านอิเล็กโตรดโลหะ โดยพิจารณาให้ดินเป็นส่วนประกอบหนึ่งในวงจรสมมูลของวงจรอนุกรมอันดับสอง จากการทดลองพบว่า คุณสมบัติทางไฟฟ้าและผลตอบสนองของระบบจะขึ้นอยู่กับค่าความชื้นในดินด้วย 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.

Keywords : soil moisture, dynamic parameters, time domain response.

1. บทนำ

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการปรับอุณหภูมิของดินและลำต้นของพืชให้เหมาะสมตามเวลา นอกจากนี้ยังช่วยรักษาสมดุลกรด-ด่างและลดดินเค็มได้ การรดน้ำให้พืชจึงควรคำนึงถึงเวลาและระวังไม่ให้ขาดน้ำนาน จะเกิดผลเสียต่อการเจริญเติบโต การพิจารณาหาค่าความชื้นดินมีหลายวิธี ซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป โดยเครื่องมือที่ใช้วัดความชื้นดินมีหลายชนิด เช่น

แท่งวัดความชื้น [1] (Moisture block) หลักการทำงานคือ วัดความสามารถในการนำไฟฟ้าของตัวกลาง ในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานไฟฟ้าซึ่งตัวกลางจะเป็นวัสดุที่ดูดซึมความชื้นได้ เช่น แท่งยิบซัม เป็นต้น โดยให้ตัวกลางได้รับความชื้นจากดิน เมื่อดินมีความชื้นมาก ตัวกลางจะมีความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และความต้านทานลดลง ซึ่งวิธีนี้ใช้เวลานานกว่าวัดความชื้นดินแต่ละครั้ง

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

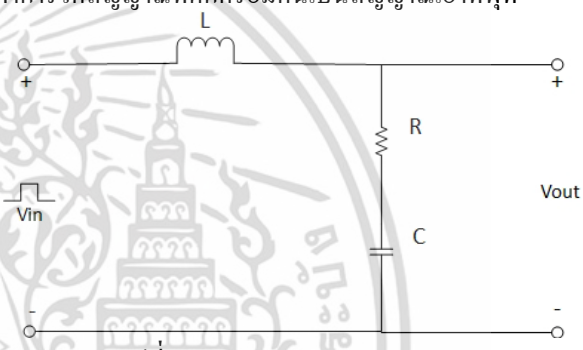
เครื่องมือวัดการแผ่รังสีนิวตรอน [3] (Neutron moisture gauge) ลักษณะเป็นกล่อง มีท่ออลูมิเนียมเสียบลงดิน ภายในกล่องบรรจุอุปกรณ์ผลิตรังสีนิวตรอนที่มีพลังงานและความเร็วสูง เมื่อยิงลงไปในดิน นิวตรอนจะไปชนกับไฮโดรเจนในโมเลกุลของน้ำและทำให้นิวตรอนสูญเสียพลังงาน หากดินมีความชื้นมากจำนวนนิวตรอนที่สูญเสียพลังงานก็จะมาก

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

ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแนวคิดในการวัดความชื้นดินโดยพิจารณาจากอัตราส่วนการหน่วงของผลตอบสนองที่คำนวณมาจากฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบ โดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ(System Identification)เพื่อหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนในแต่ละค่าความชื้น [6]เนื่องจากในดินมีคุณสมบัติคล้ายตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ จึงสมมติฐานได้ว่าเมื่อดินมีความชื้นเปลี่ยนแปลงจะส่งผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของดินเปลี่ยนไป และเมื่ออิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของดินเปลี่ยนก็จะส่งผลให้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนเปลี่ยนไปในแต่ละความชื้น นั่นก็หมายความว่าอัตราส่วนการหน่วงและเวลาขาขึ้นที่หามาได้ในแต่ละความชื้นก็จะมีค่าเปลี่ยนไปเช่นกัน

2. แบบจำลองวงจรอันดับสองของดินและการหาพารามิเตอร์ระบบ

[7]โดยทั่วไปแล้ว ดินจะมีองค์ประกอบหลักคือน้ำและแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งจะมีสมบัติทางไฟฟ้าคล้ายตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ ดังนั้นจึงทำการต่อตัวเหนี่ยวนำเข้าไป เพื่อให้เป็นวงจรอนุกรมอันดับสอง RLC โดยจะป้อนแรงดันไฟฟ้าเป็นสัญญานสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณอินพุทและจะทำการวัดสัญญาณที่ตกคร่อมดินเป็นสัญญาณเอาท์พุท



รูปที่ 1 วงจรอนุกรมอันดับสอง

จากนั้นจะทำการวนลูปวงจรจากการวิเคราะห์แรงแรงดันไฟฟ้าวงรอบของเคอร์ชอฟ อนุกรมอันดับสอง เพื่อหาสมการฟังก์ชั่นถ่ายโอน โดยให้แรงดันเอาต์พุตเป็นแรงดันคร่อมตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ จะได้สมการของระบบดังนี้

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

โดยผลตอบสนองเชิงเวลาในรูปแบบทั่วไปของฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบอันดับสอง โดยแรงดันเอาท์พุทคร่อมตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ แสดงดังสมการนี้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอิเล็กโทรดที่ใช้จะทำมาจากวัสดุสแตนเลสมีลักษณะเป็นทรงกระบอกปลายแหลม มีส่วนโลหะยาวประมาณ4เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างโพรบประมาณ 2.5 เซนติเมตร โดยดินที่ใช้จะเป็นดินร่วนมีน้ำหนัก 150 กรัม และจะทำการเติมน้ำที่ละ 15 มิลลิลิตร เพื่อเป็นการเพิ่มความชื้นทีละ 10% โดยมวล

วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ[8] (system identification) มีโครงสร้างหลายรูปแบบ ยกตัวอย่างเช่น ARX,ARMAX,OE ฯลฯ แต่ในรายงานนี้จะพิจารณาแบบจำลองแบบความผิดพลาดเอาท์พุท OE (output error) เนื่องจากง่ายต่อการคำนวณและไม่ได้ต้องการทราบถึงโมเดลของการรบกวน โดยใช้ Matlab Toolbox ในการหาค่าพารามิเตอร์ โดยจะเก็บข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่วัดได้จากระบบ พร้อมกับกำหนดจำนวนของโพลและจำนวนซีโร่ของระบบ โดยจะอาศัยการสุ่มค่าตามแบบของโมเดลกล่องเทา (Gray box model) คือ รู้ค่าจำนวนของโพลและซีโร่ของระบบแต่ไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ โดยมีการทดสอบหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดโดยเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆของระบบไปจนกระทั่งได้ความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองกับระบบจริงที่แตกต่างน้อยที่สุด มีสมการแบบจำลองแบบความผิดพลาดเอาท์พุท ดังนี้

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

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

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

โดยที่

$y(t)$ คือ ค่าเอาท์พุท ณ เวลา t

$u(\mathrm{t})$ คือ ค่าอินพุท ณ เวลา t

n_b คือ จำนวนซีโร่บวกหนึ่ง

n_a คือ จำนวนโพลของระบบ

n_k คือ จำนวนการสุ่มข้อมูล ก่อนที่อินพุทจะมีผลต่อเอาท์พุทของระบบ

$e(t)$ คือ ค่าความผิดพลาด

$b_1,\ldots,b_{nb}$ และ $a_{1,\ldots,}a_{na}$ คือค่าพารามิเตอร์ของระบบ

การหาค่าพารามิเตอร์จะทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันต่อไปนี้มีค่าน้อยที่สุด

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

โดยที่ค่าประมาณหาได้จาก

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

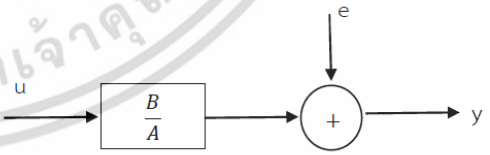
โดยที่

$$Z = [u(1), u(2), \ldots, u(N)]$$
$$y = [\mathrm{y}(1), \mathrm{y}(2), \ldots, \mathrm{y}(N)]$$

สมการที่ 4 และ 5 เป็นสมการที่อยู่ในรูปของสมการไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete time) เพื่อให้ง่าย จะต้องมีการแปลงให้อยู่ในรูปสมการต่อเนื่องของเวลา (continuous time) โดยใช้วิธี Laplace และ Z tranform เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ หรือโดยใช้คำสั่งใน Matlab คือ d2c(discrete to continuous) จะได้สมการในแบบฟอร์มสมาการที่ 8

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

ตัวอย่างของแบบจำลอง OE เขียนในรูปของบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลอง OE

3. ผลการทดลองและการจำลองค่า

หัวข้อนี้แสดงผลที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ(system identification)และขั้นตอนการบันทึกข้อมูลกราฟสัญญาณและการออกแบบการทดลอง ชุดทดสอบและวงจรที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3 โดยขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

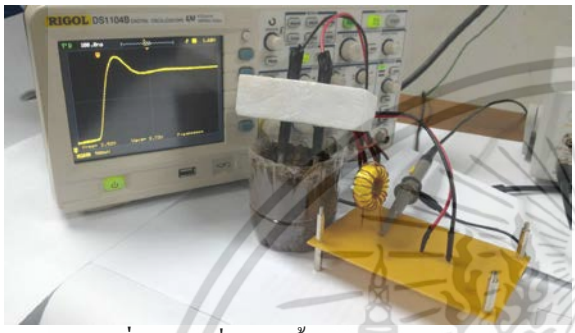
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. สร้างสัญญาณพัลส์โดยมีความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ 100 กิโลเฮิรตซ์และ500 กิโลเฮิรตซ์

2. นำสัญญาณที่ได้มาป้อนให้กับวงจร

3. นำออสซิลโลสโคปมาบันทึกข้อมูลและกราฟ

4. บันทึกการทดลอง นำข้อมูลสัญญาณที่วัดได้ไปสร้างแบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ทฤษฎีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ(System Identification)



รูปที่ 3 วงจรที่พัฒนาขึ้นใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ป้อนสัญญาณอินพุทของระบบ คือ สัญญาณพัลส์ความถี่ 1, 100 และ 500 กิโลเฮิรตซ์ ที่มีดิวตี้ไซเคิล 50% และตรวจวัดสัญญาณเอาท์พุทที่ตกคร่อมดิน โดยสัญญาณที่วัดจะถูกกำหนดช่วงข้อมูลและย่านการวัดที่เหมาะสม เพื่อให้ค่าที่วัดได้มีการรบกวนของสัญญาณน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามช่วงข้อมูลการวัดจะต้องมากพอที่จะสร้างแบบจำลองเพื่อความแม่นยำของการวัดเช่นกัน

เมื่อทำการบันทึกกราฟสัญญาณต่างๆ จะนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างแบบจำลองของระบบ โดยใช้เครื่องมือการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (system identification tool) ในโปรแกรม MATLAB โดยขั้นตอนดังนี้

1. เลือกข้อมูลสัญญาณโดยเก็บตัวอย่างข้อมูลมาอย่างละ 600 ข้อมูลที่เวลาในการสุ่มเท่ากับ 2 นาโนวินาที

2. ใช้เครื่องมือ การวิเคราะห์พารามิเตอร์ระบบในโปรแกรม MATLAB โดยเลือกรูปแบบของแบบจำลองในที่นี้ใช้แบบจำลองพหุนามรูปแบบ OE (Output-Error) เนื่องจากมีความเหมาะสมในการหาแบบจำลองระบบที่มีเพียงค่าอินพุทและเอาท์พุทเดียวและไม่ทราบค่าลักษณะของตัวรบกวน โดยมีรายละเอียดของตัวแปรในแบบจำลองดังนี้

- *nb* คือ จำนวนซีโร่ของระบบบวกด้วยหนึ่ง
- *nf* คือ จำนวนโพลของระบบ
- *nk* คือ จำนวนการสุ่มข้อมูลก่อนที่ค่าอินพุทจะมีผลต่อค่าเอาท์พุทของระบบ

เนื่องจากทราบถึงโครงสร้างแบบจำลองเบื้องต้นในสมการที่ 1 อยู่แล้วจึงพิจารณาใช้แบบจำลองแบบกล่องเทา (Gray-Box model) คือ เป็นแบบจำลองที่กำหนดจำนวนโพลและซีโร่ในระบบเท่านั้น เนื่องจากพิจารณาให้ระบบเป็นแบบจำลองวงจรอนุกรมอันดับสองและมีแรงดันเอาท์พุทคร่อมตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ จึงกำหนดให้ระบบมีจำนวนโพลเท่ากับ 2 และจำนวนซีโร่เท่ากับ 1

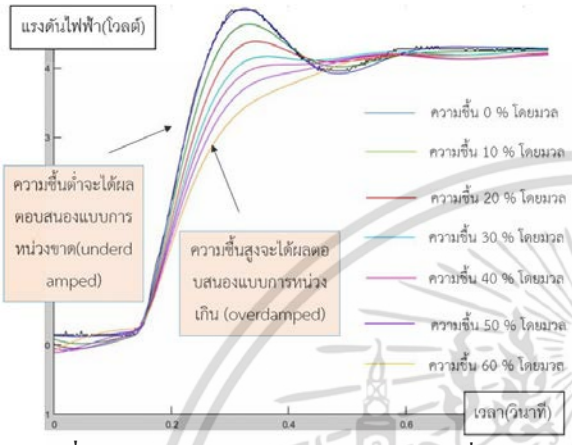
4) หาแบบจำลองและเปรียบเทียบผลที่ได้กับค่าเอาท์พุทจริงที่วัดมาได้จากวงจร มีหน่วยวัดค่าความถูกต้องเป็นเปอร์เซ็นต์ดังแสดงในสมการที่ 8

5) สร้างฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบในรูปของแบบจำลองต่อเนื่องเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ในระบบ เมื่อทำตามขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นแล้วจะทำซ้ำโดยการเปลี่ยนค่าความถี่ของเครื่องสร้างสัญญาณเป็น 100 กิโลเฮิรตซ์และ 500 กิโลเฮิรตซ์ตามลำดับ นอกจากนี้ในการปรับความชื้นจะมีการเปลี่ยนค่าการเติมน้ำลงไปครั้งละ 15 มิลลิลิตรและวัดเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐานที่ได้จัดซื้อมา คือ เครื่องมือวัดรุ่น SPH-KC-300-20C เมื่อประมวลผลด้วยเทคนิคการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System identification) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบในรูปของแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลาและเมื่อปรับเป็นแบบจำลองต่อเนื่องทางเวลาแล้วจะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ทางพลศาสตร์ได้

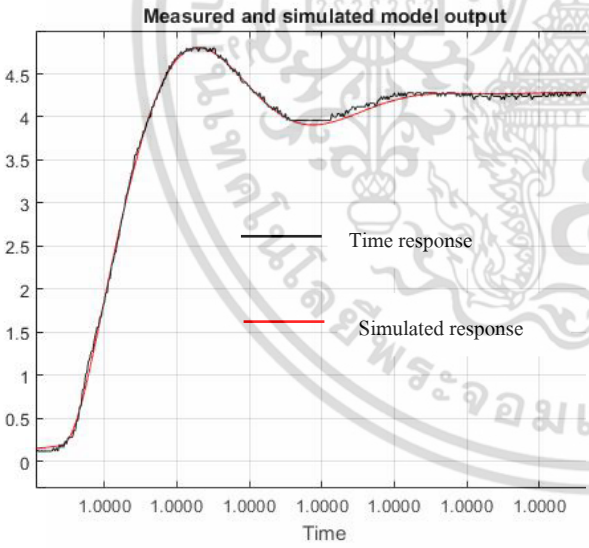
เมื่อหาค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนแล้ว จะสามารถหาค่าอัตราการหน่วงและเวลาขาขึ้นได้ โดยรูปที่ 4 แสดงผลตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงเมื่อความชื้นของดินเปลี่ยนแปลงไป จากรูปจะเห็นได้ชัดเจนว่า ความชื้นมีผลต่อคุณลักษณะของผลตอบสนองเชิงเวลาหรืออีกนัยหนึ่งความชื้นมีผลต่อพารามิเตอร์ทางพลศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ จากผลที่ได้พบว่า การวัดความชื้นในดินที่มีความชื้นน้อยจะมีผลตอบสนองเป็นแบบการหน่วงขาด (underdamped) ซึ่งอัตราการหน่วงน้อยกว่าหนึ่งแต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

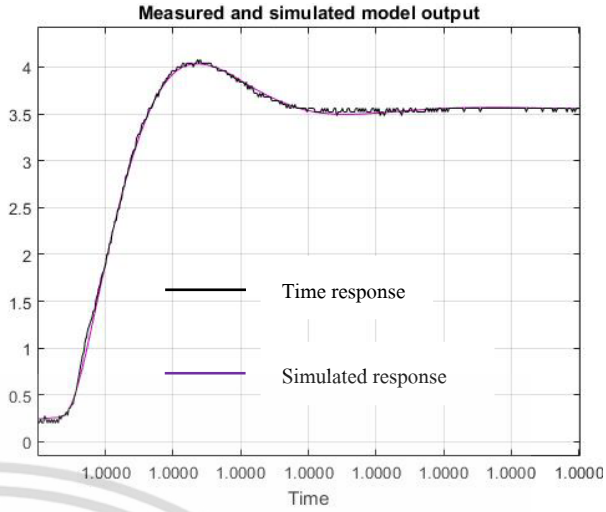
มากกว่าศูนย์และมีเวลาขาขึ้นที่น้อยจึงทำให้การเข้าสู่เสถียรภาพได้ไว แต่เมื่อดินมีความชื้นเพิ่มขึ้นจะมีผลตอบสนองเป็นแบบหน่วงเกิน (overdamped) ซึ่งมีอัตราการหน่วงมากกว่าหนึ่ง และมีเวลาขาขึ้นที่มากจึงทำให้เข้าสู่เสถียรภาพได้ช้า



รูปที่ 4 แนวโน้มของผลตอบสนองเอาท์พุทเมื่อดินมีความชื้นเปลี่ยนแปลง

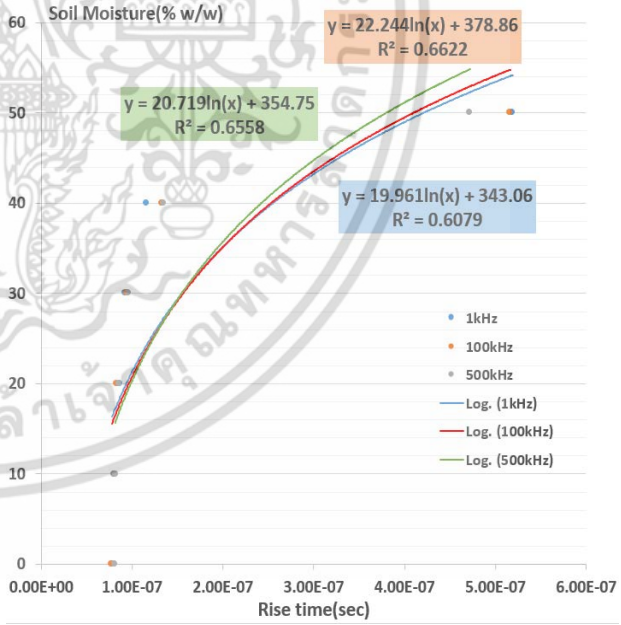


รูปที่ 5 เปรียบเทียบ Time response กับ Simulated response ที่ความชื้น 0% โดยมวล



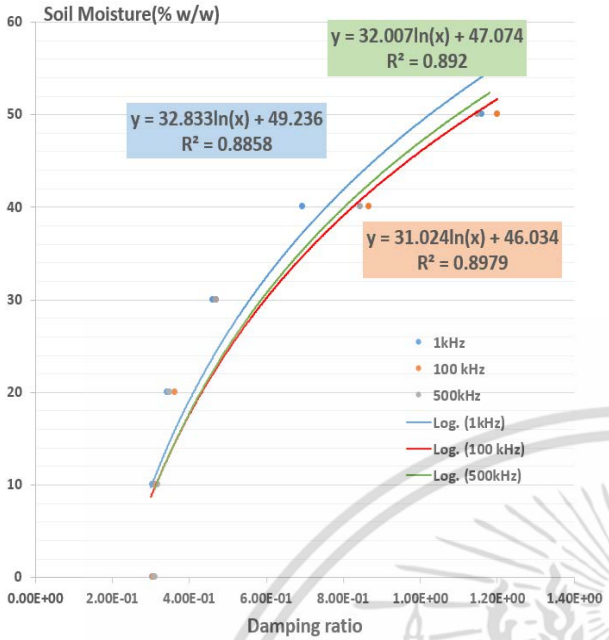
รูปที่ 6 เปรียบเทียบ Time response กับ Simulated response ที่ความชื้น 40% โดยมวล

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



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้นกับค่าความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นดินกับอัตราการหน่วงได้

จากรูปที่ 7 และ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นดินกับเวลาขาขึ้นกับอัตราการหน่วงตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์กับเวลาขาขึ้นที่ทำนายได้จะมีความถูกต้องน้อยกว่า 70% ในทางกลับกันความสัมพันธ์กับอัตราการหน่วงที่ทำนายได้จะมีค่าสูงถึง 89.79% ที่ความถี่ 100 kHz

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นดินกับเวลาขาขึ้นแสดงในรูปที่ 5 จากรูปจะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ดังกล่าวค่อนข้างไม่เป็นเชิงเส้นและมีความแตกต่างระหว่างสมการทำนายและค่าจริงค่อนข้างมาก เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าทางพลศาสตร์ พบว่า ค่าความถูกต้องของแบบจำลองจะมีมากกว่า 75% ในทุกแบบจำลองและเมื่อทำการนำค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่สนใจคือ อัตราหน่วงมาเปรียบเทียบและสร้างความสัมพันธ์พบว่า ความถูกต้องของสมการทำนายมีค่ามากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ผลของการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์

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

ที่ความถี่ 100 กิโลเฮิรตซ์

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

ที่ความถี่ 500 กิโลเฮิรตซ์

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

เมื่อ y คือ ความชื้นดินในหน่วยเปอร์เซ็นต์และ x คือค่าอัตราส่วนการหน่วง

ในรูปที่ 6 และ 7 แสดงให้เห็นว่าสมการการทำนายมีค่าเข้าใกล้ค่าจริงมากขึ้น และค่า R^2 ของอัตราการหน่วงมีค่าดีขึ้นมากกว่าของเวลาขาขึ้นในทุกความถี่ ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่า R^2 ในการวัดความถูกต้องของสมการความสัมพันธ์ซึ่งเป็นที่ชัดเจนว่า ค่าความถูกต้องของแบบอัตราหน่วงเป็นโดเมนจะมีค่ามากกว่าการใช้ค่าอัตราขอบขาขึ้นอย่างชัดเจน ในที่นี้ค่า R^2 นิยามจาก

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2} \qquad (9)$$

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 แสดงค่าระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการหน่วงกับความชื้นที่เพิ่มขึ้นในความถี่ต่างๆ

ความชื้น (%w/w)	ความถี่ (kHz)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	1	0.0017889
	100	0.0031305
	500	0.0007071

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 จะเห็นได้ว่าความถี่ธรรมชาติมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้ค่าอัตราการหน่วงและเวลาขาขึ้นมีเพิ่มขึ้นไปด้วย ค่าอัตราการหน่วงสามารถใช้ในการทำนายสมการความชื้นได้อย่างถูกต้องแม่นยำ โดยมีค่า R^2 มากกว่า 80% และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ค่าเวลาขาขึ้นพบว่ามีค่า R^2 ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัดและค่า R^2 มีค่ามากกว่า 80% ในทุกการทดสอบ โดยการทดสอบในการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ย่านความถี่ให้ผลสอดคล้องกัน ต่อมาจะเป็นการเลือกใช้ย่านของความถี่ที่จะสามารถนำไปใช้ได้จริง โดยทำการทดสอบซ้ำ 5 ครั้งในการวัดพบว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในทุกค่าความถี่มีค่าน้อยในทุกช่วงความชื้นที่วัด จึงมีความซ้ำที่และสามารถนำไปใช้งานจริงได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้