

ผลกระทบของความชื้นของวัสดุต่อประสิทธิภาพของการสำรวจด้วยคลื่นเรดาร์ An Effect of Sub-Surface Moisture Content on GPR Survey Performance

ชนะรบ วิชาลัย^{1*}

Chanarop Vichalai^{1*}

Received: December 10, 2018; Revised: October 28, 2019; Accepted: November 5, 2019

บทคัดย่อ

ประสิทธิภาพการสำรวจด้วยคลื่นเรดาร์ (Ground Penetration Radar; GPR) ขึ้นอยู่กับความชื้นของสัญญาณสะท้อนของคลื่นที่วัดได้จากความสูงยอดคลื่น (Amplitude) ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของสภาพแวดล้อม โดยความชื้นในวัสดุเป็นผลกระทบหลักต่อการสะท้อนของคลื่นซึ่งก่อให้เกิดการลดทอนสัญญาณ (Attenuation) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความชื้นในผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตและพื้นทางซีเมนต์ (Cement-Treated Base; CTB) ที่มีผลต่อสัญญาณคลื่นเรดาร์ในการตรวจพบระดับน้ำใต้ดิน โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant; ϵ) ด้วยการวัดระยะเวลาไป - กลับของคลื่นผ่านตัวอย่างที่ได้จากภาคสนาม ผลที่ได้จากการทดสอบถูกใช้ในการแปลงระยะเวลาไป - กลับของคลื่นให้เป็นระยะความลึกและเพื่ออธิบายผลเนื่องจากแรงดึงผิวที่เกิดขึ้นในชั้นวัสดุที่ทำให้ไม่สามารถระบุตำแหน่งของระดับน้ำใต้ดินได้ในผลการสำรวจ ตัวอย่างพื้นทางซีเมนต์ได้ถูกทำการทดสอบเพื่อหาการยกตัวของน้ำเนื่องจากแรงดึงผิวในห้องปฏิบัติการ นอกจากนั้นยังได้ทำการศึกษาผลการสะท้อนคลื่นเนื่องจากแรงดึงผิวด้วยการจำลองผลคลื่นเพื่อตรวจทานผลการสำรวจที่ได้จากภาคสนามและห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเฉลี่ยจากตัวอย่างแห้งและตัวอย่างเปียก คือ 7 และ 20 ตามลำดับ ผลการทดสอบแรงดึงผิวของน้ำในแท่งตัวอย่างพื้นทางคอนกรีตแห้ง พบว่าระดับความสูงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงผิวของน้ำในช่วงเวลา 24 ชม. มีค่าเท่ากับ 4.3 ซม. การจำลองผลคลื่นพบว่ายอดคลื่นที่เกิดการสะท้อนผ่านชั้นวัสดุที่เกิดแรงดึงผิวมีความสูงลดลง

คำสำคัญ : การสำรวจด้วยคลื่นเรดาร์ (GPR); ความชื้น; ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก; แบบจำลอง; ระดับน้ำใต้ดิน; แรงดึงผิว

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

¹ Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

* Corresponding Author E - mail Address: chanaropv@gmail.com

Abstract

Performance of the Ground Penetrating Radar (GPR) depends on the wave reflectivity as shown as the amplitude height that varied with environmental conditions. Moisture content in sub-surface material has a large effect on signal attenuation. This research presents an effect of moisture content in asphaltic concrete road pavement and Concrete Treated Base (CTB) layers that would cause GPR signal to detection of water table. The simple methods to examine dielectric constant (ϵ) from two-way travel time of samples those collected from the field were tested in laboratory both dry and wet conditions. These test results were employed for time-to-depth conversion for GPR data interpretation and explanation of capillary effect that caused GPR results as it has difficulty to indicate groundwater table on the radar gram. The CTB sample was tested for rising of capillary force in the laboratory. However, GPR signal modelling was done to verify capillary effect on filed data and laboratory testing results. Study results found the dielectric constant of dry and wet asphaltic concrete samples are 7 and 20, respectively. The modelling of capillary test in 24 hrs indicate the capillary zone is height of 4.3 cm and GPR wave modelling shows reflectivity of GPR signal was reduced due to capillary effect.

Keywords: Ground Penetrating Radar (GPR); Moisture Content; Dielectric Constant; Modeling; Groundwater Table; Capillary

บทนำ

Ground Penetration Radar (GPR) เป็นวิธีการสำรวจทางด้านวิศวกรรมธรณีฟิสิกส์โดยการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves, EM) ในการตรวจสอบสภาพใต้พื้นดินในระดับตื้น โดยให้ผลเป็นภาพสะท้อนของคลื่นที่มีความละเอียดสูง สามารถประยุกต์เพื่อใช้งานด้านสำรวจตำแหน่งของโครงสร้างทางธรณีวิทยา ตลอดจนจนถึงการใช้เพื่อตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีต ใช้ในกระบวนการควบคุมคุณภาพในงานด้านวิศวกรรมโยธา ซึ่งจัดเป็นวิธีทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Test; NDT) วิธีการหนึ่ง

ค่าตัวแปรหลักที่สำคัญในการตรวจสอบวัสดุทางวิศวกรรมด้วยคลื่นเรดาร์ คือ ค่าความชื้นในวัสดุทางวิศวกรรมนั้น ๆ ซึ่งเป็นผลกระทบโดยตรงต่อการลดทอนสัญญาณคลื่นเรดาร์ [1] เนื่องด้วยย่านความถี่ที่เครื่องมือ GPR ใช้งานอยู่ในช่วงคลื่นความถี่ไมโครเวฟ คือ มีความถี่ระหว่าง 5 MHz [1] ถึง 2.6 GHz [2] จากผลการศึกษาในเบื้องต้นด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ [3] พบว่า การตรวจพบวัตถุโลหะขึ้นอยู่กับความชื้นที่มีอยู่ในดิน ประเภทของดิน ความลึกของวัตถุ และความถี่ของคลื่นเรดาร์

ความชื้นในวัสดุต่าง ๆ ยังแปรผันตามค่าคงที่ไดอิเล็กตริก [4] ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กตริกนี้ยังเกี่ยวข้องกับควมลึกของการสำรวจด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะในขั้นตอนแรกในการตั้งค่าตัวแปรการเก็บข้อมูล (Acquisition Parameters) ในส่วนของการกำหนดช่วงเวลาไป - กลับของผลข้อมูลคลื่นที่ทำการบันทึก (Trace Length) ในพื้นที่การทดสอบที่เปียกชื้น หากละเลยการพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ทดสอบที่เปียกชื้น ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงกว่าปกติตามปริมาณของความชื้นในวัสดุนั้น จะทำให้ควมลึกในการสำรวจไม่เพียงพอจนทำให้พลาดระดับควมลึกของวัตถุเป้าหมายที่ต้องการตรวจสอบ [5]

แต่อย่างไรก็ตามการประมาณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในการตั้งค่าตัวแปรการเก็บข้อมูลในภาคสนามที่สอดคล้องกับค่าความชื้นของวัสดุยังเป็นการยาก บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการทดสอบตัวอย่างจากภาคสนามในห้องปฏิบัติการทดสอบ และการจำลองผลการสะท้อนคลื่นเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นในการประมวลผลและแปลผลคลื่นสะท้อนเรดาร์ที่ได้จากการสำรวจยังลึกด้วยคลื่นเรดาร์ของสนามบินสุวรรณภูมิ โดยในขั้นตอนระหว่างการเก็บข้อมูลการสำรวจอยู่ในช่วงฤดูฝน ซึ่งพื้นผิวทางที่ทำการทดสอบมีความเปียกชื้นเนื่องจากฝนที่ตกลงมา โดยความชื้นและความนำไฟฟ้าเป็นอุปสรรคที่สำคัญในการสำรวจยังลึกด้วยคลื่นเรดาร์

ทฤษฎี

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถอธิบายด้วยสมการของ Maxwell's (Maxwell's Equation) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (Electric Field; E) สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Field; H) ช่วงเวลา (Time; T) พื้นที่ (Area; A) และคุณสมบัติด้านไฟฟ้าของวัสดุ (Electric Permittivity; ϵ)

คุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ แรงต้านสนามไฟฟ้า (Electric Permittivity; ϵ) และสภาพนำไฟฟ้า (Electric Conductivity; σ) หากพิจารณาถึงความเกี่ยวข้องกับพลศาสตร์ทางไฟฟ้า (Electrodynamics) [6] สามารถสรุปให้อยู่ในรูปของแรงต้านสนามไฟฟ้ารวม (Complex Permittivity; ϵ^*) ที่พิจารณาการสูญเสียเนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลื่นในอากาศและการถูกเหนี่ยวนำเป็นควมร้อนที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดลอม สามารถสรุปเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (1)

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \left(AsV^{-1}m^{-1} \right) \quad (1)$$

เมื่อ $i = \sqrt{-1}$
โดยที่

- ϵ' เป็นค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในอุดมคติที่พิจารณาการสูญเสียเนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลื่นในอากาศ
- ϵ'' เป็นค่าสูญเสียเนื่องจากการถูกเหนี่ยวนำเป็นควมร้อนที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดลอม โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$\varepsilon_r'' = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (2)$$

เมื่อ $\omega = 2\pi f [s^{-1}]$ และ σ คือ สภาพนำไฟฟ้า แต่สำหรับแรงดันสนามไฟฟ้าในสภาพสุญญากาศ (ε_0) มีค่าเท่ากับ $8.8542 \cdot 10^{-12} \text{ AsV}^{-1}m^{-1}$ ที่ในหัวข้อมีการปราศจากมิติเข้ามาเกี่ยวข้องแล้วจะสามารถหาค่าแรงดันสนามไฟฟ้ารวม (Complex Permittivity; ε^*) ได้ดังสมการที่ (3)

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon}{\varepsilon'} = \varepsilon' - i\varepsilon_r'' \quad (3)$$

การสูญเสียเชิงสัมผัส (Tangent Loss) เป็นอัตราส่วนของการเคลื่อนที่กระแสแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r'}{\varepsilon_r''} = \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (4)$$

เมื่อ ε_r' เป็นค่าแรงดันสนามไฟฟ้าเฉพาะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ

โดยที่ $\tan \delta = 1$ ความเหนี่ยวนำกระแสเท่ากับการเคลื่อนที่ของกระแส แต่สำหรับ GPR แล้วการเคลื่อนที่ของคลื่นจะมีค่า $\tan \delta < 1$, แต่สำหรับ $\tan \delta > 1$ จะเกิดขึ้นได้ในกรณีของการกระจายตัวของคลื่น (Diffusive Process)

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุทางธรณี [7] และสมการที่ (4) สามารถพบได้ว่าทรายแห้ง ($\sigma = 1 \text{ mS/m}$, $\varepsilon = 4$) ทรายเปียก ($\sigma = 10 \text{ mS/m}$, $\varepsilon = 25$) และดินเลน ($\sigma = 50 \text{ mS/m}$, $\varepsilon = 25$) ภายใต้การทดสอบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ 50 MHz พบว่า ทรายแห้ง $\tan \delta = 0.09$ มีความเหมาะสมต่อการสำรวจด้วย GPR ทรายเปียก $\tan \delta = 0.14$ ก็ยังพอที่จะสามารถทำการสำรวจด้วย GPR แต่ดินเลน $\tan \delta = 0.72$ มีผลต่อการจำกัดการเคลื่อนที่ผ่านของคลื่นไม่เหมาะสมกับการสำรวจด้วย GPR

คุณสมบัติสภาพการซึมได้ของแม่เหล็ก (Magnetic Permeability; μ) ของวัสดุทางธรณีแทบไม่มีหรือมีค่าน้อยมากสำหรับการสำรวจด้วย GPR โดยค่าสภาพการซึมได้ของแม่เหล็กในสุญญากาศจากสมการที่ (5)

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad (5)$$

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นในระบบแกนพิกัดฉาก (Rectangular Coordinate System) สนามไฟฟ้า (Electric Field) $E = (E_x, 0, 0)$ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Field) $H = (0, E_y, 0)$ เคลื่อนที่ในแนวแกน z [8] - [9] สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (6) - (7)

$$E_x(z, t) = E_{x0} e^{yz - \omega t} \quad [Vm^{-1}] \quad (6)$$

$$E_y(z, t) = E_{y0} e^{jz - \omega t} \quad [Am^{-1}] \quad (7)$$

เมื่อค่าคงที่ของการแพร่กระจายที่ซับซ้อน (Complex Propagation Constant; γ) ดังสมการที่ (8) คือ

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad [m^{-1}] \quad (8)$$

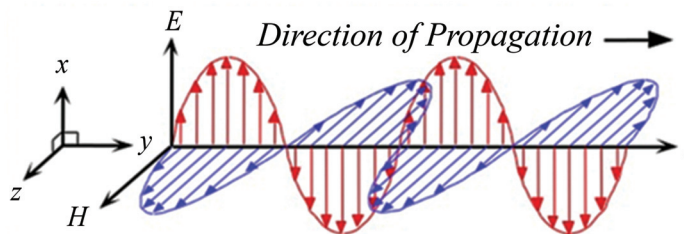
สนามไฟฟ้าสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (9)

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{j(\beta z - \omega t)} e^{-\alpha z} \quad (9)$$

สนามไฟฟ้า (Electric Field; E) และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Field; H) จะเคลื่อนที่ต่างจากซึ่งกันและกันไปตามแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น (รูปที่ 1) สมการของการเคลื่อนที่ของคลื่นสมการที่ (10) ในด้านเฟส (Phase) ที่เกี่ยวข้องกับเวลาและพื้นที่ และสมการที่ (11) ได้อธิบายถึงการถูกลดทอนคลื่น โดยมีค่าคงที่การลดทอน (Attenuation Constant; α) และค่าคงที่ของเฟส (Phase Constant; β) ทั้งสองตัวแปรเป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับค่าความถี่ (f) และค่าแรงต้านสนามไฟฟ้า (ε)

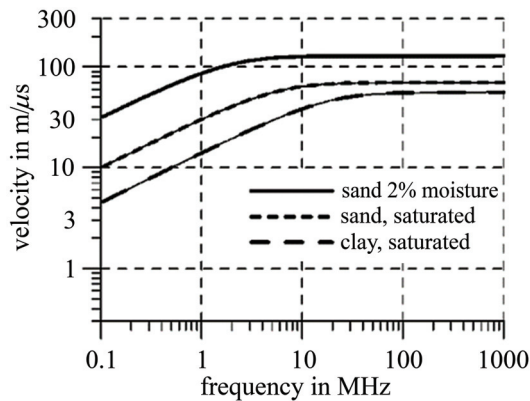
$$\alpha = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\frac{e'_r}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)} \quad [Nepers\ m^{-1}] \quad (10)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\frac{e'_r}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1)} \quad [rad\ m^{-1}] \quad (11)$$

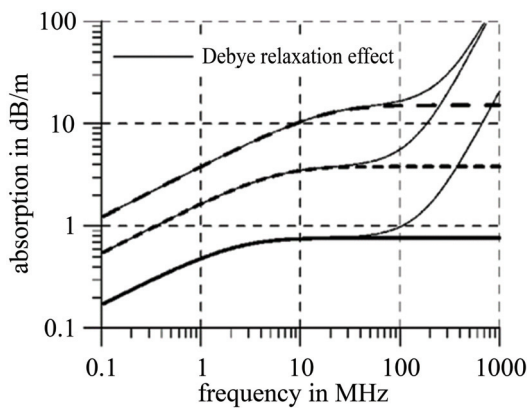


รูปที่ 1 การเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [10]

เมื่อความเร็วของแสงในสุญญากาศ $c_0 = 2.998 \times 10^8\ m/s \approx 300\ m/\mu s = 0.3\ m/ns$ ในการคำนวณจะใช้สัมประสิทธิ์การดูดซับ (Absorption Coefficient; α') $= 8.686 \alpha$ (in dB/m) ในการแทนค่าตัวประกอบการลดทอนคลื่น (Attenuation Factor; α) ดังนั้นถ้า $\tan \delta \ll 1$ แล้ว α จะมีค่าน้อย นั่นหมายถึงว่าสภาพนำไฟฟ้า (σ) มีค่าน้อยตามสำหรับการดูดซับคลื่นต่ำ นอกจากนั้นแล้วการดูดซับของคลื่นยังขึ้นอยู่กับความเร็วและความถี่ของสัญญาณด้วย ดังรูปที่ 2



(ก) การดูดซับคลื่นของทรายชื้น ทรายเปียก และดินเลน



(ข) ความสัมพันธ์ของการดูดซับคลื่นและความถี่

รูปที่ 2 ความเร็วและการถูกดูดซับของคลื่นที่ขึ้นอยู่กับความถี่ [10]

ความเร็วคลื่น (v) เป็นความเร็วเฟส (Phase Velocity) ของคลื่นเรดาร์คำนวณได้จากสมการที่ (12)

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon}} \quad (12)$$

สำหรับการเคลื่อนที่ผ่านชั้นวัสดุที่มีการสูญเสียต่ำ (Low-Loss) คือ $\tan \delta \ll 1$ สมการที่ (13)

$$\lambda \approx \frac{c_0}{f\sqrt{\epsilon}} \quad (13)$$

กฎการสะท้อนคลื่นของสเนล (Snell's Law) ได้อธิบายการสะท้อนคลื่นไว้ คือ มุมตกกระทบ (θ_i) จะเท่ากับมุมสะท้อน (θ_r) และมุมหักเห (θ_t) จะขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบที่ทำให้ไม่เกิดคลื่นสะท้อนโดยมุมนี้เรียกว่า "มุมวิกฤต" ของคลื่น ได้ดังสมการที่ (14)

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} = \frac{v_2}{v_1} \quad (14)$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) เป็นค่าที่แสดงความเข้มของคลื่นเมื่อเกิดการสะท้อนเป็นไปตามสมการที่ (15)

$$r = \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (15)$$

โดยสามารถหาค่าความลึกของชั้นวัสดุที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น (d) ได้จากความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (v) ค่าเวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นไปและกลับ (τ) ตามสมการที่ (16)

$$d = \frac{v\tau}{2} \quad (16)$$

โดยที่

- d คือ ความลึกของวัสดุที่เป็นตัวสะท้อน (m)
 v คือ ความเร็วไปและกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (m/s)
 τ คือ เวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นไปและกลับ

ดังนั้น จากสมการที่ (12) และสมการที่ (16) สามารถหาค่าความลึกในการสำรวจ (d) ได้ดังนี้

$$d = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{\tau}{2} \quad (17)$$

ในปี ค.ศ. 1980 ได้มีการเผยแพร่ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนค่าความชื้นในดินและค่าคงที่ไดอิเล็กตริก จากสมการที่ (17) โดย Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. [4] สามารถช่วยในการเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในชั้นวัสดุใต้ดินที่มีผลต่อการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ดังสมการที่ (18)

$$\theta = -0.0503 + 0.0292\epsilon_r + 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_r^{-4} + 10^{-6} \epsilon_r^3 \quad (18)$$

โดยที่

- θ คือ ค่าร้อยละของความชื้นในดิน
 ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ

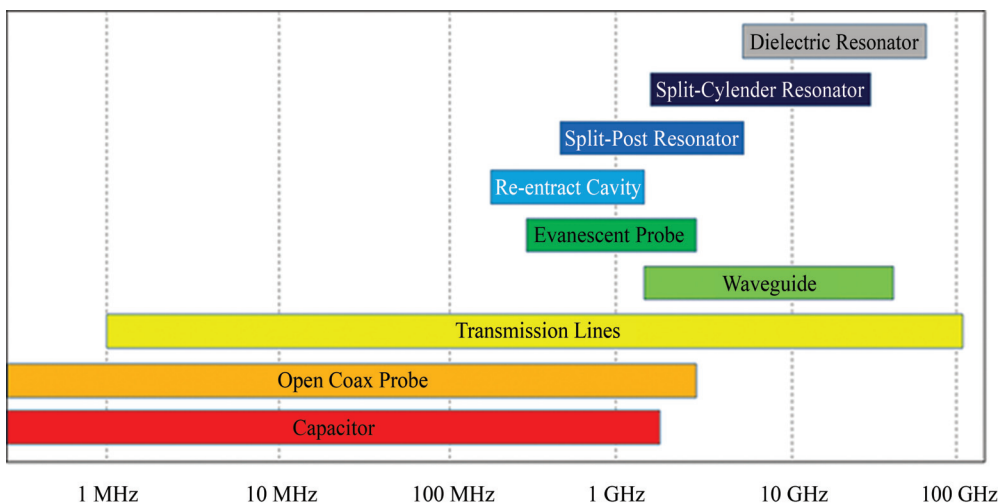
การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)

วิธีการทดสอบเพื่อวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสามารถทำได้หลายวิธีการขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นที่ทดสอบและลักษณะทางกายภาพของวัตถุที่ทำการทดสอบโดยวิธีการทดสอบที่เหมาะสมกับช่วงความถี่ต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3 สำหรับการสำรวจด้วย GPR ที่มีช่วงคลื่นความถี่ 5 MHz - 2.6 GHz

มีวิธีการทดสอบเพื่อวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมคือ 1) Transmission Lines Method 2) Open Coax Probe Method และ 3) Capacitor Method

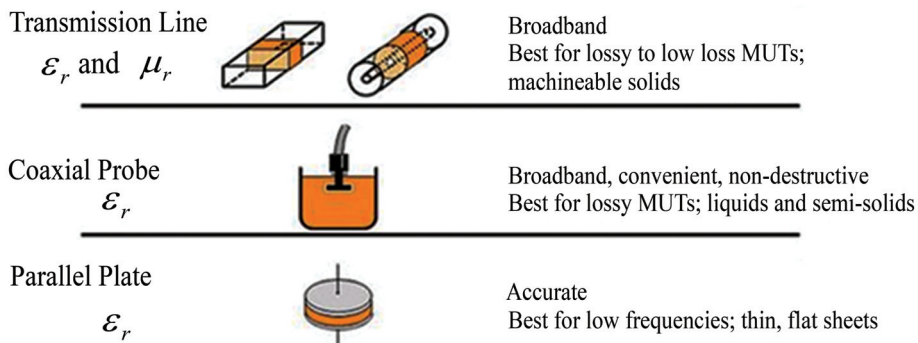
การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกด้วยวิธีการ Transmission Lines Method เป็นการวัดค่าด้วยการบรรจุวัสดุที่ต้องการทดสอบลงในอุปกรณ์ทดสอบที่มีลักษณะคล้ายกับลักษณะของสายนำสัญญาณแบบแกนร่วม (Coaxial) โดยมีสายนำสัญญาณเชื่อมต่อด้านปลายทั้งสองด้านที่มีต่อเข้ากับอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณที่อยู่ด้านปลายของอุปกรณ์บรรจุตัวอย่างทดสอบดังรูปที่ 4 โดยวิธีการนี้มีข้อดีคือ สามารถจำกัดค่าการสูญเสีย (Loss) ให้ต่ำได้ด้วยการจำกัดความยาวของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ สามารถทำการทดสอบกับวัสดุที่เป็นแม่เหล็กได้ และสามารถวัดค่าในช่วงความถี่ที่กว้าง (Broadband) ได้

วิธีการ Open Coax Probe Method เป็นวิธีการที่สามารถวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกได้ในช่วงความถี่ที่กว้าง เป็นวิธีที่ทำการทดสอบได้ง่ายไม่ยุ่งยากและเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing; NDT) เหมาะกับวัสดุที่เป็นของเหลว วัสดุแข็ง หรือวัสดุผง - แป้ง โดยการใช้อุปกรณ์ตรวจวัด (Probe) ที่ประยุกต์มาจากวิธีการ Transmission Lines Method ด้วยการตัดอุปกรณ์บางส่วนออกให้เหลือเฉพาะสายนำสัญญาณและอุปกรณ์ส่งสัญญาณเพียง 1 ข้าง วิธีการนี้ทำการวัดค่าโดยจุ่มหัววัดค่าที่มีอุปกรณ์ส่งสัญญาณลงในของเหลวหรือสัมผัสผิวของวัสดุแข็ง



รูปที่ 3 วิธีการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของช่วงความถี่ต่างๆ [11] - [12]

การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกด้วยวิธีการ Capacitor Method หรือ Parallel Plate Method เป็นวิธีการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกด้วยการวางตัวอย่างที่ต้องการทดสอบที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับขั้ววัด โดยมีขั้ววัดประกบอยู่ทั้งที่ด้านบนและด้านล่างของวัสดุตัวอย่าง แล้วทำการวัดค่าความจุไฟฟ้า (Electric Capacitance) เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

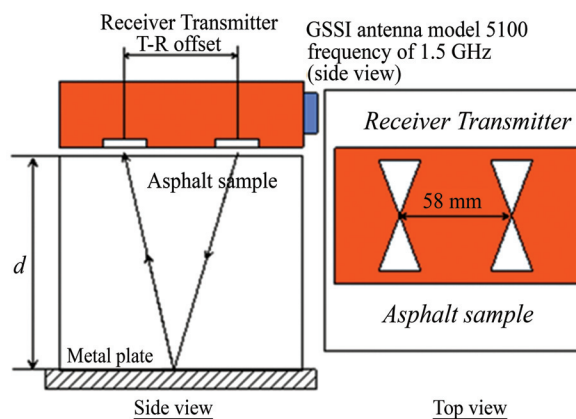


รูปที่ 4 วิธีการทดสอบหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

วิธีดำเนินการวิจัย

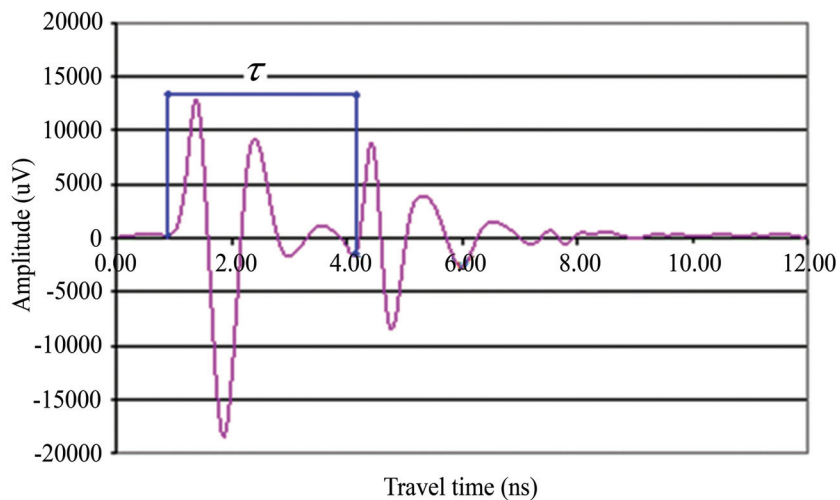
การศึกษานี้มีกรณีศึกษาจากสนามบินสุวรรณภูมิที่มีการก่อสร้างทางขับและทางวิ่งบนดินเหนียวอ่อนที่ได้รับการปรับปรุงด้วยวิธีการ Prefabricated Vertical Drain (PVD) ซึ่งโครงสร้างของทางขับและทางวิ่งประกอบด้วย ผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีต ชั้นซีเมนต์ (CTB) ชั้นทรายถม (Sand Blanked) และชั้นดินเหนียวที่ได้รับการปรับปรุง ดังแสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 5

ในการศึกษานี้ได้ทำการวัดค่าความหนาของวัสดุตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D4748-10 [13] ด้วยการทดสอบกับตัวอย่างที่ทราบความหนา (d) โดยวัดค่าระยะเวลาไป - กลับ (τ) ของคลื่นเรดาร์ด้วยสายอากาศความถี่ 1.5 GHz แล้วทำการคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกตามสมการที่ (16) เพื่อนำไปใช้ประกอบการแปลผลการสำรวจ โดยทำการทดสอบกับวัสดุผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตที่แห้งและตัวอย่างที่ได้แช่น้ำแล้ว 24 ชั่วโมง โดยมีรูปแบบการทดสอบดังรูปที่ 5



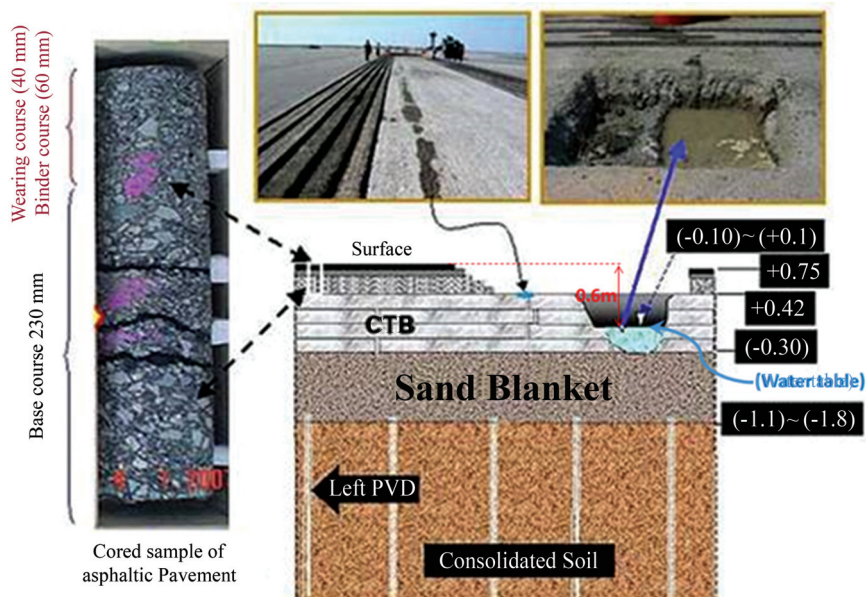
(ก) รูปแบบการทดสอบ

รูปที่ 5 วิธีการทดสอบหาความหนาของวัสดุด้วยเวฟเล็ต (Wavelet) ของสัญญาณเรดาร์ ASTM D4748-10 [13]



(ข) ระยะเวลาไปและกลับของคลื่น (τ)

รูปที่ 5 วิธีการทดสอบหาความหนาของวัสดุด้วยเวฟเล็ต (Wavelet) ของสัญญาณเรดาร์ ASTM D4748-10 [13] (ต่อ)



รูปที่ 6 โครงสร้างของชั้นวัสดุโครงสร้างทางที่ศึกษา [14]

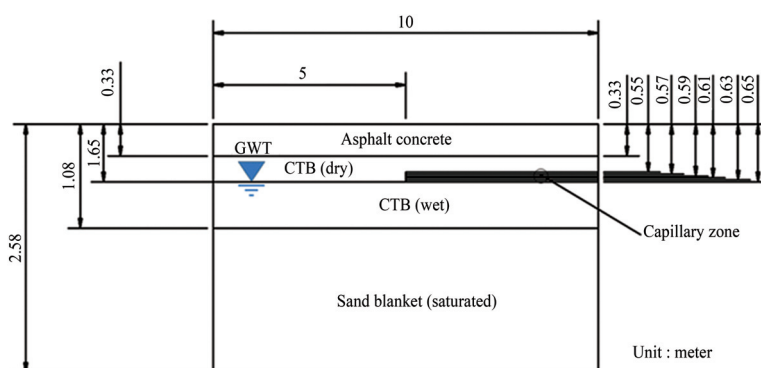
จากรายงานผลการศึกษาของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) [14] พบว่าระดับของน้ำใต้ดินมีระดับความลึกประมาณ 65 ซม. (รูปที่ 6) การศึกษาในครั้งนี้จึงได้ทำการจำลองผลเนื่องจากแรงตึงผิว (Capillary) ของน้ำใต้ดินที่อยู่ในชั้น CTB ที่อยู่บนชั้นทราย ด้วยการวางแท่งตัวอย่างบนทรายเปียก

เพื่อวัดระยะยกตัวเนื่องจากแรงดึงผิวของน้ำที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง CTB อันมีผลกระทบต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้น CTB และชั้นแอสฟัลต์ติกคอนกรีต แล้วทำการจำลองผลการสำรวจด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของการสะท้อนของคลื่นในกรณีที่มีแรงดึงผิวและไม่มีแรงดึงผิวทั้งในแบบ 1 มิติ [15] และ 2 มิติ [16] ด้วยความถี่ 200 400 และ 900 MHz เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบต่อของการสะท้อนของคลื่นของปรากฏการณ์แรงดึงผิวที่เกิดขึ้นในชั้น CTB โดยค่าตัวแปรทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในการจำลองผลแสดงไว้ในตารางที่ 1 และมีรายละเอียดของแบบจำลองดังรูปที่ 7

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการจำลองผลคลื่นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [4], [15] - [17]

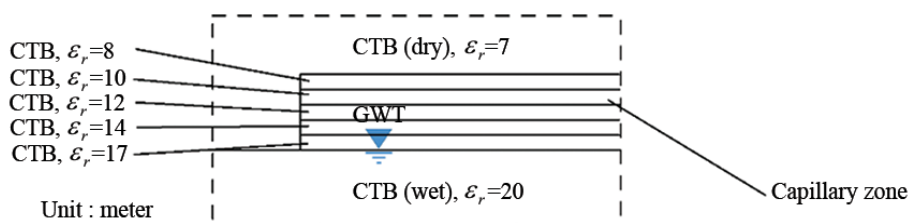
Material	Dielectric constant	Conductivity (Siem/m)
Asphaltic concrete ⁵	0.01	
Cement Treaded Base (CTB) : dry	7	0.01
	8	0.012
Cement Treaded Base (CTB)	10	0.015
with variation of moisture content due	12	0.02
to the capillary zone	14	0.05
	17	0.075
Cement Treaded Base (CTB)_wet	20	0.1
Sand blanket	30	0.01

ในเบื้องต้นคาดหวังว่าแบบจำลองผลคลื่นที่ได้จะสามารถอธิบายผลการสำรวจในสถานที่จริงที่ยากที่จะจำแนกชั้นวัสดุต่าง ๆ โดยเฉพาะชั้นน้ำใต้ดินที่อยู่ระหว่างชั้น CTB ได้



(ก) รายละเอียดของแบบจำลอง

รูปที่ 7 แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงดึงผิวต่อผลการสำรวจ



(ข) การกระจายตัวของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในช่วงที่เกิดการยกตัวของน้ำ
เนื่องจากแรงดึงผิว (Capillary)

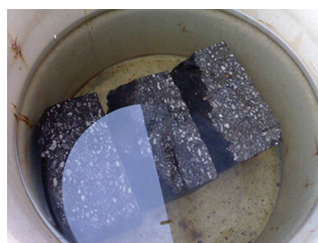
รูปที่ 7 แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงดึงผิวต่อ
ผลการสำรวจ (ต่อ)

ผลการวิจัย

การทดสอบวัดค่าความหนาของวัสดุตัวอย่างของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตแบบแห้งและเปียก
ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 - 9 ส่วนผลการคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจากสมการที่ (17) พบว่าตัวอย่างเปียกและ
ตัวอย่างแห้งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 20 และ 7 ตามลำดับ ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 2 โดยพบว่า
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกแปรผกผันกับค่าความชื้นสอดคล้องกับผลการทดสอบตัวอย่างวัสดุผิวทางแอสฟัลต์ติก
คอนกรีตด้วยวิธีการ Coaxial Test [13], [17] - [18]

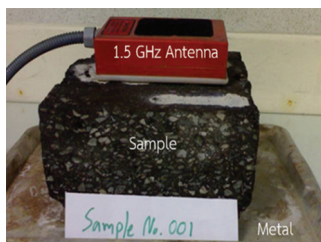


(ก) ตัวอย่างแห้ง



(ข) ตัวอย่างเปียก

รูปที่ 8 วัสดุผิวทางตัวอย่าง



(ก) การวัดค่าด้านบนผิวตัวอย่าง



(ข) การวัดค่าด้านข้างผิวตัวอย่าง

รูปที่ 9 การทดสอบวัดค่าความหนาของวัสดุตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D4748-10 ด้วยสัญญาณ
เรดาร์ [14]

ตารางที่ 2 ผลการวัดค่าความหนาของวัสดุตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D4748-10 [14]

ตัวอย่างเปียก

ตัวอย่าง ที่	วัดค่าด้านบน			ด้านข้าง		
	ความหนา (เมตร)	ระยะเวลา (ns)	ϵ_r	ความหนา (เมตร)	ระยะเวลา (ns)	ϵ_r
1	0.226	6.75	20.04	0.323	9.65	20.06
2	0.232	6.94	20.11	0.293	8.82	20.36
3	0.219	6.53	19.98	0.305	9.23	20.58
		เฉลี่ย	20.04		เฉลี่ย	20.33

ตัวอย่างแห้ง

ตัวอย่าง ที่	วัดค่าด้านบน			ด้านข้าง		
	ความหนา (เมตร)	ระยะเวลา (ns)	ϵ_r	ความหนา (เมตร)	ระยะเวลา (ns)	ϵ_r
1	0.226	3.98	6.97	0.323	5.71	7.02
2	0.232	4.1	7.02	0.293	5.16	6.97
3	0.219	3.86	6.98	0.305	5.37	6.97
		เฉลี่ย	6.99		เฉลี่ย	6.99

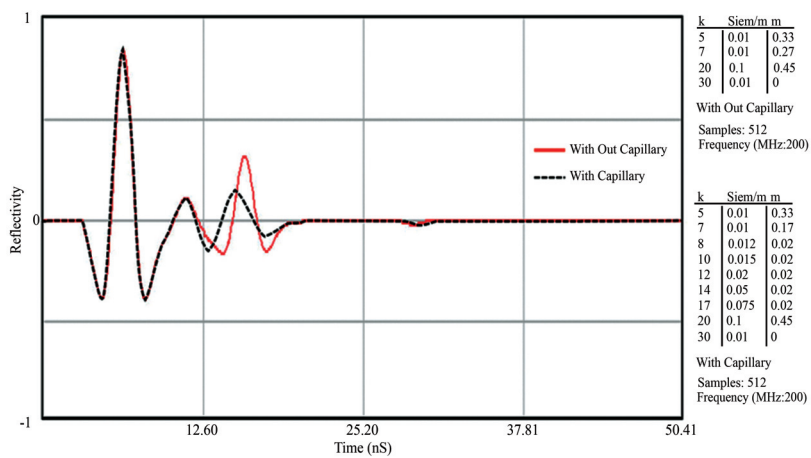
การทดสอบการยกตัวเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 ภายหลังจากการวางตัวอย่าง CTB บนทรายที่อ้อมตัวไปด้วยน้ำเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบได้ถึงการยกตัวของน้ำเนื่องจากแรงตึงผิวเท่ากับ 4.3 ซม. หรือเท่ากับ 5×10^{-4} มม./วินาที เทียบเท่ากับค่าความซึมผ่านของน้ำในคอนกรีต [19] หรือเท่ากับช่วงของค่าการซึมผ่านของน้ำในดินเหนียวปนตะกอน (Silty Clay) [19] ซึ่งมีระยะการยกตัวของน้ำเนื่องจากแรงตึงผิวเต็มที่เท่ากับ 0.75 - 75 ม. [19] ดังนั้นจากการศึกษาในครั้งนี้ทำให้ทราบได้ถึงผลของแรงตึงผิวที่ทำให้ชั้น CTB ในสถานที่จริงเปียกชุ่มไปด้วยน้ำและรวมถึงชั้นรอยต่อระหว่างผิววัสดุ CTB และแอสฟัลต์ ตลอดจนบางส่วนของชั้นแอสฟัลต์ด้วย

การจำลองคลื่นทั้ง 3 ความถี่พบว่าแบบจำลอง 1 มิติ สามารถอธิบายพฤติกรรมของการสะท้อนคลื่นเนื่องจากปรากฏการณ์แรงตึงผิวที่ทำให้เกิดการลดทอนสัญญาณอย่างเห็นได้ชัด และเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ (15) ที่แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ลดลงของแบบจำลองที่มีและไม่มีแรงตึงผิวโดยพิจารณาได้จากยอดคลื่นสะท้อนในช่วงที่เกิดปรากฏการณ์แรงตึงผิว (รูปที่ 11) และยังแสดงได้อย่างชัดเจนในแบบจำลอง 2 มิติ (รูปที่ 12) ผลการจำลองคลื่นในความถี่ที่ต่ำกว่ามีการสะท้อนในช่วงที่เกิดปรากฏการณ์แรงตึงผิวได้ดีกว่าคลื่นความถี่สูงโดยเฉพาะความถี่สูงสุดคือ 900 MHz มีการลดทอนสัญญาณอย่างเห็นได้ชัด สอดคล้องกับการทดสอบด้วยวิธีการ Coaxial Test [13], [18]

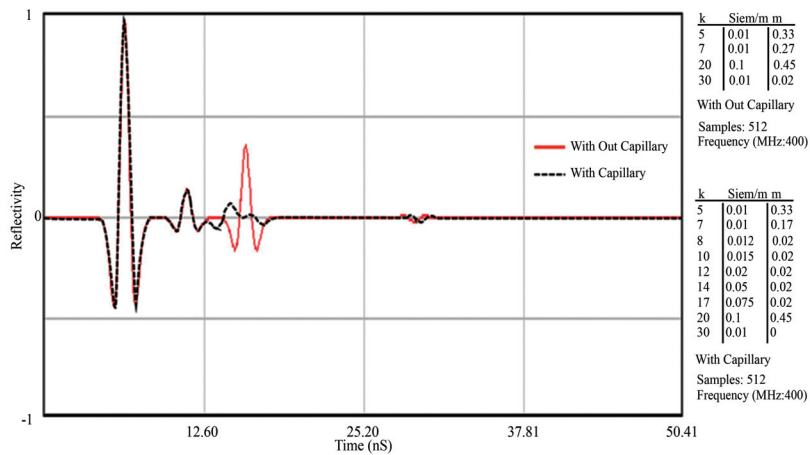


ระยะยกตัวเนื่องจากแรงดึงดูดผิว
เท่ากับ 4.3 เซนติเมตร

รูปที่ 10 การทดสอบการยกตัวของน้ำเนื่องจากแรงดึงดูดผิวน้ำในคอนกรีต (CTB)

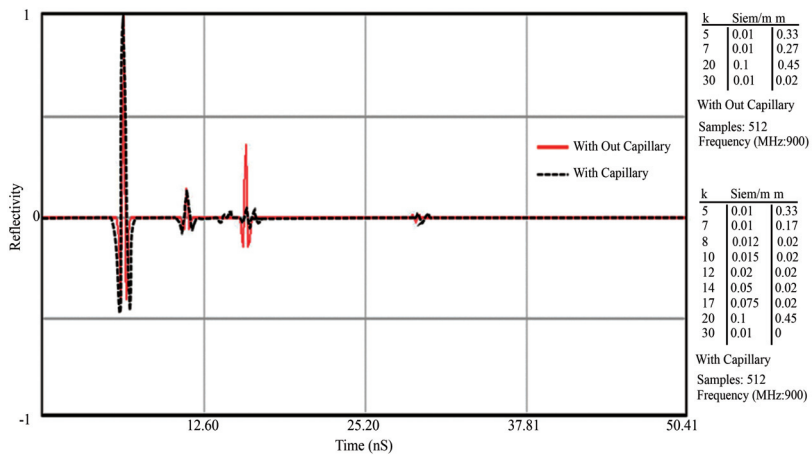


(ก) ความถี่ 200 MHz



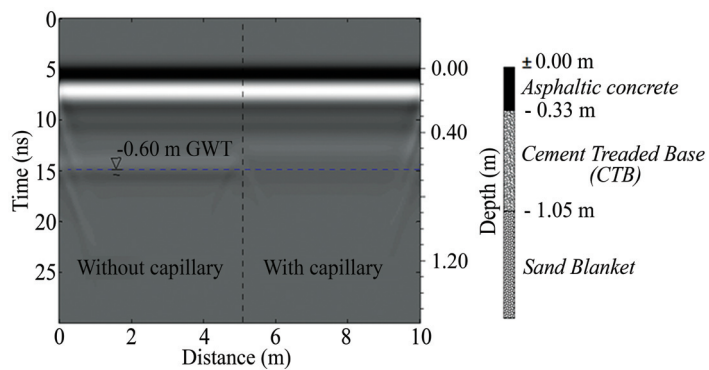
(ข) ความถี่ 400 MHz

รูปที่ 11 ผลการจำลองคลื่นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบบ 1 มิติ

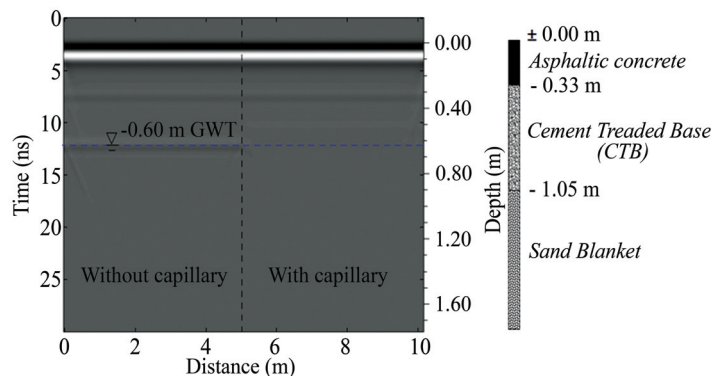


(ค) ความถี่ 900 MHz

รูปที่ 11 ผลการจำลองคลื่นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบบ 1 มิติ (ต่อ)

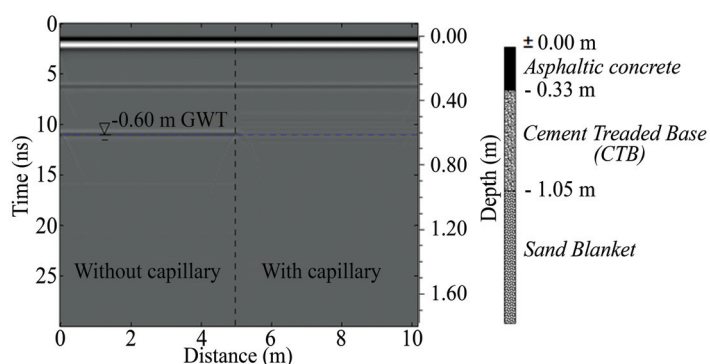


(ก) ความถี่ 200 MHz



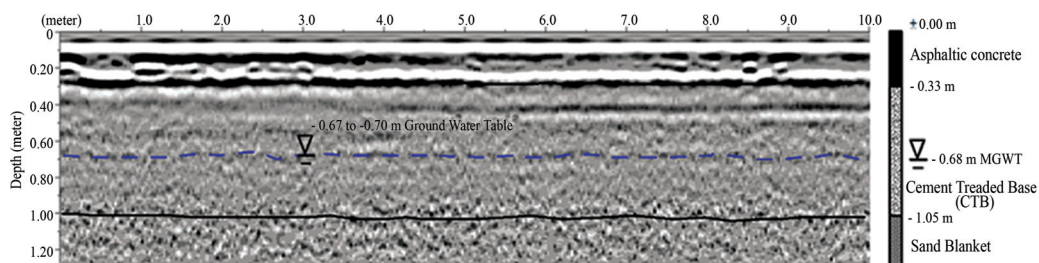
(ข) ความถี่ 400 MHz

รูปที่ 12 ผลการจำลองผลคลื่นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบบ 2 มิติ



(ค) ความถี่ 900 MHz

รูปที่ 12 ผลการจำลองผลคลื่นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบบ 2 มิติ (ต่อ)



รูปที่ 13 ผลการสำรวจในภาคสนามด้วยความถี่ 900 MHz

เมื่อพิจารณาผลการสำรวจในสถานที่จริงจากภาคสนามดังรูปที่ 13 ที่ใช้ความถี่ 900 MHz โดยมีการใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการในการประมวลผล พบว่ามีลักษณะการสะท้อนคลื่นของแต่ละชั้นวัสดุไม่ชัดเจนยากต่อการแปลผลการสำรวจสอดคล้องกับการจำลองผลคลื่นเนื่องจากแรงดึงดูดของน้ำ แต่เมื่อพิจารณาผลการสำรวจร่วมกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการและการจำลองผลคลื่นสามารถจำแนกชั้นวัสดุต่าง ๆ ได้ดีขึ้น จากการศึกษาพบว่าหากปราศจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการแล้ว ยังเป็นการยากที่จะระบุได้ถึงความหนาของระดับน้ำใต้ดิน แต่เนื่องด้วยข้อมูลจากบ่อสังเกตการณ์และข้อมูลประกอบด้านอื่น ๆ จึงสามารถแปลผลการสำรวจได้ง่ายและถูกต้องยิ่งขึ้น

อภิปรายผลและสรุป

ในทางวิศวกรรมแล้วการทดสอบเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในห้องทดสอบเป็นการยากโดยทางปฏิบัติแล้ว การคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจากค่าความชื้นด้วยสมการที่ (18) [4] สามารถกระทำได้ง่ายกว่า แม้ว่าการทดสอบเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการและมาตรฐานต่าง ๆ ให้ได้ค่าที่ถูกต้องเพื่อใช้ในการวางแผนการสำรวจด้วย GPR ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังคงเป็นการยากที่จะต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการก่อนออกสำรวจภาคสนามเสมอ ดังนั้น การทดสอบเพื่อวัดความหนาของวัสดุในภาคสนามหรือวิธีการใดวิธีการหนึ่งเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลด้านความหนาของชั้นวัสดุเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่

ไดอิเล็กตริก เป็นวิธีการที่พึงกระทำเพื่อให้การสำรวจดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถแปลผลได้ในภายหลัง

เนื่องจากในระยะเวลาที่ได้ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนามเป็นช่วงที่มีฝนตกพื้นผิวทางและสภาพแวดล้อมมีความชื้นสูงทำให้ผลการสำรวจมีความไม่ชัดเจนจึงได้มีการเก็บเอาตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์มาเพื่อทดสอบ พบว่าได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแอสฟัลต์แห้งและเปียกมีค่าเท่ากับ 7 และ 20 ตามลำดับ โดยค่าที่ได้จากตัวอย่างแอสฟัลต์เปียกเมื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความลึกของชั้นวัสดุพบว่ามีความสอดคล้องกับระดับน้ำที่ปรากฏในพื้นที่ทดสอบ

การทดสอบการจำลองการยกตัวของน้ำในแท่งตัวอย่าง CTB พบว่าที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมงมีระยะยกตัวที่ 4.3 ซม. และยังพบว่าหากทำการทดสอบอย่างต่อเนื่องจะมีระยะการยกตัวของน้ำมากกว่า 1 ม. ดังนั้นชั้นตัวอย่างแอสฟัลต์ในสถานที่จริงจึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะมีความชื้นอยู่ภายในเนื่องจากแรงดึงผิวของน้ำ

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณความยาวคลื่น (λ) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) และความถี่ (f) ของสัญญาณเรดาร์ตามสมการที่ (17)

Dielectric constant (ϵ_r)	Frequency ; f (MHz)		
	200	400	900
Wave Length; λ (cm)			
7 (CTB-Dry)	56.695	28.347	12.599
10	47.434	23.717	10.541
20 (CTB-Wet)	33.541	16.771	7.454
30	27.386	13.693	6.086
40	23.717	11.859	5.270
50	21.213	10.607	4.714
60	19.365	9.682	4.303
70	17.928	8.964	3.984
80 (Water)	16.771	8.385	3.727
90	15.811	7.906	3.514

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น ความถี่ และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ที่คำนวณได้จากสมการที่ (17) ตามความถี่ที่ใช้ในการจำลองผลการทดสอบ คือ 200 400 และ 900 MHz สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 3 พบได้ว่าที่ความถี่ 900 MHz ณ ระดับน้ำใต้ดินมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 20 มีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 7.45 ซม. และที่เหนือระดับน้ำใต้ดินมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 7 มีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 12.6 ซม. ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับความลึกของผลการสำรวจและขนาดของวัตถุที่สามารถตรวจพบได้ คือ คลื่นความถี่ต่ำกว่าสามารถให้ผลการสำรวจที่ลึกกว่าและมีการลดทอนของสัญญาณต่ำกว่าคลื่นความถี่สูง จากผลการจำลองคลื่นพบว่าผลจากแรงดึงผิวของน้ำทำให้เกิดการลดการสะท้อนของคลื่นลง โดยสังเกตได้จากยอดคลื่นสะท้อนบนบริเวณผิวรอยต่อของระดับน้ำลดลง ทำให้ผลการสำรวจมีความไม่ชัดเจน ไม่สามารถระบุตำแหน่ง

ของระดับผิวน้ำใต้ดินได้ ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องพึงระวังและพิจารณาเสมอเมื่อทำการสำรวจด้วย GPR ในพื้นที่ที่มีระดับน้ำใต้ดินอยู่ตื้น หรือในพื้นที่ที่เป็นดินเหนียวอ่อนโดยเฉพาะพื้นที่ในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จะทำให้ไม่สามารถตรวจพบหรือตรวจพบวัตถุใต้ดินได้ยาก

References

- [1] Carl, L., Pannir, K., Kenji, Y., Steve, A., and Prasad, G. (2003). Design and Field Experiments of a Ground-Penetrating Radar for Mars Exploration. **Journal of Geophysical Research**. Vol. 108, Issue E4, pp. 15-1 to 15-12. DOI: 10.1029/2003JE002113
- [2] Liu, L. B., Qian, R. Y., Li, J., Sun, M. G., and Ge, S. C. (2016). GPR Detection of Subsurface Voids and Its Validation Based on Similarity Principle. In **16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)**. Hong Kong, 2016, pp. 1-4
- [3] Gary, K. (1998). **Effect of Soil Moisture on Radar Detection of Simulant Mines**. Fact Sheet. Access (25 July 2018). Available (<http://uxoinfo.com/blogcfc/client/enclosures/CRREL26.pdf>)
- [4] Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. (1980). Electromagnetic Determination of Soil Water Content Measurement in Coaxial Transmission Line. **Water Resources Research**. Vol. 16, Issue 3, pp. 574-582. DOI: 10.1029/WR016i003p00574
- [5] Giao P. H., Vichalai, C., and Hien, D. H. (2007). A Study on Geotechnical and Geophysical Properties of Styrofoam Material for Construction of a Concrete Pavement Model, Proc. **Intl' Symp. Hanoi Geoengineering 2007**, November 2007, Hanoi, Vietnam, pp. 11-17
- [6] Von Hippel AR (ed). (1954). **Dielectric Materials and Applications**. MIT Press, Cambridge MA, USA
- [7] Davis, J. L., Annan, A. P. (1989). Ground Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. **Geophysics Prospecting Journal**. Vol. 37, Issue 5, pp. 531-551. DOI: 10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x
- [8] Hoekstra, P. and Delaney, A. (1974). Dielectric Properties of Soils at UHF and Microwave Frequencies. **Journal of Geophysical Research**. Vol. 79, Issue 11, pp. 1699-1708. DOI: 10.1029/JB079i011p01699
- [9] Arthur R. von Hippel. (1954). **Dielectrics and Waves**. MIT Press, Cambridge MA, USA. p. 537
- [10] Kirsch, R. (2006). **Ground Penetration Radar (GPR)**. In *Groundwater Geophysics : A Tool for Hydrology*. Second Edition, Springer. p. 232
- [11] Baker-Jarvis, J., Janezic, M. D., and DeGroot, D. C. (2010). High-Frequency Dielectric Measurements, Part 24 in a Series of Tutorials on Instrumentation and Measurement. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**. pp. 24-31
- [12] Yaw, K. C. (2012). **Measurement of Dielectric Material Properties Application Note**. Rhode and Shawrtz Technical Publication

- [13] ASTM D4748-10. (2015). **Standard Test Method for Determining Thickness of Bound Pavement Layers using Short-Pulse Radar**. Annual Book of ASTM Standards 2002, Section 04: Construction Soil and Rock (I). American Society for Testing and Materials. Vol. 04.08.
- [14] Asian Institute of Technology (2009). **An Investigation of Shallow Groundwater Conditions in the CTB Layer at the Suvarnabhumi International Airport**. Final report. School of Engineering and Technology, Bangkok, Thailand.
- [15] Geoscanner, A. B. (2006). **GPRSim.net**. Access (27 July 2018). Available (www.geoscanners.com)
- [16] Antonis, G. (2006). **GprMaxV2.0**. Access (27 July 2018). Available (www.gprmax.org)
- [17] Shang, J. Q., Umana, J. A., Bartlett, F. M., and Rossiter, J. R. (1999). Measurement of Complex Permittivity of Asphalt Pavement Materials. **Journal of Transportation Engineering**. Vol. 125, Issue 4, pp. 347-356
- [18] Gomes, A. M. (2003). Permeability of Concrete: A Study Intended for the “in situ” Valuation Using Portable Instruments and Traditional Techniques. In **Proceeding of International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)**. September 16-19, in Berlin, Germany
- [19] Brama, M. D. and Khaled, S. (2014). **Capillary Force in the Soil**. In Principles of Geotechnical Engineering. eight edition. USA