



การประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกเพื่อการหาค่ากำลังของวัสดุ ก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เฉลิมพล วังสำเภา¹ สกล โพลลาด² กิตติ พรหมแสง² นิภาพร อรรถนทร³,
สถาพร สิทธิวงศ์^{1,4} วิโชค พรหมดวง^{1,4} และ กীরติกานต์ พิริยะกุล^{1,5*}

¹ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาวัสดุกรรมแบบผสมผสานภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
อุทยานเทคโนโลยี มจพ., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² กองอาคารและสถานที่, มหาวิทยาลัยสวนดุสิต

³ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ, มหาวิทยาลัยนวมินทราธิราช

⁴ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

⁵ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: keeratikan.p@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 16 กันยายน 2568; วันที่บทความบทความ: 20 กุมภาพันธ์ 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 2 มิถุนายน 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 18 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: บทความนี้เสนอวิธีการตรวจสอบกำลังของวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วยการทดสอบแบบ
ไม่ทำลาย โดยใช้เทคนิคเป็นเตอร์อิลีเมนต์ ผ่านเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริก เพื่อวัดค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (V_s)
เปรียบเทียบกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ตัวอย่างทดสอบเตรียมจากดินเหนียวอ่อน
กรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก และผสมเส้นใยขนไก่
ธรรมชาติที่ผ่านการทำความสะอาดและอบแห้งในสัดส่วนร้อยละ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตร บ่มตัวอย่าง
เป็นเวลา 28 วัน ผลการศึกษาพบว่าเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกสามารถวัดค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิเพื่อประเมิน
ความแข็งแรงของวัสดุได้เป็นอย่างดี โดยค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกับค่ากำลังรับ
แรงอัดแกนเดียว ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนเส้นใยขนไก่ที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 0.5 ซึ่งให้ค่ากำลัง
รับแรงอัดแกนเดียวสูงสุดและผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง 294 kPa อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย
เกินกว่าร้อยละ 0.5 จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดและค่าความเร็วคลื่นลดลง เนื่องจากการกระจายตัวของเส้นใยที่
ไม่สม่ำเสมอและการเกิดช่องว่างในเนื้อวัสดุ

คำสำคัญ: เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริก; ดิน-ซีเมนต์; การทดสอบเป็นเตอร์อิลีเมนต์; กำลังรับแรงอัด

Application of Piezoelectric Sensors to Determine the Strength of Eco-Friendly Construction Material

Chalermpon Wungsumpow¹, Sakol Pochalard², Kitti Promsang², Nipaporn Auttanate³,
Sathaporn Sittiwong^{1,4}, Wichok Promdaung^{1,4} and Keeratikan Piriyaikul^{1,5*}

¹ Operations Center of Integrated Innovation Research and Development under Industrial Standards, KMUTNB Techno Park, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Building and Landscape Division, Suan Dusit University

³ Faculty of Sciences and Health Technology, Navamindradhiraj University

⁴ Department of Electrical Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut University of Technology North Bangkok

⁵ Department of Civil and Environmental Engineering Technology College of Industrial Technology, King Mongkut University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: keeratikan.p@cit.kmutnb.ac.th

Received: 16 September 2025; Revised: 20 February 2026; Accepted: 2 June 2026

Online Published: 18 August 2026

Abstract: This study evaluates the strength of eco-friendly construction materials using a non-destructive bender element technique with piezoelectric sensors. The shear wave velocity (V_s) was measured and correlated with unconfined compressive strength (UCS). Specimens were prepared from Bangkok soft clay mixed with 8% Type 1 Portland cement and reinforced with natural chicken feather fibers at 0, 0.5, 1.0, and 1.5% by volume. After 28 days of curing period, results showed that piezoelectric sensors effectively assess material strength, with V_s exhibiting a positive correlation with UCS. The optimal fiber content was found to be 0.5%, yielding the maximum UCS and exceeding the Department of Highways standard (294 kPa). Conversely, fiber content exceeding 0.5% reduced both compressive strength and wave velocity due to non-uniform fiber distribution and increased voids within the material matrix.

Keywords: Piezoelectric sensor; Soil-cement; Bender element testing; Compressive strength



1 บทนำ

ห้องปฏิบัติการกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และสิ่งแวดลอม ร่วมทำวิจัยกับภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ได้พัฒนาเครื่องมือทำการทดสอบแบบไม่ทำลาย การวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าในบริบทของการพัฒนาเครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing: NDT) สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ และดินในงานวิศวกรรมโยธาจะมีบทบาทสำคัญยิ่งเนื่องจากเครื่องมือเหล่านี้ไม่เพียงแต่ต้องอาศัยกลศาสตร์ของคลื่น (Wave Mechanics) ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่นเฉือน (Shear Wave: S-wave) แต่ยังต้องอาศัยหลักการทางอิเล็กทรอนิกส์ การประมวลผลสัญญาณ และการสื่อสารข้อมูลทางไฟฟ้าที่มีความแม่นยำสูงเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่เชื่อถือได้และสอดคล้องกับมาตรฐานสากล โดยการพัฒนาเครื่องมือสำหรับทดสอบที่ใช้เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Sensors) สำหรับการใช้งานจำเป็นจะต้องคำนึงถึงระบบต่างๆ เช่น ระบบวงจรขับสัญญาณ (Driving Circuit) การวัดและการประมวลผลสัญญาณ (Signal Conditioning & Processing) ตลอดจนการเก็บรวบรวมและส่งต่อข้อมูลด้วยระบบดิจิทัลและ IoT แนวทางการวิจัยด้านไฟฟ้าโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อสร้างระบบทดสอบที่มีความเที่ยงตรงสูง ลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจาก Crosstalk และ Noise และสามารถทำงานได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและสภาพพื้นที่สนามจริง โดยจะอาศัยหลักการของการเดินทางคลื่นทุติยภูมิ (S-wave) ผ่านวัสดุต่างๆ การทดสอบนี้เรียกว่าเป็นเดอร์อีลีเมนต์ ถูกประดิษฐ์ในปี ค.ศ. 1985 โดย

นักวิทยาศาสตร์ชาวนอร์เวย์สองท่าน Dyvik และ Madshus [1] ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับการติดตั้งและการใช้งานเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริก โดยมีเครื่องมือทดสอบทางธรณีเทคนิคมาตรฐานหลากหลายประเภทที่ห้องปฏิบัติการ Norwegian Geotechnical Institute (NGI) เช่น เครื่องทดสอบ Resonant Column เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน เครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง และเครื่องทดสอบการยุบตัวของดิน โดยเซ็นเซอร์นี้สามารถใช้ในการวัดค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (V_s) ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด (G_{max}) และกำลังของวัสดุของตัวอย่างดินในระหว่างกระบวนการการคายน้ำ (Consolidation) และการเฉือน (Shear) ในการทดสอบแต่ละประเภท การทดสอบกับตัวอย่างดินเหนียว 5 ชนิด ภายใต้ระดับความดันที่แตกต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่าผลจากการวัดด้วยเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบ Resonant Column และการทดสอบอื่นๆ สำหรับห้องปฏิบัติการกลศาสตร์กลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดลอม ได้เคยมีความพยายามสร้างเครื่องมือต้นแบบที่ไม่ทำลายสำหรับวัดความเร็วคลื่นทุติยภูมิเพื่อหาลำดับของดิน-ซีเมนต์ ดังที่อธิบายโดย กิรติกันต์ พิริยะกุล และ ณรงค์ ธรรมภูติ [2, 3] เครื่องทดสอบต้นแบบดังกล่าวสามารถใช้วัดความเร็วคลื่นทุติยภูมิของวัสดุได้แต่ยังมีข้อจำกัดในการวัดสัญญาณคลื่นทุติยภูมิ สัญญาณเกิดการรบกวนที่ไม่ต้องการในวงจรไฟฟ้าเกิดจากการส่งสัญญาณไฟฟ้าข้ามไปรบกวนกันเอง Crosstalk ส่งผลให้แปลผลความเร็วคลื่นทุติยภูมิเป็นไปได้ยากและคลาดเคลื่อน

ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครเป็นดินที่มีปัญหาทางวิศวกรรมสูง เนื่องจากมีกำลังรับแรงแบกทานต่ำ และการทรุดตัวสูง การก่อสร้างโครงสร้างบนดินชนิดนี้



จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพดิน วิธีการที่นิยมแพร่หลายคือการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความมั่นคงให้กับโครงสร้างดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5-9] วัสดุที่ใช้สำหรับทดสอบคือดินเหนียวกรุงเทพมหานครโดย Mairaing และ Amonkul [4] ได้ศึกษาพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างไปจนถึงปากแม่น้ำ จากข้อมูลการสำรวจดินเหนียวอ่อนจากหลุมเจาะสำรวจ 4,000 แห่งพบว่าชั้นดินเหนียวอ่อนนี้มีความหนามากกว่าในบริเวณชายฝั่งอ่าวไทย และความหนาจะลดลงเมื่อห่างไปทางทิศเหนือ ในเขตกรุงเทพฯ ความหนาของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯอยู่ที่ความลึกระหว่าง 10 - 20 เมตร เนื่องจากคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวกรุงเทพมหานครมีปริมาณความชื้นสูงเกือบถึงขีดจำกัดของความเปียกของเหลว ส่งผลให้เกิดการทรุดตัวสูงและมีกำลังเฉือนต่ำ คณะนักวิจัยด้านวิศวกรรมโยธา Horpibulsuk และคณะ [5] ได้ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพมหานครอย่างละเอียดพบว่าขีดจำกัดเหลวเพิ่มขึ้นตามความสามารถในการบีบอัด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียวเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงของดินสำหรับการใช้งานในวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐานโดยผสมปูนซีเมนต์ เรียกว่าดิน-ซีเมนต์ การปรับปรุงพื้นดินโดยวิธีการ ดิน-ซีเมนต์ นี้เป็นที่นิยมแพร่หลายมาหลายทศวรรษ มีโครงการวิจัยหลากหลายโครงการที่พยายามพัฒนาเทคนิคนี้ให้เหมาะสมกับการใช้งาน [6-9]

การคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมโดยการใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมถูกนำมาใช้ในงานวิศวกรรมโยธา Wungsumpow และคณะ [10] และใช้วิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในการวิเคราะห์พื้นที่ฝังกลบของเสียซึ่ง

ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางส่วนสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุรีไซเคิล เช่น แก้วลอย ปัจจุบันของเสียอุตสาหกรรมและใยสังเคราะห์ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในส่วนผสมดิน-ซีเมนต์ แนวคิดของวัสดุผสมเชิงนิเวศ (Eco-composite) ซึ่งเน้นย้ำถึงความสำคัญของเส้นใยธรรมชาติในกระบวนการผลิตยุคใหม่ (Ismail and Chung) [11] เส้นใยธรรมชาติมีแหล่งกำเนิดจากพืช สัตว์ และกระบวนการทางธรณีวิทยาต่าง ๆ เมื่อถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุผสม เส้นใยเหล่านี้จะส่งผลต่อคุณสมบัติของพอลิเมอร์ วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและยั่งยืนจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองต่อการตระหนักถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากวัสดุสังเคราะห์ที่ผลิตขึ้น เส้นใยธรรมชาติมักถูกใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในพอลิเมอร์เนื่องจากมีความแข็งแรงโดยธรรมชาติค่อนข้างต่ำ ตัวอย่างของเส้นใยธรรมชาติเหล่านี้ได้แก่ ไยกล้วย ไยสับปะรด ฝ้าย ชีล และเคนาฟ นอกจากนี้ยังมีการให้ความสนใจอย่างมากต่อแหล่งที่มาและคุณลักษณะของเส้นใยแต่ละชนิดอีกด้วย อุตสาหกรรมไก่เนื้อของไทยในปี 2566 พบว่าประเทศไทยมีการผลิตไก่เนื้อประมาณ 1,781.55 ล้านตัว หรือคิดเป็นเนื้อไก่ 2.85 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปี 2565 ร้อยละ 0.54 หากคำนวณจากน้ำหนักเฉลี่ยของชนไก่ที่ประมาณ 5% ของน้ำหนักตัวไก่ (ไก่เนื้อเฉลี่ย 2.5 กิโลกรัม) จะได้ชนไก่ประมาณ 125 กรัมต่อตัว ซึ่งหมายความว่าประเทศไทยมีชนไก่เหลือจากอุตสาหกรรมประมาณ 222,693 ตันต่อปี [12] ชนไก่เป็นของเสียที่ย่อยสลายยาก เนื่องจากประกอบด้วยเคราตินซึ่งเป็นโปรตีนที่มีความคงทนต่อการย่อยสลายตามธรรมชาติ การทิ้งชนไก่โดยไม่มีการจัดการที่เหมาะสมอาจนำไปสู่ปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น การปนเปื้อนในแหล่งน้ำและดิน



ปัจจุบันแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ได้รับความสนใจอย่างมากในการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ ในงานวิจัยนี้จึงสนใจนำเส้นใยชนไก่ ซึ่งเป็นของเสียจากภาคปศุสัตว์ที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นสูง มาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในดินซีเมนต์ ซึ่งจุดเด่นของงานวิจัยนี้ที่แตกต่างจากงานอื่นคือ การนำเส้นใยชนไก่มาใช้ร่วมกับเทคนิคการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริก เพื่อประเมินค่ากำลังรับแรงอัด ซึ่งยังไม่เคยมีการศึกษามาก่อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณเส้นใยชนไก่ต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ และเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นหตุยภูมิที่วัดได้จากเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกกับค่ากำลังรับแรงอัด เพื่อนำไปสู่การสร้างสรรค์การทำนายค่ากำลังของวัสดุที่มีความแม่นยำและเชื่อถือได้

2. วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

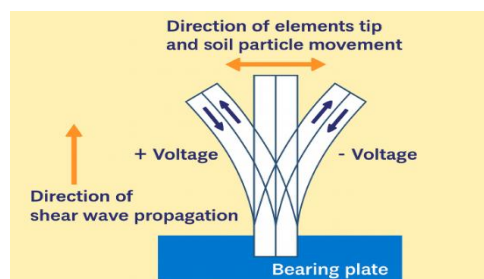
2.1 เซรามิกเพียโซอิเล็กทริก

เซรามิกเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Ceramics, รูปที่ 1) ใช้เซรามิกประเภทวัสดุอ่อน (Soft Piezoelectric Materials) หรือ PZT-5 ซึ่งมีความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ 10 kHz ติดตั้งเพื่อทำการทดสอบคือวัสดุชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติพิเศษในการ เปลี่ยนพลังงานกล (แรงกด การสั่น การดัดงอ) ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า และในทางกลับกันสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นการเปลี่ยนรูปเชิงกลหรือการสั่นได้ด้วยกลไกนี้เรียกว่า “เพียโซอิเล็กทริกเอฟเฟกต์” (Piezoelectric Effect) วัสดุเซรามิกที่นิยมใช้ เช่น ตะกั่วเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead Zirconate Titanate: PZT) มีคุณสมบัติเด่นคือให้สัญญาณไฟฟ้า

ที่มีขนาดใหญ่ มีเสถียรภาพ และสามารถผลิตในรูปแบบแท่ง แผ่น หรือแผ่นดิสก์บาง ๆ เพื่อใช้งานได้หลากหลาย โดยมีหลักการทำงานของการทำงานกำเนิดคลื่นเฉือน (Shear Wave) ด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก คือ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับเข้าไปที่แผ่นเพียโซอิเล็กทริก แผ่นจะเกิดการหดและขยายตัว ทำให้ปลายแผ่นแกว่งไปมาในแนวนอน การแกว่งนี้ทำให้อนุภาคดินที่สัมผัสอยู่เคลื่อนที่ซ้าย-ขวา ส่งผลให้เกิดแรงเฉือนภายในดินและสร้างคลื่นเฉือนที่แพร่กระจายขึ้นในแนวตั้ง คุณสมบัติสำคัญของคลื่นชนิดนี้คือ ทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค การทำงานดังกล่าวถูกนำไปใช้ในการทดสอบคุณสมบัติดินเชิงพลศาสตร์ เช่น ค่าความเร็วคลื่นเฉือนและโมดูลัสเฉือน ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างฐานรากและงานวิศวกรรมแผ่นดินไหวดังแสดงตามรูปที่ 2



รูปที่ 1 เพียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 2 หลักการทำงานของเพียโซอิเล็กทริก



2.2 ดินเหนียวกรุงเทพมหานคร

ดินเหนียวกรุงเทพมหานครที่ใช้ในการทดสอบได้จากโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วงใต้ ที่ระดับความลึกประมาณ 10–12 เมตร ได้สถานีโรงพยาบาลศิริพยาบาล โดยดินดังกล่าวเป็นเนื้อดินละเอียดซึ่งเกณฑ์ กรมทางหลวงชนบท มทข. 244 – 2567 งานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base) [13] ดินที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ต้องเป็นวัสดุที่ปราศจากหน้าดิน วัชพืช หรืออินทรีย์วัตถุอื่น ๆ และไม่มีสารอื่นที่อาจเป็นอันตรายต่อคุณภาพของดินซีเมนต์เจือปน ตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางกายและทางวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพมหานคร

2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตรากีพีโอ (สีแดง) ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 3.14

2.4 เส้นใยขนไก่

เส้นใยขนไก่มาจากอุตสาหกรรมปศุสัตว์เป็นวัสดุที่มีต้นทุนต่ำและมีโครงสร้างที่กลวง มีความหนาแน่นต่ำ มีโครงสร้างซับซ้อนและมีความเป็นระเบียบสูง จัดเป็นหนึ่งในโครงสร้างเคราตินที่ซับซ้อน ที่สุดในสัตว์มีกระดูกสันหลัง ประกอบด้วยเคราติน 91% น้ำ 8% และไขมัน 1% ขนไก่มีคุณสมบัติที่โดดเด่น เช่น ความเหนียวสูง เป็นฉนวนความร้อน มีความหนาแน่นต่ำ ไม่ก่อให้เกิดการขัดสี และกันน้ำได้ดี โครงสร้างของขนไก่มีลักษณะเป็นลำต้นหลัก (Rachis) ที่แตกกิ่งออกไปในแนวนาน โดยกิ่งเหล่านี้ถูกยึดด้วย Barbicels ที่เป็นขอกีเยว ที่ผ่านการทำความสะอาดและขจัดคราบมัน (Wax) และผ่านการอบแห้งแล้ว จากอุตสาหกรรมการผลิตหมอนขนไก่ ซึ่งมีความยาวขนไก่เฉลี่ย 7 เซนติเมตร มีความถ่วงจำเพาะ 0.58 ดังแสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติของดินเหนียวอ่อน กรุงเทพมหานคร

พารามิเตอร์	ค่า
ขีดจำกัดเหลว (%)	84
ขีดจำกัดพลาสติก (%)	34
UCS (kPa)	14.8
ความถ่วงจำเพาะ	2.68
ปริมาณความชื้น (%)	81
หน่วยน้ำหนัก (T/m^3)	1.47
การจำแนกประเภทดิน	CH
การร่อนตะแกรงผ่านเบอร์ 200 (%)	56.9



รูปที่ 3 เส้นใยขนไก่

2.5 การเตรียมดินผสมซีเมนต์

ในการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยจะผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement: OPC) กับน้ำในปริมาณที่เท่ากับค่าขีดจำกัดของเหลว (Liquid Limit) ที่ร้อยละ 84 โดยใช้สัดส่วนของปูนซีเมนต์ที่ผสมในปริมาณร้อยละ 8 โดยน้ำหนักดินแห้ง อัตราน้ำต่อซีเมนต์ W/C ที่ 0.5 และใช้เส้นใยขนไก่ในสัดส่วนร้อยละ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 หลังจากนั้นจึงทำการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน



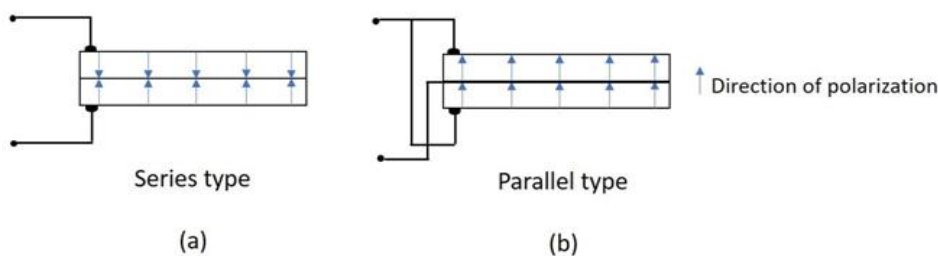
3. วิธีการดำเนินการ

3.1 การทดสอบเป็นเดอร์อีลีเมนต์

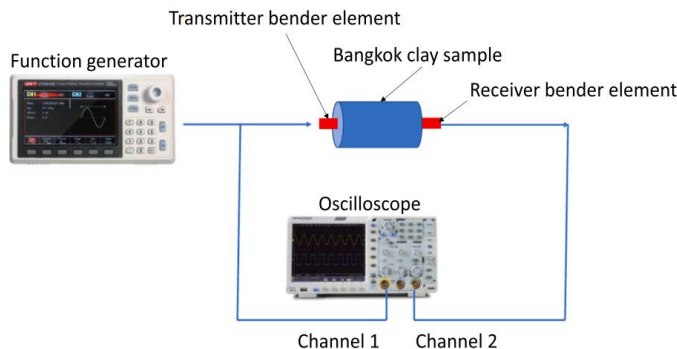
หลักการทำงานของเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกอิงตามคุณสมบัติของวัสดุเซรามิกชนิดเพียโซอิเล็กทริกเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าถูกจ่ายผ่านหน้าสัมผัสของวัสดุเซรามิกสองแผ่นซึ่งจัดวางในรูปแบบที่หนึ่งแผ่นขยายตัวและอีกแผ่นหดตัว จะทำให้ทั้งแผ่นเกิดการงอตัว ดังที่ Dyvik และ Madshus [1] อธิบายไว้ และในทางกลับกันหากมีการรบกวนเชิงกลในแนวราบ (lateral disturbance) เกิดขึ้นกับเซ็นเซอร์ชนิดนี้ ก็จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกจึงสามารถทำหน้าที่เป็นทั้งตัวส่งและตัวรับคลื่นทุติยภูมิได้ แบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่ ชนิดต่ออนุกรม (Series Connected) และชนิดต่อขนาน (Parallel Connected) โดยรูปที่ 4(a) แสดงลักษณะของชนิดต่ออนุกรม ซึ่งมีการจัดเรียงโพลาริไซในทิศทางตรงกันข้ามในแต่ละแผ่น และสายไฟจะเชื่อมต่อกับผิวอิเล็กโทรดด้านนอกทั้งสอง ขณะที่ชนิดต่อขนาน แสดงในรูปที่ 4(b) มีทิศทางของโพลาริไซในแผ่นทั้งสองเหมือนกัน และสายไฟจะเชื่อมต่อกับอิเล็กโทรดด้านนอกทั้งสองที่มีขั้วเดียวกัน ส่วนอิเล็กโทรดตรงกลางจะเป็นอีกขั้วหนึ่ง โดยต้องมีการขัดผิวบางส่วนของแผ่นเพื่อต่อสายไฟเข้าสู่อิเล็กโทรดกลาง โดยทั่วไป

เซ็นเซอร์ชนิดต่ออนุกรมเหมาะสำหรับใช้เป็นตัวรับสัญญาณ ส่วนชนิดต่อขนานเหมาะสำหรับใช้เป็นตัวส่ง การทดสอบนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D8295-19

รูปที่ 5 แสดงผังการทดสอบเป็นเดอร์อีลีเมนต์โดยใช้ Function generator สำหรับสร้างสัญญาณรูปคลื่นทุติยภูมิขนาด $10 V_{pp}$ และต้องจรรยาตามรูปที่ 5 จากนั้นจ่ายสัญญาณตามเงื่อนไขที่ต้องการและใช้เครื่องออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณและเวลาระหว่างสัญญาณที่ส่งและสัญญาณที่รับ โดยเริ่มจากการจ่ายสัญญาณตารางที่ 2 ตามลำดับ ไปยังเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกตัวส่ง ทำให้เกิดคลื่นทุติยภูมิ เมื่อคลื่นทุติยภูมิเดินทางมาถึงปลายอีกด้านของตัวอย่างดิน การบิดตัวของเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกตัวรับจะก่อให้เกิดสัญญาณอีกครั้ง ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังออสซิลโลสโคปเพื่อตรวจจับสัญญาณและเปรียบเทียบเวลาระหว่างการส่งและการรับคลื่นทุติยภูมิ สำหรับการทดสอบจะใช้ความถี่อยู่ระหว่าง 2 ถึง 12 กิโลเฮิร์ตซ์ ภายใต้ระดับความเครียดต่ำมาก (ต่ำกว่า 0.0001%) ที่ความถี่ต่ำๆ สัญญาณอาจได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ Near-Field ส่วนที่ความถี่สูง สัญญาณที่รับจะอ่อนและตีความได้ยาก สัญญาณจะถูกเฉลี่ยถึง 32 ครั้งเพื่อให้ได้สัญญาณที่ชัดเจนยิ่งขึ้น



รูปที่ 4 เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริก (a) ชนิดอนุกรม และ (b) ชนิดขนาน



รูปที่ 5 การทำงานของการทดสอบเบ้นเตอร์อีลีเมนต์

ในการทดสอบเบ้นเตอร์อีลีเมนต์ คลื่นทุติยภูมิถูกสร้างขึ้นและรับโดยเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกที่ติดตั้งไว้ที่ปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างดิน ความเร็วคลื่นทุติยภูมิจะคำนวณจากระยะทางระหว่างปลายถึงปลาย (tip-to-tip) ของเซ็นเซอร์ทั้งสอง และเวลาที่คลื่นทุติยภูมิใช้ในการเดินทางผ่านระยะทางดังกล่าวตามสมการที่ 1

$$V_s = L/t \quad (1)$$

โดยที่ V_s คือ ความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (เมตร/วินาที), L คือ ระยะทางระหว่างปลายของเซ็นเซอร์ทั้งสอง (มิลลิเมตร), t คือ เวลาที่คลื่นเฉือนใช้ในการเดินทางผ่านระยะทางนี้ (ไมโครวินาที)

เวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นเฉือน (t) คำนวณจากสมการที่ 2

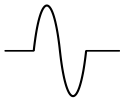
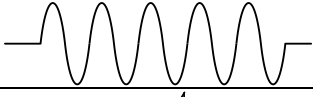
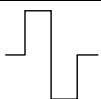
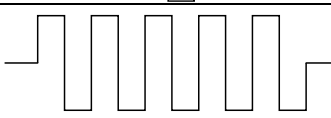
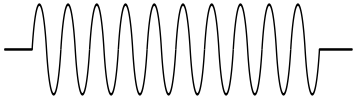
$$t = t_1 - t_2 \quad (2)$$

ความเร็วคลื่นทุติยภูมิสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$V_s = f \cdot \lambda \quad (3)$$

โดยที่ f คือ ความถี่ของเร็วคลื่นทุติยภูมิ (เฮิรตซ์), λ คือ ความยาวคลื่น

ตารางที่ 2 รูปแบบสัญญาณคลื่นทุติยภูมิ

รูปแบบสัญญาณ	รายละเอียด
	คลื่นไซน์ 1 ลูก
	คลื่นไซน์ 5 ลูก
	คลื่นสามเหลี่ยม 1 ลูก
	คลื่นสามเหลี่ยม 5 ลูก
	สี่เหลี่ยม 1 ลูก
	สี่เหลี่ยม 5 ลูก
	คลื่นไซน์ต่อเนื่อง



3.2 การทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัด Unconfined compressive Strength (UCS)

การทดสอบความแข็งแรงของแรงอัดแบบไม่จำกัด (Unconfined compressive Strength, UCS) ด้วยวิธีความแข็งแรงของแรงอัดแบบไม่จำกัด วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความแข็งแรงของแรงอัดแบบไม่จำกัด มีข้อดีของการทดสอบ เช่น ประหยัดเวลาในการทดสอบรู้ผลการทดสอบ ได้อย่างรวดเร็ว ขั้นตอนการทดสอบนั้นง่าย แม้ว่าการทดสอบความแข็งแรงของแรงอัดแบบไม่จำกัดจะทำลายตัวอย่างที่ทดสอบก็ตาม ในการทดลองกับตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ใช้ในการศึกษานี้ ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ถูกบรรจุในกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและความสูง 100 มิลลิเมตร จากนั้นหล่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในภาชนะพลาสติกที่มีฝาปิดสนิท โดยมีระยะเวลาการบ่ม 28 วัน เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการบ่ม ตัวอย่างจะถูกทดสอบโดยใช้วิธี UCS ตามมาตรฐาน ASTM D1633-17 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงอัด ยี่ห้อCONTROLS รุ่น MULTISPEED 34-V1072 ความคุมอัตราการกดที่ความเร็ว 0.5 มิลลิเมตรต่อนาทีจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 เครื่องทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัด (UCS)

4. ผลการทดลอง

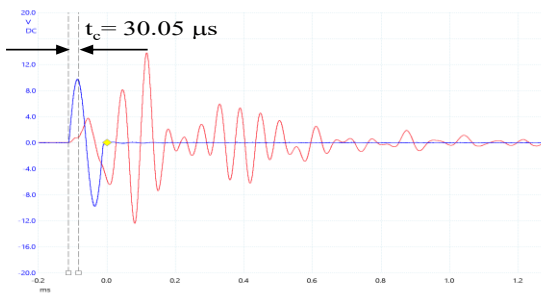
4.1 ผลการทดสอบเป็นเตอร์อีลีเมนต์

จากรูปที่ 5 แสดงเวลาสอบเทียบ t_c เป็น 30.44 ไมโครวินาที ของสัญญาณคลื่นทุติยภูมิแบบไซน์ 1 ลูก โดยนำเซ็นเซอร์ตัวส่งและตัวรับมาชนกันและวัดค่า t_c จากนั้นวัดเวลาที่คลื่นเดินทางผ่านตัวอย่างดินซีเมนต์ t_s เป็น 381.7 ไมโครวินาที ความยาวของตัวอย่างดินซีเมนต์เป็น 99.196 มิลลิเมตร ดังนั้นความเร็วคลื่นทุติยภูมิสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2 เป็น 282.247 เมตรต่อวินาที ตารางที่ 3 ความเร็วคลื่นทุติยภูมิของทุกรูปแบบสัญญาณและมีค่าใกล้เคียงกัน จากสัญญาณไซน์ต่อเนื่องความเร็วคลื่นทุติยภูมิสามารถคำนวณได้จากวิธี cross-correlation ในสมการที่ 3 ซึ่งได้ประมาณ 310-320 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งจากข้อมูลในตารางที่ 3 และ 4 ซึ่งแสดงผลการวัดเวลาการเดินทางของคลื่น (t) และความเร็วคลื่น (V_s) ที่ได้จากสัญญาณรูปแบบต่างๆ พบว่าค่าที่ได้มีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยสัญญาณแบบ คลื่นไซน์ (Sine Wave) ให้ค่าความเร็วคลื่นที่มีความสม่ำเสมอและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Dyvik และ Madhus [1] และ Yamashita et al. [14] ซึ่งระบุว่าการใช้สัญญาณคลื่นไซน์แบบ Single pulse จะช่วยลดผลกระทบจากคลื่นสะท้อน (Near-field Effect) ได้ดีกว่าสัญญาณต่อเนื่อง (Continuous Signal) หรือสัญญาณรูปทรงอื่น ส่งผลให้ค่า V_s ที่คำนวณได้มีความถูกต้องแม่นยำกว่า การทดสอบในงานวิจัยนี้จึงยืนยันได้ว่าการใช้สัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 10 kHz เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดสอบวัสดุดินซีเมนต์ผสมเส้นใยขนไก่การวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณคลื่น (Waveform Analysis) จากการทดสอบเปรียบเทียบ

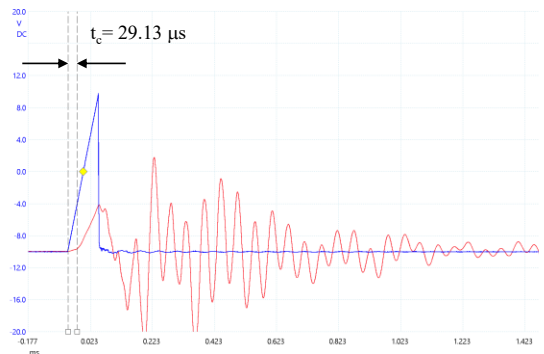


รูปแบบสัญญาณอินพุต (Input Signals) 3 รูปแบบ ได้แก่ คลื่นไซน์ (Sine Wave), คลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) และคลื่นสามเหลี่ยม (Triangle Wave) ที่ความถี่ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 6-17 พบว่ารูปแบบสัญญาณมีผลต่อความชัดเจนของการระบุเวลาการเดินทางของคลื่น (Arrival Time) 1. คลื่นไซน์ (Sine Wave) ให้ลักษณะสัญญาณตอบสนองที่ราบเรียบและมีความเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุด ทำให้สามารถระบุจุดเริ่มต้นของคลื่นทุกสัญญาณ (First arrival) ได้ง่ายและแม่นยำกว่ารูปแบบอื่น ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานการทดสอบเป็นเตอร์อีลีเมนต์ทั่วไป 2. คลื่นสี่เหลี่ยม

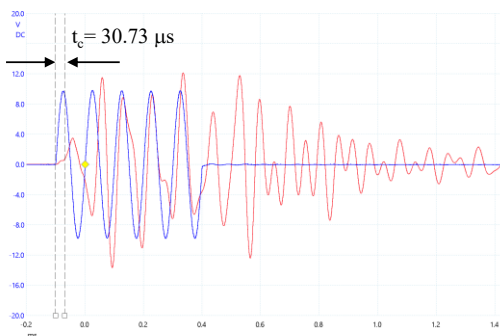
(Square Wave) แม้จะมีพลังงานสูงแต่ส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) และการสั่นค้าง (Ringing) ในช่วงต้นของสัญญาณรับ ทำให้การแปลผลเวลาการเดินทางมีความคลาดเคลื่อนได้ง่ายกว่า 3. คลื่นสามเหลี่ยม (Triangle Wave) ให้ผลตอบสนองที่คล้ายคลึงกับคลื่นไซน์แต่มีความชันของหน้าคลื่นที่แตกต่างกัน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ คลื่นไซน์ (Sine Wave) เป็นหลักในการคำนวณค่าความเร็วคลื่น (V_s) เนื่องจากให้ความถูกต้องและน่าเชื่อถือสูงสุดในการทดสอบกับวัสดุดินซีเมนต์



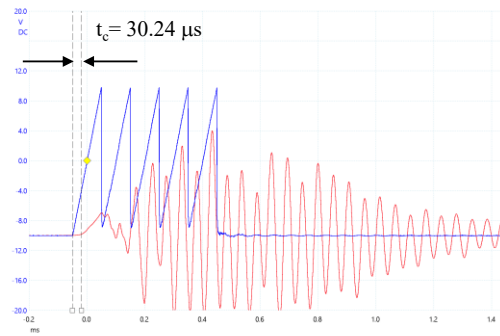
รูปที่ 5 เวลาสอบเทียบสัญญาณไซน์ 1 ลูก



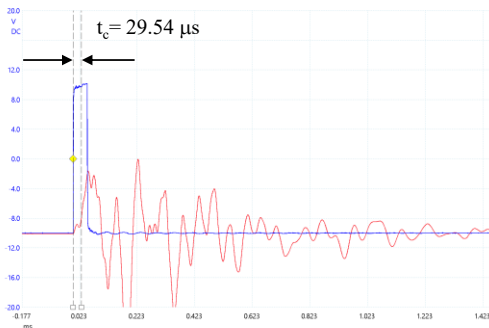
รูปที่ 7 เวลาสอบเทียบสัญญาณสามเหลี่ยม 1 ลูก



รูปที่ 6 เวลาสอบเทียบสัญญาณไซน์ 5 ลูก

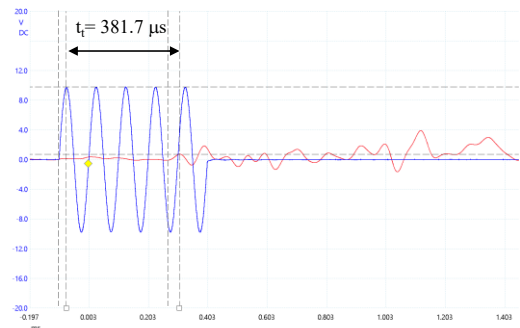


รูปที่ 8 เวลาสอบเทียบสัญญาณสามเหลี่ยม 5 ลูก



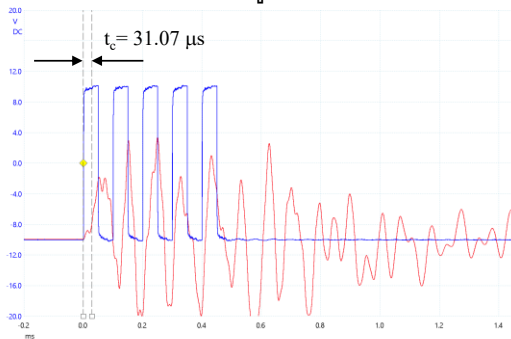
รูปที่ 9 เวลาสอบเทียบสัญญาณสี่เหลี่ยม

1 ลูก



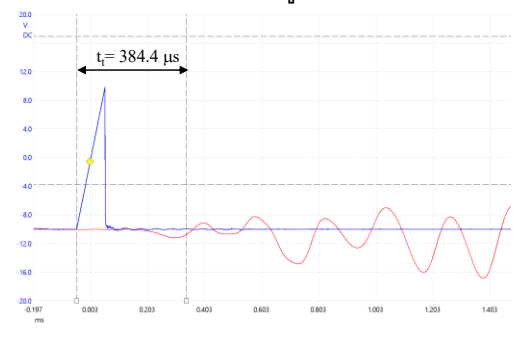
รูปที่ 12 เวลาเดินทางของคลื่นทุติยภูมิสัญญาณไซน์

5 ลูก



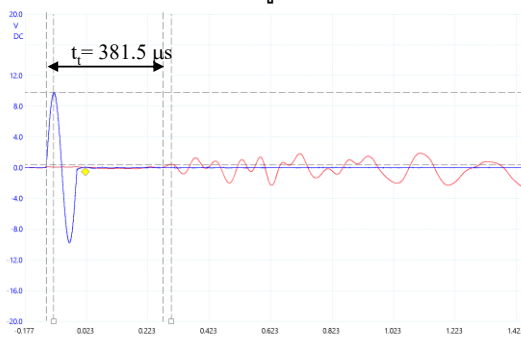
รูปที่ 10 เวลาสอบเทียบสัญญาณสี่เหลี่ยม

5 ลูก

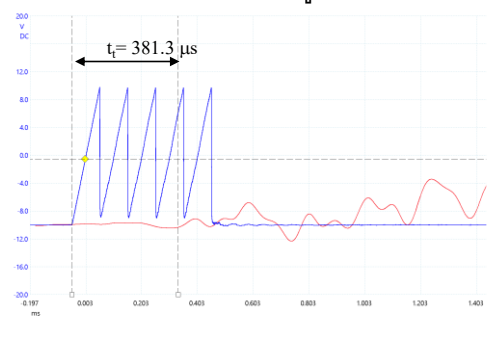


รูปที่ 13 เวลาเดินทางของคลื่นทุติยภูมิสัญญาณ

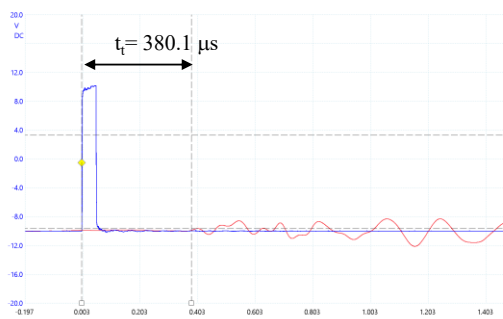
สามเหลี่ยม 1 ลูก



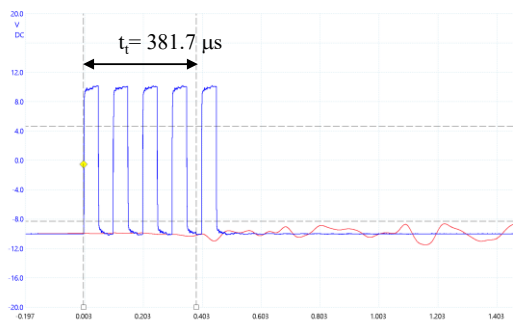
รูปที่ 11 เวลาเดินทางของคลื่นทุติยภูมิ
สัญญาณไซน์ 1 ลูก



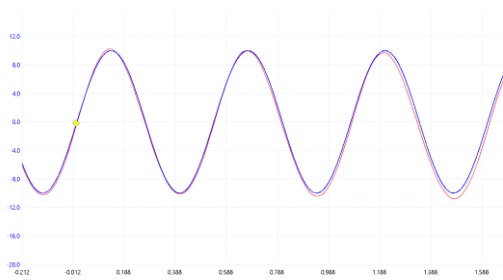
รูปที่ 14 เวลาเดินทางของคลื่นทุติยภูมิสัญญาณ
สามเหลี่ยม 5 ลูก



รูปที่ 15 เวลาเดินทางของคลื่นทุติยภูมิสัญญาณ
สี่เหลี่ยม 1 ลูก



รูปที่ 16 เวลาเดินทางของคลื่นทุติยภูมิสัญญาณ
สี่เหลี่ยม 5 ลูก



รูปที่ 17 เวลาเดินทางของคลื่นทุติยภูมิสัญญาณไซน์
ต่อเนื่อง

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบเป็นเดอร์อีลีเมนต์

Signals	L (mm)	t_r (μ s)	t_c (μ s)	t (μ s)	V_s (m/s)
ไซน์ 1 ลูก	99.196	381.5	30.05	351.45	282.247
ไซน์ 5 ลูก	99.196	381.7	30.73	350.97	282.634
สามเหลี่ยม 1 ลูก	99.196	384.4	29.13	355.27	279.213
สามเหลี่ยม 5 ลูก	99.196	381.3	30.24	351.06	282.561
สี่เหลี่ยม 1 ลูก	99.196	380.1	29.54	350.56	282.964
สี่เหลี่ยม 5 ลูก	99.196	381.7	31.07	350.63	282.908

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบเป็นเดอร์อีลีเมนต์

f (Hz)	λ (m)	V_s (m/s)
622	0.500	311.00
1282	0.250	320.50
1867	0.167	311.17
2583	0.125	322.88
3750	0.083	312.50

4.2 ผลการทดสอบ UCS และการเติมเส้นใยจาก ขนไก่

รูปที่ 18 พบว่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) มีค่า
สูงที่สุดที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 0.5 เนื่องจากเส้นใยขน
ไก่ทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) ช่วยรับ
แรงดึงและช่วยยึดเหนี่ยวเม็ดดิน (Bridging Effect) แต่
เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นเกินกว่าร้อยละ 0.5 จะส่งผลให้
เกิดการจับตัวเป็นก้อน (Agglomeration) ของเส้นใย
ทำให้การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและเกิดช่องว่าง
(Voids) ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ความหนาแน่น
และกำลังรับแรงอัดลดลงโดยมีค่าเท่ากับ 468.62 kPa
ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง ซึ่งเมื่อปริมาณ
เส้นใยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 1.0 และ 1.5 ค่ากำลังรับแรงอัด
กลับมีแนวโน้มลดลง การที่กำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงแรก
เนื่องจากเส้นใยขนไก่ทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมแรง



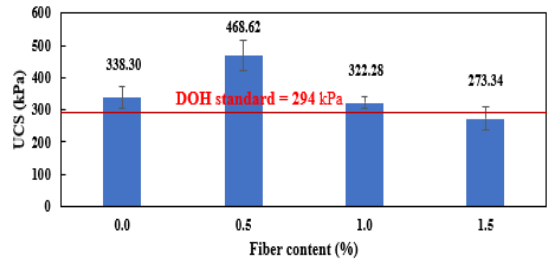
บทความวิจัย

(Reinforcement) ช่วยรับแรงดึงและยึดเหนี่ยวเม็ดดิน (Bridging Effect) แต่เมื่อปริมาณเส้นใยมากเกินไป เกิน 0.5% จะเกิดการจับตัวเป็นก้อน (Agglomeration) ของเส้นใย ทำให้เกิดช่องว่าง (Voids) ภายในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลงและการยึดเกาะระหว่างปูนซีเมนต์กับเส้นใยทำได้ไม่ทั่วถึง ค่ากำลังจึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM ที่แสดงให้เห็นช่องว่างในตัวอย่างที่มีเส้นใยปริมาณสูง

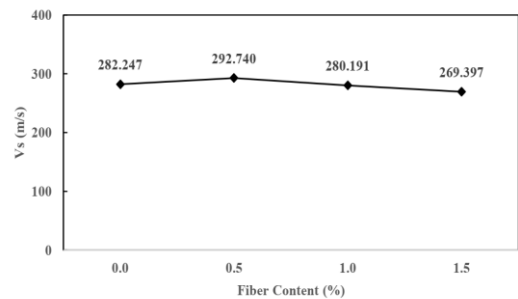
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s และ UCS

จากรูปที่ 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นทุติยภูมิและค่ากำลังรับแรงอัด ซึ่งพบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination) R^2 เป็น 0.9156 ซึ่งความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงนี้แสดงให้เห็นว่าค่าความเร็วคลื่นแปรผันตรงกับค่ากำลังรับแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ เมื่อวัสดุมีการพัฒนากำลังอัดที่สูงขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์ จะส่งผลให้โครงสร้างภายในมีความหนาแน่นและความแข็งตึง (Stiffness) เพิ่มขึ้น ทำให้คลื่นเสียงสามารถเดินทางผ่านตัวกลางได้เร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นในตัวกลางยืดหยุ่น ผลการวิเคราะห์ยืนยันว่าเทคนิคเบ็นเดอร์ลีเมนต์สามารถนำมาใช้ทำนายค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเส้นใยขนไก่ได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้ สามารถที่จะบ่งชี้ว่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่ากำลังรับแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ เมื่อวัสดุมีความแข็งแรงสูง ความหนาแน่นจะมาก ทำให้คลื่นเดินทางได้เร็วขึ้น ดังสมการที่ 4

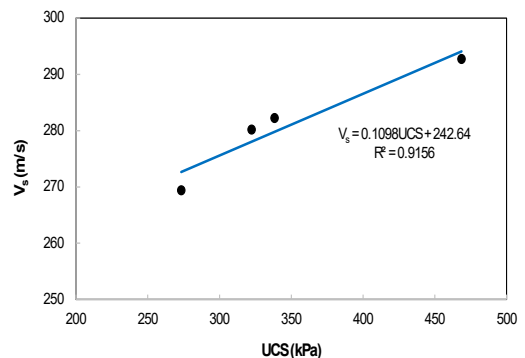
$$V_s = 0.1098UCS + 242.64 \quad (4)$$



รูปที่ 18 ผลการทดสอบ UCS กับปริมาณเส้นใยขนไก่



รูปที่ 19 ผลการทดสอบเบ็นเดอร์ลีเมนต์กับปริมาณเส้นใยขนไก่

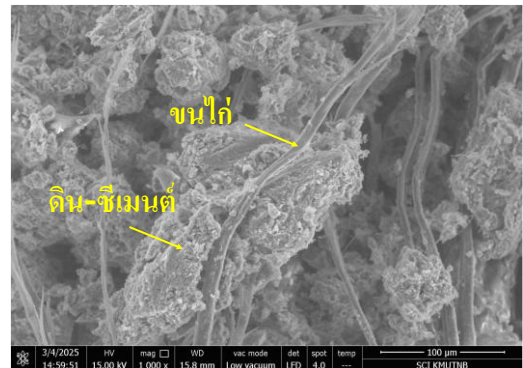


รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s และ UCS



4.4 ผลการทดสอบ SEM

รูปที่ 21 แสดงรูปขยาย 1,000 เท่าเพื่อศึกษา ลักษณะฐานวิทยาและการยึดเกาะระหว่างเส้นใย ชนไก่กับเนื้อดินซีเมนต์ ทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 450 ที่กำลังขยาย 1000x โดยนำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบกำลังแล้วมาเคลือบทอง (Gold coating) ก่อนนำไปส่องดูโครงสร้างภายใน ซึ่งยืนยันได้ว่า ดิน-ซีเมนต์สามารถยึดเกาะเส้นใยธรรมชาติจากชนไก่ได้ดี สอดคล้องกับผลการทดสอบ UCS ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณเส้นใยชนไก่เพิ่มขึ้น โดยใช้เกณฑ์การพิจารณาการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและซีเมนต์ (Interfacial Bonding Criteria): การพิจารณาประสิทธิภาพการยึดเกาะในงานวิจัยนี้ วิเคราะห์จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค (SEM) โดยสังเกตลักษณะรอยต่อระหว่างผิวเส้นใยและเนื้อดินซีเมนต์ (Interfacial Transition Zone: ITZ) ซึ่งการยึดเกาะที่ดี (Good bonding) พิจารณาจาก 2 ลักษณะหลัก คือ 1. กลไกการยึดเกาะทางกายภาพ (Mechanical Interlocking): ผิวของเส้นใยชนไก่มีความขรุขระตามธรรมชาติ ช่วยเพิ่มแรงเสียดทานและแรงยึดเหนี่ยวกับเนื้อซีเมนต์ ไม่พบร่องรอยการหลุดร่อน (Pull-out) หรือช่องว่าง (Gap) ที่รอยต่ออย่างชัดเจน และ 2. การห่อหุ้มของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ (Cement Hydration Products): พบว่ามีผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H gel) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เข้ามาเกาะและห่อหุ้มรอบเส้นใยอย่างหนาแน่น ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ดีของวัสดุ (Compatibility) ช่วยให้เส้นใยสามารถรับแรงดึงและถ่ายเทหน่วยแรงจากเนื้อดินซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 21 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค (SEM) ของตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเส้นใยชนไก่ที่ร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร แสดงลักษณะการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเม็ดดิน 4

5. สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้ เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกเพื่อประเมินกำลังของวัสดุ ดินซีเมนต์ผสมชนไก่ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (V_s) ได้อย่างแม่นยำและมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) โดยปริมาณเส้นใยชนไก่ที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 0.5 ซึ่งช่วยปรับปรุงคุณสมบัติดินให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง อย่างไรก็ตามข้อจำกัดคือปริมาณเส้นใยที่ไม่ควรเกินร้อยละ 0.5 เพื่อป้องกันการเกิดช่องว่างในเนื้อวัสดุ องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นศักยภาพของการใช้เทคนิคคลื่นเสียงความถี่สูงในการตรวจสอบคุณภาพวัสดุก่อสร้างในสนาม (Field Application) ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็ว ประหยัด และไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive) โดยจากผลการวิจัยสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

- จากการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกในการวัดความเร็วคลื่นทุติยภูมิพบว่ารูปแบบของ



สัญญาณไม่มีผลกระทบกับเวลาการเดินทางและความเร็วของคลื่นทุติยภูมิ อีกทั้งการใช้คลื่นไซน์ต่อเนื่องเพื่อวัดความเร็วคลื่นทุติยภูมิยังเป็นวิธีใหม่ที่สามารถวัดค่าได้ใกล้เคียง

- จากการทดสอบ UCS แนะนำให้ใช้เส้นใยชนไก่ในปริมาณร้อยละ 0.5 ในดิน-ซีเมนต์ ซึ่งเป็นค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ แต่ไม่ควรเพิ่มปริมาณเส้นใยชนไก่เกินร้อยละ 1 เนื่องจากกำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามาตรฐานของกรมทางหลวงที่ 294 kPa

- จากการวิจัยพบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นทุติยภูมิและค่ากำลังรับแรงอัด $V_s = 0.1098UCS + 242.64$ ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงมีค่าความคลาดเคลื่อน R^2 เป็น 0.9156

- จากการทดสอบ SEM ยืนยันได้ว่าดิน-ซีเมนต์สามารถยึดเกาะเส้นใยธรรมชาติจากชนไก่ได้ดีสอดคล้องกับผลการทดสอบ UCS ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณเส้นใยชนไก่เพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือตามเลขที่สัญญาเลขที่ KMUTNB-69-IP-16

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Dyvik and C. Madshus, Lab measurements of Gmax using bender elements, the Geotechnical Engineering Division, Advances in the art of testing soil under cyclic conditions, ASCE, MI, USA, 1985, 186-196.
- [2] K. Piriyaikul, A development of a bender element apparatus, The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2010, 20(2), 363-369.
- [3] K. Piriyaikul and N. Thumputi, Using of piezoelectric ceramic sensor to measure the shear wave velocity of Bangkok clay, The Journal of Industrial Technology, 2012, 8(2), 82-89.
- [4] W. Mairaing and C. Amonkul, Soft Bangkok clay zoning, The EIT-Japan Symposium on Engineering for Geo-Hazards: Earthquakes and Landslides-Surface and Subsurface Structures, Proceedings, 2010, 1-10.
- [5] S. Horpibulsuk, S. Shibuya, K. Fuenkajorn and W. Katkan, Assessment of engineering properties of Bangkok clay, Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(2), 73-187.
- [6] S. Pochalard, K. Promsang, C. Wungsumpow and K. Piriyaikul, Enhancement of initial shear modulus in cement and fly ash admixed Bangkok clay out of bender element test, Discover Sustainability, 2025, 6(1), 1-20.
- [7] S. Pochalard, C. Wungsumpow and K. Piriyaikul, Enhancement of compressive strength in cement admixed Bangkok clay with glass fiber and bottom ash for eco-friendly functional road materials, Mechanics of Advanced Composite Structures, 2025, 279-292.



- [8] S. Pochalard, C. Wungsumpow, and K. Piriyaikul, Enhancement on compressive strength of Bangkok clay cement using novel high-strength polyethylene fibers, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Proceedings, 2024, 1335(1), 1-8.
- [9] A. Petcherdchoo, S. Pochalard, and K. Piriyaikul, Use of bender element tests for determining shear modulus of fly-ash and cement admixed Bangkok clay with considering unconfined compressive strength, Case Studies in Construction Materials, 2023, 18, 1-13.
- [10] C. Wungsumpow, S. Towprayoon, C. Chiemchaisri, D. Suanburi and K. Wangyao, Applying electrical resistivity tomography measurement in landfill mining: A study on configuration and spacing setting, Sustainable Energy and Environment (SEE 2018): Technology and Innovation for Global Energy Revolution, Proceedings, 2018.
- [11] H. Ismail and F. L. Chung, Partial replacement of silica by white rice husk ash in natural rubber compounds: The effects of bonding agents, Iranian Polymer Journal, 1998, 7, 255–262.
- [12] Office of Agricultural Economics, Agricultural Economic Situation in 2023 and Outlook for 2024, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Thailand, 2023. (in Thai)
- [13] DRR Standard 244-2567, Standard of Soil Cement Base, 2024. (in Thai)
- [14] S. Yamashita, T. Kawaguchi, Y. Nakata, T. Mikami, T. Fujiwara, and S. Shibuya, Interpretation of international parallel test on the measurement of Gmax using bender elements, Soils and Foundations, 2009, 49(4), 631-650.