



# การพัฒนาเครื่องบันทึกผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

อนิรุทธิ์ สุขแสน และ ชีวินทร์ ลิ้มศิริ\*

สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

\* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author) Email: Cheevin\_lim@vu.ac.th

วันที่รับบทความ: 29 กรกฎาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 26 กุมภาพันธ์ 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 9 มีนาคม 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 เมษายน 2569

**บทคัดย่อ :** การศึกษานี้เป็นการศึกษาพัฒนาเครื่องบันทึกผลสำหรับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวในห้องปฏิบัติการ เช่นเซอร์วัดระยะที่ใช้ในงานในอุตสาหกรรมถูกนำมาใช้เพื่อวัดระยะที่รูตัดตัวของดินขณะทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ สัญญาณแอนะล็อกที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดระยะในรูปของแรงดันไฟฟ้าจะถูกปรับปรุงและแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยวงจรปรับปรุงสัญญาณราคาถูก ไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำงานร่วมกับคำสั่งภาษา C++ ใช้สำหรับการประมวลผลเพื่อแสดงและบันทึกผลจากการทดสอบ ความแม่นยำของการวัดด้วยเซ็นเซอร์ถูกสอบเทียบก่อนใช้งาน การทดสอบอัดตัวคายน้ำหนึ่งมิติของดินเหนียวรุ่นใหม่แบบการเพิ่มน้ำหนักกดทับถูกใช้เพื่อการเปรียบเทียบความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง การหลุดตัวในระหว่างการทดสอบที่ได้จากอุปกรณ์มาตรฐานและเครื่องบันทึกที่พัฒนาในการศึกษาค้างถูกนำมาเปรียบเทียบกัน คุณสมบัติเอกภคณณ์ของดินเหนียวถูกใช้เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบทั้งสอง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดจากอุปกรณ์ที่มีราคาถูกสามารถให้ผลการทดสอบที่น่าพอใจ มีความน่าเชื่อถือของข้อมูลสำหรับใช้ในการนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติการอัดตัวคายน้ำของดินได้

**คำสำคัญ:** ไมโครคอนโทรลเลอร์; การอัดตัวคายน้ำ; ดินเหนียวรุ่นใหม่

# Development of a Microcontroller-Based Data Logger for Consolidation Testing

Aniroot Suksan and Cheevin Limsiri\*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Vongchavalitkul University

\* Corresponding Author, Email: Cheevin\_lim@vu.ac.th

Received: 29 July 2025; Revised 26 February 2026; Accepted: 9 March 2026

Online Published: 20 April 2026

**Abstract:** This study aims to develop a data logger for consolidation testing of clay soil in the laboratory. During the test, an industrial-grade displacement transducer was employed to measure the settlement of the soil sample. Analog signals from sensors were amplified and converted into digital signals using a low-cost conditioning module. Microcontroller-Based System programmed in C++ were developed to indicate and acquire the testing data. The sensor was calibrated with reference dial gauge before use. The one-dimensional consolidation testing by incremental loading was carried out on reconstituted clay using both dial gauge and the developed sensor. The settlement of clay measured during each test was compared. The unique consolidation properties of clay were used to validate the result. The results showed that the data logger developed in this study provides reliable and useful data for analyzing the consolidation characteristic of soil.

**Keyword:** Microcontroller; Consolidation; Reconstituted clay



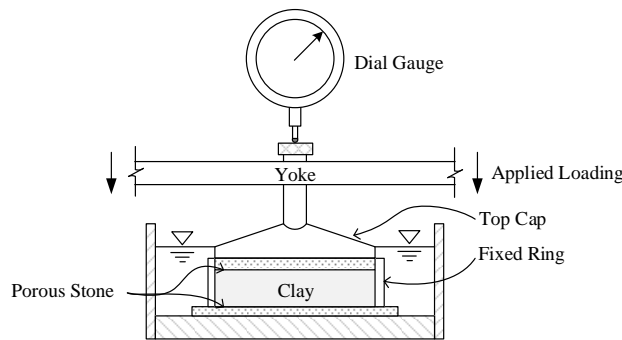
### 1. บทนำ

การอัดตัวคายน้ (Consolidation) เป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในดิน ภายใต้สมมติฐานว่าดินอิ่มตัวด้วยน้ำและมีความเป็นเนื้อเดียว เมื่อมีแรงภายนอกกระทำจะทำให้เกิดความดันน้ำส่วนเกินต้านทานในช่วงแรก ความดันน้ำส่วนเกินนี้จะพยายามทำให้น้ำไหลออกไปตามเส้นทางระบายน้ำที่เป็นรูพรองภายในเนื้อดิน และเมื่อน้ำไหลออกจากรูพรองก็จะทำให้ดินเกิดการทรุดตัว (Settlement) กระบวนการทรุดตัวคายน้จะเกิดขึ้นเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับชนิดของดิน หากเป็นในดินเม็ดหยาบที่มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่สูงจะทำให้กระบวนการอัดตัวคายน้เกิดขึ้นและสิ้นสุดในเวลาอันสั้น ในทางกลับกันหากเกิดในดินเม็ดละเอียดอย่างเช่น ดินเหนียว กระบวนการดังกล่าวอาจกินเวลานานหลายวันหรืออาจจะหลายปีขึ้นอยู่กับระดับความเค้นที่กดทับและคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ของดิน กระบวนการอัดตัวคายน้ที่ยาวนานของดินนี้เป็นสิ่งที่วิศวกรให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเมื่อต้องพิจารณาเสถียรภาพของอาคาร ในทางปฏิบัติมีการทดสอบการอัดตัวคายน้ (Consolidation Test) เพื่อประเมินคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ของดิน ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับวิศวกรในการคำนวณเพื่อทำนายปริมาณการทรุดตัวรวมและระยะเวลาการทรุดตัวคายน้ การทดสอบการอัดตัวคายน้

น้ำมีหลักการทดสอบคือวางน้ำหนักด้านบนของตัวอย่าง ขณะเดียวกันมีการวัดการทรุดตัวของตัวอย่างเทียบกับเวลาเพื่อจำลองการเกิดกระบวนการอัดตัวคายน้ดังรูปที่ 1

การทดสอบตามมาตรฐานมีการกำหนดให้บันทึกค่าการทรุดตัวตลอดช่วงเวลา 24 ชั่วโมงของการทดสอบเพื่อให้แน่ใจว่าความดันน้ำส่วนเกินไหลออกจากตัวอย่างจนหมด หรือไม่เกิดการทรุดตัวเพิ่ม [1] ซึ่งเป็นการยืนยันว่าดินมีระดับการอัดตัวคายน้เข้าใกล้ร้อยละ 100 ขณะทดสอบมีการอ่านค่าการทรุดตัวจากไอดีลเกจ (Dial Gauge) ที่เวลาแบบทวีคูณ (เวลาอ่านครั้งถัดไปมีค่าเป็นหนึ่งเท่าของเวลาก่อนหน้า) ทำให้ผู้ทดสอบจะต้องอ่านค่าและบันทึกผลการทดสอบเช่นนี้ ทุกค่าระดับน้ำหนักกดทับ ในบางกรณีเวลาในการทดสอบรวมทั้งสิ้นอาจใช้เวลา 7-14 วัน [2]

ระยะเวลาการทดลองที่นานนี้จะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่สูง จึงทำให้มีนักวิจัยพยายามหาวิธีการทดสอบที่ใช้เวลาน้อยลงเพื่อลดเวลาในการทดลอง มีการศึกษาที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวเทียบคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ เช่น ชีตจำกัดเหลว ชีตจำกัดพลาสติก เป็นต้น แต่ความแม่นยำสามารถนำไปใช้ประเมินคุณสมบัติเบื้องต้นของดินเท่านั้น [3]



รูปที่ 1 แผนภาพการทดสอบการอัดตัวคายน้ของดิน



การทดลองแบบเร็วถูกนำเสนอโดย Sridharan et. al. [4] เพื่อให้ระยะเวลาการทดสอบสั้นลง หลักการคือการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบมาตรฐานแตกต่างกันเพียงเวลาการทดสอบ โดยจะใช้วิธีการคำนวณสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำแบบวิธี Hyperbolic method เพื่อประเมินอัตราการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ร่วมกับการบันทึกค่าความดันน้ำส่วนเกินระหว่างการทดสอบเพื่อประเมินระดับความเค้นประสิทธิภาพ การทดสอบจะทำการทดสอบในแต่ละช่วงประมาณ 25-40 นาที ซึ่งเมื่อรวมเวลาทดสอบทั้งหมดจะใช้เวลาเพียง 3-4 ชั่วโมง ซึ่งน้อยกว่าเวลาที่ใช้ในการทดสอบแบบมาตรฐานมาก แต่การทดสอบดังกล่าวยังไม่เป็นที่แพร่หลาย

จนกระทั่งมีมาตรฐานการทดสอบแบบอัตราความเครียดในแนวตั้งคงที่ (Constant Rate of Strain) ซึ่งเป็นการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่พัฒนาจากการทดสอบแบบการใส่หน้าหนักแบบเป็นขั้น หลักการคล้ายการทดสอบแบบใส่หน้าหนักแต่แตกต่างกันที่มีการกดตัวอย่างด้วยความเครียดคงที่คล้ายการทดสอบกำลังอัด แต่ดินที่จะทดสอบอยู่ในวงแหวนอัดตัวคายน้ำ นอกจากนี้ยังมีระบบความดันกลับ (Back Pressure) เพื่อให้ตัวอย่างอิมิตัวด้วยน้ำ และการวัดความดันน้ำส่วนเกินขณะการทดสอบ การกดตัวอย่างจะทำให้ความเค้นรวม (Total Stress) เพิ่มขึ้น ขณะที่ความดันน้ำส่วนเกินจะถูกวัดเพื่อนำมาคำนวณความเค้นประสิทธิภาพ การทรุดตัว แรงดันน้ำส่วนเกินและแรงกดใช้เครื่องมือตรวจวัดแบบอิเล็กทรอนิกส์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมระบบการทำงานอัตโนมัติ [5] เนื่องจากราคาของอุปกรณ์ที่สูงจึงยังไม่เป็นที่นิยมในประเทศไทยนัก

S. Rojmosik, and S. Sonlamp [6] พัฒนาการทดสอบการอัดตัวคายน้ำอัตโนมัติสำหรับดินเหนียวโดยใช้เครื่องมือตรวจวัดอิเล็กทรอนิกส์เพื่อบันทึกผลการทรุดตัวในแนวตั้งด้วย Linear Variable Displacement Transducer (LVDT) ร่วมกับการวัดแรงที่ด้านบนของตัวอย่างด้วย load cell ให้แรงกดทับด้วยกระบอกนิวเมตริกตลอดระยะเวลาทดสอบ พร้อมทั้งควบคุมด้วยโปรแกรมและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยมีกระบวนการทำงานคือเมื่อน้ำหนักกดทับและตรวจวัดการทรุดตัวของตัวอย่างพร้อมทั้งรักษาระดับความเค้นไว้คงที่ จนการทรุดตัวมีค่าคงที่ระบบจะมีการสั่งการให้กระบอกนิวเมติกส์ (Pneumatics) เคลื่อนที่กดตัวอย่างในแนวตั้งเพื่อให้หน่วยความเค้นรวมมีค่าที่เพิ่มขึ้นเป็นหนึ่งเท่าของค่าก่อนหน้า ทุกกระบวนการจะทำงานอัตโนมัตินับตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ จากผลการทดลองเป็นผลที่น่าพอใจและใช้งบประมาณไม่สูงมากเมื่อเทียบกับเครื่องมือที่จัดหาจากต่างประเทศ

ในปัจจุบันประเทศไทยยังคงนิยมใช้การทดสอบแบบมาตรฐานที่ใช้การขึ้นน้ำหนักแบบขั้นและใช้เวลาการทดสอบที่ 24 ชั่วโมงเป็นอย่างน้อยสำหรับทุกช่วงน้ำหนักกดทับ อ่านค่าโดยผู้ทดสอบและจดบันทึกข้อมูลลงกระดาษ อาจมีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ตรวจวัดและบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์ แต่เครื่องมือที่ใช้เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพงจึงมีใช้งานอย่างจำกัด

ปัจจุบันมีเทคโนโลยีไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ทำหน้าที่ประมวลผลระบบที่ไม่ซับซ้อนมาก มีราคาถูกและยังเป็นการเปิดให้นักพัฒนาสามารถใช้งานได้แบบอิสระ (Open Source) สามารถนำไปประยุกต์สร้างนวัตกรรมได้อย่างหลากหลายด้านโดยที่ราคาที่ไม่สูงมาก มีภาษาในการ



## บทความวิจัย

สั่งการที่นิยมแพร่หลายเช่น C++ ทำให้ราคาอุปกรณ์ต่าง ๆ ถูกลง และสามารถนำไปใช้งานในหลากหลายด้าน [7] การศึกษาในอดีตได้นำไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับแปลงผลจากเซ็นเซอร์เพื่อวัดผลการโก่งตัวและการวัดแรงในวัสดุ [8] ซึ่งได้ผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจ สามารถนำข้อมูลนำไปใช้งานได้ มีการนำไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรขยายสัญญาณราคาถูกเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจากสเตรนเกจ และแปลงไปเป็นความเค้นหรือแรงในวัสดุ ซึ่งสามารถให้ผลการสอบที่เทียบเท่ากับเครื่องมือวัดได้อย่างถูกต้องและสามารถทำงานได้ นอกจากนี้ยังมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการใช้แทนเครื่องมือที่มีราคาแพง [9] อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างการแปลงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์กับการทดสอบตามมาตรฐานด้านวิศวกรรมโยธายังไม่เป็นที่แพร่หลายนัก

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นในการพัฒนาระบบการตรวจวัดการทรุดตัวของตัวอย่างดินสำหรับการทดสอบการอัดตัวของดิน โดยใช้เซ็นเซอร์วัดการทรุดตัวเทียบกับเวลา และส่งการด้วยเก็บข้อมูลการทดสอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์บันทึกลง Micro SD Card ผลการทดสอบจากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการทดสอบแบบดั้งเดิมที่ใช้ไอตัลเกจและนาฬิกาจับเวลา

## 2. วิธีการดำเนินงานทดลอง

### 2.1 การพัฒนาเครื่องบันทึกผลการทดลอง

เซ็นเซอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวัดระยะการทรุดตัวในแนวดิ่งของตัวอย่าง (Displacement Transducer) โครงสร้างภายในจะเป็นคานยื่นที่มีสเตรนเกจ (Strain Gauge) ติดทั้งด้านบนและล่าง เมื่อมีการเคลื่อนตัวจะ

ทำให้คานยื่นเกิดการโก่งตัวของคาน ส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าจากสเตรนเกจเปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงความต้านทานจะมีความอ่อนไหวต่อสภาพแวดล้อมอย่างมาก ทำให้จะต้องมีวงจรที่ลดผลกระทบดังกล่าว โดยทั่วไปผู้ผลิตมักนิยมต่อวงจรแบบ Wheatstone Bridge โดยนำตัวต้านทานมาต่อขนาน 4 ตัว เมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟเข้าวงจร และวัดแรงดันไฟที่ออกจากวงจรจะพบว่าเมื่อความต้านทานที่เปลี่ยนไปจะทำให้แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนไปด้วย [8] แรงดันไฟฟ้านี้สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นระยะทาง

เช่น เซอร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็น Displacement Transducer (รูปที่ 2) ต่อวงจรสเตรนเกจแบบ Full bridge กล่าวคือมีการใช้สเตรนเกจเป็นตัวต้านทานทั้ง 4 ตัว รุ่น TLDT10MM มีช่วงระยะยุบ 10 มิลลิเมตร สำหรับสัญญาณที่ส่งออกจากเซ็นเซอร์เป็นแบบแอนะล็อก 2mV/V

ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้บอร์ด Arduino Uno version 3 (รูปที่ 3) ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากมีราคาถูกใช้งานง่ายกินกระแสไฟฟ้าน้อย ใช้แรงดันไฟฟ้า 7-12 v ภายในมีชิพ ATmega328 ทำงานที่ความถี่ 16 MHz และมีขาเชื่อมต่อแบบ UART และ I<sup>2</sup>C เพียงพอสำหรับต่อกับอุปกรณ์เสริมหรือเซ็นเซอร์ที่ต้องการใช้งานในการศึกษา



รูปที่ 2 เซ็นเซอร์วัดการทรุดตัว



รูปที่ 3 บอร์ด Arduino UNO version 3 [7]

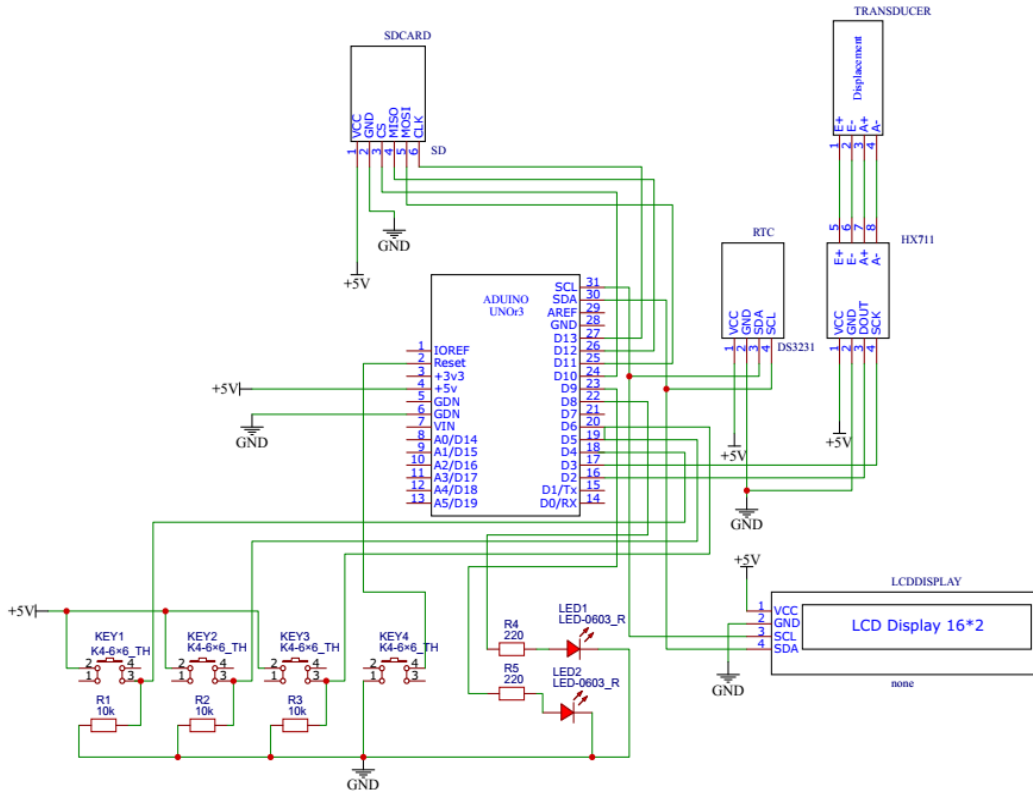
ในการรับสัญญาณจากเซ็นเซอร์วัดระยะที่มีแรงดันไฟฟ้าออกมามีค่าน้อยมากจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสัญญาณให้มีความเสถียรโดยใช้บอร์ด HX711 ที่มีหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter, ADC) ขนาด 24 บิต ใช้สายสัญญาณเพียง 2 สาย คือ Clock และ Data มักนิยมใช้แปลงสัญญาณจากอุปกรณ์ Load Cell ที่ใช้สเตรนเกจ

การต่อวงจรและการทำงาน จะเริ่มจากเซ็นเซอร์วัดระยะต่อเข้ากับบอร์ดขยายสัญญาณและทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นต่อเข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino R3 การเก็บข้อมูลจะใช้ Micro SD Card ปุ่มควบคุมการทำงานจะถูกออกแบบให้มีทั้งสิ้น 4 ปุ่ม คือ ปุ่ม Tare ตั้งค่าที่วัดได้ให้เป็นศูนย์ ปุ่ม Start สำหรับเริ่มการบันทึกผล และ ปุ่ม Stop เพื่อหยุดการบันทึกผล มีการใช้วงจรแบบ Pull-down Resistance เพื่อป้องกันการรบกวนสัญญาณที่อาจทำให้เกิดการสั่งงานที่ไม่พึงประสงค์

การจับเวลาสำหรับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำในการศึกษาครั้งนี้จะใช้โมดูล Real Time Clock (RTC) เพื่อจับเวลา การแสดงข้อความโต้ตอบกับผู้ใช้งาน พร้อมทั้งแสดงและค่าระยะยุบ และเวลาที่เปลี่ยนไปจะใช้จอ LCD ที่สื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ I<sup>2</sup>C ขนาด 16 x 2 การต่อวงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์เชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์และบอร์ดต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4

## 2.2 การเตรียมทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นดินเหนียวมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.65 มีขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) และดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity Index) เท่ากับ 50% และ 30% ตามลำดับ เมื่อจำแนกดินด้วยระบบ Unified Soil Classification System (USCS) พบว่าเป็นดินเหนียวที่มีความพลาสติกต่ำ (CL) ตัวอย่างดินเหนียวบ้นใหม่จะเตรียมโดยนำตัวอย่างดินอบด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วัน และนำมาทุบให้เป็นเม็ด ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 จากนั้น เติมน้ำกลั่นที่ปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณความชื้นที่ขีดจำกัดเหลวและคนให้เข้ากัน ดินเหนียวบ้นใหม่จะเก็บไว้ในภาชนะที่เก็บความชื้นอย่างน้อย 3 วันก่อนทดสอบ จากนั้นดินเหนียวจะถูกนำมาใส่วงแหวนอัดตัวคายน้ำ แบบยึดแน่น (Fixing Ring) และประกอบอุปกรณ์การทดสอบ การทดสอบจะทดสอบภายใต้มาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท มขท.(ท) 305-254 [1] การวัดการทรุดตัวเทียบกับเวลาจะอ่านค่าทรุดตัวจากไดอัลเกจร่วมกับนาฬิกาจับเวลา



รูปที่ 4 แสดงการต่อวงจรสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดการทรุดของดินเทียบกับเวลา

ในขณะที่การทดสอบอีกครั้งจะใช้เซ็นเซอร์ร่วมกับเครื่องบันทึกที่พัฒนาในการศึกษารั้งนี้ ทั้งสองการทดสอบจะดำเนินการภายใต้เงื่อนไขเดียวกันคือ อัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักกดทับจะมีค่าเป็น 2.0 เท่าของค่าน้ำหนักกดทับก่อนหน้า เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดดินวิบัติเมื่อมีความชื้นสูง ความเค้นในการทดสอบครั้งนี้คือ 5, 12, 25, 50, 100, 200, และ 400 kPa เพื่อใช้พฤติกรรมอัดตัวคายน้ำที่เป็นเอกลักษณ์ของดินเหนียวร่วมด้วยในการตรวจสอบผลการทดสอบ ดังนั้นปริมาณความชื้นเริ่มต้นของดินเหนียวทั้งสองการทดสอบจะมีค่าแตกต่างกัน

การอ่านค่าการทรุดตัวจะอ่านที่เวลา 0, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15 และ 30 นาที และ 1, 2, 4, 8, 16, และ

24 ชั่วโมง หากการทรุดตัวที่ 24 ชั่วโมงยังไม่สามารถแสดงการเปลี่ยนความชันของความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวและเวลาได้ จะทำการขยายเวลาทดสอบออกไปอีกคราวละ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งกราฟการทรุดตัวเทียบกับเวลาจะบ่งชี้ว่าสิ้นสุดกระบวนการอัดตัวคายน้ำสำหรับการวัดด้วยเครื่องบันทึกที่กำหนดเวลาการบันทึกให้ใกล้เคียงกับเวลาการวัดมาตรฐาน กล่าวคือเครื่องจะทำการบันทึกที่ระยะทรุดตัวเมื่อเวลาผ่านไป (Elapsed-Time) มีค่าเป็นหนึ่งเท่าของค่าก่อนหน้า และเมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 24 ชั่วโมงจะบันทึกค่าทุก ๆ 2 ชั่วโมง และจะบันทึกที่เวลากดปุ่มหยุดการบันทึกเพื่อความสมบูรณ์ของข้อมูล การติดตั้งเครื่องมือเพื่อเครื่องบันทึกการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5



(ก)



(ข)

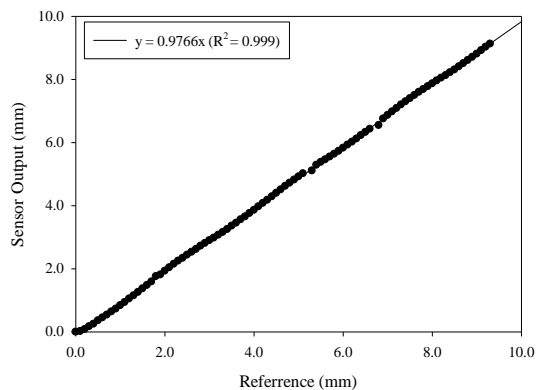
รูปที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการทรุดตัว (ก) นาฬิกาวัด (ข) เซ็นเซอร์และเครื่องบันทึก

### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 3.1 การสอบเทียบเซ็นเซอร์

ก่อนนำเซ็นเซอร์ไปใช้งานจะต้องใช้ Calibration Factor เป็นตัวเลขเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าให้เป็นระยะ มีหลักการคือนำเซ็นเซอร์วัดระยะที่ทราบค่าเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ และเพื่อความสะดวกจะใช้ไลบรารี (Library) ในการสอบเทียบสำหรับ Load Cell [10] ดำเนินการผ่านโปรแกรม Arduino IDE ในการศึกษารั้งนี้ค่า Calibration Factor เฉลี่ยตลอดช่วงการวัดของเซ็นเซอร์มีค่าเท่ากับ 439500 จากนั้นจะนำเซ็นเซอร์ไปสอบเทียบค่าระยะกับไดอัลเกจที่มีความละเอียดเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นความละเอียดตามมาตรฐานการทดสอบการอัดตัวของกรวมทางหลวงชนบท [1] เพื่อตรวจสอบความแม่นยำในการวัด การสอบเทียบได้ดำเนินการสามครั้งเพื่อยืนยันผลการสอบเทียบ รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ของค่าระยะจาก

การวัดของทั้งสองอุปกรณ์ โดยความสัมพันธ์มีค่า  $R^2$  สูงถึง 0.999 ซึ่งยืนยันถึงความเป็นเชิงเส้นของข้อมูล และจะพบว่าค่าระยะที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์มีค่าน้อยกว่าค่าที่อ่านได้จากมาตรวัดเล็กน้อย เมื่อวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์จากการสอบเทียบพบว่ามีค่าอยู่ราว 2-5%



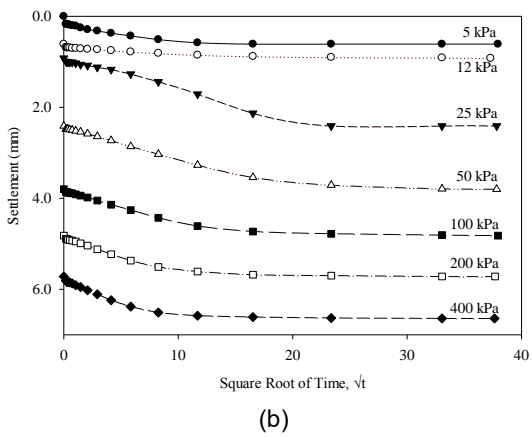
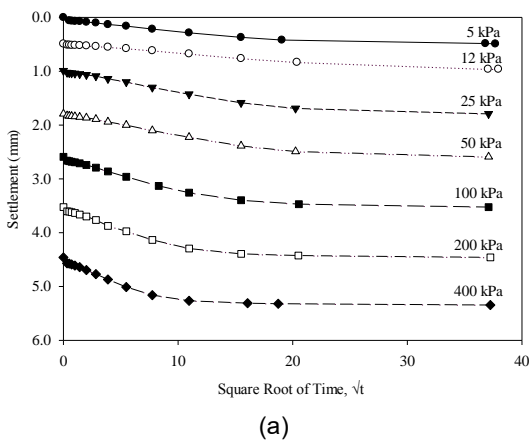
รูปที่ 6 การสอบเทียบเซ็นเซอร์และมาตรวัดอ้างอิง



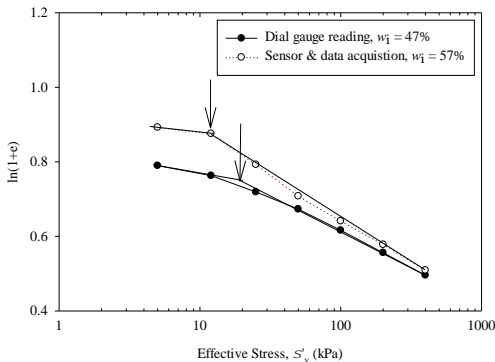
### 3.2 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐานภายใต้ความเค้นในแนวตั้งประสิทธิผลตั้งแต่ 5-400 kPa ของทั้งสองการทดสอบแสดงดังรูปที่ 7 จากรูปพบว่าดินตัวอย่างทั้งสองการทดลองมีการทรุดตัวอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเวลาประมาณ 100 นาที การทรุดตัวเทียบกับเวลาจึงลดลงและมีค่าค่อนข้างคงที่จนกระทั่งครบระยะเวลาการทดสอบที่ 24 ชั่วโมง นอกจากนี้จะพบว่าที่ตำแหน่งเวลาการบันทึกค่าการทรุดตัวของสองวิธีมีค่าต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากการกำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์มีเก็บข้อมูลที่ Elapsed Time มีค่าเป็น 2 เท่าของค่าก่อนหน้า ซึ่งใช้เพียงเป็นคำสั่งที่สั้นและง่ายกว่าการกำหนดเวลาที่เวลาตามมาตรฐานซึ่งเป็นข้อจำกัดของเครื่องบันทึกนี้ พฤติกรรมทรุดตัวของดินเทียบกับเวลาที่ได้จาก การทดสอบจากการอ่านไอดีลเกจและที่ได้จากเครื่อง

บันทึกก็มีลักษณะคล้ายกัน แตกต่างเพียงระดับของการทรุดตัว ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณความชื้นของตัวอย่างทั้งสองมีค่าแตกต่างกันซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป การตีความพฤติกรรมอัดตัวคายน้ำของดินมักแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรง (Void Ratio,  $e$ ) และลอการิทึมของความเค้นประสิทธิผล มักจะได้รับความสัมพันธ์เส้นโค้งรูปตัว S อย่างไรก็ตามก็ดีเพื่อการนำเสนอความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง การศึกษานี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมฐานธรรมชาติของดัชนีอัตราส่วนโพรง ( $\ln(1+e)$ ) และลอการิทึมของความเค้นประสิทธิผล (รูปที่ 8) โดยที่อัตราส่วนโพรงจะพิจารณาจากระดับการทรุดตัวสุดท้าย ณ ระดับความเค้นประสิทธิผลนั้น จากรูปพบว่าอัตราส่วนโพรงลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระดับความเค้นประสิทธิผล โดยจะสังเกตเห็นเส้นตรงสองเส้นที่มีความชันต่างกัน



รูปที่ 7 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวปั้นใหม่ (a) ผลการทดสอบจากการบันทึกโดยไอดีลเกจ (b) ผลการทดสอบที่บันทึกจากเครื่องบันทึก



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและความเค้นประสิทธิผล

ผลจากการทดสอบจากทั้งสองครั้งมีความคล้ายกัน แต่ผลการทดสอบจากเครื่องบันทึกจะพบว่ามิติซึ้นอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นที่สูงกว่า ซึ่งอาจเกิดการเตรียมตัวอย่างที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงกว่า คือ 57% ในขณะที่ตัวอย่างที่ทดสอบและบันทึกผลโดยไดอัลเกจ ตัวอย่างมีความชื้นเริ่มต้นเพียง 47% จึงมีอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นที่ต่ำกว่า ความแตกต่างของเส้นอัตราตัวคายน้ำของดินเหนียวบั้นใหม่ ที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นแตกต่างกันในการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ HONG *et. al.* [11] โดยระบุว่าความเค้นที่จุดตัดของเส้นตรงทั้งสองคือความเค้นดูด (Suction Pressure) ที่ต้านทานการทรุดตัว และจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณความชื้นสูงขึ้น เมื่อความเค้นมีค่าสูงเกินค่าความเค้นดูด ความชันของเส้นความสัมพันธ์จะนิยามเป็นดัชนีการอัดตัว (Compression Index,  $C_c$ ) ซึ่งพบว่าดินที่ทดสอบโดยใช้เซ็นเซอร์และเครื่องบันทึกจะมีดัชนีการอัดตัวที่สูงกว่าเล็กน้อย

สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation,  $c_v$ ) เป็นอีกคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ำของดินที่วิศวกรให้ความสนใจ โดยบ่งบอกถึงอัตรา

ความเร็วในการเกิดกระบวนการคายน้ำ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เทคนิคการหาสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำด้วยวิธีรากที่สองของเวลา (Square Root of Time Method) สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำที่ร้อยละ 90 ( $t_{90}$ ) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C_v = \frac{0.848 \bar{H}^2}{t_{90}} \quad (1)$$

โดยที่  $C_v$  คือสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ ( $\text{mm}^2/\text{min}$ )  
 $\bar{H}$  ระยะทางระบายน้ำของตัวอย่าง

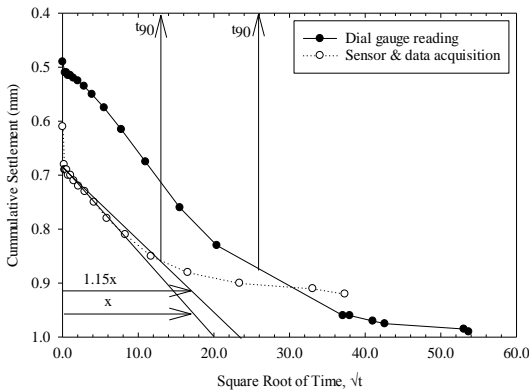
การคำนวณหา  $t_{90}$  สามารถดำเนินการได้จากความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของเวลาและการทรุดตัวแสดงดังรูปที่ 9 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำจากทั้งสองการทดสอบแสดงดังรูปที่ 10 จากรูปพบว่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำที่ได้จากการทดสอบทั้งสองครั้ง มีค่าแตกต่างกันสูงในช่วงแรกที่มีระดับความเค้นประสิทธิผลไม่เกิน 50 kPa จากนั้นความแตกต่างระหว่างการทดสอบทั้งสองครั้งลดลง เนื่องจาก  $t_{90}$  มีผลโดยตรงจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวและเวลา ดังจะสังเกตเห็นได้จากการเปรียบเทียบ  $t_{90}$  ของการทดสอบทั้งสองครั้งที่ระดับความเค้นประสิทธิผลที่เท่ากัน การเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวเทียบกับเวลาเพียงเล็กน้อยก็ส่งผลต่อค่า  $t_{90}$  อย่างมีนัยยะสำคัญ เมื่อความเค้นมีค่าสูงกว่า 50 kPa สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของทั้งสองการทดสอบมีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความเค้นที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาในอดีต ที่ระบุว่าดินเหนียวที่มีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำเพิ่มขึ้นตามระดับความเค้น พฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวเหล่านั้นถูกควบคุมโดยปัจจัยด้านกลไก



บทความวิจัย

(Mechanical Factor) ที่ขึ้นอยู่กับกายภาพของดิน

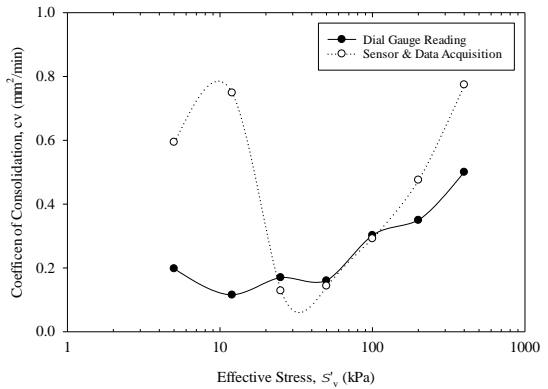
โดยตรง [12-13]



รูปที่ 9 ระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำที่ร้อยละ 90 ( $t_{90}$ )  
โดยวิธีรากที่สองของเวลา

การเตรียมตัวอย่างทดสอบของดินชนิดเดียวกันแต่มีความชื้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันในการศึกษาครั้งนี้ ทำให้การเปรียบเทียบการทรุดตัวเทียบกับเวลาของทั้งสองการทดสอบโดยตรงอาจทำให้เห็นถึงความแตกต่างของข้อมูล ซึ่งไม่สามารถแบ่งแยกว่าเกิดจากคุณสมบัติของดินเองหรือเกิดจากความแม่นยำของเครื่องทดสอบ อย่างไรก็ตามดินเหนียวมีคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ำที่จำเพาะเป็นเอกลักษณ์

Burland [14] ได้เสนอเส้นความสัมพันธ์เนื้อแท้ (Intrinsic Compression Line, ICL) ของดินเหนียวบั้นใหม่ที่มีความชื้นใกล้เคียงกับความชื้นที่ขีดจำกัดเหลว โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคืออัตราส่วนโพรงที่ระดับความเค้น 100 และ 1000 kPa เขียนเป็นสัญลักษณ์คือ  $e_{100^*}$  และ  $e_{1000^*}$  ตามลำดับ ดัชนีช่องว่าง (Void Index,  $I_v$ ) เป็นฟังก์ชันของระดับความเค้นประสิทธิภาพและเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำและความเค้นประสิทธิภาพ

$$I_v = \frac{e - e_{100^*}}{C_c} \quad (2)$$

โดยที่  $C_c = e_{1000^*} - e_{100^*}$  หมายถึง : ในการศึกษาครั้งนี้ใช้  $e_{1000^*}$  เป็นค่าประมาณที่จุดตัดกราฟ เนื่องจากความเค้นที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีค่ามากที่สุดเพียง 400 kPa

สถานะของดินเหนียวบั้นใหม่ทุกชนิดจะอยู่เป็นเส้นความสัมพันธ์เนื้อแท้ที่เขียนเป็นสมการดังนี้ [14]

$$I_v = 2.45 - 1.85 \log \sigma'_v + 0.015 \log \sigma_v^3 \quad (3)$$

เพื่อใช้ยืนยันผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่มีความชื้นเริ่มต้นต่างกันจากการศึกษาครั้งนี้ ดัชนีช่องว่างที่คำนวณจากสองการทดสอบถูกนำมาเปรียบเทียบกับเส้นเนื้อแท้ของดินเหนียวดังแสดงในรูปที่ 11 จากรูปพบว่าเส้นดัชนีช่องว่างจากทั้งสองการทดสอบในช่วงที่มีความเค้นต่ำกว่า 50 kPa จะมีค่าแตกต่างจากเส้นเนื้อแท้ และเมื่อความเค้นมีค่ามากกว่า 50 kPa พบว่าดัชนีช่องว่างของการทดสอบ



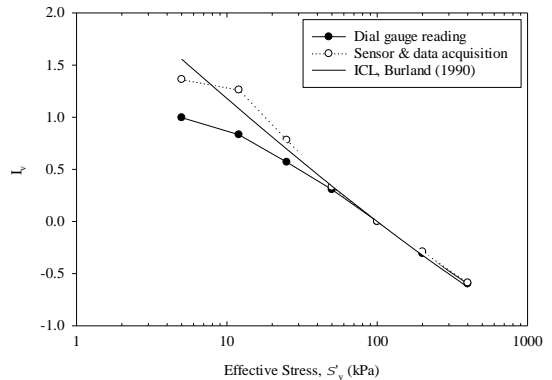
## บทความวิจัย

ทั้งสองสอดคล้องกับเส้นสถานะเนื้อแท้ แม้ว่าจะมีอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นต่างกันและเซ็นเซอร์มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ 2.5-5.0% ซึ่งผลดังกล่าวสามารถยืนยันความแม่นยำของผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบ โดยอาศัยคุณสมบัติของดินเหนียวเป็นสิ่งยืนยันร่วมกับการเปรียบเทียบค่าระยะยุบเทียบกับเวลา แม้ว่าผลในช่วงแรกของการทดสอบดัชนีช่องว่างจะมีค่าสูงและต่ำกว่าเส้นเนื้อแท้ ทั้งนี้อาจเกิดจากความเค้นเริ่มต้นที่ใช้ทดสอบค่าน้อยกว่าค่าความเค้นที่แนะนำสำหรับสมการที่ (3) ซึ่งระบุว่าเหมาะสมในการทำนายผลที่ทดสอบด้วยความเค้นตั้งแต่ 10-4000 kPa

## 4. บทสรุป

การเปรียบเทียบผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวบั้นใหม่ที่มีความชื้นเริ่มต้นต่างกันแสดงให้เห็นว่าเครื่องบันทึกที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับวงจรขยายสัญญาณที่มีราคาถูก ให้ผลการทดสอบที่สามารถเปรียบเทียบได้กับผลการทดสอบที่ตรวจวัดโดยใช้ไอตัลเกจร่วมกับนาฬิกาจับเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ำของดินที่เป็นเอกลักษณ์ ซึ่งยืนยันได้ว่าเครื่องบันทึกผลนี้สามารถนำมาใช้เพื่อทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินตามมาตรฐาน มีความน่าเชื่อถือของผลทดสอบ นอกจากนี้เครื่องบันทึกยังสามารถทำงานได้ต่อเนื่อง ลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากผู้ปฏิบัติงานที่จะต้องอ่านข้อมูล ต่อเนื่องเป็นเวลานานรวมทั้งเป็นทางเลือกแทนการใช้เครื่องมือราคาแพงที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ระบบการตรวจวัดนี้ในอนาคตยังสามารถนำไปต่อยอดพัฒนาร่วมกับระบบอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet of Thing, IOT) ที่จะทำให้การตรวจวัดสามารถแสดงผลแบบทันที และ

ยังบูรณาการกับการทดสอบได้หลากหลาย ซึ่งจะทำให้การทดสอบมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการเพียงเฉพาะดิน



รูปที่ 11 เส้นเนื้อแท้ของดินเหนียวบั้นใหม่

เหนียวบั้นใหม่ที่มีคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ำที่เป็นเอกลักษณ์ งานวิจัยต่อยอดในอนาคตอาจทดสอบกับเดี่ยวธรรมชาติเพื่อยืนยันความแม่นยำของเครื่องบันทึกมากยิ่งขึ้น

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล สัญญาทุนวิจัยเลขที่ 4/61 (10)

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] DRR 305-2545, Standard Test Method for Consolidation Characteristic, 2002. (in Thai)
- [2] K.H. Head, Manual of soil laboratory testing: Permeability, shear strength and compressibility tests, Pentech Press, London, UK, 1994.
- [3] A. Sridharan, and H.B. Nagaraj, Compressibility behaviour of remoulded, fine-grained soils and correlation with index



- properties, Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(3), 712-722.
- [4] A. Sridharan, H.B. Nagaraj, and N. Srinivas, Rapid method of consolidation testing, Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(2), 392-400.
- [5] ASTM D4186-89, Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Controlled-Strain Loading, 2017.
- [6] S. Rojmosik and S. Sonlamp, Development of automatic consolidation testing system, The 18<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering, Proceeding, 2013, GTE351-GTE354. (in Thai).
- [7] <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3> (Accessed on 23 June 2025)
- [8] M. Agüero, D. Maharjan, M.P. Rodríguez, D.D.L. Mascarenas and F. Moreu, Design and implementation of a connection between augmented reality and sensors, Robotics, 2020, 9(3).
- [9] C.C. Suciú, V. Stoica, M. Ilie, I. Ionel, and R. Ionel, A low-cost IoT-based bidirectional torque measurement system with strain gauge technology, Applied Sciences, 2025, 15(15), 8158.
- [10] <https://github.com/bogde/HX711> (Accessed on 13 February 2026)
- [11] Z. Hong, J. Yin and Y. Cui, Compression behaviour of reconstituted soils at high initial water contents, Geotechnique, 2010, 60(9), 691-700.
- [12] R. Robinson, M. Allam, Effect of clay mineralogy on coefficient of consolidation, Clays and Clay Minerals, 1998, 46(5), 596-600.
- [13] F. Habibbeygi and H. Nikaz, Variation of consolidation coefficient of expansive clays at high water content, Journal of Engineering Science and Technology, 2018, 13(9), 2644–2654.
- [14] J.B. Burland, On the compressibility and shear strength of natural clays, Geotechnique, 1990, 40(3), 329-378.