



การปรับปรุงกำลังอัดสำหรับดินเหนียวกรุงเทพมหานคร ผสมซีเมนต์ ซิลิกาฟุ่ม และเส้นใยขนไก่

นายกิตติ พรหมแสง

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การปรับปรุงกำลังอัดสำหรับดินเหนียวกรุงเทพมหานคร ผสมซีเมนต์ ซิลิกาฟุ้ง และเส้นใยขนไก่



นายกิตติ พรหมแสง

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมก่อสร้าง

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองโครงการค้นคว้าอิสระ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การปรับปรุงกำลังอัดสำหรับดินเหนียวกรุงเทพมหานคร ผสมซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และเส้นใยขนไก่

โดย นายกิตติ พรหมแสง

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
เทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง

..... หัวหน้าภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรารัตน์พร นวลสวรรค์)

คณะกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.นันทวัฒน์ ขมหวาน)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กิริติกานต์ พิริยะกุล)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติภูมิ รอดสิน)

ประธานกรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

กรรมการ

ชื่อ : นายกิตติ พรหมแสง
 ชื่อการค้นคว้าอิสระ : การปรับปรุงกำลังอัดสำหรับดินเหนียวกรุงเทพมหานคร
 ผสมซีเมนต์ ซิลิกาฟุ่ม และเส้นใยขนไก่
 สาขาวิชา : เทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระหลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.กิริติกันต์ พิริยะกุล
 ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

สารนิพนธ์นี้ศึกษาวิธีการเพิ่มกำลังการรับแรงอัดของดินเหนียวกรุงเทพมหานครด้วยการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1 ซิลิกาฟุ่ม และเส้นใยธรรมชาติจากขนไก่ โดยการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่างผลทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีเป็นเดอร์อีลีเมนต์ และผลการทดสอบแบบทำลายสภาพด้วยวิธีแรงอัดแกนเดียว เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟุ่ม เส้นใยขนไก่ และหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน ซึ่งใช้ปริมาณเส้นใยขนไกร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 โดยปริมาตรของปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 จากน้ำหนักแห้ง อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 ที่มีสัดส่วนปริมาณผสมซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 จากน้ำหนักแห้ง จากผลการวิจัยพบว่าควรใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 8 โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์อยู่ที่ 0.75-1.00 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่มไม่เกินร้อยละ 15 และเส้นใยขนไก่ไม่เกินร้อยละ 0.5 สำหรับดินซีเมนต์กรุงเทพมหานคร ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงอัดแกนเดียวของมาตรฐานกรมทางหลวงที่ 297 kPa

(มีจำนวนทั้งสิ้น 74 หน้า)

คำสำคัญ : ซิลิกาฟุ่ม, เส้นใยขนไก่, ดินซีเมนต์, แรงอัดแกนเดียว

อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระหลัก

Name : Mr. Kitti Promsang
Independent Study Title : Enhancement of the compressive strength for
Bangkok clay mixed with cement, silica fume and
chicken feather
Major Field : Construction Engineering Technology
King Mongkut's University of Technology North
Bangkok
Independent Study Advisor : Associate Professor Dr. Keeratikan Piriyaikul
Academic Year : 2024

ABSTRACT

This independent study investigated methods to increase the compressive strength of Bangkok clay by mixing Portland cement type 1, silica fume, and natural fibers from chicken feathers. It compares the relationship between NDT results using the bender element method and DT results using unconfined compressive strength testing to determine the optimal ratio of cement, silica fume, and chicken feather fibers. The study also investigates the relationship between compressive strength at a curing period of 28 days, using chicken feather fiber proportions of 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, and 2.5% by volume, cement percentages of 2%, 4%, 6%, 8%, and 10% based on dry weight, and water-to-cement ratios (W/C) of 0.25, 0.5, 0.75, and 1.0, incorporating silica fume proportions of 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, and 30% based on dry weight. It was found that a minimum cement content of 8% should be used, with W/C ratio of 0.75-1.00, and that the substitution of cement with silica fume should not exceed 15%, while chicken feather fibers should not exceed 0.5% for Bangkok soil-cement. These findings align with the unconfined compressive strength of the department of highways standard at 297 kPa.

(Total 74 Pages)

Keywords: silica fume, chicken feathers, soil-cement, compressive strength

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

สารนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์
รองศาสตราจารย์ ดร.กิริติกานต์ พิริยะกุล ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำติดตามดูแล ตลอดจนช่วย
แก้ไขปัญหาดังกล่าว จนสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ของสารนิพนธ์ฉบับนี้ได้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติภูมิ รอดสิน คณะกรรมการสอบสารนิพนธ์ ที่ได้
ให้ข้อชี้แนะที่เป็นประโยชน์ทำให้สารนิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ทำนุขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาซึ่งให้กำลังใจอบรมสั่งสอนและส่งเสริมและคอย
ถามไถ่ในเรื่องการศึกษาตลอดมา ขอบพระคุณครูบาอาจารย์ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาการศึกษาด้วยดีเสมอ
มา ขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ศิริโรจน์ ผลพันธิน ที่ให้โอกาสในการศึกษาระดับปริญญาโท
เพื่อนักศึกษาและผู้ที่ทำให้การสนับสนุนในการศึกษาและวิจัยของผู้วิจัยจนประสบความสำเร็จ

กิตติ พรหมแสง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	9
1.3 ขอบเขตการศึกษา	9
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 ประวัติความเป็นมา	10
2.2 สารผสมเพิ่มที่ใช้ในการปรับปรุงดิน	13
2.3 อีลาสติกโมดูลัสเฉือน (Elastic Shear Modulus, G_0)	23
2.4 คลื่นอีลาสติก (Elastic Wave)	24
2.5 การทดสอบเบนด์เออร์อีลีเมนต์ (Bender Element Test)	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	35
3.1 ธรณีวิทยาของกรุงเทพมหานคร	35
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเบนด์เออร์อีลีเมนต์	37

3.4 การทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัด	40
3.4 ดินที่ใช้ในงานวิจัย	41
3.5 วัสดุที่ใช้การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ	42
3.6 วิธีการทดสอบเป็นเดอร์อีซีเมนต์	48
3.7 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test)	50
บทที่ 4 ผลการทดลอง	54
4.1 ผลการทดสอบ UCS กับการเติมปริมาณซีเมนต์	54
4.2 ผลการทดสอบ V_s กับการเติมปริมาณซีเมนต์	55
4.3 ผลการทดสอบ UCS และปริมาณการเติมน้ำ W/C	55
4.4 ผลการทดสอบ V_s กับปริมาณการเติมน้ำ W/C	56
4.5 ผลการทดสอบ UCS และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย Silica fume	57
4.6 ผลการทดสอบ V_s กับการแทนที่ด้วย Silica fume	58
4.7 ผลการทดสอบ UCS และการเติมเส้นใยจากขนไก่	58
4.8 ผลการทดสอบ V_s กับการเติมเส้นใยขนไก่	59
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับความมเร็วคลื่นเฉือน	60
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	61
5.1 ข้อเสนอแนะการใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม (Group A)	61
5.2 ข้อเสนอแนะการใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม (Group B)	61
5.3 ข้อเสนอแนะการใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์กับซิลิกาฟุ่มที่เหมาะสม (Group C)	61
5.4 ข้อเสนอแนะการใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์กับเส้นใยขนไก่ที่เหมาะสม (Group D)	62

บรรณานุกรม	63
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบความเร็วคลื่นและโมดูลัสเฉือนของดินผสมซีเมนต์และชนไก่	70
ภาคผนวก ข ภาพขยายของตัวอย่างการทดลอง	72
ประวัติผู้เขียน	74



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3-1 สมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	42
ตารางที่ 3-2 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟุ่ม	42
ตารางที่ 3-3 แสดงสัดส่วนการผสมตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ	44



สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 2-1 SEM-EDX ที่ได้จากชนไก่ (A) ไม่ล้าง (t0); (B) ล้างแล้ว(t1); (C) ผ่านการบำบัดด้วย SDS (t2) (D) ผ่านการบำบัดด้วย CTAB (t3) (E) ผ่านการบำบัดด้วย PEG (t4)	19
ภาพที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอีลาสติกโมดูลัสกับความเครียด	24
ภาพที่ 2-3 การเคลื่อนที่ของคลื่นเลิฟ (Love wave)	25
ภาพที่ 2-4 การเคลื่อนที่ของคลื่นเลิฟ (Rayleigh wave)	25
ภาพที่ 2-5 การเคลื่อนที่ของคลื่นปฐมภูมิ (P-wave)	26
ภาพที่ 2-6 การเคลื่อนที่ของคลื่นเฉือน (S-wave)	27
ภาพที่ 2-7 เป็นเดอร์อีลีเมนต์เซ็นเซอร์แบบวงจรรอนุกรม (series connected bender element)	28
ภาพที่ 2-8 เป็นเดอร์อีลีเมนต์เซ็นเซอร์แบบวงจรรขนาน (parallel connected bender element)	28
ภาพที่ 3-1 พื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล (Tuladhar R. et al. 2003)	36
ภาพที่ 3-2 ความหนาของชั้นดินเหนียวกรุงเทพมหานคร (Tuladhar R. et al. 2003)	36
ภาพที่ 3-3 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินกรุงเทพมหานคร (Warnitchai P. et al. 2000)	37
ภาพที่ 3-4 ระบบการทำงานของชุดทดสอบเป็นเดอร์อีลีเมนต์	38
ภาพที่ 3-5 ตัวอย่างการวัดความเร็วคลื่นเฉือน	39
ภาพที่ 3-6 โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินบริเวณสถานีวิสุทธิยาบาล	41
ภาพที่ 3-7 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาซิลิกาฟุ่ม	43

ภาพที่ 3-8 ขนไก่	43
ภาพที่ 3-9 ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพมหานคร	45
ภาพที่ 3-10 การผสมดินกับซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และขนไก่	45
ภาพที่ 3-11 ตัวอย่างขนไก่ที่นำมาใช้	46
ภาพที่ 3-12 แบบหล่อตัวอย่างดินผสมกับซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และขนไก่	46
ภาพที่ 3-13 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ผสมดินกับซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และขนไก่	47
ภาพที่ 3-14 การอัดตัวอย่างดินผสมกับซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และขนไก่ลงในแบบหล่อ	47
ภาพที่ 3-15 ตัวอย่างดินผสมกับซีเมนต์ ซิลิกาฟูมและขนไก่ ห่อด้วยฟิล์มพลาสติก	48
ภาพที่ 3-16 ตัวอย่างดินผสมซีเมนต์ถูกทดสอบโดยวิธีเป็นเดอร์อิลีเมนต์	49
ภาพที่ 3-17 ผลการทดสอบเป็นเดอร์อิลีเมนต์	50
ภาพที่ 3-18 ตัวอย่างการทดสอบดินผสมกับซีเมนต์ ซิลิกาฟูมและขนไก่	51
ที่ 28 วันทดสอบแบบไม่ถูกจำกัด	
ภาพที่ 3-19 ผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด	52
ภาพที่ 3-20 ผังงานการทดสอบภาพที่	53
ภาพที่ 4-1 ผลการทดสอบ UCS กับการเติมปริมาณซีเมนต์	54
ภาพที่ 4-2 ผลการทดสอบ V_s กับการเติมปริมาณซีเมนต์	55
ภาพที่ 4-3 ผลการทดสอบ UCS และปริมาณการเติมน้ำ W/C	56
ภาพที่ 4-4 ผลการทดสอบ V_s กับปริมาณการเติมน้ำ W/C	56
ภาพที่ 4-5 ผลการทดสอบ UCS และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย Silica fume	57
ภาพที่ 4-6 ผลการทดสอบ V_s กับการแทนที่ด้วย Silica fume	57
ภาพที่ 4-7 ผลการทดสอบ UCS และการเติมเส้นใยไฟเบอร์จากขนไก่	58

ภาพที่ 4-8 ผลการทดสอบ V_s กับการเติมเส้นใยขนไก่ 59

ภาพที่ 4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และ V_s 60



รายการคำย่อ

MSW	Municipal Solid Waste
FA	Fly Ash
BA	Bottom Ash
OPC	Ordinary Portland Cement
RDF	Refuse Derived Fuel
SEM	Scanning Electron Microscopy
LL	Liquid Limit
ASTM	American Society for Testing and Materials
ACI	American Concrete Institute Standards
DOH	Department of Highways
UCS	Unconfined Compressive Strength
Vs	Shear Wave Velocity
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
NDT	Non-Destructive Testing
DT	Destructive Testing

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการนำดินมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยดินมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งดินเหนียวของกรุงเทพมหานคร เป็นดินที่มีสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่มากมาย แต่ดินเหนียวกรุงเทพกลับมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมไม่เหมาะสมต่องานฐานราก ทำให้ฐานรากแตกร้าวเสียหายอีกทั้งดินยังมีความสามารถในการรับแรงอัดได้น้อย ในการนำดินมาใช้งานจึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงให้ดินได้คุณภาพที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่เหมาะสม

กรุงเทพมหานครเป็นศูนย์กลางเศรษฐกิจและเมืองหลวงของประเทศไทย ตั้งอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนที่รู้จักกันในชื่อ "ดินเหนียวกรุงเทพ" โดย Mairaing และ Amonkul (2010) ได้ศึกษาพื้นที่ที่ราบน้ำท่วมของกลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างไปจนถึงปากแม่น้ำ จากข้อมูลการสำรวจดินเหนียวอ่อนจากหลุมเจาะสำรวจ 4,000 แห่ง พบว่าชั้นดินเหนียวอ่อนนี้มีความหนามากกว่าในบริเวณชายฝั่งอ่าวไทย และความหนาจะลดลงเมื่อห่างไปทางทิศเหนือ ในเขตกรุงเทพฯ ความหนาของชั้นดินเหนียวกรุงเทพอยู่ที่ความลึกระหว่าง 10 - 20 เมตร เนื่องจากคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวกรุงเทพมีปริมาณความชื้นสูงเกือบถึงขีดจำกัดของความเป็นของเหลว ส่งผลให้เกิดการทรุดตัวสูงและมีกำลังเฉือนต่ำ มีการศึกษาเกี่ยวกับปัญหาเหล่านี้้อย่างหลากหลาย ตัวอย่างเช่น กลุ่มนักวิจัยด้านกลศาสตร์ดิน Horpibulsuk และคณะ (2007) ได้ประเมินลักษณะทางวิศวกรรมหลายประการของดินเหนียวกรุงเทพและพบว่าเส้นการบดอัด (Compaction Lines) ของดินเหนียวกรุงเทพที่ปั้นใหม่ขึ้นอยู่กับการบดอัดดินและของไหลในรูปพรุน และสรุปได้ว่าขีดจำกัดของความเป็นของเหลวเพิ่มขึ้นตาม

ความสามารถในการบีบอัด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียวเพื่อเพิ่มกำลังของดินสำหรับการใช้งานในวิศวกรรมโยธาในหลายรูปแบบ กลุ่มวิศวกรโยธา El-Kassasa และคณะ (2020) ได้เปรียบเทียบกรณีศึกษาสองแห่ง คือ สถานีรถไฟใต้ดินสุซุมวิทในกรุงเทพฯ และ สถานีรถไฟใต้ดินชิคาโกในสหรัฐอเมริกา พบว่าการหดตัวของแผ่นรองรับที่เกิดจากการหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิส่งผลกระทบต่อผนังสถานีรถไฟใต้ดิน รวมถึงการเปลี่ยนรูปและการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนในทุกขั้นตอนของการก่อสร้างสถานีรถไฟใต้ดิน การปรับปรุงดินเหนียวด้วยปูนซีเมนต์ที่เรียกว่า "ดิน-ซีเมนต์" (Soil-Cement) สามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มคุณสมบัติความแข็งแรงของดินและลดการทรุดตัวของดิน การปรับปรุงดินด้วยวิธีการผสมลึก (Deep Mixing Method: DMM) เป็นวิธีการที่นิยมซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement: OPC) ผสมกับดินอ่อน อย่างไรก็ตาม การใช้ OPC ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนดั่งที่ Suksiripattanapong และคณะ (2022) กล่าวไว้

1.1.1 การปรับปรุงดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยเถ้าลอยแคลเซียม (FA) และเถ้าโพลีเมอร์ในคอลัมน์ดิน-ซีเมนต์ มีการศึกษาการปรับปรุงดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยการใช้เถ้าลอยแคลเซียม (Fly Ash, FA) และเถ้าโพลีเมอร์ในคอลัมน์ดิน-ซีเมนต์ พบว่ากำลังอัดในสภาวะไม่ระบายของตัวอย่างดินที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเถ้าโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณ OPC ในการออกแบบคอลัมน์ดิน-ซีเมนต์

Naweena และคณะ (2013) ศึกษาการพัฒนากำลังของดินเหนียวทรายที่มีความชื้นสูง พบว่าสัดส่วนระหว่างดินเหนียวต่อปริมาณน้ำ/สารเติมแต่งมีความสำคัญต่อการพัฒนากำลัง และเมื่อดัชนีความเหลว (Liquidity Index) อยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 2 จะส่งผลดีต่อกำลังดิน

กลุ่มนักวิจัย Saadeladin และคณะ (2013) ได้ตรวจสอบลักษณะของดิน-ซีเมนต์ผสม และพัฒนาความโน้มเอียงทั่วไปสำหรับดิน-ซีเมนต์ พบว่าการลดดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity Index) มีผลต่อความเสถียรของกำลังดิน-ซีเมนต์ Firoozi และคณะ (2017) ศึกษาคุณสมบัติของดินที่ผสมกับสารเติมแต่งหลายชนิด และระบุว่าดินที่ผ่านการปรับปรุงสามารถถือเป็นวัสดุผสมที่คุณสมบัติของดินขึ้นอยู่กับส่วนผสมและการปรับแต่งสารเติมแต่ง ทั้งนี้ การปรับปรุงดินเหนียวด้วยซีเมนต์สามารถลดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรได้ แต่ไม่เหมาะสำหรับดินเหนียวที่มีค่าดัชนีความเป็นพลาสติกสูง

ในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา มีการนำเสนอแบบจำลองการคาดการณ์หลายรูปแบบ Tsuchida และ Tang (2015) ประเมินกำลังอัดของดินเหนียวทะเลที่ผ่านการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ โดยใช้ทฤษฎีอัตราส่วนพื้นที่เจล (Gel-Space Ratio Theory) และได้เสนอสมการใหม่จากผลการศึกษาในดินเหนียวทะเลญี่ปุ่น 6 ชนิด นอกจากนี้ Kang และคณะ (2015) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของดินญี่ปุ่นที่ผ่านการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ในช่วงแรกของระยะเวลาบ่ม โดยทดสอบดินเหนียวญี่ปุ่น 4 ตัวอย่างด้วยการทดสอบกำลังอัดและกำลังเฉือน พบว่ากระบวนการเปลี่ยนแปลงสามารถแบ่งออกเป็น 2 ระยะ คือ ก่อนและหลังการบ่ม 3 วัน พร้อมทั้งแนะนำสมการพยากรณ์ที่เป็นประโยชน์ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำเริ่มต้นและอัตราส่วนปริมาตรที่เฉพาะเจาะจง

Yao และคณะ (2019) เสนอสมการไฮเปอร์โบลิกทั่วไปเพื่อคำนวณกำลังและความแข็งแรงของดินที่ผ่านการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ สมการนี้สามารถใช้กับชนิดซีเมนต์ ดิน และระยะเวลาการบ่มที่แตกต่างกันได้ กลุ่มวิศวกร Correia และคณะ (2013) ได้ศึกษากำลังอัดในสภาวะไม่ระบาย (Unconfined Compressive Strength: UCS) ของดินที่ผ่านการปรับปรุงด้วยซีเมนต์

1.1.2 การปรับปรุงดินเหนียวอ่อนด้วยวิธีการเสถียรทางเคมีแบบเปียกและแห้ง การเสถียรดินเหนียวอ่อนทางเคมีด้วยวิธีเปียกและแห้งได้รับการบันทึกว่าเหมาะสมกับดินหลากหลายชนิด Miura และคณะ (2001) ศึกษาอิทธิพลของซีเมนต์ที่ผสมกับดินเหนียวกรุงเทพฯที่มีความชื้นสูง พบว่าสัดส่วนซีเมนต์-ดินเหนียว-น้ำ มีความสำคัญต่อการควบคุมคุณสมบัติของดิน-ซีเมนต์ โดยเฉพาะเมื่อดัชนีความเหลว (Liquidity Index) อยู่ระหว่าง 1 และ 2 นอกจากนี้ยังระบุว่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 1:1 เหมาะสมกับวิธีการผสมเปียกของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

Por และคณะ (2017) พบว่าการเติมซีเมนต์ช่วยลดแรงดึงตัวในแนวตั้งและแนวนอน รวมถึงลดการพองตัวที่เกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนากำลังและความแข็งแรงของดินเหนียวขยายตัว (ซึ่งเป็นส่วนผสมของ Na-montmorillonite, เบนโทไนต์ และดินเหนียวกรุงเทพฯ) โดยซีเมนต์มีผลในการลดแรงดันพองตัวในแนวตั้งมากกว่าในแนวนอนในกระบวนการพองตัวหนึ่งมิติ

1.1.3 การใช้ปอชโซลานทดแทนซีเมนต์

ปอชโซลานได้รับการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ในปัจจุบัน เนื่องจากมีลักษณะทางเคมีที่คล้ายกับซีเมนต์ Ahmed และคณะ (2019) พบว่าวัสดุปอชโซลานทำปฏิกิริยาทุติยภูมิกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, C-S-H) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต โดยปอชโซลานต้องใช้เวลา 91 วันในการพัฒนาความแข็งแรง

Li และคณะ (2012) ประเมินการพัฒนากำลังของดินอินทรีย์ที่เสถียรด้วยซีเมนต์และสารเสถียรที่เรียกว่า GX07 ซึ่งประกอบด้วยยิปซัม, ปูนขาว, โซเดียมซิลิเกต, โซเดียมไฮดรอกไซด์, สารลดน้ำ

พิเศษ และไตรเอทานอลามีน พบว่า GX07 ช่วยเพิ่มกำลังของดิน-ซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีต้นทุนต่ำ

Liu และคณะ (2019) ตรวจสอบดิน-ซีเมนต์ที่ผสมเมตาแคโอลินและตะกรันในดินที่มีสัดส่วนดินเหนียว ความชื้น และเวลาบ่มที่แตกต่างกัน พบว่าวัสดุใหม่ที่พัฒนาขึ้นมีความแข็งแรงเทียบเท่ากับดิน-ซีเมนต์

Nakayenga และคณะ (2021) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณหิน, ผงแร่ และขนาดอนุภาคของผงหินแกรนิตต่อกำลังของดิน-ซีเมนต์ พบว่ากำลังอัดของวัสดุธรรมชาติสังเคราะห์ที่มีอนุภาคหินแกรนิตสูงกว่าตัวอย่างควบคุม เนื่องจากพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของผงหิน

1.1.4 การพัฒนาวัสดุใหม่เพื่อปรับปรุงดิน-ซีเมนต์ด้วยการลดการใช้ซีเมนต์

วัสดุใหม่ที่ใช้ผงหินสามารถลดการใช้ซีเมนต์ลงได้ถึง 28.6% กลุ่มนักวิจัย Chindaprasirt และคณะ (2021) ศึกษาคุณสมบัติการฟื้นฟูของดิน-ซีเมนต์รีไซเคิลที่ผสมเถ้าลอย (Fly Ash, FA) โดยพบว่าปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20 % - 25 % ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองการพยากรณ์

1.1.5 การศึกษาความแข็งแรงของดิน-ซีเมนต์

กลุ่มนักวิจัยด้านธรณีเทคนิค Cong และคณะ (2014) ตรวจสอบการเพิ่มกำลังของดิน-ซีเมนต์ด้วยวิธีการอัดกำลังอัดในสภาวะไม่ระบาย (UCS) และการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ข้อมูลแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสารยึดเกาะช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลานิกและเพิ่มกำลังอัดของดิน-ซีเมนต์

Vichan และ Rachan (2013) ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลเพื่อเสถียรดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ พบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นในสภาพที่มีค่า pH สูง และวัสดุผสมนี้มีกำลังสูงกว่าส่วนผสมของดิน-ซีเมนต์ที่ใช้เถ้าลอยและเถ้าชีวมวลหลังการบ่มตัว 28 วัน

Jamsawang และคณะ (2017) ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ผสมซีเมนต์และเถ้าอ้อย (BA) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมอ้อย พบว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าอ้อยในสัดส่วน 20% เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มกำลังงาน การศึกษานี้ยืนยันถึงประสิทธิภาพของการใช้วัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

Tural และคณะ (2024) ศึกษาวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้ตะกรันเตาหลอม (Ground Granulated Blast Furnace Slag: GBS), เถ้าลอย และซิลิกาฟูม พบว่าสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ระหว่าง 13%-43%

1.1.6 บทบาทของเถ้าลอย (FA) ในการปรับปรุงดิน-ซีเมนต์

เถ้าลอยมีบทบาทสำคัญมากขึ้นในฐานะส่วนผสมที่ยั่งยืนในดิน-ซีเมนต์ในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา Horpibulsuk และคณะ (2009, 2010) ศึกษากำลังและโครงสร้างจุลภาคในดิน-ซีเมนต์ผสม พบว่าเถ้าลอยทำให้กลุ่มดิน-ซีเมนต์ขนาดใหญ่กระจายตัวเป็นกลุ่มเล็กลง โดยกำลังสูงสุดพบที่ปริมาณเถ้าลอย 10%

Horpibulsuk (2012) ศึกษาผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม ปริมาณซีเมนต์ และเถ้าลอยต่อกำลังและโครงสร้างจุลภาคของดิน-ซีเมนต์ พบว่าการพัฒนากำลังแบ่งออกเป็น 3 โซน ได้แก่ พื้นที่ที่มีการทำงาน, พื้นที่เฉื่อย, และพื้นที่อื่น ๆ

1.1.7 การพัฒนาคุณสมบัติทางกลและกำลังของดินเหนียวกรุงเทพฯ กระบวนการพัฒนากำลังในดิน-ซีเมนต์ Horpibulsuk (2012) ได้อธิบายการพัฒนากำลังของดิน-ซีเมนต์ว่าแบ่งออกเป็น 3 พื้นที่หลัก:

1. พื้นที่ที่มีการทำงาน (Active Area): รูพรุนขนาดเล็กกว่า $0.1 \mu\text{m}$ จะลดลงเนื่องจากการเพิ่มของผลิตภัณฑ์จากปูนซีเมนต์ ส่งผลให้กำลังสูงขึ้น
2. พื้นที่เฉื่อย (Inertial Area): รูพรุนและผลิตภัณฑ์จากปูนซีเมนต์เปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ ความแข็งแรงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย
3. พื้นที่เสื่อมสภาพ (Degraded Area): ขาดความชื้นเนื่องจากน้ำไม่เพียงพอ ส่งผลให้กำลังลดลง

1.1.8 การผสมดินเหนียวกรุงเทพฯ ด้วย OPC และ FA

Chompoorat และคณะ (2022) ศึกษาการพัฒนาคุณสมบัติทางกลและการแตกร้าวจากการหดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยการผสมลิคโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC) และเถ้าลอย (FA) การทดสอบกำลังอัดแบบไม่ระบาย (UCS) ดำเนินการหลังจากการบ่ม 7 และ 28 วัน พร้อมการพิจารณาผลกระทบจากการหมุนเปียก/แห้งต่อความทนทานของส่วนผสม การศึกษาชี้แนะให้ใช้เถ้าลอยแทนที่ในอัตรา 15% ที่สัดส่วนตัวประสานต่อน้ำ 0.4

1.1.9 การพัฒนาพฤติกรรมการพองตัวและคุณสมบัติทางวิศวกรรมอื่นๆ

Chompoorat และคณะ (2021) พบว่าซีเมนต์และปูนขาวมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงพฤติกรรมการพองตัวและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวขยายตัวตามธรรมชาติ การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของการก่อตัวของกลุ่ม

อนุภาคเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น และการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) แสดง
ผลิตภัณฑ์เคมีปอซโซลานิก

1.1.10 การใช้ของเสียอุตสาหกรรมในดิน-ซีเมนต์

Wungsumpow และคณะ (2018) ใช้วิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในการวิเคราะห์พื้นที่
ฝังกลบของเสีย ซึ่งของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางส่วนสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุรีไซเคิล เช่น ถ้ำ
ลอย ปัจจุบันของเสียอุตสาหกรรมและใบสังเคราะห์ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในส่วนผสมดิน-
ซีเมนต์ (Pochalard, et al., 2024a; 2024b)

1.1.11 การทดสอบ Bender Element (BE)

เทคนิคการทดสอบ Bender Element (BE) ใช้ในการวิเคราะห์กำลังของวัสดุธรณีมาหลายปี
เนื่องจากเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing: NDT) Piriyakul และ
Pochalard (2012) ศึกษาการพัฒนากำลังของดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ผสมซีเมนต์และถ้ำลอยด้วยการ
ทดสอบ BE พบว่าปริมาณถ้ำลอยที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 15%-20%

1.1.12 การศึกษาการใช้ BE Test และการเปลี่ยนซีเมนต์ด้วยถ้ำลอยในดินเหนียวกรุงเทพฯ

Iamchaturapatr และคณะ (2021) ได้ศึกษาปฏิกิริยาไปโอซีเมนต์ในทรายโดยใช้การทดสอบ
Bender Element (BE) พบว่าเทคนิค BE สามารถใช้ตรวจสอบการพัฒนากำลังของทรายที่ผ่าน
กระบวนการไปโอซีเมนต์ได้ นอกจากนี้ Iamchaturapatr และคณะ (2022a, 2022b) ยังใช้เทคนิค
BE เพื่อกำหนดมอดูลัสเฉือนของวัสดุธรณีอีกด้วย

บทวิจารณ์ที่กล่าวถึงข้างต้นแสดงให้เห็นว่าซีเมนต์มีบทบาทสำคัญในการเสถียรดินเหนียว
อ่อนกรุงเทพฯ ส่วนถ้ำลอย (FA) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้า มีบทบาทช่วยลดการใช้ซีเมนต์เพื่อ

ความยั่งยืน งานวิจัยนี้ใช้การทดสอบ BE เพื่อวัดมอดุลัสเฉือนเริ่มต้น (Initial Shear Modulus) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่เสถียรด้วย OPC และเถ้าลอยที่ใช้แทนซีเมนต์ โดยความเร็วคลื่นเฉือนถูกบันทึกที่ช่วงเวลา 7, 14, 28 และ 90 วันหลังจากการบ่ม การทดสอบกำลังอัดแบบไม่ระบาย (UCS) ยังถูกใช้เพื่อเปรียบเทียบการพัฒนา กำลังของตัวอย่างดินที่ทดสอบ นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด UCS และมอดุลัสเฉือนของดินเหนียวกรุงเทพที่ผ่านการเสถียร

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟุ่มและเส้นใยขนไก่ ด้วยการทดสอบแบบทำลายโดยวิธีการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) และการทดสอบแบบไม่ทำลายแบบเบ็นเดอร์อีลีเมนต์ (Bender Element Test)

1.2.2 เพื่อศึกษาการหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพมหานคร

1.3.2 ใช้ปริมาณเส้นใยขนไก่อ้อยละ 0.0, 0.5 , 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตร ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 2 , 4 , 6 , 8 , และ 10 โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 0, 5 , 15 , และ 25 โดยน้ำหนักดินแห้ง ทำการบ่มที่ระยะเวลา 28 วัน เพื่อศึกษาการพัฒนา กำลังของดินซีเมนต์ ควบคุมปริมาณความชื้นในดินเหนียว

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมา

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement: OPC) เป็นที่นิยมใช้เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ วิธีการผสมแบบลิก หรือที่เรียกว่าเสาดิน-ซีเมนต์ เป็นวิธีการปรับปรุงดินให้ดินเหนียวกรุงเทพฯ มีความสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นและลดการทรุดตัว โดยศึกษาปัจจัยการพัฒนาความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ที่ผสมกับดินเหนียวกรุงเทพฯ พบว่าอัตราส่วนของส่วนผสมดินเหนียว-น้ำ/ซีเมนต์ WC/C เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการควบคุมการพัฒนาความแข็งแรงของดิน-ซีเมนต์ และยังพบว่าดัชนีสภาพคลองจะแตกต่างกันระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์นี้และกฎของอับราม

ปัจจุบันมีการใช้ปอซโซลานทดแทนปูนซีเมนต์ และมีลักษณะทางเคมีคล้ายกับปูนซีเมนต์ Ahmed et al. (2019) พบว่าวัสดุปอซโซลานอาศัยปฏิกิริยารอง โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระเพื่อสร้างเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีต วัสดุปอซโซลานใช้เวลา 91 วันในการสร้าง และมีความสามารถในการรับแรงอัดสูงจากการผสมและการหล่อ Li et al. (2012) ประเมินการปรับปรุงความแข็งแรงของดินอินทรีย์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งมีสารทำให้คงตัวที่เรียกว่า GX07 สารประกอบนี้เป็นส่วนผสมของยิปซัม ปูนขาว แก้วน้ำ โซเดียมไฮดรอกไซด์ สารลดแรงตึงผิว และไตรเอทานอลามีน มีการสังเกตว่า GX07 ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของดินและปูนซีเมนต์และราคาถูก กลุ่มวิศวกรโยธา Liu et al. (2019) ยืนยันดินและปูนซีเมนต์ เมทาเคอลิน และตะกอนที่เศษส่วนดิน ปริมาณน้ำ และเวลาในการบ่มที่แตกต่างกัน พบว่า

ความแข็งแรงของวัสดุที่พัฒนาขึ้นใหม่นั้นดีพอๆ กับดินผสมซีเมนต์ กลุ่มนักธรณีวิทยา Nakayenga และคณะ (2021) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณหิน ปริมาณผง และขนาดอนุภาคของผงแกรนิตชนิดต่างๆ ที่มีต่อความแข็งแรงของดินผสมซีเมนต์ พบว่าความแข็งแรงในการอัดตัวของวัสดุสังเคราะห์ที่มีอนุภาคแกรนิตนั้นสูงกว่าของตัวอย่างควบคุม เนื่องจากพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นและปฏิกิริยาปอซโซลานของผงหิน วัสดุใหม่นี้สามารถลดการใช้ซีเมนต์ได้ 28.6% โดยใช้ผงหิน กลุ่มนักวิจัยด้านวัสดุ Chindaprasirt และคณะ (2021) ศึกษาคุณสมบัติในการฟื้นฟูสภาพของดินผสมซีเมนต์ที่ผ่านการรีไซเคิลด้วย FA พบว่าปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 20% ถึง 25% ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองการทำนาย ทีมนักวิจัยด้านธรณีเทคนิค Cong และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงความแข็งแรงของดินผสมซีเมนต์โดยใช้ UCS และ SEM ข้อมูลแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสารยึดเกาะมีประสิทธิภาพสำหรับปฏิกิริยาปอซโซลานิกและสามารถปรับปรุง UCS ของดิน-ซีเมนต์ได้ Vichan และ Rachan (2013) ใช้เศษแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลเพื่อให้ดินเหนียวอ่อนของกรุงเทพฯ มีเสถียรภาพ พบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นที่ pH สูงและความแข็งแรงที่สูงกว่า ส่วนผสมของดินเหนียวผสมเถ้าลอยและดิน-ซีเมนต์ชีวมวลหลังจากบ่มเป็นเวลา 28 วัน กลุ่มนักวิจัย Jamsawang และคณะ (2017) ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของดินอ่อนกรุงเทพฯ ผสมกับซีเมนต์และเถ้าขานอ้อยซึ่งเป็นของเสีย (ได้จากอุตสาหกรรมน้ำตาล) พบว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วย BA 20% เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มความแข็งแรง ผลการค้นพบยืนยันการใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมเพื่อทดแทนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา กลุ่มวิศวกร Tural และคณะ (2024) ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้ตะกรันเตาถลุงแบบบดละเอียด (GBS) เถ้าลอย และควันซิลิกา พบว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลดลงจาก 13% เหลือ 43%

กลุ่มวิศวกรดิน Madhyannapu และคณะ (2010) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยทำให้ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ นี้มีความเสถียรด้วยจีโอโพลิเมอร์แคลเซียมเกล็ดลอย (FA) ในคอลัมน์ดิน-ซีเมนต์ พบว่าความแข็งแรงอัดแน่นแบบไม่มีการระบายน้ำของจีโอโพลิเมอร์ที่ผ่านการบำบัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อปริมาณ OPC เพิ่มขึ้นเพื่อก่อแบบคอลัมน์ดิน-ซีเมนต์ Naweena และคณะ (2013) ศึกษาการพัฒนาความแข็งแรงของดินเหนียวทรายที่เสถียรซึ่งมีปริมาณน้ำสูง พบว่าอัตราส่วนของดินเหนียวต่อน้ำ/สารเติมแต่งมีความสำคัญต่อการพัฒนาความแข็งแรง ดัชนีสภาพคล่องจะเท่ากันในช่วงระหว่าง 1 ถึง 2 เมื่อใดก็ตามที่ทำการศึกษา กลุ่มนักวิจัย Saadeldin และคณะ (2013) ตรวจสอบลักษณะเฉพาะของการผสมดิน-ซีเมนต์ และพัฒนาแนวโน้มทั่วไปของส่วนผสมดิน-ซีเมนต์ พบว่าการลดดัชนีความเป็นพลาสติกมีประสิทธิภาพในการแสดงเสถียรภาพในความแข็งแรงของดินซีเมนต์ Firoozi และคณะ (2017) ศึกษาคุณสมบัติของดินที่มีสารเติมแต่งต่างๆ และระบุว่าดินที่เสถียรแล้วเป็นวัสดุผสมที่มีคุณสมบัติของดินได้โดยการผสมและปรับให้เหมาะสมของสารเติมแต่งเหล่านั้น พบว่าการบำบัดดินเหนียวด้วยซีเมนต์สามารถลดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้อย่างไรก็ตาม ไม่เหมาะสำหรับดินเหนียวที่มีดัชนีความยึดหยุ่นสูงเพื่อพัฒนาความแข็งแรงของดิน มีการเสนอแบบจำลองเชิงทำนายหลายแบบในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา กลุ่มนักวิจัย Tsuchida และ Tang (2015) ประเมินความแข็งแรงของแรงอัดของดินเหนียวทะเลที่ผ่านการบำบัดด้วยซีเมนต์ที่มีค่าเริ่มต้นและปริมาณน้ำที่แตกต่างกัน โดยใช้ทฤษฎีอัตราส่วนพื้นที่เจล ได้มีการกำหนดสูตรใหม่จากผลลัพธ์ของดินเหนียวทะเลญี่ปุ่น 6 ชนิด นอกจากนี้ Kang และคณะ (2015) ยังได้ศึกษาการเคลื่อนตัวของดินญี่ปุ่นที่ผ่านการบำบัดด้วยซีเมนต์ในระยะเริ่มต้นของเวลาในการบ่ม โดยทำการตรวจสอบตัวอย่างดินญี่ปุ่น 4 ตัวอย่างด้วยการทดสอบแรงอัดและแรงเฉือนแบบไร้ขอบเขต พบว่ากระบวนการเคลื่อนย้ายสามารถแบ่งได้เป็น 2 ระยะ คือ ก่อนและหลังระยะเวลาบ่ม 3 วัน โดยแนะนำสมการทำนายที่มีประโยชน์โดยอิงจากปริมาณน้ำเริ่มต้นและอัตราส่วนปริมาตรจำเพาะ Yao และคณะ

(2019) เสนอสูตรไฮเปอร์โบลิคทั่วไปเพื่อคำนวณกำลังและขนาดการแข็งตัวของดินและซีเมนต์ที่เสถียร แบบจำลองนี้ใช้ได้กับซีเมนต์ประเภทต่างๆ ประเภทของดิน และระยะเวลาบ่ม กลุ่มวิศวกร Correia และคณะ (2013) ศึกษาค่า Unconfined Compressive Strength (UCS) ในดินอ่อนที่เสถียรทางเคมีโดยใช้วิธีเปียกและแห้ง พบว่าวิธีนี้ใช้ได้ผลกับดินหลากหลายประเภท

Miura et al. (2001) ศึกษาอิทธิพลของปูนซีเมนต์ที่ผสมกับปริมาณน้ำขึ้นสูงของดินเหนียวกรุงเทพฯ พบว่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์-ดินเหนียว-น้ำมีความสำคัญต่อการควบคุมลักษณะของดิน-ปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อดัชนีสภาพคล่องอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 1 ยังถูกอ้างถึงสำหรับวิธีการผสมดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แบบเปียกอีกด้วย Por et al. (2017) พบว่าการเติมปูนซีเมนต์ช่วยลดการบวมตัวในแนวตั้งและแนวดิ่งโดยปราศจากความเครียดได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากการปรับปรุงที่เห็นได้ชัดในด้านความแข็งแรงและความแข็งของดินเหนียวขยายตัว (ส่วนผสมของ Na-montmorillonite, bentonite และดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ไม่ขยายตัว) แล้วปูนซีเมนต์ยังมีการลดแรงกดในแนวดิ่งที่มากกว่าแรงกดในแนวขวางระหว่างการบวมตัวแบบมิติเดียวอีกด้วย

2.2 สารผสมที่ใช้ในการปรับปรุงดิน

การปรับปรุงคุณสมบัติดินโดยวิธีผสมสารเคมีสามารถทำได้หลากหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่ใช้ ซึ่งมีชนิดหลักๆ ที่ใช้กันแพร่หลายดังต่อไปนี้

เถ้าลอย (FA) มีบทบาทเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้เป็นส่วนผสมดินและซีเมนต์ที่ยั่งยืนในอีกไม่กี่ทศวรรษข้างหน้า งานวิจัยจำนวนมากได้ใช้ FA เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงของดินและซีเมนต์ ตัวอย่างเช่น การศึกษาวิจัยสองชิ้นโดย Horpibulsuk et al. (2009 และ 2010) ได้ศึกษาความแข็งแรงและโครงสร้างจุลภาคในส่วนผสมดินและซีเมนต์ พบว่าอิทธิพลของเถ้าลอยในดินและซีเมนต์

ทำให้กลุ่มดินและซีเมนต์ขนาดใหญ่กระจายตัวเป็นกลุ่มที่เล็กกว่า พบว่าพบความแข็งแรงสูงสุดที่ FA 10% Horpibulsuk (2012) ศึกษาผลกระทบของเวลาในการบ่ม ปริมาณซีเมนต์ และเกลือต่อความแข็งแรงและโครงสร้างจุลภาคของดินและซีเมนต์ ระบุว่าการพัฒนาแรงประกอบด้วยสามโซน ได้แก่ พื้นที่ใช้งาน พื้นที่เฉื่อย และพื้นที่สลายตัว ในพื้นที่ใช้งาน พื้นที่รุ่มรอนที่มีขนาดน้อยกว่า 0.1 ไมโครเมตรจะลดลงเนื่องจากผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีความแข็งแรงสูง ในพื้นที่เฉื่อย พื้นที่รุ่มรอนและผลิตภัณฑ์ซีเมนต์จะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในพื้นที่เสื่อมสภาพ ไม่มีความชื้นเนื่องจากขาดน้ำ ส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง Chompoorat et al. (2022) ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและลักษณะการแตกร้าวจากการหดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ในการผสมลิกกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC) และเกลือ (FA) การทดสอบ UCS ดำเนินการหลังจากเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน ร่วมกับการพิจารณาผลกระทบของการบ่มแบบเปียก/แห้งต่อความทนทานของส่วนผสมจากการทดสอบเบื้องต้นของการผสมลิกกับ OPC แนะนำให้เปลี่ยนปริมาณ FA 15% ในอัตราส่วนสารยึดเกาะต่อน้ำที่เสนอคือ 0.4 กลุ่มนักวิจัยด้านกลศาสตร์ของดิน Chompoorat et al. (2021) ได้แสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์และปูนขาวมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงพฤติกรรมการบวมและคุณสมบัติทางวิศวกรรมอื่นๆ ของดินเหนียวที่ขยายตัวตามธรรมชาติ การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเผยให้เห็นการเพิ่มขึ้นของการก่อตัวของคลัสเตอร์อนุภาคที่มีระยะเวลาการบ่มและรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ซึ่งแสดงให้เห็นความชื้นและผลิตภัณฑ์ของอนุภาคเคมีปอซโซลานิก กลุ่มวิศวกรด้านวัสดุ Wungsumpow et al., 2018 ใช้การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในหลุมฝังกลบ ขยะที่เหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้จำเป็นต้องขุดในหลุมฝังกลบโดยการทำเหมืองเพื่อขุดหลุมฝังกลบ ซึ่งบางส่วนสามารถนำไปใช้ทำวัสดุรีไซเคิลเป็น FA ได้ ปัจจุบัน ขยะอุตสาหกรรมและเส้นใยสังเคราะห์

เป็นที่นิยมในการนำไปใช้ในการผสมดินกับซีเมนต์ตามที่ Pochalard et al. (2024a) และ Pochalard et al. (2024b) อธิบายไว้

Bargi และคณะ พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่เน้นที่การเติมนาโน-SiO₂ บนคอนกรีต. Bargi และคณะพยายามใช้ออนุภาคนาโน-SiO₂ ในดินซีเมนต์และสังเกตผลกระทบ เนื่องจากในคอนกรีตไม่มีอนุภาคที่ผ่านตะแกรง 200 และข้อจำกัดนี้ไม่ใช้กับดินซีเมนต์ จึงมีการทดสอบบางส่วนกับเมทริกซ์นาโน-SiO₂ + ดิน-ซีเมนต์ เนื่องจากความแตกต่างที่สำคัญระหว่างคอนกรีตและดินซีเมนต์ ขั้นตอนการทดสอบประกอบด้วยความหนาแน่นเมื่อแห้ง การทดสอบแรงอัดที่ไม่ถูกจำกัด และการนำไฟฟ้าของไฮดรอลิก ในการทดสอบเหล่านี้ จะเติมซิลิกาฟุ่ม (ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 21 ตร.ม./ก.) นาโน-SiO₂ (ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 200 และ 380 ตร.ม./ก.) ลงในดินซีเมนต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมนอนุภาคนาโน-SiO₂ ในปริมาณหนึ่งลงในเมทริกซ์ดินซีเมนต์สามารถปรับปรุงความแข็งแรงในการอัดลดการซึมผ่าน และเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันในเมทริกซ์เมื่อมีอนุภาคนาโน-SiO₂ อยู่

Ghavami และคณะศึกษาเพื่อประเมินประสิทธิภาพของนาโนซิลิกาและซิลิกาฟุ่มต่อคุณลักษณะของดินเหนียวที่ผ่านการทำให้เสถียรด้วยฝุ่นปูนซีเมนต์จากเตาเผา ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยตัวอย่างได้รับการทดสอบ 7 และ 28 วันหลังการเตรียมเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของเวลาในการบ่มต่อคุณลักษณะความแข็งแรงของดิน ในขณะเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างทางเคมีและจุลภาคของดินได้รับการสังเกตโดยใช้การตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณของนาโนซิลิกา 1% และซิลิกาฟุ่ม 15% ตามน้ำหนักดินแห้งเป็นปริมาณที่เหมาะสมของสารกระตุ้นที่ใช้เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางธรณีเทคนิคของดินที่ผ่านการบำบัดด้วย CKD ตามลำดับ นอกจากนี้ การประเมินความยั่งยืนยังเผยให้เห็นว่าดินที่ผ่านการบำบัดด้วย CKD เป็นส่วนผสมที่มีความยั่งยืนมากที่สุด เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบด้านความยั่งยืน การเติมนาโนซิลิกาน้อยกว่า 2% และซิลิกาฟุ่มลงใน

ดินที่ผ่านการบำบัดด้วย CKD อาจทำให้ได้ดินที่ผ่านการบำบัดที่มีความยั่งยืนมากกว่าปูนซีเมนต์อย่างมาก สิ่งสำคัญคือต้องเน้นว่าความยั่งยืนของดินที่ผ่านการบำบัดด้วย CKD ที่มีซิลิกาฟูนนั้นมากกว่าความยั่งยืนของดินที่ผ่านการบำบัดด้วย CKD อย่างมาก

การทดสอบ Bender Element (BE) ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดความแข็งแรงของวัสดุภูมิสารสนเทศมาหลายปีแล้ว เทคนิคนี้มีข้อดีหลายประการเนื่องจากการทดสอบแบบไม่ทำลาย (NDT) Piriyakul และ Pochalard (2012) ศึกษาการพัฒนาความแข็งแรงของดินเหนียวกรุงเทพฯ ผสมกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอยโดยใช้การทดสอบ BE พบว่าปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 15 – 20% กลุ่มวิศวกรสิ่งแวดล้อม lamchaturapatr และคณะ (2021) ศึกษาปฏิกิริยาไบโอซีเมนต์ในทรายโดยใช้การทดสอบ BE พบว่าเทคนิค BE สามารถใช้ติดตามการพัฒนาความแข็งแรงของทรายไบโอซีเมนต์ได้ lamchaturapatr และคณะ (2022a) และ lamchaturapatr และคณะ (2022b) ใช้เทคนิค BE เพื่อกำหนดโมดูลัสเฉือนของวัสดุภูมิสารสนเทศ

ปิติและพิทยา (2011) ได้ใช้เส้นใยเหล็กและโพลีโพรพิลีนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตัดของดินซีเมนต์โดยใช้เทคนิคการผสมซีเมนต์แบบลึก (DCM) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีซีเมนต์ประมาณ 10–20% จึงมีลักษณะที่เหมือนกันกับซีเมนต์ที่แข็งตัว ได้แก่ การซึมผ่านที่จำกัด ความแข็งแรงในการดึงและการดัดที่อ่อนแอ และความแข็งแรงในการอัดที่ต่ำ ความแข็งแรงในการดัดที่ไม่ดีมักส่งผลให้เสาเข็มซีเมนต์เสียหายเมื่อสัมผัสกับโมเมนต์ดัดที่เกิดจากการรับน้ำหนักในแนวนอน วิธีการผสมเส้นใยสั้นจะถูกเพิ่มลงในส่วนผสมดินซีเมนต์เพื่อเพิ่มความเปราะและความแข็งแรงในการดัด ซีเมนต์ดินเสริมใย (FRSC) ทำจากเส้นใยสองประเภท ได้แก่ เส้นใยเหล็กและโพลีโพรพิลีนสามส่วนที่มีปริมาตรแตกต่างกัน ได้แก่ 0.5%, 0.75% และ 1% FRSC ได้รับการทดสอบประสิทธิภาพการดัดตามมาตรฐาน ASTM C1609 ผลการศึกษาบ่งชี้ว่าการเพิ่มเส้นใยลงไปในส่วนผสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดัดงอได้ โดย

สังเกตได้จากอัตราส่วนความแข็งแรงในการดัดงอที่เทียบเท่าและความแข็งแรงคงเหลือที่เพิ่มขึ้น พบว่าเส้นใยโพลีโพรพิลีนมีประสิทธิภาพเหนือกว่าเส้นใยเหล็ก เมื่อปริมาตรเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) หรือ ไมโครซิลิกา (Microsilica) หรือ ซิลิกาฟุ้ง ควบแน่น (Condensed Silica Fume) เป็นวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิต Silicon Metal และ Ferrosilicon Alloy เป็นขบวนการ Reduction จาก Quartz ที่บริสุทธิ์ไปเป็น Silicon โดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2000 องศา ทำให้เกิดไอ (Fume) ของ SiO₂ ซึ่งต่อมากจะออกซิไดซ์ (Oxidize) และกลั่นตัว (Condense) ที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้เป็นอนุภาคขนาดเล็กมากๆ ของซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) และถูกดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้โดยทั่วไปซิลิกาฟุ้งจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 μm และมีพื้นที่ผิวประมาณ 20 ถึง 25 m^2/g (โดยวิธี Nitrogen Absorption) ขนาดของซิลิกาฟุ้ง (0.1 μm) เป็นขนาดที่เล็กมากๆ กล่าวคือมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 100 เท่า เนื่องจากอนุภาคของซิลิกาฟุ้งที่เล็กมากๆ จึงมีพื้นที่ผิวสูงมากและอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก ทำให้ซิลิกาฟุ้งเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วมาก ปัญหาของซิลิกาฟุ้งที่พบบ่อยเมื่อใช้ในคอนกรีต คือต้องเพิ่มปริมาณน้ำ ในส่วนผสมเพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่าเดิม

2.2.1 การใช้เส้นใยปรับปรุงวัสดุก่อสร้าง

ประเภทของเส้นใย

1 เส้นใยจากธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยที่มีอยู่ในธรรมชาติ แบ่งได้เป็น

(ก) เส้นใยจากพืช ได้แก่ เส้นใยจากเซลลูโลส เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลส ซึ่งได้จากส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ป่าน ปอ ลินิน ไยสับปะรด ไยมะพร้าว ฝ้าย หนุ่น ทรนารายณ์ เป็นต้น เซลลูโลส เป็น โพลิเมอร์ ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสจำนวนมาก มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา

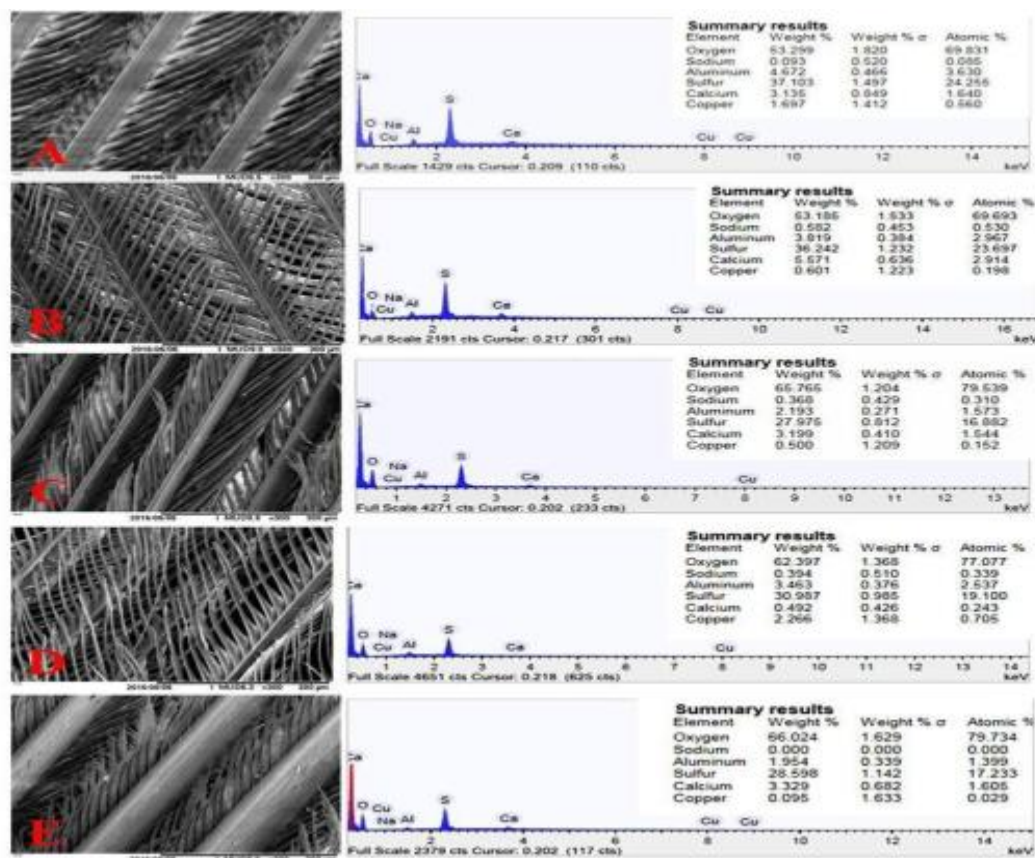
(ข) เส้นใยจากสัตว์ ได้แก่ เช่น ขนสัตว์ (wool) ขนไก่อ (CFs) คิดเป็น 10% ของมวลแห้งทั้งหมดของไก่อ และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้หลายอย่าง ขนไก่อประกอบด้วยเส้นใยโปรตีนที่เรียกว่าเคราติน ซึ่งเป็นโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำ ขั้นตอนการฆ่าเชื้อขั้นต้นมีความซับซ้อนเนื่องจากมีจุลินทรีย์ที่แพร่ทางเลือด เชื้อโรค และปรสิตจำนวนมากในชีวมวลดิบกระบวนการสกัดเคราตินจากขนไก่อที่ยังไม่ได้แปรรูปก็เป็นงานที่ท้าทายเช่นกัน ก่อนการสกัด การทำความสะอาด/ฆ่าเชื้อขนไก่อเป็นขั้นตอนที่จำเป็นมาก ดังนั้น งานปัจจุบันจึงดำเนินการเพื่อปรับให้สารลดแรงตึงผิวที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการทำความสะอาดขนไก่อโดยใช้สารลดแรงตึงผิวแบบไอออนิกและแบบไม่มีไอออนิก การทดลองนี้ดำเนินการโดยการล้างขนไก่อด้วยน้ำกลั่นสองครั้ง (ddH₂O) ผงซักฟอก อีเธอร์ และสุดท้ายด้วยน้ำเดือด ขนนกที่ล้างแล้วได้รับการบำบัดด้วยสารลดแรงตึงผิว (โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS), เซทริโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) และโพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG)) และวิเคราะห์ผลของสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดด้วยการทดสอบทางจุลชีววิทยาซึ่งบ่งชี้ถึงขอบเขตของการมีอยู่ของแบคทีเรียชนิดต่างๆ บนขนนกที่ได้รับการบำบัด SEM, EDX และ FTIR ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบของ CF ที่ไม่ได้รับการบำบัดและผ่านการบำบัดแล้ว SEM ไม่แสดงความเสียหายของเส้นใยที่ตรวจพบได้หลังจากการบำบัด เซทริโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) (t3) เป็นหนึ่งในสารลดแรงตึงผิวที่ดีที่สุดที่แนะนำสำหรับการบำบัด CF จากสารลดแรงตึงผิวทั้งหมดที่ใช้ การศึกษานี้บรรยายถึงวิธีการบำบัดที่ดีที่สุดสำหรับ CF

2.2.2 การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา

ผลของวิธีการรักษาแต่ละวิธีต่อสัณฐานวิทยาของขนไก่อได้รับการศึกษาด้วยตาเปล่าและการใช้กล้อง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ขององค์ประกอบหลักทั้งหมดของขนและสามารถแยกความแตกต่างได้ในขนที่ผ่านการบำบัด นอกจากนี้ การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยายังทำโดยใช้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนและสเปกโตรสโคปีเอกซเรย์แบบกระจายพลังงาน (SEM-EDX)

ตามที่แสดงในภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 SEM-EDX ที่ได้จากขนไก่ (A) ไม่ล้าง (t0); (B) ล้างแล้ว(t1); (C) ผ่านการบำบัดด้วย SDS (t2) (D) ผ่านการบำบัดด้วย CTAB (t3) (E) ผ่านการบำบัดด้วย PEG (t4)

ขนไก่ที่ได้รับการบำบัดด้วยวิธี t2, t3, t4 พบว่ามีการแข็งตัวมากเกินไปและไม่มีส่วนที่เป็นขน เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการบำบัดด้วยวิธี t0 และ t1 ตลอดโครงสร้างขน องค์ประกอบหลักที่พบในการบำบัดทั้งหมดหลังจากการกำจัดคาร์บอน ได้แก่ O, Na, Al, S, Ca และ Cu สัดส่วนน้ำหนัก (% w/w) ที่เกี่ยวข้องกับ S คือ 37.10, 36.24, 27.97, 37.18, 28.59 และ Na 0.09, 0.58, 0.36, 0.29, 0.00 ในขนที่ได้รับการบำบัดด้วยวิธี t1, t2, t3, t4 ตามลำดับ ไม่มีความเสียหายของเส้นใยที่ตรวจพบได้ในขนที่

ได้รับการบำบัด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในโครงสร้างขนในการบำบัดด้วยวิธี t3 รองลงมาคือ t4 เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี t0 และ t1 จากการศึกษาพบว่า t3 เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่นๆ และไม่มีการสะสมของสารลดแรงตึงผิวในสาร t3 แต่พบบางส่วนในขนของ t2 และ t4 การสะสมของสารลดแรงตึงผิวบนขนอาจทำให้ผิวหนังของมนุษย์เกิดการระคายเคืองเล็กน้อยเมื่อสัมผัส

สุรัตน์ ศรีจันทร์ และคณะ (2563) ได้ศึกษาผลของขนาดและปริมาณของเส้นพลาสติกโพลีเอทิลีนที่มีต่อกำลังต้านทานแรงอัดของอิฐดินดิบ การทดลองจะใช้เส้นพลาสติกโพลีเอทิลีนขนาดกว้าง 0.25 ซม. และ 0.5 ซม. ที่มีรูปทรงอัตราส่วนความยาว 1:1, 1:5, และ 1:10 ผสมกับดินเหนียวด้วยเส้นขนาดเดียวและแบบคละสองขนาด กำหนดสัดส่วนของเส้นพลาสติกแต่ละขนาดด้วยปริมาณร้อยละ 0-2 โดยน้ำหนักของดินแห้ง นำตัวอย่าง ทดลองไปทดสอบแรงอัดแกนเดียว จากนั้นจึงคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อนำไปผลิตเป็นอิฐดินดิบแล้ว ศึกษากำลังอัดของก้อนอิฐ ผลการศึกษาพบว่าดินเหนียวทดลองมีความเป็นพลาสติกสูง มีความหนาแน่นแห้ง สูงสุด 1.346 ตัน/ลบ.ม. ที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสมร้อยละ 30 ผลของกำลังอัดแกนเดียว (qu) ของดินเหนียวผสม เส้นพลาสติกมีค่าอยู่ระหว่าง 1.47-3.74 กก./ตร.ซม. โดยเส้นพลาสติกอัตราส่วนความยาว 1:5 ให้กำลังอัดแกนเดียวสูงที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วนความยาว 1:10 และ 1:1 ตามลำดับ ทั้งนี้กำลังอัดแกนเดียวไม่ได้แปรผันตามปริมาณและขนาดของเส้นพลาสติกอย่างมีนัยสำคัญแต่ขึ้นอยู่กับโอกาสกระจายตัวและรูปแบบการวางตัว ของเส้นพลาสติกในเนื้อดิน ผลการทดสอบกำลังอัดของอิฐดินดิบพบว่า เส้นพลาสติกขนาด 0.25x1.25 ซม. ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุดเท่ากับ 13.54 กก./ตร.ซม. รองลงมาได้แก่ ส่วนผสมเส้นพลาสติกแบบคละขนาด 0.5x0.5 ซม. กับ 0.5x2.5 ซม. และเส้นพลาสติกขนาด 0.5x2.5 ซม. ตามลำดับ

จักรารุณ ดันสกุล และคณะ (2561) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์มวลเบาด้วยเส้นใยโพลิพรพิลีน สำหรับใช้ในพื้นที่ดินเหนียวอ่อน การศึกษาจะมุ่งเน้นการปรับปรุงจุดด้อยเรื่อง การแตกหักง่ายและเพื่อเพิ่มความเหนียวให้วัสดุ โดยทำการทดสอบตัวอย่างแบบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยมีสัดส่วนปริมาตรเส้นใยโพลิพรพิลีนที่ต่างกันในอัตราส่วนร้อยละ 0, 1, 2, 3 และ 4 กับดินซีเมนต์มวลเบาที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ 100, 150 และ 200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตัวอย่างที่ใช้มีหน่วยน้ำหนัก 8, 10 และ 12 กิโลนิวตัน/ลูกบาศก์เมตร ในการทดสอบนี้ได้ใช้เส้นใยยาว 6 และ 12 มิลลิเมตรจากนั้นทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวอย่างที่ระยะเวลาการบ่ม 7 และ 28 วัน ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่า การใส่เส้นใยโพลิพรพิลีนทำให้เกิดพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุดีขึ้น ซึ่งเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าความเหนียวและค่าความเค้นคงค้างตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยและอัตราการลดลงของการสูญเสียความเค้นหลังจุดวิบัติ นอกจากนี้ยังพบว่า อิทธิพล การเพิ่มของปริมาณและความยาวเส้นใยมีผลอย่างไม่มีนัยต่อการเพิ่มของค่ากำลังรับแรงอัด

ดร.พิมลพรรณ เนียมกลาง และคณะ (2561) ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมพอลิพรพิลีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยจากมูลม้า โดยเส้นใยที่ได้จะผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมคือการปรับสภาพเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อเป็นการเปรียบเทียบ วัสดุผสมพอลิพรพิลีนจะถูกเตรียมโดยใช้เส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (HMF) และเส้นใย ปรับสภาพแล้ว (THMF) เป็นเส้นใยเสริมแรงที่สัดส่วน 10, 20, 30, 40 และ 50 phr โดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ในการผสมและขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกจากผลการทดลองพบว่า ค่า ความทนทานต่อแรงดึงของวัสดุผสมทั้ง PP/HMF และ PP/THMF มีค่าน้อยกว่าพอลิพรพิลีน ในทางกลับกัน ค่ามอดูลัสของยังก์ความทนทานต่อแรงกระแทก และความแข็ง ของวัสดุผสมมีค่าสูงกว่า พอลิพรพิลีน นอกจากนี้สัดส่วนของปริมาณเส้นใยส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลได้แก่ ค่ามอดูลัสของยังก์

และความทนทานต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย ส่วนค่าความทนทานต่อแรงดึง และความแข็งแรงมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเติม HMF และ THMF ในวัสดุผสมพอลิโพรพิลีน พบว่าสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม PP/THME จะมีค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่ามอดูลัสของยังก์ ความทนทานต่อแรงกระแทก และความแข็งแรงที่สูงกว่าวัสดุผสม PP/HME ในทุกสัดส่วนเส้นใย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพันธ์ แสงสุวรรณและคณะ (2557) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) เส้นใยพลาสติก (โพลีโพรพิลีน) (Polypropylene) เถ้าลอย (Fly ash) ดินขาว(Meta kaolin) มาผสม เพิ่มเข้าไปในคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยใช้ค่า w/c เท่ากับ 0.42 โดยผสมเส้นใยเหล็กใน ปริมาณร้อยละ 0.5 และเส้นใยโพลีพรอพิลีนในปริมาณร้อยละ 0.25 ของน้ำหนักคอนกรีต ตัวอย่าง คอนกรีตที่ใช้ทดสอบนี้ประกอบไปด้วยคอนกรีตธรรมดา(OPC) คอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานเถ้าลอย ผสมเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ชนิดเส้นใยโพลีพรอพิลีน (FA/PP) คอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานเถ้าลอย ผสมเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ชนิดเส้นใยเหล็ก (FA/ST) คอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานดินขาว ผสมเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ชนิดเส้นใยโพลีพรอพิลีน(MK/PP) และคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานดินขาว ผสมเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ชนิดเส้นใยเหล็ก(MK/ST) โดยหล่อเป็นตัวอย่างแบบ ทรงกระบอกขนาด 10 x 20 เซนติเมตร ตัวอย่างแบบทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร และ ตัวอย่างแบบคานขนาด 10x10x35 เซนติเมตร หลังจากการบ่มน้ำ 28 วัน จึงนำตัวอย่างคอนกรีตไป ทดสอบกำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัด และนำไปทำการทดสอบการเคลื่อนที่ ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตด้วยวิธี Chloride Migration Test จากนั้นจึงนำมาหาค่ากำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัด และค่าการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต การนำคอนกรีตผสม วัสดุปอซโซลานมาผสมกับเส้นใยสังเคราะห์เพื่อพัฒนาคุณภาพของคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นอีก ทั้งยังช่วยลดการพูนของคอนกรีต และการซึมผ่านของคลอไรด์ที่เกิดขึ้นในคอนกรีต(เฉพาะในเขตภูมิ ประเทศที่ติดกับทะเล) จากการทดสอบสามารถ

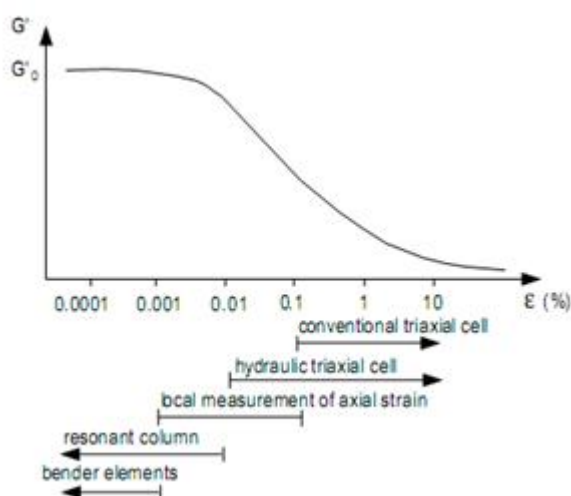
ถบอได้ว่า คอนกรีตผสมวัสดุพอสโซลานกับผสมเส้นใยสังเคราะห์เข้าไปทำให้ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตดีขึ้นต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย สังเคราะห์ และปริมาณของวัสดุพอสโซลานที่ผสมไป

2.3 อีลาสติกโมดูลัสเฉือน (Elastic Shear Modulus, G_0)

อีลาสติกโมดูลัสเฉือน (G) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากในงานวิศวกรรมปฐพีและงานวิศวกรรมแผ่นดินไหว ดังภาพที่ 2-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอีลาสติกโมดูลัสเฉือนกับความเครียด (ϵ) โดยพบว่าที่ระดับความเครียดต่ำกว่า 0.001 % ค่าอีลาสติกโมดูลัสเฉือนจะมีค่าสูงที่สุดและคงที่ ดังนั้นจึงเรียกค่าอีลาสติกโมดูลัสเฉือนสูงสุดนี้ว่า “Initial Shear Modulus, G_0 ” และสามารถหาได้จากการทดสอบเบนเดอร์อัสไมนตในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์

สำหรับอีลาสติกวัสดุ (Elastic Material) ที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีพฤติกรรม เป็นแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Behavior) ค่าอีลาสติกโมดูลัสเฉือนสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นเฉือน (Shear Wave Velocity, V_s) กับความหนาแน่น (ρ) ดังสมการที่ 2-1

$$G_0 = (V_s)^2 \cdot \rho \quad (2-1)$$



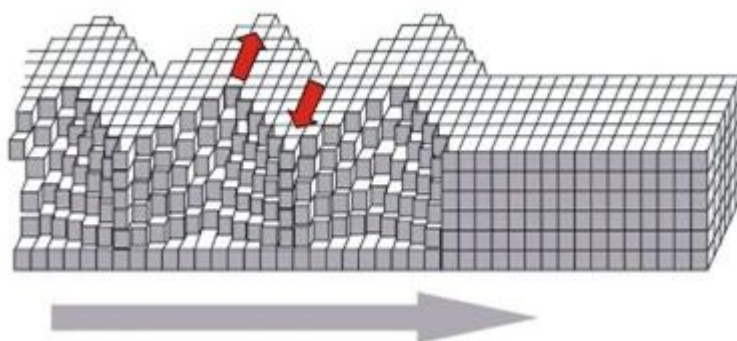
ภาพที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอีลาสติกโมดูลส์เหนือนกับความเครียด

2.4 คลื่นอีลาสติก (Elastic Wave)

คลื่นอีลาสติก (Elastic Wave) ที่เคลื่อนที่ผ่านไปในวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทหลักๆ คือ คลื่นพื้นผิว (Surface Wave) และคลื่นหลัก (Body Wave) โดยที่คลื่นพื้นผิวจะเคลื่อนที่อยู่ที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุในขณะที่คลื่นหลักจะเคลื่อนที่ภายในเนื้อของวัสดุ

คลื่นพื้นผิว (Surface Wave) จะเคลื่อนที่ตามพื้นผิวของวัสดุที่ต่างกัน โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ คลื่นเลิฟ (Love Wave) และคลื่นเรย์ลี (Rayleigh Wave) โดยคลื่นเลิฟเป็นคลื่นพื้นผิวที่ตั้งชื่อเป็นเกียรติแก่ A.E.H Love นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษผู้ค้นพบคลื่นนี้เป็นคนแรก เมื่อ ค.ศ 1911 คลื่นเลิฟเป็นคลื่นที่มีความเร็วที่สุดในบรรดาคลื่นพื้นผิวและมีความเร็วเป็นอันดับสามในบรรดาคลื่นทั้งหมดเมื่อคลื่นเลิฟเดินทางผ่านพื้นผิวของโลกทำให้สิ่งที่เกี่ยวข้อง ที่คลื่นเลิฟเดินทางผ่านเคลื่อนที่ไปด้านข้าง ทำให้อาคารหรือสิ่งก่อสร้างเสียหาย ดังภาพที่ 2-3 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นเลิฟที่เดินทางผ่านวัตถุ

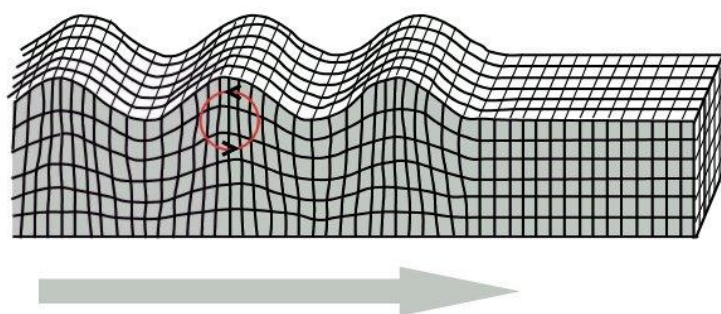
Love wave



ภาพที่ 2-3 การเคลื่อนที่ของคลื่นเลิฟ (Love wave)

คลื่นพื้นผิวอีกประเภท คือ คลื่นเรย์ลี (Rayleigh Wave) เป็นคลื่นพื้นผิวที่ตั้งชื่อเพื่อเป็นเกียรติแก่ Lord Rayleigh นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษผู้พบคลื่นนี้เป็นคนแรกเมื่อ ค.ศ. 1885 โดยคลื่นเรย์ลี เป็นคลื่นที่มีความเร็วช้าที่สุดในบรรดาคลื่นทั้งหมด เมื่อคลื่นเรย์ลีเดินทางไปตามพื้นผิวโลก ทำให้ตัวกลางที่คลื่นเรย์ลีเดินทางผ่านม้วนตัวในแนวตั้งคล้ายคลื่นน้ำ ขณะเดียวกันก็กระเพื่อมไปด้านข้าง ด้วยเหตุนี้เราจึงรู้สึกสั่นสะเทือนจากคลื่นนี้โดดเด่นกว่าอื่นๆ ความเสียหายส่วนใหญ่เกิดขึ้นเพราะคลื่นเรย์ลีนี้ ดังแสดงในภาพที่ 2-4

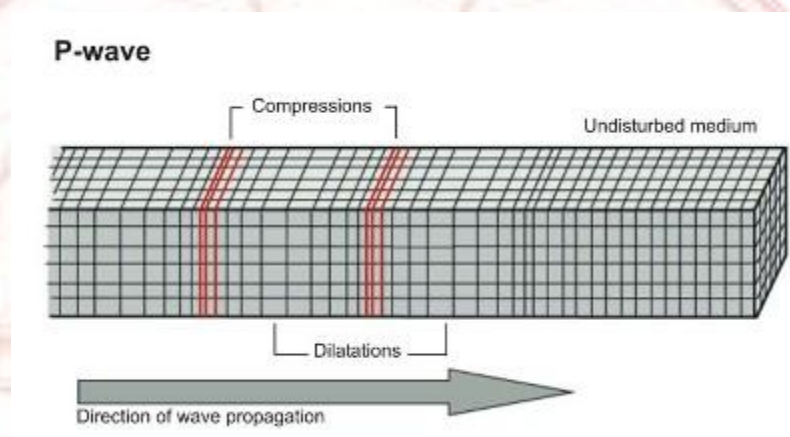
Rayleigh Wave



ภาพที่ 2-4 การเคลื่อนที่ของคลื่นเลิฟ (Rayleigh wave)

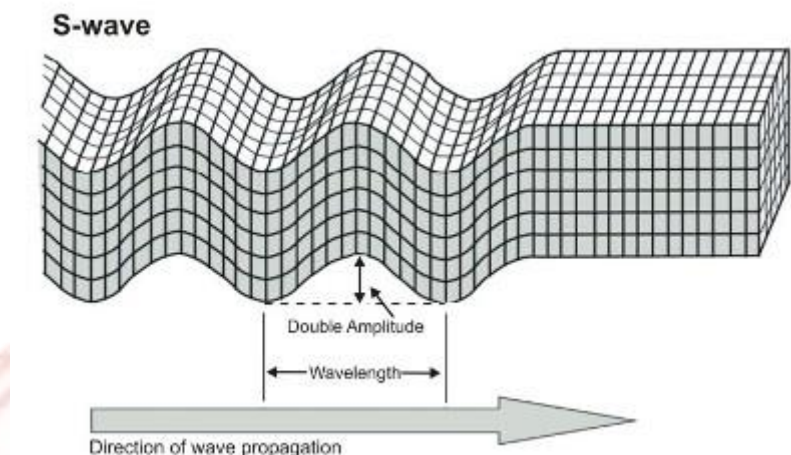
คลื่นหลัก (Body Wave) นั้น สามารถแบ่งออกเป็นสองชนิดด้วยกันโดยชนิดแรกคือ คลื่นปฐมภูมิ (Primary Wave, P-Wave) ลักษณะเป็นคลื่นตามยาวมีลักษณะเช่นเดียวกับคลื่นเสียง เกิด

จากการอัด-ขยาย ซึ่งอนุภาคจะถูกดันกลับไป-มา ในทิศทางขนานกับการเคลื่อนที่ของคลื่น โดยอนุภาคของวัสดุจะสั่นอัดขยายในทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของคลื่นดังแสดงในภาพที่ 2-5 และคลื่นนี้ สามารถเคลื่อนที่ผ่านของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ด้วยความเร็วสูงมาก เป็นคลื่นประเภทแรกที่จะเดินทางขึ้นมาถึงผิวโลก



ภาพที่ 2-5 การเคลื่อนที่ของคลื่นปฐมภูมิ (P-wave)

คลื่นหลักชนิดที่สอง คือ คลื่นทุติยภูมิ หรือ คลื่นเฉือน (Secondary Wave, S-Wave) ลักษณะเป็นคลื่นตามขวางมีลักษณะเดียวกับคลื่นแสง อนุภาคจะถูกดันเคลื่อนที่ออกไปด้านข้างกลับไป-มา ในทิศทางตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่นดังแสดงในภาพที่ 2-6 คลื่นเฉือนสามารถเคลื่อนที่ได้เฉพาะในของแข็งเท่านั้น เดินทางช้ากว่าคลื่น P-Wave เมื่อกระทบวัตถุจะเกิดแรงยกขึ้นและลง โดยจะเปลี่ยนเฉพาะรูปร่างของสิ่งที่มันเคลื่อนที่ผ่านก๊าซและของเหลวนั้น ไม่สามารถต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างได้ดังนั้นจึงเปลี่ยนรูปร่างแต่ไม่สามารถส่งผ่านคลื่นเฉือนได้

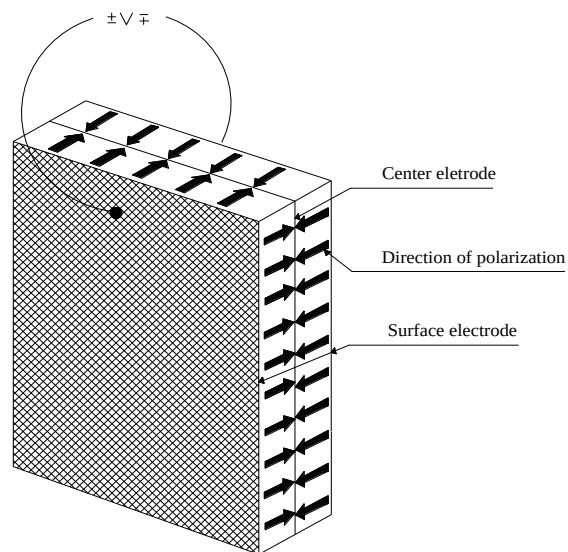


ภาพที่ 2-6 การเคลื่อนที่ของคลื่นเฉือน (S-wave)

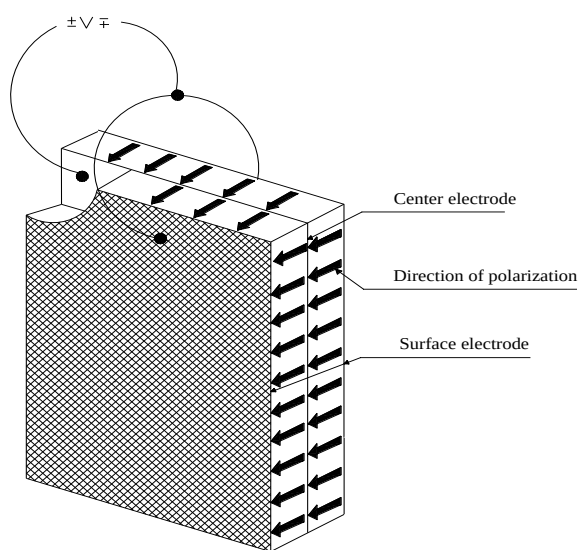
2.5 การทดสอบเบนด์เออร์อีลีเมนต์ (Bender Element Test)

การทดสอบเบนด์เออร์อีลีเมนต์ (Bender Element Test) เพื่อหาความเร็วคลื่นเฉือนถูกนำมาใช้ครั้งแรกกับการทดสอบวัสดุดินทางวิศวกรรมให้ห้องประลองปฐพีกลศาสตร์โดย Dyvik & Madshus (1985) ซึ่งได้นำตัวเซ็นเซอร์แบบ Piezoceramic มาใช้สำหรับส่งและรับคลื่นเฉือน ตัวเซ็นเซอร์แบบ Piezoceramic นี้ แบ่งออกเป็นสองชนิดโดยชนิดแรกเป็นชนิดแรกเป็นชนิดที่ต่อแบบวงจรอนุกรม (Series Connected Bender Element) ซึ่งชนิดนี้จะนำแผ่น Piezoceramic มาต่อกันแบบอนุกรม ดังแสดงในภาพที่ 2-7 ตัวเซ็นเซอร์ชนิดนี้จะมีคามไวในการรับสัญญาณดี จึงมักถูกใช้เป็น ตัวรับสัญญาณคลื่นเฉือน ชนิดที่สองเป็นชนิดที่ต่อแบบวงจรขนาน (Parallel Connected Bender Element) ซึ่งชนิดนี้จะนำแผ่น Piezoceramic มาต่อกันแบบขนานดังแสดงในภาพที่ 2-8 ตัวเซ็นเซอร์ชนิดนี้จะมีกำลังสูงในการส่งสัญญาณจึงมักถูกใช้เป็นตัวสัญญาณคลื่นเฉือน

การศึกษานี้ได้ใช้ตัวเซ็นเซอร์ชนิดที่ต่อแบบวงจรอนุกรม (Series Connected Bender Element) เป็นทั้งตัวรับและตัวส่งสัญญาณคลื่นเฉือน เนื่องจากตัวเซ็นเซอร์นี้มีความไวในการรับสัญญาณที่ดี



ภาพที่ 2-7 เป็นเตอร์อีลีเมนต์เซ็นเซอร์แบบวงจรรวม (series connected bend element)



ภาพที่ 2-8 เป็นเตอร์อีลีเมนต์เซ็นเซอร์แบบวงจรรวม (parallel connected bend element)

สำหรับการวัดความเร็วคลื่นเฉือนนั้นได้นำวิธีการวัดตามงานวิจัยของ Brignoli et al. (1996) โดยที่คลื่นเฉือนจะถูกส่งและรับด้วยเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่ด้านปลายของตัวอย่างดิน ความเร็ว คลื่นเฉือนสามารถคำนวณได้จากระยะทางระหว่างเซ็นเซอร์กับเวลาเดินทางของคลื่นเฉือนดังสมการที่ 2-2 และ 2-3

$$V_s = \frac{L}{t} \quad (2-2)$$

โดยกำหนดให้

V_s เป็นความเร็วคลื่นเฉือน

L เป็นระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์ตัวส่งและเซ็นเซอร์ตัวรับ

t เป็นเวลาที่คลื่นเฉือนเดินทางจากเซ็นเซอร์ตัวส่งถึงเซ็นเซอร์ตัวรับ

$$t = t_t - t_c \quad (2-3)$$

โดยกำหนดให้

t_t เป็นเวลาทั้งหมดที่คลื่นเฉือนเดินทางจากเซ็นเซอร์ตัวส่งถึงเซ็นเซอร์ตัวรับ

t_c เป็นเวลาสอบเทียบของคลื่นเฉือนเมื่อนำเซ็นเซอร์ตัวส่งและตัวรับมาชนกัน

ทองศักดิ์ ออกผล (2561) ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านความตึงน้ำภายหลังการปรับปรุงคุณภาพดินด้านกำลังด้วย การใช้ซีเมนต์เพื่อให้ดินมีคุณสมบัติด้านความตึงน้ำที่เหมาะสม ก่อนที่จะนำดินไปใช้ก่อสร้างคันดิน การศึกษานี้ได้ใช้ตัวอย่างดินมาผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนปริมาณ 0, 2, 5, 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง จากนั้นนำมาผสมกับน้ำในปริมาณ ณ ค่าความชื้นเหมาะสมซึ่งได้จากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานของแต่ละอัตราส่วนผสม การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำด้วยการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่ระยะเวลาบ่ม 0, 7 และ 28 วัน จาก

การทดสอบ พบว่าตัวอย่างดินเหนียวที่ทำการศึกษาคจัดเป็นดินประเภท Clay of High Plasticity (CH) และ Clay of Low Plasticity (CL) โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.68 และ 2.77 และมีปริมาณสารอินทรีย์เฉลี่ย 8.81 และ 8.27% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ตัวอย่างดินเหนียว ปากแม่น้ำที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการผสมซีเมนต์มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า 1×10^{-9} m/s ตัวอย่างดินเหนียวปากแม่น้ำที่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการผสมซีเมนต์ใน สัดส่วน ปริมาณ 2, 5, 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง ผลการทดสอบ ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่า ตัวอย่างดินเหนียวปากแม่น้ำ CH และ CL มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า 1.6×10^{-10} และ 2×10^{-11} m/s ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับที่อายุการบ่ม 0, 7 และ 28 วัน ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ของน้ำของทั้งตัวอย่างดินเหนียวปากแม่น้ำ CH และ CL ไม่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนตามเวลา แต่ทั้งตัวอย่างดินเหนียวปากแม่น้ำ CH และ CL มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำอยู่ในช่วง 9×10^{-12} ถึง 1×10^{-10} m/s การศึกษาแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ไม่มีผลต่อ การเพิ่มคุณสมบัติความตึบน้ำของดิน ดินเหนียวปากแม่น้ำที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการ ผสมซีเมนต์มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมเป็นไปตามคำแนะนำของการนำดินไปใช้ในการก่อสร้างส่วนตึบน้ำของ ทำนบกดิน

พิธาน ไพโรจน์ (2562) ได้ทำการศึกษาคการเพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ค่า โมดูลัสยืดหยุ่น และค่าโมดูลัสเฉือนของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมผงซิลิกาจากการทดสอบ แรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง โดยวัดความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากเบนเดอร์อิลิเมนต์ซึ่งติดตั้ง ไว้ที่ฝาครอบด้านบนและแท่นของเครื่องทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง เพื่อให้ทราบ การเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสเฉือนได้ ซึ่งค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำหาได้จากการทดสอบ ที่อัตราความเครียด 1เปอร์เซ็นต์ต่ออนาที ระหว่างที่มีการบันทึกค่าโมดูลัสเฉือน ผลการวิจัยพบว่า ค่า กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าโมดูลัสเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อบดอัดดินผสม

ผงซิลิกาในอัตราที่เพิ่มขึ้นแต่ความเครียดลดลง ณ จุดวิบัติ ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพดิน คั่นทางโดยใช้ซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มระหว่างการบดอัดดินในการก่อสร้างสามารถเพิ่มประสิทธิภาพ ของคั่นทางได้

วฤธ รัตนรุ่งโรจน์ และคณะ (2563) ได้ศึกษาศักยภาพของการใช้ตะกรันเหล็กบดละเอียดจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็กและเถ้าชีวมวลจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษมาปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพโดยผสมกับปูนซีเมนต์ตามหลักการของวิศวกรรมปฐพีสิ่งแวดล้อม จากการศึกษาพบว่าสัดส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ : ผงตะกรันเหล็ก: เถ้าชีวมวล เท่ากับ 0.750 : 0.125 : 0.125 เป็นสัดส่วนผสมที่ดีที่สุดเมื่อนำสารเชื่อมประสานมาผสมกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ที่อัตราส่วน 150, 200 และ 250 kg/m พบว่าดินมีกำลังเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามอายุการบ่ม โดยพิจารณาจากกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) และ เปอร์เซ็นต์ CBR (California Bearing Ratio) ผลจากการทดสอบคุณสมบัติดินทางด้าน Physico – chemical Properties โดย X-ray Diffractometer (XRD) ผลการทดลองยืนยันศักยภาพของการใช้กากอุตสาหกรรมดังกล่าวเป็นสารเชื่อมประสานในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียว ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์ในการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง

อักรชัย เรืองแสงทอง (2563) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยกากวัสดุจากโรงงานอุตสาหกรรมทั้ง เถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวมาผสมกับปูนซีเมนต์โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและการวิเคราะห์เทคนิค การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ซึ่งพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดสอบเบื้องต้นสำหรับทำสารเชื่อม ประสานจากวัสดุดังกล่าวคือใช้ปูนซีเมนต์ : เถ้าซัง ข้าวโพด : ผงหินปูนขาวเท่ากับ 65:20:15 เมื่อนำสารเชื่อมประสาน ดังกล่าวผสมกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยวิธีการบดอัดโดยการควบคุมความหนาแน่นของดินในอัตราส่วน 10%, 12% และ 14% โดยน้ำหนักเปียกเพื่อปรับปรุงคุณภาพพบว่าดินซีเมนต์ผสมเถ้าซังข้าวโพดและ

ผงหินปูนขาวมีกำลังรับแรงอัด แขนเดียวสูงขึ้นตามปริมาณสารเชื่อมประสานและอายุการบ่ม และนอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบพัฒนากำลังโดยการวิเคราะห์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่า สารผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น ในขณะที่ไดแคลเซียมซิลิเกต และไตรแคลเซียมซิลิเกตมีค่าลดลง จากการศึกษาสรุปได้ว่าการใช้สารเชื่อมประสานที่ได้จากการผสมปูนซีเมนต์ เถ้าขังข้าวโพด และผงหินปูนขาวในปริมาณที่เหมาะสมมีศักยภาพในการนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพด้านกำลังของดินเหนียว อ่อนได้

กัญจน์ สลึงค์ และคณะ (2563) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังด้วยมาตรฐานด้วยวัสดุผสม ซีเมนต์ โพลีเมอร์ (cement-polymer mixture) เพื่อลดปริมาณการใช้ซีเมนต์ลงในการปรับปรุงคุณภาพดิน ให้สามารถรับกำลังรับแรงอัดได้ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ซึ่งในปัจจุบันซีเมนต์ถูกใช้เพื่อการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังอยู่ด้วย แต่เนื่องด้วยดินปรับปรุงด้วยซีเมนต์จะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงแต่มีความสามารถในการรับแรงดัด และไวต่อการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากน้ำและความชื้น งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างซีเมนต์และโพลีเมอร์ (Polymers) ที่นำมาปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยมาตรฐาน โดยมีเป้าประสงค์ที่จะให้โพลีเมอร์มาช่วยในการพัฒนาความสามารถในการรับแรงดัดและการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากน้ำและความชื้น โดยการศึกษาพิจารณาการพัฒนา กำลังรับแรงอัด แขนเดียว กำลังการรับแรงดัด และความสามารถในการดูดซึมน้ำของดินลูกรังด้วยมาตรฐานที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่ 1 และโพลีเมอร์ ในการทำเป็นตัวเชื่อมประสานของดินลูกรัง โดยแทนที่ซีเมนต์ด้วยโพลีเมอร์ที่ 0, 5, 10, 15, 20% และที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน จากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนการแทนที่ด้วยโพลีเมอร์ 10% มีค่ากำลังรับแรงอัด แขนเดียวดีที่สุด และมีการพัฒนาการรับแรงดัด ร่วมกับการซึมได้ของน้ำที่ต่ำ ดังนั้นด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมที่จะสามารถนำไปใช้ในการรักษาเสถียรภาพดินลูกรังด้วยมาตรฐานสำหรับการใช้งานบนถนน

เส้นใยธรรมชาติอาจพบได้ทั้งในพืชและสัตว์ การศึกษาเชิงทดลองได้ดำเนินการเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอมโพสิตแบบประกบที่ทำจากโพลีเมอร์ไฮบริดที่เสริมด้วยเส้นใยขนเป็ด Duck Feather Fiber (DFF) และเส้นใยปอ Jute Fiber (JF) เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพเชิงกล พบว่าคอมโพสิต DFF และ JF สามชั้นมีประสิทธิภาพดีกว่าคอมโพสิตสองชั้น ซึ่งบ่งชี้ว่าผลการศึกษานำไปใช้ได้สำเร็จในงานอุตสาหกรรมต่างๆ (Kurien et al., (2023)) มีการศึกษามากมายที่ดำเนินการตลอดหลายปีที่ผ่านมาเพื่อระบุวัสดุทดแทนที่ใช้งานได้สำหรับเส้นใยสังเคราะห์ เส้นใยขนไก่ Chicken Feather Fiber (CFF) ซึ่งเป็นคอมโพสิตเส้นใยชีวภาพธรรมชาติชนิดหนึ่ง ถือเป็นทางเลือกอื่นที่เป็นไปได้สำหรับเส้นใยสังเคราะห์ เนื่องจาก CFF เป็นผลพลอยได้จากการเลี้ยงไก่ จึงวิเคราะห์ บำบัด และดำเนินการภายหลังได้ยาก เนื่องจากไม่มีเทคนิคการสกัดที่ได้มาตรฐาน. อย่างไรก็ตาม CFF เป็นประเภทของเส้นใยที่น่าสนใจซึ่งมีศักยภาพในการนำไปใช้ในแอปพลิเคชันต่างๆ มากมาย เนื่องจากมีปริมาณค่อนข้างมากและมีคุณสมบัติเข้ากันได้ จากการศึกษา การใช้งาน CFF จะสร้างส่วนผสมที่ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการกำจัดผลิตภัณฑ์ขยะมูลฝอยหลักจากฟาร์มไก่ Kurien et al., (2022) ได้ทำการวิเคราะห์ CFF อย่างละเอียดถี่ถ้วนในงานวิจัยนี้ โดยให้ความสนใจเป็นพิเศษกับลักษณะทางกล เคมี ความร้อน เสียง และสัณฐานวิทยาของวัสดุ นอกจากนี้ความแตกต่างบางประการในคุณสมบัติที่ระบุของวัสดุแล้ว ยังมีการตรวจสอบการใช้งาน CFF ที่เป็นไปได้ในภาคธุรกิจต่างๆ มากมายเพื่อพัฒนาสินค้าที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างละเอียดถี่ถ้วนอีกด้วย คอนกรีตที่มีขนไก่เป็นส่วนผสม 0% มีค่ากำลังอัดเฉลี่ย 200.78 กก./ชม.2 คอนกรีตที่มีเส้นใยขนไก่เป็นส่วนผสม 1% มีค่ากำลังอัดเฉลี่ย 215.09 กก./ชม.2 และคอนกรีตที่มีเส้นใยขนไก่เป็นส่วนผสม 2% มีค่ากำลังอัดเฉลี่ย 197.54 กก./ชม.2 ตามข้อมูลของ Sutarno, Rahmawati และ Masvika (2021). ในขณะเดียวกัน ค่าความแข็งแรงดัดงอสำหรับเปอร์เซ็นต์ของเส้นใย 0%, 1% และ 2% คือ 24.00 กก./ชม.2, 23.03 กก./ชม.2 และ 21.08 กก./ชม.2 ตามลำดับ

ซึ่งบ่งชี้ว่าเมื่อคอนกรีตถึงระดับที่เหมาะสม การเติมเส้นใยชนไก่จะทำให้ค่าความแข็งแรงในการอัดลดลง ผลการทดสอบความแข็งแรงในการอัดทรงกระบอกแสดงไว้ในตารางที่ 5 ปูนซีเมนต์ถูกนำมาใช้กับดินเหนียว Zebabdja เพื่อเพิ่มคุณภาพของดิน โดยการเติมเศษวัสดุรอง เช่น เส้นใยชนนกคุณภาพของดินที่มีสมบัติต่ำก็ได้รับการปรับปรุง ทำให้มูลค่าของเส้นใยธรรมชาติในการก่อสร้างและการแก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น โดยจะประเมินปริมาณปูนซีเมนต์ (6, 8, 10 และ 12%) และปริมาณเส้นใยชนนกไก่ (1, 2 และ 3%) รวมถึงปัจจัยควบคุมอื่นๆ ที่นี้ ในระยะเวลาการบ่มที่แตกต่างกัน จะมีการวัดการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงและแรงอัดที่ไม่ถูกจำกัด จากผลการศึกษาพบว่าจำเป็นต้องใช้ซีเมนต์ 10% เพื่อทำให้ดินเหนียวที่ผ่านการบำบัดมีเสถียรภาพพื้นฐานเพิ่มเติมที่แสดงว่าคุณภาพเชิงกลของดินเหนียวได้รับการปรับปรุงคือเส้นใยชนไก่ที่เพิ่มขึ้น 2% ซึ่งอาจช่วยแก้ปัญหาทางเทคนิคที่น่าสนใจสำหรับผู้ที่มีดินอ่อนได้ (Zerrouk, Kadri และ Bougara (2022))

บทที่ 3

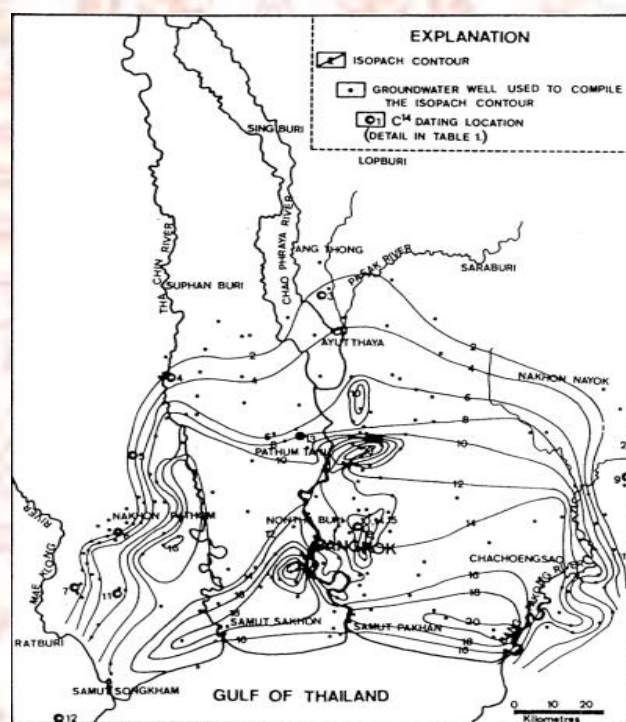
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ธรณีวิทยาของกรุงเทพมหานคร

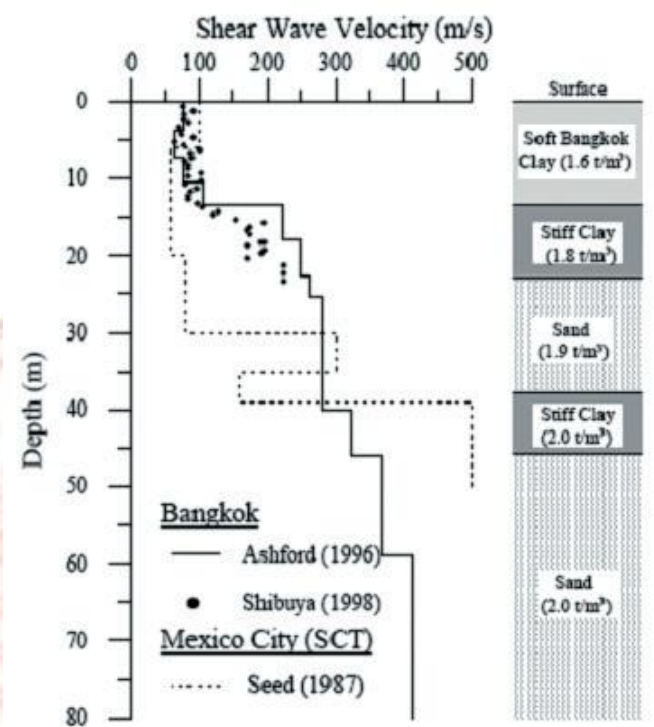
กรุงเทพมหานครตั้งอยู่บนที่ราบขนาดใหญ่บนชั้นดินตะกอนปากแม่น้ำที่มีความหนาของลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา โดยที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยานี้มีพื้นที่ขนาดประมาณ 13,800 ตารางกิโลเมตรและเคยอยู่ใต้ทะเลเมื่อประมาณ 3,000-5,000 ปีมาแล้ว หลังจากนั้นเมื่อ 2,700 ปีที่ผ่านมา น้ำทะเลค่อยๆลดระดับลงจนเกิดเป็นที่ราบลุ่มตอนกลางของประเทศไทย ดังแสดงในภาพที่ 3-1 ที่ราบลุ่มนี้มีชั้นดินเหนียวหนาอยู่ด้านบน ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่า “ดินเหนียวกรุงเทพมหานคร (Bangkok clay)” โดยจะมีความหนาประมาณ 15-20 เมตร ในเขตเมือง ภาพที่ 3-1 แสดงความหนาของชั้นดินเหนียว กรุงเทพมหานคร ชั้นดินเหนียวกรุงเทพมหานครนี้มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำและยุบตัวสูง จัดเป็นดินประเภท normally consolidated clay ส่วนบนของชั้นดินกรุงเทพมหานคร 1-5 เมตรแรกจะเป็นซากพืชซากสัตว์ที่ทับถมซึ่งมีกำลังรับแรงต่ำ ชั้นดินกรุงเทพมหานครจะหนาขึ้นในด้านทิศเหนือทางทิศใต้และบางลงในด้านทิศเหนือ ชั้นดินเหนียวแข็งจะอยู่ที่ประมาณ 5-7 เมตรแรก ส่วนชั้นทรายชั้นที่ 1 อยู่ที่ประมาณ 50 เมตร ชั้นหินดานจะลึกประมาณ 500-2,000 เมตร



ภาพที่ 3-1 พื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล (Tuladhar R. et al. 2003)



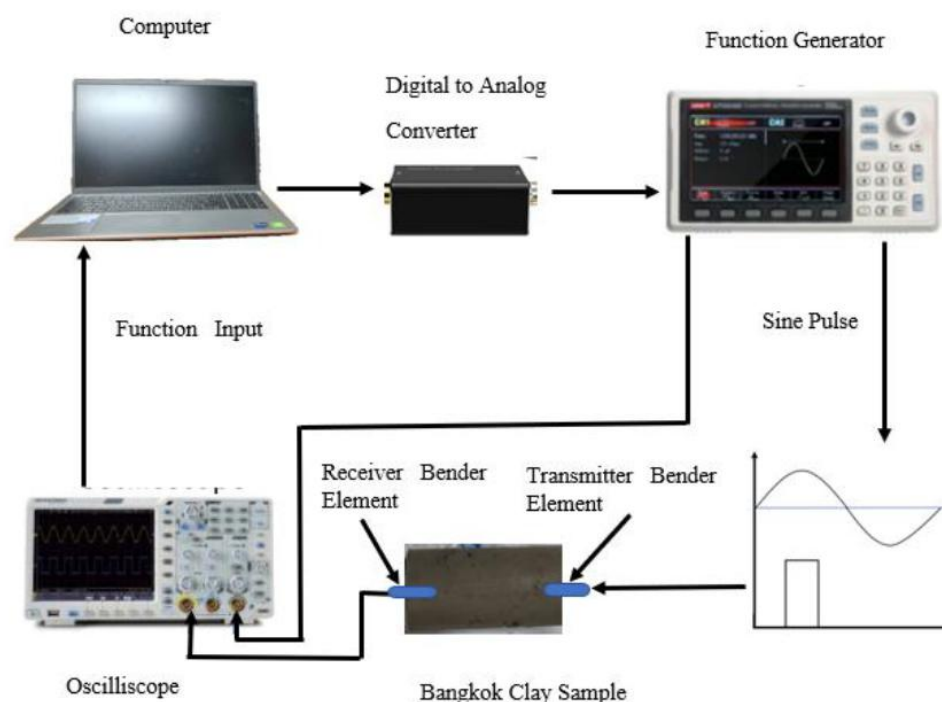
ภาพที่ 3-2 ความหนาของชั้นดินเหนียวกรุงเทพมหานคร (Tuladhar R. et al. 2003)



ภาพที่ 3-3 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินกรุงเทพมหานคร (Warnitchai P. et al. 2000)

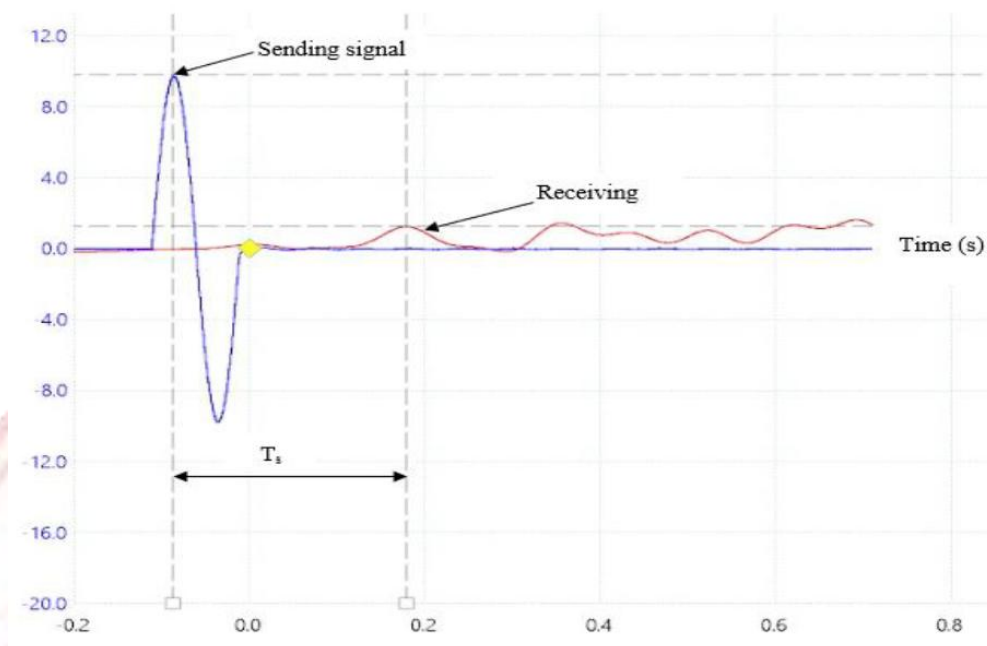
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเป็นเตอร์อีลีเมนต์

จากภาพที่ 3-6 แสดงชุดการทดสอบเป็นเตอร์อีลีเมนต์ในตัวอย่างดิน โดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์สร้างสัญญาณจากโปรแกรม ส่งสัญญาณผ่านเซ็นเซอร์เป็นเตอร์อีลีเมนต์ตัวส่ง (sending bender element sensor) สัญญาณจะเดินทางผ่านตัวอย่างดินไปยังเซ็นเซอร์เป็นเตอร์อีลีเมนต์ตัวรับ (receiving bender element sensor) สัญญาณที่ตัวรับจะถูกขยายด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (instrument amplifier) ความเร็วคลื่นจะถูกวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ Oscilloscope ทำการวัดเวลาที่คลื่นเดินทางผ่านตัวอย่างดิน เมื่อทราบเวลาที่คลื่นเดินทางและความสูงของตัวอย่างดินก็สามารถคำนวณหาความเร็วคลื่นได้จากสมการที่ 2-2



ภาพที่ 3-4 ระบบการทำงานของชุดทดสอบเป็นเตอร์อีลีเมนต์

ตามมาตรฐาน ASTM D8295-19 การทดสอบองค์ประกอบตัดจะใช้ในการวัดความเร็วของคลื่นเฉือน Vs ซึ่งใช้ในการกำหนดความแข็งของตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ในแง่ของโมดูลัสเฉือนเริ่มต้น G0 วิธีนี้ใช้ในการกำหนดการพัฒนาความแข็งแรงในการพิจารณา Vs สำหรับตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ธรรมดาและเถ้าลอยที่ผ่านปฏิกิริยาปอซโซลานิกผ่านโมดูลัสเฉือน รูปที่ 2 แสดงวิธีการทดสอบคลื่นเฉือนโดยจัดวางอุปกรณ์ให้สร้างสัญญาณคลื่นเฉือน เครื่องกำเนิดฟังก์ชันจะแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณพัลส์ไซน์ โดยสัญญาณพัลส์ไซน์ จะถูกส่งไปยังองค์ประกอบตัดของเครื่องส่งสัญญาณที่มาจากสายสัญญาณหนึ่งสายที่ติดตั้ง กับตัวอย่างกรุงเทพฯ สัญญาณจะเดินทางผ่านตัวอย่างดินเหนียว เมื่อเข้าสู่องค์ประกอบตัดของตัวรับ สัญญาณจะเดินทางเข้าไปในออสซิลโลสโคปและเชื่อมต่อสายอีกเส้นหนึ่งโดยตรง กับออสซิลโลสโคปเพื่อแปลงสัญญาณกลับเข้าไปในคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างรูปแบบของสัญญาณ ที่เดินทางผ่านตัวอย่างดินเหนียว



ภาพที่ 3-5 ตัวอย่างการวัดความเร็วคลื่นเฉือน

ภาพที่ 3-7 แสดงตัวอย่างการวัดคลื่นเฉือน รูปแบบของสัญญาณพัลส์ไซน์ ที่ส่งผ่านเครื่องส่ง ออสซิลโลสโคปที่ส่งคลื่นเฉือนพัลส์ไซน์ความถี่ ที่เกิดจากการเดินทางของคลื่นไซน์ผ่านตัวอย่างดิน เหนียวกลับไปยังคอมพิวเตอร์ต้นทางสัญญาณ การส่งสัญญาณผ่านคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างคลื่นพัลส์ ไซน์จะส่งสัญญาณแอมพลิจูด 10 V ที่ความถี่ 10 kHz ผ่านตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกตาม คำแนะนำของผู้ผลิต เมื่อคลื่นเดินทางผ่านความสูงของตัวอย่างดินเหนียว องค์ประกอบตัวรับโค้ง จะ รับสัญญาณคลื่นเฉือนที่เดินทางผ่านตัวอย่างดินเหนียว ในการเดินทางเฉือน คือระยะเวลาที่ใช้ในการ เดินทางของคลื่นจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ การตรวจสอบระยะเวลาเดินทาง ของคลื่นเฉือน จาก ภาพที่ 3-7 คลื่นที่เข้าสู่จุดสูงสุดของคลื่น 1 จะถูกใช้เป็นจุดเริ่มต้นของการนับระยะเวลาเดินทางจาก การส่งไปยังจุดสูงสุดของคลื่น 2 เป็นจุดสิ้นสุดของการเดินทางของคลื่นรับ ดังนั้น V_s (แสดงเป็น $V_s - v_h$) สามารถหาได้ร่วมกัน (ASTM D1633-17 และ ASTM D8295-19)

โดยที่ V_s คือความเร็วของคลื่นเฉือนที่วัดเป็นหน่วย (ม./วินาที) L_i คือความยาวของตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพ ที่ใช้สำหรับการทดสอบ (ม.) L_b คือความยาวโดยรวมขององค์ประกอบตัดที่วัดได้ระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ (ม.) T_s คือเวลาที่วัดได้ของการเคลื่อนที่ของคลื่นเฉือน ผ่านวัตถุจากหน่วยการปล่อยคลื่นไปยังหน่วยตัวรับคลื่น T_c คือปัจจัยแก้ไขความล่าช้า โมดูลัสเฉือนเริ่มต้น (G_0 , MPa) ของตัวอย่างดินเหนียวที่วัดได้ V_s สามารถคำนวณเพิ่มเติมได้

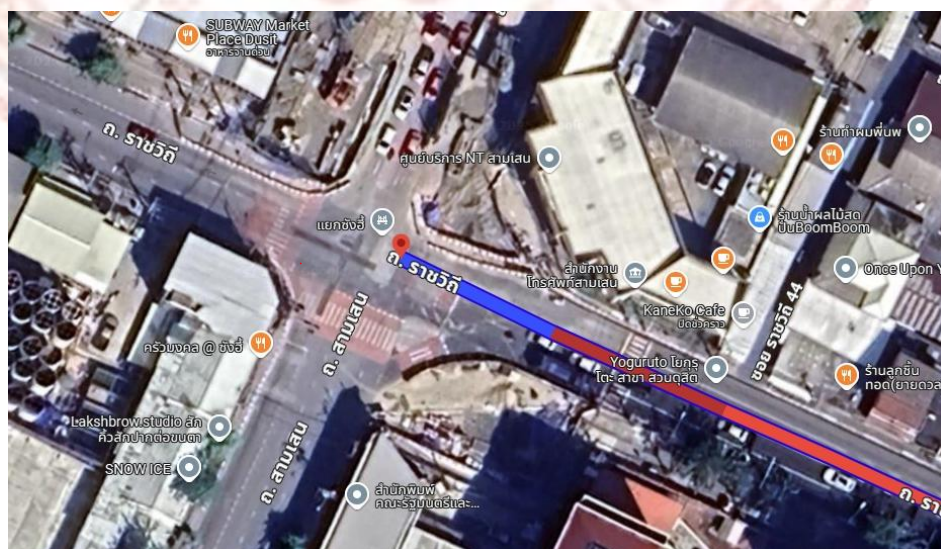
โดยที่ p คือความหนาแน่นของดินอ่อนที่เสถียร (กก./ม.3) ตามที่แสดงในตาราง

3.3 การทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัด

ตามมาตรฐาน ASTM D1633-17 การดำเนินการทดสอบความแข็งแรงของแรงอัดแบบไม่จำกัด (UCS) ด้วยวิธีความแข็งแรงของแรงอัดแบบไม่จำกัด วัตถุประสงค์คือเพื่อเปรียบเทียบความสามารถของความแข็งแรงของแรงอัดแบบไม่จำกัดกับความเร็วของคลื่นเฉือนซึ่งระยะเวลาจะกำหนดความแข็งแรง ซึ่งหมายความว่าคลื่นเฉือนสามารถเคลื่อนที่ได้ดีในวัตถุที่มีความหนาแน่น การทดสอบความแข็งแรงของแรงอัดแบบไม่จำกัด มีข้อดีของการทดสอบ เช่น ประหยัดเวลาในการทดสอบ รู้ผลการทดสอบ ได้อย่างรวดเร็ว ขั้นตอนการทดสอบนั้นง่าย แม้ว่าการทดสอบความแข็งแรงของแรงอัดแบบไม่จำกัด จะทำลายตัวอย่างที่ทดสอบก็ตาม ในการทดลองกับตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ใช้ในการศึกษานี้ ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ถูกบรรจุในกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและความสูง 100 มิลลิเมตร จากนั้นห่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในภาชนะพลาสติกที่มีฝาปิดสนิท โดยมีระยะเวลาการบ่ม 28 วัน เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการบ่ม ตัวอย่างจะถูกทดสอบโดยใช้วิธี UCS ตามมาตรฐาน ASTM D1633-17 อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมดินกับซีเมนต์แสดงไว้ในตาราง 3-3

3.4 ดินที่ใช้ในงานวิจัย

ดินที่นำมาใช้ในการทดสอบมาจากโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง บริเวณทางตอนใต้ของสถานี
 ชिरพยาบาล โดยขุดลึกลงไป 10-12 เมตร ตัวอย่างดินนี้ถูกนำไปยังห้องปฏิบัติการที่มหาวิทยาลัย
 เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (KMUTNB) วิทยาเขตกรุงเทพฯ เพื่อตรวจสอบลักษณะ
 พื้นฐานและองค์ประกอบทางเคมี รายละเอียดของตัวอย่างดินที่เก็บรวบรวมเพื่อการวิเคราะห์แสดงใน
 ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์พบว่าดินกรุงเทพฯ มีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติประมาณ 81% และ
 ค่าดัชนีความเหลว (Liquidity Index) อยู่ใกล้ผิวดิน ตามตารางที่ 3 พบว่าค่าดังกล่าวประมาณ 1.0
 แต่ลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 4318-93 พบว่าดินกรุงเทพฯ
 มีขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit) เท่ากับ 84% และขีดจำกัดความพลาสติก (Plastic Limit)
 เท่ากับ 34% ค่าความถ่วงจำเพาะของดินกรุงเทพฯ คำนวณได้เท่ากับ 2.68 โดยใช้มาตรฐาน ASTM
 D 4253 สำหรับตัวอย่างดินกรุงเทพฯ ที่มีความชื้น 81% ถูกนำไปทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D
 2216-19 [45] ดินกรุงเทพฯ ยังผ่านการทดสอบมาตรฐาน ASTM D 7263-21 โดยได้ค่าหน่วยน้ำหนัก
 1.47 ตัน/ลูกบาศก์เมตร



ภาพที่ 3-6 โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินบริเวณสถานีวชิรพยาบาล

การเตรียมตัวอย่างจะนำดินเหนียวกรุงเทพมหานครมาผสมน้ำให้มีความชื้นเท่ากับพิกัดเหลว จากนั้นผสมปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมคิดเป็นร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 5, 15, และ 25 โดยน้ำหนักดินแห้ง ใช้ปริมาณเส้นใยขนไก่ร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, และ 2.0 โดยปริมาตร

ตารางที่ 3-1 สมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	UCS (kPa)	Specific gravity	Moisture content (%)	Unit weight (t/m ³)
84	34	1.48	2.68	81	1.47

ตารางที่ 3-2 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟุ่ม

Comp.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
Silica fume (%)	>85	0-1.1	0-2	0-0.8	0-4.5	0-1.3

3.5 วัสดุที่ใช้การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ

วัสดุหลักที่ใช้ในการทำให้ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ เสถียรคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement: OPC) ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 3.14 นอกจากนี้ยังเป็นผลพลอยได้จากการผลิตโลหะผสมซิลิกอนและโลหะซิลิกอน การใช้โลหะผสมซิลิกอนและเฟอร์โรซิลิกอนตามลำดับ ทำให้เกิดซิลิกาฟุ่มที่มีซิลิกอนไดออกไซด์มากกว่า 90% และ 85% ตามลำดับ จากภาพที่ 2 ซิลิกาฟุ่มเป็นอนุภาคทรงกลม

ขนาดเล็กมาก โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร สารนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 15,000–25,000 ตร.ม./กก. และมีความถ่วงจำเพาะ 2.2–2.3 ในขณะที่ปูนซีเมนต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 1,500 ตร.ม./กก. ซิลิกาฟุ้งที่ละเอียดมากนี้มีเอฟเฟกต์ฟิลเลอร์และเป็นสถานที่ที่สมบูรณ์แบบสำหรับการงอกของผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แต่โครงสร้างอะมอร์ฟัสและปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ที่สูงทำให้เป็นสารปอซโซลานิกที่มีปฏิกิริยาสูง



ภาพที่ 3-7 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาซิลิกาฟุ้ง

3.5.1 ขนไก่

ขนไก่ที่นำมาใช้เป็นขนที่ได้จากขยะอุตสาหกรรมสัตว์ปีกในรูปที่ 3-17 มีความถ่วงจำเพาะ 0.58



ภาพที่ 3-8 ขนไก่

การเตรียมตัวอย่างจะนำดินเหนียวกรุงเทพมหานครมาผสมน้ำให้มีความชื้นเท่ากับพิกัดเหลว จากนั้นผสมปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมคิดเป็นร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนักแห้ง ใช้ปริมาณเส้นใยขนไก่ร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 โดยปริมาตร

ตารางที่ 3-3 แสดงสัดส่วนการผสมตัวอย่างดิน-ซีเมนต์

Serial No.	Cement Content (%)	Cement Content (g)	Silica Fume Content (%)	Silica Fume Content (g)	Fiber Content (%)	Fiber Content (g)	W/C (%)	Water Content (%)	Curing Time (day)
A1	2	3.33	0	0	0	0	0.50	84	28
A2	4	6.66	0	0	0	0	0.50	84	28
A3	6	10.0	0	0	0	0	0.50	84	28
A4	8	13.31	0	0	0	0	0.50	84	28
A5	10	16.64	0	0	0	0	0.50	84	28
B1	8	13.31	0	0	0	0	0.25	84	28
B2	8	13.31	0	0	0	0	0.50	84	28
B3	8	13.31	0	0	0	0	0.75	84	28
B4	8	13.31	0	0	0	0	1.00	84	28
C1	8	13.31	0.00	0	0	0	0.50	84	28
C2	8	13.31	5.00	0.66	0	0	0.50	84	28
C3	8	13.31	15.00	1.99	0	0	0.50	84	28
C4	8	13.31	25.00	3.32	0	0	0.50	84	28
D1	8	13.31	0	0	0	0	0.5	84	28
D2	8	13.31	0	0	0.5	0.57	0.5	84	28
D3	8	13.31	0	0	1.0	1.14	0.5	84	28
D4	8	13.31	0	0	1.5	1.71	0.5	84	28



ภาพที่ 3-9 ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพมหานคร



ภาพที่ 3-10 การผสมดินกับซีเมนต์ ซิลิกาฟุ่ม และขี้เถ้า



ภาพที่ 3-11 ตัวอย่างขนไก่ที่นำมาใช้



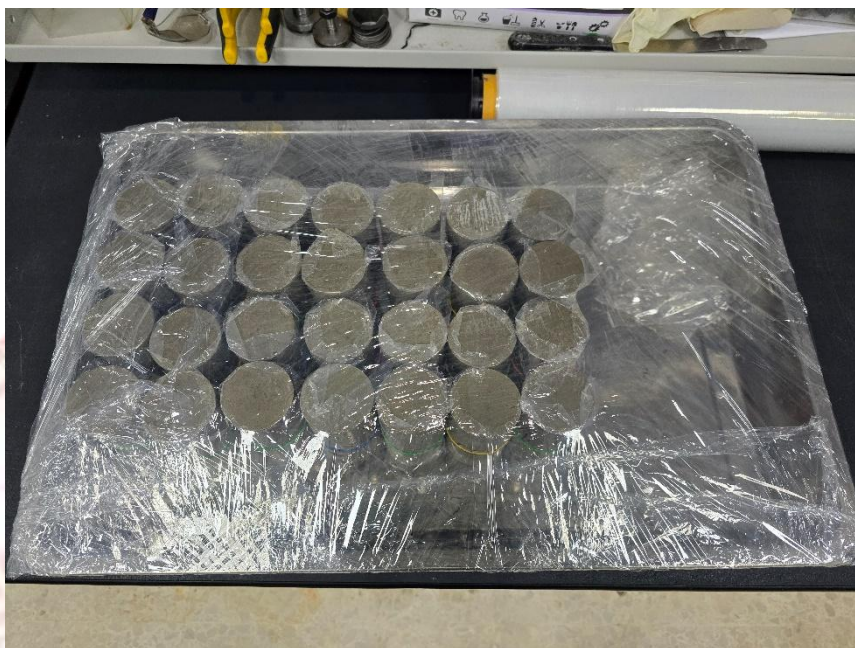
ภาพที่ 3-12 แบบหล่อตัวอย่างดินผสมกับซีเมนต์ ซิลิกาฟุ้ง และขนไก่



ภาพที่ 3-13 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ผสมดินกับซีเมนต์ ชิลิกาฟุ้ง และชนไก่



ภาพที่ 3-14 การอัดตัวอย่างดินผสมกับซีเมนต์ ชิลิกาฟุ้ง และชนไก่ลงในแบบหล่อ



ภาพที่ 3-15 ตัวอย่างดินผสมกับซีเมนต์ ซิลิกาฟูมและขี้เถ้า ห่อด้วยฟิล์มพลาสติก

3.6 วิธีการทดสอบเป็นเตอร์ฮีสเทอรีซิส

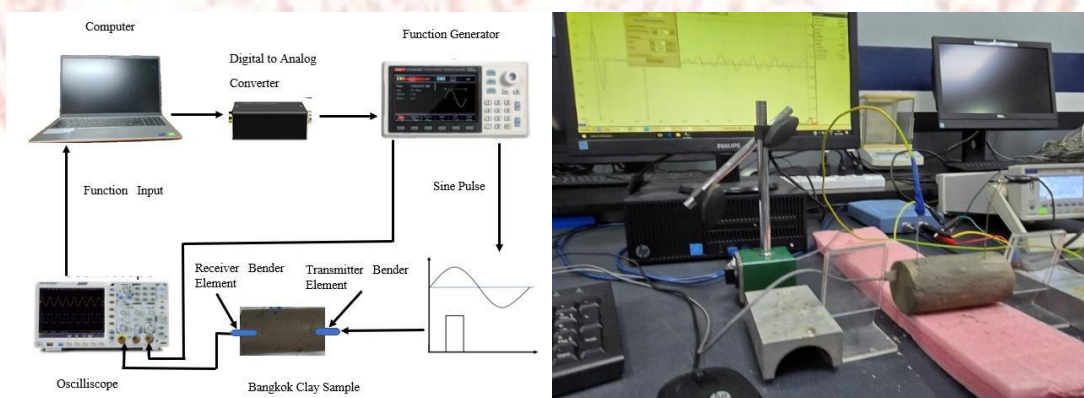
ภาพที่ 3-25 แสดงตัวอย่างการวัดคลื่นเฉือน รูปแบบของสัญญาณพัลส์ไซน์ที่ส่งผ่านเครื่องส่งออสซิลโลสโคปที่ส่งความถี่คลื่นเฉือนพัลส์ไซน์ที่เกิดจากการเดินทางของคลื่นไซน์ผ่านตัวอย่างดินเหนียวกลับไปยังคอมพิวเตอร์ต้นทางสัญญาณ การส่งสัญญาณผ่านคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างคลื่นพัลส์ไซน์จะส่งสัญญาณแอมพลิจูด 10 V ที่ความถี่ 10 kHz ผ่านตัวแปลงดิจิทัลเป็นอนาล็อกตามคำแนะนำของผู้ผลิต เมื่อคลื่นเดินทางผ่านความสูงของตัวอย่างดินเหนียวแล้วองค์ประกอบตัดตัวรับจะรับสัญญาณคลื่นเฉือนที่เดินทางผ่านตัวอย่างดินเหนียว ในการเดินทางเฉือน ปริมาณเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ การตรวจสอบระยะเวลาเดินทางของคลื่นเฉือน จากรูปที่ 3-25 คลื่นที่เข้าสู่จุดสูงสุดของคลื่น 1 จะถูกใช้เป็นจุดเริ่มต้นของการนับเวลาเดินทางจากการส่งไปยังจุดสูงสุดของคลื่น 2 เป็นจุดสิ้นสุดของการเดินทางของ

คลื่นรับ ดังนั้น V_s (แสดงเป็น V_s -vh) สามารถพบร่วมกันได้ (ASTM D1633-17 และ ASTM D8295-19) โดยใช้สมการ (2-4) ต่อไปนี้

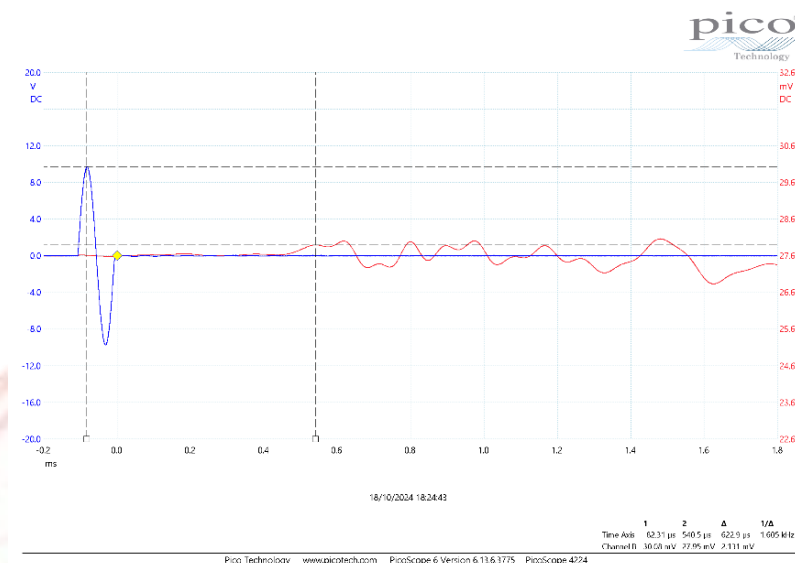
$$V_s = (L_i - L_b)/(T_s - T_c) \quad (2-4)$$

โดยที่ V_s คือความเร็วของคลื่นเฉือนที่วัดเป็นหน่วย (ม./วินาที) L_i คือความยาวของตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพที่ใช้ในการทดสอบ (ม.) L_b คือความยาวรวมของการทดสอบ องค์ประกอบตัดที่วัดได้ระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ (ม.) T_s คือเวลาที่วัดได้ของการเคลื่อนที่ของคลื่นเฉือนผ่านวัตถุจากหน่วยการปล่อยคลื่นไปยังหน่วยรับคลื่น T_c คือปัจจัยแก้ไขความล่าช้า โมดูลัสเฉือนเริ่มต้น (G_0 , MPa) ของตัวอย่างดินเหนียวที่สอดคล้องกับ V_s ที่วัดได้ สามารถคำนวณเพิ่มเติมได้ในสมการ (2-5)

$$G_0 = (\rho)(V_s^2)/10^6 \quad (2-5)$$



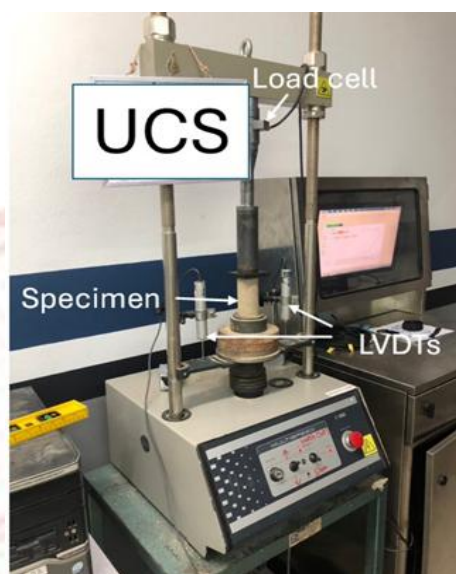
ภาพที่ 3-16 ตัวอย่างดินผสมซีเมนต์ถูกทดสอบโดยวิธีเป็นเตอร์อีลีเมนต์



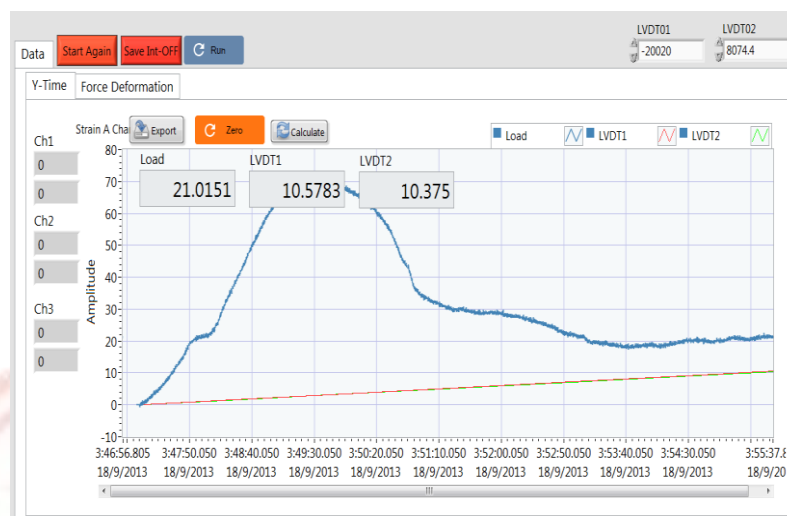
ภาพที่ 3-17 ผลการทดสอบเป็นเตอร์อิลีเมนต์

3.7 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test)

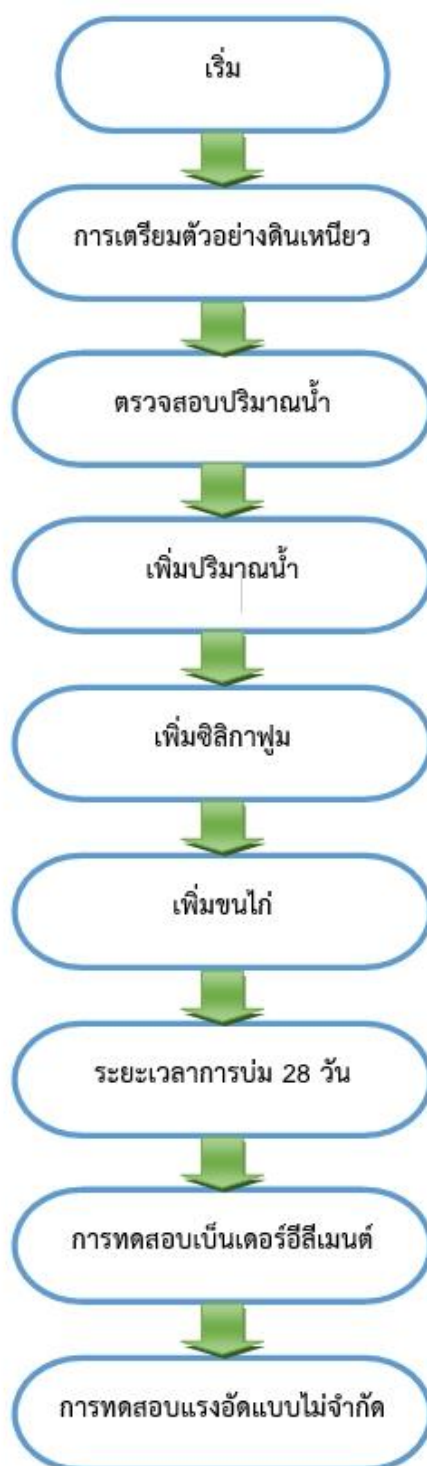
การทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัดตามมาตรฐาน ASTM D1633-17 การทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัด (UCS) จะใช้การทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัด วัตถุประสงค์คือเพื่อเปรียบเทียบความสามารถของแรงอัดแบบไม่จำกัดกับความเร็วของคลื่นเฉือนซึ่งระยะเวลาจะกำหนดความแข็งแรง ซึ่งหมายความว่าคลื่นเฉือนสามารถเคลื่อนที่ได้ดีในวัตถุที่มีความหนาแน่น การทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัดมีข้อดีของการทดสอบ เช่น ประหยัดเวลาในการทดสอบ รู้ผลการทดสอบได้อย่างรวดเร็ว ขั้นตอนการทดสอบนั้นง่ายมาก แม้ว่าการทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัดจะทำลายตัวอย่างที่ทดสอบก็ตาม ในการทดลองกับตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพที่ใช้ในการศึกษานี้ ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพจะถูกบรรจุในกระบอกสูบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. และความสูง 100 มม. จากนั้นจึงห่อหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในภาชนะพลาสติกที่มีฝาปิดสนิท โดยมีระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ตัวอย่างจะถูกทดสอบโดยใช้วิธี UCS ตาม ASTM D1633-17 อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมดินกับซีเมนต์แสดงอยู่ในตาราง 3-3



ภาพที่ 3-18 ตัวอย่างการทดสอบดินผสมกับซีเมนต์ ซิลิกาฟูมและขี้เถ้า ที่ 28 วันทดสอบแบบไม่
ถูกจำกัด



ภาพที่ 3-19 ผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด



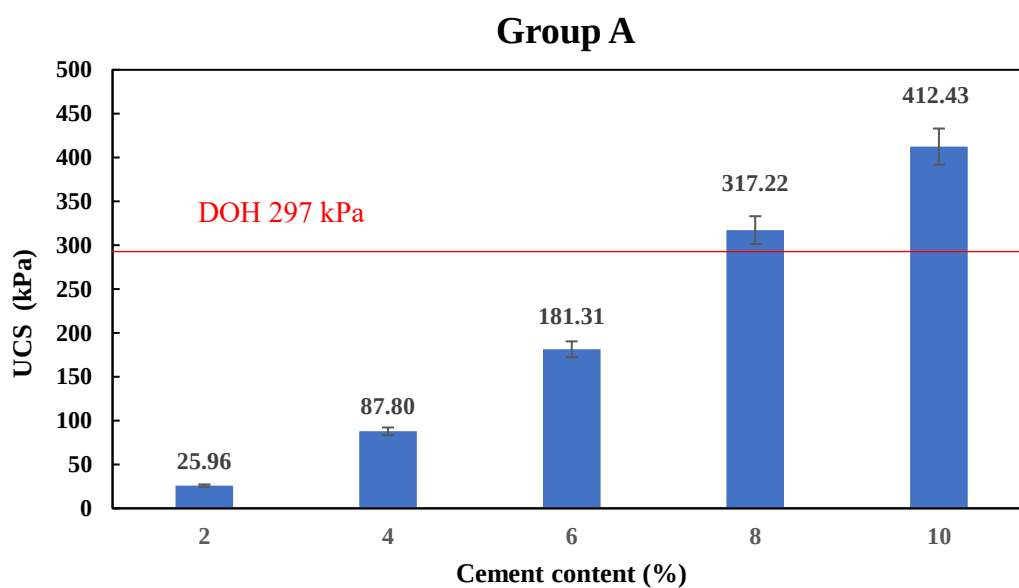
ภาพที่ 3-20 ผังงานการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบ UCS กับ การเติมปริมาณซีเมนต์

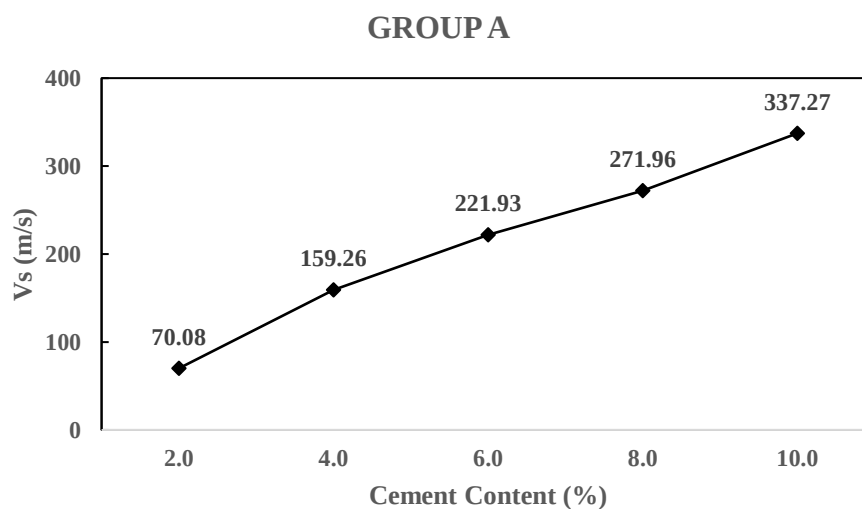
ภาพที่ 4-1 แสดงข้อมูลค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) หลังจากบ่ม 28 วัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ในช่วง 2-10% พบว่าค่ากำลังอัด UCS ที่ 317.22 kPa เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ในอัตรา 8% สามารถผ่านมาตรฐานของกรมทางหลวง (DOH) ที่กำหนดไว้ที่ 297 kPa โดยทั่วไปพบว่าเมื่ออัตราส่วนของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 4-1 ผลการทดสอบ UCS กับ การเติมปริมาณซีเมนต์

4.2 ผลการทดสอบ V_s กับการเติมปริมาณซีเมนต์

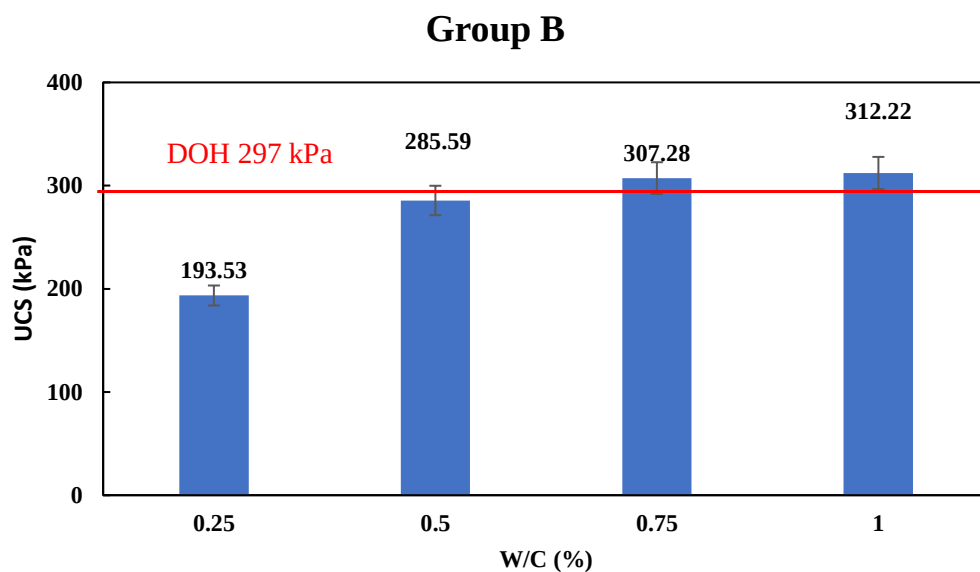
ภาพที่ 4-2 แสดงผลค่าการพัฒนาด้านความแข็งแรงของการตรวจสอบด้วยคลื่น V_s หลังจากบ่ม 28 วัน พบว่าความแข็งแรงของดินซีเมนต์ที่ผสมด้วยปริมาณซีเมนต์ตั้งแต่ 2% ถึง 10% ความแข็งแรง ถูกพัฒนาสูงขึ้นตามปริมาณ ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-2 ผลการทดสอบ V_s กับการเติมปริมาณซีเมนต์

4.3 ผลการทดสอบ UCS และปริมาณการเติมน้ำ W/C

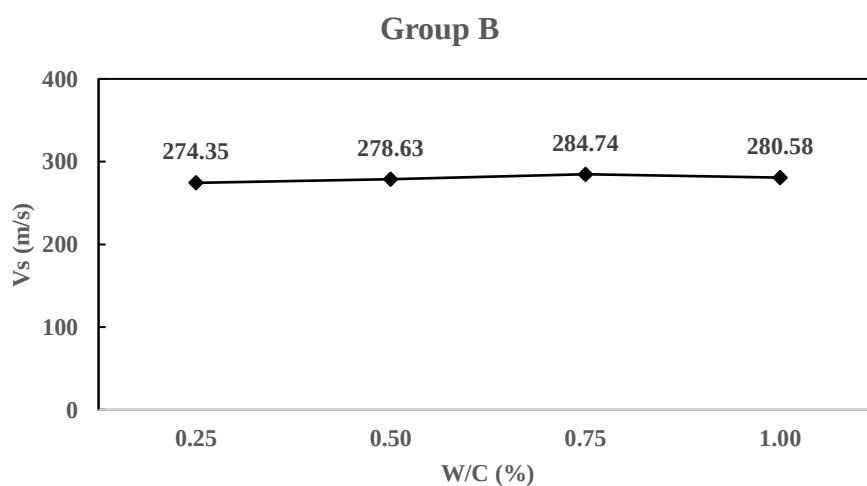
ภาพที่ 4-3 แสดงผลของปริมาณการผสมน้ำตามอัตราส่วนน้ำต่อน้ำซีเมนต์ (W/C) ในปริมาณ 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0% โดยจากมาตรฐานของกรมทางหลวง (DOH) ที่กำหนดค่ามาตรฐานไว้ที่ 297 kPa พบว่าเฉพาะอัตราส่วน W/C ที่ 0.75 และ 1.0 เท่านั้นที่ผ่านมาตรฐานดังกล่าว ดังนั้นแนะนำให้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อน้ำซีเมนต์ที่ไม่น้อยกว่า 0.75%



ภาพที่ 4-3 ผลการทดสอบ UCS และปริมาณการเติมน้ำ W/C

4.4 ผลการทดสอบ V_s กับปริมาณการเติมน้ำ W/C

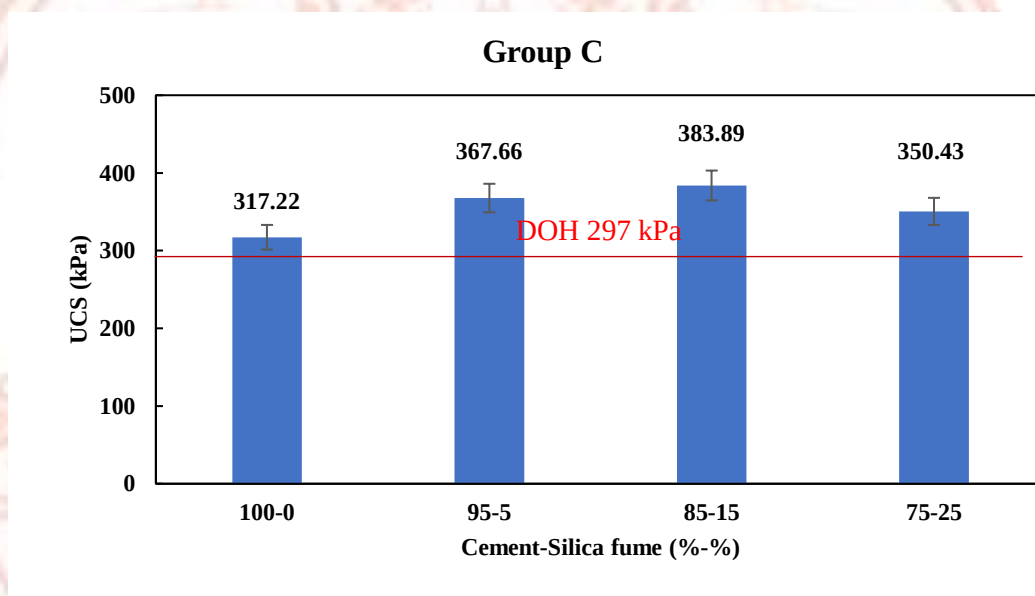
ภาพที่ 4-4 แสดงผลค่าการพัฒนาด้านความแข็งแรงของการตรวจสอบด้วยคลื่น V_s หลังจากบ่ม 28 วัน พบว่าความแข็งแรงของดินซีเมนต์ที่ผสมด้วยปริมาณน้ำตั้งแต่ 0.25% ถึง 1.00% ความแข็งแรง ถูกพัฒนาสูงขึ้นตามปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นโดยพบว่าที่ปริมาณน้ำ 0.75-1.00% ให้ค่า V_s สูงสุดซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบ UCS.



ภาพที่ 4-4 ผลการทดสอบ V_s กับปริมาณการเติมน้ำ W/C

4.5 ผลการทดสอบ UCS และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย Silica fume

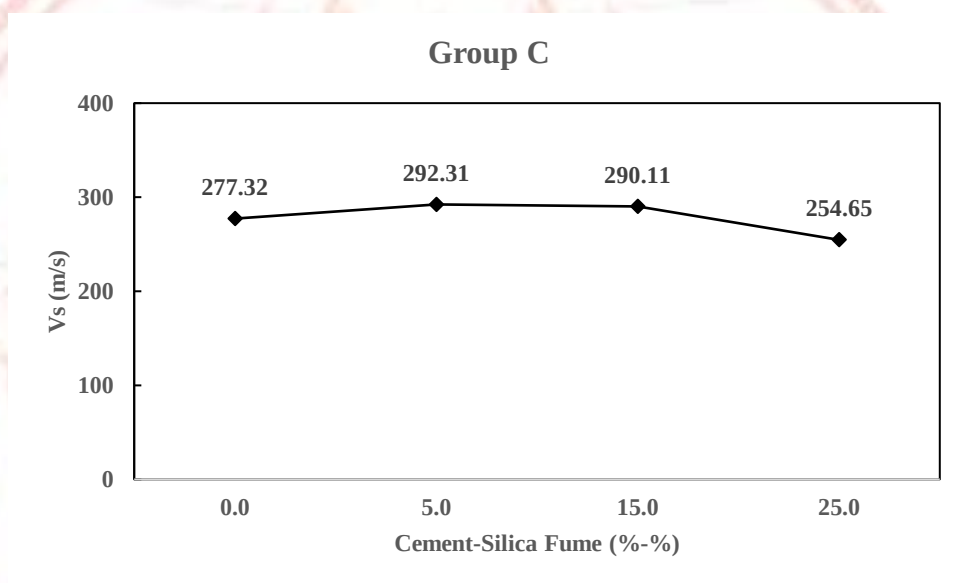
ภาพที่ 4-5 แสดงผลกระทบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุมในอัตราส่วน 0%, 5%, 15% และ 25% โดยทดสอบที่ 28 วัน พบว่าการเติมซิลิกาฟุมแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) สูงขึ้น มากกว่าการมาเติม ซิลิกาฟุม โดยอัตราส่วนการแทนที่ที่เหมาะสมที่สุดคือ 15%



ภาพที่ 4-5 ผลการทดสอบ UCS และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย Silica fume

4.6 ผลการทดสอบ V_s กับการแทนที่ด้วย Silica fume

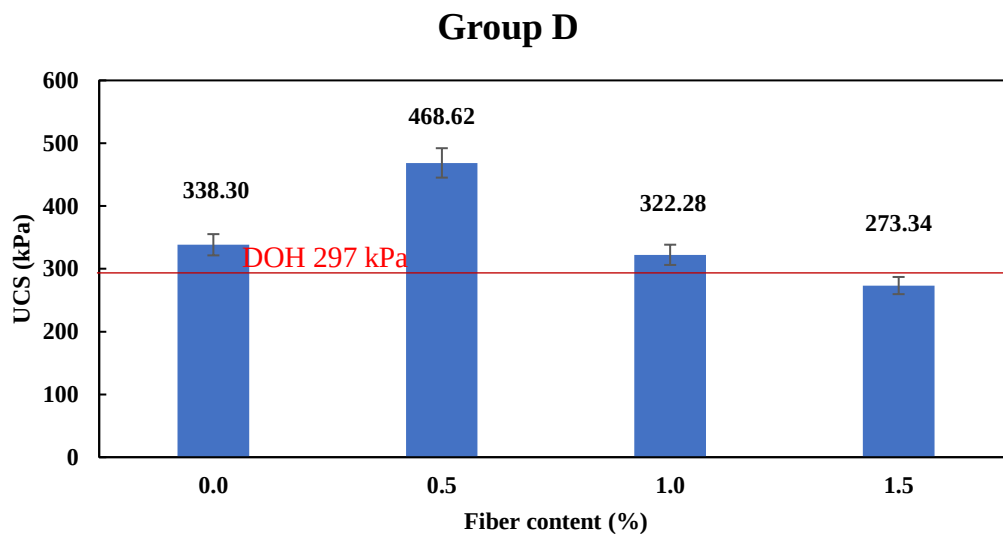
ภาพที่ 4-6 แสดงผลค่าการพัฒนาด้านความแข็งแรงของการตรวจสอบด้วยคลื่น V_s หลังจากบ่ม 28 วัน พบว่าความแข็งแรงของดินซีเมนต์ที่มีการแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ้ง ที่ 5% และ 15% ให้ค่า V_s สูงสุด ที่ 292.31 และ 290.11 m/s และลดลงหลังจากเติมซิลิกาฟุ้งเพิ่มขึ้น ซึ่งใกล้เคียงการทดสอบจาก UCS.



ภาพที่ 4-6 ผลการทดสอบ V_s กับการแทนที่ด้วย Silica fume

4.7 ผลการทดสอบ UCS และการเติมเส้นใยจากขนไก่

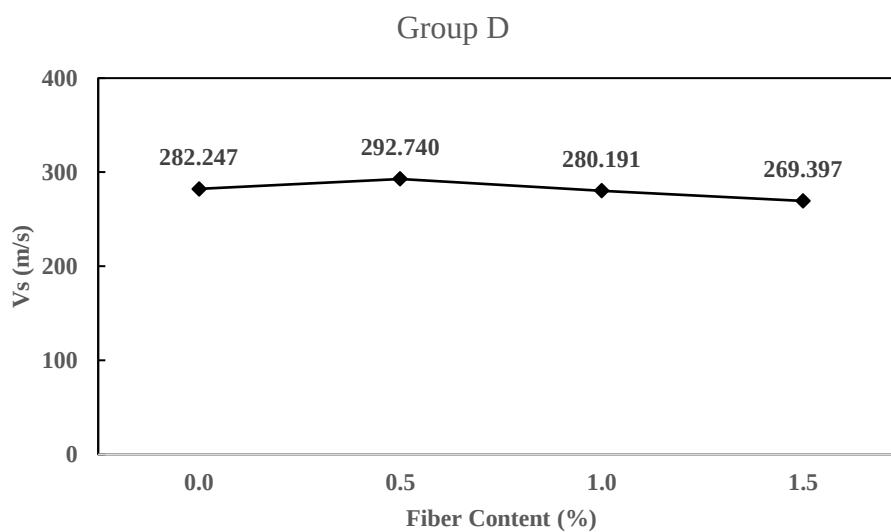
ภาพที่ 4-7 แสดงผลกระทบของปริมาณเส้นใยขนไก่ที่เติมลงในดิน-ซีเมนต์กรุงเทพฯ โดยปริมาณเส้นใยขนไก่ที่ใช้มีค่าตั้งแต่ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5% พบว่าผลค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) สูงสุดที่ 468.62 kPa เมื่อเติมเส้นใยขนไก่ในอัตรา 0.5% และแนะนำให้เติมเส้นใยขนไก่ไม่เกิน 1.0% มิฉะนั้นค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) อาจไม่ผ่านมาตรฐานของกรมทางหลวง (DOH)



ภาพที่ 4-7 ผลการทดสอบ UCS และการเติมเส้นใยจากขนไก่

4.8 ผลการทดสอบ V_s กับการเติมเส้นใยขนไก่

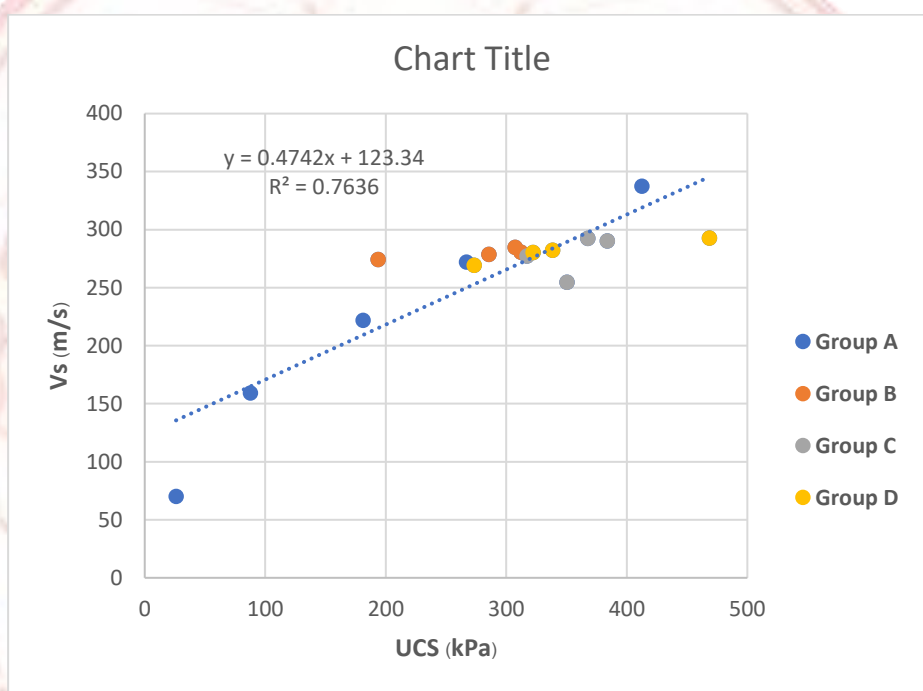
ภาพที่ 4-8 แสดงผลค่าการพัฒนาด้านความแข็งแรงของการตรวจสอบด้วยคลื่น V_s หลังจากบ่ม 28 วัน พบว่าความแข็งแรงของดินซีเมนต์ที่มีการเติมเส้นใยขนไก่ ที่ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5% ให้ค่า V_s สูงสุด ที่ 292.74 m/s และลดลงหลังจากเติมเส้นใยขนไก่เพิ่มขึ้น ซึ่งใกล้เคียงการทดสอบ จาก UCS.



ภาพที่ 4-8 ผลการทดสอบ V_s กับการเติมเส้นใยขนไก่

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับความเร็วคลื่นเฉือน

จากภาพที่ 4-9 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว (UCS) กับความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave, V_s) เมื่อสร้างเส้นแนวโน้มจากการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงอัดมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเร็วคลื่นเฉือน โดยพบวากำลังรับแรงอัดจึงใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และ V_s

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษานี้ ดินเหนียวกรุงเทพฯ ถูกผสมในสัดส่วนต่าง ๆ กับปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และชนไก่ โดยกำหนดอัตราส่วนปูนซีเมนต์ไว้ที่ 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยน้ำหนักแห้ง กำหนดความเข้มข้นของซิลิกาฟูมที่ 0%, 5%, 15% และ 25% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และกำหนดอัตราส่วนชนไก่ตามปริมาตรไว้ที่ 0%, 0.5%, 1.0% และ 1.5% ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างคือ 28 วัน ใช้วิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) ในการประเมินผล สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 ข้อสรุปการใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม (Group A)

จากการทดลองแนะนำให้ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC) ที่ 8% สำหรับดิน-ซีเมนต์กรุงเทพฯ โดยปริมาณ OPC นี้เพียงพอที่จะผ่านมาตรฐานกรมทางหลวง (DOH) ที่ 297 kPa

5.2 ข้อสรุปการใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม (Group B)

จากการทดลองควรกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) ควรอยู่ที่ 0.75-1.00 เพื่อให้เพียงพอต่อปฏิกิริยาการเกิดไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และความต้องการน้ำที่เหมาะสมสำหรับการผสมดิน-ซีเมนต์ โดย Miura และคณะ (2001) ระบุว่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 1:1 เหมาะสมกับวิธีการผสมเปียกของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นกรณีที่เกี่ยวข้องในการศึกษาครั้งนี้

5.3 ข้อสรุปการใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์กับซิลิกาฟูมที่เหมาะสม (Group C)

จากการทดลองการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมในอัตรา 15% พบว่าทำให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) สูงสุด การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของดิน-ซีเมนต์ โดยการทดสอบเผยว่าการแทนที่ในอัตรานี้ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด เมื่อพิจารณา

เปรียบเทียบกับ Ghavami และคณะ (2021) ในการใช้นาโนซิลิกาและซิลิกาฟุ่มต่อคุณลักษณะของดินเหนียวที่ผ่านการทำให้เสถียรด้วยฝุ่นปูนซีเมนต์จากเตาเผา พบว่าปริมาณของนาโนซิลิกา 1% และซิลิกาฟุ่ม 15% ตามน้ำหนักดินแห้งเป็นปริมาณที่เหมาะสมของสารกระตุ้นที่ใช้เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางธรณีเทคนิคของดิน ซึ่งปริมาณการใช้ ซิลิกาฟุ่มในดินที่ 15% เป็นปริมาณที่ใกล้เคียงกัน.

5.4 ข้อสรุปการใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์กับเส้นใยชนไก่ที่เหมาะสม (Group D)

จากการทดลองแนะนำให้ใช้เส้นใยชนไก่ในอัตรา 0.5% การเพิ่มปริมาณเส้นใยชนไก่ในดิน-ซีเมนต์พบว่าช่วยให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่น ๆ ในชุดการทดลองนี้ โดย Zerrouk, Kadri และ Bougara (2022) ใช้ซีเมนต์ 10% เพื่อทำให้ดินเหนียวที่ผ่านการบำบัดมีเสถียรภาพหลักฐานเพิ่มเติมที่แสดงว่าคุณภาพเชิงกลของดินเหนียวได้รับการปรับปรุงคือเส้นใยชนไก่ที่เพิ่มขึ้น 2% ซึ่งอาจช่วยแก้ปัญหาทางเทคนิคที่น่าสนใจสำหรับผู้ที่มีดินอ่อนได้

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

ตระกูล จีระ. อิทธิพลเนื่องจากอายุที่เพิ่มขึ้นของดินผสมซีเมนต์ โดยการทดสอบเป็นเตอร์อิลีเมนต์.

สารนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2554

ธเนศ เกษกลิ่น. ขบวนการไปโอซีเมนต์เพื่อการปรับปรุงคุณภาพดิน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร

มหาบัณฑิตสาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2556

ทงศักดิ์ ออกผล. การศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านการที่บน้ำของดินเหนียวปากแม่น้ำ. ปริญญา

นิพนธ์วิศวกรรมบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา,

2561

พิธาน ไพโรจน์. เพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น วารสารวิชาการคณะ

เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 มกราคม 2562 –

มิถุนายน 2562

วฤธ รัตนรุ่งโรจน์ และคณะ. การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยปูนซีเมนต์ผสมผง

ตะกั่วเหล็กและเถ้าชีวมวล จากโรงงานผลิตกระดาษ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา

แห่งชาติ ครั้งที่ 25 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กรุงเทพมหานคร, 2563

อักรชัย เรืองแสงทอง. การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าซัง

ข้าวโพดและผงหินปูนขาว. วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนคร

เหนือ, 2563

กัญจน์ สลึงค์ และคณะ. การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยมาตรฐานด้วยวัสดุผสมซีเมนต์-โพลีเมอร์.

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จังหวัดชลบุรี, 2563

ภาษาอังกฤษ

- [1]. Pochalard, S., Wungsumpow, C., & Piriyaikul, K. (2025). 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*, 12(2), 279-292.
- [2]. Pochalard, S., Wungsumpow, C., & Piriyaikul, K. (2024, May). Enhancement on compressive strength of Bangkok clay cement using novel high-strength polyethylene fibers. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1335, No. 1, p. 012008). IOP Publishing.
- [3]. Prathungthai, P., Wungsumpow, C., Pochalard, S., & Piriyaikul, K. (2024, February). Improving Mechanical Behavior of Compacted Cement Sand Mixed with Glass Powder from Glass Industry and Glass Fiber for Green Construction Materials. In *International Conference on Eco-friendly Fibers and Polymeric Materials* (pp. 67-83). Singapore: Springer Nature Singapore.
- [4]. Piriyaikul, K., 2013. Application of the nondestructive testing method to determine the Gmax of Bangkok clay. *Applied Mechanics and Materials*, 418, pp.157-160.

- [5]. Petcherdchoo, A., Pochalard, S., & Piriyaikul, K. (2023). 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*, 18, e02040.
- [6]. Tajdini, M., Bargi, M. M., & Rasouli Ghahroudi, O. (2021). An Investigation on the Effects of Adding Nano-Sio₂ Particles and Silica Fume with Different Specific Surface Areas on the Physical and Mechanical Parameters of Soil-Cement Materials. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 54(1), 93-109.
- [7]. Shooshpasha, I., Hasanzadeh, A., & Kharun, M. (2020, November). Effect of silica fume on the ultrasonic pulse velocity of cemented sand. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1687, No. 1, p. 012017). IOP Publishing.
- [8]. Al-Gharbawi, A. S., Najemalden, A. M., & Fattah, M. Y. (2022). Expansive soil stabilization with lime, cement, and silica fume. *Applied Sciences*, 13(1), 436.
- [9]. Ghavami, S., Naseri, H., Jahanbakhsh, H., & Nejad, F. M. (2021). The impacts of nano-SiO₂ and silica fume on cement kiln dust treated soil as a sustainable cement-free stabilizer. *Construction and Building Materials*, 285, 122918.
- [10]. Siengchin, S. (2023). A review on lightweight materials for defence applications: Present and future developments. *Defence Technology*, 24, 1-17.
- [11]. Suksiripattanapong, C., Sakdinakorn, R., Tiyaangthong, S., Wonglakorn, N., Phetchuay, C., & Tabyang, W. (2022). Properties of soft Bangkok clay stabilized

with cement and fly ash geopolymer for deep mixing application. Case Studies in Construction Materials, 16, e01081.

[12]. Bozyigit, I., Bulbul, F., Alp, C., & Altun, S. (2021). Effect of randomly distributed pet bottle strips on mechanical properties of cement stabilized kaolin clay. Engineering Science and Technology, an International Journal, 24(5), 1090-1101.

[13]. Bargi, M. M., Rasouli Ghahroudi, O., & Tajdini, M. (2021). An investigation on the effects of adding nano-SiO₂ particles and silica fume with different specific surface areas on the physical and mechanical parameters of soil-cement materials. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 51(1), 93-109.

[14]. Ghavami, S., Naseri, H., Jahanbakhsh, H., & Nejad, F. M. (2021). The impacts of nano-SiO₂ and silica fume on cement kiln dust treated soil as a sustainable cement-free stabilizer. *Construction and Building Materials*, 285, 122918.

[15]. Koohmishi, M., & Palassi, M. (2022). Mechanical properties of clayey soil reinforced with PET considering the influence of lime-stabilization. *Transportation Geotechnics*, 33, 100726.

[16]. Kurien, R.A., Santhosh, A., Paul, D., Kurup, G.B., Reji, G.S. and Selvaraj, D.P., 2021.

A study on recent developments in jute, cotton, coir, silk and abaca fiber-reinforced composites. *Advances in Materials Processing and Manufacturing Applications: Proceedings of iCADMA 2020*, pp.375-384.

[17]. Kurien, R.A., Santhosh, A., Paul, D., Kurup, G.B. and Reji, G.S., 2021. A review on

recent developments in kenaf, sisal, pineapple, bamboo and banana fiber-reinforced composites. *Advances in Materials Processing and Manufacturing Applications: Proceedings of iCADMA 2020*, pp.301-310.

- [18]. Kurien, R.A., Biju, A., Raj, A.K., Chacko, A., Joseph, B., Koshy, C.P. and Paul, C., 2023. Comparative Mechanical Properties of Duck Feather–Jute Fiber Reinforced Hybrid Composites. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 76(9), pp.2575-2580.
- [19]. Kurien, R.A., Biju, A., Raj, K.A., Chacko, A., Joseph, B. and Koshy, C.P., 2022. Chicken feather fiber reinforced composites for sustainable applications. *Materials Today: Proceedings*, 58, pp.862-866.
- [20]. Zerrouk, A., Kadri, A., & Bougara, A. (2022). Improving properties of modified clay with cement containing random chicken feather fibers. *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*, 9(2), 237-249.
- [21]. Prem, P. R., Ambily, P. S., Vankudothu, B., & Bharatkumar, B. H. (2020). Sustainable production of high performance concrete. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. Oxford: Elsevier, 527-36.
- [22]. Panesar, D. K., & Zhang, R. (2020). Performance comparison of cement replacing materials in concrete: Limestone fillers and supplementary cementing materials–A review. *Construction and building materials*, 251, 118866.
- [23]. ASTM D1633-17, Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders.

[24]. ACI 230.1R- 09, American Concrete Institute, Report on Soil Cement.

[25]. ACI 211.1-91 Standard Practice For Selecting Proportions For Normal, Heavyweight,
and Mass Concrete

This is Mendeley biography



ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบความเร็วคลื่นและโมดูลัสเฉือนของดินผสมซีเมนต์และชนไก่



ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบความเร็วคลื่นและโมดูลัสเฉือน โดยมีอัตราส่วนซีเมนต์ไม่เท่ากันและอัตราส่วน W/C เท่ากัน

Group A	Cement (%)	W/C	UCS (kPa)	Vs (m/s)	Curing Time (day)
A1	2	0.50	25.96	70.08	28
A2	4	0.50	87.80	159.26	28
A3	6	0.50	181.31	221.93	28
A4	8	0.50	317.22	271.96	28
A5	10	0.50	412.43	337.27	28

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบความเร็วคลื่นและโมดูลัสเฉือน โดยมีอัตราส่วนซีเมนต์เท่ากันและอัตราส่วน W/C ไม่เท่ากัน

Group B	Cement (%)	W/C	UCS (kPa)	Vs (m/s)	Curing Time (day)
B1	8	0.25	193.53	274.35	28
B2	8	0.50	285.59	278.63	28
B3	8	0.75	307.28	284.74	28
B4	8	1.00	312.22	280.58	28

ตารางที่ ก-3 ผลการทดสอบความเร็วคลื่นและโมดูลัสเฉือน โดยมีอัตราส่วนซีเมนต์เท่ากันและอัตราส่วน W/C เท่ากัน แต่อัตราส่วนซิลิกาฟุ่มไม่เท่ากัน

Group C	Cement (%)	W/C	Silica Fume %	UCS (kPa)	Vs (m/s)	Curing Time (day)
C1	8	0.50	0	317.22	277.32	28
C2	8	0.50	5	367.66	292.31	28
C3	8	0.50	15	383.89	290.11	28
C4	8	0.50	25	350.43	254.65	28

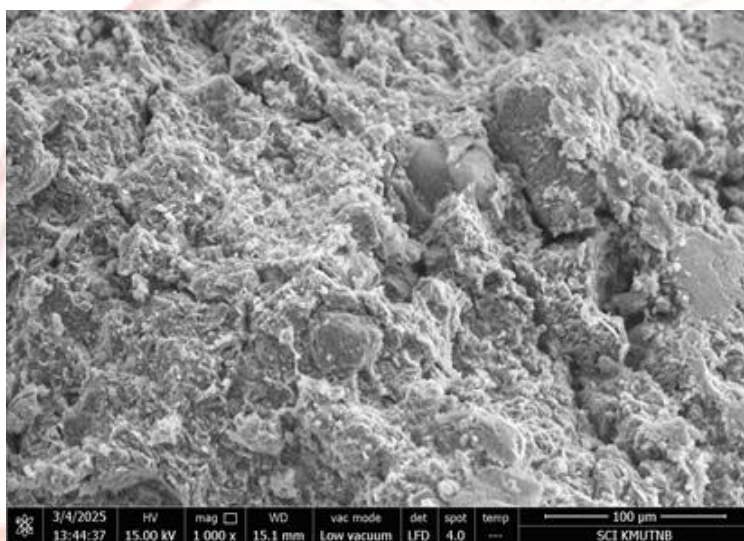
ตารางที่ ก-4 ผลการทดสอบความเร็วคลื่นและโมดูลัสเฉือน โดยมีอัตราส่วนซีเมนต์เท่ากันและ
อัตราส่วน W/C เท่ากัน แต่อัตราส่วนเส้นใยขนไก่ไม่เท่ากัน

Group D	Cement (%)	W/C	Fiber Content %	UCS (kPa)	Vs (m/s)	Curing Time (day)
D1	8	0.50	0.0	338.30	282.247	28
D2	8	0.50	0.5	468.621	292.740	28
D3	8	0.50	1.0	322.28	280.191	28
D4	8	0.50	1.5	273.34	269.397	28

ภาคผนวก ข

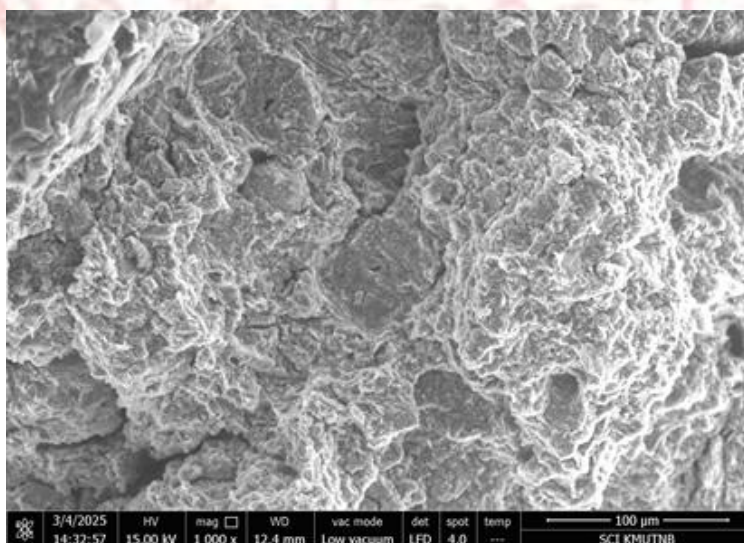
ภาพขยายของตัวอย่างการทดลอง

ภาพขยายตัวอย่างการทดลอง กลุ่ม A



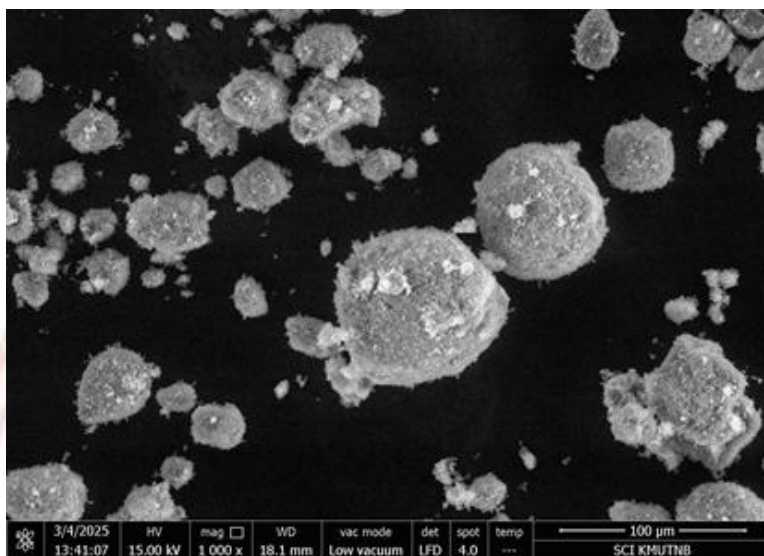
ภาพที่ ข-1 ภาพขยายตัวอย่างการทดลองปูนซีเมนต์ของ กลุ่ม A

ภาพขยายตัวอย่างการทดลอง กลุ่ม B



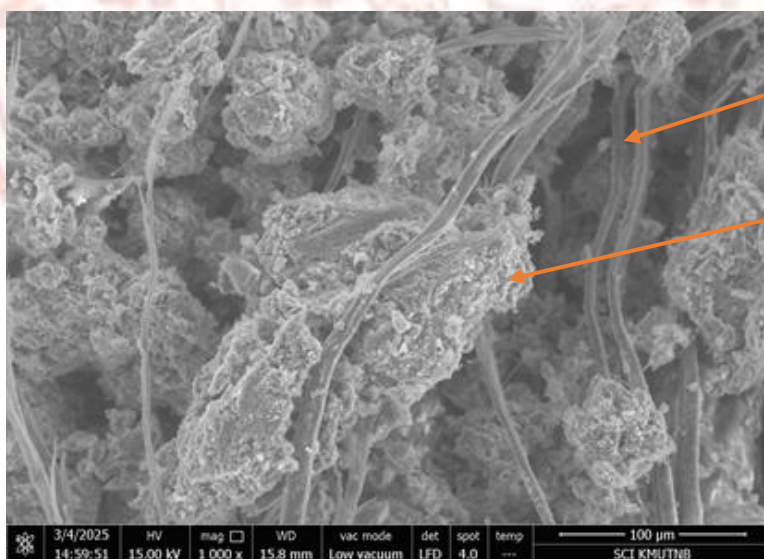
ภาพที่ ข-1 ภาพขยายตัวอย่างการทดลอง W/C ของ กลุ่ม B

ภาพขยายตัวอย่างการทดลอง กลุ่ม C



ภาพที่ ข-1 ภาพขยายตัวอย่างการทดลองซิลิกาฟุ้งของ กลุ่ม C

ภาพขยายตัวอย่างการทดลอง กลุ่ม D



ภาพที่ ข-1 ภาพขยายตัวอย่างการทดลองเส้นใยขนไก่ของ กลุ่ม D

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายกิตติ พรหมแสง
ชื่อการค้นคว้าอิสระ	การปรับปรุงกำลังอัดสำหรับดินดินเหนียวกรุงเทพมหานคร ผสมซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และเส้นใยขนไก่
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ประวัติ	ประวัติส่วนตัว เกิดเมื่อวันที่ 9 กรกฎาคม 2522 ปัจจุบันอาศัยอยู่บ้านเลขที่ 7/48 หมู่ 7 ถนนบางกรวย-ไทรน้อย ตำบลบางกรวย อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี 11130 ประวัติการศึกษา ปีการศึกษา 2559 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ประวัติการทำงาน ปี 2549 - ปัจจุบันทำงานที่มหาวิทยาลัยสวนดุสิต