

การศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์เพื่อการใช้งานร่วมกับเครื่องพิมพ์คอนกรีตสามมิติของบริษัท Vertico และระบบผสม Multimix3D กรณีศึกษาดินจังหวัดชัยภูมิ

AN INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF SOIL-CEMENT MADE FROM CHAIYAPHUM SOIL FOR USE WITH VERTICO'S 3D CONCRETE PRINTER AND THE MULTIMIX3D MIXING SYSTEM



ณภัทร อาริวัฒน์

การค้นคว้าอิสระฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาสถาปัตยกรรมเขตร้อน

คณะสถาปัตยกรรม ศิลปะและการออกแบบ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2568

KMITL-2025-AR-M-002-035

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AN INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF SOIL-CEMENT MADE FROM
CHAIYAPHUM SOIL FOR USE WITH VERTICO'S 3D CONCRETE PRINTER AND THE
MULTIMIX3D MIXING SYSTEM



AN INDEPENDENT STUDY SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ARCHITECTURE PROGRAM IN TROPICAL ARCHITECTURE
SCHOOL OF ARCHITECTURE, ART, AND DESIGN
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2025

KMITL-2025-AR-M-002-035

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2025

SCHOOL OF ARCHITECTURE, ART, AND DESIGN

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อการค้นคว้าอิสระ	การค้นคว้าอิสระการศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์เพื่อการใช้งานร่วมกับเครื่องพิมพ์คอนกรีตสามมิติของบริษัท Vertico และระบบผสมMultimix3D กรณีศึกษาดินจังหวัดชัยภูมิ
นักศึกษา	นาย ณภัทร อารีย์วัฒน์
รหัสประจำตัว	67026023
ปริญญา	ปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	สถาปัตยกรรมเขตร้อน
พ.ศ.	2568
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนสิณี อรรณวนิช

บทคัดย่อ

ปัจจุบันปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทวีความรุนแรงมากขึ้น อุตสาหกรรมก่อสร้างยังคงเป็นหนึ่งในแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกขนาดใหญ่ โดยเฉพาะจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุพื้นฐานของงานก่อสร้างทั่วโลก งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการใช้ทรัพยากรท้องถิ่นอย่าง “ดินทรายแดง” จากจังหวัดชัยภูมิ เพื่อพัฒนาเป็น “ดินซีเมนต์” สำหรับงานพิมพ์คอนกรีตสามมิติ (3D Concrete Printing) ร่วมกับระบบแขนกลพิมพ์ของบริษัท Vertico และระบบผสมอัตโนมัติ Multimix3D ซึ่งมีศักยภาพในการควบคุมอัตราส่วนผสมแบบเรียลไทม์และสนับสนุนการใช้วัสดุคาร์บอนต่ำ งานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองโดยแบ่งวัสดุออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ดินทรายแดงที่ผ่านการกรอง ดินทรายแดงที่ไม่ผ่านการกรอง และ มอร์ตาร์มาตรฐาน (ทรายผสมซีเมนต์ที่ผ่านการกรอง) ทุกกลุ่มใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และทำการทดสอบ 2 ด้าน ได้แก่ ความสามารถในการพิมพ์ (printability) ผ่านการไหลแผ่ (Flow Table) และการคงรูป (Buildability) รวมถึงกำลังอัด (compressive strength) ตามช่วงอายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า กลุ่มดินทรายแดงที่ผ่านการกรองมีค่าการไหลเฉลี่ย 135 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ และสามารถขึ้นรูปได้โดยไม่ยุบตัวเมื่อพิมพ์ซ้อนกัน 5 ชั้นติดต่อกัน ในขณะที่กลุ่มดินที่ไม่กรองมีค่าการไหลเฉลี่ยเพียง 105 มิลลิเมตร และเกิดการแผ่ตัวเกินมาตรฐานเมื่อพิมพ์ซ้อนกัน ในด้านกำลังอัด กลุ่มดินกรองให้ค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ 5.2 เมกะปาสกาล ณ อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มไม่กรองที่ได้เพียง 3.6 เมกะปาสกาล ส่วนมอร์ตาร์มาตรฐานให้ค่าเฉลี่ย 10.8 เมกะปาสกาล ซึ่งสูงสุดในบรรดากลุ่มที่ศึกษา สามารถสรุปได้ว่าการกรองดินก่อนนำไปผสมซีเมนต์มีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของดินซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งในด้านความสามารถในการไหลและกำลังรับแรงอัด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการใช้งานจริงกับเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ องค์ความรู้ที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาวัสดุก่อสร้างทางเลือกจากทรัพยากรในท้องถิ่น เพื่อลดการพึ่งพาปูนซีเมนต์ และสนับสนุนเป้าหมายด้านการก่อสร้างที่ยั่งยืนและการลดการปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emission) ในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Independent Study	An Investigation of the Properties of Soil-Cement Made from
Submit	Chaiyaphum Soil for Use with Vertico’s 3D Concrete Printer and the Multimix3D Mixing System
Student	Napat Arriyawat
Student ID	67026023
Degree	Master of Architecture
Program	Tropical Architecture
Year	2025
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Monsinee Attavanich

ABSTRACT

Climate change is becoming increasingly severe, and the construction industry remains one of the major sources of greenhouse gas emissions—particularly from the production of Portland cement, a fundamental material in global construction. This research investigates the use of a local resource, *red sandy soil* from Chaiyaphum Province, to develop *soil-cement* suitable for 3D Concrete Printing. The study incorporates the use of a robotic printing arm developed by Vertico and the Multimix3D automated mixing system, which enables real-time control of mix proportions and promotes the use of low-carbon materials. The experimental design categorizes materials into three groups: 1. filtered red sandy soil, 2. unfiltered red sandy soil, and (3) standard mortar (filtered sand mixed with cement). All groups use Type I Portland cement as the primary binder. The materials were evaluated based on two key properties: **printability** through *flow spread* (FlowTable test) and *buildability* as well as **compressive strength**, tested at curing ages of 1, 3, 7, and 28 days according to ASTM standards. Results show that the filtered red sandy soil group achieved an average flow spread of 135 mm, which falls within the optimal range for 3D printing and demonstrated good structural build-up, maintaining shape when printed in 5 continuous layers. In contrast, the unfiltered soil group had a lower average flow spread of 105 mm and exhibited excessive lateral spreading when

layered, compromising printability. In terms of compressive strength, the filtered soil group reached a maximum average of 5.2 MPa at 28 days, compared to 3.6 MPa for the unfiltered group. The standard mortar achieved the highest strength, averaging 10.8 MPa. These findings indicate that soil filtration has a direct impact on both the flowability and compressive strength of soil-cement mixtures two critical properties for 3D printing applications. The knowledge gained from this study can serve as a guideline for developing alternative construction materials from local resources, reducing dependence on conventional cement, and supporting the global goals for sustainable construction and Net Zero carbon emissions in the future.



กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนสิณี อรรถวานิช อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำอย่างใกล้ชิดตลอดระยะเวลาการดำเนินการวิจัย ด้วยความเมตตา ความรอบรู้ และความอดทนที่มอบให้มาโดยตลอด ถือเป็นแรงสนับสนุนที่สำคัญยิ่งในการพัฒนางานวิจัยฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วง ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชุม คำพุ่ม ที่กรุณาให้ข้อมูลชุดดินจากจังหวัดชัยภูมิ อันเป็นทรัพยากรพื้นฐานที่มีคุณค่าต่อการศึกษาวิจัยอย่างยิ่ง ทั้งยังให้คำแนะนำในเชิงวิชาการที่มีส่วนช่วยในการกำหนดแนวทางวิจัยและวิเคราะห์ผลได้อย่างชัดเจน ขอขอบคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ทุกท่านที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงและพัฒนา งานวิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณ บริษัท Vertico และระบบ Multimix3D สำหรับข้อมูลด้านเทคนิค และการสนับสนุนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการทดลองครั้งนี้ สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ครอบครัว เพื่อน และผู้ร่วมงาน ทุกคน ที่คอยเป็นกำลังใจ และแรงสนับสนุนทั้งในด้านจิตใจและการปฏิบัติการณ์ตลอดช่วงเวลาของการศึกษาค้นคว้า

นาย ฌภัทร อารีย์วัฒน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 คำถามการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและกรอบแนวคิด.....	4
2.1 นิยามศัพท์.....	4
2.2 ดิน.....	5
2.2.1 ดิน (Soil).....	5
2.2.2 การจำแนกดินในงานวิศวกรรม.....	7
2.2.3 การจำแนกดินตามระบบ Unified Soil Classification (USCS).....	10
2.3 ดินซีเมนต์.....	12
2.3.1 ดินซีเมนต์ (Soil Cement).....	12
2.3.2 พฤติกรรมทางกลของดินซีเมนต์.....	14
2.4 เทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 ระบบเครื่องพิมพ์ Vertico.....	16
2.4.2 ระบบผสมวัสดุ Multimix3D.....	17
2.4.3 การกำหนดพารามิเตอร์สำหรับการพิมพ์	18
2.5 งานวิจัยเกี่ยวข้อง	19
2.5.1 งานวิจัยเกี่ยวกับดินซีเมนต์และวัสดุท้องถิ่น	19
2.5.2 งานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีต.....	22
2.5.3 ตารางเปรียบเทียบการทดสอบงานวิจัย.....	23
2.6 ดินทรายแดงจังหวัดชัยภูมิ.....	28
2.7 กรอบแนวคิด.....	31
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	32
3.1.1 เครื่องมือจำแนกดิน.....	32
3.1.2 เครื่องมือทดสอบ Flow table การทดสอบการไหลแผ่.....	36
3.1.3 เครื่องมือทดสอบการรับแรงอัด.....	41
3.2 การออกแบบการทดลอง.....	43
3.2.1. จำแนกดิน.....	43
3.2.2. ทดสอบ Flow table การทดสอบการไหลแผ่.....	48
3.2.3. ทดสอบการรับแรงอัด	49
3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	50
3.4.1. จำแนกดิน.....	50
3.4.2. ทดสอบ Flow table การทดสอบการไหลแผ่.....	53
3.4.3. ทดสอบการรับแรงอัด	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล.....	56
4.1 ผลการจำแนกดิน	56
4.2 ผลการทดสอบการไหลผ่าน	59
4.2.1 ดินซีเมนต์แบบกรอง	59
4.2.2 ดินซีเมนต์แบบไม่กรอง	60
4.2.3 มอดาร์	61
4.3 ผลการทดสอบแรงอัด.....	62
4.3.2 ดินซีเมนต์แบบไม่กรอง	63
4.3.3 มอดาร์.....	64
4.4 วิเคราะห์ข้อมูล.....	65
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	66
5.1 สรุปผลการวิจัย	66
5.2 อภิปรายผล	67
5.3 ข้อเสนอแนะ	68
บรรณานุกรม.....	69
ประวัติผู้เขียน.....	75

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ช่วงขนาดอนุภาคที่เหมาะสมสำหรับนำมาทำดินซีเมนต์.....	11
2.2 แสดงค่าในการตั้งพารามิเตอร์.....	18
2.3 เปรียบเทียบวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยดินซีเมนต์.....	20
2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติดินซีเมนต์ที่ศึกษาในแต่ละงานวิจัย.....	21
2.5 คุณสมบัติของวัสดุจากแต่ละงานวิจัย.....	22
2.6 เปรียบเทียบการทดสอบงานวิจัยวัสดุ.....	23
2.7 เปรียบเทียบการทดสอบงานวิจัยเครื่องพิมพ์3มิติ.....	25
4.1 Flowtable Soil(Sieve).....	59
4. 2 Flowtable Soil(Non-Sieve).....	60
4.3 Flowtable Mortar(Sieve).....	61
4.4 Compressive Soil(Sieve).....	62
4.5 Compressive Soil(Non-Sieve).....	63
4.6 Compressive Mortar(Sieve).....	64
4.7กราฟเปรียบเทียบการไหลแผ่.....	65
4.8 กราฟเปรียบเทียบการแรงอัด.....	65

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กรอบแนวคิด	31
3.1 ตะแกรงร่อน.....	32
3.2 เครื่องสั่นตะแกรง	33
3.3 แม่พิมพ์สำหรับใส่ตัวอย่างดิน.....	33
3.4 เครื่องชั่ง	34
3.5 เครื่องมือ Casagrande	34
3.6 เครื่องมือสำหรับทดสอบ Plastic Limit.....	35
3.7 จานหตตัว.....	35
3.8 โตะกระจายตัว.....	36
3.9 แม่พิมพ์รูปทรงกรวยตัด	37
3.10 เกรียงเหล็ก.....	37
3.11 นาฬิกาจับเวลา.....	38
3.12 เครื่องผสมมอร์ตาร์.....	38
3.13 ไม้บรรทัด / เวอร์เนียดิจิทัล.....	39
3.14 ภาชนะผสม	39
3.15 ผ้าเช็ดโตะ / แปรงเล็ก.....	40
3.16 เครื่องทดสอบการอัด.....	41
3.17 แม่พิมพ์สำหรับตัวอย่าง.....	41
3.18 เครื่องชั่ง.....	42
3.19 ตัวอย่างตารางเก็บข้อมูล SIEVE ANALYSIS OF FINE AGGREGATE.....	50
3.20 ตัวอย่างตารางพล็อตกราฟ SIEVE ANALYSIS OF FINE AGGREGATE.....	50
3.21 ตัวอย่างตารางเปรียบเทียบข้อมูล SIEVE ANALYSIS OF FINE AGGREGATE.....	51
3.22 ตัวอย่างตารางเปรียบเทียบข้อมูล MATERIALS FINER THAN 75 μm IN AGGREGATE BY WASHING OF FINE AGGREGATE.....	51
3.23 ตัวอย่างตารางเปรียบเทียบข้อมูล ATTERBERG LIMITS TEST	52
3.24 ตารางข้อมูลผลการทดสอบแรงอัด.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

3.25	สรุปข้อมูลเป็นกราฟเส้น	53
3.26	ตัวอย่างตารางเก็บข้อมูลผลทดสอบการรับแรงอัด	54
3.27	ตัวอย่างกราฟข้อมูลเชิงเส้น	55
4.1	ผลการจำแนกดิน.....	56
4.2	ผลการทดสอบผ่านผ่านตะแกรงเบอร์ 200	57
4.3	ค่าขีดจำกัดของดิน (Liquid Limit และ Plastic Limit).....	58



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมก่อสร้างยังคงเป็นหนึ่งในภาคส่วนที่ปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในระดับสูง โดยเฉพาะจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุก่อสร้างหลักของโลก (Scrivener et al., 2018) การลดการพึ่งพาปูนซีเมนต์จึงเป็นแนวทางสำคัญในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่สนับสนุนการก่อสร้างอย่างยั่งยืน หนึ่งในนั้นคือเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ (3D Concrete Printing) เนื่องจากความก้าวหน้าของอุตสาหกรรมโครงสร้างพื้นฐานได้มี การประยุกต์โดยการนำเทคโนโลยีมาใช้ในการก่อสร้างมากขึ้น ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ กำลังเป็น สิ่งหนึ่งที่น่าสนใจมากยิ่งขึ้นในปัจจุบัน โดยการศึกษาการพัฒนาของ เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เกิดขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 จนถึงปัจจุบัน ในช่วงปี พ.ศ. 2568 นั้นมีแนวโน้มในการพัฒนาที่เพิ่มมากขึ้นเป็น สองเท่า เมื่อเทียบกับช่วงที่ผ่านมา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีการ พิมพ์ 3 มิติเริ่มมีการพัฒนา และมีการวิจัยในการนำวิธีก่อสร้างแบบ ดั้งเดิมมาประยุกต์ใช้ในการผลิตโครงสร้างของคอนกรีตโดยใช้ เทคโนโลยีการพิมพ์ ซึ่งมีข้อได้เปรียบในด้านการลดการใช้แบบหล่อ ลดของเสียจากกระบวนการผลิต และเพิ่มอิสระในการออกแบบโครงสร้าง บริษัท Vertico จากประเทศเนเธอร์แลนด์นับเป็นผู้นำในการพัฒนา เทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ โดยใช้ระบบแขนกลควบคุมการพิมพ์ร่วมกับระบบผสมอัตโนมัติ Multimix3D ซึ่งสามารถปรับอัตราส่วนผสมของวัสดุแบบเรียลไทม์ เพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุพิมพ์ และเปิดโอกาสให้สามารถใช้วัสดุท้องถิ่นหรือวัสดุทางเลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในประเทศไทย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยหน่วยวิจัยวัสดุทางเลือกและกระบวนการก่อสร้าง ได้ดำเนินการศึกษาการขึ้นรูปวัสดุด้วยเทคโนโลยีดังกล่าว โดยมุ่งเน้นการนำ “ดินซีเมนต์” มาเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ ด้วยคุณสมบัติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม วัสดุดังกล่าว จัดเป็นวัสดุคาร์บอนต่ำ ซึ่งสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ อันเป็นแหล่งปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ที่สำคัญในกระบวนการก่อสร้าง (Habert et al., 2020) อีกทั้งยังมีคุณค่าด้าน สุนทรียภาพและความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในเชิงสถาปัตยกรรม หนึ่งในวัสดุท้องถิ่นที่มีศักยภาพสูง ในการนำมาพัฒนาเป็นดินซีเมนต์สำหรับงานพิมพ์สามมิติ คือ “ดินทรายแดง” ซึ่งพบได้อย่างแพร่หลายใน จังหวัดชัยภูมิ โดยเป็นดินที่มีลักษณะเนื้อหยาบประกอบด้วยทรายและดินเหนียวผสมกัน ดินชนิดนี้เคย ได้รับการศึกษาเบื้องต้นภายใต้โครงการวิจัยของสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ซึ่งพบว่ามีความสามารถในการขึ้นรูปและให้ค่าความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ที่น่าสนใจ (สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ, 2021)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยฉบับนี้จึงเป็นการต่อยอดจากกรณีศึกษาดังกล่าว โดยมุ่งเน้นการประเมินคุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินทรายแดงซึ่งผ่านการคัดเลือกตามปริมาณอินทรีย์วัตถุที่เหมาะสม แล้วนำมาผสมกับซีเมนต์ในส่วนต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบคุณลักษณะสำคัญทั้งในด้านความสามารถในการพิมพ์ (printability) และกำลังอัด (compressive strength) ซึ่งเป็นสมรรถนะที่จำเป็นสำหรับการใช้งานจริง ทั้งนี้ ดินทรายแดงมีคุณสมบัติทางกายภาพที่อาจแปรเปลี่ยนได้ตามแหล่งที่มา โดยเฉพาะในแง่ของมวลละเอียดและองค์ประกอบภายใน การเตรียมวัสดุจึงเป็นกระบวนการสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของดินซีเมนต์ที่ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การกรองหรือคัดขนาดอนุภาค ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการไหลของวัสดุผ่านหัวฉีดของเครื่องพิมพ์แบบอัตโนมัติ

ด้วยเหตุนี้การศึกษาในครั้งนี้จึงศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์จากดินทรายแดงจากชัยภูมิ เพื่อประเมินความเหมาะสมของแต่ละวัสดุในการใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติของบริษัท Vertico และระบบผสม Multimix3D ซึ่งมีความสามารถในการควบคุมสัดส่วนวัสดุอย่างแม่นยำ และสามารถพิมพ์โครงสร้างที่ซับซ้อนได้โดยไม่ต้องใช้แบบหล่อ ผลการทดลองที่ได้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานสำหรับการพัฒนาวัสดุท้องถิ่นให้สามารถใช้เป็นวัสดุก่อสร้างทางเลือกในระบบพิมพ์คอนกรีตสามมิติ โดยมุ่งตอบสนองต่อแนวทางการก่อสร้างแบบยั่งยืน และเป้าหมายการลดการปล่อยคาร์บอนในอนาคต (United Nations Environment Programme, 2020)

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์จากดินชัยภูมิในการใช้งานร่วมกับระบบพิมพ์คอนกรีตสามมิติของบริษัท Vertico ร่วมกับระบบ Multimix3D

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ใช้ดินทรายแดงจากจังหวัดชัยภูมิเป็นวัสดุหลักในการทำการศึกษา

1.3.2 ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติของบริษัท Vertico และระบบผสม Multimix3D เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 คำถามการวิจัย

ดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินทรายแดงสามารถใช้งานกับเครื่องพิมพ์คอนกรีตสามมิติได้หรือไม่และควรมีคุณสมบัติอย่างไร

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

กระบวนการในการนำดินมาจัดทำดินซีเมนต์เพื่อการใช้งานกับเครื่องพิมพ์สามมิติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมและกรอบแนวคิด

2.1 นิยามศัพท์

เครื่องพิมพ์คอนกรีตสามมิติ (3D Concrete Printer) การพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ หรือเรียกง่าย ๆ ว่าการพิมพ์คอนกรีต หมายถึงกระบวนการผลิตแบบดิจิทัลสำหรับวัสดุประสาน โดยอาศัยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติที่แตกต่างกันหลายเทคโนโลยี คอนกรีตที่พิมพ์ 3 มิติช่วยลดความจำเป็นในการใช้แบบหล่อ ลดการสูญเสียวัสดุ และทำให้โครงสร้างที่ซับซ้อนมีอิสระทางเรขาคณิตมากขึ้น ด้วยการพัฒนาล่าสุดในด้านการออกแบบส่วนผสมและเทคโนโลยีการพิมพ์ (Brick-laying machine, published 1967)

ระบบผสมวัสดุ (Mixing System / Multimix3D) ระบบการผสมวัสดุแบบต่อเนื่อง เช่น Multimix3D เป็นเทคโนโลยีที่ควบคุมการจ่ายและการผสมองค์ประกอบของวัสดุอย่างแม่นยำ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานด้านการพิมพ์คอนกรีตสามมิติที่ต้องการคุณสมบัติวัสดุสม่ำเสมอ (Multimix3D Technical Manual, 2023)

เทคนิคการขึ้นรูปชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer Fabrication) เป็นกระบวนการผลิตที่สร้างวัตถุจากข้อมูล 3 มิติด้วยการเติมวัสดุทีละชั้น เริ่มจากฐานไปยังยอดตามรูปทรงที่กำหนด โดยวิธีนี้ใช้กันแพร่หลายในเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (Gibson et al., 2015)

ดินซีเมนต์ (Soil-Cement) วัสดุก่อสร้างที่ได้จากการผสมดินธรรมชาติกับปูนซีเมนต์และน้ำ แล้วบดอัดให้แน่น เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของดินด้วยปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นที่นิยมและมีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายและการผสมซีเมนต์ลงไปดินจะช่วยทำให้คุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering properties) ของดินให้ดีขึ้น ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงต่อแรงอัดได้ดี เหมาะสำหรับงานฐานรากและงานถนน (กรมชลประทาน,2558;กรมทางหลวง, 2562)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) คือ ปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่งที่น่าิยมใช้แพร่หลายทั่วโลกในงานก่อสร้าง นับเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตคอนกรีต ปูนมอร์ตาร์ และปูนสูตรพิเศษประเภทต่างๆ มีส่วนผสมหลัก คือ หินปูน หินดินดาน ดินลูกรัง และทราย รวมถึงการเพิ่มสารอื่นๆ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของปูนซีเมนต์ เช่น ยิปซัม สารปอซโซลาน สารลดน้ำ เป็นต้น (SCG Home, 2566)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมาคม ASTM (American Society for Testing and Materials) เอเอสทีเอ็ม (ASTM International ในชื่อเดิมว่า American Society for Testing and Materials) เป็น สมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่กำหนด และจัดทำมาตรฐาน(การทดสอบ และผลิต) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ และเป็นที่ยอมรับทั่วโลก สมาคม (hongmat, 2023)

การทดสอบการกระจายขนาดอนุภาค (Sieve Analysis) Sieve analysis คือ วิธีการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคของแข็งหรือความละเอียด (fineness) โดยการร่อนผ่านของแข็งที่ทราบน้ำหนักไปบนชุดตะแกรงทดสอบ (test sieves) ซึ่งมีช่องขนาดต่างๆ กัน โดยจัดเรียงตะแกรงตามลำดับช่องที่ต้องการตะแกรงเหล่านี้อาจติดอยู่กับที่หรือเคลื่อนไหวได้

ขีดจำกัดแอสเตอร์เบิร์ก (Atterberg Limits) การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวในสถานะความชื้นต่าง ๆ เพื่อประเมินลักษณะการเปลี่ยนสถานะระหว่างของเหลว พลาสติก และของแข็ง (ASME, 2020)

ขีดจำกัดของเหลว (Liquid Limit: LL)** ค่าความชื้นที่ดินเริ่มแสดงพฤติกรรมของเหลวก่อนเปลี่ยนสู่สถานะพลาสติก (ASTM D4318)

ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit: PL)** ความชื้นต่ำสุดที่ดินยังคงมีพฤติกรรมแบบพลาสติก โดยความชื้นที่ต่ำกว่านี้จะทำให้ดินแตกหรือร่วน (ASTM D4318)

ขีดจำกัดการหดตัว (Shrinkage Limit: SL)** ค่าความชื้นต่ำสุดที่ดินหยุดการหดตัวเมื่อแห้งลงไป (ASTM D427)

การประเมินความสามารถในการไหล (Flowability) คือการทดสอบพฤติกรรมของวัสดุเม็ดหรือผงว่ามีแนวโน้มไหลผ่านภาชนะหรือพื้นผิวได้อย่างราบรื่นหรือไม่ ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพกระบวนการผลิต (ASTM C230)

การทดสอบกำลังอัด (Compression Test) เป็นกระบวนการตรวจสอบความสามารถของวัสดุในการรับแรงอัด โดยใช้วัดความแข็งแรงของวัสดุก่อสร้าง เช่น คอนกรีต มอร์ตาร์ หรือดินซีเมนต์ (ASTM C109)

2.2 ดิน

2.2.1 ดิน (Soil)

ดินเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีความหลากหลายทางองค์ประกอบและสมบัติทางวิศวกรรมอย่างมาก โดยสามารถพบได้ในทุกภูมิภาคของโลก ซึ่งในงานสถาปัตยกรรมและวิศวกรรมโยธา ดินมักถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาใช้เป็นวัสดุฐานราก งานถม หรือแม้แต่เป็นวัสดุก่อสร้างโดยตรง เช่น ดินอัด (Rammed Earth) อิฐดิน (Adobe) หรือในกรณีของงานวิจัยนี้ คือการพัฒนาดินให้กลายเป็น “ดินซีเมนต์” เพื่อใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ องค์ประกอบพื้นฐานของดินและการจำแนกชนิด โดยทั่วไปดินประกอบด้วยสี่องค์ประกอบหลัก ได้แก่

- 1). แร่ธาตุ (Mineral Particles) ซึ่งเป็นส่วนอนินทรีย์ ได้แก่ เม็ดทราย (Sand) เม็ดตะกอนขนาดกลาง (Silt) และดินเหนียว (Clay)
- 2). สารอินทรีย์ (Organic Matter) ที่เกิดจากการย่อยสลายของซากพืชซากสัตว์
- 3). น้ำ (Water) ซึ่งอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน
- 4). อากาศ (Air) ที่แทรกอยู่ในรูพรุนของดิน

ในทางปฏิบัติ ดินมักถูกจำแนกอย่างง่ายตามลักษณะสัมผัสและความสามารถในการเก็บน้ำ ได้แก่

- ดินเหนียว (Clay): ละเอียด อุ้มน้ำดี ยึดเกาะสูง
- ดินร่วน (Loam): ผสมระหว่างทราย-ตะกอน-เหนียว สมดุล เหมาะกับพืชและงานก่อสร้างบางประเภท
- ดินทราย (Sandy Soil): ระบายน้ำดี ไม่ยึดเกาะ

องค์ประกอบทางเคมีของดิน โดยเฉพาะสารอินทรีย์และอนินทรีย์ มีผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพของวัสดุก่อสร้างที่ได้จากดิน ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติทางกล ความสามารถในการรับน้ำ ความแข็งแรง และความเสถียรเมื่อใช้งานในระยะยาว โดยเฉพาะในกรณีของการผลิต ดินซีเมนต์ ซึ่งต้องอาศัยปฏิกิริยาเคมีระหว่างดิน ปูนซีเมนต์ และน้ำเพื่อสร้างโครงสร้างวัสดุที่มีความแข็งแรงและคงทน

สารอินทรีย์ในดินและสารอนินทรีย์ในดิน

สารอินทรีย์ในดิน สารอินทรีย์ (Organic Matter) ได้แก่ซากพืช ซากสัตว์ และจุลินทรีย์ที่สลายตัวในดิน ซึ่งมีความสามารถในการอุ้มน้ำและเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลา สารอินทรีย์ที่มีความซับซ้อน เช่น กรดฮิวมิก (Humic acids) และ กรดฟุลวิก (Fulvic acids) สามารถรบกวนปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) ของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้วัสดุไม่แข็งตัวหรือมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าที่ควรจะเป็น นอกจากนี้ สารอินทรีย์ยังมีแนวโน้มย่อยสลาย ทำให้เกิดการยุบตัวหรือเกิดโพรงในวัสดุ ซึ่งเป็นความเสี่ยงต่อเสถียรภาพในระยะยาว

วิธีการตรวจสอบสารอินทรีย์

- การเผาตัวอย่างเพื่อหาค่า “Loss on Ignition (LOI)” ตามมาตรฐาน ASTM D2974
- การวิเคราะห์สีของสารละลายดินโดยใช้ด่าง (เช่น NaOH) เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสีที่สัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารอนินทรีย์ในดิน สารอนินทรีย์ (Inorganic Components) ในดินคือส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิต เช่น ซิลิกา (SiO_2), อะลูมินา (Al_2O_3), เหล็กออกไซด์ และแร่ธาตุต่าง ๆ ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาดินซีเมนต์ โดยเฉพาะการเกิดสารประกอบไฮเดรต (C-S-H และ C-A-H) ที่ให้ความแข็งแรงในวัสดุปูนซีเมนต์

อย่างไรก็ตาม แร่บางชนิด เช่น มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ซึ่งเป็นแร่ในกลุ่ม Smectite มีความสามารถในการพองตัวและดูดน้ำสูง ซึ่งอาจทำให้วัสดุที่ผลิตขึ้นเกิดการเปลี่ยนรูปเมื่อใช้งาน

วิธีการวิเคราะห์สารอนินทรีย์

1. X-Ray Fluorescence (XRF) เพื่อหาสัดส่วนของธาตุหลัก เช่น Si, Al, Fe, Ca
2. X-Ray Diffraction (XRD) สำหรับระบุชนิดของแร่ในดิน
3. Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อตรวจสอบโครงสร้างผลึกและลักษณะผิวของอนุภาคดิน

4. ความจำเป็นของการตรวจสอบองค์ประกอบดินก่อนผลิตดินซีเมนต์ การศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบของดินอย่างละเอียด โดยเฉพาะในด้านสารอนินทรีย์และอนินทรีย์ เป็นขั้นตอนที่จำเป็นก่อนนำดินไปพัฒนาสูตรผสมดินซีเมนต์ ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ดังต่อไปนี้:

1. เพื่อกำหนด อัตราส่วนผสม ที่เหมาะสมกับดินแต่ละชนิด
2. เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้วัสดุอ่อนตัวหรือเสื่อมสภาพ
3. เพื่อควบคุมคุณสมบัติทางกล เช่น ความสามารถในการรับแรงอัด
4. เพื่อควบคุม ความสามารถในการไหล ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของพิมพ์สามมิติ
5. เพื่อส่งเสริมแนวทางการพัฒนา วัสดุก่อสร้างทางเลือกที่ยั่งยืน (Sustainable Construction Materials)

ดังนั้น กระบวนการตรวจสอบสารอนินทรีย์และอนินทรีย์ในดินจึงมิใช่เพียงการวิเคราะห์เชิงเคมีเท่านั้น แต่ยังเป็นกลไกสำคัญในการควบคุมคุณภาพของวัสดุในระดับโครงสร้าง และมีความเชื่อมโยงอย่างแน่นแฟ้นกับเป้าหมายของงานวิจัยด้านวัสดุพิมพ์คอนกรีตสามมิติอย่างยั่งยืน

2.2.2 การจำแนกดินในงานวิศวกรรม

การจำแนกดินในงานวิศวกรรมจะใช้มาตรฐานสากล โดยการจำแนกดินและการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเป็นขั้นตอนสำคัญสำหรับการศึกษาลักษณะของวัสดุดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีการนำดินมาใช้ในการผสมกับซีเมนต์เพื่อสร้างวัสดุผสมที่สามารถนำไปใช้งานกับเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ เนื่องจากขนาดและการกระจายของอนุภาคดินส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมกรรมการไหลตัว ความสามารถในการยึดเกาะกันของเนื้อวัสดุ และความแข็งแรงทางกลของวัสดุหลังการเซตตัว หากดินมีขนาดอนุภาคที่ไม่เหมาะสม เช่น มีการกระจายตัวของขนาดที่กว้างเกินไปหรือแคบเกินไป อาจก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการอัดพิมพ์ หรือทำให้โครงสร้างที่พิมพ์เกิดความพรุนและไม่มีความเสถียร การหาขนาดของเม็ดดินด้วยการร่อนตะแกรงทำได้ 2 วิธี คือ

ร่อนแห้ง (Dry Sieving) เป็นการทำการร่อนดินแห้งๆ โดย ตัวอย่างดินที่เหมาะสมกับวิธีนี้ ต้องเป็นดินเม็ดใหญ่และสะอาด รวมทั้งมีดินเม็ดละเอียดปนอยู่น้อย หรือไม่มีเลย

ร่อนเปียก (Wet Sieving) ทำการร่อนด้วยการล้างน้ำ โดย เหตุผลที่ต้องทำการร่อนเปียก เพื่อให้แยกดินเม็ดละเอียดออก จากดินเม็ดใหญ่ด้วยการล้าง ทำให้ได้ผลการทดสอบถูกต้อง ยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับงานดินโดยทั่วไป แล้วจึงนำไปคัดแยกตามแต่ละกระบวนการการจำแนกตามตารางและแผนภูมิควบคุมการจำแนกประเภทดิน โดยระบบการจำแนกประเภทของดินมีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่นำไปใช้ การอ่านผลการจำแนกประเภทของดินที่นิยมใช้กันในปัจจุบันมี 3 วิธี ดังนี้

1. แผนภูมิสามเหลี่ยมจำแนกประเภทดิน (Triangular Soil Classification Chart)

วิธีนี้จำแนกโดยอาศัยขนาดของเม็ดดินเป็นเกณฑ์ เหมาะสำหรับดินกรวดหรือทราย จากตารางจะพบว่าไม่ได้พิจารณาค่าขีดความเหลว ขีดความเหนียว และดัชนีสภาพพลาสติก การจำแนกประเภทของดินตามขนาดของเม็ดดินที่ง่ายที่สุดสามารถทำได้โดยอาศัยรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 6.1 ตัวอย่างเช่น มีตัวอย่างดินและแยกได้ดังนี้ มีดินเหนียว 60%, มีทรายปนน้อย 40% และมีตะกอนทรายผสมอยู่ 30% ในตัวอย่างดินกลม จากภาพจะได้ดินประเภท ดินร่วนปนดินเหนียว

2. ระบบ Unified Soil Classification หรือที่เรียกว่า USCS

ระบบนี้นิยมกันมากในงานวิศวกรรมฐานราก ซึ่งนอกจากจะพิจารณามวลละของดินแล้ว ยังได้นำค่าขีดความเหลว ขีดความเหนียว และดัชนีสภาพพลาสติกของมวลดินมาเป็นเกณฑ์ในการเรียกชื่อ โดยใช้ตัวภาษาอังกฤษแทน เช่น G คือกรวด, S คือทราย, M คือดินตะกอน และ C คือดินเหนียว และเขียน 2 ตัวแทนชนิดของดินได้ GM หมายถึงกรวดปนดินตะกอน GC หมายถึงกรวดปนดินเหนียว การจำแนกประเภทของดินโดยระบบ Unified เป็นวิธีที่นิยมแพร่หลายมากกว่าวิธีอื่น เพราะเหมาะกับงานวิศวกรรมทั่วไป เช่น งานถมดินและงานฐานราก เป็นต้น โดยจะจำแนกประเภทของดินออกเป็นกลุ่มๆ โดยใช้อักษรภาษาอังกฤษเป็นสัญลักษณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนการเรียกชื่อกลุ่มดิน ซึ่งจะแบ่งตามขนาดและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดิน แต่ละกลุ่มจะมีอักษร 2 ตัว ตัวแรกจะเป็นกลุ่มหลัก และตัวที่ 2 จะเป็นกลุ่มย่อยลงไป

3. ระบบ AASHTO (Classification)

การจำแนกดินระบบ AASHTO นิยมใช้ในงานวิศวกรรมการทาง โดยแบ่งดินเป็นกลุ่มใหญ่ 7 กลุ่ม ใช้สัญลักษณ์ A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6 และ A-7 สำหรับดิน A-1, A-2, A-3 เป็นดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ไม่เกิน 30% จัดเป็นดินมวลหยาบ ส่วนดินกลุ่ม A-4, A-5, A-6 และ A-7 เป็นดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 35% จัดเป็นพวกดินมวลละเอียด คือดินตะกอนปนดินเหนียว ซึ่งในดินบางกลุ่มยังสามารถแบ่งย่อยได้ โดยเรียงตามลำดับความเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นดินถนน กลุ่มดินกลุ่ม A-1 จะดีที่สุด และดินที่กลุ่ม A-7 จะไม่ดีที่สุด ดินกลุ่ม A-1 ถึง A-3 จะเป็นดินเม็ดหยาบ โดย A-1 เป็นพวกกรวดและทรายที่มีขนาดคละกันดี แบ่งย่อยเป็น A-1-a และ A-1-b ดินกลุ่ม A-2 เป็นพวกกรวดและทรายที่มีดินพวกเม็ดละเอียด เช่น ตะกอนทรายหรือดินเหนียวปนน้อย แบ่งเป็นกลุ่มย่อยอีกคือ A-2-4, A-2-5, A-2-6 และ A-2-7 สำหรับดินกลุ่ม A-3 เป็นพวกทรายที่มีขนาดคละกันไม่ดี ดินกลุ่ม A-4 ถึง A-7 เป็นดินเม็ดละเอียด เช่น ตะกอนทรายหรือดินเหนียว โดย A-4 และ A-5 เป็นพวกตะกอนทราย ส่วน A-6 และ A-7 เป็นพวกดินเหนียว สำหรับ A-7 ยังแบ่งย่อยออกไปเป็น A-7-5 และ A-7-6 ดินกลุ่ม A-4 ถึง A-7 สามารถจำแนกประเภทได้เลยจากค่าขีดความเหลวและดัชนีสภาพพลาสติกโดยอาศัยแผนภูมิความเหนียว นอกจากนั้นยังมีดินนอกกลุ่มหนึ่ง คือ A-8 เป็นดินที่มีสารอินทรีย์ปนน้อย เช่น Peat ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้งานทางวิศวกรรมได้ ซึ่งระบบจำแนกดินที่เป็นที่ยอมรับในงานวิศวกรรมโยธา คือ Unified Soil Classification System (USCS) ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2487-69 การจำแนกประเภทของดินระบบ Unified Soil Classification อาศัยข้อมูลพื้นฐานในการจำแนกคล้ายๆ กัน คือ การกระจายและขนาดของเม็ดดิน, ค่า Atterberg's limits, สี, กลิ่น และการจับตัวของเม็ดดิน รวมทั้งอนุภาคทรายที่เจือปน ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทของ Atterberg's Limits และบทของการหาขนาดเม็ดดินแล้ว โดยใช้อักษรภาษาอังกฤษแทนชื่อของดินนั้น จะช่วยให้การจำแนกดินทางวิศวกรรมออกเป็นหมวดหมู่ได้แก่ ดินมวลหยาบ ดินมวลละเอียด ซึ่งดินมวลหยาบประกอบด้วย กรวด ทราย และดินมวลละเอียดประกอบด้วย ดินตะกอนและดินเหนียว นอกจากนั้นยังพิจารณาอักษรตัวท้าย โดยดูจากมวลคละดีหรือมวลคละไม่ดี และค่าขีดความเหลวของดิน พลาสติกอินเด็กส์

สำหรับการศึกษาครั้งนี้ ใช้วิธีการอ่านผลการจำแนกดินตามระบบ Unified Soil Classification เนื่องจากมีความแม่นยำ และเป็นสากลมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การจำแนกดินตามระบบ Unified Soil Classification (USCS)

USCS เป็นระบบที่นิยมใช้งาน ผู้ที่คิดระบบนี้เป็นคนแรก คือ Arthure Casagrande (1942) ต่อมา U.S. Corps of Engineer ได้นำมาปรับปรุงแก้ไขเพื่อนำมาใช้ในการจำแนกดินในงานสร้างถนน และนอกจากนั้นยังมีหน่วยงานอื่นนำเอาการจำแนกดินระบบนี้ไปแก้ไขเพิ่มเติม และตั้งเป็นระบบใหม่อีกหลายๆ ระบบในประเทศต่างๆ (กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม, 2543) ระบบนี้เป็นระบบร้อนแห้งโดยแบ่งดินออกเป็นกลุ่มใหญ่ 3 ประเภท ได้แก่:

- 1). ดินหยาบ (Coarse-grained soils) – ประกอบด้วยกรวด (gravel) และทราย (sand) ซึ่งมีขนาดอนุภาคมากกว่า 0.075 มิลลิเมตร
- 2). ดินละเอียด (Fine-grained soils) – ได้แก่ ดินเหนียว (clay) และดินตะกอน (silt) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร
- 3). ดินอินทรีย์ (Organic soils) – ประกอบด้วยวัสดุอินทรีย์เช่น ซากพืชที่ยังย่อยสลายไม่สมบูรณ์ ซึ่งมักมีคุณสมบัติเฉพาะตัวและไม่เหมาะกับการก่อสร้าง

ในกรณีของดินละเอียด USCS จะใช้ผลการทดสอบ Atterberg Limits ได้แก่ ค่าความชื้นในจุดเหลว (Liquid Limit – LL) และจุดพลาสติก (Plastic Limit – PL) เพื่อจัดกลุ่มดินเป็น CL (Clay with low plasticity), CH (Clay with high plasticity), ML (Silt with low plasticity) และ MH (Silt with high plasticity) ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีผลต่อความสามารถในการยึดเกาะและความเสถียรของดินผสมซึ่งระบบนี้จะถูกเรียกว่าระบบร้อนเปียก การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Analysis) เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคภายในตัวอย่างดิน โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักตามลักษณะของอนุภาค ได้แก่

การร่อนตะแกรง (Sieve Analysis): ใช้สำหรับดินหยาบ โดยทำการร่อนตัวอย่างผ่านตะแกรงที่มีขนาดรูต่าง ๆ ตามลำดับมาตรฐาน (ตาม ASTM C136) แล้วชั่งน้ำหนักของดินที่ค้างในแต่ละชั้น

การวิเคราะห์ด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis): ใช้สำหรับดินละเอียด โดยอาศัยหลักการการตกตะกอนของอนุภาคในของเหลวตามเวลาที่กำหนด (ตาม ASTM D422) ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์จะถูกแสดงในรูปแบบกราฟกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution Curve) ซึ่งใช้ในการคำนวณค่าดัชนีสำคัญ :

D10: ขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าร้อยละ 10 ของตัวอย่าง (Effective size)

D30 และ D60: ขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าร้อยละ 30 และ 60 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cu (Uniformity Coefficient): ค่าที่แสดงถึงความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาค
($Cu = D_{60} / D_{10}$)

Cc (Coefficient of Curvature): ค่าที่ใช้วิเคราะห์รูปร่างของกราฟกระจายตัว
($Cc = D_{30}^2 / (D_{10} \times D_{60})$)

ค่าดังกล่าวช่วยในการประเมินคุณลักษณะทางกายภาพของดิน เช่น ความสามารถในการอัดแน่น หรือความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุในงานพิมพ์คอนกรีต ค่ากลางของขนาดอนุภาคที่เหมาะสมสำหรับดินซีเมนต์และมอร์ตาร์ในงานพิมพ์คอนกรีตสามมิติ

ดังนั้น ดินที่จะนำมาผสมเป็นดินซีเมนต์ จำเป็นต้องควบคุมขนาดอนุภาคให้มีความเหมาะสมเพื่อให้วัสดุมีคุณสมบัติที่ดีทั้งในด้านความสามารถในการรับน้ำหนักเมื่อเซตตัวแล้ว โดยมีค่าจากการศึกษาในปัจจุบันเสนอค่ากลางที่เหมาะสมได้ดังนี้ (Portland Cement Association, 1992)

ตารางที่ 2.1 ช่วงขนาดอนุภาคที่เหมาะสมสำหรับนำมาทำดินซีเมนต์

เบอร์ตะแกรง	ช่วงขนาดอนุภาคที่เหมาะสม	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การไหลผ่าน	หมายเหตุเพิ่มเติม
04	4.75 mm	40-80%	ใช้จำแนกกลุ่มดินตามแผนภูมิ USCS
16	1.18 mm	25-65%	ช่วงค่าเหมาะสมต่อการผสม
100	0.15 mm	10-20%	ช่วงค่าเหมาะสมต่อการผสม
200	0.075 mm	8-20%	ใช้จำแนกกลุ่มดินตามแผนภูมิ USCS

สรุปการจำแนกประเภทของดินและการควบคุมขนาดอนุภาคมีบทบาทสำคัญในงานพิมพ์คอนกรีตสามมิติ โดยช่วยให้ได้วัสดุผสมที่มีสมบัติเหมาะสมทั้งในด้านพฤติกรรมการไหล การเซตตัว และความแข็งแรงหลังพิมพ์ การกำหนดช่วงขนาดอนุภาคที่เหมาะสมเป็นแนวทางเริ่มต้นที่ช่วยประกันคุณภาพของวัสดุ ก่อนเข้าสู่กระบวนการปรับแต่งสูตรและทดสอบสมบัติเชิงกลในขั้นต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับดินจากแหล่งท้องถิ่น เช่น ดินจากจังหวัดชัยภูมิ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.3 ดินซีเมนต์

2.3.1 ดินซีเมนต์ (Soil Cement)

ดินซีเมนต์ (Soil Cement) หรือดินผสมซีเมนต์มักถูกเลือกให้ใช้งานทำถนนและงานฐานราก อย่างในประเทศไทย การก่อสร้างถนนบริเวณที่ราบลุ่มภาคกลางของประเทศไทย มักประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพของโครงสร้างชั้นทางและการทรุดตัว เนื่องจากชั้นดินเป็นดินอ่อนที่มีกำลังต่ำ และการยุบตัวสูง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ วิศวกรมักเลือกออกแบบผิวทางด้วยวัสดุที่มีคุณภาพสูง เช่น เลือกว่าสตุหินคลุกและดินลูกรังสำหรับชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าก่อสร้างสูงและอาจไม่คุ้มทุน(พนันท์ พรหมขาม,2556) ดินซีเมนต์จึงมักเป็นทางเลือกในการใช้งาน โดยลักษณะของดินซีเมนต์เป็นดินที่ปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมหลักและน้ำในปริมาณที่เหมาะสม เมื่อบดอัดให้มีความหนาแน่นสูงสุดทำให้มีสมบัติทางวิศวกรรมที่ดี โดยปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ต้องมีปริมาณมากพอที่จะทำให้ดินซีเมนต์มีกำลังแบกทานตามที่กำหนดกลไกการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยการผสมปูนซีเมนต์และน้ำนี้ ไม่ได้เกิดจากอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมกับดินเพียงอย่างเดียว แต่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วย โดยหลังจากที่ผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ทำให้เกิดสารประกอบ Calcium Silicate Hydrate(CSH) ในรูปของเจล ในส่วนผสมของปูนซีเมนต์และน้ำ (Czernin, 1962) แนวคิดของการใช้ดินซีเมนต์เริ่มต้นขึ้นในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 โดยองค์การทางหลวงสหรัฐฯ ได้ริเริ่มนำมาใช้ในการปรับปรุงฐานถนนในพื้นที่ห่างไกล ซึ่งขาดแคลนวัสดุก่อสร้างคุณภาพสูง (Portland Cement Association, 1952) จากนั้น เทคนิคนี้ได้แพร่หลายไปยังหลายประเทศ รวมถึงพื้นที่ในเขตร้อนและกึ่งแห้งแล้ง ซึ่งมักมีดินคุณภาพต่ำและหลากหลายทางกายภาพ (ศาสน์ สุขประเสริฐ, 2559)

หลักการของดินซีเมนต์คือการปรับปรุงคุณสมบัติของดินด้วยการผสมปูนซีเมนต์ เพื่อสร้างพันธะใหม่ภายในโครงสร้างของดิน ซึ่งช่วยเพิ่มความหนาแน่น ลดการอุ้มน้ำ และเพิ่มค่ากำลังอัดอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อวัสดุแข็งตัวแล้ว จะสามารถรับน้ำหนักได้ดี และมีความต้านทานต่อการกัดเซาะ ความชื้น และแรงเฉือนจากภายนอกมากกว่าดินเดิมหลายเท่า (Chen et al., 2023) ดินซีเมนต์ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโยธาและสถาปัตยกรรม เช่น วัสดุถมปรับฐานรากชั้นล่าง โครงสร้างถาวร กึ่งถาวร หรือชั่วคราว รวมถึงงานก่อสร้างทางเลือกในพื้นที่ชนบท ตัวอย่างการใช้งาน ได้แก่ การสร้างชั้นพื้นถนนเพื่อเพิ่มความมั่นคง ลดค่าการพังตัวของดิน และเพิ่มความทนทานต่อการรับน้ำหนักของยานพาหนะและสิ่งปลูกสร้าง นอกจากนี้ ดินซีเมนต์ยังถูกนำไปใช้ในระบบกำแพงกันดินและแนวป้องกันน้ำซึม เนื่องจากมีค่าการซึมน้ำต่ำ มีความคงทนต่อความชื้น และช่วยลดความเสี่ยงต่อการพังทลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของโครงสร้าง ในด้านการขึ้นรูป ดินซีเมนต์สามารถนำมาผลิตเป็นบล็อกก่อสร้างโดยการอัดลงในแม่พิมพ์ ซึ่งให้ความแข็งแรงเพียงพอสำหรับใช้เป็นผนังรับน้ำหนักหรือผนังเบา โดยไม่จำเป็นต้องผ่านการเผา ช่วยลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิต ให้คุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อน และลดต้นทุนการผลิตวัสดุ ก่อสร้าง (Prabakar & Sridhar, 2002; Chen et al., 2023)

ส่วนผสมพื้นฐานของดินซีเมนต์ทั่วไปประกอบด้วยดินธรรมชาติประมาณ 85–90% โดย น้ำหนัก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 5–10% และน้ำ 12–16% ของน้ำหนักดินแห้ง เพื่อให้เหมาะสมต่อการ ผสมและบดอัดโดยไม่ทำให้วัสดุเหลวจนเกินไป (Consolidated Laboratories, 2006) อัตราส่วนดินต่อ ซีเมนต์ที่นิยมใช้ในงานฐานรากหรือถนนอยู่ในช่วง 10:1 ถึง 15:1 โดยปรับให้เหมาะสมตามคุณลักษณะ ของดิน ความละเอียด และความชื้น เพื่อให้วัสดุพัฒนาแรงอัดได้สูงสุด (Chen et al., 2023) สำหรับการ ผลิตบล็อกก่อสร้าง จะใช้อัตราส่วนดินต่อซีเมนต์ที่เข้มข้นขึ้น เช่น 8:1 ถึง 12:1 เพื่อให้ได้ค่ากำลังอัดที่ เพียงพอ โดยไม่จำเป็นต้องเสริมเหล็ก และสามารถนำไปใช้ในระบกก่ออิฐทั่วไปได้ โดยไม่ต้องพึ่งพาอิฐเผา หรือคอนกรีตบล็อก วัสดุดินซีเมนต์จึงตอบสนองต่อความต้องการในด้านความประหยัด ความยั่งยืน และ การพึ่งพาตนเองของชุมชน คุณลักษณะเด่นอีกประการของดินซีเมนต์คือความสามารถในการปรับสูตร ผสมให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่หลากหลาย โดยการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในช่วง 10–20% โดย น้ำหนัก สามารถเพิ่มค่ากำลังอัดและความทนทานของวัสดุให้เพียงพอสำหรับงานโครงสร้างที่ต้องรับ น้ำหนัก เช่น ผนังโครงสร้าง หรือองค์ประกอบที่ขึ้นรูปในสถานที่โดยไม่ต้องใช้แบบหล่อค้ำพุง (Mboup et al., 2021) ปัจจุบันมีแนวโน้มพัฒนาสูตรผสมดินซีเมนต์ให้เหมาะสมกับเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีต สามมิติ ซึ่งต้องการวัสดุที่มีคุณสมบัติเฉพาะ เช่น ความสามารถในการไหล (flowability) การตั้งตัวอย่าง รวดเร็ว (buildability) และการยึดเกาะระหว่างชั้นพิมพ์ (interlayer adhesion) สูตรผสมจึงต้องปรับ สัดส่วนให้เหมาะสมกับพฤติกรรมเชิงรีโอโลยี โดยนิยมใช้อัตราส่วนดินต่อซีเมนต์ในช่วง 5:1 ถึง 8:1 หรือ คิดเป็นปูนซีเมนต์ 12–20% โดยน้ำหนัก และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b ratio) ให้อยู่ ในช่วง 0.35–0.45 เพื่อให้วัสดุมีความสามารถในการไหลโดยไม่ยุบตัวหลังพิมพ์ (Mboup et al., 2021; Lahoti et al., 2023) ในหลายกรณีมีการเติมสารผสมเพิ่ม (additives) เช่น hydrated lime, fly ash, silica fume และ blast furnace slag เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ความหนืด ความสามารถในการ คงรูปร่าง และความทนทาน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในระบบการพิมพ์แบบอัดรีด (Lahoti et al., 2023) จากการศึกษาเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าดินซีเมนต์จะยังไม่มีสูตรมาตรฐานเฉพาะสำหรับการพิมพ์คอนกรีต สามมิติ แต่ด้วยความยืดหยุ่นในการปรับสูตร ต้นทุนต่ำ และการใช้ทรัพยากรท้องถิ่น วัสดุนี้นี้จึงมี ศักยภาพสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 พฤติกรรมทางกลของดินซีเมนต์

พฤติกรรมทางกลของดินซีเมนต์เป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ประเมินความสามารถของวัสดุในการรองรับน้ำหนักและรักษาเสถียรภาพเชิงโครงสร้าง ทั้งในระยะสั้นระหว่างการขึ้นรูป (fresh state) และระยะยาวหลังวัสดุแข็งตัว (hardened state) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานพิมพ์คอนกรีตสามมิติ ที่ต้องการวัสดุที่มีสมดุลระหว่างความสามารถในการไหลตัวและความสามารถในการรับน้ำหนักทันทีหลังการพิมพ์ เพื่อป้องกันการยุบตัวหรือเสียรูปก่อนวัสดุจะแข็งตัวเต็มที่ ดินซีเมนต์ (Soil-Cement) คือวัสดุผสมที่เกิดจากการรวมกันของดินธรรมชาติ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และน้ำ โดยผ่านกระบวนการผสมที่เหมาะสมเพื่อเสริมแรงและความทนทานให้กับดิน โดยทั่วไปจะใช้ในงานโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ถนน หรือโครงสร้างรับแรงต่ำ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยในระยะหลังเริ่มมีการปรับใช้วัสดุดินซีเมนต์ร่วมกับเทคโนโลยี 3DCP เพื่อสร้างระบบก่อสร้างที่ยั่งยืนและใช้ทรัพยากรในท้องถิ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Soil-Cement Matrices for Additive Construction, 2021)

ความสำคัญของกำลังอัด กำลังอัด (Compressive Strength) เป็นตัวชี้วัดหลักของความสามารถในการรับแรงของวัสดุ โดยเฉพาะในการใช้งานร่วมกับเทคโนโลยี 3DCP ที่เน้นการขึ้นรูปวัสดุโดยไม่ใช้แบบหล่อ การมีค่ากำลังอัดเพียงพอเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้วัสดุสามารถคงรูปและรองรับน้ำหนักของชั้นถัดไปในระหว่างการพิมพ์ได้ (Evaluating the Printability and Rheological and Mechanical Properties of 3D-Printed Earthen Mixes, 2023) ช่วงค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์สำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าดินซีเมนต์ที่ใช้ในการพิมพ์ 3 มิติ มีค่ากำลังอัดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัสดุผสม เช่น อัตราส่วนปูนซีเมนต์ ปริมาณน้ำ และชนิดของดินที่ใช้ ตัวแปรที่ส่งผลต่อกำลังอัดมีดังนี้

1. ชนิดของดิน – ดินที่มีสัดส่วนของเม็ดหยาบ เช่น หกรายหรือหินบด จะช่วยเพิ่มความหนาแน่นและลดการหดตัวเมื่อผสมกับซีเมนต์ ในขณะที่ดินเหนียวอาจเพิ่มความเหนียวแต่ลดกำลังอัด หากไม่ได้รับการปรับปรุงอย่างเหมาะสม (A Review on Soil Cement Blocks, 2018)
2. ปริมาณซีเมนต์ – ปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลต่อการสร้างปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ส่งผลต่อกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าที่มากเกินไปอาจลดความสามารถในการพิมพ์ (Evaluating the Printability, 2023)

สำหรับดินซีเมนต์ที่นำมาใช้ในรูปแบบมอร์ตาร์ ซึ่งเป็นวัสดุผสมที่มีปูนซีเมนต์เป็นสารประสานหลัก ผสมกับดินและสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ พบว่ากำลังอัดเป็นหนึ่งในสมบัติทางกลที่ถูกศึกษา มากที่สุด เนื่องจากเป็นตัวชี้วัดความแข็งแรงและความทนทานของวัสดุที่สามารถบ่งบอกถึงความเหมาะสมในการใช้งานจริงได้อย่างชัดเจน จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ใน

รูปแบบมอร์ตาร์ที่ใช้สำหรับการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ มีค่ากลางโดยประมาณอยู่ในช่วง 7.5 ถึง 14.0 เมกะปาสกาล (MPa) ที่อายุ 28 วัน ซึ่งค่ากลางนี้สามารถนำมาเป็นเกณฑ์มาตรฐานเบื้องต้นในการออกแบบผสมวัสดุที่เหมาะสมกับกระบวนการพิมพ์ 3 มิติและให้ผลลัพธ์ที่ตอบโจทย์ในด้านความแข็งแรงและความสามารถในการรับน้ำหนัก (กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม)

การศึกษาของหลายงานวิจัย เช่น การวิเคราะห์สมบัติทางไหลและการพิมพ์ของมอร์ตาร์ที่ผสม silica fume, hydrated lime และ blast furnace slag ได้แสดงให้เห็นว่า มอร์ตาร์ชนิดนี้สามารถทำให้ได้กำลังอัดเฉลี่ยราว 10 MPa ที่ 28 วัน (Analysis of rheological properties and printability of a 3D-printing mortar, 2017) ขณะที่งานวิจัยที่ศึกษาผลของการเติมเถ้าลอย (Fly Ash) และ GGBFS พบว่ากำลังอัดอยู่ในช่วง 7.5–11.5 MPa (Effect of FA and GGBFS on compressive strength, rheology, and printing properties, 2019) และงานวิจัยด้านการพิมพ์คอนกรีตที่เน้นการใช้สารเติมแต่งแร่ชนิดต่าง ๆ ยังรายงานค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง 9.0–13.0 MPa (Advancements in 3D printing of cementitious materials: A review, 2020) ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการออกแบบผสมวัสดุอย่างละเอียดเพื่อให้ได้สมบัติทางกลที่เหมาะสม

โดยภาพรวมแล้ว การควบคุมสมบัติทางกลของดินซีเมนต์ในรูปแบบมอร์ตาร์ ไม่ได้มุ่งเน้นเพียงแค่การเพิ่มความแข็งแรงสูงสุดเท่านั้น แต่ยังคงคำนึงถึงความสามารถในการไหลตัวและการพิมพ์ผ่านหัวฉีดที่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยี 3DCP ด้วย

สรุปพฤติกรรมทางกลของดินซีเมนต์ในรูปแบบมอร์ตาร์ที่ใช้สำหรับงานพิมพ์คอนกรีตสามมิติ มีค่ากำลังอัดโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 10.63 MPa (ช่วง 7.5–14.0 MPa) ที่อายุ 28 วัน ซึ่งเป็นค่ากลางที่สามารถใช้เป็นเกณฑ์อ้างอิงในการออกแบบผสมวัสดุสำหรับการใช้งานจริง งานวิจัยชี้ให้เห็นว่าการเติมสารเติมแต่งแร่และวัสดุรองช่วยเสริมสมบัติทางกลของมอร์ตาร์ได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงความสมดุลของสมบัติทางกลและสมบัติการไหลตัว เพื่อให้วัสดุเหมาะสมกับกระบวนการพิมพ์คอนกรีตสามมิติที่ต้องการความแม่นยำและประสิทธิภาพสูง

2.4 เทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ

เทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ เป็นรูปแบบหนึ่งของการก่อสร้างยุคใหม่ที่อาศัยหลักการของการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing) โดยเป็นเทคโนโลยีที่เริ่มถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในหลายด้าน เช่น การแพทย์ งานสถาปัตยกรรม รวมถึงการนำมาใช้อุตสาหกรรมก่อสร้างซึ่งจะเรียกว่าการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ เนื่องด้วยเป็นเทคโนโลยีที่ความแม่นยำ สูง ใช้เวลาในการผลิตที่น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถสร้างชิ้นส่วนได้อย่างอิสระ และช่วย ลดการใช้วัสดุ แต่เทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ ข้อจำกัดที่จะต้องพิจารณาค่อนข้างมาก เช่น คุณสมบัติเชิงกลและคุณลักษณะของคอนกรีตที่จะนำมาพิมพ์ ระยะเวลาการแข็งตัว ระยะเวลาในการพิมพ์ ขนาดของเครื่องพิมพ์ (เศรษฐวัฒน์ ตียกุล, 2564) การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ต้องอาศัยการพัฒนาควบคู่กันทั้งในด้านวัสดุ เครื่องจักร และการควบคุมกระบวนการ โดยเฉพาะวัสดุผสมปูนหรือดินซีเมนต์ที่ใช้กับระบบการพิมพ์จะต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการไหล การยึดเกาะระหว่างชั้น และการแข็งตัวอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นความท้าทายหลักของงานวิจัยในช่วงหลายปีที่ผ่านมา (Behrokh Khoshnevis, 2016)

การพิมพ์คอนกรีตสามมิติใช้หลักการรีดวัสดุที่อยู่ในสถานะสดผ่านหัวฉีดแบบควบคุมอัตโนมัติ เพื่อสร้างโครงสร้างชิ้นต่อชิ้นตามแบบจำลองสามมิติ (CAD Model) โดยวัสดุจะต้องมีสมบัติด้านการไหล (Flowability) ที่เหมาะสมเพียงพอที่จะส่งผ่านระบบ แต่ยังสามารถคงรูปได้หลังจากพิมพ์ลงในแต่ละชั้น (Buildability)

คุณสมบัติเหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความมั่นคงของชิ้นงานและการพิมพ์อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในระบบการพิมพ์แบบอัดรีด (Extrusion) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยและในเชิงพาณิชย์ (A Review of Printing Strategies, Sustainable Cementitious Materials and Characterization Methods in the Context of Extrusion-Based 3D Concrete Printing, 2020)

2.4.1 ระบบเครื่องพิมพ์ Vertico

Vertico เป็นบริษัทจากประเทศเนเธอร์แลนด์ที่เชี่ยวชาญด้านการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ โดยใช้หุ่นยนต์ ระบบของ Vertico ใช้แขนหุ่นยนต์แบบหกแกนที่ติดตั้งอยู่บนฐานที่มั่นคง ทำให้สามารถเคลื่อนไหวได้อย่างแม่นยำและซับซ้อนในพื้นที่สามมิติ ระบบหุ่นยนต์นี้ช่วยให้สามารถพิมพ์โครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ที่มีรูปทรงอิสระได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้แบบหล่อแบบดั้งเดิม ข้อดีสำคัญของระบบ

1. ความยืดหยุ่น: แขนหุ่นยนต์หกแกนสามารถพิมพ์ในรูปทรงเรขาคณิตที่ซับซ้อนและในทิศทางที่ไม่จำเป็นต้องตั้งฉากกับพื้น
2. ประสิทธิภาพของวัสดุ: การไม่ใช้แบบหล่อร่วมกับการควบคุมการไหลของวัสดุอย่างแม่นยำช่วยลดวัสดุเหลือทิ้ง
3. ความสามารถในการปรับเปลี่ยน: ระบบสามารถปรับใช้กับโครงการที่หลากหลายและรองรับสูตรผสมคอนกรีตประเภทต่าง ๆ

นอกจากนี้ยังใช้งานร่วมกับระบบผสมวัสดุ Multimix-3D เพื่อความยืดหยุ่นในการใช้งานและความแม่นยำในการผสมวัสดุ (Vertico: 3D Concrete Printing Solutions, 2020)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ระบบผสมวัสดุ Multimix3D

เครื่องผสมและปั๊มมอร์ตาร์ MAI@MULTIMIX-3D เป็นทางออกสำหรับผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ การออกแบบเครื่องผสมที่จัดสิทธิบัตรร่วมกับชิ้นส่วน MAI@CODUR รับประกันผลลัพธ์การผสมที่ยอดเยี่ยม ร่วมกับระบบจัดการน้ำแบบนวัตกรรม ทำให้มั่นใจได้ถึงความสำเร็จของวัสดุ ขึ้นอยู่กับปั๊มเกลียว (worm pump) ที่ใช้ อัตราการจ่ายสามารถทำได้ระหว่าง 1 ลิตรต่อนาที ถึง 55 ลิตรต่อนาที ภายในช่วงสมรรถนะของปั๊มเกลียวแต่ละรุ่น ความจุของปั๊มสามารถปรับได้อย่างต่อเนื่องทั้งที่ตัวเครื่องโดยตรง หรือผ่านการควบคุมภายนอก (4-20 mA, 0-10 V, OPC-UA) MAI.MULTIMIX-3D มาพร้อมหน้าจอสัมผัสสีขนาด 7 นิ้ว ซึ่งช่วยให้การใช้งานเครื่องเป็นไปอย่างง่ายดายและเป็นธรรมชาติ ตัวเครื่องมีพอร์ตเชื่อมต่อ MAI@NET จำนวนสามช่องตามมาตรฐาน ซึ่งสามารถใช้ควบคุมอุปกรณ์เพิ่มเติม เช่น MAI@3DCP PRINTHEAD, MAI@DOS หรือ MAI@WHD ข้อมูลการทำงานที่สำคัญทั้งหมด และข้อมูลจากเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งในเครื่อง (อุณหภูมิ น้ำ, อุณหภูมิอากาศ, ความชื้น, อุณหภูมิของมอร์ตาร์, แรงดันของมอร์ตาร์) รวมถึงข้อมูลการทำงานจากอุปกรณ์เสริม จะแสดงบนหน้าจอพารามิเตอร์การทำงานทั้งหมดของเครื่องและอุปกรณ์เสริมสามารถตั้งค่าได้ทั้งผ่านหน้าจอและผ่านอินเทอร์เฟซ OPC-UA MAI@CONNECT ที่ติดตั้งในเครื่องยังทำให้สามารถสะท้อนภาพหน้าจอไปยังอุปกรณ์มือถือหรือคอมพิวเตอร์ผ่าน WLAN หรือ LAN ได้ ซึ่งหมายความว่าสถานะการทำงานสามารถตรวจสอบได้จากอุปกรณ์เหล่านี้ และพารามิเตอร์สามารถปรับได้เมื่อจำเป็น

การตั้งพารามิเตอร์หลักของเครื่อง MAI@MULTIMIX-3D เริ่มจากการปรับอัตราการจ่ายวัสดุ (delivery rate) ซึ่งสามารถปรับได้ต่อเนื่องตั้งแต่ 1 ลิตรต่อนาที ถึง 55 ลิตรต่อนาที โดยขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของปั๊มเกลียว (worm pump) ที่ใช้งาน ซึ่งผู้ใช้สามารถปรับตั้งค่านี้ได้โดยตรงจากหน้าจอสัมผัสสีขนาด 7 นิ้ว หรือผ่านการควบคุมภายนอกด้วยสัญญาณมาตรฐาน เช่น 4-20 mA, 0-10 V หรือ OPC-UA นอกจากนี้ เครื่องยังมีระบบจัดการน้ำที่ควบคุมการจ่ายน้ำอย่างแม่นยำ เพื่อรักษาความชื้นของมอร์ตาร์ให้คงที่และเหมาะสมกับการพิมพ์ ระบบนี้ช่วยให้สามารถรักษาความสำเร็จของวัสดุได้ตลอดการทำงาน

เครื่องมีเซ็นเซอร์ตรวจวัดที่สำคัญหลายชนิด ได้แก่

1. อุณหภูมิ น้ำ (Water temperature)
2. อุณหภูมิอากาศ (Air temperature)
3. ความชื้น (Humidity)
4. อุณหภูมิของมอร์ตาร์ (Mortar temperature)
5. แรงดันของมอร์ตาร์ (Mortar pressure)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลจากเซ็นเซอร์เหล่านี้จะแสดงบนหน้าจอ และใช้ในการปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ แบบเรียลไทม์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผสมและการจ่ายวัสดุ

โดยรวมแล้ว การตั้งค่าพารามิเตอร์กลางของเครื่อง จะรวมการควบคุมอัตราการจ่ายวัสดุ ระบบน้ำ และการอ่านข้อมูลจากเซ็นเซอร์ เพื่อประสานการทำงานกับอุปกรณ์เสริม เช่น หัวพิมพ์ MAI@3DCP PRINTHEAD ซึ่งสามารถตั้งค่าผ่านหน้าจอ หรือผ่านระบบ OPC-UA โดยผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบสถานะและปรับค่าจากอุปกรณ์มือถือหรือคอมพิวเตอร์ผ่านระบบ MAI@iCONNECT ได้ด้วย

2.4.3 การกำหนดพารามิเตอร์สำหรับการพิมพ์

พารามิเตอร์สำคัญในการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ ได้แก่ ความเร็วในการพิมพ์ (Print Speed), อัตราการไหลของวัสดุ (Material Flow Rate), ระยะห่างระหว่างชั้น (Layer Height), ขนาดหัวฉีด (Nozzle Diameter) และเวลาเซตตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) ซึ่งต้องมีการปรับให้เหมาะสมกับชนิดวัสดุและลักษณะงานที่ต้องการการควบคุมพารามิเตอร์ดังกล่าวมีผลต่อความสามารถในการก่อสร้าง ความสามารถในการพิมพ์ และสมรรถนะเชิงกลของชิ้นงานสุดท้าย โดยจำเป็นต้องมีการทดสอบและสอบเทียบอย่างต่อเนื่อง (mix design and fresh properties of 3d printed concrete, 2021)

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าในการตั้งพารามิเตอร์

พารามิเตอร์	ค่าโดยประมาณ	หมายเหตุ
อัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ทราย	1 : 2.75	สูตรทั่วไปที่ให้ความสามารถในการยึดเกาะดี
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)	0.38 – 0.42	เหมาะสมกับงานพิมพ์แบบไหลตัวได้ดี(วัดใหม่ทุกครั้ง อ้างอิงจาก Flow table)
ปริมาณ Superplasticizer	0.8 – 1.2% โดยน้ำหนักของซีเมนต์	ช่วยเพิ่มความไหลโดยไม่เพิ่มน้ำ
รอบการผสม (Mixing RPM)	60 – 80 รอบ/นาที	สำหรับห้องผสมความเร็วกลาง
เวลาในการผสม	120 – 180 วินาที	ขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุและความเร็ว
อัตราการไหลของวัสดุ	10 – 15 กก./นาที	ปรับตามการทำงานของหัวพิมพ์

จากตารางพารามิเตอร์มีค่าดังนี้ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ทราย และ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ซึ่งจากการค้นคว้ามีค่าอัตราส่วน 1 : 2.75 ซึ่งสูตรทั่วไปที่ให้ความสามารถในการยึดเกาะดีและ

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.38 – 0.42 เหมาะสมกับงานพิมพ์แบบไหลตัวได้ดี (วัดใหม่ทุกครั้งที่เปลี่ยนสัดส่วนหรือเปลี่ยนวัสดุ ที่อิงจากสูตรอ้างอิงจากการหาFlowtable)

การทดสอบความสามารถในการไหล (Flowability)

การทดสอบ Flowability เป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินความเหมาะสมของวัสดุสำหรับการพิมพ์เนื่องจากเกี่ยวข้องกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยทั่วไปนิยมใช้วิธี FlowTable Test เพื่อวัดการแผ่กระจายของมอร์ตาร์หรือดินซีเมนต์ที่ผสมแล้ว โดยค่าการไหลที่เหมาะสมสำหรับการพิมพ์อยู่ในช่วง 110–140 มิลลิเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุและระบบพิมพ์ที่ใช้ โดยค่าการไหลจะสัมพันธ์กับค่าน้ำโดยมีสูตรคำนวณแสดงความสัมพันธ์ดังนี้ คุณสมบัติที่สัมพันธ์โดยตรงกับสมบัติด้านความหนืด (Viscosity) และการคงรูปของวัสดุ ซึ่งจำเป็นต้องรักษาสมดุลระหว่างความไหลลื่นและความเสถียรระหว่างชั้นพิมพ์ ทั้งนี้มีงานวิจัยจำนวนมากที่วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสม ปริมาณน้ำ วัสดุแร่เติม และค่าการไหลที่เหมาะสม

2.5 งานวิจัยเกี่ยวข้อง

การพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืนโดยใช้ทรัพยากรในท้องถิ่นร่วมกับเทคโนโลยีการผลิตสมัยใหม่เป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างมากในวงการวิศวกรรมและสถาปัตยกรรมในปัจจุบัน งานวิจัยงานวิจัยในกลุ่มนี้ครอบคลุมประเด็นสำคัญ 3 ด้านหลัก ได้แก่ (1) งานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุดินซีเมนต์และการใช้ทรัพยากรท้องถิ่น (2) งานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ และ (3) งานวิจัยที่เน้นกระบวนการทดสอบสมบัติของวัสดุในแต่ละระบบผสม โดยการสังเคราะห์ข้อมูลจากงานวิจัยเหล่านี้จะเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการออกแบบการทดลองในบทถัดไป และเป็นแนวทางเปรียบเทียบเพื่อประเมินสมรรถนะของวัสดุผสมจากแหล่งดินในจังหวัดชัยภูมิ

2.5.1 งานวิจัยเกี่ยวกับดินซีเมนต์และวัสดุท้องถิ่น

ดินซีเมนต์เป็นวัสดุก่อสร้างทางเลือกที่มีศักยภาพในการพัฒนาอย่างยั่งยืน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทของการใช้ทรัพยากรท้องถิ่นเพื่อลดต้นทุนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยในกลุ่มนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาคุณสมบัติของดินชนิดต่าง ๆ ที่สามารถผสมกับปูนซีเมนต์หรือสารปรับปรุงอื่น ๆ เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความทนทาน และความเหมาะสมต่อการใช้งานโครงสร้างพื้นฐาน เช่น งานทาง บล็อก

ผนัง หรือการก่อสร้างในพื้นที่ชนบท ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการเลือกวัสดุดิบจากแหล่งดินในจังหวัดชัยภูมิ และกำหนดสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง

จากการศึกษางานวิจัยหลายฉบับพบว่า ดินซีเมนต์สามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างหลากหลายรูปแบบ เช่น การทำบล็อกผนัง (A Review on Soil Cement Blocks), การปรับปรุงดินสำหรับงานถนน และการเสริมเสถียรภาพดินฐานราก (Soil Stabilization Using Cement) โดยทั่วไปใช้ดินเหนียวหรือดินร่วนร่วมกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนประมาณ 10:1 ถึง 6:1 ขึ้นอยู่กับประเภทงาน สำหรับการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ งานวิจัยเช่น Sustainable Mixes for 3D Printing of Earth-Based Constructions และ Soil-Cement Matrices for Additive Construction ได้พัฒนาส่วนผสมที่ใช้ดินท้องถิ่นร่วมกับซีเมนต์และวัสดุเสริม เช่น metakaolin และไฟเบอร์ธรรมชาติ ซึ่งให้สมบัติการไหล การคงรูป และกำลังอัดที่เหมาะสมต่อการพิมพ์หลายชั้นและลดคาร์บอนในกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบวัสดุดิบที่ใช้ในงานวิจัยดินซีเมนต์

งานวิจัย	ดินที่ใช้	สารปรับปรุง	สัดส่วนโดยประมาณ (ดิน : ปูน : น้ำ)	จุดประสงค์การใช้งาน	แหล่งวัสดุ
A Review on Soil Cement Blocks	ดินทั่วไป (ดินเหนียว-ร่วน)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	6 : 1 : ~1.5 (ทั่วไป)	ก่อผนังบล็อก, อิฐก่อสร้าง	ดินท้องถิ่น
Performance of Soil-Cement and Cement-Modified Soil for Pavements	ดินละเอียด (silt, clay)	OPC, Fly Ash	10 : 1 ถึง 20 : 1	ถนน, ชั้นฐานรอง	สหรัฐอเมริกา
Soil Stabilization Using Cement	ดินเหนียว	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	15 : 1 ถึง 20 : 1	การปรับปรุงเสถียรภาพดิน	อินเดีย
Durability and Sustainability of Soil-Cement Materials...	ดินทั่วไป + ของเสียอุตสาหกรรม	OPC, GGBS, Fly Ash	ไม่ระบุชัด (รีวิว)	ความทนทานในสภาพแวดล้อมรุนแรง	ไม่ระบุ
Comprehensive Review of Soil Stabilization Agents	ดินหลากหลายชนิด	OPC, Lime, GGBS, Geopolymers	ไม่ระบุ (รีวิว)	วิเคราะห์คุณสมบัติของสารปรับปรุง	หลายประเทศ
Long-Term Strength and Durability of Soil Cement	ดินทราย-ดินร่วน	OPC	10 : 1 ถึง 16 : 1	ถนน, ดินถม	ไม่ระบุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการศึกษางานวิจัย ดินที่ใช้ในงานวิจัย (งานวิจัยที่อ้างอิง) ได้แก่ ดินเหนียว ดินร่วน และดินลูกรัง ซึ่งพบได้ทั่วไปในประเทศไทยรวมถึง จ.ชัยภูมิ โดยมีสารปรับปรุงใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) เป็นหลัก บางงานมีการทดลอง Fly Ash และ Lime เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเสริม และมีค่าสัดส่วนค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมอยู่ที่ 6 : 1 ถึง 20 : 1 ในกรณีนี้ต้องดูสัดส่วนของมอดาร์รวมประกอบ 2.75 : 1 (เขตกจากการทดสอบการไหลแม่) ซึ่งจุดประสงค์ ครอบคลุมการใช้งานที่หลากหลาย เช่น งานฐานทาง, บล็อกผนัง, และโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งสามารถประยุกต์สู่ระบบพิมพ์ 3 มิติ แหล่งวัสดุ ทุกงานวิจัยยืนยันการใช้วัสดุท้องถิ่น ซึ่งตรงกับเป้าหมายของการใช้ดินในพื้นที่ จ.ชัยภูมิ

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติดินซีเมนต์ที่ศึกษาในแต่ละงานวิจัย

ลำดับ	ชื่องานวิจัย	จุดประสงค์การใช้งาน	กำลังอัด (MPa)
1	A Review on Soil Cement Blocks	บล็อกก่อผนัง, อิฐก่อสร้าง	~2.5–4.5 MPa
2	Soil-Cement for Pavements	ถนน, ชั้นรองพื้น (subbase)	~1.5–3.0 MPa
3	Soil Stabilization Using Cement	ปรับปรุงเสถียรภาพดิน	~1.5–3.5 MPa
4	Durability in Harsh Environments	งานในสภาพแวดล้อมรุนแรง	2.0–6.0 MPa (บางสูตร)
5	Review of Stabilization Agents	วิเคราะห์สารปรับปรุงดิน	ไม่ระบุชัด
6	Long-Term Strength of Soil Cement	ถนน, ดินถม, งานโครงสร้างฐานราก	3.0–5.5 MPa
7	Sustainable Mixes for 3D Printing	พิมพ์ 3D อาคารจากดิน	4.0–6.0 MPa
8	Soil-Cement for Additive Construction	พิมพ์ 3D โครงสร้างอาคาร	3.5–5.0 MPa
9	From Local Earth to Modern Structures	พิมพ์ 3D สถาปัตยกรรมดิน	สูงสุด ~8.0 MPa
10	Evaluating Printability of Earthen Mixes	พิมพ์ 3D ลวดคาร์บอน	สูงสุด ~5.5 MPa

สรุปผลจากตารางเปรียบเทียบแสดงให้เห็นภาพรวมของสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินซีเมนต์ในบริบทที่หลากหลาย ตารางต่อไปได้นำเสนอการเปรียบเทียบคุณสมบัติหลักที่ได้รับการรายงานในงานวิจัยต่าง ๆ ได้แก่ กำลังอัด (Compressive Strength) และความทนทาน (Durability) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญในการประเมินคุณภาพของวัสดุผสมดินซีเมนต์ โดยข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์อ้างอิงในการออกแบบการทดลองในบทที่ 3 เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของวัสดุผสมที่พัฒนาขึ้นจากแหล่งดินในจังหวัดชัยภูมิ กำลังอัด (Compressive Strength) มีช่วงกว้างตั้งแต่ 1.5 – 8.0 MPa ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าต่ำ (<4.0 MPa): เหมาะกับโครงสร้างเบา หรืองานชั่วคราว

ค่าปานกลาง (4.0–6.5 MPa): เหมาะกับการพิมพ์ 3 มิติ หรือผนังไม่รับแรง

ค่าสูง (>6.5 MPa): เหมาะกับโครงสร้างถาวรและรับแรง

2.5.2 งานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีต

ในปัจจุบันการพิมพ์คอนกรีตสามมิติเป็นเทคโนโลยีที่อยู่ระหว่างการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งหนึ่งในหัวใจสำคัญของระบบนี้ คือ เครื่องพิมพ์และระบบจ่ายวัสดุ ที่ต้องทำงานร่วมกับวัสดุพิมพ์ที่มีสมบัติเหมาะสม งานวิจัยหลายฉบับได้ให้ข้อมูลที่ชัดเจนเกี่ยวกับระบบการพิมพ์ที่ใช้จริงในอุตสาหกรรม เช่น เครื่องพิมพ์ของบริษัท Vertico และระบบผสมวัสดุ Multimix3D ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับวัสดุหลากหลายชนิด รวมถึงวัสดุดินซีเมนต์ ซึ่งจากการศึกษาเบื้องต้น ค่าการไหลแผ่ที่เหมาะสมกับค่ากลางของพารามิเตอร์ที่ตั้งค่าพร้อมสำหรับการพิมพ์คอนกรีตคือ **105-120 มม.** โดยนอกจากข้อกำหนดของเครื่องพิมพ์แล้ว งานวิจัยหลายฉบับยังให้ข้อมูลเกี่ยวกับ คุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สำคัญต่อการไหลผ่านหัวพิมพ์ การรักษารูปทรงของชั้นวัสดุ และการยึดเกาะระหว่างชั้น

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของวัสดุจากแต่ละงานวิจัย

แหล่งงานวิจัย	Yield Stress	ความหนืด (Viscosity)	ค่าการไหลแผ่ (Flow Table Spread)	การคงรูป (Buildability)
Advancements in 3D printing of cementitious materials	200–500 Pa	Low to Medium	140–160 mm	High
A comprehensive review on fresh state rheology	100–300 Pa	Medium	160–180 mm	Moderate
Effect of FA and GGBFS...	150–350 Pa	Medium–High	135–155 mm	High
Soil-Cement Matrices for Additive Construction	300–600 Pa	Medium	120–145 mm	Moderate
Evaluating the Printability of 3D-Printed Earthen Mixes	250–450 Pa	Low–Medium	130–150 mm	High

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปจากการสังเคราะห์ข้อมูลจากงานวิจัย

สูตรวัสดุที่สามารถใช้งานพิมพ์ได้มักมี ค่าการไหลแผ่ในช่วง 130–160 mm วัสดุที่มีค่าการไหลแผ่มากเกินไป (>170 mm) จะไหลง่ายแต่มีปัญหาด้านการคงรูป วัสดุที่มีค่าการไหลแผ่น้อยกว่า 130 mm มักพิมพ์ได้ยากหรือเกิดการติดหัวพิมพ์ ซึ่งค่าการไหลแผ่นั้นมากกว่าค่ากลางของเครื่องพิมพ์ของงานวิจัยเล่มนี้พอสมควร อาจเนื่องมาจากความแตกต่างกันของแรงขับวัสดุในเครื่องพิมพ์ โดยค่า มักอยู่ในช่วงค่า Yield Stress 200–500 Pa ซึ่งเพียงพอต่อการคงรูป ส่วนเครื่องพิมพ์ของงานวิจัยเล่มนี้ มีค่า Yield Stress 100–200 Pa ซึ่งค่ากลางถึงต่ำของตาราง ดังนั้นการไหลแผ่ตามค่ากลางพารามิเตอร์ จึงเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการทดสอบคือการไหลแผ่ 105-120 มม.

2.5.3 ตารางเปรียบเทียบการทดสอบงานวิจัย

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบการทดสอบงานวิจัยวัสดุ

หมวดงานวิจัย	ชื่อบทความ	วัสดุที่ใช้ (รวมวัสดุเสริม)	การทดลองหลัก	สมบัติที่ทดสอบ	ผลสำคัญ/ข้อสรุป
มอร์ตาร์ (Mortar)	1. Advancements in 3D printing of cementitious materials: A review of mineral additives, properties, and systematic developments	ซีเมนต์ + แร่เสริม (เช่น silica fume, fly ash)	ทบทวนการเพิ่มสารเสริม	Rheology, Mechanical Properties, Printability	วัสดุเสริมช่วยปรับ rheology และเพิ่มความแข็งแรง
	2. A comprehensive review on fresh state rheological properties of extrusion mortars designed for 3D printing applications	มอร์ตาร์ผสมสารเติมแต่ง	ทบทวน rheology	Rheology, Extrudability	Rheology สำคัญต่อความสมดุลการไหลและการพิมพ์
	3. Effect of FA and GGBFS on compressive strength, rheology, and printing properties of cement-based 3D printing material	ซีเมนต์ + Fly Ash (FA), Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS)	แรงอัด, rheology, พิมพ์	Compressive Strength, Rheology	FA และ GGBFS ช่วยเพิ่มแรงอัดและปรับ rheology

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 (ต่อ)

	4. Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review	ซีเมนต์ + วัสดุทางเลือก	ทบทวนวัสดุ	Rheology, Mechanical Strength	วัสดุต้องปรับ rheology เพื่อสมรรถนะการพิมพ์ดี
	5. A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in extrusion-based 3D concrete printing	ซีเมนต์ + วัสดุยั่งยืน	ทบทวนเทคนิคและวัสดุ	Rheology, Sustainability, Mechanical Properties	วัสดุยั่งยืนช่วยลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม
	6. Analysis of rheological properties and printability of a 3D-printing mortar containing silica fume, hydrated lime, and blast furnace slag	มอร์ตาร์ + silica fume, hydrated lime, blast furnace slag	Rheology, Printability	Rheology, Printability	silica fume และ hydrated lime ช่วยเพิ่มเสถียรภาพ rheology
ดินซีเมนต์ (Soil Cement)	1. A Review on Soil Cement Blocks	ดิน + ซีเมนต์ + วัสดุเสริม (เช่น แร่ธาตุ ปูนขาว)	ทดสอบแรงอัด, การจำแนกดิน	Compressive Strength, Soil Classification	วัสดุเสริมช่วยปรับโครงสร้างดินและความแข็งแรง
	2. Performance of Soil-Cement and Cement-Modified Soil for Pavements: Research Synopsis	ดิน + ซีเมนต์ + สารปรับปรุง (lime, fly ash)	แรงอัด, การทรุดตัว	Compressive Strength, Stability, Soil Classification	lime และ fly ash ปรับปรุงสมบัติดินและเพิ่มความแข็งแรง
	3. Soil Stabilization Using Cement	ดิน + ซีเมนต์ + สารเสริม (lime, fly ash, slag)	ความแข็งแรง, การจำแนกดิน	Strength, Durability, Soil Classification	สารเสริมช่วยปรับโครงสร้างและเพิ่มความทนทาน
	4. Durability and Sustainability of Soil-Cement Materials in Harsh Environments	ดิน + ซีเมนต์ + วัสดุเสริม	ทดสอบความทนทาน	Durability, Environmental Resistance	วัสดุเสริมเพิ่มความทนทานในสภาพแวดล้อมรุนแรง
	5. Comprehensive Review of Soil Stabilization Agents	ดิน + ซีเมนต์ + สารเสริม หลากหลาย (lime,	ทบทวนสารเสริม	Strength, Durability, Soil Classification	สารเสริมต่าง ๆ ช่วยเพิ่มคุณสมบัติและคุ้มค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 (ต่อ)

		fly ash, polymers)			
	6. Long-Term Strength and Durability of Soil Cement	ดิน + ซีเมนต์ + วัสดุเสริม	ทดสอบแรงอัด ระยะยาว	Long-term Strength, Durability	วัสดุเสริมเพิ่ม ความแข็งแรง ระยะยาว

สรุปการทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical Properties) แรงอัด (Compressive Strength) วัดความสามารถรับแรงกดทับของวัสดุ ทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

การทดสอบสมบัติการไหล (Rheological Properties) Flow Table Test (การไหล
แผ่ของมอร์ตาร์) ทดสอบการกระจายตัวและความหนืดโดยใช้การสั่นสะเทือน

การทดสอบการจำแนกและคุณสมบัติดิน (Soil Classification & Properties) การ
จำแนกประเภทดิน (Soil Classification) ใช้มาตรฐาน ASTM D2487 หรือเทียบเท่า
เพื่อตรวจสอบประเภทและขนาดอนุภาคดิน

การทดสอบการกรองดิน (Permeability)

ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบการทดสอบงานวิจัยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

กลุ่ม งานวิจัย	ชื่อบทความ	การทดสอบ หลัก	วิธีทดสอบ (ตัวอย่าง)	สมบัติ/ตัวแปร ที่วัด	ข้อสรุป/ จุดเด่น
ดินซีเมนต์สำหรับ 3D Printing	1. Sustainable mixes for 3D printing of earth-based constructions	- Rheology - Printability - Strength	- Rheometer - Extrusion test - Compressive strength test	Rheology, Extrudability, Compressive strength	เน้นวัสดุยั่งยืน ปรับสูตรให้ เหมาะสมกับ 3D Printing
	2. Soil-Cement Matrices for Additive Construction: 3D Printing System Validation and Printing Tests	- Printing validation - Mechanical tests	- Printing trials - Compressive & flexural strength tests	Printability, Strength	ยืนยันความ เหมาะสมวัสดุ และเครื่องมือ พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 (ต่อ)

	3. From local earth to modern structures: A critical review of 3D printed cement composites for sustainable and efficient construction	- Review rheology, mechanical and durability	รวมหลายวิธีทดสอบ	Rheology, Mechanical, Durability	สรุปแนวทาง การใช้วัสดุ ท้องถิ่นผสม ซีเมนต์สำหรับ 3D Printing
	4. Evaluating the Printability and Rheological and Mechanical Properties of 3D-Printed Earthen Mixes for Carbon-Neutral Buildings	- Rheology - Printability - Compressive strength	Rheometer, Printing trials, Compression test	Rheology, Printability, Strength	ประเมินวัสดุ เพื่อการ ก่อสร้าง คาร์บอนต่ำ
3D Concrete Printing (ทั่วไป)	1. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing	- Rheology - Printability - Mechanical properties	Rheometer, Printing tests, Compression tests	Rheology, Printability, Strength	วิเคราะห์ ข้อจำกัดและ โอกาสในงาน 3D Printing คอนกรีต
	2. A review of printing strategies, sustainable	- Rheology - Mix design - Mechanical testing	Rheology test, Mix design variations, Compression	Rheology, Strength, Durability	เน้นวัสดุยั่งยืน และเทคนิค การพิมพ์ที่ เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 (ต่อ)

	cementitious materials and characterization methods in extrusion-based 3D concrete printing				
	3. A comprehensive analysis of buildability of 3D-printed concrete and the use of bi-linear stress-strain criterion-based failure curves towards their prediction	- Buildability - Mechanical behavior	Printing layer tests, Stress-strain analysis	Buildability, Mechanical properties	ใช้แบบจำลองวิเคราะห์การรับแรงและความล้มเหลว
	4. MIX DESIGN AND FRESH PROPERTIES OF 3D PRINTED CONCRETE	- Mix design - Fresh properties	Slump test, Rheology, Printing trials	Workability, Rheology, Printability	ปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อสมดุลระหว่างไหลและความแข็งแรง
	5. 3D Concrete Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix Designs, Mechanical, Microstructural, and Durability Characteristics	- Rheology - Mechanical - Microstructure - Durability	Rheology, Compression, Microscopy, Durability tests	Rheology, Strength, Microstructure, Durability	รวบรวมองค์ความรู้และแนวโน้มวัสดุสำหรับ 3D Printing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 (ต่อ)

3D Printing (Vertico & Multimix3D)	1. Vertico: 3D Concrete Printing Solutions	- System validation - Material testing	Printing trials, Rheology, Mechanical tests	Printability, Rheology, Strength	นำเสนอโซลูชันและการทดสอบระบบของ Vertico
	2. Robotic 3D-Printing for Building and Construction	- Robotic control - Material properties	Robotic printing tests, Rheology	Precision, Printability	เน้นเทคโนโลยีหุ่นยนต์และการควบคุมวัสดุ
	3. 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector	- Material characterization - Printability	Rheology, Mechanical tests, Printing tests	Rheology, Printability, Strength	วิเคราะห์ความท้าทายและโอกาสของวัสดุซีเมนต์
	4. Modelling of 3D concrete printing process: A perspective on material and structural simulations	- Process modeling - Material simulations	Computational simulations	Flow, Buildability, Mechanical behavior	ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ช่วยพัฒนาการพิมพ์

2.6 ดินทรายแดงจังหวัดชัยภูมิ

ดินทรายแดงที่พบในจังหวัดชัยภูมิเป็นดินเนื้อหยาบที่มีองค์ประกอบหลักเป็น ทรายละเอียดถึงปานกลาง และมี ตะกอนหรือดินแป้ง (silt) เจือปนในปริมาณพอสมควร จัดอยู่ในกลุ่ม Silty Sand (SM) ตามระบบการจำแนกของ USCS (Unified Soil Classification System) ซึ่งหมายถึงดินทรายที่มีสมบัติเชิงพฤติกรรมอยู่ระหว่างทรายเป็นดินเหนียว โดยมีความสามารถในการระบายน้ำสูงแบบทราย และคุณสมบัติการขึ้นรูปบางส่วนที่เกิดจากการมีตะกอนผสมอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษานี้ ดินทรายแดงจากจังหวัดชัยภูมิถูกเลือกเป็นกรณีศึกษาหลักสำหรับการพัฒนาเป็นวัสดุดินซีเมนต์ที่สามารถใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ เนื่องจากดินกลุ่มนี้ได้ผ่านการตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานโดยหน่วยงานที่เชื่อถือได้ และพบว่าเป็น **ดินประเภทอนินทรีย์ (Inorganic Soil)** ที่ไม่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในระดับที่เป็นอันตรายต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ข้อมูลนี้ได้รับการยืนยันจากงานวิจัยของสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ซึ่งดำเนินการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของดินทรายแดงจากพื้นที่จริง พบว่า:

- ดินมี **ปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ** ตามการตรวจสอบด้วยวิธี **Loss on Ignition (LOI)** และการทดสอบเบื้องต้นด้วยสารละลาย NaOH
- ดินมีองค์ประกอบหลักเป็นแร่ **ซิลิกา (SiO₂)**, **อะลูมินา (Al₂O₃)**, และ **เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃)** ซึ่งเป็นแร่ธาตุอนินทรีย์ที่ส่งเสริมปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์
- เมื่อเติมซีเมนต์ลงในดินชนิดนี้ จะสามารถสร้างเจล C-S-H และ C-A-H ซึ่งเป็นสารประกอบที่ให้ความแข็งแรงในวัสดุปูนซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว ดินทรายแดงชัยภูมิจึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาพัฒนาเป็นวัสดุดินซีเมนต์เพื่อใช้กับระบบพิมพ์คอนกรีตสามมิติ โดยเฉพาะในบริบทของ **วัสดุก่อสร้างทางเลือก** ที่เน้นการใช้ทรัพยากรท้องถิ่นและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ศักยภาพทางวิศวกรรม

จากผลการศึกษาของสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) พบว่าดินทรายแดงจากชัยภูมิ:

- ศักยภาพในการ **ขึ้นรูปและรับแรง** ได้ดีหลังเติมซีเมนต์
- ให้ค่ากำลังอัดอยู่ในเกณฑ์ที่ **เหมาะสมต่อการใช้งานทางสถาปัตยกรรมและงานก่อสร้างทั่วไป**
- มีเนื้อดินที่สามารถ **ปรับปรุงคุณสมบัติทางกล** ได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่านการเสริมด้วยวัสดุประสาน เช่น ปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางกายภาพ

- ขนาดเม็ดดินหลัก: **ทรายละเอียดถึงทรายนานกลาง**
- ขนาดอนุภาคละเอียดกว่า 0.075 มม. (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) ในปริมาณที่ไม่มากนัก
- ค่าพลาสติก (Plasticity Index) อยู่ในระดับ **ปานกลางถึงสูง**
- จัดอยู่ในกลุ่ม **A-4 หรือ A-5** ตามระบบ AASHTO ซึ่งหมายถึงดินตะกอนทราย (silty soil)

องค์ประกอบทางเคมี

ดินทรายแดงชัยภูมิประกอบด้วยแร่อนินทรีย์หลัก ได้แก่:

- ซิลิกา (SiO₂)
- อะลูมินา (Al₂O₃)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)

องค์ประกอบเหล่านี้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันร่วมกับปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะการสร้างสารประกอบ C-S-H (Calcium Silicate Hydrate) และ C-A-H (Calcium Aluminate Hydrate) ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความคงทนของวัสดุหลังแข็งตัว โดยมีการยืนยันองค์ประกอบเหล่านี้ผ่านการวิเคราะห์ด้วย XRF, XRD และ SEM

การตรวจสอบสารอินทรีย์/อนินทรีย์ (อ้างอิงการตรวจสอบโดย ผศ.ดร.ประชุม คำพุด หัวหน้าหน่วยวิจัย ฯ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

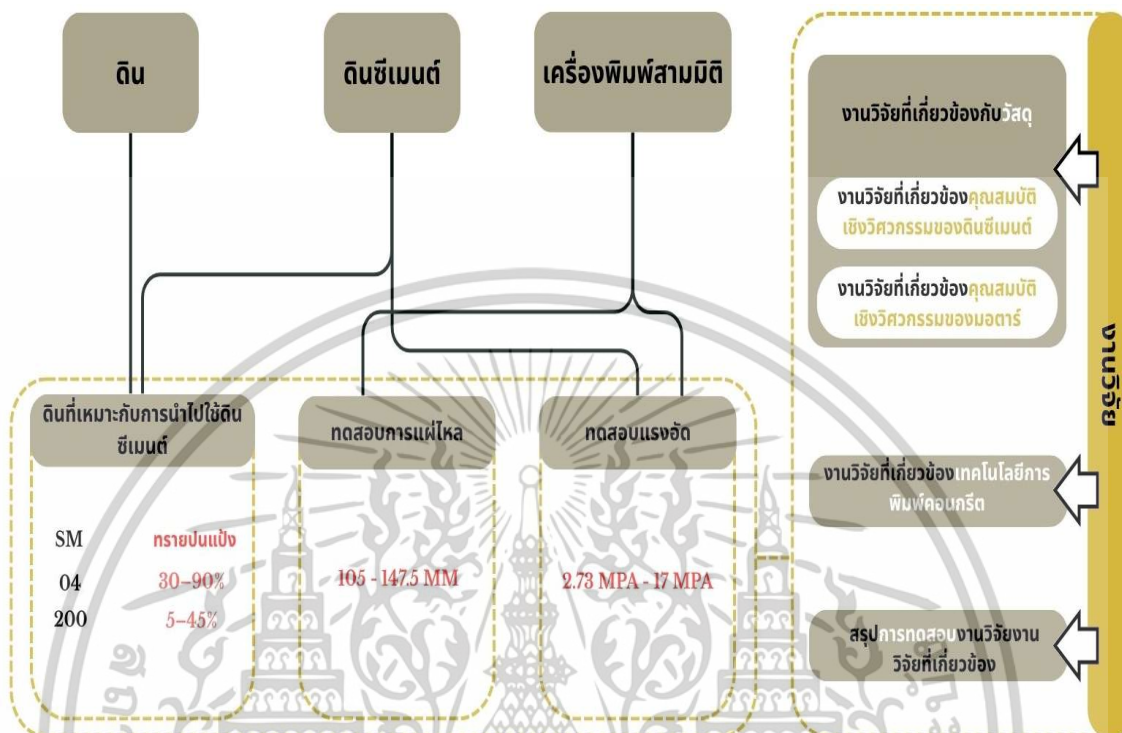
เพื่อประเมินความเหมาะสมของดินต่อการทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ ได้ทำการตรวจสอบสารอินทรีย์ด้วยวิธี:

- Loss on Ignition (LOI) ตาม ASTM D2974
- การใช้สารละลาย NaOH ตรวจสอบการเปลี่ยนสี

ผลการตรวจสอบพบว่า:

- ดินทรายแดงจากชัยภูมิเป็น ดินประเภทอนินทรีย์ (Inorganic Soil)
- ปริมาณสารอินทรีย์อยู่ในระดับต่ำเพียงพอที่จะไม่รบกวนปฏิกิริยาไฮเดรชัน
- จึงสามารถใช้งานเป็น วัสดุตั้งต้นของดินซีเมนต์ ได้โดยไม่ต้องปรับปรุงด้านอินทรีย์วัตถุเพิ่มเติม

2.7 กรอบแนวคิด



รูปที่ 2.1 กรอบแนวคิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (experimental research) และสรุปผลแบบสถิติเชิงปริมาณ เพื่อศึกษาและแสดงผลการทดสอบแรงอัดของวัสดุก่อผนังจากดินซีเมนต์ จากแหล่งดินทรายแดงจังหวัดชัยภูมิ 1. เครื่องที่ใช้ในงานวิจัย 2. การออกแบบการทดลอง 3. การเก็บรวบรวมข้อมูล

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 เครื่องมือจำแนกดิน

1. Sieve Analysis

ตะแกรงร่อน (Sieves)

การใช้งาน: ตะแกรงร่อนเป็นเครื่องมือหลักที่ใช้ในการทดสอบการร่อน ซึ่งมีขนาดรูตะแกรงแตกต่างกัน ตามมาตรฐาน (เช่น ASTM หรือ ISO) เพื่อคัดแยกอนุภาคดินออกเป็นชั้น ๆ ตามขนาดของอนุภาค

ประเภท: ตะแกรงที่ใช้มีหลายขนาด เช่น 4.75 มม., 2 มม., 1 มม., 0.425 มม., 0.075 มม. และขนาดที่เล็กกว่านั้น โดยจะเลือกใช้ตามขนาดของดินที่ต้องการทดสอบ

วัสดุ: ตะแกรงส่วนใหญ่ทำจากโลหะ เช่น สแตนเลส ซึ่งทนทานและสามารถทำความสะอาดได้



รูปที่ 3.1 ตะแกรงร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องสั่นตะแกรง (Sieve Shaker):

การใช้งาน: เครื่องสั่นตะแกรงใช้ในการทำให้อนุภาคดินผ่านตะแกรงได้ง่ายขึ้น โดยการสั่นตะแกรงในช่วงเวลาที่กำหนด



รูปที่ 3.2 เครื่องสั่นตะแกรง

แม่พิมพ์สำหรับใส่ตัวอย่างดิน (Sample Container):

การใช้งาน: ใช้สำหรับใส่ตัวอย่างดินก่อนการร่อน

วัสดุ: ทำจากพลาสติกหรือโลหะ เช่น สแตนเลส



รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์สำหรับใส่ตัวอย่างดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องชั่ง (Balance):

การใช้งาน: ใช้ในการชั่งน้ำหนักตัวอย่างดินทั้งก่อนและหลังการร่อน เพื่อคำนวณสัดส่วนของแต่ละขนาดของอนุภาคดิน



รูปที่ 3.4 เครื่องชั่ง

2. Atterberg's limits

Casagrande Apparatus (เครื่องมือ Casagrande):

การใช้งาน: ใช้ในการทดสอบ Liquid Limit (LL) หรือขีดจำกัดของของเหลว ซึ่งเป็นจุดที่ดินจะเปลี่ยนจากสภาพที่แข็งเป็นของเหลว

ลักษณะ: ประกอบด้วย แท่นโลหะ ที่มีรอยตัดตรงกลาง (groove) และ ไม้กด ที่ใช้ทดสอบให้ดินไหลออกจากรอยตัดเมื่อสัมผัสกับแท่น



รูปที่ 3.5 เครื่องมือ Casagrande

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Plastic Limit Device (เครื่องมือสำหรับทดสอบ Plastic Limit):

การใช้งาน: ใช้ในการทดสอบ Plastic Limit (PL) ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ดินจะเปลี่ยนจากสภาพที่เหนียวเป็นสภาพที่แห้ง

ลักษณะ: ใช้ กระจกนูนไม้ หรือ แผ่นโลหะ ขนาดเล็กในการทำให้ดินมีลักษณะเส้นยาวบาง (thread) เมื่อดินเริ่มแห้ง



รูปที่ 3.6 เครื่องมือสำหรับทดสอบ Plastic Limit

Shrinkage Dish (จานหดตัว):

การใช้งาน: ใช้ในการทดสอบ Shrinkage Limit (SL) ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ดินจะหดตัวในขณะที่สูญเสียความชื้น

ลักษณะ: เป็นจานหรือภาชนะที่มีรูปทรงแบน ใช้สำหรับการทดสอบการหดตัวของดินเมื่อสูญเสียความชื้น



รูปที่ 3.7 จานหดตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องชั่ง (Balance):

การใช้งาน: ใช้ในการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างดินก่อนและหลังการทดสอบเพื่อหาค่าความชื้นของดินในแต่ละขั้นตอน

ลักษณะ: เครื่องชั่งที่ใช้ต้องมีความแม่นยำสูง เช่น 0.01 กรัม

3.1.2 เครื่องมือทดสอบ Flow table การทดสอบการไหลแผ่

Flow Table (โต๊ะกระจายตัว)

การใช้งาน: พื้นโต๊ะแบบแข็งแรงพร้อมกลไกยก/ปล่อยโต๊ะให้ตกกระทก ใช้สร้างแรงกระแทกให้มอร์ตาร์แผ่ออก เพื่อวัดความสามารถในการไหล

ลักษณะ: มักทำจาก เหล็กกล้า หรือ อลูมิเนียม เพื่อให้ทนทานต่อการใช้งาน ระบบยก-ปล่อย ให้โต๊ะตกลงจากความสูง $12.5 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ น้ำหนักประมาณ 13–15 กก. (แล้วแต่ผู้ผลิต)



รูปที่ 3.8 โต๊ะกระจายตัว

Flow Mold (แม่พิมพ์รูปทรงกรวยตัด):

การใช้งาน: ใช้เป็นแม่พิมพ์รองรับมอร์ตาร์ก่อนเริ่มการทดสอบ เพื่อให้มีรูปทรงเริ่มต้นที่แน่นอน ก่อนจะปล่อยให้แผ่ออก

ลักษณะ: ทำจากโลหะผิวเรียบ เช่น ทองเหลือง, เหล็กชุบสังกะสี, หรือ สแตนเลส ขนาด 50 mm x 100mm x 70mm ผิวเรียบ ไม่มีรอยขีดข่วน เพื่อไม่ให้มีผลต่อการปล่อยมอร์ตาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แม่พิมพ์รูปทรงกรวยตัด

Spatula / เกรียงเหล็ก:

การใช้งาน: สำหรับเติมมอร์ตาร์ลงในแม่พิมพ์ และปาดหน้ามอร์ตาร์ให้เรียบเสมอบนของแม่พิมพ์

ลักษณะ: ทำจาก สแตนเลส หรือ เหล็กกล้าเคลือบกันสนิม ใบมีดบาง แบน ตรง หรือปลายมน ขึ้นรูปให้เรียบเสมอกัน ความยาวใบประมาณ 150–200 mm, ความกว้างใบ 20–30 mm ด้ามจับมักเป็นไม้หรือพลาสติกแข็ง จับถนัดมือ ผิวเรียบ ไม่มีรอยขรุขระ ไม่ทำให้มอร์ตาร์ติดหรือหลุดรูปร่าง



รูปที่ 3.10 เกรียงเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาฬิกาจับเวลา (Stopwatch):

การใช้งาน: ใช้จับเวลาในการปล่อย Flow Table ให้ตกกระแทก 25 ครั้งภายใน 15 วินาที

ลักษณะ: แบบดิจิทัล หรือ อะนาล็อกก็ได้(นิยมใช้แบบดิจิทัลเพราะแม่นยำกว่า) แสดงเวลาเป็น นาที: วินาที:เสี้ยววินาที เช่น 00:15.00 ควรจับเวลาได้อย่างแม่นยำอย่างน้อยถึง 1/100 วินาที (0.01s) ตัวเรือนทำจาก พลาสติกแข็งแรงหรือยางกันกระแทก เพื่อความทนทานในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.11 นาฬิกาจับเวลา

เครื่องผสมมอร์ตาร์ (Mortar Mixer) (ถ้ามี):

การใช้งาน: ใช้ผสมมอร์ตาร์ให้ได้ส่วนผสมที่สม่ำเสมอ (ตาม ASTM C305) ก่อนนำมาทดสอบ

ลักษณะ: แบบตั้งโต๊ะ (Bench-top) หรือ แบบตั้งพื้น (Floor-type) มาตรฐาน ASTM C305 มักใช้ถึงขนาด 5 ลิตร (หรือประมาณ 5,000 มล.) ทำจาก สเตนเลส หรือ โลหะเคลือบกันสนิม รูปทรงพิเศษ ทำจากโลหะ ทนต่อแรงดันของมอร์ตาร์



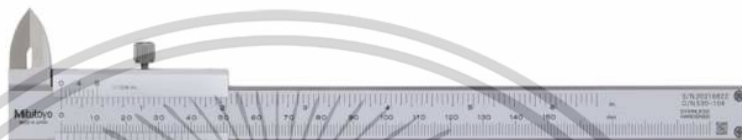
รูปที่ 3.12 เครื่องผสมมอร์ตาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม้บรรทัด / เวอร์เนียดิจิทัล:

การใช้งาน: ใช้วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของมอร์ตาร์ที่แผ่กระจายหลังการทดสอบ

ลักษณะ: โลหะ (มักเป็นสแตนเลส) ช่วงการวัด 0 – 150 mm หรือ 0 – 300 mm แล้วแต่รุ่น เปลี่ยนได้ทั้ง มิลลิเมตร (mm) และ นิ้ว (inch) มีปุ่ม ON/OFF, Zero, Unit สำหรับเปลี่ยนหน่วย



รูปที่ 3.13 ไม้บรรทัด / เวอร์เนียดิจิทัล

ภาชนะผสม (Mixing Bowl):

การใช้งาน: ภาชนะสำหรับผสมมอร์ตาร์ด้วยมือหรือตักออกจากเครื่องผสม

ลักษณะ: ทำจากสแตนเลส (Stainless Steel) – นิยมมากที่สุด เพราะไม่เกิดสนิม, ทำความสะอาดง่าย ความจุประมาณ 4 – 6 ลิตร ตามมาตรฐาน ASTM C305 (ใช้ขนาด 5 ลิตร เป็นมาตรฐานทั่วไป) ผิวเรียบ ลื่น เพื่อให้ปูนไม่ติดง่าย และทำความสะอาดง่าย



รูปที่ 3.14 ภาชนะผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ้าเช็ดโต๊ะ / แปรงเล็ก:

การใช้งาน: ใช้ทำความสะอาดพื้นผิวโต๊ะและแม่พิมพ์ก่อนเริ่มการทดสอบ เพื่อให้ผลแม่นยำ

ลักษณะ: ขนไนลอน, ขนพลาสติกอ่อน หรือขนธรรมชาติ ความยาวขนแปรง 2-3 ซม., ด้ามยาว 10-15 ซม. ขนาดกลางถึงอ่อน – เพื่อปิดเศษมอร์ตาร์โดยไม่ทำร้ายผิวอุปกรณ์ อาจมีหัวเฉียงหรือหัวตรง แล้วแต่ความถนัดของผู้ใช้



รูปที่ 3.15 ผ้าเช็ดโต๊ะ / แปรงเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 เครื่องมือทดสอบการรับแรงอัด

เครื่องทดสอบการอัด (Compression Testing Machine):

การใช้งาน: เครื่องหลักที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัว โดยจะสามารถปรับแรงอัดและบันทึกค่าผลการทดสอบ

ลักษณะ: เครื่องทดสอบนี้ประกอบด้วย แรงกด ที่สามารถปรับได้ และมี มาตรฐาน หรือ เซ็นเซอร์ เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของขนาดและการยึดหดของตัวอย่าง



รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบการอัด

แม่พิมพ์สำหรับตัวอย่าง (Specimen Mould):

การใช้งาน: ใช้สำหรับเตรียมตัวอย่างวัสดุที่จะทดสอบ เช่น ตัวอย่างคอนกรีต, ดิน, หรือวัสดุอื่น ๆ โดยจะมีขนาดที่ต้องการเพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐาน

ลักษณะ: โดยทั่วไปจะมีรูปทรงเป็น ทรงกระบอก หรือ ทรงลูกบาศก์ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ทดสอบ



รูปที่ 3.17 แม่พิมพ์สำหรับตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซ็นเซอร์วัดการเปลี่ยนรูป (Deformation Sensor)(ติดตั้งพร้อมเครื่องทดสอบแรงอัด):

การใช้งาน: ใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของรูปทรงของตัวอย่างที่ได้รับแรงอัด เพื่อช่วยในการคำนวณ โมดูลัสความยืดหยุ่น หรือ ค่าการยืดหยุ่นของวัสดุ

ลักษณะ: เซ็นเซอร์จะติดตั้งบนตัวอย่างหรือในเครื่องทดสอบเพื่อจับการยืดหรือหดตัวของตัวอย่างวัสดุ ขณะทดสอบ

เครื่องมือวัดแรง (Load Cell) (ติดตั้งพร้อมเครื่องทดสอบแรงอัด):

การใช้งาน: ใช้ในการวัด แรงอัด ที่กระทำกับตัวอย่างวัสดุในระหว่างการทดสอบ

ลักษณะ: เครื่องมือวัดแรงทำงานร่วมกับเครื่องทดสอบการอัดเพื่อให้สามารถบันทึกแรงที่ถูกกระทำกับ วัสดุและแสดงผลในรูปแบบของหน่วยแรง (เช่น นิวตัน หรือ กิโลกรัม)

เครื่องชั่ง (Balance):

การใช้งาน: ใช้ในการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างวัสดุก่อนการทดสอบ เช่น น้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตหรือ ดิน

ลักษณะ: เครื่องชั่งต้องมีความแม่นยำสูง เช่น ความละเอียด 0.01 กรัม หรือ 0.1 กรัม



รูปที่ 3.18 เครื่องชั่ง

3.2 การออกแบบการทดลอง

3.2.1 จำแนกดิน

การจำแนกประเภทของดินเป็นขั้นตอนสำคัญในการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ซึ่งในที่นี้ใช้วิธีการทดสอบ 3 ส่วนหลัก คือ:

1. การวิเคราะห์การกระจายขนาดเม็ดดิน (Sieve Analysis of Fine Aggregate)
2. การหาสัดส่วนวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอนโดยการล้าง (Materials Finer than 75 μm by Washing)
3. การทดสอบขีดจำกัดของดิน (Atterberg Limits Test)

ผลที่ได้จะถูกใช้เปรียบเทียบกับตารางจำแนกดิน (ระบบ Unified Soil Classification System หรือ USCS) โดยทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลและนำไปเปรียบเทียบตารางจำแนกดินตามลำดับดังต่อไปนี้

SIEVE ANALYSIS ใช้ผลทดสอบกับ

1. SIEVE ANALYSIS OF FINE AGGREGATE
2. MATERIALS FINER THAN 75 μm IN AGGREGATE BY WASHING OF FINE AGGREGATE

ขั้นตอนที่ 1 นำดินทรายแดงที่ต้องการทดสอบมาตากแดด หรืออบที่อุณหภูมิ 105–110°C จนแห้งสนิท (ไม่มีความชื้นตกค้าง) ใช้เครื่องชั่งน้ำหนักดินให้ได้ประมาณ 1,000 กรัมต่อชุดทดสอบ ในงานวิจัยนี้เตรียมไว้ 10 ชุด เพื่อความแม่นยำ แม้ใช้ดินชนิดเดียวกัน (สังเกต: ดินที่แห้งจะไม่จับตัวเป็นก้อน และสามารถร่อนผ่านตะแกรงได้ดี)

ขั้นตอนที่ 2 จัดเรียงตะแกรงในลำดับจาก ตะแกรงที่มีรูใหญ่ที่สุดอยู่ด้านบน ไปหา เล็กที่สุดด้านล่าง และจับที่ถาดรับ (pan) ตัวอย่างลำดับตะแกรงที่ใช้:

- 4.75 mm
- 2.36 mm
- 1.18 mm
- 600 μm (0.6 mm)
- 300 μm (0.3 mm)
- 150 μm (0.15 mm)
- 75 μm (0.075 mm)
- Pan (ถาดปิดล่างสุด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(หมายเหตุ: ต้องทำความสะอาดตะแกรงทุกครั้งก่อนใช้งาน เพื่อไม่ให้วัสดุตกค้างจาก รอบก่อนกระทบผลลัพธ์)

ขั้นตอนที่ 3 เทดินทรายแดง (ที่อบแห้งแล้ว) ลงบนตะแกรงชั้นบนสุดอย่างช้า ๆ ไม่ให้ กระจายออกนอกตะแกรง ปิดฝาตะแกรงให้เรียบร้อย และนำชุดตะแกรงวางลงในเครื่องเขย่า เปิดเครื่อง เขย่าเป็นเวลา 10–15 นาที (ความเร็วประมาณ 200–300 รอบต่อนาที) หากไม่มีเครื่องเขย่า: ให้ใช้มือจับ ตะแกรงแล้วเขย่าด้วยแรงสม่ำเสมอเป็นเวลาเท่ากัน โดยใช้ท่าขยับตะแกรงแบบวงกลมหรือขึ้น-ลง ประมาณ 1 รอบ/วินาที

(สังเกต: ไม่ควรเขย่าแรงเกินไปจนวัสดุกระเด็น หรือเบาเกินไปจนวัสดุไม่แยก)

ขั้นตอนที่ 4 แยกตะแกรงออกทีละชั้น ใช้แปรงปัดหรือเคาะเบา ๆ ให้วัสดุที่ค้างหล่นลง ให้หมด ชั่งน้ำหนักวัสดุที่ค้างบนแต่ละตะแกรง และจดบันทึก จำนวนดังนี้:

$$\text{เปอร์เซ็นต์ค้างในแต่ละตะแกรง} = (\text{น้ำหนักค้าง} \div \text{น้ำหนักรวม}) \times 100$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ผ่านสะสม} = 100 - \sum \text{เปอร์เซ็นต์ค้างสะสมจากตะแกรงบน}$$

(ตรวจสอบ: น้ำหนักรวมของวัสดุที่ค้างทุกตะแกรงรวมกับที่อยู่ใน pan ต้องใกล้เคียง น้ำหนักเริ่มต้น $\pm 1-2\%$)

ขั้นตอนที่ 5 บันทึกผลทั้งหมดลงในตาราง นำข้อมูลไปพล็อตกราฟ กรอบค่าสัดส่วน ขนาด (Particle Size Distribution Curve) โดย

แกน X: ขนาดรูตะแกรง (ในหน่วย log scale)

แกน Y: % ผ่านสะสม (Cumulative Passing %)

Materials Finer than 75 μm by Washing

ขั้นตอนเพิ่มเติมหลังการร่อน (ถ้ามี)

ขั้นตอนที่ 1 หลังการร่อนจากขั้นตอน Sieve Analysis ให้นำวัสดุที่ตกผ่านตะแกรง 75 μm เทใส่ถ้วยหรือกระบอแก้วสำหรับล้าง

ขั้นตอนที่ 2 เติมน้ำลงในถ้วยจนท่วมวัสดุ แล้วกวนอย่างเบามือให้ผงละเอียดแขวนลอย ในน้ำที่มึนที่มีผงละเอียดออกผ่านกระดาษกรองหรือตะแกรงตาถี่ (ห้ามทิ้งดินในน้ำเด็ดขาด!) ทำซ้ำขั้นตอน นี้หลาย ๆ ครั้งจนกว่าน้ำที่เทออกจะ “ใส” และไม่มีดินเหนียวปนอีก (สังเกต: น้ำต้องใส ไม่มีเมฆสีเทา หรือขุ่น)

ขั้นตอนที่ 3 รวบรวมวัสดุที่ล้างแล้วลงในกระป๋องตัวอย่าง นำไปอบแห้งในเตาอบ (105–110°C) จนแห้งสนิทชั่งน้ำหนักอีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณปริมาณวัสดุละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เปอร์เซ็นต์วัสดุละเอียดกว่า 75 } \mu\text{m} = \frac{\text{น้ำหนักวัสดุที่เหลือหลังล้าง}}{\text{น้ำหนักดินทรายแดงแห้งก่อนล้าง}} \times 100$$

ATTERBERG LIMITS TEST

มีทดสอบหาค่า 3 ค่าเพื่อเข้าสู่ตรรกะคำนวณค่าขีดจำกัดของดิน เพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของดินในสภาพเปียก → แห้ง และคำนวณดัชนีความเหนียว เช่น Plasticity Index (PI)

$$PI = LL - PL$$

1. Liquid Limit (LL)

2. Plastic Limit (PL)

3. Shrinkage Limit (SL) เลือกทำหรือไม่ทำก็ได้ (ขึ้นอยู่กับผลการทดสอบ 1 และ 2 ว่าเพียงพอต่อการสรุปผลหรือไม่)

Liquid Limit Test (LL) – ขีดจำกัดเหลว

ขั้นตอนที่ 1 นำดินตัวอย่างที่เก็บมาแล้วมาผ่านตะแกรงเบอร์ 40 โดยใช้มือหรือแปรงขนอ่อนช่วยให้ดินร่วนซุย ผ่านตะแกรงให้หมด (เฉพาะดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.425 มม. เท่านั้น) นำดินที่ร่อนแล้วไปใส่ในภาชนะผสมเติมน้ำสะอาดทีละน้อย (ใช้ขวดหยดหรือฝักบัวรดเบา ๆ) และใช้เกรียงคลุกเคล้าดินอย่างช้า ๆ ผสมให้ดินมีลักษณะคล้ายครีมข้น ไม่เหลวจนไหล หรือแห้งจนแตก (สังเกต: ดินควรเหนียวปาดแล้วไม่ยุบตัวเอง)

ขั้นตอนที่ 2 ใช้เกรียงตักดินลงในถ้วยทองเหลืองของเครื่อง Casagrande ใช้เกรียงปาดให้ดินแน่นเต็มถ้วย โดยไล่ฟองอากาศออก และให้ผิวหน้าดินเรียบเสมอบนถ้วย (สังเกต: ไม่ควรกดแรงจนแน่นเกินไป หรือทิ้งฟองอากาศไว้ภายใน)

ขั้นตอนที่ 3 ใช้เครื่องมือเหล็กตัดร่องตามแนวยาวของถ้วยดินตัดให้ลึกถึงก้นถ้วย เป็นรูปตัว V ที่มีมุม 45° และกว้างประมาณ 2 มม. ที่ก้นร่อง (สังเกต: ร่องต้องตรง สะอาด ไม่เบี้ยวหรือเป็นซิกแซก)

ขั้นตอนที่ 4 หมุนคันโยกของเครื่อง Casagrande ให้ถ้วยทองเหลืองกระทบพื้นแข็งด้วยจังหวะ 1 ครั้งต่อวินาที จับเวลาพร้อมนับจำนวนครั้งที่ถ้วยกระทบ (สังเกต: ขณะถ้วยกระทบ ให้ดูร่องดินตรงกลาง คอยสังเกตว่า “ร่องปิดตัว” หรือ “ปลายร่องบรรจบกัน” ยาวประมาณ 12 มม. หรือ 1.2 ซม.)

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อร่องปิดตามเกณฑ์แล้ว (เช่น ไข่ไป 25 ครั้ง), ให้ใช้เกรียงตักดินบริเวณตรงกลาง (บริเวณที่ร่องปิด) ใส่ดินลงในกล่องอลูมิเนียม หรือกระป๋องเก็บตัวอย่าง ชั่งน้ำหนักกล่องพร้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดินเปียก และ จดบันทึก นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105–110°C เป็นเวลา 16–24 ชั่วโมง นำออกมาชั่ง น้ำหนักอีกครั้ง (กล่อง + ดินแห้ง) คำนวณ % ความชื้นจากสูตร:

$$\text{Moisture content (\%)} = \frac{W_{\text{wet}} - W_{\text{dry}}}{W_{\text{dry}}} \times 100$$

ขั้นตอนที่ 6 เก็บตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบ → ชั่งน้ำหนัก → นำไปอบให้แห้ง

ขั้นตอนที่ 7 ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1–5 อีก 4–6 รอบ โดยเพิ่มหรือลดปริมาณน้ำในดิน

แต่ละชุด เก็บข้อมูล “% ความชื้น” และ “จำนวนครั้งที่ร่อนปิด” ของแต่ละรอบ

ตัวอย่างเช่น:

รอบที่ 1: ร่อนปิดที่ 15 ครั้ง เท่ากับ ความชื้น 35%

รอบที่ 2: ร่อนปิดที่ 20 ครั้ง เท่ากับ ความชื้น 32%

รอบที่ 3: ร่อนปิดที่ 25 ครั้ง เท่ากับ ความชื้น 29%

รอบที่ 4: ร่อนปิดที่ 30 ครั้ง เท่ากับ ความชื้น 27%

ขั้นตอนที่ 8 สร้างกราฟ “แกนนอน = $\log(\text{Number of Blows})$ ” กับ “แกนตั้ง = Moisture Content (%)” ลากเส้นแนวนิ่งผ่านจุดทั้งหมด ดูจุดที่จำนวน Blows = 25 แล้ว อ่านค่า Moisture Content ที่ตรงกับจุดนี้

ซึ่งค่านั้นคือ Liquid Limit (LL)

Plastic Limit (PL)

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมดินตัวอย่างที่ผ่านตะแกรง No. 40 (รู 0.425 มม.) ให้สะอาด ไม่มีเศษวัชพืชหรือกรวดหยาบ เติมน้ำสะอาดที่ล้นน้อยลงในดิน แล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน โดยใช้มือหรือเกรียง เหล็กผสมจนดินมีลักษณะ เหนียวและสามารถปั้นได้โดยไม่ติดมือมาก (สังเกต: ดินควรอยู่ในสภาพที่สามารถจับตัวเป็นก้อนกลมได้ และไม่เหลวจนไหล หรือแห้งจนแตกร่วน)

ขั้นตอนที่ 2 หยิบดินขนาดประมาณ 1 กรัม (เท่าเม็ดถั่วเขียว) มาปั้นเป็นเส้นกลม วางบนพื้นผิวเรียบ เช่น แผ่นกระจก หรือโต๊ะโลหะสะอาดใช้ปลายนิ้วทั้งสองข้าง กลิ้งดินไปมาช้า ๆ ให้ได้เส้นกลมยาว

ใช้แรง สม่่าเสมอ

กลิ้งไปและกลิ้งกลับในระยะ 90–100 มม. ต่อรอบ

ความเร็วประมาณ 90 รอบต่อนาที

กลิ้งไปเรื่อย ๆ จนเส้นดินมี เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.2 มม. (1/8 นิ้ว) (สังเกต: หากดิน แตก หรือ ฉีกขาด เมื่อเส้นมีขนาด 3.2 มม. แสดงว่าถึงขีดจำกัดพลาสติก) ให้ทำซ้ำหลายรอบ (3 ชุด) เพื่อให้ได้ผลเฉลี่ยที่แม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 ทันทึที่เส้นดินเกิดการแตก ให้หีบเศษดินส่วนนั้นใส่ลงในกระป๋องตัวอย่าง (ที่สะอาดและแห้ง) ปิดฝาให้สนิทเพื่อป้องกันการระเหยซึ่งน้ำหนักตัวอย่างดินเปียก (Wet weight) เปิดฝา แล้วนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105–110°C อย่างน้อย 16 ชั่วโมง หรือจนแห้งสนิทนำออกมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาน้ำหนักแห้ง (Dry weight)

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าความชื้น

$$\text{Plastic Limit (PL)} = \frac{\text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักแห้ง}} \times 100$$

ค่าที่ได้คือ % ความชื้นของดิน ในขณะที่เกิดการแตกตอนกลิ้ง → นั่นคือค่าขีดจำกัดพลาสติก (PL)

Shrinkage Limit (SL) เลือกทำหรือไม่ทำก็ได้ (ขึ้นอยู่กับผลการทดสอบ 1 และ 2 ว่าเพียงพอต่อการสรุปผลหรือไม่)

ขั้นตอนที่ 1 ร่อนดินผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (รู 0.425 มม.) เติมน้ำสะอาดลงไปทีละน้อย แล้วคนให้เข้ากัน จนดินมีลักษณะเหมือน “ครีมข้น” ไม่เหลวเกินไป และไม่ข้นจนขาดความต่อเนื่องใช้เกรียงเหล็กหรือช้อนคนให้ดินเนียน ไม่มีก้อน

ขั้นตอนที่ 2 เตรียมจานอลูมิเนียมหรือภาชนะทดสอบ (Shrinkage Dish) ให้สะอาดและแห้ง ทาจาระบีหรือน้ำมันเครื่องบาง ๆ ด้านในจาน เพื่อกันดินเกาะแน่น ค่อย ๆ เทดินที่ผสมไว้ลงจาน ทีละชั้น ใช้ไม้พายหรือเกรียง กดเบา ๆ ไล่อากาศ ทีละชั้น เติมนจนเต็มขอบจาน และ ปาดให้เรียบเสมอขอบ (ระวัง: อย่าให้เกิดฟองอากาศหรือช่องว่างด้านใน เพราะจะทำให้ผลคลาดเคลื่อน)

ขั้นตอนที่ 3 ชั่งน้ำหนักขณะเปียก (W_1) ใช้เครื่องชั่งละเอียด (ความละเอียด 0.01 กรัม) ชั่งน้ำหนักของ “จาน + ดินเปียก” แล้วบันทึกไว้เป็น W_1

ขั้นตอนที่ 4 วางจานดินในอากาศ ปล่อยให้แห้งเอง 24 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการแตกร้าว จากนั้นนำเข้าเตาอบ (Oven) ที่อุณหภูมิ 105–110°C อบจนดินแห้งสนิท (อย่างน้อย 16 ชั่วโมง)

ขั้นตอนที่ 5 ชั่งน้ำหนักดินแห้ง (W_2) เมื่อดินเย็นลง ให้นำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง บันทึกน้ำหนัก “จาน + ดินแห้ง” เป็น W_2 น้ำหนักดินแห้ง (W_d) = W_2 - น้ำหนักจานเปล่า

ขั้นตอนที่ 6 หาปริมาตรดินแห้ง (V_d) วิธีที่ 1: ใช้ปรอท (แม่นยำกว่า) วางดินแห้งลงในภาชนะ ค่อย ๆ เติมปรอทจนพอดีกับขอบผิวหน้าดิน ชั่งน้ำหนักปรอทที่ใช้ แล้วคำนวณ:

$$V_d = \frac{\text{น้ำหนักปรอท (g)}}{13.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีที่ 2: ใช้เวอร์เนีย (Caliper) วัดความยาว กว้าง และสูงของก้อนดินคำนวณปริมาตร (หากก้อนมีทรงสม่ำเสมอ)

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณค่า Shrinkage Limit (SL)

สูตร:

$$SL = \frac{(W_w - W_d) - (V_w - V_d) \cdot \rho_w}{W_d} \times 100$$

โดยที่:

W_w = น้ำหนักดินเปียก (W_1 - น้ำหนักจาน)

W_d = น้ำหนักดินแห้ง

V_w = ปริมาตรจาน (วัดล่วงหน้า, ใช้ตลับเมตรวัดแล้วคำนวณ)

V_d = ปริมาตรดินแห้ง (จากขั้นตอน 6)

ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ = 1.0 g/cm³

3.2.2. ทดสอบ Flow table การทดสอบการไหลแผ่

ขั้นตอนที่ 1 ทำความสะอาดโต๊ะ Flow Table และแม่พิมพ์ทรงกรวยตัด (Flow Mold) ให้ไม่มีเศษวัสดุเกาะวางแม่พิมพ์ทรงกรวยไว้ตรงกลางโต๊ะ กดให้แน่นเพื่อไม่ให้เคลื่อนตอนใส่ดินซีเมนต์

ขั้นตอนที่ 2 ผสมดินซีเมนต์ตามอัตราส่วน 1:2.75 (ดิน : ซีเมนต์) และปริมาณน้ำที่กำหนด(ต้องสุ่มเพื่อลองหาพิกัดค่าน้ำของแต่ละสูตร) เติมน้ำซีเมนต์ลงในแม่พิมพ์ เป็น 2 ชั้น กดแน่นเบา ๆ ด้วยเกรียง เพื่อไล่อากาศ ไม่อัดแน่นเกินไป เพื่อให้ได้ผลที่เป็นธรรมชาติของวัสดุ ปาดผิวหน้าดินซีเมนต์ให้เรียบเสมอขอบแม่พิมพ์

ขั้นตอนที่ 3 ค่อย ๆ ยกแม่พิมพ์ ในแนวตั้ง อย่างช้า ๆ ระวังไม่ให้เกิดแรงสะท้อนหรือสั่นกระทบเนื้อวัสดุดินซีเมนต์ควรทรงตัวและเริ่มไหลออกจากรูปทรงกรวย

ขั้นตอนที่ 4 ภายในเวลา 15 วินาทีหลังจากยกแม่พิมพ์ออก ปลดปล่อยโต๊ะให้ตกกระแทก 25 ครั้ง ภายใน 15 วินาที ใช้มือดึงล็อกโต๊ะแล้วปล่อยให้ตกอย่างสม่ำเสมอ แต่ละจังหวะตกต้อง “เสมอ กัน” เพื่อความแม่นยำในการวัด(วิธีการใช้งานเครื่องคือหมุนมือจับจนครบรอบโต๊ะจะตกกระแทก 1 ครั้ง)

ขั้นตอนที่ 5 วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุที่แผ่ออก (4 ทิศทาง) แล้วหารเฉลี่ย บันทึกเป็นค่า “Flow Diameter (mm)” หรือเปรียบเทียบกับ “% Flow” จากขนาดแม่พิมพ์

3.2.3. ทดสอบการรับแรงอัด

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมแม่พิมพ์ให้พร้อมแกะแบบออกมา ทำความสะอาดแม่พิมพ์โลหะให้เรียบร้อย ทาน้ำมันบาง ๆ ภายในแม่พิมพ์เพื่อป้องกันการติดและประกอบกลับเข้าไปให้เหมือนเดิม

ขั้นตอนที่ 2 ผสมวัสดุตามอัตราส่วน 1:2.75 (ดิน : ซีเมนต์/ทราย : ซีเมนต์) เติมน้ำในปริมาณที่เหมาะสม (ตามการทดลองการไหลแม่) ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันจนได้ลักษณะพลาสติกเหมาะแก่การขึ้นรูป

ขั้นตอนที่ 3 เทลงแม่พิมพ์และอัดแน่นทั่ววัสดุลงในแม่พิมพ์เป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นให้ใช้แท่งเหล็ก/ไม้เขี่ย หรือ เครื่องสั่น เพื่อไล่อากาศ ปาดผิวหน้าชิ้นงานให้เรียบเสมอขอบแม่พิมพ์

ขั้นตอนที่ 4 การบ่มตัวอย่างทิ้งให้ตัวอย่างเซตตัวในแม่พิมพ์อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ในอุณหภูมิห้องแม่พิมพ์อย่างระมัดระวัง และนำตัวอย่างไปพันด้วยพลาสติกห่ออาหาร(เพื่อหยุด ค่าน้ำในซีเมนต์) บ่มตามระยะเวลาที่กำหนด 1, 3, 7, และ 28 วัน

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบผิวหน้าชิ้นงานต้องเรียบ ไม่มีรอยแตกร้าว บิ่น หรือบิดเบี้ยว วัดขนาดชิ้นงานเพื่อใช้คำนวณพื้นที่หน้าตัด โดยตัวอย่างที่ใช้มีขนาดและรูปทรงเป็นลูกบาศก์ขนาด 50 × 50 mm พื้นที่รับแรง = กว้าง × ยาว = 2,500 mm²

ขั้นตอนที่ 6 เปิดเครื่องทดสอบ และตั้งค่าให้พร้อมใช้งาน กำหนดอัตราการเพิ่มโหลด (Loading Rate) ให้เป็นไปตามมาตรฐาน 0.25 MPa/sec ไม่เกิน 0.35 MPa/sec (ตามมาตรฐาน ASTM C109) ตรวจสอบการทำงานของระบบบันทึกค่าแรง (Load Cell)

ขั้นตอนที่ 7 เซตผิวหน้าชิ้นงานให้สะอาด ปราศจากเศษวัสดุวางชิ้นงานให้ ตั้งฉาก และอยู่ใน ตำแหน่งศูนย์กลางของเครื่องกดปรับหัวกดลงมาแตะผิวชิ้นงาน เบา ๆ เพื่อให้แนบสนิท

ขั้นตอนที่ 8 เริ่มปล่อยแรงกดอย่างต่อเนื่องตามอัตราที่ตั้งไว้ เครื่องจะบันทึก ค่าแรงกดสูงสุด (Maximum Load) จุดที่ชิ้นงานแตกร้าวถือเป็นค่ากำลังอัดสูงสุด

ขั้นตอนที่ 9 จดบันทึกผลการทดสอบบันทึกค่ากำลังอัดที่วัดได้ในหน่วย N/mm² หรือ MPa ใช้สูตร:

$$\text{Compressive Strength} = \frac{\text{Maximum Load (N)}}{\text{Area (mm}^2\text{)}}$$

บันทึกวันอายุของชิ้นงาน 1, 3, 7 และ 28 วัน และสภาพการเก็บรักษาก่อนทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

3.4.1. จำแนกดิน

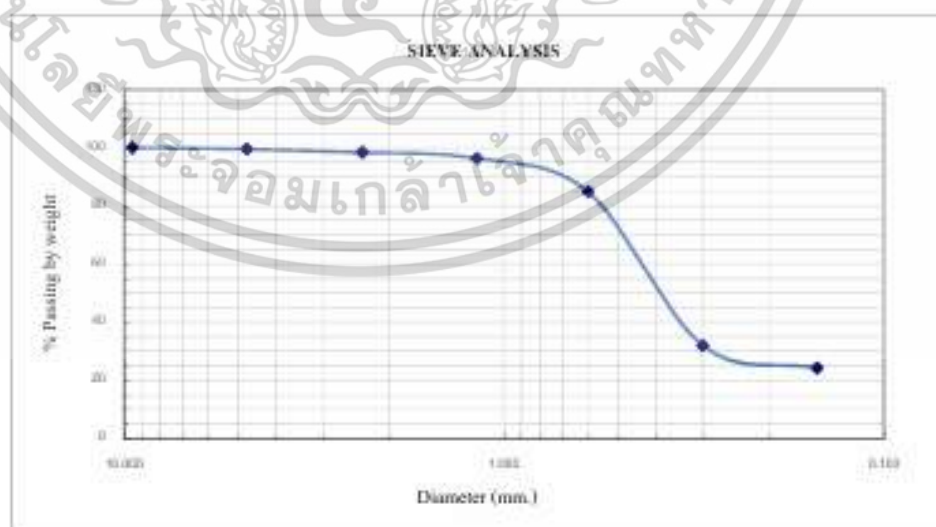
ขั้นตอนที่ 1 เก็บข้อมูล SIEVE ANALYSIS OF FINE AGGREGATE เพื่อจำแนกดินผ่าน ปริมาณเม็ดดินขนาดต่างๆผ่านตะแกรงและเปรียบเทียบกับตารางเพื่อจำแนกประเภท ดินเบื้องต้น

คำนวณ Fineness Modulus (FM) ด้วยสูตร: $FM = \frac{\text{ผลรวมเปอร์เซ็นต์ค้ำงสะสมบน ตะแกรงมาตรฐาน (No.4 ถึง No.100)}}{100}$

พล็อตกราฟ ขนาดตะแกรง (แกนนอน - log scale) vs. เปอร์เซ็นต์ผ่านสะสม (แกนตั้ง)

Sieve Number Size in inch, (mm.)	Weight Sieve (gm.)	Weight Sieve - Soil (gm.)	Retained (gm.)	Retained (%)	Accumulative Retained (%)	Passing (%)
3/8" (9.5)	771.47	771.47	0.00	0.00	0.00	100.00
No.4 (4.75)	769.46	774.05	4.59	0.46	0.46	99.54
No.10 (2.00)	447.97	459.52	11.55	1.16	1.61	98.39
No.20 (0.85)	380.55	400.29	19.74	1.97	3.59	96.41
No.40 (0.425)	350.30	465.62	115.32	11.53	15.12	84.88
No.100 (0.15)	325.50	854.73	529.23	52.92	68.04	31.96
No.200 (0.075)	509.37	586.12	76.75	7.68	75.72	24.28
Pan	347.67	590.49	242.82	24.28	100.00	0.00
Total			1000.00	100.00		

รูปที่ 3.19 ตัวอย่างตารางเก็บข้อมูล SIEVE ANALYSIS OF FINE AGGREGATE



รูปที่ 3.20 ตัวอย่างตารางพล็อตกราฟ SIEVE ANALYSIS OF FINE AGGREGATE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2 เปรียบเทียบกับตารางเพื่อจำแนกประเภทดินเบื้องต้น

การจำแนกประเภททั่วไป		สัญลักษณ์กลุ่ม	ชื่อกลุ่มดิน	เกณฑ์การจำแนกประเภท			
ดินพวกเม็ดทราย ส่วนตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่าหรือเท่ากับ 50%	กรวด ห้ามตะแกรงเบอร์ 4 มากกว่าหรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของส่วนที่เป็นเม็ดทราย	กรวดขนาดเม็ดละเอียดปนอยู่บ้างหรือไม่เลย	GW	กรวดมีขนาดละเอียด กรวดผสมทรายมีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่เลย	C _u มากกว่า 4 C _c อยู่ระหว่าง 1-3		
			GP	กรวดมีขนาดละเอียด กรวดผสมทรายมีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่	ไม่เข้าเกณฑ์ประเภท GW		
		กรวดมีเม็ดละเอียดปน	GM	กรวดมีตะกอนทรายปน กรวด-ทราย-ตะกอนทรายผสมกัน	Atterberg limits อยู่ได้ เส้น A หรือ P.I. < 4	Atterberg limits อยู่ใน Hatched โซนถือว่า คาบเกี่ยวกันใช้ สัญลักษณ์ 4 ตัว	
			GC	กรวดดินเหนียวปน กรวด-ทราย-ดินเหนียวผสมกัน	Atterberg limits อยู่เหนือ เส้น A หรือ P.I. > 7		
		ทราย ห้ามตะแกรงเบอร์ 4 มากกว่าหรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของส่วนที่เป็นเม็ดทราย	ทรายละเอียดปนอยู่บ้างหรือไม่เลย	SW	ทรายมีขนาดละเอียด ทรายปนกรวดมีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่	C _u มากกว่า 6 C _c อยู่ระหว่าง 1-3	
				SP	ทรายมีขนาดละเอียด ทรายปนกรวดมีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่	ไม่เข้าเกณฑ์ประเภท SW	
	ทรายเป็นเม็ดละเอียดปน		SM	ทรายมีตะกอนทรายปน ทราย-ตะกอนทรายผสมกัน	Atterberg limits อยู่ได้ เส้น A หรือ P.I. < 4	Atterberg limits อยู่ใน Hatched โซนถือว่า คาบเกี่ยวกันใช้ สัญลักษณ์ 4 ตัว	

การจำแนกประเภทของดิน โดยอาศัยวิธีใช้เส้นเชื่อมดินพวกเม็ดละเอียด
 ส่วนตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่า 5% : GW GP SW SP
 ส่วนตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 12% : GM GC SM SC
 ส่วนตะแกรงเบอร์ 200 ระหว่าง 5%-12% : คาบเกี่ยวกัน ใช้สัญลักษณ์ 4 ตัว

รูปที่ 3.21 ตัวอย่างตารางเปรียบเทียบข้อมูล SIEVE ANALYSIS OF FINE AGGREGATE

ขั้นตอนที่ 3 เก็บข้อมูลและเปรียบเทียบฝุ่นผงในตัววัสดุ หรือชื่อผลการเก็บข้อมูล MATERIALS FINER THAN 75 µm IN AGGREGATE BY WASHING OF FINE AGGREGATE

MATERIALS FINER THAN 75 µm IN AGGREGATE
BY WASHING OF FINE AGGREGATE

Project :
Sample From :
Sample Description :

Req. No. 67-2881
Req. Date : 27-11-2024
Date of Testing : 17-12-2024

Determination	Sample No.1
Original dry weight of sample, gm	1,000.00
Dry weight of sample after washing, gm	757.18
Materials finer than no.200 sieve, gm	242.82
The percentage of material finer than no.200 sieve, %	24.28

รูปที่ 3.22 ตัวอย่างตารางเปรียบเทียบข้อมูล MATERIALS FINER THAN 75 µm IN AGGREGATE BY WASHING OF FINE AGGREGATE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

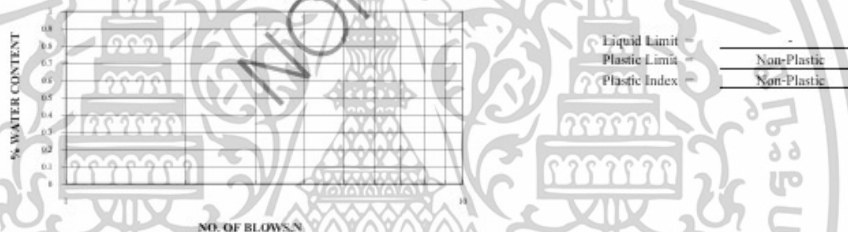
ขั้นตอนที่ 4 เก็บข้อมูลและเปรียบเทียบ ATTERBERG LIMITS TEST

ATTERBERG LIMITS TEST

Project : - Req. No. 67-2881
 Sample From : - Req. Date : 27-11-2024
 Sample Description : - Date of Testing : 17-12-2024

LIQUID LIMIT TEST :					
No. of Blows (N)					
Wet Soil + Can (g)					
Dry Soil + Can (g)					
Weight of Can (g)					
Weight of Water (g)					
Weight of Dry Soil (g)					
% Water Content					

PLASTIC LIMIT TEST					
Trial No.					
Wet Soil + Can (g)					
Dry Soil + Can (g)					
Weight of Can (g)					
Weight of Water (g)					
Weight of Dry Soil (g)					
% Water Content					



รูปที่ 3.23 ตัวอย่างตารางเปรียบเทียบข้อมูล ATTERBERG LIMITS TEST

ขั้นตอนที่ 5 สรุปประเภทของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2. ทดสอบ Flow table การทดสอบการไหลแม่

ขั้นตอนที่ 1 วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของมอร์ตาร์ที่แผ่ออก 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกันใช้ไม้บรรทัดหรือเวอร์เนียร์ วัด และหาค่าเฉลี่ย

ขั้นตอนที่ 2 จดข้อมูลผลการทดสอบและค่าเฉลี่ย ใช้สูตร: $\text{Flow (\%)} = [(D - D_0) / D_0] \times 100$

D = ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางหลังแม่ (มม.)

D_0 = เส้นผ่านศูนย์กลางแม่พิมพ์ = 100 mm (มาตรฐาน ASTM C1437)

ตัวอย่าง:

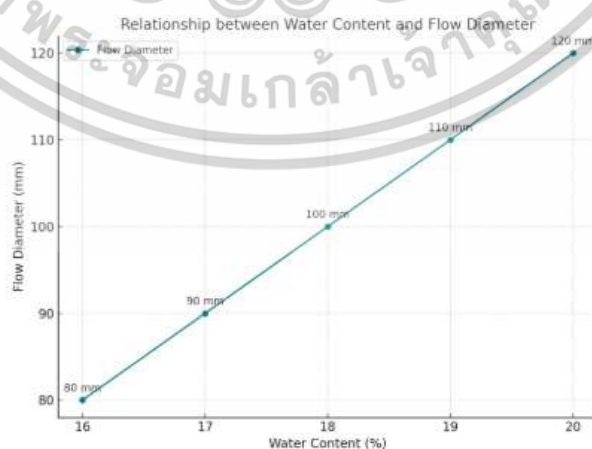
ถ้ามอร์ตาร์แผ่ได้ค่าเฉลี่ย 165 mm $\rightarrow \text{Flow} = [(165 - 100) / 100] \times 100 = 65\%$

Sample No.	Water Content (%)	Flow Diameter 1 (mm)	Flow Diameter 2 (mm)	Average Diameter (mm)
1	14.0	115	120	117.5
2	15.5	125	130	127.5
3	17.0	135	140	137.5
4	18.5	150	155	152.5
5	20.0	165	170	167.5

รูปที่ 3.24 ตารางข้อมูลผลการทดสอบแรงอัด

ขั้นตอนที่ 3 สรุปลข้อมูลเป็นกราฟเส้น โดยค่าการไหลแม่ที่ดีที่สุดคือ 105%-115%

ตัวอย่างกราฟข้อมูลเชิงเส้น



รูปที่ 3.25 สรุปลข้อมูลเป็นกราฟเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3. ทดสอบการรับแรงอัด

ขั้นตอนที่ 1 บันทึกค่าแรงสูงสุดที่เครื่องแสดงก่อนที่ชิ้นงานแตก หน่วยทั่วไป: kN (กิโลนิวตัน) หรือ N

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าความต้านทานแรงอัด (Compressive Strength)

$$f_c = \frac{P}{A}$$

f_c = ความต้านทานแรงอัด (MPa)

P = แรงที่ชิ้นงานรับได้ก่อนแตก (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (mm^2)

ตัวอย่าง:

แรงที่รับได้ = 100,000 N

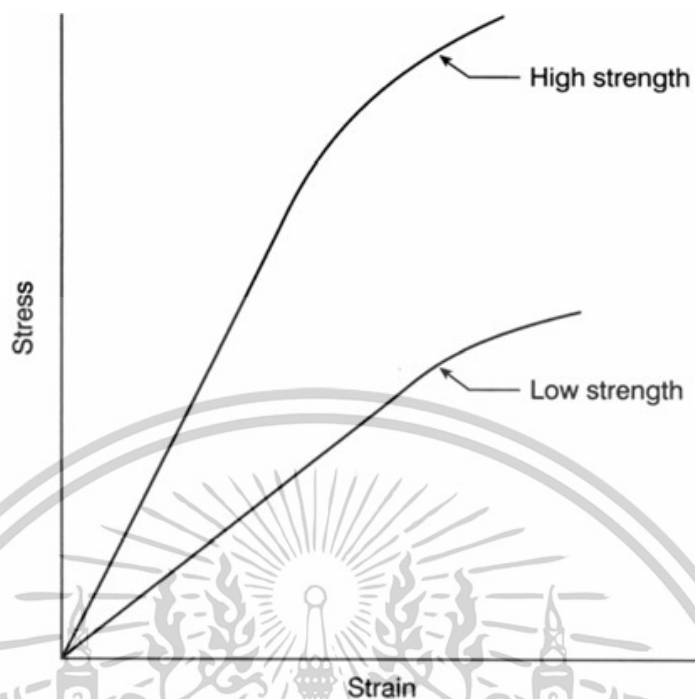
พื้นที่หน้าตัด = 50 mm × 50 mm = 2,500 mm^2

$$f_c = \frac{100,000}{2,500} = 40 \text{ MPa}$$

วันทดสอบ (Age)	ตัวอย่างที่	กำลังอัด (kN)	พื้นที่หน้าตัด (mm^2)	กำลังอัด (MPa) = แรง / พื้นที่
1 วัน	1	4,100	2,500	1.64
	2	4,250	2,500	1.70
	3	4,000	2,500	1.60
3 วัน	1	6,800	2,500	2.72
	2	7,000	2,500	2.80
	3	6,750	2,500	2.70
7 วัน	1	9,200	2,500	3.68
	2	9,100	2,500	3.64
	3	9,300	2,500	3.72
28 วัน	1	11,500	2,500	4.60
	2	11,700	2,500	4.68
	3	11,600	2,500	4.64

รูปที่ 3.26 ตัวอย่างตารางเก็บข้อมูลผลทดสอบการรับแรงอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 ตัวอย่างกราฟข้อมูลเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

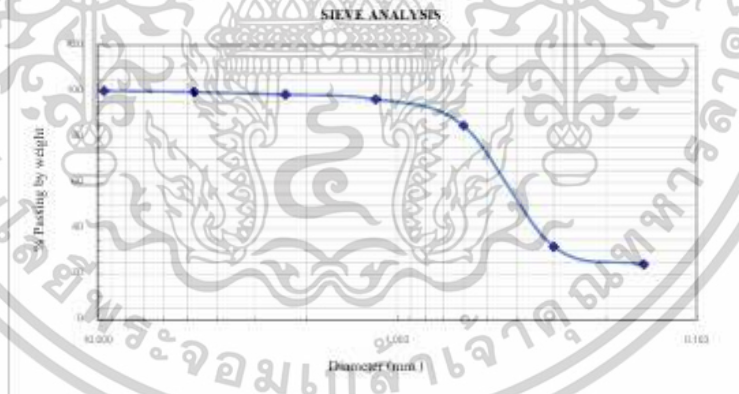
บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการจำแนกดิน

SIEVE ANALYSIS OF FINE AGGREGATE

Project :	-	Req. No.	67-2881			
Sample From :	-	Req. Date :	27-11-2024			
Sample Description :	-	Date of Testing :	17-12-2024			
Sieve Number Size in inch, (mm.)	Weight Sieve (gm.)	Weight Sieve + Soil (gm.)	Retained (gm.)	Retained (%)	Accumulative Retained (%)	Passing (%)
3/8" (9.5)	771.47	771.47	0.00	0.00	0.00	100.00
No.4 (4.75)	769.46	774.05	4.59	0.46	0.46	99.54
No.10 (2.00)	447.97	459.52	11.55	1.16	1.61	98.39
No.20 (0.85)	380.55	400.29	19.74	1.97	3.59	96.41
No.40 (0.425)	350.30	465.62	115.32	14.53	15.12	84.88
No.100 (0.15)	325.50	854.73	529.23	52.92	68.04	31.96
No.200 (0.075)	509.37	586.12	76.75	7.68	75.72	24.28
Pan	347.67	590.49	242.82	24.28	100.00	0.00
Total			1000.00	100.00		



Note :

- 1) Certification applies to test samples only.
- 2) No erasure or alterations.
- 3) Test method reference: ASTM C33

Tested by : _____
Mr.Theerudetch Kumwilai

Certified by : _____

รูปที่ 4.1 ผลการจำแนกดิน

ดินจากชัยภูมิที่นำมาใช้ผ่านกระบวนการร่อนเพื่อวิเคราะห์ขนาดอนุภาคพบว่าเป็นดินเม็ดละเอียดระดับ fine aggregate มีค่าร้อยละผ่านตะแกรงที่บ่งชี้ว่าอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถใช้ทำดินซีเมนต์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**MATERIALS FINER THAN 75 μm IN AGGREGATE
BY WASHING OF FINE AGGREGATE**

Project :	-	Req. No.	67-2881
Sample From :	-	Req. Date :	27-11-2024
Sample Description :	-	Date of Testing :	17-12-2024

Determination	Sample No.1
Original dry weight of sample, gm	1,000.00
Dry weight of sample after washing, gm	757.18
Materials finer than no.200 sieve, gm	242.82
The percentage of material finer than no.200 sieve, %	24.28

Note :

- 1) Certification applies to test samples only.
- 2) No erasure or alterations.

Tested by :

Mr.Theeradetch Kumwilai

Certified by :

รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบผ่านผ่านตะแกรงเบอร์ 200

ดินมีองค์ประกอบฝุ่นละเอียด (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) ในปริมาณที่ไม่สูงเกินไป จึงไม่กระทบต่อกำลังอัดมากนัก

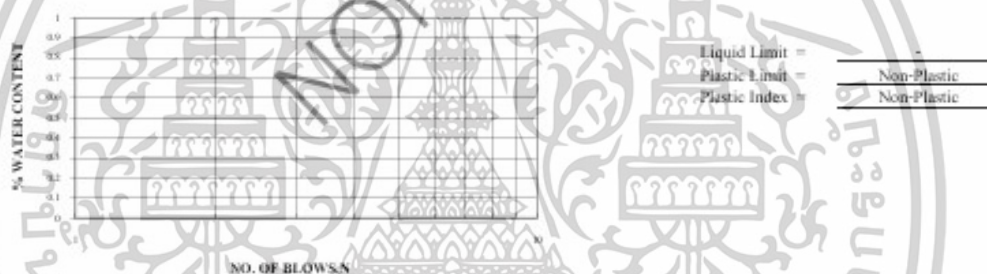
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ATTERBERG LIMITS TEST

Project : - **Req. No.** 67-2881
Sample From : - **Req. Date :** 27-11-2024
Sample Description : - **Date of Testing :** 17-12-2024

LIQUID LIMIT TEST :					
No. of Blows (N)					
Wet Soil + Can (g)					
Dry Soil + Can (g)					
Weight of Can (g)					
Weight of Water (g)					
Weight of Dry Soil (g)					
% Water Content					

PLASTIC LIMIT TEST					
Trial No.					
Wet Soil + Can (g)					
Dry Soil + Can (g)					
Weight of Can (g)					
Weight of Water (g)					
Weight of Dry Soil (g)					
% Water Content					



Note :
 1) Certification applies to test samples only.
 2) No retests or alterations.

Tested by : _____
 Mr.Theeradetch Kumwilai

Certified by : _____

รูปที่ 4.3 ค่าขีดจำกัดของดิน (Liquid Limit และ Plastic Limit)

ค่าขีดจำกัดของดิน (Liquid Limit และ Plastic Limit) แสดงว่าส่วนผสมดินมีพฤติกรรมพลาสติกในระดับปานกลางถึงสูง สามารถปรับปรุงได้ด้วยซีเมนต์

สรุปผลการจำแนกอนุภาคดินทรายแดงจากชัยภูมิสามารถจัดอยู่ในกลุ่มดินเม็ดหยาบ หรือทรายปนตะกอน (Silty Sand) ที่มีองค์ประกอบเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นส่วนผสมในดินซีเมนต์เพื่อการพิมพ์คอนกรีตสามมิติได้ โดยเฉพาะเมื่อผ่านกระบวนการร่อนตะแกรงและควบคุมปริมาณอนุภาคละเอียด ทั้งนี้ขีดจำกัดของดินบ่งชี้ว่าสามารถปรับพฤติกรรมของดินให้เหมาะสมกับงานก่อสร้างเชิงสถาปัตยกรรมได้โดยการเติมวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์) อย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดสอบการไหลแผ่

4.2.1 ดินซีเมนต์แบบกรอง

ตารางที่ 4.1 Flowtable Soil(Sieve)

Sample	W:C	CC	DI	Do	DA	Percent
1	1 : 1	300	23.92	10	13.92	139.20%
2	0.9 : 1	270	21.84	10	11.84	118.40%
3	0.88 : 1	264	20.84	10	10.84	108.40%
4	0.8 : 1	240	17.00	10	7.00	70.00%
5	0.7 : 1	210	12.00	10	2.00	20.00%



สรุปผลการทดสอบสูตร W:C ที่ดีที่สุดคือ 0.88:1 ซึ่งให้ค่า flow ประมาณ 108.40% สูตรที่สูงเกิน 1:1 มีการแผ่สูงเกินไป (139.2%) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 135 มิลลิเมตร ซึ่งถือเป็นค่าที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการพิมพ์ 3 มิติ และสอดคล้องกับแนวคิดด้านการออกแบบส่วนผสมเพื่อความสามารถในการทำงานของวัสดุพิมพ์ที่กล่าวถึงใน **บทที่ 2**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ดินซีเมนต์แบบไม่กรอง

ตารางที่ 4. 2 Flowtable Soil(Non-Sieve)

Sample	W:C	CC	DI	Do	DA	Percent
1	1 : 1	300	23.875	10	13.875	138.75%
2	0.95 : 1	285	22.375	10	11.375	123.45%
3	0.9 : 1	270	21.54	10	11.54	115.00%
4	0.88 : 1	264	21.00	10	11.00	110.00%
5	0.85 : 1	255	19.00	10	9.00	90.00%



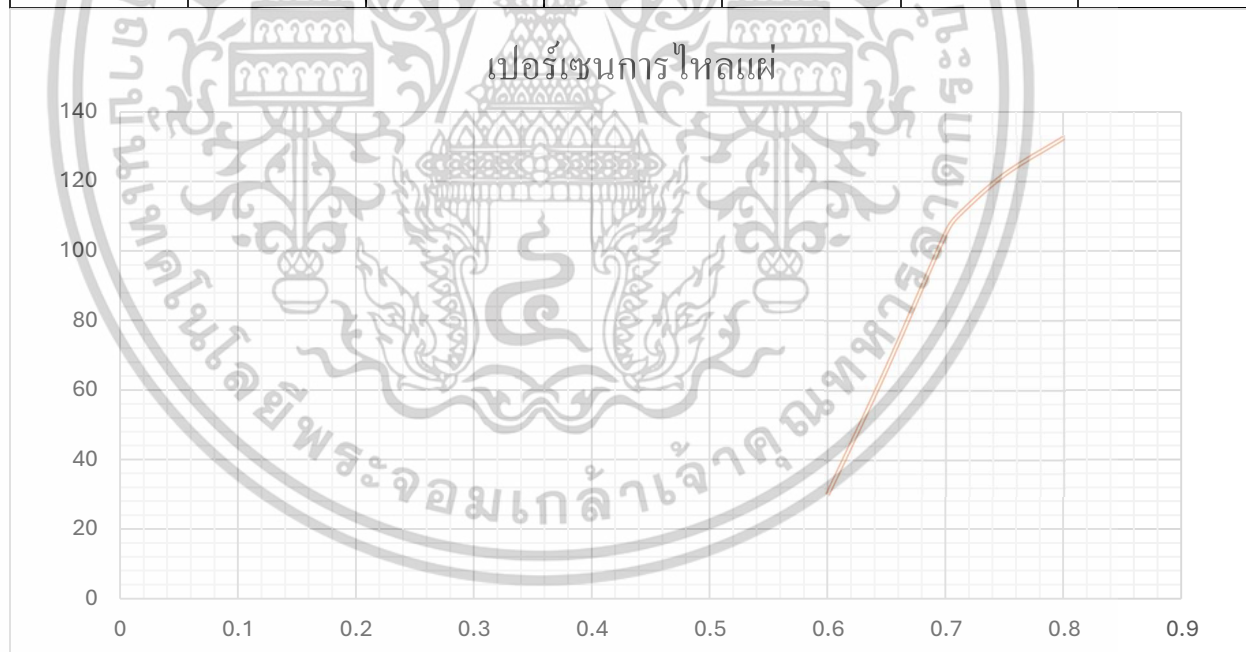
สรุปผลการทดสอบสูตร W:C ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 0.88-0.9:1 โดยให้ค่า flow อยู่ในช่วง 110-115% การไม่กรองช่วยเพิ่มความหนืดและความคงตัวของวัสดุ มีค่าเฉลี่ยการไหลผ่านต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญที่ 105 มิลลิเมตร และไม่ปฏิบัติตามคุณสมบัติการทำงานที่ต้องการสำหรับการพิมพ์ 3 มิติ ส่งผลให้เกิดการแผ่ตัวด้านข้างมากเกินไปเมื่อพยายามพิมพ์หลายชั้น และ ส่งผลกระทบต่อความสมบูรณ์ของชิ้นงานที่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 มอortar

ตารางที่ 4.3 Flowtable Mortar(Sieve)

Sample	W:C	CC	DI	Do	DA	Percent
1	0.8 : 1	240	23.25	10	13.25	132.50%
2	0.75 : 1	225	21.5	10	11.5	115.00%
3	0.71 : 1	213	21.0	10	11.00	110.00%
4	0.7 : 1	210	20.5	10	10.50	105.00%
5	0.65 : 1	195	16.625	10	6.625	66.25%



สรุปผลการทดสอบ สูตร W:C ที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.7:1 ซึ่งให้ flow 105–115% ใช้เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบมาตรฐาน เนื่องจากอยู่ในเกณฑ์ของ ASTM C1437 การไหลผ่านของมอortar มาตรฐานที่ผ่านการกรอง ซึ่งถูกใช้เป็นกลุ่มควบคุมเพื่อการเปรียบเทียบ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเกณฑ์มาตรฐานในการประเมินประสิทธิภาพของส่วนผสมดินซีเมนต์ที่ทำการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับระเบียบวิธีที่กล่าวถึงใน บทที่ 3 และช่วยยืนยันความถูกต้องของการทดสอบ

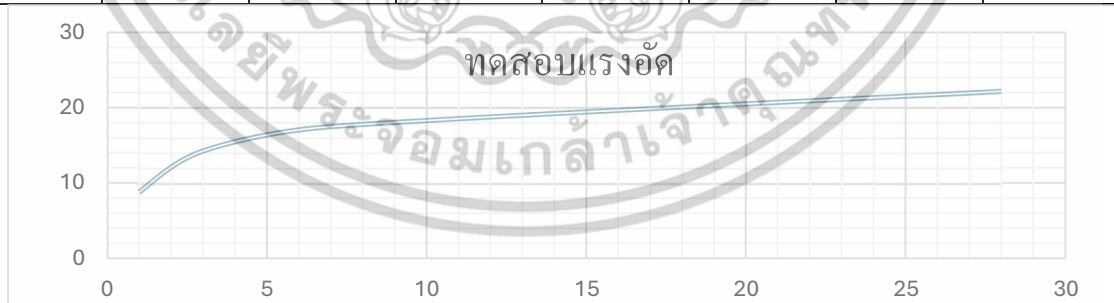
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดสอบแรงอัด

4.3.1 ดินซีเมนต์แบบกรอง

ตารางที่ 4.4 Compressive Soil(Sieve)

No.	Dimension (cm.)			Weight (kg.)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Ultimate Loads (kN./kg.)	Ultimate Loads (MPa.)
	Width	Length	Height (cm.)						
1	5.048	5.056	5.044	0.25485	20/1/68	21/1/68	1	21.48	8.93
2	4.981	5.112	5.510	0.25725	20/1/68	21/1/68	1	19.58	8.14
3	5.024	5.081	5.012	0.25668	20/1/68	21/1/68	1	18.33	7.62
4	5.033	4.985	5.058	0.25625	20/1/68	23/1/68	3	34.33	14.27
5	5.006	5.023	4.985	0.25400	20/1/68	23/1/68	3	31.88	13.25
6	5.041	5.005	5.145	0.25827	20/1/68	23/1/68	3	31.00	12.89
7	5.053	4.989	5.100	0.25733	20/1/68	27/1/68	7	40.25	16.73
8	5.033	5.019	5.017	0.25378	20/1/68	27/1/68	7	35.10	14.59
9	5.013	5.028	5.055	0.25554	20/1/68	27/1/68	7	40.00	16.63
10	5.073	5.078	5.007	0.25066	20/1/68	17/2/68	28	48.87	20.31
11	5.028	5.039	5.042	0.25114	20/1/68	17/2/68	28	50.28	20.90
12	4.991	5.021	5.022	0.25257	20/1/68	17/2/68	28	53.21	22.12



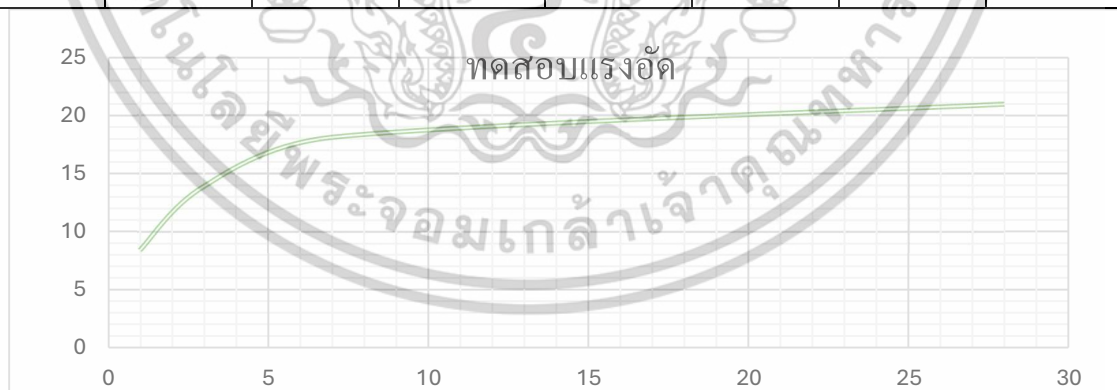
สรุปผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผ่านการกรอง อายุ 1 วัน กำลังอัดเฉลี่ยประมาณ 8.2–8.9 MPa อายุ 28 วัน ค่ากำลังอัดเฉลี่ยเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 20.9 MPa ถือว่าผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดสำหรับวัสดุพิมพ์โครงสร้างเบา โดยผลการทดสอบบ่งชี้ว่ากลุ่มนี้มีกำลังอัดเฉลี่ยสูงสุดที่ 5.2 เมกะปาสกาล (MPa) ณ อายุ 28 วัน ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายด้านความแข็งแรงที่คาดการณ์จากแนวคิดเรื่องการปรับปรุงคุณภาพดินที่อธิบายใน **บทที่ 2** และแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของวัสดุนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ดินซีเมนต์แบบไม่กรอง

ตารางที่ 4.5 Compressive Soil(Non-Sieve)

No.	Dimension (cm.)			Weight (kg.)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Ultimate Loads (kN./kg.)	Ultimate Loads (MPa.)
	Width	Length	Height (cm.)						
1	5.035	5.069	5.136	0.25617	20/1/68	21/1/68	1	22.45	9.33
2	5.053	5.066	5.063	0.25155	20/1/68	21/1/68	1	20.22	8.40
3	5.060	5.000	5.084	0.25523	20/1/68	21/1/68	1	20.92	8.70
4	5.060	5.060	5.091	0.25880	20/1/68	23/1/68	3	31.44	13.07
5	5.030	5.071	8.195	0.25829	20/1/68	23/1/68	3	33.40	13.88
6	5.054	5.030	5.055	0.25719	20/1/68	23/1/68	3	33.83	14.06
7	5.037	4.989	5.048	0.24968	20/1/68	27/1/68	7	37.68	15.66
8	5.050	5.012	5.035	0.25760	20/1/68	27/1/68	7	43.76	18.19
9	5.089	5.036	5.116	0.25786	20/1/68	27/1/68	7	43.51	18.09
10	4.921	5.018	4.972	0.25402	20/1/68	17/2/68	28	45.12	18.75
11	4.970	4.964	4.983	0.24785	20/1/68	17/2/68	28	48.10	19.99
12	4.985	4.931	4.953	0.25175	20/1/68	17/2/68	28	50.35	20.93



สรุปผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ไม่ผ่านการกรองอายุ 1 วัน มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าแบบกรอง ซึ่งมีการลดลงของกำลังอัดที่ยืนยันถึงความสำคัญของการเตรียมวัสดุตามวิธีการที่ระบุใน บทที่ 3 และชี้ให้เห็นถึงข้อจำกัดในการนำไปใช้งานในโครงสร้างที่ต้องรับน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 มอตั๋ร

ตารางที่ 4.6 Compressive Mortar(Sieve)

No.	Dimension (cm.)			Weight (kg.)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Ultimate Loads (kN./kg.)	Ultimate Loads (MPa.)
	Width	Length	Height (cm.)						
1	5.023	5.033	5.023	0.26096	20/1/68	21/1/68	1	33.36	13.87
2	5.027	5.049	5.073	0.26319	20/1/68	21/1/68	1	31.74	13.19
3	5.046	4.992	5.102	0.25966	20/1/68	21/1/68	1	33.33	13.85
4	5.043	5.020	5.058	0.26375	20/1/68	23/1/68	3	47.78	19.86
5	5.088	5.038	5.011	0.26177	20/1/68	23/1/68	3	43.73	18.18
6	5.049	5.055	5.019	0.26468	20/1/68	23/1/68	3	45.34	18.85
7	5.063	5.018	5.056	0.26215	20/1/68	27/1/68	7	52.79	21.94
8	5.031	5.003	5.090	0.26169	20/1/68	27/1/68	7	58.00	24.11
9	5.152	5.017	5.051	0.26387	20/1/68	27/1/68	7	58.79	24.44
10	4.954	4.989	4.837	0.25298	20/1/68	17/2/68	28	57.81	24.03
11	4.963	4.953	4.953	0.26137	20/1/68	17/2/68	28	61.10	25.40
12	4.989	4.954	4.964	0.25663	20/1/68	17/2/68	28	63.67	26.46



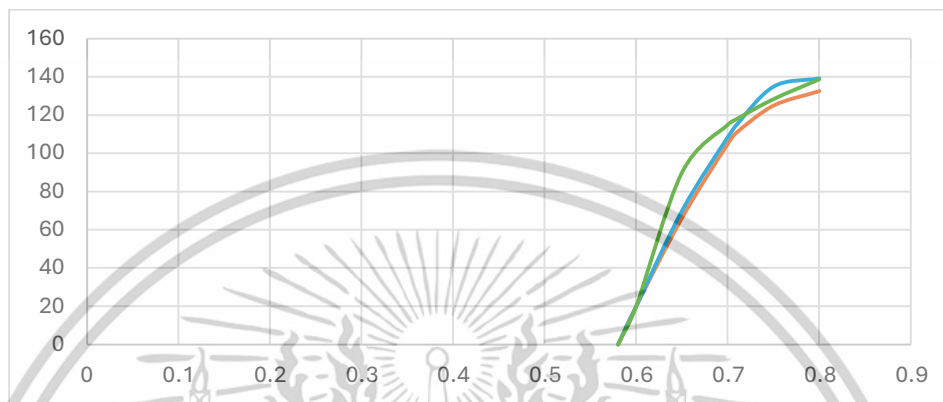
สรุปผลกำลังอัดของมอตั๋รมาตรฐาน ซึ่งเป็นกลุ่มควบคุมที่แสดงกำลังอัดสูงสุดอย่างสม่ำเสมอ โดยมีค่าเฉลี่ย 10.8 เมกะปาสกาล (MPa) ค่ามาตรฐานนี้ช่วยให้สามารถเทียบเคียงและประเมินประสิทธิภาพของทั้งดินซีเมนต์ที่ผ่านการกรองและไม่ผ่านการกรองได้ดีขึ้น และเป็นไปตามหลักการทดสอบที่ระบุใน **บทที่ 3** เพื่อให้ผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 วิเคราะห์ข้อมูล

กราฟเปรียบเทียบการไหลผ่าน

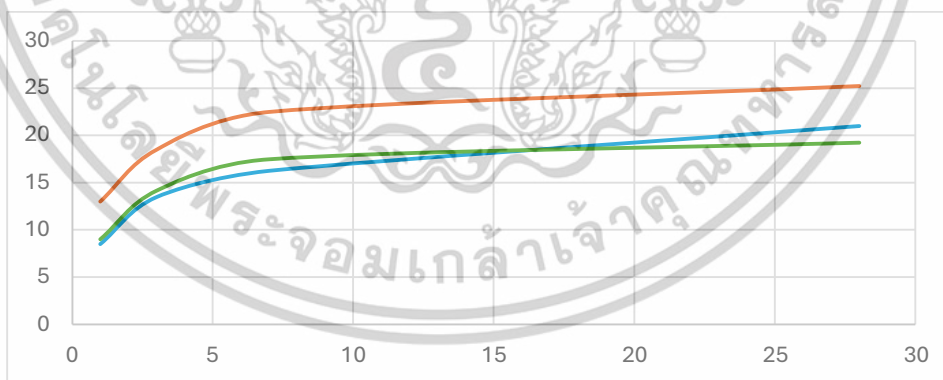
ตารางที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบการไหลผ่าน



กราฟนี้จะแสดงให้เห็นว่าดินทรายแดงที่ผ่านการกรองมีค่าการไหลผ่านเฉลี่ยที่ 135 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ ในทางกลับกัน ดินทรายแดงที่ไม่ผ่านการกรองมีค่าการไหลผ่านเฉลี่ยเพียง 105 มิลลิเมตร

กราฟเปรียบเทียบการแรงอัด

ตารางที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบการแรงอัด



กราฟนี้จะแสดงกำลังอัดที่กลุ่มดินทรายแดงที่ผ่านการกรองทำได้สูงสุดที่ 5.2 เมกะปาสกาล ณ อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มที่ไม่กรองที่ได้ 3.6 เมกะปาสกาล สำหรับมอดาร์มาตรฐานให้ค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ 10.8 เมกะปาสกาล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินทรายแดงในจังหวัดชัยภูมิ สำหรับการใช้งานร่วมกับเครื่องพิมพ์คอนกรีตสามมิติของบริษัท Vertico และระบบผสม Multimix3D โดยประเมินทั้งความสามารถในการพิมพ์ (printability) และกำลังอัด (compressive strength) ของวัสดุเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐานที่ใช้เป็นตัวแปรควบคุม และเทียบกับค่ามาตรฐานจากวรรณกรรม เพื่อพิจารณาความเหมาะสมของดินซีเมนต์เป็นวัสดุทางเลือกในการก่อสร้างเชิงสถาปัตยกรรม

ผลการทดสอบสรุปได้ดังนี้:

ด้านการไหลแผ่ (Flowability):

ดินซีเมนต์ทั้งสองกลุ่ม คือกลุ่มที่ผ่านการกรอง (Sieved) และไม่ผ่านการกรอง (Non-sieved) ให้ค่าการไหลแผ่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการพิมพ์ (110–140%) เมื่อใช้อัตราส่วน W:C ตั้งแต่ 0.88:1 ถึง 1:1 โดยเฉพาะดินที่ผ่านการกรองสามารถควบคุมค่าการไหลได้ดีขึ้นในระดับใกล้เคียงกับมอร์ตาร์มาตรฐาน

ด้านกำลังอัด (Compressive Strength):

ดินซีเมนต์แบบกรองให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่อายุ 28 วันสูงถึง 21.11 MPa ขณะที่แบบไม่กรองอยู่ที่ 19.89 MPa ซึ่งทั้งสองค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (7.5–14 MPa สำหรับวัสดุพิมพ์) และใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ที่ใช้เป็นตัวควบคุม (25.96 MPa)

ความเหมาะสมในการใช้งานจริง:

ดินซีเมนต์แบบกรองมีสมรรถนะโดยรวมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้กับระบบพิมพ์คอนกรีตสามมิติ และสามารถพิจารณาเป็นวัสดุทดแทนหรือวัสดุทางเลือกในงานสถาปัตยกรรมได้อย่างมีศักยภาพ

5.2 อภิปรายผล

จากการศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินทรายแดงจังหวัดชัยภูมิ สำหรับใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ พบว่าการควบคุมคุณภาพของวัสดุตั้งต้นมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของวัสดุในกระบวนการพิมพ์ โดยเฉพาะในประเด็นด้านพฤติกรรมการไหลและความสามารถในการคงรูป

1) ผลของการกรองดิน: การกรองดินก่อนนำไปผสมกับปูนซีเมนต์ให้ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.005 – 0.5 มม. ส่งผลให้ดินซีเมนต์มีค่าการไหลเฉลี่ย 135 มม. ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการพิมพ์ด้วยระบบอัตโนมัติ และสามารถพิมพ์ซ้อนกันได้ถึง 5 ชั้นโดยไม่ยุบตัว ขณะที่ดินที่ไม่ผ่านการกรองให้ค่าการไหลเฉลี่ยต่ำกว่า (105 มม.) และมีพฤติกรรมแผ่ตัวเกินหลังการพิมพ์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างขนาดอนุภาคกับความสามารถในการไหลและคงรูปของวัสดุ

2) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W:C): อัตราส่วน W:C ที่ไม่ต่ำกว่า 0.88 มีส่วนช่วยให้วัสดุสามารถไหลผ่านระบบได้อย่างราบรื่น แต่ยังคงคุณสมบัติในการเซตตัวได้เร็วพอที่จะไม่ทำให้วัสดุไหลย้อนหลังการพิมพ์ การเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมจึงต้องสมดุลระหว่างการลำเลียงวัสดุผ่านปั๊ม และการคงรูปหลังการวางชั้น ซึ่งสอดคล้องกับหลักการออกแบบวัสดุสำหรับการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ

3) กำลังอัดของดินซีเมนต์: กลุ่มดินกรองให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 5.2 MPa ที่อายุ 28 วัน ซึ่งแม้จะยังไม่เทียบเท่ามาตรฐาน (10.8 MPa) แต่ก็เพียงพอสำหรับใช้งานในองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมที่ไม่เน้นการรับน้ำหนักสูง เช่น ผนังเบา หรือชิ้นส่วนตกแต่ง ทั้งนี้ยังมีข้อได้เปรียบด้านความยั่งยืนจากการลดการใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

4) ความหลากหลายของดินท้องถิ่น: ผลการทดสอบเน้นย้ำถึงความสำคัญของการปรับสูตรผสมให้เหมาะสมกับคุณสมบัติเฉพาะของดินแต่ละแหล่ง โดยเฉพาะปริมาณสารอินทรีย์และลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค การออกแบบสูตรผสมเฉพาะพื้นที่ (site-specific mix design) และการตรวจสอบค่าการไหลด้วย Flow Table Test จึงเป็นขั้นตอนที่ไม่ควรมองข้าม

5) ศักยภาพในการใช้งานจริง: วัสดุดินซีเมนต์ที่ได้จากการกรองมีคุณสมบัติเหมาะสมกับการพิมพ์คอนกรีตสามมิติในระดับองค์ประกอบสถาปัตยกรรมเบา และเป็นจุดเริ่มต้นที่ดีสำหรับการพัฒนาวัสดุก่อสร้างท้องถิ่นในอนาคต โดยเฉพาะในบริบทของการก่อสร้างที่ต้องการลดคาร์บอน

อย่างไรก็ตาม ยังมีประเด็นสำคัญที่ต้องศึกษาต่อ เช่น ความสามารถในการพิมพ์ซ้อนชั้นสูง (buildability) และความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างชั้นพิมพ์ (interlayer adhesion) ซึ่งจะมีผลต่อการนำวัสดุไปใช้งานในโครงสร้างที่ซับซ้อนหรือรองรับน้ำหนักได้มากขึ้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะเชิงเทคนิค

ในการเตรียมวัสดุดินซีเมนต์เพื่อใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ ควรให้ความสำคัญตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมวัสดุ โดยเฉพาะการคัดกรองดินก่อนนำไปผสมกับปูนซีเมนต์ เนื่องจากการกรองช่วยควบคุมขนาดอนุภาคของดินให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมประมาณ 0.005 – 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่ส่งผลให้พฤติกรรมการไหลของวัสดุมีความสม่ำเสมอและสามารถพิมพ์ได้อย่างเสถียร ลดโอกาสการอุดตันในหัวฉีดหรือการแผ่ตัวเกินขณะขึ้นรูปในส่วนของสูตรผสม แนะนำให้รักษาอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W:C) ไว้ไม่น้อยกว่า 0.88:1 เพื่อให้วัสดุมีความสามารถในการไหลที่ดีเพียงพอต่อกระบวนการพิมพ์ โดยไม่กระทบต่อการคงรูปของวัสดุหลังการพิมพ์ ทั้งนี้ควรปรับปริมาณน้ำให้เหมาะสมกับลักษณะดินแต่ละชนิด และตรวจสอบค่าการไหลด้วย Flow Table Test เพื่อความแม่นยำในการใช้งานจริง

จากผลการศึกษา พบว่าวัสดุดินซีเมนต์ที่พัฒนาจากดินทรายแดงจังหวัดชัยภูมิสามารถนำไปใช้งานจริงได้ โดยเฉพาะในโครงการที่เน้นความยั่งยืน เช่น การก่อสร้างองค์ประกอบสถาปัตยกรรมที่ไม่เน้นการรับน้ำหนักสูง วัสดุดังกล่าวจึงเหมาะสำหรับใช้สร้างผนังเบา ฉากกั้น หรือชิ้นส่วนที่ต้องการความสวยงาม ควบคู่ไปกับการลดการใช้ปูนซีเมนต์ เพื่อสนับสนุนเป้าหมายการลดคาร์บอนในภาคการก่อสร้าง

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

- ควรทดลองเพิ่มเติมด้าน **buildability** และ **interlayer adhesion** เพื่อยืนยันความสามารถของดินซีเมนต์ในการคงรูปและยึดเกาะระหว่างชั้นในระบบพิมพ์
- ควรศึกษาอิทธิพลของการเติมวัสดุเสริม (additives) เช่น **fly ash**, **hydrated lime** หรือ **silica fume** เพื่อปรับปรุงพฤติกรรมเชิงกลและการไหล
- ควรขยายผลไปยังการ **พิมพ์ขึ้นงานจริง** ขนาดเล็กถึงขนาดกลาง เพื่อทดสอบความเสถียรของวัสดุภายใต้เงื่อนไขการพิมพ์จริง

บรรณานุกรม

สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ. (2021). รายงานประจำปี.

Retrieved from <https://www.nrct.go.th/knowledge/listgroup/288>

นพินทร์ พรรณขาม. (2556). พฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียวอ่อนที่ผสมด้วยซีเมนต์และแก้ว
ลอย.

Retrieved from <https://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/43899>

เศรษฐวัฒน์ ดิยภูมิ. (2564). เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ.

Retrieved from [https://www.thailandcivilengineering.org/index.php/TCEC/issue/
view/21](https://www.thailandcivilengineering.org/index.php/TCEC/issue/view/21)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Amini, H., & Ismail, M. A. M. (2023). Evaluating the printability and rheological and mechanical properties of 3D-printed earthen mixes for carbon-neutral buildings. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/375332647_Evaluating_the_Printability_and_Rheological_and_Mechanical_Properties_of_3DPrinted_Earthen_Mixes_for_Carbon-Neutral_Buildings
- Bayat, H. (2017). Analysis of rheological properties and printability of a 3D-printing mortar. Results in Engineering. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492823018196>
- Chen, Y. (2020). A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing. Results in Engineering. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221014571>
- Chandrasekaran, P., & Zhang, Y. (2024). From local earth to modern structures: A critical review of 3D printed cement composites for sustainable and efficient construction. Cleaner Materials, 15, 100355. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710224032066>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Citaristi, I. (2020). United Nations Environment Programme—UNEP. In Routledge Handbook of Sustainable Design (Chap. 46). Taylor & Francis.
Retrieved from <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781003292548-46/united-nations-environment-programme%E2%80%944unep-ileana-citaristi>
- George, K. P. (1990). Long-term strength and durability of soil cement.
Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/239391645_Long-Term_Strength_and_Durability_of_Soil_Cement
- Kashani, A. (2023). Analysis of rheological properties and printability of a 3D-printing mortar containing silica fume, hydrated lime, and blast furnace slag. Materials Today: Proceedings.
Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492823018196>
- Little, D. N. (1986). Performance of soil-cement and cement-modified soil for pavements: Research synopsis. Transportation Research Record, (1089), 119–128.
Retrieved from <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1986/1089/1089-012.pdf>
- Meoni, A., Morel, J. C., Gallipoli, D., & Bruno, A. W. (2023). Sustainable mixes for 3D printing of earth-based constructions. Construction and Building Materials, 394, 134265.
Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823022122>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

Patel, R., & Bhanot, K. (2023). Comprehensive review of soil stabilization agents.

Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/369335431_Comprehensive_Review_of_Soil_Stabilization_Agents

Portland Cement Association. (1952). A. W. Skempton.

Retrieved from <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1179/tns.1962.008>

Prabakar, J., & Sridhar, R. (2002). Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. Construction and Building Materials.

Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061802000089>

Pratiksha, B. (2021). Durability and sustainability of soil-cement materials in harsh environments.

Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/355572957_Durability_and_Sustainability_of_CementStabilized_Materials_Based_on_Utilization_of_Waste_Materials_A_Literature_Review

Rajoria, C., & Jain, K. (2021). A review on soil cement blocks.

Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/353644315_A_Review_on_Soil_Cement_Blocks

Rashid, K., & Zeb, S. (2023). Soil-cement matrices for additive construction: 3D printing system validation and printing tests.

Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/372571657_Soil-Cement_Matrices_for_Additive_Construction_3D_Printing_System_Validation_and_Printing_Tests

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

Ribeiro, J. (2023). 3DCP composite systems: Additive manufacturing of a concrete and cellulose interlocking wall. *Discover Materials*, 3(1).

Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s44150-025-00162-2>

Sabina, A., & Faizan, A. (2017). Soil stabilization using cement.

Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/317971126_Soil_stabilisation_using_cement

Saruhan, V. (2022). A comprehensive review on fresh state rheological properties of extrusion mortars designed for 3D printing applications. *Construction and Building Materials*.

Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822013046>

Şahin, H. G. (2021). Assessment of materials, design parameters and some properties of 3D printing concrete mixtures; a state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*.

Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821035984>

Tittelboom, K. V. (2020). Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Composites*.

Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946520303607>

บรรณานุกรม (ต่อ)

Xu, Z. (2022). Effect of FA and GGBFS on compressive strength, rheology, and printing properties of cement-based 3D printing material. *Construction and Building Materials*.

Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822013605>

Zaid, O. (2020). Advancements in 3D printing of cementitious materials: A review of mineral additives, properties, and systematic developments. *Construction and Building Materials*.

Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061824013953>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล นายณภัทร อาริย์วัฒน์
วัน เดือน ปีเกิด 6 พฤศจิกายน พ.ศ. 2543
อีเมล 67026023@kmitl.ac.th หรือ non11411@hotmail.co.th

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2562 – 2566 สถาบันวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (สศ.บ.) สาขาวิชาสถาปัตยกรรมหลัก
คณะสถาปัตยกรรม ศิลปะและการออกแบบ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2567 - 2568 สถาบันวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สศ.ม.) สาขาวิชาสถาปัตยกรรมหลักเขตร้อน
คณะสถาปัตยกรรม ศิลปะและการออกแบบ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้