

การศึกษาวัสดุประสานที่ใช้ในการก่อสร้างอาคารที่อยู่อาศัยด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

The Study of Cementitious Materials used in Residential Building Construction by 3D Printing Technology

ณัฐรา ศรีพัฒน์^{1,*} จิตรณัฐา คงยก² ภัทรพล ชัยมัธยมผล³ และ กิจพัฒน์ ภู่วรรณ⁴

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: nattha.srip@ku.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้ซีเมนต์ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และส่งเสริมการก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้ดินเป็นวัสดุผสมหลักร่วมกับซีเมนต์ ดินที่นำมาศึกษามี 4 ชนิด ได้แก่ ดินเหนียว ดินเหนียวปนทราย ทราย และตะกอน ซึ่งถูกนำมาออกแบบส่วนผสมในอัตราส่วนดิน 60%, 70% และ 80% ตามลำดับ จากนั้นจึงทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุทั้ง Fresh State และ Hardened State โดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร เพื่อประเมินค่ากำลังอัดประลัยที่อายุ 28 วัน โดยพิจารณาเกณฑ์ที่กำลังอัดต้องมากกว่า 80 ksc พร้อมทั้งต้องมีความเหมาะสมในการฉีดผ่านหัวพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการเสริมโครงสร้างภายในคานเพื่อประเมินผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงของคาน จากผลการทดลองพบว่าส่วนผสมที่มีดินเหนียวปนทรายและตะกอนในสัดส่วน 60% ให้ค่ากำลังอัดประลัยเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด และมีคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

คำสำคัญ: การพิมพ์ 3 มิติ, วัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืน, วัสดุก่อสร้างจากดิน, ซีเมนต์, กำลังอัดประลัย

Abstract

This article investigates suitable mixtures for use in 3D printing technology, with the goal of reducing the usage of cement, which is a major contributor to carbon dioxide emissions, and promoting environmentally responsible construction. The mixtures are primarily composed of soil combined with cement. Four types of soil were examined: clay, sandy clay, sand, and silt. Each soil type was used to create combinations with soil proportions of 60%, 70%, and 80%, respectively. The mechanical properties of the materials were tested in fresh and hardened states using cube specimens with dimensions of 50x50x50 mm. The compressive strength at 28 days was evaluated, with the target strength being greater than 80 ksc. Additionally, the mixtures had to be appropriate for

extrusion through the nozzle of a 3D printer. The study also investigated internal reinforcement structures within beams to determine their impact on load-bearing capacity. The results indicate that mixtures containing 60% sandy clay or silt met the required compressive strength criteria and had mechanical qualities suitable for use as a 3D printer mixture.

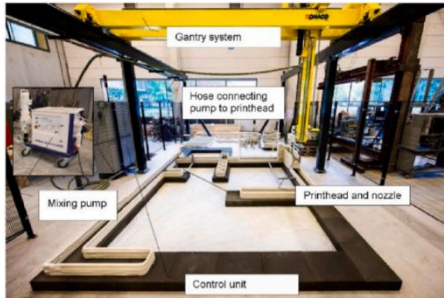
Keywords: 3D Printing, Sustainable Materials, Soil-based Construction Materials, Cement, Compressive Strength

1. บทนำ

การก่อสร้างเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ใช้ทรัพยากรธรรมชาติในปริมาณมากและได้สร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในวงกว้าง เช่น การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกระบวนการผลิตซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้าง การเพิ่มขึ้นของปริมาณฝุ่นละอองในอากาศ และเกิดขยะจากวัสดุเหลือใช้จากการก่อสร้างปริมาณมาก ปัจจุบัน จึงได้มีการให้ความสนใจกับการก่อสร้างที่ยั่งยืนมากขึ้นเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การก่อสร้างโดยใช้เทคโนโลยี 3D Concrete Printing และการใช้วัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

การพิมพ์ 3 มิติ เป็นเทคโนโลยีการก่อสร้างเพื่อสิ่งแวดล้อมที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อก้าวข้ามขีดจำกัดการก่อสร้างแบบเดิมและสามารถแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างได้ เช่น ลดปัญหามลพิษทางเสียงที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง ลดระยะเวลาในการก่อสร้าง ลดการใช้แรงงานสามารถก่อสร้างได้อย่างแม่นยำและสามารถก่อสร้างรูปทรงที่มีความหลากหลายได้มากขึ้น อีกทั้งยังเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า [1] สำหรับส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ต้องมีความชื้นเหลวที่เหมาะสมสามารถไหลผ่านท่อและฉีดได้ โดยคอนกรีตที่ออกมาจากหัวฉีดจะต้องมีความสามารถอยู่ได้ด้วยตัวเองไม่เหลวจนเกินไป และระยะเวลาในการก่อตัวของคอนกรีตที่ใช้ในการแข็งตัวจะต้องมีความสัมพันธ์กับรูปแบบของโครงสร้าง ความเร็วในการฉีดและการเคลื่อนตัวของหัวพิมพ์ [2] โดยวัสดุคอนกรีตที่ใช้นั้นมีส่วนประกอบหลักเป็นมวลรวมละเอียดและ Ordinary Portland Cement ซึ่งนำไปสู่ carbon emission ปริมาณมากในกระบวนการผลิตซีเมนต์ นอกจากนี้รูปแบบของโครงสร้างรับน้ำหนักของที่อยู่อาศัยที่ถูกสร้างขึ้นจากการพิมพ์ 3 มิติ จะ

ออกแบบเป็นระบบผนังรับแรงของโครงสร้างด้านบน และมีการศึกษา ลักษณะของการใช้รูปทรงเรขาคณิตเข้ามาประยุกต์และเน้นรูปแบบความ สวยงามทางด้านสถาปัตยกรรม [1] โดยที่รูปทรงหรือการออกแบบผนังจะมี ผลต่อกำลังการรับแรงกดของโครงสร้างด้วย [3]



รูปที่ 1 องค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ [6]

จากการศึกษาพบว่าดินเป็นวัสดุที่ยั่งยืนและถูกใช้ในการก่อสร้างมา อย่างยาวนาน หากได้ทั่วไปในธรรมชาติจึงทำให้มีต้นทุนที่ต่ำ สามารถควบคุม อุณหภูมิและทนไฟได้ดี มีคุณสมบัติแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่และเมื่อ หมดยุคการใช้งานแล้วสามารถย่อยสลายกลับคืนสู่ธรรมชาติได้ นอกจากนี้ ยังพบว่าดินที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในการก่อสร้างจะต้องมีดินเหนียว เพียงพอที่จะทนต่อการกัดเซาะของน้ำและต้องมีทรายมากพอที่จะช่วย ไม่ให้เกิดการแตกร้าว [4] ด้วยคุณสมบัติทั้งหมดที่กล่าวมาจึงทำให้ดินเป็น วัสดุที่ถูกนำมาศึกษาและพัฒนาเป็นส่วนผสม เช่น การนำดินมาผสมกับ ซีเมนต์ หรือที่เรียกว่า “soil cement” เป็นวิธีหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพ ของดินที่ได้รับความนิยม เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของดิน ทำให้สามารถรับ แรงอัดและทนต่อการกัดเซาะของน้ำได้ดีขึ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนของดินต่อซีเมนต์ต่อน้ำ และระยะเวลาบ่มเป็นตัวแปรหลักที่ ควบคุมการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของ soil cement [5]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้สนใจที่จะพัฒนาส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับใช้ กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยที่องค์ประกอบหลักเป็นดินผสมกับซีเมนต์ ด้วย ความต้องการที่จะลดการใช้ปริมาณซีเมนต์ที่เป็นสาเหตุของ carbon emission เพื่อการก่อสร้างที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งการ นำดินที่อยู่ในธรรมชาติมาใช้ยังเป็นการลดต้นทุนและเพิ่มความสามารถใน การพิมพ์ รวมถึงศึกษาการเสริมโครงสร้างภายในคาน เพื่อประเมินผลต่อ การเพิ่มกำลังรับแรงของคาน

2. วัสดุและวิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 คุณสมบัติของดิน เป็นการ ทดสอบเพื่อวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดดินรวมถึงความ ถ่วงจำเพาะของดินแต่ละชนิดที่นำมาศึกษา ส่วนที่ 2 สภาวะสด (Fresh State) คือ การศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของส่วนผสมและคุณสมบัติ เชิงกลของวัสดุให้มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในเทคโนโลยีการ พิมพ์ 3 มิติ และส่วนที่ 3 สภาวะแข็ง (Hardened State) เป็นการทดสอบ คุณสมบัติของส่วนผสมที่ผ่านการทดลองในส่วนที่ 2 โดยการฉีดขึ้นรูปและ ความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้าง

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัสดุหลักประกอบด้วย (1) 3D Mortar (2) ปูนซีเมนต์ (3) มวลรวมละเอียด (4) สารเคมีผสมเพิ่ม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของ ส่วนผสมให้มีความชื้นเหลวที่เหมาะสมสำหรับใช้ในเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ รวมถึงให้กำลังอัดที่เหมาะสม โดยรายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการวิจัยมี ดังนี้

3D Mortar มอร์ต้าเชิงพาณิชย์ที่ใช้สำหรับเทคโนโลยี การพิมพ์ 3 มิติ

Hydraulic Cement เป็นปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.2594-2556 เน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของ ปูนซีเมนต์ (Performance Based) และลดการปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์

มวลรวมละเอียดที่นำมาใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 4 ชนิด คือ ดิน เหนียว ทรายปนดินเหนียว ทราย และตะกอน ก่อนนำมาทดลองผ่าน กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาปริมาณความชื้น โดยดินเหนียว ทรายปนดินเหนียว ทราย และ ตะกอน มีค่าความชื้นเท่ากับร้อยละ 38, 9, 0.32 และ 0.53 โดยน้ำหนัก

สารเคมีผสมเพิ่ม ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Superplasticizer เป็นสารผสม เพิ่มทางเคมีที่ใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต โดยการลดปริมาณน้ำ ในคอนกรีตซึ่งส่งผลให้ความพรุนและการหดตัวลดลง มีความ ทนทาน และมี workability เพิ่มขึ้น [8] ซึ่งต้องควบคู่ไปกับการควบคุม ปริมาณที่ใช้ ถ้ามากเกินไปจะส่งผลให้มอร์ต้ามี workability ลดลง [9]

2.2 สัดส่วนผสมและวิธีการออกแบบส่วนผสม

การออกแบบส่วนผสมของมอร์ต้าที่ใช้สำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะคำนึงถึงความสามารถทำงานได้ (workability) ซึ่งจะต้องมี ความสามารถในการไหลที่เหมาะสมเพื่อให้ฉีดขึ้นรูปได้ ดังนั้น ปัจจัยสำคัญ ที่ต้องพิจารณาคือปริมาณของน้ำของส่วนผสม รวมถึงการนำสารเคมีผสม เพิ่มมาเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของมอร์ต้า

ในการศึกษานี้ ได้พัฒนาส่วนผสมที่ประกอบด้วยซีเมนต์ มวลรวม ละเอียด น้ำ และ Superplasticizer โดยปริมาณ Superplasticizer จะ คำนวณเป็นสัดส่วนจากมวลของซีเมนต์ในแต่ละส่วนผสม กำหนดไว้ที่ร้อยละ 0.7 สำหรับทุกส่วนผสม ซึ่งค่าที่แนะนำไม่ควรเกิน 1% [9] และปริมาณ น้ำจะถูกทดสอบเพื่อปรับเปลี่ยนให้ได้ส่วนผสมที่สามารถพิมพ์ขึ้นรูปได้

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบ

	ส่วนผสม		
	ส่วนผสม 1 (ดิน 60%)	ส่วนผสม 2 (ดิน 70%)	ส่วนผสม 3 (ดิน 80%)
ซีเมนต์ (g)	500	500	500
ดิน (g)	750	1167	2000
% Superplasticizer (% มวลซีเมนต์)	0.7	0.7	0.7

ส่วนผสมเบื้องต้นที่นำมาทดสอบความสามารถในการพิมพ์แสดงใน ตารางที่ 1 โดยกำหนดให้ปริมาณซีเมนต์ของทุกสูตรเท่ากัน แต่ปริมาณดินที่ ใช้แตกต่างกัน ส่งผลให้มีอัตราส่วนดินต่อซีเมนต์ต่างกัน

2.3 การทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมสำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

การทดสอบส่วนผสมสำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะทดสอบ 2 สภาวะ คือ (1) สภาวะสด (Fresh state) คือ ความสามารถในการไหลแผ่ (2) สภาวะแข็งตัวแล้ว (Hardened state) ได้แก่ กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของโครงสร้างคาน

2.3.1 การทดสอบความข้นเหลวปกติ ตามมาตรฐาน ASTM C187 [11] เป็นภาวะที่ใช้ทดสอบหาระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์ โดยกำหนดว่าความข้นเหลวปกติ หมายถึง ภาวะที่เพิ่มขนาดมาตรฐาน สามารถจมลงในซีเมนต์เพสต์ 10 มม. ภายใน 30 วินาที

2.3.2 การทดสอบการไหลแผ่ ตามมาตรฐาน ASTM Standards C230 [11] เพื่อหาความสามารถให้การทำงาน (Workability) ผิดขึ้นรูปได้

2.3.3 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM Designation C 109 / C 109M-2 [11] ของตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 ซม. บ่มที่ 28 วัน

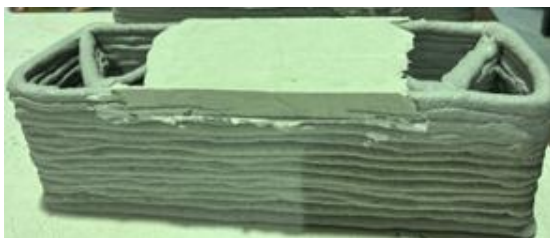
2.3.4 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 39 [12] ของตัวอย่างทรงกระบอกขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 ซม. สูง 15 ซม. หน้า 1.2 ซม. บ่มที่ 7 วัน

2.3.5 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัดของคาน ตามมาตรฐาน ASTM C 78 [13] ของคานขนาด กว้างXสูงXยาว เท่ากับ 10X10X33 ซม. บ่มที่ 7 วัน

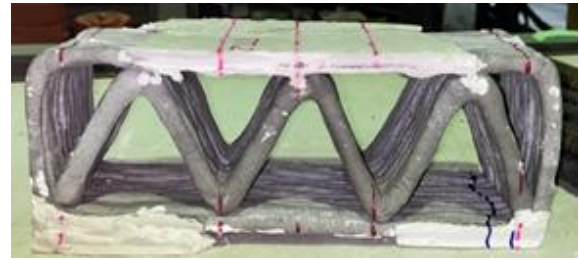
โครงสร้างคานที่ใช้ทดสอบทั้งหมดมี 2 แบบ คือ คานกลวงและคานที่มีภายในมีโครงถัก รูปแบบการรับแรงดัดของคานมี 3 รูปแบบ คือ (1) การกุดคานกลวงจากด้านบนหน้าตัด แทนด้วยสัญลักษณ์ “NT” แสดงในรูปที่ 2 (2) การกุดคานที่มีภายในมีโครงถักโดยกุดทำมุม 0° กับแนวราบ แทนด้วยสัญลักษณ์ “T” แสดงในรูปที่ 3 (3) การกุดคานที่มีภายในมีโครงถักโดยกุดทำมุม 90° กับแนวราบ แทนด้วยสัญลักษณ์ “TT” แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 2 คานรูปแบบ NT



รูปที่ 3 คานรูปแบบ T

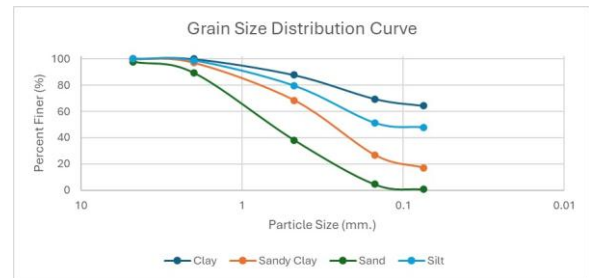


รูปที่ 4 คานรูปแบบ TT

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

3.1 ขนาดคละและค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด

จากรูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบการกระจายตัวของขนาดคละมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM D 422 – 63 [10] ผลการทดสอบพบว่ามวลรวมละเอียดที่ใช้มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร ซึ่งมีความเหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์สำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่ต้องคำนึงถึงการลำเลียงผ่านหัวฉีดที่มีขนาดเล็ก รวมทั้งต้องการชิ้นงานที่มีความละเอียด [6-7]



รูปที่ 5 ขนาดคละและการกระจายตัวของมวลรวมละเอียด

จากตารางที่ 2 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดแต่ละชนิด ตามมาตรฐาน ASTM D 854 – 58 [10] ผลการทดสอบพบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียว ดินเหนียวปนทราย ทราย และตะกอนมีค่า 2.63, 2.59, 2.56 และ 1.06 ตามลำดับ

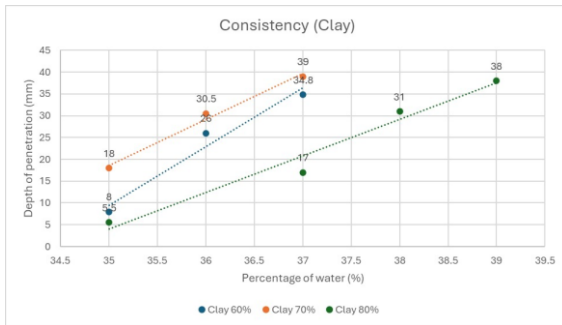
ตารางที่ 2 ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดแต่ละชนิด

Soil Type	Specific Gravity
Clay	2.63
Sandy Clay	2.59
Sand	2.56
Silt	1.06

3.2 การทดสอบมอร์ตาร์ในสภาวะสด (Fresh State)

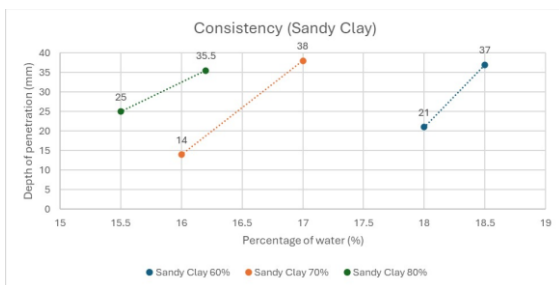
3.2.1 การทดสอบความข้นเหลว

จากรูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบความข้นเหลวของส่วนผสม โดย Rama et al. แนะนำว่าส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับ 3D Concrete Printing ควรมีระยะจมเข็มขนาดมาตรฐานอยู่ที่ 33-35 มม. ภายใน 30 วินาที [14] ทดสอบหาปริมาณน้ำในส่วนผสมที่ประกอบด้วยดินเหนียว 60%, 70% และ 80% เท่ากับ 36.83%, 36.46% และ 38.58% ตามลำดับ



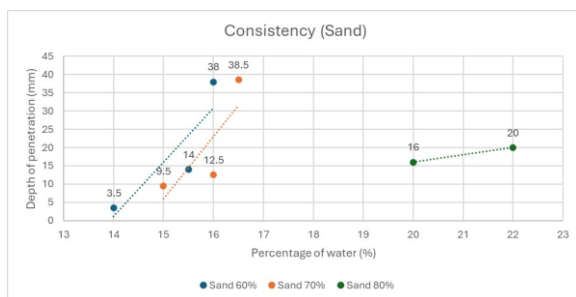
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของเข็มและปริมาณน้ำ (%) จากการทดสอบส่วนผสมที่เหมาะสมของดินเหนียว

จากรูปที่ 7 แสดงผลการทดสอบความชื้นเหลวของส่วนผสมปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมที่ประกอบด้วยดินเหนียวปนทราย 60%, 70% และ 80% เท่ากับ 18.4%, 16.17% และ 16.15%



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของเข็มและปริมาณน้ำ (%) จากการทดสอบส่วนผสมที่เหมาะสมของดินเหนียวปนทราย

จากรูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบความชื้นเหลวของส่วนผสมปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมที่ประกอบด้วยทราย 60%, 70% และ 80% เท่ากับ 15.95%, 16.46% และ 29%

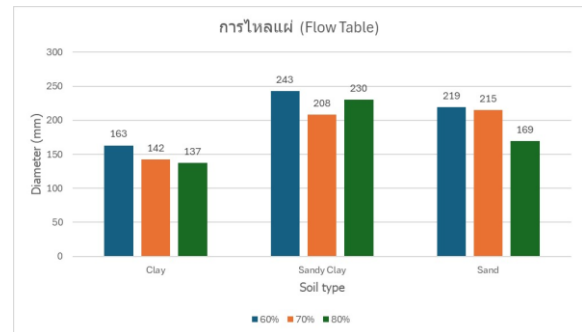


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของเข็มและปริมาณน้ำ (%) จากการทดสอบส่วนผสมที่เหมาะสมของทราย

3.2.2 การทดสอบการไหลของมอร์ตาร์

จากรูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบการไหลของมอร์ตาร์ที่ใช้ปริมาณน้ำในแต่ละส่วนผสมตามปริมาณน้ำที่ได้จากการทดสอบความชื้นเหลว Kumari et al. [8] แนะนำว่า ส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับ 3D concrete printing ควรมีค่าการไหลอยู่ระหว่าง 160-220 มิลลิเมตร ส่วนผสมที่เป็นตามเกณฑ์ดังกล่าว ได้แก่ ส่วนผสมที่มีดินเหนียวเป็นองค์ประกอบ 60%,

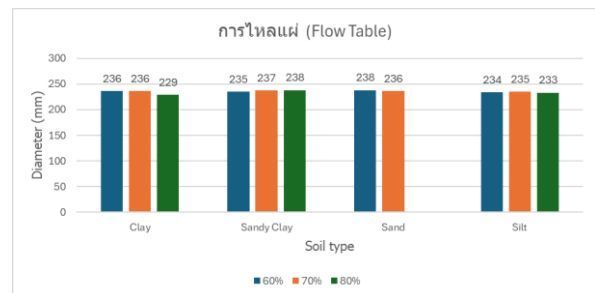
ส่วนผสมที่มีดินเหนียวปนทราย เป็นองค์ประกอบ 70% และส่วนผสมที่มีทรายเป็นองค์ประกอบ 70% ได้ค่าการไหลเท่ากับ 161, 208 และ 216 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อนำไปทดสอบการฉีดขึ้นรูปพบว่าไม่สามารถฉีดขึ้นรูปได้ เนื่องจากส่วนผสมมีความหนืดเกินไปจึงต้องทำการทดสอบการไหลอีกครั้ง โดยใช้ค่าการไหลของ 3D Mortar เชิงพาณิชย์เป็นเกณฑ์



รูปที่ 9 ค่าการไหลของมอร์ตาร์โดยอิงเกณฑ์จากงานวิจัย

ผลการทดสอบการไหลของ 3D Mortar ได้ค่าเท่ากับ 230 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาค่าการไหลที่เหมาะสม โดยกำหนดให้ค่าการไหลที่เหมาะสมของส่วนผสมต้องมีค่า 230-235 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 10 แสดงผลการทดสอบการไหลของมอร์ตาร์ พบว่าส่วนผสมที่มีค่าการไหล 230-235 มม. ได้แก่ ส่วนผสมที่มีดินเหนียวปนทรายเป็นองค์ประกอบ 60% และส่วนผสมที่มีตะกอนเป็นองค์ประกอบ 60%, 70% และ 80%, ได้ค่าการไหลเท่ากับ 235, 234, 234, และ 233 ตามลำดับ และได้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 10 ค่าการไหลของมอร์ตาร์โดยอ้างอิงเกณฑ์จาก 3D Mortar เชิงพาณิชย์

ตารางที่ 3 ปริมาณน้ำ (%) ที่เหมาะสมสำหรับฉีดขึ้นรูป

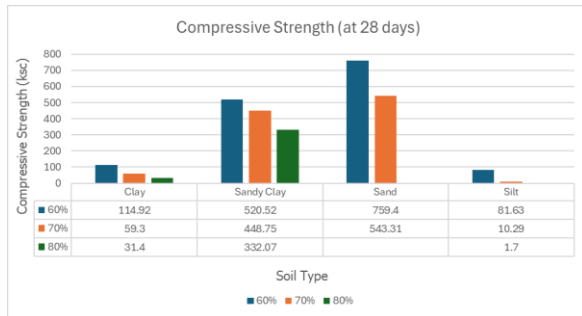
Soil Type	% Soil	% Water
Sandy Clay	60	18.5
Silt	60	50
	70	53
	80	53

3.3 การทดสอบมอร์ตาร์ในสภาวะแข็งตัวแล้ว (Hardened State)

3.3.1 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

ของตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 ซม.

จากรูปที่ 11 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลา 28 วัน โดยมอร์ตาร์ที่มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่ 28 วันมากกว่า 80 ksc ได้แก่ มอร์ตาร์ที่มีองค์ประกอบของดินเหนียว 60%, มอร์ตาร์ที่มีองค์ประกอบของดินเหนียวปนทราย 60%, 70% และ 80%, มอร์ตาร์ที่มีองค์ประกอบของทราย 60% และ 70% และ มอร์ตาร์ที่มีองค์ประกอบของตะกอน 60% ตามลำดับ



รูปที่ 11 ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่างลูกบาศก์

เมื่อนำค่าการไหลและกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของมอร์ตาร์ขนาด 5x5x5 ซม. มาพิจารณาร่วมกันพบว่ามีส่วนผสมเพียง 2 สูตร ที่ผ่านเกณฑ์การพิจารณา คือ ส่วนผสมที่มีองค์ประกอบของดินเหนียวปนทราย 60% และส่วนผสมที่มีองค์ประกอบของตะกอน 60% โดยให้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 520 และ 82 ksc ตามลำดับ

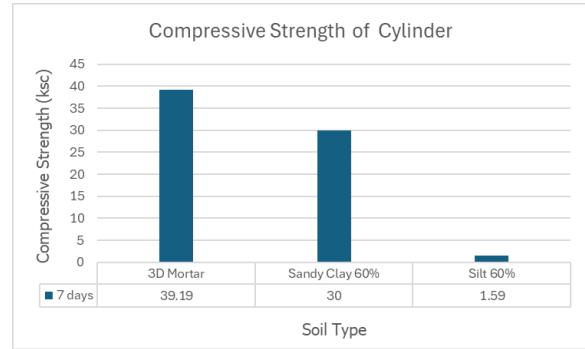
3.3.2 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

ของตัวอย่างทรงกระบอก

เนื่องจากโครงสร้างที่ได้จากการฉีดยุติด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีลักษณะโครงสร้างด้านในกลวง ผู้วิจัยจึงทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทรงกระบอกกลางอีกครั้งเพื่อให้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงและนำค่ากำลังรับแรงอัดที่ทดสอบได้ไปเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงอัดของ 3D Mortar เชิงพาณิชย์ โดยผู้วิจัยเลือกส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์การพิจารณาในสถานะสด (Fresh State) มาฉีดยุติเป็นทรงกระบอก

จากรูปที่ 12 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่างทรงกระบอกกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 ซม. สูง 15 ซม. หน้า 1.2 ซม.

บ่มที่ระยะเวลา 7 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของทรงกระบอกกลางที่ฉีดยุติขึ้นรูปจาก 3D Mortar, ทรงกระบอกกลางที่มีดินเหนียวปนทรายเป็นองค์ประกอบ 60% และทรงกระบอกกลางที่มีตะกอน เป็นองค์ประกอบ 60% เท่ากับ 39, 30 และ 2.93 ksc ตามลำดับ

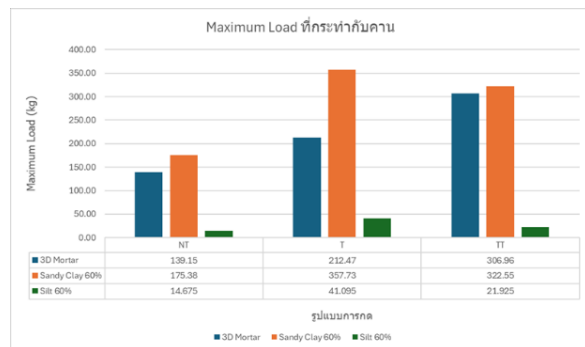


รูปที่ 12 ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่างทรงกระบอก

3.3.3 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัด (Bending Strength) ของ

คาน

จากรูปที่ 13 แสดงค่าน้ำหนักสูงสุดที่กระทำต่อโครงสร้างคานแต่ละชนิด โดยตัวอย่างคานที่ทดสอบมีขนาดกว้าง 10 ซม. สูง 10 ซม. ยาว 33 ซม. บ่มที่ระยะเวลา 7 วัน และจะหยุดให้น้ำหนักเมื่อพบว่าคานที่ทดสอบเกิด first crack ผลการทดสอบพบว่าคานที่ฉีดยุติด้วยส่วนผสมที่มีองค์ประกอบของดินเหนียวปนทราย 60% รับน้ำหนักได้มากที่สุดและมีค่าใกล้เคียงกับคานที่ขึ้นรูปด้วย 3D Mortar ในทุกรูปแบบการกด โดยคานที่ฉีดยุติด้วยส่วนผสมที่มีองค์ประกอบของดินเหนียวปนทราย 60% รับน้ำหนักการกดสูงสุดในรูปแบบการกด NT, T และ TT เท่ากับ 175, 358 และ 323 กิโลกรัม และโครงสร้างคานที่ภายในมีโครงกลังสามารถรับน้ำหนักสูงสุดได้มากกว่าคานกลวง 2 เมื่อนำไปคำนวณหาค่า Flexural Strength ได้เท่ากับ 24, 33 และ 7 ksc



รูปที่ 13 น้ำหนักสูงสุดที่กระทำต่อโครงสร้างคานแต่ละชนิด

4. สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการพัฒนาส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับใช้กับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยที่มีองค์ประกอบหลักเป็นดินผสมกับซีเมนต์ รวมถึงศึกษาการเสริมโครงสร้างภายในคาน เพื่อประเมินผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงของคาน โดยในการออกแบบและทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบหาความชื้นเหลวและค่าการไหลของมอร์ตาร์ เนื่องจากต้องการศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและต้องการจำแนกส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับนำไปฉีดยุติโครงสร้างคาน โดยกำหนดค่าการไหลแผ่นที่สนใจอยู่ในช่วง 230-235 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่อ้างอิงจาก 3D

Mortar เชิงพานิชย์ และต้องได้ค่ากำลังอัดประลัยที่ 28 วัน ของตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 ซม. มากกว่า 80 ksc โดยส่วนผสมที่เหมาะสม คือ ส่วนผสมที่มีองค์ประกอบของดินเหนียวปนทราย 60% และส่วนผสมที่มีองค์ประกอบของตะกอน 60% จากนั้นจึงนำส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์พิจารณาฉีดขึ้นรูปเป็นโครงสร้างคาน เพื่อพิจารณาผลของกำลังที่เพิ่มขึ้นเมื่อออกแบบโครงสร้างคานให้ภายในมีโครงถักและรับน้ำหนักในรูปแบบการกดที่แตกต่างกัน โครงสร้างคานที่มีโครงถักภายในสามารถรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นจากคานกลวงมากกว่า 2 เท่า เนื่องจากสามารถถ่ายแรงไปในแต่ละชั้นส่วนได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามการเลือกใช้คานในงานก่อสร้างจริงควรคำนึงถึงความคุ้มค่า โดยพิจารณาว่าการเพิ่มความสามารถในการรับแรงนั้นสอดคล้องกับปริมาณวัสดุและต้นทุนที่ต้องใช้เพิ่มขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฏฐา เวสสะภักดี, วิฑิต ปานสุข, กันตวิทย์ สุพรรณแสง, ลาภยศ ประสิทธิ์ไธกิน และ ทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์ (2566). การศึกษาพฤติกรรม การรับแรงของคานจากการใช้แบบด้วยการพิมพ์ 3 มิติ. *การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28*, ภูเก็ต, 24-26 พฤษภาคม 2566.
- [2] ชนม์วิทย์ ธัญญะสุขวนิชย์, ทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์ และ วิฑิต ปานสุข. (2564). การศึกษาอัตราส่วนผสมและทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของ วัสดุซีเมนต์สำหรับการพิมพ์สามมิติ. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติ ครั้งที่ 26*, ออนไลน์, 23-25 มิถุนายน 2564.
- [3] Liu, D., Zhang, Z., Zhang, X. and Chen, Z. 3D printing concrete structures: State of the art, challenges, and opportunities. *Construction and Building Materials* 405. 2023, 133364, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133364>.
- [4] Curth, A., Pearl, N., Castro-Salazar, A., Mueller, C. and Sass, L. 3D printing earth: Local, circular material processing, fabrication methods, and Life Cycle Assessment. *Construction and Building Materials* 421 .2024, 135714, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135714>.
- [5] สุขสันต์ หอพิบูลสุข. (2547). *การเพิ่มกำลังของดินเหนียวและดิน ตะกอนโดยการผสมซีเมนต์สำหรับงานฐานราก*. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา.
- [6] Chen, Y., He, S., Gan, Y., Çopuroglu, O. Veer, F. and Schlangen, E. A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing. *Journal of Building Engineering* 45. 2022, 103599, <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.103599>.

[7] ประสาน ชันธรัตน์, วีรนนท์ มณีรัฐรุ่งเรือง, สลิลลาถัญ ตั้งเสถียร และ ทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์. (2566). การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติ ของวัสดุซีเมนต์สำหรับการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ ที่ใช้ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก เป็นสัดส่วนผสม. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28*, ภูเก็ต, 24-26 พฤษภาคม 2566.

[8] Gamage, K., Fawzia, S., Zahra, T., Teixeira, M.B.F. and Ramli Sulong, N.H. Advancement in Sustainable 3D Concrete Printing: A Review on Materials, Challenges, and Current Progress in Australia. *Buildings*. 2024, 14, 494, <https://doi.org/10.3390/buildings14020494>.

[9] Daher, J., Kleib, J., Benzerzour, M., Abriak, N.-E. and Aouad, G. The Development of Soil-Based 3D-Printable Mixtures: A Mix-Design Methodology and a Case Study. *Buildings*. 2023, 13, 1618., <https://doi.org/10.3390/buildings13071618>.

[10] วรกร ไม้เรียง, จิรพัฒน์ โชติกร และ ประทีป ดวงเดือน (2525). *ปฏิวัติศาสตร์: ฟิสิกส์เชิงเตอร์ การพิมพ์*, หน้า 22-46.

[11] ประเสริฐ สุวรรณวิทยา, ขวเลข วนิชเวทิน และ สุวิมล สัจจ วนิชย์ (ม.ป.ป.). *คู่มือปฏิบัติการทดสอบวัสดุวิศวกรรมโยธา*. ม.ป.ท., หน้า 47-56.

[12] American Society for Testing and Materials, ASTM C 39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards, 2001.

[13] American Society for Testing and Materials, ASTM C 78 : Standard Test Method for Flexural Strength of Cylindrical Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), Annual Book of ASTM Standards, 2001.

[14] Rama Krishana, A. K., Mallik, M. and Damodar, M. Developing an appropriate concrete mix for 3D concrete printing. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. 2024, 9, 104, <https://doi.org/10.1007/s41024-024-00456-w>.

[15] Daher, J., Kleib, J., Benzerzour, M., Abriak, N.-E. and Aouad, G. The Development of Soil-Based 3D-Printable Mixtures: A Mix-Design Methodology and a Case Study. *Buildings*. 2023, 13, 1618., <https://doi.org/10.3390/buildings13071618>.

[15] Malaeb, Z., Hachem, H., Tourbah, A., Maalouf, T., Zarwi, N.E. and Hamzeh, F. 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2015, Volume 6, Issue 6, June , pp. 14-22; https://www.researchgate.net/publication/280488795_3D_Concrete_Printing_Machine_and_Mix_Design