

อิทธิพลของวัสดุประสานที่มีผลต่อสมบัติวัสดุทางกลของพลาสติกคอนกรีต

Influence of Binder Materials on the Mechanical Properties of Plastic Concrete

พงศกร วิมูลชาติ¹, พชรพล เอี่ยมเพ็ชร², เบญจจิรา พราหมณี³
สุบรรณ สนิทอินทร์⁴, เพ็ญพิชชา สนิทอินทร์^{5,*} และ การ์นต์ คล้ายน้ำ⁶

² นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม

^{1,3} นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม

⁴ นิสิตปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม

^{5,6} อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม

*Corresponding author; E-mail fengppcs@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อพิจารณาสมบัติทางกลของพลาสติกคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างกำแพงกันดิน (Cut-off Wall) ในโครงการปรับปรุงเสถียรภาพของเขื่อนสิริกิติ์ บริเวณเขื่อนดิน Dike 4 โดยเน้นการให้ความสำคัญกับสมบัติของวัสดุ ประสิทธิภาพทางกลและความสามารถในการทำงานของพลาสติกคอนกรีต เช่น ขนาดคละของวัสดุผสม การก่อตัวของพลาสติกคอนกรีต การยุบตัว โมดูลัสยืดหยุ่น และความสามารถในการรับกำลังอัด โดยปรับปรุงอัตราส่วนผสมของพลาสติกโดยการพิจารณาอัตราส่วนของวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น เพื่อใช้ผลทดสอบประเมินความสามารถและผลกระทบในการก่อสร้างที่ดำเนินการอยู่ ณ ปัจจุบัน ผลการศึกษาพบว่า พลาสติกคอนกรีตชนิดควบคุม (ถูกใช้ในการก่อสร้างจริงในช่วงต้น ตามข้อกำหนดโครงการ, TOR) นั้นมีคุณสมบัติที่ยังต่ำกว่าสัญญาจ้างทั้งในสมบัติด้านการก่อตัว การรับกำลังอัดและความยืดหยุ่น เมื่อพิจารณาผลการทดสอบของพลาสติกคอนกรีตที่ได้รับปรับปรุงส่วนผสมแล้ว จะเห็นได้ว่าสมบัติในด้านต่างๆ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของพลาสติกคอนกรีตนั้นดีขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางต้นแบบในการพัฒนาพลาสติกคอนกรีตโดยใช้วัสดุผสมชนิดอื่นๆ ในการก่อสร้าง เพื่อป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับกำแพงกันดินในอนาคตได้ งานวิจัยนี้มุ่งหวังให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาโครงสร้างเขื่อนและระบบกักเก็บน้ำในโครงการอื่น ๆ อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ : การก่อตัวของพลาสติกคอนกรีต, คุณสมบัติทางกล, พลาสติกคอนกรีต, เบนท์โนไนท์

Abstract

This research aims to investigate the mechanical properties of plastic concrete used in the construction of cut-off walls for the Sirikit Dam stability improvement project, specifically at

Earth Dam Dike 4. The study emphasizes material properties, mechanical properties, and workability of plastic concrete, such as aggregate gradation, setting time, slump, elastic modulus, and compressive strength of concrete. The mix proportions were modified by increasing the binder content to evaluate performance and minimize construction-related impacts during ongoing works. The study found that the controlled plastic concrete mix (used in the early construction phase according to the project's Terms of Reference - TOR) exhibited properties that were below the contractual requirements in terms of workability, compressive strength, and flexibility compared. Furthermore, improved plastic concrete mixes demonstrated enhanced properties, suggesting better overall performance. The study also proposes prototype guidelines for developing plastic concrete using alternative materials in cut-off wall construction to mitigate potential impacts on the structure in the future. This research aspires to contribute new knowledge that can be applied to the sustainable development of dam structures and water retention systems in other related projects.

Keywords: Bentonite, Mechanical properties, Plastic concrete, Setting of Plastic concrete

1. บทนำ

การเสื่อมสภาพของเขื่อนและกำแพงกันดินเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของโครงสร้าง และความสามารถในการกักเก็บน้ำ ดังนั้นงานก่อสร้างโครงสร้างประเภทนี้ต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติทางกล

และความทนทานสูง เพื่อให้สามารถรองรับแรงดันดินและแรงดันน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ หนึ่งในแนวทางที่ได้รับความสนใจคือการพัฒนาพลาสติกคอนกรีต โดยใช้สารเติมแต่ง เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของวัสดุ

กำแพงกันดินเป็นส่วนที่สำคัญเป็นอย่างมากในโครงสร้างเขื่อนดิน โดยทำหน้าที่เป็นเหมือนกับฟิล์มเพื่อกั้นระหว่างดินน้ำกับท้ายน้ำไม่ให้ให้น้ำภายในเขื่อนรั่วไหลออกมา ซึ่งวัสดุที่สามารถทำหน้าที่เป็นกำแพงกันดินนั้นไม่เพียงแต่มีค่าการซึมผ่านที่ต่ำหรือด้านความทนทาน แต่ยังต้องมีความสามารถในการทนกลในรูปแบบจำเพาะ โดยที่ชนิดของกำแพงกันดินมีอยู่ 4 ประเภทหลัก ได้แก่ 1. Soil - bentonite หรือ Earth Cutoff 2. Cement-bentonite 3. Plastic Concrete 4. Reinforced Concrete โดยผู้ว่าจ้างนั้นได้เลือกใช้วัสดุชนิดพลาสติกคอนกรีต[1]ที่มีความสามารถด้านความแข็งแรงและยืดหยุ่นได้ตามต้องการ แต่อย่างไรก็ตาม ส่วนผสมที่ใช้มีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับแต่ละพื้นที่ ทำให้ต้องมีการทดสอบหาผลการทดสอบทางห้องทดสอบ เพื่อยืนยันได้ว่า อัตราส่วนผสมของพลาสติกคอนกรีตที่เลือกมาใช้งานมีประสิทธิภาพเพียงพอหรือดีกว่าเกณฑ์ที่ผู้ว่าจ้างกำหนด

ในงานพลาสติกคอนกรีต มีที่ถูกนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อเสริมสร้างคุณสมบัติพิเศษในการป้องกันการซึมผ่านของน้ำและเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับคอนกรีต พลาสติกคอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารต้านทานแรงดันจากน้ำและดินได้ดีขึ้น โดยไม่ทำให้เกิดการแตกร้าวหรือเสื่อมสภาพเร็วเหมือนคอนกรีตทั่วไป เนื่องจากพลาสติกคอนกรีตจะมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับดินมากกว่าคอนกรีตทั่วไป นอกจากนี้ ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองของคอนกรีตเมื่อเกิดรอยร้าวเล็ก ๆ เนื่องจากคุณสมบัติการพองตัวที่สามารถอุดช่องว่างและรอยแตกร้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ[2]

เป็นแร่ดินเหนียวธรรมชาติที่มีคุณสมบัติพิเศษในการพองตัวเมื่อสัมผัสน้ำและมีความสามารถในการกักเก็บน้ำได้ดี แร่ชนิดนี้ได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้างและวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะในงานที่ต้องการการป้องกันการซึมผ่านของน้ำและการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุก่อสร้างต่าง ๆ หนึ่งในนั้นคืองานพลาสติกคอนกรีต ซึ่งมีความสำคัญต่อโครงสร้างที่ต้องรับแรงดันจากน้ำและดิน เช่น กำแพงกันดิน

การนำมาใช้ในงานพลาสติกคอนกรีตจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตให้สามารถต้านทานต่อการซึมผ่านของน้ำได้ดีขึ้น ช่วยลดปัญหาการเสื่อมสภาพที่เกิดจากการกัดกร่อนเนื่องจากการซึมผ่านของน้ำ ทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการบำรุงรักษาโครงสร้างในระยะยาวด้วยเหตุนี้ การใช้จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการสร้างความมั่นคงและความปลอดภัยให้กับโครงสร้างที่ต้องเผชิญกับแรงดันน้ำแต่ยังมีปัญหาในวิธีการเตรียมวัสดุเพื่อนำไปใช้ในส่วนผสมพลาสติกคอนกรีตว่าควรผสมน้ำก่อนหรือใช้แบบแห้งในการผสม และยังมีปัญหาลักษณะการใส่ส่วนผสมก่อน/หลัง ด้วยเหตุนี้ได้นำข้อมูล 1.การผสมก่อนมีการรับกำลังอัดได้ดีกว่าแบบแห้ง[3] 2.ขั้นตอนใส่ส่วนผสมนั้นไม่ส่งผลเมื่ออายุของพลาสติกคอนกรีตมากขึ้น[2]

ดังนั้น การพัฒนาพลาสติกคอนกรีตที่มีสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของกำแพงกันดิน จึงเป็นการยกระดับมาตรฐานงานก่อสร้างให้สามารถทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ท้าทายมากขึ้น และมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการสร้างโครงสร้างพื้นฐานที่ปลอดภัย ความทนทานในระยะยาวดังกล่าว และคาดหวังให้มีคุณภาพสูงขึ้น เพื่อป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับกำแพงกันดินในอนาคตได้

การศึกษานี้จึงมุ่งหมายที่จะศึกษาสมบัติของพลาสติกคอนกรีตทั้งในด้านการรับกำลัง ความยืดหยุ่น และความทนทาน รวมถึงการให้ความสำคัญกับการพิจารณาสมบัติของวัสดุที่นำมาผลิตเป็นพลาสติกคอนกรีตในการก่อสร้าง/ปรับปรุงเสถียรภาพของเขื่อนลิริกิตี บริเวณเขื่อนดิน Dike 4

2. วิธีการดำเนินงานวิจัยและการทดสอบ

2.1 วัสดุวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยนี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด โดยวัสดุแต่ละชนิดได้รับการทดสอบสมบัติตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้องเพื่อให้มั่นใจถึงความเหมาะสมในการใช้งาน

วัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ปูนซีเมนต์ชนิดปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ดังแสดงในตารางที่ 1 ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก โดยใช้ขวดแก้วเลอชาเตอลิเออร์ (Le Chatelier) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188 [4] โดยมีค่าเท่ากับ 3.138

ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มเพื่อให้มีความเป็นพลาสติกคอนกรีต โดยในการศึกษานี้ ใช้ ประเภท Sodium Bentonite ซึ่งมีคุณสมบัติการพองตัวสูงและสามารถกักเก็บน้ำได้ดี สมบัติทางเคมีของที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยค่าความถ่วงจำเพาะของมีค่า 2.499

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของ

Chemical Composition %	Hydraulic Cement	Bentonite
Silicon Dioxide, SiO_2	17.1	55-58
Aluminum Oxide, Al_2O_3	2.98	16-18
Ferric Oxide, Fe_2O_3	3.16	5-7
Calcium Oxide, CaO	69.9	1.9-2.1
Magnesium Oxide, MgO	-	2.1-2.5
Sulfur Trioxide, SO_3	6.23	-
Potassium Oxide, K_2O	0.57	0.3-0.5
Loss on Ignition, LOI	1.86	11-12
Sodium Oxide, Na_2O	-	3.6-4.0
Titanium Dioxide, TiO_2	-	1.2-1.5

มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ หินปูน และทรายแม่น้ำ ตามลำดับ ซึ่งเป็นวัสดุชุดเดียวกันกับวัสดุที่ใช้ในโครงการปรับปรุงเสถียรภาพของเขื่อนสิริกิติ์ บริเวณเขื่อนดิน Dike 4 วัสดุทั้งสองถูกคัดเลือกและทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุก่อนนำมาใช้ การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน เป็นตามวิธีของ ASTM C188 [4] โดยใช้ขวดแก้วเลอชาเตอลีเออร์ (Le Chatelier flask) การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดน้ำของมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C128 [5] การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดน้ำของมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM C127 [6] การทดสอบหาความชื้นของ ตามมาตรฐาน ASTM D2216 [7] การทดสอบหาความชื้นของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C566 [8] การทดสอบการวิเคราะห์หาสัดส่วนขนาดคละ ตามมาตรฐาน ASTM C136 [9] การทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน ตามมาตรฐาน ASTM C131 [10] การทดสอบหาค่าความคงทน ตามมาตรฐาน ASTM C88 [11] การทดสอบหาหน่วยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C29 [12] การทดสอบสารอินทรีย์ที่เจอปนในทราย ตามมาตรฐาน ASTM C40 [13] และการทดสอบหาความเป็นกรดต่าง โดยใช้กระดาษลิตมัส

ตารางที่ 2 แสดงสมบัติจำเพาะของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยที่เป็นปัจจัยสำคัญในการนำมาออกแบบและพิจารณาประกอบร่วมกับผลการทดสอบของพลาสติกคอนกรีต ซึ่งจะพบว่าค่าโมดูลัสความละเอียดของหินและทราย มีค่าเท่ากับ 5.60 และ 2.31 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของมวลรวมที่เหมาะสม นอกจากนี้ น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตเป็นน้ำที่ได้จากเขื่อนสิริกิติ์ ซึ่งเป็นน้ำที่ใช้จริงในการก่อสร้างเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของเขื่อนดังกล่าว และไม่พบสิ่งเจือปนที่เป็นอันตรายต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันร่วมกับปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2 สมบัติของวัสดุ

การทดสอบ	มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	เบนโทไนท์
Abrasion (%)	-	27.08	-	-
Soundness (%)	33.78	15.16	-	-
Absorption (%)	0.58	0.39	-	-
Specific Gravity	2.50	2.72	3.138	2.481
Moisture (%)	0.33	0.10	-	11.93
Organic (Pass/Not Pass)	Pass	-	-	-
Finess Modulus	2.31	5.60	-	-

2.2 ส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นพลาสติกคอนกรีต 2 ส่วนผสม 1.ตัวอย่างควบคุมคอนกรีต CN คือตัวอย่างที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ 140 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร 35 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร 2.ตัวอย่างปรับปรุงคอนกรีต CD มีปริมาณปูนซีเมนต์ 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร 30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มวลรวมและปริมาณในส่วนผสมทั้งสองส่วนผสมเท่ากัน แสดงดังตารางที่ 3 โดยพิจารณาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 2.24 และ 1.70 ในการศึกษาครั้งนี้มีวัสดุประสานที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3 ส่วนผสมพลาสติกคอนกรีต

Concrete	CN	CD
Cement	140	200
Sand	736	736
Limestone	864	864
Bentonite	35	30
Water	392	392
W/B Ratio	2.24	1.70
Slump (cm)	20±2	20±2

2.3 การทดสอบ

2.3.1 การทดสอบกำลังอัดของพลาสติกคอนกรีต (Compressive Strength of Plastic Concrete)

การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39/39M [14] เป็นการทดสอบเพื่อหาลำดับกำลังอัดของคอนกรีต ดังรูปที่ 1 โดยทำความสะอาดผิวของตัวอย่างคอนกรีต หลังจากนั้นทำการปรับผิวหน้าทดสอบให้เรียบทั้งด้านบนและล่างเพื่อให้แน่ใจได้ว่าพื้นที่รับแรงอัดเรียบและสามารถรับกำลังอัดได้ทั่วหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีต ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ โดยแต่ละอายุการทดสอบใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 15X30 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง ซึ่งแต่ละอายุการทดสอบได้พิจารณากำลังอัดที่มีความแตกต่างกันอยู่ในช่วงร้อยละ 7.8 ของค่าเฉลี่ยกำลังอัด

2.3.2 การทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกคอนกรีต (Elastic modulus of Plastic Concrete)

การทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C469[15] เป็นการทดสอบเพื่อหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยทำการปรับผิวหน้าทดสอบให้เรียบแล้ว ติดตั้ง Compressometer เข้ากับก้อนตัวอย่างดังรูปที่ 1 ทำการทดสอบที่อายุ 7, 28, 60, 90 และ 120 วัน



รูปที่ 1 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดและโมดูลัสของความยืดหยุ่น

2.3.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของพลาสติกคอนกรีต (Flexural Strength of Plastic Concrete)

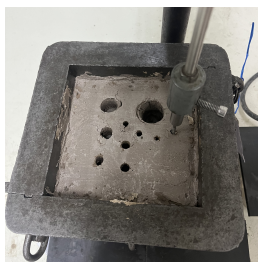
การทดสอบความแข็งแรงในการดัดตามมาตรฐาน ASTM C78 (2021) เป็นการทดสอบคานคอนกรีตเพื่อหาค่ากำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีตในรูปของโมดูลัสการแตกร้าว โดยการทดสอบนี้จะแตกต่างจากการดัดตัวอย่างคอนกรีตโดยตรง เนื่องจากการยืดหดตัวในคานคอนกรีตนี้อยู่ในลักษณะส่วนโค้ง ดังรูปที่ 2 ซึ่งทำการทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตที่อายุ 7 และ 28 วัน



รูปที่ 2 การทดสอบการดัดของพลาสติกคอนกรีต (Flexural strength of Plastic Concrete)

2.3.4 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของพลาสติกคอนกรีต (Setting Time of Plastic Concrete)

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 403 [16] เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าระยะการก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีต และระยะการก่อตัวสุดท้าย โดยทำการทดสอบ 3 ตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบระยะเวลาการทำงานของคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของพลาสติกคอนกรีต (Setting Time of Plastic Concrete)

2.3.5 การทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss)

การทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัวตามมาตรฐาน ASTM C143 [17] เป็นการวัดค่า Slump ชั่วโมงๆ 15 นาที เพื่อให้ทราบว่าคอนกรีตสามารถรักษาคูณสมบัติการไหลตัวได้นานแค่ไหน การทดสอบแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump loss)

3. ผลการทดสอบ

3.1 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต (Setting Time)

3.1.1 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต CN

จากผลการทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่างของคอนกรีต CN พบว่าตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) คือ 11, 15 และ 15 ชั่วโมง ตามลำดับ มีค่าแรงต้านทานเท่ากับ 600, 980 และ 1000 ปอนด์/ตร.นิ้ว ตามลำดับ ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) คือ 59, 60 และ 60 ชั่วโมง ตามลำดับ มีค่าแรงต้านทานเท่ากับ 4080, 4000 และ 4040 ปอนด์/ตร.นิ้ว ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

จากผลการทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่างของคอนกรีต CD พบว่าตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) คือ 8, 9 และ 9 ชั่วโมง ตามลำดับ มีค่าแรงต้านทานเท่ากับ 1120, 800 และ 800 ปอนด์/ตร.นิ้ว ตามลำดับ ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) คือ 20, 19 และ 19 ชั่วโมง ตามลำดับ มีค่าแรงต้านทานเท่ากับ 4800, 4320 และ 4560 ปอนด์/ตร.นิ้ว ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

3.1.3 เปรียบเทียบการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต CD กับคอนกรีต CN

จากผลการก่อตัวของพลาสติกคอนกรีตทั้งคือคอนกรีต CN และคอนกรีต CD ที่กล่าวมาในหัวข้อข้างต้น มีผลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ระยะการก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) คอนกรีต CD มีการก่อตัวที่เร็วกว่าคอนกรีต CN 1.67 เท่า ระยะการก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) แตกต่างกันถึง 3 เท่า ดังนั้นเวลาการก่อตัวของคอนกรีต CN จึงส่งผลต่อการทำงานหน้างาน

3.2 การทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump loss)

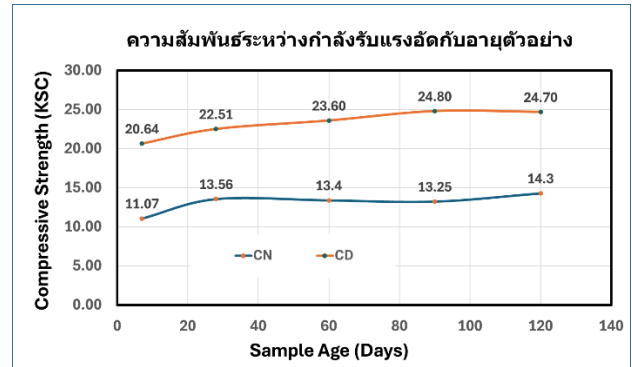
จากผลการทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ตารางที่ 4 พบว่าพลาสติกคอนกรีต CN มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นที่ 21.6 เซนติเมตร เมื่อวัดค่าการยุบตัวทุก 15 นาที พลาสติกคอนกรีต CN มีค่าการยุบตัวที่ 9.2 และ 3.2 เซนติเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าภายใน 30 นาที มีการสูญเสียค่าการยุบตัวอย่างรวดเร็ว ในขณะที่พลาสติกคอนกรีต CD มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นที่ 18 เซนติเมตร และค่าการยุบตัวลดลงเหลือ 12.7 เซนติเมตร ในเวลา 15 นาที ซึ่งมีค่าการยุบตัวที่ลดลงช้ากว่าในตัวอย่างพลาสติกคอนกรีต CN จะแสดงให้เห็นว่าพลาสติกคอนกรีต CD มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีกว่า แต่เมื่อเทียบที่เวลา 0 นาที ตัวอย่างควบคุมมีค่าการยุบตัวที่ต่ำกว่า ส่งผลให้การทำงานของหน้างานสะดวกขึ้น เนื่องจากตัวอย่างควบคุม คอนกรีต CN นั้นมีปริมาณเบนโทไนท์ที่สูงกว่า ตัวอย่างปรับปรุงคอนกรีต CD [18]

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss)

เวลา (นาที)	ระยะการยุบตัว (ซม.)	
	CN	CD
0	21.6	18
15	9.2	12.7
30	3.2	0

3.3 การทดสอบกำลังอัดของพลาสติกคอนกรีต (Compressive Strength of Plastic Concrete)

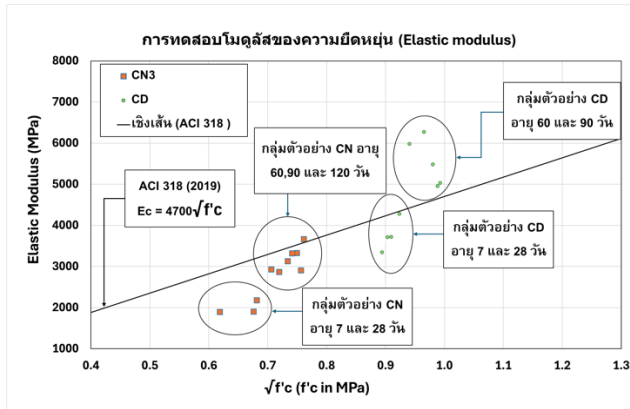
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของพลาสติกคอนกรีต ดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นแนวโน้มการเพิ่มกำลังรับแรงอัดที่มากขึ้น เมื่ออายุตัวอย่างมากขึ้น โดยที่ตัวอย่างปรับปรุงคอนกรีต CD มีกำลังรับแรงอัดทุกช่วงอายุมากกว่าตัวอย่างคอนกรีต CN เนื่องจากมีปริมาณของปูนซีเมนต์ที่มากกว่า โดยที่ตัวอย่างควบคุมมีปริมาณปูนซีเมนต์อยู่ที่ 140 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่ตัวอย่างปรับปรุงคอนกรีต CD มีปริมาณปูนซีเมนต์อยู่ที่ 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.24 และ 1.96 ตามลำดับ จึงทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของทั้งสองตัวอย่างมีปริมาณที่ต่างกัน ส่งผลให้ปริมาณ C-S-H ที่มีหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานต่างกันเช่นเดียวกัน และยังแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปริมาณน้ำที่มีต่อพลาสติกคอนกรีต [3, 19-21] ที่กล่าวมาทั้ง 2 ส่วน ข้างต้น 1. ปริมาณของปฏิกิริยาไฮเดรชัน 2. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ส่งผลให้เกิดช่องว่างในพลาสติกคอนกรีต ซึ่งเป็นปัจจัยให้น้ำสามารถซึมผ่านได้ [3] และจะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีต CD มีความชันของกราฟอย่างต่อเนื่อง แต่ตัวอย่างคอนกรีต CN ที่อายุตัวอย่าง 28 วันไปแล้วไม่มีการพัฒนาของกำลังรับแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ



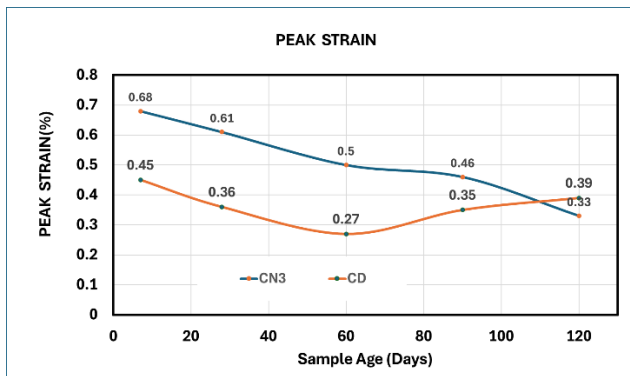
รูปที่ 5 กำลังอัดของพลาสติกคอนกรีต

3.4 การทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกคอนกรีต (Elastic modulus of Plastic Concrete)

ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่น ตามมาตรฐาน ASTM C469-21 แสดงในรูปที่ 6 พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกคอนกรีตแปรผันโดยตรงกับค่ากำลังรับแรงอัด โดยค่าที่ได้จากการทดสอบสามารถได้ผลของโมดูลัสเส้นเชื่อมจุดเริ่มต้นกับจุดบนส่วนโค้ง (Secant Modulus) และโมดูลัสสัมผัส (Tangent Modulus) ซึ่งค่าที่ได้ทั้ง 2 โดยการคำนวณนั้นค่าของโมดูลัสเส้นเชื่อมจุดเริ่มต้นกับจุดบนส่วนโค้ง (Secant Modulus) เนื่องจากพฤติกรรมการเสียรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้นของคอนกรีตเมื่อรับแรงอัดสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ACI 318 [22] กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับรากที่สองของกำลังอัดคอนกรีต CN มีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นที่ต่ำกว่าเส้นมาตรฐาน ACI 318 แต่จะเห็นได้ว่าเมื่ออายุของคอนกรีต CN มีอายุ 60 วันขึ้นไปมีความใกล้เคียงกับมาตรฐาน ACI 318 ในช่วง 3,000-3,700 MPa แต่คอนกรีต CD จะเห็นได้ว่ามีการกระจายตัวของผล [18] โดยผลของคอนกรีต CD ที่อายุ 7 และ 28 วันนั้นมีค่าต่ำกว่าเส้นกราฟมาตรฐาน ACI 318 แต่เมื่ออายุ 60, 90 และ 120 วัน มีผลที่สูงกว่ามาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าหลังจากอายุ 28 วันนั้นมีการทำปฏิกิริยาบางอย่างที่น่าสนใจ เพราะตามทฤษฎีแล้วเมื่อคอนกรีตอายุ 28 วันแล้วยังคงมีการพัฒนา กำลังรับแรงอัดอยู่ แต่ค่อนข้างน้อย จึงทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลัง 28 วันนั้นเป็นสิ่งที่ควรทำการศึกษาต่อในเชิงเคมี และจากรูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสูงสุดกับอายุตัวอย่างการทดสอบของพลาสติกคอนกรีต แสดงให้เห็นได้ว่าตัวอย่างคอนกรีต CN มีค่าความเครียดสูงสุดมากกว่าคอนกรีต CD ทุกช่วงอายุ และมีค่าความเครียดสูงสุดลดลงทั้งสองตัวอย่าง เมื่ออายุตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องมาจากการหดตัวของพลาสติกคอนกรีตลดลงตามอายุ เนื่องมาจากช่องว่างในเนื้อพลาสติกคอนกรีตทั้งคอนกรีต CN และ คอนกรีต CD ไม่เท่ากัน เพราะปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ทำให้คอนกรีต CN มีการให้ตัวมากกว่าคอนกรีต CD แต่เมื่ออายุเพิ่มปฏิกิริยาไฮเดรชันมีปริมาณมากขึ้นตามอายุตัวอย่างทำให้ช่องว่างที่กล่าวมาลดลง และตัวอย่างปรับปรุงคอนกรีต CD ที่อายุตัวอย่าง 90 วันมีผลการทดสอบที่ไม่เป็นไปตามแนวโน้มของกราฟ จึงต้องรออายุตัวอย่างที่ 120 วัน



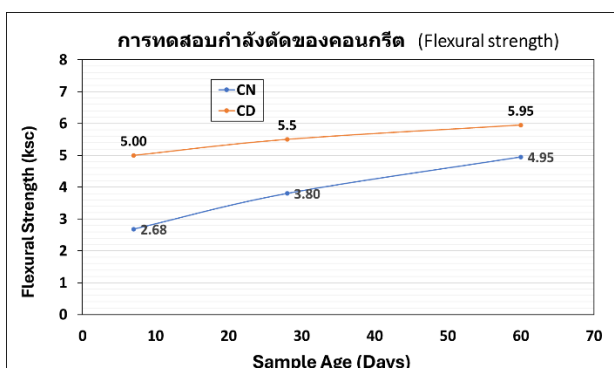
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์โมดูลัสยืดหยุ่นกับ $\sqrt{f'c}$



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสูงสุดกับอายุตัวอย่างการทดสอบ

3.5 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของพลาสติกคอนกรีต (Flexural Strength of Plastic Concrete)

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของพลาสติกคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าคอนกรีต CD ซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากกว่าคอนกรีต CN มีกำลังรับแรงดัดมากกว่าคอนกรีต CN อย่างชัดเจนในทุกช่วงอายุของการทดสอบ เนื่องจากคอนกรีต CD มีปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากกว่าส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงได้ผลผลิตที่เรียกว่า C-S-H ซึ่งเป็นตัวหลักในการประสานคอนกรีตให้แข็งแรงตามปริมาณของปูนซีเมนต์ ในขณะที่การใช้ปริมาณสูงในคอนกรีต CN อาจส่งผลให้โครงสร้างภายในคอนกรีตมีความไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากมีลักษณะเป็นอนุภาคละเอียดที่ไม่สามารถช่วยเสริมกำลังได้ และอาจแทรกตัวขัดขวางการเกิด C-S-H จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต CN ต่ำกว่าคอนกรีต CD



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดกับอายุตัวอย่าง

4. สรุปผลการทดสอบ

- คอนกรีต CD มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายที่ไววกว่าคอนกรีต CN ในด้านแรงต้านทานคอนกรีต CD ก็มีค่าแรงต้านทานที่มากกว่าเมื่อเทียบทั้งที่ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้าย
- คอนกรีต CD มีค่าการสูญเสียการยุบตัวที่เร็วกว่า คอนกรีต CN แต่ทั้งคอนกรีต CN และคอนกรีต CD มีการสูญเสียการยุบตัวที่เร็ว จึงมีความสามารถในการทำงานในระยะเวลาที่จำกัด
- พลาสติกคอนกรีตมีแนวโน้มพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น และกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นตามอายุ
- คอนกรีต CD มีการรับกำลังอัดที่ดีกว่าคอนกรีต CN เนื่องจากคอนกรีต CD มีปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากกว่าและค่า W/B ที่ต่ำกว่า จึงทำให้คอนกรีต CD มีความหนาแน่นสูง และมีช่องว่างภายในลดลง แต่พลาสติกคอนกรีตทั้งสองประเภทก็มีแนวโน้มการพัฒนาการรับกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแปรผันตามค่ากำลังอัด
- ค่าความเครียดสูงสุด (Peak Strain) ของคอนกรีต CD มีค่าที่ต่ำกว่าคอนกรีต CN เนื่องจากคอนกรีต CD มีค่ากำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูง เนื่องจากค่าความเครียดสูงสุดจะแปรผกผันกับค่ากำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น

5. ข้อเสนอแนะ

- เนื่องจากเบนโทไนท์ที่ใช้ในแต่ละส่วนผสมมีแหล่งที่มาที่แตกต่างกัน ดังนั้นก่อนการนำเบนโทไนท์มาใช้ควรทดสอบสมบัติทางกายภาพ เพื่อให้ได้ผลดีต่อการทำปฏิกิริยาของคอนกรีตพลาสติก
- การเพิ่มสารเติมแต่งด้วยเถ้าลอย (Fly Ash) ในอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม อาจช่วยให้คุณสมบัติของคอนกรีตพลาสติกมีแนวโน้มที่ดีขึ้น [23, 24]
- การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ และลดเบนโทไนท์ลง (W/B) ส่งผลให้พลาสติกคอนกรีตมีคุณสมบัติที่เป็นคอนกรีตมากขึ้น
- ศึกษาสารเติมแต่งเพิ่มเติม เพื่อนำมาปรับปรุงและพัฒนาคุณสมบัติของพลาสติกคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น
- ศึกษาจุดอิ่มตัวของเบนโทไนท์ เพื่อกำหนดอัตราส่วนผสมให้เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน
- ปรับปรุงกระบวนการผสมของพลาสติกคอนกรีต โดยควบคุมระยะเวลาการผสมให้เหมาะสม เพื่อให้เบนโทไนท์กระจายตัวได้ดี ไม่จับตัวเป็นก้อน
- การทดสอบรับกำลังอัดและโมดูลัสของความยืดหยุ่นควรทดสอบแบบการบีบอัดแบบไตรแอกเซียล [25, 26]

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนในการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อีกทั้งงานวิจัย ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้เพราะได้รับความอนุเคราะห์วัสดุต่างๆจากทางโรงไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)

และขอขอบคุณที่อาจารย์ที่ปรึกษาและเพื่อนนิสิตที่สนับสนุนให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. Bruce, D.A., *Seepage cut-offs for levees and dams: The technology review*. 2009.
2. Alós Shepherd, D., E. Kotan, and F. Dehn, *Plastic concrete for cut-off walls: A review*. Construction and Building Materials, 2020. **255**: p. 119248.
3. Luo, J., et al., *Bentonite replacing part of cement concrete for resistance to chloride ion attack*. E3S Web of Conferences, 2019. **136**: p. 03011.
4. ASTM, *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*, in *Standard C188*. 2019, ASTM International: ASTM International, WestConshohocken, PA. p. 3.
5. ASTM, *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*, in *Standard C128*. 2023, ASTM International: ASTM International, WestConshohocken, PA. p. 6.
6. ASTM, *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*, in *Standard C127*. 2024, ASTM International: ASTM International, WestConshohocken, PA. p. 6.
7. ASTM, *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*, in *Standard D2216*. 2019, ASTM International: ASTM International, WestConshohocken, PA. p. 7.
8. ASTM, *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying*, in *Standard C566*. 2019, ASTM International: ASTM International, WestConshohocken, PA. p. 3.
9. ASTM, *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, in *Standard C136*. 2015, ASTM International: ASTM International, WestConshohocken, PA. p. 5.
10. ASTM, *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*, in *Standard C131*. 2010, ASTM International: ASTM International, WestConshohocken, PA. p. 4.
11. ASTM, *Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*, in *Standard C88*. 2023, ASTM International: ASTM International, WestConshohocken, PA. p. 5.
12. ASTM, *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*, in *Standard C29/C29M*. 2023, ASTM International: ASTM International, WestConshohocken, PA. p. 5.
13. ASTM, *Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete*, in *Standard C40*. 2011, ASTM International: ASTM International, WestConshohocken, PA. p. 2.
14. ASTM, *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, in *Standard C39/C39M*. 2023, ASTM International: ASTM International, WestConshohocken, PA. p. 8.
15. ASTM, *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, in *Standard C469-02e1*. 2010, ASTM International: ASTM International, WestConshohocken, PA. p. 5.
16. ASTM, *Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance*, in *Standard C403/C403M*. 2017, ASTM International: ASTM International, WestConshohocken, PA. p. 7.
17. ASTM, *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*, in *Standard C143*. 2017, ASTM International: ASTM International, WestConshohocken, PA. p. 4.
18. Alós Shepherd, D. and F. Dehn, *Experimental Study into the Mechanical Properties of Plastic Concrete: Compressive Strength Development over Time, Tensile Strength and Elastic Modulus*. Case Studies in Construction Materials, 2023. **19**: p. e02521.
19. Flessati, L., G.D. Vecchia, and G. Musso, *Effects of curing on the hydro-mechanical behaviour of cement-bentonite mixtures for cut-off walls*. Construction and Building Materials, 2023. **383**: p. 131392.
20. Abbaslou, H., A.R. Ghanizadeh, and A.T. Amlashi, *The compatibility of bentonite/sepiolite plastic concrete cut-off wall material*. Construction and Building Materials, 2016. **124**: p. 1165-1173.
21. Tang, B., et al., *The macroscopic mechanical characteristics and microscopic evolution mechanism of plastic concrete*. Construction and Building Materials, 2023. **391**: p. 131898.

-
22. ACI, *Building Code Requirements for Structural Concrete Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete*, in ACI 318R-19. 2019, American Concrete Institute: Farmington Hills.
23. Shabab, M.E., et al., *Synergistic effect of fly ash and bentonite as partial replacement of cement in mass concrete*. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016. **20**(5): p. 1987-1995.
24. Saingam, P., et al., *Synergizing Portland Cement, high-volume fly ash and calcined calcium carbonate in producing self-compacting concrete: A comprehensive investigation of rheological, mechanical, and microstructural properties*. Case Studies in Construction Materials, 2024. **21**: p. e03832.
25. Mahboubi, A. and A. Ajorloo, *Experimental study of the mechanical behavior of plastic concrete in triaxial compression*. Cement and Concrete Research, 2005. **35**: p. 412-419.
26. Pashang Pisheh, Y. and S.M. Mir Mohammad Hosseini, *Stress-strain behavior of plastic concrete using monotonic triaxial compression tests*. Journal of Central South University, 2012. **19**.