

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก

นายธนกฤต ภูประดิษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2569

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก

นายธนกฤต ภู่ประดิษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2569

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง คุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก

โดย นายธนกฤต ภู่ประดิษฐ์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

..... รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.เสาวณิต สุขภารังษี)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธาน

(ศาสตราจารย์ ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร.พิทยา แจ่มสว่าง)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ณพล อยู่บรรพต)

ชื่อ : นายธนกฤต ภู่ประดิษฐ์
ชื่อวิทยานิพนธ์ : คุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก
สาขาวิชา : วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศาสตราจารย์ ดร.พิทยา แจ่มสว่าง
ปีการศึกษา : 2569

บทคัดย่อ

การก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนมักประสบปัญหาการทรุดตัวและเสถียรภาพต่ำ เนื่องจากดินมีค่ากำลังเฉือนต่ำและการยุบตัวสูง การใช้เสารองรับ เช่น เสาคอนกรีต เสาดินซีเมนต์ และเสากรวด สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพดินได้ อย่างไรก็ตาม เสาเหล่านี้มีความแข็งแรงสูงเกินความจำเป็นสำหรับงานคันทางดิน ส่งผลให้มีต้นทุนก่อสร้างที่มากและสิ้นเปลืองทรัพยากรดังนั้น การศึกษานี้จึงนำเสนอเสาแบบยืดหยุ่นร่วมกับเสาแบบแข็งกลายเป็นเสาแบบกึ่งแข็ง ที่มีความสามารถและคุณสมบัติขึ้นอยู่กับประเภทวัสดุที่นำมาใช้ เรียกว่า “เสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยขวดพลาสติก” เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมเพื่อนำไปใช้ในการก่อสร้าง ควบคู่กับการลดต้นทุนทรัพยากรและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยขี้เถ้ายูคาลิปตัสซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเผาชีวมวลของโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล ขณะเดียวกันได้นำขวดพลาสติกที่จัดอยู่ในวัสดุเหลือทิ้งประเภทขยะพลาสติกรีไซเคิลมาแปรรูปเป็นเส้นใยเพื่อปรับปรุงและเสริมประสิทธิภาพของวัสดุ วัสดุที่ใช้ประกอบด้วยมวลรวมหยาบขนาด 4.75–9.50 และ 9.50–19.00 มิลลิเมตร ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในปริมาณ 340 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.32 โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขี้เถ้ายูคาลิปตัสในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนัก และใช้เส้นใยจากขวดพลาสติกขนาดความกว้าง 2 มิลลิเมตร ความยาว 70 มิลลิเมตร ในปริมาณส่วนร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยปริมาตร เพื่อศึกษากำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก กำลังรับแรงดัด ความพรุน และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน ร่วมกับการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ผลการศึกษาพบว่า ขนาดมวลรวม ปริมาณเถ้ายูคาลิปตัส และปริมาณเส้นใยพลาสติก ล้วนส่งผลต่อกำลังรับแรงและความสามารถในการระบายน้ำของเสา โดยมวลรวมแบบผสม (MG) ให้กำลังรับแรง

สูงสุดจากการจัดเรียงตัวที่ดี ขณะที่มวลรวมขนาดเดียว (LG) ให้ความพรุนและการไหลซึมผ่านของน้ำที่ดีกว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ายูคาลิปตัสที่ร้อยละ 10 ส่งผลให้กำลังรับแรงสูงสุด ในส่วนความพรุนและสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านต่ำสุด ส่วนเส้นใยพลาสติกที่ปริมาณร้อยละ 1.0 ให้กำลังรับแรงอัดและแรงดึงสูงสุด ในขณะที่ร้อยละ 2.0 ให้กำลังรับแรงดัดสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังรับแรงและความสามารถในการระบายน้ำมีความสัมพันธ์แบบผกผันกัน คือ เสาที่มีความพรุนสูงจะมีกำลังรับแรงต่ำ ผลการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสัดส่วนผสมของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยขวดพลาสติก ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน ไม่ว่าจะเน้นด้านกำลังรับแรงหรือด้านการระบายน้ำ อันเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 73 หน้า)

คำสำคัญ : เสากึ่งแข็ง ขี้เถ้ายูคาลิปตัส เส้นใยขวดพลาสติก ความพรุน กำลังรับแรงอัด สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

_____ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

Name : Mr. Tanakit Phoopradit
Thesis Title : Engineering Properties of Cement-Eucalyptus Ash Gravel Column Reinforced with Plastic Bottle Fibers
Major Field : Civil Engineering
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Professor Dr. Pittaya Jamsawang
Academic Year : 2026

ABSTRACT

Embankment construction on soft clay foundations often encounters excessive settlement and low stability, as the soil exhibits low shear strength and high compressibility. Supporting columns such as concrete columns, soil-cement columns, and gravel columns can be used to improve soil quality. However, these column types generally possess strength far exceeding what is required for embankment applications, resulting in high construction costs and unnecessary consumption of resources. This study therefore proposes a semi-rigid column concept, combining the properties of flexible columns (stone columns) with rigid columns (vibro-concrete columns), termed "Cement–Eucalyptus Ash Gravel Column Reinforced with Plastic Bottle Fibers." The objective is to investigate its engineering properties for construction applications while reducing material costs and environmental impact, by partially replacing cement with eucalyptus ash a waste by-product from biomass power plant combustion and by processing recycled plastic bottle waste into fibers to enhance material performance. The materials used include coarse aggregates of 4.75–9.50 mm and 9.50–19.00 mm, hydraulic cement at 340 kg/m³, and a water-to-binder ratio of 0.32. Cement was replaced with eucalyptus ash at 5%, 10%, 15%, 20%, and 25% by weight, and plastic bottle fibers (2 mm wide, 70 mm long) were added at 0.5%, 1.0%, 1.5%, and 2.0% by volume. Compressive strength, splitting tensile strength, flexural

strength, porosity, and coefficient of water permeability were evaluated at curing ages of 28 and 90 days, together with microstructural analysis using Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray Diffraction (XRD). The results showed that aggregate size, eucalyptus ash content, and plastic fiber content all significantly affected both the strength and drainage capacity of the columns. The mixed-graded aggregate (MG) produced the highest strength due to better particle packing, while the single-sized aggregate (LG) provided better porosity and water permeability. Replacing cement with 10% eucalyptus ash yielded the highest strength along with the lowest porosity and permeability coefficient. A fiber content of 1.0% produced the highest compressive and tensile strengths, while 2.0% produced the highest flexural strength. Furthermore, strength and drainage capacity were found to be inversely related columns with higher porosity exhibited lower strength. These findings can serve as a guideline for designing mix proportions of cement–eucalyptus ash gravel columns reinforced with plastic bottle fibers to suit specific application requirements, whether prioritizing strength or drainage performance, thereby promoting efficient resource use and reduced environmental impact.

(Total 73 Pages)

Keywords: Semi-rigid column, Eucalyptus ash, Plastic bottle fibers, Porosity, Compressive strength, Coefficient of permeability

_____ Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ศาสตราจารย์ ดร.พิทยา แจ่มสว่าง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ตลอดจนแก้ไข ในข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี ผู้ทำการวิจัยตระหนักถึงความทุ่มเทของอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้อำนวยความสะดวกการศึกษาวิจัย ทั้งในด้าน สถานที่ อุปกรณ์ ตลอดจนเครื่องมือทดสอบในการศึกษาให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้หารสนับสนุนในด้านการเงิน และเป็นแรงผลักดันให้กับผู้วิจัย จนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญามหาบัณฑิต

ธนกฤต ภู่ประดิษฐ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ฉ

กิตติกรรมประกาศ ซ

สารบัญ ฌ

สารบัญตาราง ฎ

สารบัญรูปภาพ ฏ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3

1.3 ขอบเขตงานวิจัย 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 คอนกรีตกำลังต่ำ 5

2.2 คอนกรีตพรุน 5

2.3 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตพรุน 6

2.4 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค 20

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย 24

3.1 การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม 24

3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ 28

3.3 วิธีการศึกษาคุณสมบัติเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก 32

3.4 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค 37

บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล 39

4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก 39

4.2 ลักษณะรูปแบบความเสียหายของตัวอย่างเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก 56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก 60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ 66
5.1 สรุปผลการทดลอง 66
5.2 ข้อเสนอแนะ 67
บรรณานุกรม 68
ประวัติผู้เขียน 73

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2-1 ค่าความพรุนของวัสดุชนิดต่างๆ 7

2-2 สัดส่วนผสมของคอนกรีตพรุน 10

2-3 ชนิดของเส้นใยรีไซเคิลพลาสติก 18

3-1 คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของมวลรวมหยาบ 25

3-2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และขี้เถ้ายูคาลิปตัส 27

3-3 คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของเส้นใยขวดพลาสติก 28

3-4 แสดงตัวอย่างสัดส่วนของการผสม 31

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สารบัญรูปภาพ

ภาพที่ หน้า

2-1 รูปตัดของคอนกรีตพรุนที่ปริมาณส่วนผสมแตกต่างกัน 7

2-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดมวลรวมและกำลังรับแรงอัด 9

2-3 กำลังรับแรงอัดของวัสดุงานทางแต่ละชนิด ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน 9

2-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น 11

2-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความพรุนรวม 11

2-6 ผลกระทบของ (a) ปริมาณเส้นใย, (b) ความยาวเส้นใย และ (c) ความกว้างเส้นใย เทียบกับค่ากำลังรับแรงอัด 13

2-7 (a) การติดตั้ง Compressometer และ Extensometer บนตัวอย่างทดสอบ (b) การติดตั้งตัวอย่างทดสอบบนเครื่องกดทดสอบ 14

2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและความพรุนที่ปริมาณความเค้นต่าง ๆ 14

2-9 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับค่ากำลังรับแรงอัด 15

2-10 แสดงค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก 16

2-11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดเทียบกับค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก 16

2-12 ผลกระทบของ (a) ปริมาณเส้นใย, (b) ความยาวเส้นใย และ (c) ความกว้างเส้นใย เทียบกับค่ากำลังรับแรงดัด 18

2-13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำ 19

2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุน กำลังรับแรงอัดและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน 20

2-15 ภาพถ่ายระดับจุลภาคของตัวอย่างขี้เถ้ายูคาลิปตัส ณ กำลังขยายต่าง ๆ ที่: (a) 400x, (b) 3,000x, (c) 6,000x และ (d) 12,000x 22

2-16 กราฟการเลี้ยวเบนของขี้เถ้ายูคาลิปตัส 23

3-1 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของมวลรวมหยาบ 25

3-2 แสดงมวลรวมหยาบที่นำมาใช้ในการทดสอบ 25

3-3 (a) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และ (b) ขี้เถ้ายูคาลิปตัส 26

3-4 ลักษณะของขวดพลาสติก ชนิด PE และขนาดเส้นใยขวดพลาสติก 27

3-5 การเตรียมตัวอย่างรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm ความสูง 200 mm 29

3-6 การเตรียมตัวอย่างคานทรงลูกบาศก์ขนาดความกว้าง 100 mm ความลึก 100 mm และความยาว 350 mm 30

3-7 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบกำลังอัด 33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

3-8 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีก 34

3-9 แสดงเครื่องทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน 35

3-10 แสดงตำแหน่งการติดตั้งการทดสอบกำลังรับแรงดัด 36

3-11 การดูดความชื้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบ SEM ด้วยซิลิกาเจล 37

3-12 การดูดความชื้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบ XRD ด้วยซิลิกาเจล 38

4-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนต่อปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่เพิ่มขึ้น ที่ปริมาณเส้นใยขวดพลาสติก 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0% ตามลำดับ และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ 41

4-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดต่อปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่เพิ่มขึ้น ที่ปริมาณเส้นใยขวดพลาสติก 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 % ตามลำดับ และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 และ 90 วันตามลำดับ 44

4-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังรับแรงอัด 45

4-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและมอดูลัสยืดหยุ่น 46

4-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดที่กำลังสูงสุด 47

4-6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกต่อปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่เพิ่มขึ้น ที่ปริมาณเส้นใยขวดพลาสติก 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0% ตามลำดับ และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 และ 90 วันตามลำดับ 49

4-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก 50

4-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่อปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่เพิ่มขึ้น ที่ปริมาณเส้นใยขวดพลาสติก 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0% ตามลำดับ และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 และ 90 วันตามลำดับ 52

4-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน 53

4-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุน กำลังรับแรงอัด และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน 54

4-11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดสูงสุดต่อปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ที่ปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัส 0 และ 10% ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 และ 90 วันตามลำดับ 55

4-12 ความเสียหายจากกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก (a) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (b) ที่อายุการบ่ม 90 วัน 57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-13 ความเสียหายจากกำลังรับแรงดึงของตัวอย่างเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก (a) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (b) ที่อายุการบ่ม 90 วัน 58

4-14 ความเสียหายจากกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก (a) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (b) ที่อายุการบ่ม 90 วัน 59

4-15 ภาพถ่าย SEM ของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก (a) EA0, EA10 และ EA25 ที่อายุการบ่ม 28 วัน (b) EA0, EA10 และ EA25 ที่อายุการบ่ม 90 วัน 62

4-16 ผลการวิเคราะห์ด้วยการทดสอบ (XRD) (a) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (b) ที่อายุการบ่ม 90 วัน 65

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ดินเหนียวอ่อนเป็นวัสดุทางธรณี โดยถือว่าเป็นดินที่มีปัญหาเนื่องจากมีกำลังเฉือนต่ำ และมีการการยุบอัดตัวสูง การก่อสร้างคันทางบนดินเหนียวอ่อนมักพบปัญหาจากแรงดันดินด้านข้างที่มาก และการทรุดตัว และการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงรวมถึงเสถียรภาพต่ำนำไปสู่การวิบัติ ปัญหาเหล่านี้ทำให้งานก่อสร้างล่าช้า และเสียค่าใช้จ่ายสูงสำหรับซ่อมแซม เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินได้ถูกนำมาใช้อย่างต่อเนื่องเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว อาทิเช่น เสาหิน (stone column) เสาทราย (sand column) เสาซีเมนต์ผสมลึก (deep cement mixing column, DCM) ซึ่งเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพเหล่านี้ล้วนแต่มีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดเกี่ยวกับลักษณะทางธรณีเทคนิคของชั้นดิน ข้อจำกัดด้านระยะเวลาในการก่อสร้าง หรือด้านการประมาณต้นทุนทั้งหมด ในส่วนของเสารองรับคันทางดิน โดยทั่วไปเสาที่ใช้ในการรองรับคันทางดินที่สร้างบนฐานรากดินเหนียวอ่อน อาทิเช่น เสาคอนกรีต เสาดินซีเมนต์ และเสากรวด ซึ่งเสาคอนกรีตมีความแข็งแรงสูง ลดการทรุดตัวได้ดี และสามารถตอกผ่านเข้าไปยังชั้นดินแข็ง หรือชั้นดินเหนียวแข็งเป็นผลทำให้สามารถรับกำลังได้มากกว่าเสาดินซีเมนต์ และเสากรวด แต่เนื่องด้วยจุดประสงค์ในการใช้งานที่เกินความจำเป็นจึงเกิดการสิ้นเปลืองทรัพยากร ดังนั้น เสาคอนกรีตจึงไม่เหมาะสมต่อการใช้งานในการรองรับคันทางดิน

คอนกรีตพรุน (Porous Concrete) มีองค์ประกอบพื้นฐานเช่นเดียวกับคอนกรีตทั่วไป แต่มีลักษณะเฉพาะที่ทำให้แตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากมีช่องว่างขนาดใหญ่ของคอนกรีตที่เชื่อมต่อกันภายใน และมีมวลรวมละเอียดเพียงเล็กน้อย หรือไม่มีเลย ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้มักอยู่ในช่วง 265–385 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) อยู่ในช่วง 0.26–0.40 (American Concrete Institute, 2010) โดยส่วนผสมและลักษณะของมวลรวมหยาบมีผลต่อความแข็งแรงและความพรุนของคอนกรีตพรุนอย่างมีนัยสำคัญ (Aamer Rafique Bhutta, et al. 2013; Bhutta, et al. 2012; Ibrahim, et al. 2014; Joshaghani, et al. 2015; Lian, et al. 2011; Xu, et al. 2018; Zhong & Wille, 2015) และเพื่อให้สามารถระบายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องให้แน่ใจว่าคอนกรีตพรุนมีความพรุนและความสามารถในการซึมผ่านที่เพียงพอ ทำให้คอนกรีตพรุนมักจะมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป ถึงแม้ว่าคอนกรีตพรุนมีความแข็งแรงและความสามารถในการซึมผ่านที่ดี แต่คอนกรีตพรุนไม่มีความเหมาะสำหรับการรองรับคันทางดินเนื่องจากค่ากำลังรับแรงอัดที่เกินความจำเป็น ส่งผลต่อต้นทุนในการก่อสร้างสูงเกินความจำเป็น

ในปัจจุบัน ประเทศไทยมีโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล (Biomass power plant) จำนวนมาก ซึ่งผลพลอยได้จากการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง คือ เถ้าชีวมวล (Biomass ash) โดยการเผาชีวมวลจะผลิตเถ้าประมาณ 1,000 ตันต่อเมกะวัตต์ต่อปี เถ้าเหล่านี้มักถูกกำจัดโดยการฝังกลบ ซึ่งต้องใช้พื้นที่จำนวนมาก และมีค่าใช้จ่ายสูงในการจัดการ แต่ปัจจุบันการนำเถ้าชีวมวลไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ มีจำนวนมากขึ้น อาทิเช่น การนำมาใช้งานในด้านวิศวกรรมโยธาเป็นทางเลือกหนึ่ง โดยในด้านขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชีวมวลส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) สูง เมื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ และปริมาณน้ำที่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา ทำให้เกิดสารเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาในการใช้ประโยชน์ในด้านงานวิศวกรรมโยธา (Jamsawang, et al. 2017; Couto, et al. 2024) การศึกษาข้างต้นทำให้เห็นว่าเถ้าชีวมวลมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุปอซโซลานิกแทนที่ปูนซีเมนต์ มีส่วนในการทำให้คุณสมบัติของวัสดุดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีส่วนในการช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ ลดต้นทุน และลดปัญหาในการฝังกลบของเถ้าชีวมวลอีกด้วย

ประเทศไทยตามรายงานสถานการณ์ขยะมูลฝอยจากกรมควบคุมมลพิษพบว่าประเทศไทยมีปริมาณขยะเพิ่มมากขึ้นทุกปี โดยปริมาณขยะส่วนใหญ่เป็นขยะอินทรีย์ รองลงมาเป็นขยะพลาสติกรีไซเคิล และขยะทั่วไป เพื่อลดปัญหาที่กล่าวมา โดยการนำวัสดุเหลือทิ้งพลาสติกมาใช้ในงานวิศวกรรมโยธาเป็นวิธีการแก้ไขปัญหาขยะพลาสติกที่เพิ่มขึ้น นักวิจัยหลายท่านได้ตรวจสอบศักยภาพในการปรับปรุงคอนกรีตโดยการเพิ่มวัสดุ เช่น เส้นใยโพลีโพรพีลีน (Jamsawang, et al. 2018) เส้นใยพีวีซี (Ahmed, et al. 2021) และเส้นใยจากขวดพลาสติกเหลือทิ้ง (Huynh, et al. 2023) ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์แพคเกจขวดพลาสติกนั้นขยายตัวอย่างรวดเร็ว วัสดุที่นำมาใช้งานมีความหลากหลาย โดยพลาสติกที่นิยมใช้ ได้แก่ PE (Polyethylene), PP (Polypropylene) และ PET (Polyethyleneterephthalate) เนื่องด้วยพลาสติก PE มีการใช้งานมากที่สุดในการผลิตขวดน้ำ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ทนทานและยืดหยุ่น ทำให้เหมาะสมต่อการนำมาใช้งานในการเพิ่มวัสดุเป็นเส้นใยขวดพลาสติก (plastic bottles fiber) และเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ลดปริมาณขยะได้อีกด้วย

ดังนั้นวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอรูปแบบเสาแบบยืดหยุ่น (เสาหิน) ร่วมกับเสาแบบแข็ง (เสาคอนกรีตไวโบร) กลายเป็นเสาแบบกึ่งแข็งที่ความสามารถ และคุณสมบัติขึ้นอยู่กับประเภทวัสดุที่นำมาใช้นำมาแทนที่ โดยในการศึกษานี้ได้นำกรวด ซีเมนต์ ขี้เถ้ายูคาลิปตัส และเส้นใยขวดพลาสติกมาผสมกัน เรียกว่า เสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ซึ่งปูนไฮดรอลิกซีเมนต์จะถูกแทนที่ด้วยขี้เถ้ายูคาลิปตัสบางส่วน และขวดพลาสติกเสริมแรง เพื่อเป็นการลดต้นทุน ลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และพื้นที่การฝังกลบ โดยคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ใช้ความแตกต่างของขนาดอนุภาค

และปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสในห้องปฏิบัติการ โดยศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพประกอบด้วยความพรุน การรับกำลังอัด มอดูลัสยืดหยุ่น ความเครียดที่กำลังสูงสุดการรับกำลังดึงแบบผ่าซีก สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำ และการรับกำลังดัด ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วันรวมไปถึงการศึกษาคุณสมบัติทางเคมี โดยสรุป การทดสอบนี้เพื่อเป็นแนวทางในการพิจาราณาเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหาขนาดมวลรวมหยาบ ปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัส และปริมาณเส้นใยขวดพลาสติก ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการก่อสร้างเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก โดยพิจารณาจากการทดสอบความพรุน การรับกำลังอัด มอดูลัสยืดหยุ่น ความเครียดที่กำลังสูงสุด การรับกำลังดึงแบบผ่าซีก สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน การรับกำลังดัด

1.2.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรม และรูปแบบการวิบัติของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก

1.2.3 เพื่อศึกษาคุณลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่ส่งผลต่อความสามารถทางกายภาพของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษาเป็นมวลรวมหยาบที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไปมีขนาดอนุภาคใหญ่สุด 3/4 นิ้ว (19 มิลลิเมตร) จำแนกตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) ซึ่งขนาดที่ใช้ในการศึกษามี 2 ขนาด ได้แก่ 4.75 - 9.50 มิลลิเมตร และ 9.50 - 19.00 มิลลิเมตร

1.3.2 ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) 2594 ของกระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งอ้างอิงกับมาตรฐาน ASTM C1157 โดยปริมาณปูนซีเมนต์ เท่ากับ 340 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b ratio) เท่ากับ 0.32

1.3.3 เถ้าที่ใช้ในการศึกษาเป็นขี้เถ้ายูคาลิปตัสจากโรงงานกระดาษดับเบิ้ลเอ ตำบลท่าตูม อำเภอศรีมหาโพธิ จังหวัดปราจีนบุรี แทนที่ด้วยอัตราส่วน 5, 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักซีเมนต์

1.3.4 เส้นใยที่ใช้ในการศึกษาเป็นเส้นใยจากขวดพลาสติก (Plastic bottle Fibers) ความกว้าง 2 มิลลิเมตร ความยาว 70 มิลลิเมตร แทนที่ด้วยอัตราส่วน 0.5, 1, 1.5 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรตัวอย่าง

1.3.5 การทดสอบหาความพรุน การรับกำลังอัด มอดูลัสยืดหยุ่น ความเครียดที่กำลังสูงสุด การรับกำลังดึงแบบผ่าซีก สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน ใช้ตัวอย่างขนาด 100×200 มิลลิเมตร และการทดสอบการรับกำลังดัด ใช้ตัวอย่างขนาด 100×100×350 มิลลิเมตร ที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน

1.3.6 การศึกษารูปแบบความเสียหายของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก

1.3.7 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาค ได้แก่ Scanning Electron Microscope (SEM) และ X-ray diffraction (XRD)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงขนาดมวลรวมหยาบ ปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัส และเส้นใยขวดพลาสติกที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ในการก่อสร้างเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก โดยพิจารณาจากการทดสอบความพรุน การรับกำลังอัด มอดูลัสยืดหยุ่นความเครียดที่กำลังสูงสุด การรับกำลังดึงแบบผ่าซีก สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน การรับกำลังดัด

1.4.2 ทราบถึงพฤติกรรม และรูปแบบการวิบัติของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก

1.4.3 ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่ส่งผลต่อความสามารถทางกายภาพของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก

1.4.4 เพื่อเป็นการลดปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัส และพื้นที่ที่ใช้ในการฝังกลบ โดยการนำมาใช้เป็นวัสดุในการผสม

1.4.5 เพื่อเป็นการลดปริมาณขยะขวดพลาสติก และรักษาสภาพแวดล้อม โดยการนำมาใช้เป็นวัสดุในการผสม

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอนกรีตกำลังต่ำ

คอนกรีตกำลังต่ำ (Controlled Low-Strength Material หรือ CLSM) เป็นวัสดุที่สามารถอัดแน่นและปรับระดับได้ด้วยตัวเอง โดยมีคุณสมบัติสำคัญ ได้แก่ ความสามารถในการไหล (Flowability) ความสามารถในการอัดตัวเอง และความต้านทานการบีบอัดต่ำ (Ling, et al. 2018) CLSM ถูกนำไปใช้ในการปรับปรุงดินอ่อน งานคันทาง งานอุโมงค์ และงานชั้นใต้ดิน เพื่อลดการทรุดตัวและเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้าง CLSM สามารถใช้วัสดุรีไซเคิล เช่น เถ้าลอย และวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมซีเมนต์ ซึ่งช่วยลดต้นทุนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (ส่วนผสมทั่วไปของ CLSM มักจะประกอบด้วยเถ้าลอย วัสดุมวลรวมละเอียด ซีเมนต์ และสารเคมีผสมอื่นๆเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานมากขึ้น ตามที่ระบุใน (American Concrete Institute, 2010) ในระยะเวลา 28 วัน ของ CLSM จะต้องมีความสามารถในการรับกำลังอยู่ที่ประมาณ 0.3 - 8.3 เมกะปาสคาล

2.2 คอนกรีตพรุน

คอนกรีตพรุน (Porous concrete) ถูกพัฒนาเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยประโยชน์หลายประการ เช่น การควบคุมการไหลของน้ำฝน การฟื้นฟูแหล่งน้ำใต้ดิน และลดมลพิษในน้ำและดิน (Bhutta, et al. 2012; Lian & Zhuge, 2010) หรือการนำมาใช้ในงานก่อสร้างในพื้นที่ที่ต้องการการระบายน้ำได้ดี เช่น เป็นวัสดุปูพื้นทาง พื้นลานจอดรถ หรือพื้นสวนบริเวณรอบที่พักอาศัย องค์ประกอบหลักของคอนกรีตพรุนนั้นประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ มวลรวม และ น้ำ โดยปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้มักอยู่ในช่วง 265–385 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) อยู่ในช่วง 0.26–0.40 (American Concrete Institute, 2010) เพื่อเชื่อมผสานให้มวลรวมยึดติดเข้าด้วยกัน ซึ่งส่วนผสมและลักษณะของมวลรวมหยาบมีผลต่อความแข็งแรงและความพรุนของคอนกรีตพรุนอย่างมีนัยสำคัญ (Aamer Rafique Bhutta, et al. 2013; Ibrahim, et al. 2014; joshaghani, et al. 2015; Xu, et al. 2018; Lian, et al. 2011) ความสามารถในการไหลซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน โดยทั่วไปเพื่อให้สามารถระบายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องให้แน่ใจว่าคอนกรีตพรุนมีความพรุนและความสามารถในการซึมผ่านที่เพียงพอ (Shan, et al. 2022) คอนกรีตพรุนมักจะมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำ โดยอยู่ในช่วง 5 – 26 เมกะปาสคาล หรือมีค่ามากถึง 50 เมกะปาสคาล ค่ากำลังรับแรงดัดโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 1 – 3.8 เมกะปาสคาล ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัด โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตพรุนอยู่ในช่วง 5

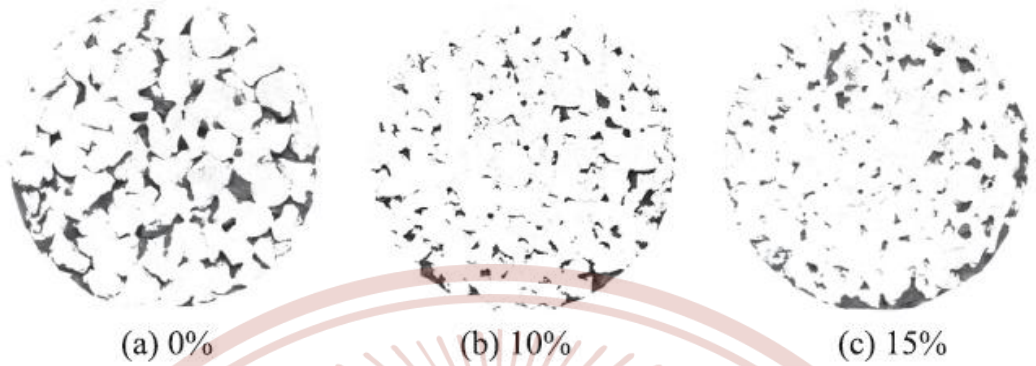
– 45 จิกะปาสคาล (Hariyadi & Hiroki Tamai, 2015; Zhong & Wille, 2015) โครงสร้างของคอนกรีตพรุนจะมีรูโพรงที่เชื่อมต่อกันขนาดระหว่าง 2 ถึง 8 มิลลิเมตร ปริมาณช่องว่างภายในจะอยู่ที่ 15 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ (American Concrete Institute, 2010)

2.3 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตพรุน

2.3.1 ความพรุน

เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต มีความสัมพันธ์กับการจัดเรียงตัวของมวลรวม และความพรุน คอนกรีตที่มีการจัดเรียงตัวของมวลรวม และความพรุนที่เหมาะสมจะทำให้กำลังเพิ่มขึ้น (Chindaprasirt, et al. 2008) ความพรุน เป็นสัดส่วนของช่องว่างต่อปริมาณทั้งหมดของวัตถุ ซึ่งจากหลายๆงานวิจัยพบว่า ค่าความพรุนของคอนกรีตพรุนอยู่ในช่วง 15 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ (Chindaprasirt, et al. 2008; Lian, et al. 2011; Xu, et al. 2018) และเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตพรุน (Ibrahim, et al. 2014) ความพรุนจะแตกต่างกันไปในแต่ละวัตถุ ถูกควบคุมโดยขนาดรูปร่าง และขนาดของวัสดุ ช่องว่างภายในตัวอย่างคอนกรีตพรุนประกอบด้วยช่องว่างขนาดใหญ่ (Macropore) น้ำ และอากาศ สามารถเคลื่อนที่ได้ดี และช่องว่างขนาดเล็ก (Micropore) ซึ่งเป็นส่วนที่เก็บความชื้นไว้ น้ำจะไหลผ่านได้ยาก โดยค่าความพรุน (P) จะมีค่าเฉลี่ยดังตารางที่ 2-1 คอนกรีตพรุนที่มีช่องว่างขนาดใหญ่อยู่เป็นจำนวนมากน้ำจะไหลผ่านได้ดี และมีการเก็บน้ำได้น้อย ในส่วนของคอนกรีตพรุนที่มีช่องว่างขนาดเล็กเป็นจำนวนมากจะมีการระบายน้ำได้ไม่ดี เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1/6 - 1/10 เท่าของมวลรวมหยาบ มวลละเอียดจะสามารถเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ได้และไม่รบกวนการเรียงตัวกันของอนุภาคมวลรวมหยาบ ดังนั้นซีเมนต์มอร์ตาร์จะช่วยเสริมการยึดเกาะระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่เพื่อสร้างการผสมผสานของโครงสร้างและการเติมมวลรวมละเอียดจะช่วยในการเพิ่มจุดเชื่อมประสานเพื่อปรับปรุง

นอกจากนี้ (Xu, et al. 2018) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตพรุนสำหรับใช้ในงานถนน ซึ่งได้ศึกษาถึงการกระจายของรูพรุนด้วยวิธีการประมวลผลจากรูปตัดของตัวอย่างทดสอบที่มีส่วนผสมของมวลรวมละเอียดที่ 0 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 2-1 จากภาพถ่ายจะเห็นได้ว่าบริเวณที่เป็นสีขาวแสดงถึงวัตถุซึ่งเป็นของแข็งและสีดำแสดงถึงช่องว่างอากาศ เมื่อปริมาณมวลรวมละเอียดเพิ่มมากขึ้นแล้วนั้นจะส่งผลให้ขนาดของรูพรุนลดลง เมื่อสัดส่วนของมวลรวมละเอียดเพิ่มจาก 0 เป็น 15 เปอร์เซ็นต์ รูพรุนที่มีขนาดใหญ่จะมีปริมาณลดลง ในขณะเดียวกันขนาดของรูพรุนขนาดเล็ก จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น คอนกรีตพรุนที่มีสัดส่วนผสมของมวลรวมละเอียดที่ 10% จะมีรูพรุนขนาดกลางมากที่สุด ในขณะเดียวกันรูพรุนขนาดใหญ่จะน้อยกว่าคอนกรีตพรุนที่มีสัดส่วนผสมของมวลรวมละเอียด 0% ในขณะที่สัดส่วนผสมของมวลรวมละเอียดที่เพิ่มเกิน 15% จะไปอุดตันช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบและไปกีดขวางทางระบายน้ำใต้ดิน



ภาพที่ 2-1 รูปตัดของคอนกรีตพรุนที่ปริมาณส่วนผสมแตกต่างกัน (Xu, et al. 2018)

ตารางที่ 2-1 ค่าความพรุนของวัสดุชนิดต่างๆ (Swiss Standard SN 670 010b ;)

Description	USCS	Porosity (%)	
		min	max
Well graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GW	21	32
Poorly graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GP	21	32
Silty gravels, silty sandy gravels	GM	15	22
Gravels	(GW-GP)	23	38
Clayey gravels, clayey sandy gravels	GC	17	27
Well graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SW	22	42
Coarse sand	(SW)	26	43
Fine sand	(SW)	29	46
Poorly graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SP	23	43
Silty sands	SM	25	49
Clayey sands	SC	15	37

ที่มา : Das (2008)

ตารางที่ 2-1 (ต่อ)

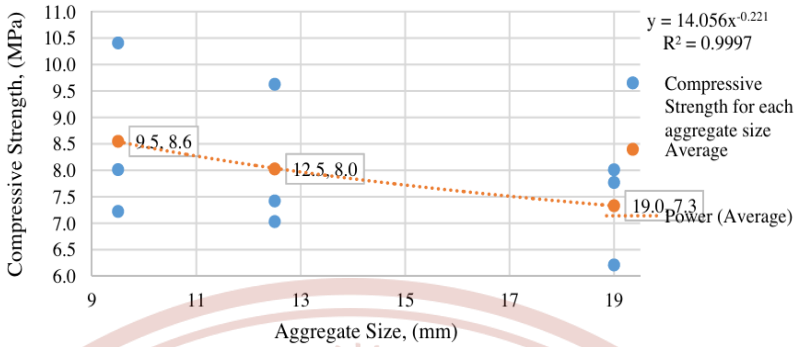
Inorganic silts, silty or clayey fine sands, with slight plasticity	ML	21	56
Uniform inorganic silt	(ML)	29	52
Inorganic clays, silty clays, sandy clays of low plasticity	CL	29	41
Organic silts and organic silty clays of low plasticity	OL	42	68
Silty or sandy clay	(CL-OL)	20	64
Inorganic silts of high plasticity	MH	53	68
Inorganic clays of high plasticity	CH	39	59
Organic clays of high plasticity	OH	50	75

ที่มา : Das (2008)

2.3.2 คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด

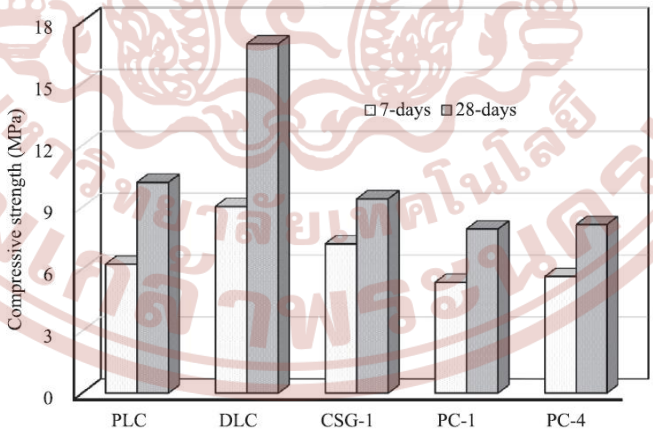
กำลังรับแรงอัดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากที่สุดของคอนกรีต การออกแบบทางวิศวกรรมส่วนใหญ่มักจะออกแบบจากกำลังรับแรงอัดเป็นหลัก ซึ่งกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างประกอบกัน เช่น ขนาดของมวลรวม อายุของการบ่ม อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ สารผสมเพิ่มวัสดุเสริมกำลัง และอื่น ๆ

โดยจากการศึกษาของ (joshaghani, et al. 2015) ได้ทำการศึกษาการพัฒนากำลังของคอนกรีตพรุน พบว่าขนาดของมวลรวมนั้นมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุน โดยใช้มวลรวม 3 ขนาดโดยใช้ขนาด 4.5-9.5 มิลลิเมตร, 9.5-12.5 มิลลิเมตร และ 12.5-19.0 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2-2 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด และขนาดของมวลรวม โดยเมื่อมวลรวมมีขนาดเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนจะลดลง เนื่องมาจากขนาดของมวลรวมที่ใหญ่ขึ้นทำให้ความหนาแน่นโดยรวมของคอนกรีตพรุนรวมลดลง และทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมลดลง



ภาพที่ 2-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดมวลรวมและกำลังรับแรงอัด (joshaghani, et al. 2015)

อายุในการบ่มของตัวอย่างเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนเช่นกัน โดยจากการศึกษาของ (Xu, et al. 2018) แสดงให้เห็นถึงกำลังรับแรงอัดของวัสดุต่างชนิด ที่อายุการบ่มที่ 7 วัน และ 28 วัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าคอนกรีตพรุน (PLC) นั้นมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าวัสดุในงานทางชนิดอื่น ๆ ที่มีโครงสร้างพรุนเหมือนกัน ดังแสดงในภาพที่ 2-3 เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตพรุนแบบที่ 1 (PC-1) และคอนกรีตพรุนแบบที่ 4 (PC-4) ที่มีการปรับปรุงโดยการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมละเอียด 15% ซึ่งมีสัดส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 2-2 พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนแบบที่ 4 (PC-4) มีค่าเพิ่มขึ้น 5.2% ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 2.8% ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ



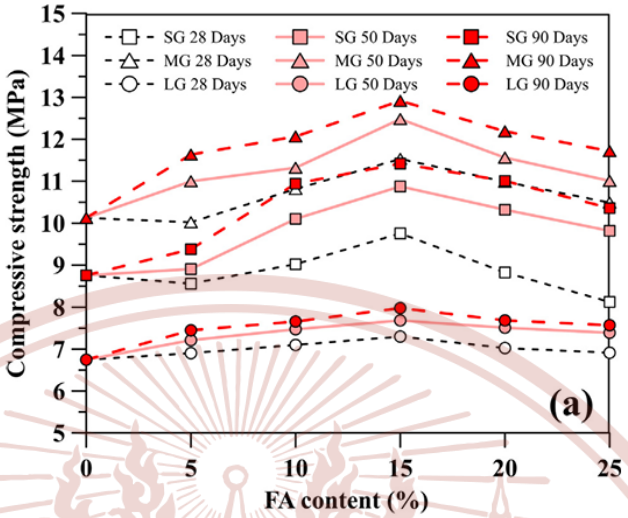
ภาพที่ 2-3 กำลังรับแรงอัดของวัสดุงานทางแต่ละชนิด ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน (Xu, et al. 2018)

ตารางที่ 2-2 สัดส่วนผสมของคอนกรีตพรุน (kg/m^3)

Mixture ID	Cement	FA	Coarse Aggregate	Additional Fine Aggregate	Additional Fine Aggregate Ratio (%)	Water
PC-1	213	0	1704	0	0%	81
PC-2	181	0	1625	0	0%	82
PC-2F	145	36	1625	0	0%	82
PC-3	181	0	1381	244	15%	100
PC-4	150	0	1381	264	15%	85
PC-4F	120	30	1501	264	15%	85

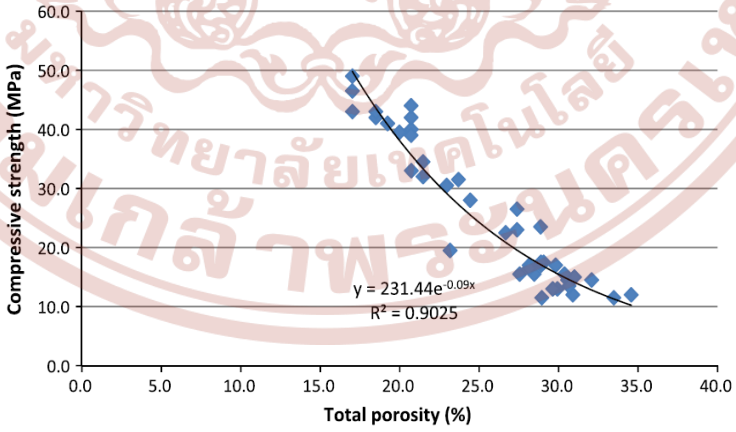
ที่มา : (Xu, et al. 2018)

จากการศึกษาของ (Yoobanpot, et al. 2020) ได้ทำการศึกษากำลังรับแรงอัดของกรวดเถ้าลอยซีเมนต์ หรือวัสดุ CFG (cement fly ash gravel) โดยอธิบายไว้ว่ากำลังรับแรงอัดนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ปริมาณเถ้าลอย (fly ash) ที่ใช้แทนปูนซีเมนต์ ขนาดอนุภาคของหินที่ใช้ในส่วนผสม และระยะเวลาการบ่ม ซึ่งผลการศึกษา ดังแสดงในภาพที่ 2-4 พบว่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุ CFG มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 9.9 เมกะปาสคาล ซึ่งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดได้ โดยเมื่อทำการแทนที่ในอัตราส่วน 15 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดในทุกกรณี เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมจะช่วยเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้างและเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเสริมความแข็งแรงของวัสดุ อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณเถ้าลอยมากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ พบว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง เนื่องจากสัดส่วนของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลงมากจนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่สร้างแรงยึดเหนี่ยวในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้ความพรุนเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง และดังแสดงในภาพที่ 2-4 ยังแสดงถึงผลของระยะเวลาการบ่มซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุ CFG ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย มีค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นเมื่อผ่านระยะเวลาบ่ม 28 วัน และพัฒนาความแข็งแรงอย่างต่อเนื่อง เมื่อระยะเวลาบ่ม 50 และ 90 วัน ตามลำดับ เนื่องด้วยบทบาทของปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่สามารถดำเนินต่อได้



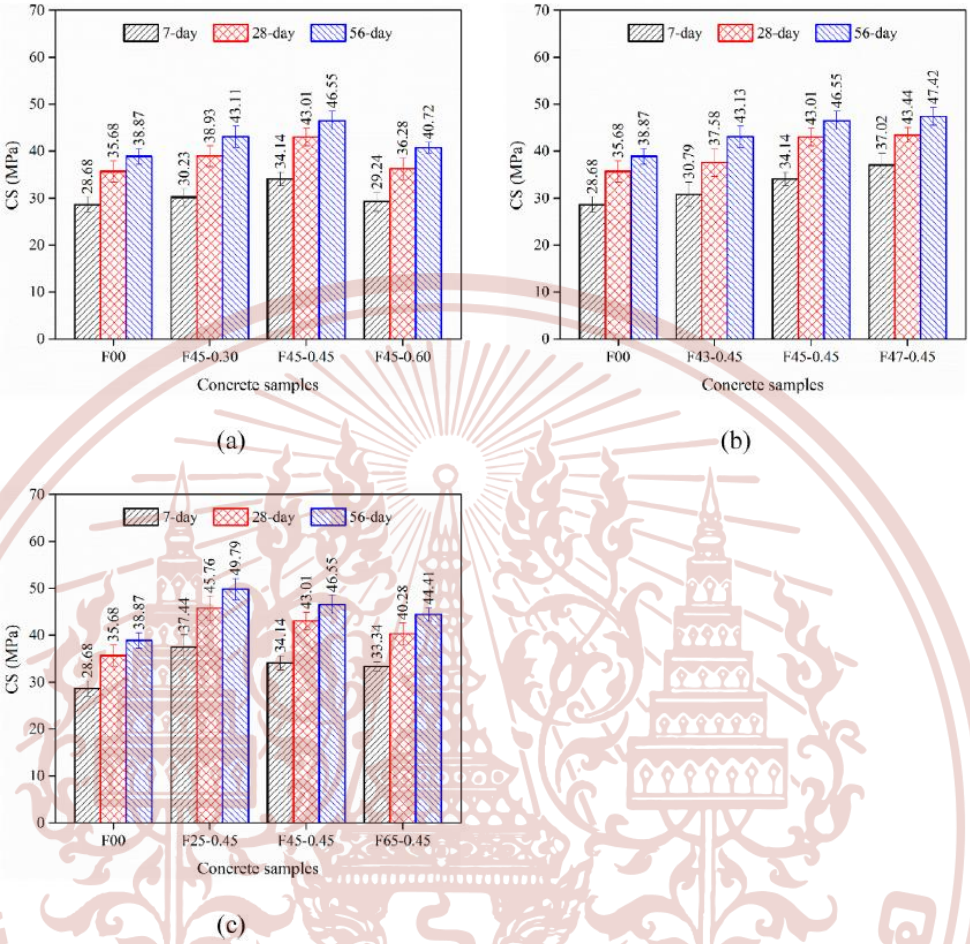
ภาพที่ 2-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น (Yoobanpot, et al. 2020)

ช่องว่างทั้งหมดภายในคอนกรีตพรุนนั้นจะส่งผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีตพรุน ความพรุนรวมทั้งหมดของคอนกรีตพรุนก็ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนเช่นกัน จากการศึกษาของ (Lian, et al. 2011) แสดงให้เห็นถึงสมการถดถอยแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล เมื่อความพรุนรวมของคอนกรีตพรุนมีค่าที่สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนมีค่าต่ำลง ดังแสดงในภาพที่ 2-5 จึงกล่าวได้ว่าความพรุนรวมทั้งหมดของคอนกรีตพรุนนั้นส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุน



ภาพที่ 2-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความพรุนรวม (Lian, et al. 2011)

(Huynh, et al. 2023) ได้ทำการศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยขวดพลาสติกรีไซเคิล ดังแสดงในภาพที่ 2-6 แสดงระยะเวลาบ่ม และผลของขนาด ความยาว และปริมาณของเส้นใยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด พบว่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มในทุกกลุ่มตัวอย่าง ในส่วนผลของปริมาณเส้นใยขวดพลาสติกรีไซเคิล ดังแสดงในภาพที่ 2-6(a) จากกราฟมีการแสดงผลอย่างชัดเจนต่อกำลังรับแรงอัด โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยขวดพลาสติกรีไซเคิลจาก 0.3 เปอร์เซ็นต์ เป็น 0.45 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อเกิน 0.45 เปอร์เซ็นต์ ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากเกิดจากการกระจายตัวของเส้นใยขวดพลาสติกรีไซเคิลที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เส้นใยรวมตัวกันในโครงสร้าง ทำให้ความแน่นในโครงสร้างภายในคอนกรีตลดลง อาจส่งผลทำให้เกิดการแตกหักในบริเวณใกล้เส้นใยและรูพรุนภายใน ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดในคอนกรีตลดลง นอกจากนี้ความยาว และความกว้างของเส้นใยขวดพลาสติกรีไซเคิลยังมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 2-6(b) พบว่าเมื่อความยาวของเส้นใยขวดพลาสติกรีไซเคิลเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 70 มิลลิเมตร ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่เส้นใยขวดพลาสติกรีไซเคิลมีความยาวเพิ่มขึ้นจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับเนื้อคอนกรีตมากขึ้น จึงเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยขวดพลาสติกรีไซเคิลและเนื้อคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพมากกว่า ทำให้คอนกรีตสามารถรับแรงอัดได้สูงขึ้น ในทางตรงกันข้าม ผลจากการศึกษาพบว่าความกว้างของเส้นใยขวดพลาสติกรีไซเคิลมีผลในเชิงลบต่อค่ากำลังรับแรงอัด เมื่อความกว้างของเส้นใยขวดพลาสติกรีไซเคิลเพิ่มขึ้นเกิน 2 มิลลิเมตร ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลง เป็นผลมาจากความกว้างของเส้นใยที่ใหญ่ขึ้นทำให้พื้นที่ในการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและโครงสร้างต่ำลง ส่งผลให้ความสามารถในการยึดเกาะและความแข็งแรงของคอนกรีตลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2-6(c)



ภาพที่ 2-6 ผลกระทบของ (a) ปริมาณเส้นใย, (b) ความยาวเส้นใย และ (c) ความกว้างเส้นใย เทียบกับค่ากำลังรับแรงอัด (Huynh, et al. 2023)

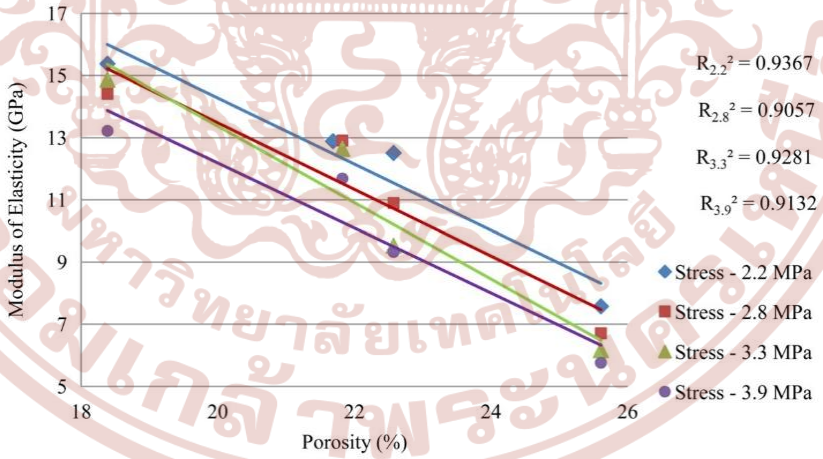
2.3.3 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตพรุน

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการประเมินคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ลักษณะที่ไม่เหมือนกันของคอนกรีตพรุนไม่ได้เกิดจากความแตกต่างของวัสดุเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ยังมีผลจากความแตกต่างระหว่างมวลและช่องว่างอีกด้วย จากการศึกษาของ (Alam & Haselbach, 2014) ได้ทำการศึกษาการประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตพรุนตามความพรุน โดยหาจากค่าความลาดชันในช่วงต้น จากกราฟ Stress-Strain ของการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยใช้มาตรฐาน C469/C469M ซึ่งพื้นผิวด้านบนและด้านล่างของชิ้นงานตัวอย่างทรงกระบอกต้องราบเรียบ จึงมีการใช้ยิปซั่มปิดที่หัวท้ายของชิ้นงานตัวอย่างก่อนทำการทดสอบและมีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C469/C469M เพื่อหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่น โดยใช้ LVDT ติดตั้งที่ด้านข้างของชิ้นงานเพื่อวัดค่าการทรุดตัวระหว่างทดสอบการรับกำลังอัด ดังแสดงในภาพที่ 2-7 ผลการศึกษาด้วยวิธีดังกล่าวพบว่าเมื่อความ

พรุนของตัวอย่างเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2-8 ซึ่งมีผลสอดคล้องกันกับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนที่แปรผันกับค่าความพรุน นอกจากนี้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นอาจมีความแตกต่างกันไปตามความเค้นที่เพิ่มมากขึ้นด้วย



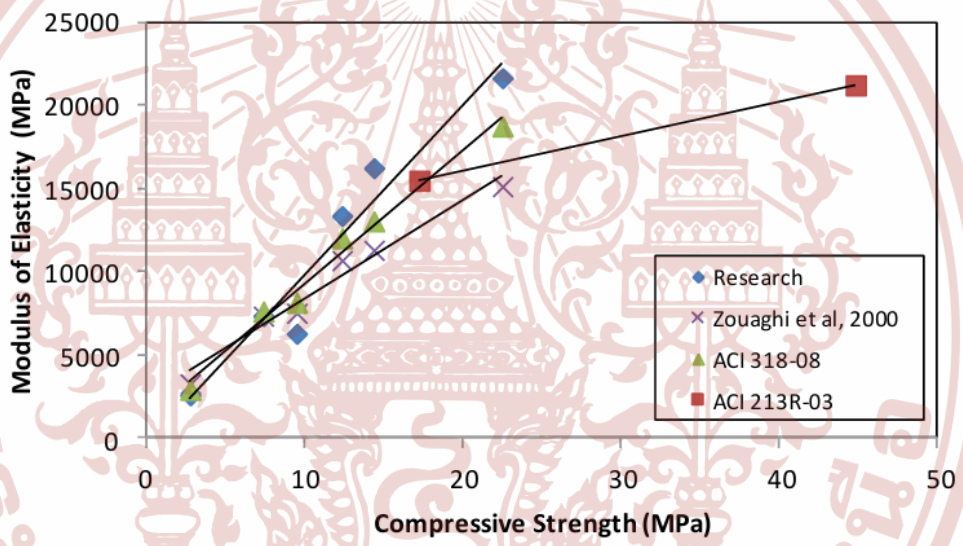
ภาพที่ 2-7 **(a)** การติดตั้ง Compressometer และ Extensometer บนตัวอย่างทดสอบ **(b)** การติดตั้งตัวอย่างทดสอบบนเครื่องกดทดสอบ (Alam & Haselbach, 2014)



ภาพที่ 2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและความพรุนที่ปริมาณความเค้นต่าง ๆ (Alam & Haselbach, 2014)

(Hariyadi & Hiroki Tamai, 2015) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตพรุน ด้วยใช้ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตพรุนที่ทำจากหินพัมมิช แสดงออกมาเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น โดยมีผลการศึกษาของมาตรฐานคอนกรีตวัสดุมวลเบา (American Concrete Institute, 2003) และมาตรฐานคอนกรีตโครงสร้าง (American Concrete

Institute, 2008) เพื่อเปรียบเทียบเพิ่มเติมเพราะคอนกรีตพรุนถูกจัดประเภทเป็นคอนกรีตน้ำหนักเบา ดังแสดงในภาพที่ 2-9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นก็เพิ่มขึ้นตามสัดส่วน อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากศึกษาโมดูลัสความยืดหยุ่นสำหรับคอนกรีตพรุนของ (Hariyadi & Hiroki Tamai, 2015) นั้นต่ำกว่ามาตรฐานคอนกรีตวัสดุมวลเบา(American Concrete Institute, 2003) อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบ่งชี้ว่าการเปลี่ยนรูปภายใต้แรงอัดในคอนกรีตพรุนเกิดขึ้นเร็วกว่าในคอนกรีตปกติและคอนกรีตน้ำหนักเบา การพัฒนาแรงดึงในคอนกรีตพรุนอาจเร่งขึ้นเนื่องจากการไม่มีวัสดุละเอียดภายในโครงสร้าง ซึ่งทำให้เกิดการโก่งตัวอย่างรวดเร็วเมื่อพันธะเชื่อมประสานระหว่างวัสดุมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ได้รับความเค้นถึงจุดสูงสุด

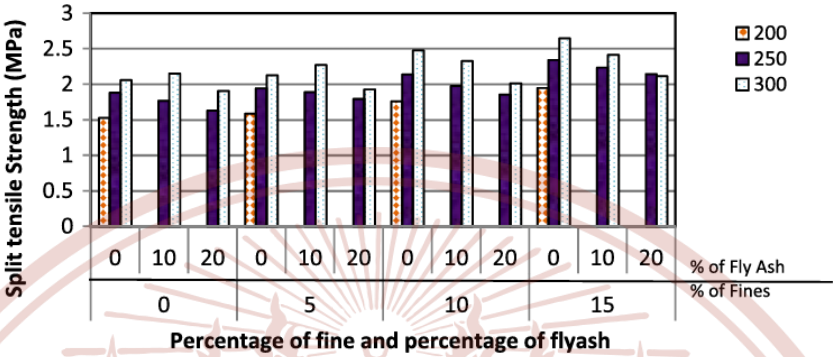


ภาพที่ 2-9 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับค่ากำลังรับแรงอัด (Hariyadi & Hiroki Tamai, 2015)

2.3.4 คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงดึง

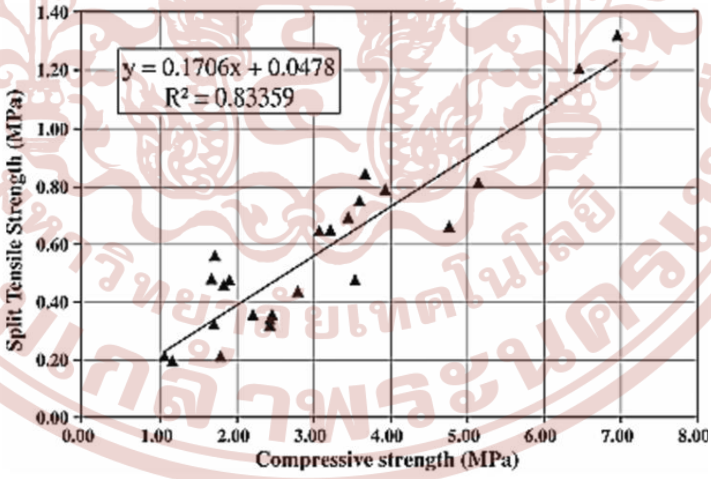
ในคอนกรีตทั่วไปนอกจากการศึกษากำลังรับแรงอัดแล้ว ก็ยังคงต้องตรวจสอบค่ากำลังรับแรงดึงด้วยเพราะคอนกรีตทั่วไปเป็นวัสดุที่รับกำลังแรงอัดได้มาก แต่รับกำลังแรงดึงได้น้อยหรือรับกำลังแรงดึงไม่ได้เลยทำให้วัสดุเกิดการแตกร้าวหรือเกิดการวิบัติได้ โดยงานวิจัยของ (Muthaiyan & Thirumalai, 2017) ได้ทำการศึกษาและทำการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตพรุน โดยวิธีการใช้มวลรวม 2 ขนาด ขนาด 4.5-9.5 มิลลิเมตร, 9.5-19.0 มิลลิเมตร มีการใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ช่วงระหว่าง 200-300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีการใช้มวลรวมละเอียดและเถ้าลอยในการแทนที่ส่วนผสม ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 2-10 แสดงถึงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก เทียบกับเปอร์เซ็นต์ของปริมาณมวลรวมละเอียดและเปอร์เซ็นต์ของปริมาณเถ้า

ลอยที่ใส่แทนที่ ซึ่งทำให้เห็นว่าการใช้ปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และปริมาณมวลละเอียด ส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตพรุนมีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย



ภาพที่ 2-10 แสดงค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Muthaiyan & Thirumalai, 2017)

และค่ากำลังรับแรงดึงนั้นสามารถประเมินได้จากค่ากำลังรับแรงอัด โดย (Adresi, et al. 2023) ได้ทำการศึกษาและแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดึงกับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนออกมาในลักษณะเชิงเส้น ดังแสดงในภาพที่ 2-11 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างค่ากำลังรับแรงดึงและค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุน โดยการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่ากำลังรับแรงอัดจะส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงดึงตามไปด้วย



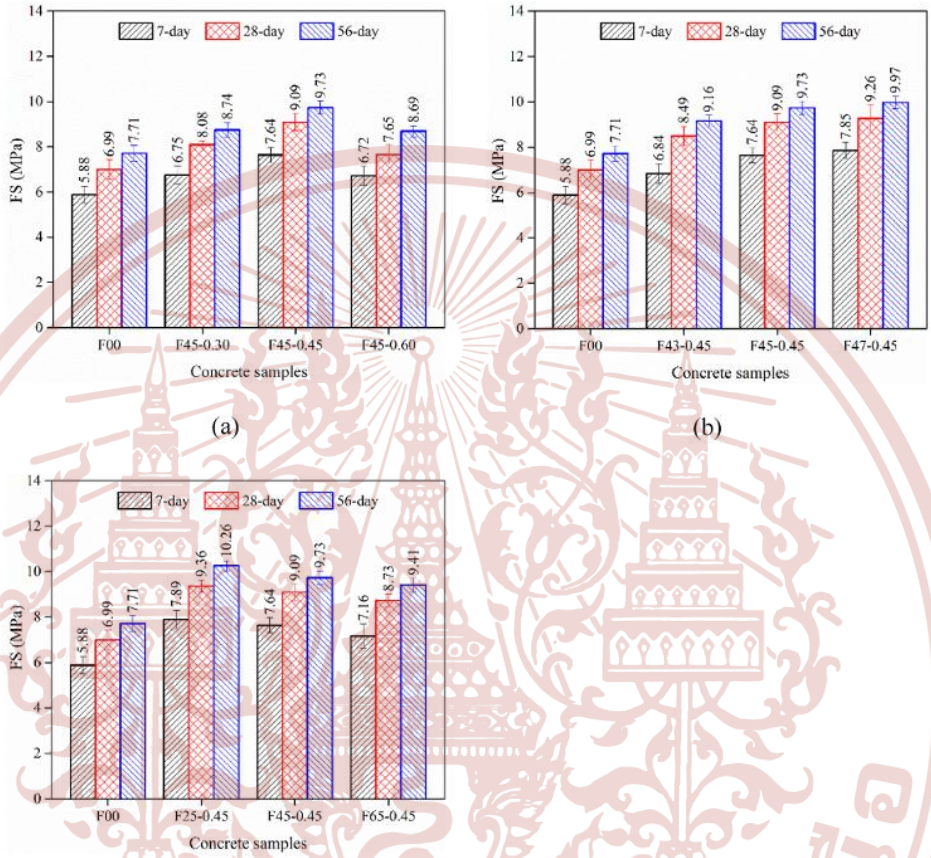
ภาพที่ 2-11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดเทียบกับค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Adresi, et al. 2023)

2.3.5 คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงดัด

ปัญหาต่าง ๆ เช่น การแตกร้าวระหว่างกระบวนการแห้งและการหดตัวทางปฏิกิริยาไฮดรอลิก ทำให้การใช้คอนกรีตที่ผสมซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบบดั้งเดิมมีข้อจำกัด เพื่อตอบสนองต่อปัญหาเหล่านี้ นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคอนกรีตเหล่านี้โดยการเพิ่มวัสดุเส้นใยต่าง ๆ

เช่น เส้นใยไนลอน เส้นใยโพรพิลีน เส้นใย PVC และเส้นใยแก้ว โดยงานวิจัยของ (Huynh, et al. 2023) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้วัสดุเส้นใยรีไซเคิลจากขวดพลาสติกที่ใช้แล้วในการปรับปรุงคุณภาพคอนกรีต ซึ่งใช้การหลักการประเมินจากความกว้าง ความยาว และเปอร์เซ็นต์เส้นใยรีไซเคิลพลาสติกที่ใช้ทดสอบ ในขนาดและปริมาตรที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2-3 เทียบกับค่ากำลังรับแรงดัด โดยเพื่อศึกษาผลกระทบของประเภทเส้นใยต่อประสิทธิภาพของคอนกรีต เส้นใยรีไซเคิลพลาสติกถูกเพิ่มเข้าไปในส่วนผสม F00 (ไม่มีการใส่เส้นใยรีไซเคิลพลาสติก) ในปริมาณที่ต่างกันสามระดับ (ตามปริมาตร): 0.3% (ส่วนผสม F45–0.30), 0.45% (ส่วนผสม F45–0.45), และ 0.6% (ส่วนผสม F45–0.60) นอกจากนี้เส้นใยรีไซเคิลพลาสติกประเภทต่าง ๆ (เช่น F25, F65, F43, และ F47) ได้ถูกเพิ่มเข้าไปในส่วนผสม F00 ที่ระดับเดียวกัน (0.45%) ได้แก่ F25–0.45, F65–0.45, F43–0.45, และ F47–0.45 ภาพที่ 2-12(a) แสดงถึงกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 56 วัน อันเนื่องมาจากการใส่เส้นใยรีไซเคิลพลาสติกที่ปริมาณที่ต่างกัน ซึ่งจะเห็นว่าค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเกิดการเพิ่มขึ้นตามเวลาการบ่ม ในขณะที่ระดับปริมาณเส้นใยรีไซเคิลพลาสติกที่ปริมาณที่แตกต่างกันในตัวอย่างทดสอบส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงดัดที่สูงขึ้นกว่าตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเส้นใยรีไซเคิลพลาสติก โดยตัวอย่างทดสอบที่มีปริมาณสูง (0.45% และ 0.60%) มีค่ากำลังรับแรงดัดที่มากกว่าตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยน้อยกว่า (0.30%) อย่างมีนัยสำคัญ (เพิ่มขึ้น 10-15%) ความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญและเป็นบวกระหว่างระดับปริมาณเส้นใยรีไซเคิลพลาสติกกับค่ากำลังรับแรงดัด เกิดจากการที่มีเส้นใยรีไซเคิลพลาสติกในโซนรับแรงดึงมากขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงดัดและต้านทานการแตกร้าวที่ส่งผลเสียต่อค่ากำลังรับแรงดึง แม้ว่าค่ากำลังรับแรงดัดจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยรีไซเคิลพลาสติกมากกว่า 0.45% แต่ค่ากำลังรับแรงดัดยังคงสูงกว่าตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเส้นใยอย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากระดับเส้นใยที่มากเกินไปอาจทำให้การกระจายตัวของเส้นใยไม่ดี ส่งผลให้เส้นใยรวมตัวกันในโครงสร้างคอนกรีต ซึ่งทำให้ค่าความพรุนเพิ่มขึ้นแต่ค่ากำลังรับแรงดัดลดลง และปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปอาจขัดขวางการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและมวลคอนกรีต ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดลดลง ในด้านความยาว และความกว้างของเส้นใยรีไซเคิลพลาสติก พบว่าความยาวของเส้นใยมีค่าความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงดัดที่สูงกว่าในตัวอย่างทดสอบ โดยตัวอย่างทดสอบที่มีความเส้นใยที่ยาวกว่า (50 และ 70 มิลลิเมตร) มีค่ากำลังรับแรงดัดสูงกว่า 5-10% เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีความยาวเส้นใยที่สั้นกว่า (30 มิลลิเมตร) ความยาวของเส้นใยที่มากขึ้นเกี่ยวข้องกับพื้นผิวการยึดเกาะที่ใหญ่ขึ้นและผลของการต่อกันที่ดีกว่าระหว่างเส้นใยและมวลคอนกรีต ซึ่งช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงดัด ดังแสดงในภาพที่ 2-12(b) ในทางกลับกัน ผลการทดสอบแสดงความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างความกว้างของเส้นใยและค่ากำลังรับดัด ดังแสดงในภาพที่ 2-12(c) โดยชิ้นงานที่มีความกว้างของใยกว้างกว่า (6 มิลลิเมตร) แสดงค่ากำลังรับแรงดัดที่ต่ำกว่า 5–10% เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีความ

กว้างของเส้นใยแคบกว่า (2 และ 4 มิลลิเมตร) ซึ่งความกว้างของใยที่เล็กกว่าจะสร้างพื้นผิวการยึดเกาะที่ใหญ่ขึ้น ความสามารถในการยึดเกาะที่สูงขึ้น และส่งผลให้ค่ากำลังรับดัดสูงขึ้น



ภาพที่ 2-12 ผลกระทบของ **(a)** ปริมาณเส้นใย, **(b)** ความยาวเส้นใย และ **(c)** ความกว้างเส้นใยเทียบกับค่ากำลังรับแรงดัด (Huynh, et al. 2023)

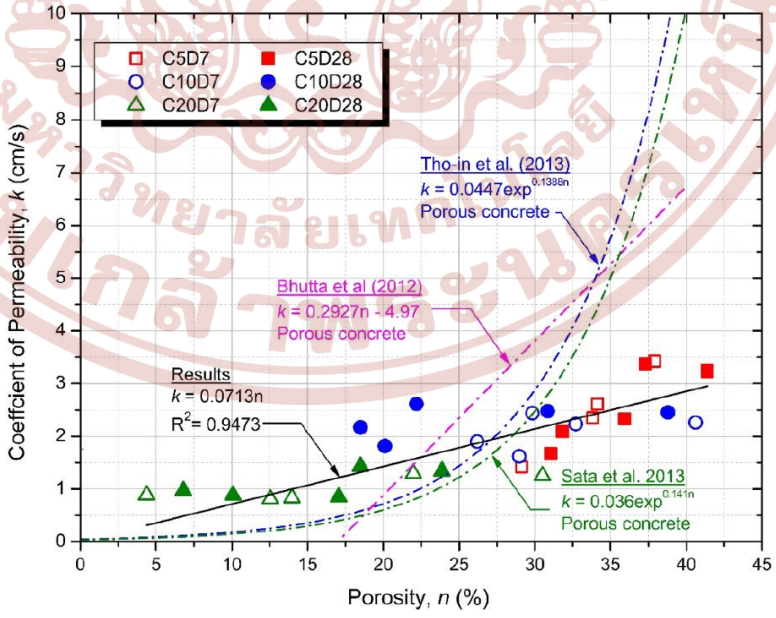
ตารางที่ 2-3 ชนิดของเส้นใยรีไซเคิลพลาสติก (Huynh, et al. 2023)

Fiber type	Average width (W,mm)	Average Length (W,mm)	L/W ratio
F25	2	50	25.0
F45	4	50	12.5
F65	6	50	8.3
F43	4	30	7.5
F47	4	70	17.5

2.3.6 คุณสมบัติในการไหลซึมผ่านของน้ำ

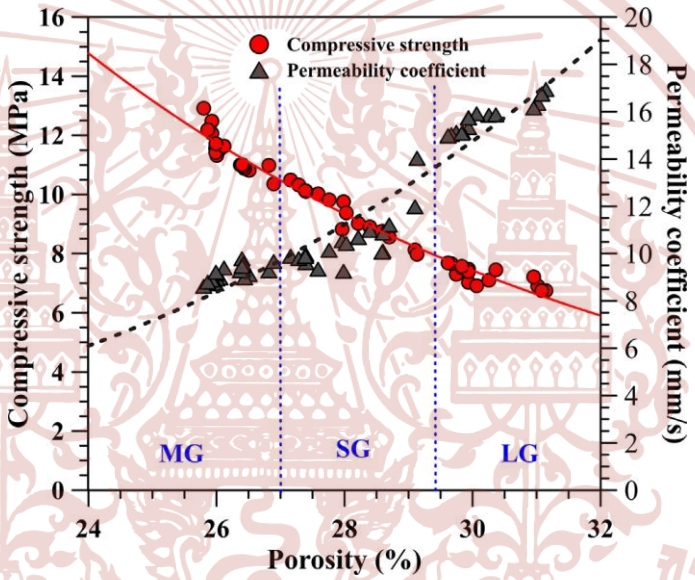
ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำเป็นสมบัติพื้นฐานที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุมวลรวมในการยอมให้น้ำไหลผ่านเนื้อวัสดุ โดยระดับของการไหลซึมผ่านนี้สามารถระบุเป็นเชิงปริมาณได้ผ่านค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำ ซึ่งมักแสดงในหน่วยเซนติเมตรต่อวินาที โดยค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของตัววัสดุ เช่น ขนาดของอนุภาคที่ใช้ ความต่อเนื่องของช่องว่างภายในโครงสร้าง โดยคอนกรีตพรุนเป็นวัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ได้รับการออกแบบให้มีสมบัติการไหลซึมผ่านของน้ำที่ดี ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ไม่มี หรือมีส่วนผสมที่น้อยมากของมวลรวมละเอียด และแทนที่ด้วยมวลรวมหยาบเพียงอย่างเดียว การจัดองค์ประกอบเช่นนี้ส่งผลทำให้โครงสร้างเกิดช่องว่างรูพรุนต่อเนื่องภายในเนื้อคอนกรีต ทำให้ของไหลสามารถแทรกซึมผ่านได้สะดวก เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่มีโครงสร้างหนาแน่น และความพรุนน้อย

จากการศึกษาของ (Sukkarak, et al. 2025) ได้มีการใช้หินฝุ่นเป็นวัสดุปรับปรุงเสากรวดซีเมนต์ ในสัดส่วนที่แตกต่างกันของหินฝุ่น และปริมาณปูนซีเมนต์ จากความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 2-13 พบว่าสำหรับส่วนผสมของเสากรวดซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ มีแนวโน้มสอดคล้องไปในแนวทางเดียวกัน โดยเมื่อค่าความพรุนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งช่วงค่าความพรุนจากการศึกษานี้อยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูง (ระหว่าง 4 ถึง 42 เปอร์เซ็นต์) ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำสูงตามไปด้วย (ระหว่าง 1.92 ถึง 5.96 เซนติเมตร/วินาที)



ภาพที่ 2-13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน (Sukkarak, et al. 2025)

จากคุณสมบัติหลักของคอนกรีตพรุน (Yoobanpot, et al. 2020) ได้ทำการแสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดต่อความสามารถในสัมประสิทธิ์การซึมผ่านนั้นมีความสอดคล้องกันกับความพรุนของคอนกรีตพรุน ดังแสดงในภาพที่ 2-14 พบว่าเมื่อค่าความพรุนเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากอัตราส่วนช่องว่างที่เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามกลับส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น และยังสามารถใช้กำหนดขนาดมวลรวมที่ให้ค่าความพรุนที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างให้เป็นไปตามข้อกำหนดของความสามารถในการรับแรงอัด และการไหลซึมผ่านของน้ำของวัสดุได้อีกด้วย



ภาพที่ 2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุน กำลังรับแรงอัดและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Yoobanpot, et al. 2020)

2.4 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค

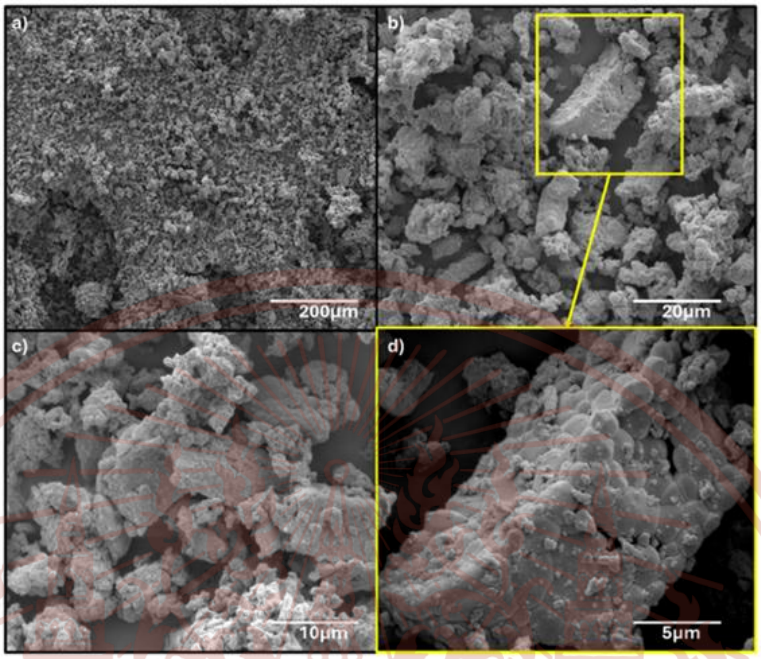
การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างในระดับจุลภาคเนื่องจากการผสมซีเมนต์หรือสารผสมเพิ่มอื่น ๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพสามารถอธิบายได้ด้วยการทดสอบและวิเคราะห์โครงสร้างในระดับจุลภาค ในการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคจะศึกษาด้านรูปร่างของอนุภาคมวลรวม การจัดเรียงของโครงสร้างและขนาดของช่องว่าง โดยใช้มีหลักการและข้อจำกัดตามเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

2.4.1 การทดสอบด้วย Scanning Electron Microscope

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกเมื่อปี 1932 ในประเทศเยอรมนี โดยนักวิทยาศาสตร์ 2 คน คือ แมกซ์นอลล์ (Max Knoll) และเอิร์นสต์รุสกา (Ernst Ruska) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนแทนแสงธรรมดา คิดค้นขึ้นมาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการมองเห็นวัตถุของกล้องจุลทรรศน์ให้สามารถแสดงรายละเอียดได้ดีมากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งมีหลักการทำงาน

คล้ายกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง แต่แตกต่างกันที่ส่วนประกอบภายใน กล่าวคือเป็นการประยุกต์เอาอิเล็กตรอนที่มีช่วงคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงมาใช้แทนคลื่นแสงและใช้เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแทนเลนส์กระจก โดยเลนส์ต่างๆ ในกล้องจะใช้ขดลวดพันรอบแท่งเหล็กอ่อน เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ซึ่งสนามแม่เหล็กจะผลักกับประจุของอิเล็กตรอน ทำให้ประจุอิเล็กเล็กตอนเบี่ยงเบนไปสู่เป้าหมายได้ และมีตัวตรวจวัดที่ จะมาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำแสงอิเล็กตรอนไปกระทบผิวตัวอย่าง จากนั้นก็จะมีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณที่ดีให้ได้ เป็นสัญญาณภาพปรากฏบนหน้าจอรับต่อไป ภาพของวัตถุหรือตัวอย่างที่ได้จะมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่าถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า (กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงมีกำลังขยายได้เต็มที่ไม่เกิน 3,000 เท่า) และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้ โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่างตั้งแต่ 3 - 100 นาโนเมตร กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) จะได้ภาพมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ ใช้ศึกษาโครงสร้างผิวเซลล์ หรือผิววัตถุ ลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบริเวณด้านผิวนอกของวัตถุ ภาพที่ได้จะเห็นเฉพาะผิวนอก หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด เกิดจากการที่ Primary Electron วิ่งไปกระทบพื้นผิวของวัตถุ ทำให้มีการสะท้อนกลับของพลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่น อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back-scatter Electron) รังสีเอ็กซ์ (X-ray) หรือ Secondary Electron ในกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดสัญญาณภาพที่ได้เกิดจากการใช้ตัวตรวจวัด Secondary Electron (Secondary Electron Detector: SE) และเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณอิเล็กตรอน แล้วส่งสัญญาณไปยังจอภาพ (Cathode Ray Tube) เพื่อให้ภาพที่เกิดมานั้นมองเห็นได้ โดยมีลักษณะเป็น 3 มิติ จากนั้นจึงบันทึกลง Photographic เครื่อง SEM สามารถทำการวิเคราะห์ทดสอบตัวอย่างได้ทั้ง แบบของแข็ง แบบผง ฟิล์มเคลือบ ตัวอย่างทางชีวภาพ ตัวอย่างทางวัสดุ และอิเล็กทรอนิกส์ โดยปริมาณตัวอย่างที่ต้องเตรียมเพื่อทำการวิเคราะห์ หากเป็นแบบผง ใช้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น หากเป็นของแข็ง ควรเตรียมตัวอย่างให้มีขนาดไม่เกิน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตร ข้อมูลที่ได้จากกล้อง SEM สามารถแสดงให้เห็นพื้นผิวของวัสดุ ขนาด และรูปร่างของอนุภาค หรือตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงาน และแสดงให้เห็นลักษณะและการกระจายของเฟสในโครงสร้างทางจุลภาค

(Couto, et al. 2024) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของขี้เถ้ายูคาลิปตัสจากเตาเผาในฟาร์มเพื่อใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ โดยจากการศึกษาขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่กำลังขยายต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงในภาพที่ 2-15 พบว่าขี้เถ้ายูคาลิปตัสประกอบด้วยเมล็ดอนุภาคที่มีขนาดหลากหลาย ในส่วนของอนุภาคขนาดเล็กมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเป็นก้อน (Lumps) และมีการเกาะตัวของเมล็ดอนุภาคขนาดเล็กบนผิวของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า นอกจากนี้ ในภาพที่ 2-15(d) ยังสามารถสังเกตเห็นการก่อตัวของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ในรูปของแร่แคลไซต์ (Calcite) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

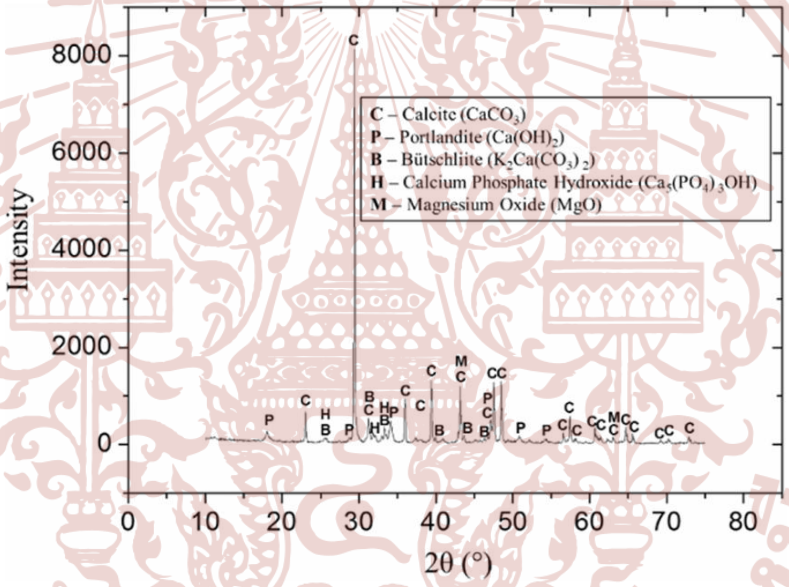


ภาพที่ 2-15 ภาพถ่ายระดับจุลภาคของตัวอย่างขี้เถ้ายูคาลิปตัส ณ กำลังขยายต่าง ๆ ที่: (a) 400x, (b) 3,000x, (c) 6,000x และ (d) 12,000x (Couto, et al. 2024)

2.4.2 การทดสอบด้วยวิธี X-ray diffraction

XRD เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากันทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่าง ๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่าในตัวอย่างนั้น ๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาองค์ประกอบของตัวอย่างได้ และยังสามารถคำนวณหา ปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบาง และคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย เครื่อง XRD สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็ง หรือตัวอย่างที่เป็น powder ได้ ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวจะต้องเรียบ ส่วนในกรณีตัวอย่างที่เป็นผง จะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 325 mesh หรือ ประมาณ 40 micron (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี

(Couto, et al. 2024) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของขี้เถ้ายูคาลิปตัสจากเตาเผาในฟาร์ม โดยการทดสอบด้วยวิธี XRD ถูกนำมาใช้เพื่อระบุ เฟสผลึก (Crystalline phases) ในวัสดุ ซึ่งสังเกตได้จากพีค (Peak) ที่เป็นเอกลักษณ์ในกราฟการเลี้ยวเบน (Diffractogram) ดังแสดงในภาพที่ 2-16 โดยผลจากการศึกษาพบว่าขี้เถ้ายูคาลิปตัสมีความเป็นผลึกสูง (High crystallinity) เนื่องจากพีคที่ตรวจพบมีลักษณะแคบและแหลมชัดเจน และจากการวิเคราะห์กราฟยังแสดงให้ถึงเฟสต่าง ๆ ของขี้เถ้ายูคาลิปตัสดังนี้ แคลไซต์ (Calcite, $CaCO_3$) เป็นเฟสหลัก พบมากถึง 69%, แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Portlandite, $Ca(OH)_2$) 11.4%, โพแทสเซียม-แคลเซียมคาร์บอเนต (Bütschliite) 10.80%, แคลเซียมฟอสเฟตไฮดรอกไซด์ 6.70%, แมกนีเซียมออกไซด์ 2.20%



ภาพที่ 2-16 กราฟการเลี้ยวเบนของขี้เถ้ายูคาลิปตัส (Couto, et al. 2024)

บทที่ 3
การดำเนินงานวิจัย

เนื้อหาภายในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียด และขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยและการทดลอง เพื่อทำการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก เพื่อหาความพรุน การรับกำลังแรงอัด มอดูลัสความยืดหยุ่น ความเครียดที่กำลังสูงสุด การรับกำลังดึงแบบผ่าซีก สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน การรับกำลังดัด โดยจะใช้ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกขนาด 100X200 mm และแบบคานขนาด 100X100X350 mm โดยทำการควบคุมปริมาตรมวลรวมหยาบ ปริมาณปูนไฮดรอลิกซีเมนต์ที่ใช้เท่ากับ 340 kg/m^3 อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.32 ซึ่งมีการใช้ขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่ได้จากโรงงานกระดาษดับเบิ้ลเอ โดยการแทนที่น้ำหนักปูนไฮดรอลิกซีเมนต์ที่ 5, 10, 15, 20 และ 25% และใช้เส้นใยขวดพลาสติก โดยการแทนที่ปริมาตรตัวอย่างที่ 0.5, 1, 1.5 และ 2% และมีการศึกษาคุณลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค ได้แก่ การทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM) และการทดสอบ X-ray diffraction (XRD) เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางวิศวกรรม

3.1 การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม

3.1.1 การศึกษาคุณสมบัติของมวลรวมหยาบ

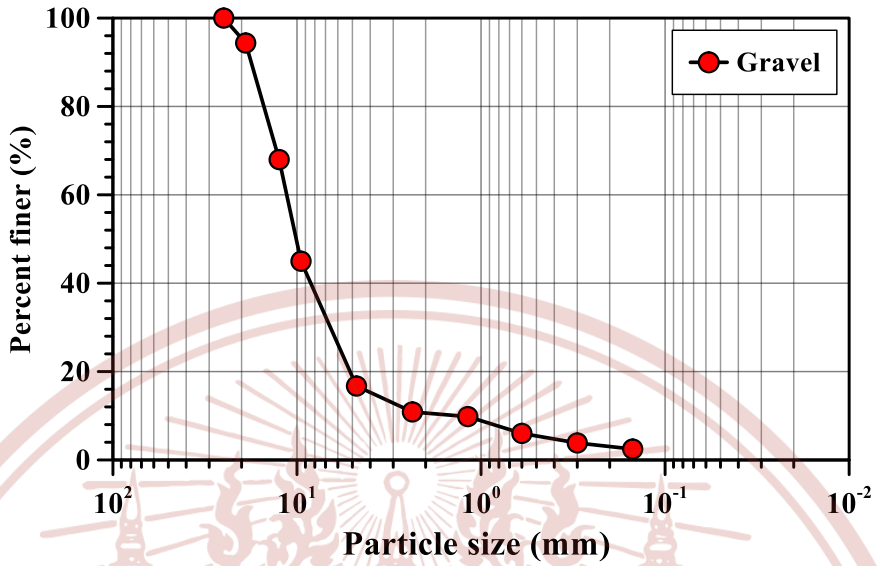
มวลรวมหยาบตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นหินกรวดที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไป ซึ่งการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ดังแสดงในภาพที่ 3-1 โดยใช้มวลรวมหยาบที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 3/4 นิ้ว ค้างที่ตะแกรง 3/8 นิ้ว (9.51 – 19.00 mm.) ใช้สัญลักษณ์ LG และ มวลรวมหยาบที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว ค้างตะแกรงเบอร์ 4 (4.76 - 9.51 mm) ใช้สัญลักษณ์ SG ดังแสดงในภาพที่ 3-2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM โดยมีรายการทดสอบดังนี้

3.1.1.1 การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักและช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบ (ASTM C29)

3.1.1.2 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ และการดูดซึมของมวลรวมหยาบ (ASTM C127)

3.1.1.3 การตรวจสอบความต้านทานต่อการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบ (ASTM C131)

โดยผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมหยาบดังแสดงในตารางที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของมวลรวมหยาบ



ภาพที่ 3-2 แสดงมวลรวมหยาบที่นำมาใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของมวลรวมหยาบ

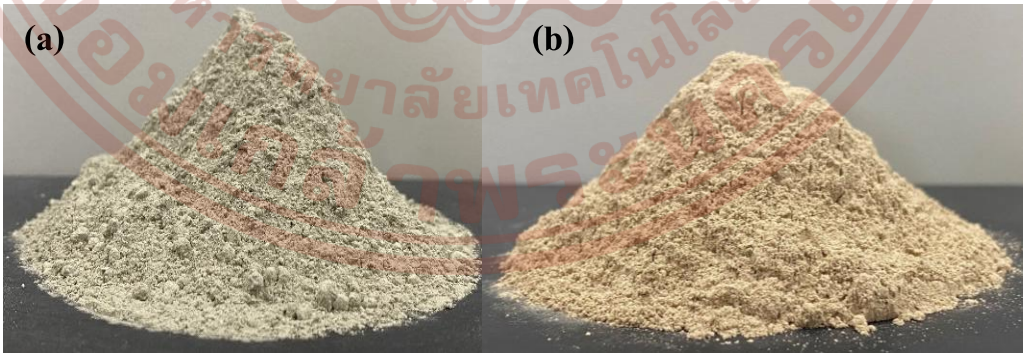
Properties	Coarse Aggregate
Bulk density (kg/m^3)	1555
Void (%)	42.16
Specific gravity	2.73
Water absorption (%)	0.43
Los Angeles abrasion weight loss (%)	22.71

3.1.2 การศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุผสมเพิ่มที่นิยมใช้กันแพร่หลายโดยทั่วไป เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่หาได้ง่าย มีคุณสมบัติสม่ำเสมอ มีมาตรฐานและข้อกำหนดที่ใช้ปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ จึงสามารถนำมาอ้างอิง ดัดแปลงให้เหมาะสมกับงานก่อสร้างได้ โดยปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) 2594 ของกระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งอ้างอิงกับมาตรฐาน ASTM C1157 แสดงในภาพที่ 3-3(a) และองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากการตรวจสอบด้วยวิธี X-ray Fluorescence ดังแสดงในตาราง 3-2 โดยการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในงานวิจัยครั้งนี้จะใช้ที่ 340 kg/m^3 และอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b ratio) เท่ากับ 0.32

3.1.3 การศึกษาคุณสมบัติของเถ้า

เถ้าชีวมวลที่ใช้ในการศึกษาเป็นของเหลือจากการเผาไหม้ ซึ่งจัดเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติปอซโซลานสังเคราะห์ประเภทหนึ่ง ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้ขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่ได้จากโรงงานกระดาษดับเบิ้ลเอ ตำบลท่าตูม อำเภอศรีมหาโพธิ จังหวัดปราจีนบุรี แสดงในภาพที่ 3-3(b) และองค์ประกอบทางเคมีซึ่งได้จากการตรวจสอบด้วยวิธี X-ray Fluorescence ดังแสดงในตาราง 3-2 โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เถ้าลอยเป็นมวลละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกด้วยน้ำหนักอัตราส่วนเทียบต่อน้ำหนักแห้งของขี้เถ้ายูคาลิปตัส ซึ่งจะใช้ปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสในการแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ 0 – 25 % เทียบกับหน่วยน้ำหนักปูนซีเมนต์



ภาพที่ 3-3 (a) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และ (b) ขี้เถ้ายูคาลิปตัส

ตารางที่ 3-2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และขี้เถ้ายูคาลิปตัส

Compound	Hydraulic Cement (%)	Eucalyptus ash (%)
SiO_2	13.93	25.5
Al_2O_3	3.16	4.53
Fe_2O_3	2.79	4.31
CaO	74.36	49.75
MgO	0.4	3.24
SO_3	4.49	3.69
K_2O	0.61	8.44
$Na_2O + Ti_2O$ + other	0.26	0.5

3.1.4 การศึกษาคุณสมบัติของเส้นใยขวดพลาสติก

เส้นใยที่ใช้ในการศึกษาเป็นเส้นใยจากขวดพลาสติก ชนิด PE ดังแสดงในภาพที่ 3-4 โดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากในการช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึง หรือการรับแรงดัดที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำทางด้านข้างซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง เนื่องด้วยเส้นใยเป็นวัสดุที่มีค่ากำลังดึงที่สูง เป็นผลทำให้ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของโครงสร้าง โดยคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของเส้นใยขวดพลาสติก แสดงในตารางที่ 3-3 โดยการใช้เส้นใยขวดพลาสติกในงานวิจัยครั้งนี้มีขนาดความหนา 2 มิลลิเมตร ความยาว 70 มิลลิเมตร และใช้ปริมาณเส้นใยขวดพลาสติกที่ 0 - 2% ของหน่วยปริมาตรตัวอย่าง



ภาพที่ 3-4 ลักษณะของขวดพลาสติก ชนิด PE และขนาดเส้นใยขวดพลาสติก

ตารางที่ 3-3 คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของเส้นใยขวดพลาสติก

Properties	Waste plastic bottle Fibers
Tensile Strength (MPa)	20
Elastic Modulus (MPa)	1405
Elongation (%)	7
Specific gravity	1.32
Section	Rectangle
Length, l (mm)	70
Width, w (mm)	2
Aspect Ratio (l/w)	35
Water absorption (%)	0.48

3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก สำหรับทำการทดสอบนั้น จะใช้วัสดุที่กล่าวมาในหัวข้อ 3.1.1 – 3.1.4 โดยอัตราส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงในตารางที่ 3-4 ในการเตรียมส่วนผสมสำหรับทำตัวอย่างในแต่ละครั้งจะเตรียมอย่างเพียงพอสำหรับหนึ่งตัวอย่างเพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพตัวอย่าง โดยการเตรียมส่วนผสมขั้นแรกจะนำกรวด ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ขี้เถ้ายูคาลิปตัส และเส้นใยขวดพลาสติกผสมเข้าด้วยกัน จากนั้นทำการเติมน้ำ และผสมให้เข้ากันอีกครั้ง เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า จากนั้นนำแต่ละส่วนผสมที่ได้เตรียมไว้บรรจุลงในแบบหล่อตัวอย่างที่ได้ทำการทาด้วยน้ำมันหล่อลื่นที่แบบหล่อตัวอย่างเพื่อป้องกันการยึดเกาะของตัวอย่างทดสอบกับแบบหล่อ หลังจากเสร็จสิ้นการเตรียมตัวอย่างจะทำการหุ้มด้วยพลาสติกใสทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างเกิดการคงรูปในแบบหล่อตัวอย่าง จากนั้นเมื่อครบกำหนดเวลาถอดตัวอย่างออกจากแบบทันที และทำการบันทึกค่าน้ำหนัก และค่าขนาดของตัวอย่างก่อนที่จะนำไปบ่มด้วยการหุ้มด้วยพลาสติกใสตามอายุการบ่มที่ 28 และ 90 วัน เมื่อครบกำหนดอายุการบ่มจะนำตัวอย่างมาทำการทดสอบแต่ละกระบวนการที่กำหนดไว้

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ ความพรุน การรับกำลังแรงอัด มอดูลัสยืดหยุ่น ความเครียดที่กำลังสูงสุด การรับกำลังแรงดึงแบบผ่าซีก และสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน

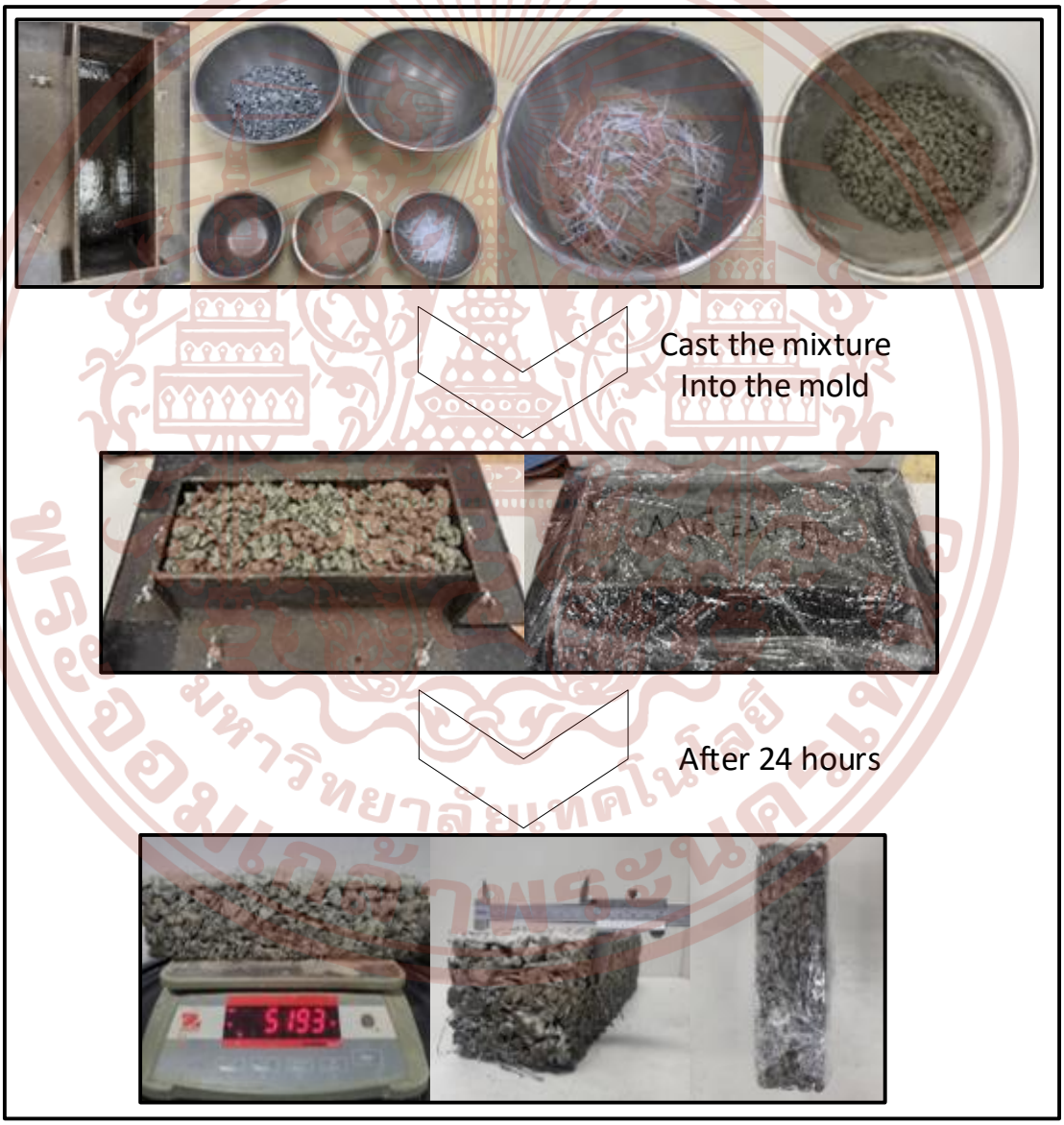
นำส่วนผสมที่ได้ทำการผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันบรรจุใส่ลงในตัวอย่างแบบหล่อรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm ความสูง 200 mm จากนั้นทำการหุ้มด้วยพลาสติกใสทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาถอดตัวอย่างออกจากแบบ ทำการบันทึกค่าน้ำหนัก และค่าขนาดของตัวอย่าง หลังจากนั้นทำการบ่มด้วยการหุ้มด้วยพลาสติกใสตามอายุการบ่มที่ 28 และ 90 วัน เพื่อนำไปทำการทดสอบต่อ ดังแสดงในภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 การเตรียมตัวอย่างรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm ความสูง 200 mm

3.2.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ การรับกำลังแรงดัด

นำส่วนผสมที่ได้ทำการผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันบรรจุใส่ลงในตัวอย่างแบบหล่อคานทรงลูกบาศก์ขนาดความกว้าง 100 mm ความลึก 100 mm และความยาว 350 mm จากนั้นทำการหุ้มด้วยพลาสติกใสทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาถอดตัวอย่างออกจากแบบ ทำการบันทึกค่าน้ำหนัก และค่าขนาดของตัวอย่าง หลังจากนั้นทำการบ่มด้วยการหุ้มด้วยพลาสติกใสตามอายุการบ่มที่ 28 และ 90 วัน เพื่อนำไปทำการทดสอบต่อ



ภาพที่ 3-6 การเตรียมตัวอย่างคานทรงลูกบาศก์ขนาดความกว้าง 100 mm ความลึก 100 mm และความยาว 350 mm

ตารางที่ 3-4 แสดงตัวอย่างสัดส่วนของการผสม

Coarse aggregate		Eucalyptus ash (%)	plastic bottle Fibers (%)	Hydraulic cement (kg/m^3)	w/b ratio
SG (%)	LG (%)				
100	0	0 5 10 15 20 25	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	340	0.32
0	100	0 5 10 15 20 25	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	340	0.32
50	50	0 5 10 15 20 25	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	340	0.32

3.3 วิธีการศึกษาคุณสมบัติเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ด้วยการทดสอบดังต่อไปนี้ การทดสอบหาความพรุน (Porosity) การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting tensile strength) การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน (Coefficient of permeability) การทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural strength) โดยรายละเอียด และขั้นตอนมีดังนี้

3.3.1 การทดสอบความพรุน

การทดสอบหาค่าความพรุนของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM C1754/ C1754M เพื่อหาปริมาณช่องว่างของคอนกรีตพรุน ในการศึกษา ค่าความพรุนถูกคำนวนโดยค่าน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตพรุนหลังจากชั่งในน้ำอย่างน้อย 30 นาที และค่าน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตพรุนหลังจากการทำให้แห้งด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียล เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากค่าดังกล่าวมาที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปใช้ในการหาค่าความพรุน ซึ่งคำนวนได้จากสมการ 3-1

$$n = \left[1 - \left(\frac{W_d - W_w}{\gamma_w V}\right)\right] \times 100(\%) \qquad (3\text{-}1)$$

เมื่อ n คือ ค่าความพรุน (เปอร์เซ็นต์, %)

W_d คือ ค่าน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตพรุนหลังจากการทำให้แห้ง (กรัม, g)

W_w คือ ค่าน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตพรุนหลังจากชั่งในน้ำ (กรัม, g)

γ_w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, g/cm^3)

V คือ ปริมาตรตัวอย่าง (ลูกบาศก์มิลลิเมตร, mm^3)

3.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

กำลังรับแรงอัด และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm ความสูง 200 mm ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM C39/C39M สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก ซึ่งในทางปฏิบัติผิวด้านบน และด้านล่างของตัวอย่างมักจะไม่เรียบ ทำให้ผลการทดสอบเกิดข้อผิดพลาดได้ ดังนั้นก่อนการทดสอบจึงใช้ยิปซั่มเคลือบปิดที่หัวและท้ายของตัวอย่างให้เรียบตามมาตรฐาน ASTM C617/C617M จากนั้นทำการทดสอบตัวอย่างด้วยเครื่องกดทดสอบแบบไฮดรอลิกที่อัตราความเค้น 0.25 ± 0.05 เมกาปาสคาลต่อวินาที จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ นอกจากนี้ในระหว่างการทดสอบตัวอย่างจะเกิดการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งสามารถหาได้จากการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อน

ตัวในแนวดิ่ง (Linear variable differential transducers, LVDT) ดังแสดงในภาพที่ 3-7 ค่าที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปใช้หา กำลังรับแรงอัด มอดูลัสความยืดหยุ่น และความเครียดที่กำลังสูงสุด ซึ่งคำนวนได้จากสมการ 3-2 และ 3-3 ตามลำดับ

$$q_u = \frac{4P}{\pi D^2} \tag{3-2}$$

$$E_{50} = \frac{q_u}{\varepsilon} \tag{3-3}$$

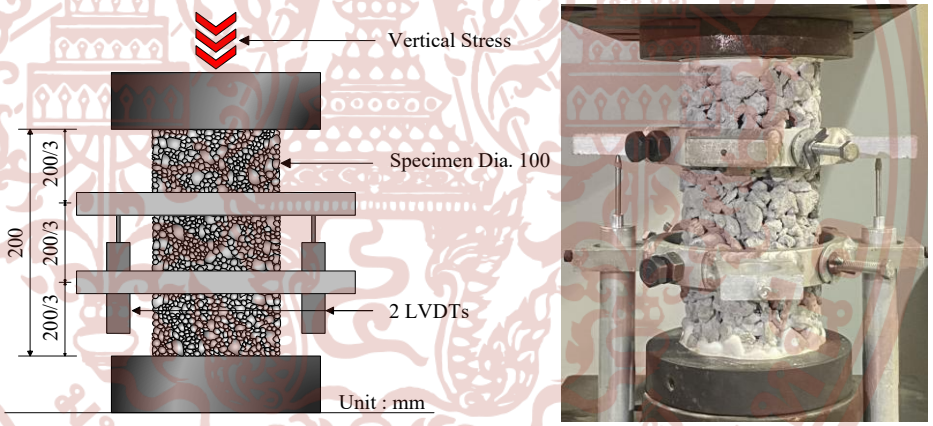
เมื่อ q_u คือ กำลังรับแรงอัด (เมกาปาสคาล, MPa)

P คือ ค่าแรงอัดประลัยที่กระทำต่อตัวอย่างรูปทรงกระบอก (กิโลนิวตัน, kN)

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างรูปทรงกระบอก (มิลลิเมตร, mm)

E_{50} คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (กิกะปาสคาล, GPa)

ε คือ ความเครียด



ภาพที่ 3-7 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบกำลังอัด

3.3.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ความสูง 200 มิลลิเมตร ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM C496/C496M สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตรูปทรงกระบอก ทำการทดสอบตัวอย่างด้วยเครื่องกดทดสอบแบบไฮดรอลิกที่อัตราคงที่ในช่วง 0.7 - 1.4 เมกาปาสคาลต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ โดยให้ตัวอย่างวางนอนเพื่อรับแรงกดตามแนวแกนที่ส่งผ่านจากแผ่นไม้อัดหนา 3 มิลลิเมตร กว้าง 25 มิลลิเมตร แรงอัดที่ส่งผ่านไม้อัดจะทำให้เกิดแรงดึง ดังแสดงในภาพที่ 3-8 จากการทดสอบบันทึกค่าแรงอัดประลัยที่กระทำต่อคอนกรีต ซึ่ง

ระบุจากการเครื่องกดทดสอบแบบไฮดรอลิกหลังจากตัวอย่างเกิดการวิบัติ ค่าที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปใช้ในการหาค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก ซึ่งคำนวนได้จากสมการ 3-4

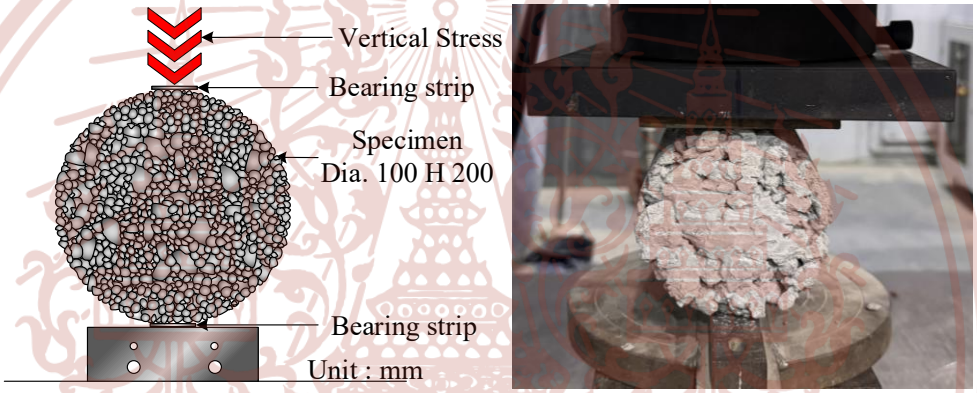
$$T = \frac{2P}{\pi LD} \tag{3-4}$$

เมื่อ T คือ กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (เมกาปาสคาล, MPa)

P คือ ค่าแรงอัดประลัยที่กระทำต่อตัวอย่างรูปทรงกระบอก (นิวตัน, N)

L คือ ความยาวของตัวอย่างรูปทรงกระบอก (มิลลิเมตร, mm)

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างรูปทรงกระบอก (มิลลิเมตร, mm)



ภาพที่ 3-8 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีก

3.3.4 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D5084 สำหรับการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในดินหยาบ โดยได้นำวิธีการทดสอบมาปรับใช้เพื่อใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ตัวอย่างจะถูกเตรียมในแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และความสูง 200 มิลลิเมตร เครื่องทดสอบซึ่งถูกสร้างโดยผู้ทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 3-9

จากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำจะถูกกำหนดโดยการบันทึกความต่างของระดับน้ำเริ่มต้น $\mathbf{h_1}$ ที่เวลา $\mathbf{t}$ = 0 จากนั้นปล่อยให้น้ำไหลผ่านตัวอย่าง บันทึกความต่างของระดับน้ำสุดท้าย $\mathbf{h_2}$ ที่เวลา $\mathbf{t} = \mathbf{t_2}$ โดยค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำสามารถคำนวนได้จากสมการ 3-5

$$k = 2.303 \frac{aL}{At} log \frac{h_1}{h_2} \quad (3\text{-}5)$$

เมื่อ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำ (มิลลิเมตรต่อวินาที, mm/sec)

a คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (ตารางมิลลิเมตร, mm^2)

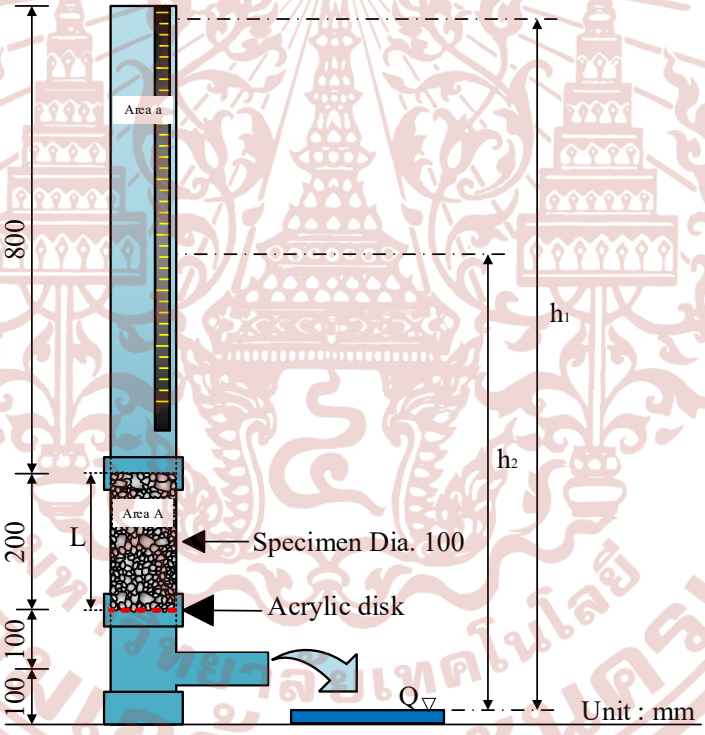
L คือ ความยาวของตัวอย่าง (มิลลิเมตร, mm)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตารางมิลลิเมตร, mm^2)

t คือ เวลาของน้ำที่ไหลซึมผ่าน (วินาที, sec)

h_1 คือ ความสูงของระดับน้ำก่อนการทดสอบ (มิลลิเมตร, mm)

h_2 คือ ความสูงของระดับน้ำหลังการทดสอบ (มิลลิเมตร, mm)



ภาพที่ 3-9 แสดงเครื่องทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน

3.3.5 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

การการทดสอบกำลังรับแรงดัดของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM C78/C78M สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตโดยตัวอย่างจะถูกทดสอบตัวอย่างด้วยเครื่องกดทดสอบแบบไฮดรอลิกที่อัตราการเสียรูปสุทธิอยู่ในช่วง 0.05 – 0.10 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งคานตัวอย่างเกิดการเสียรูปที่ L/600 หลังจากนั้นอัตราการเสียรูปสุทธิอยู่ในช่วง 0.05 – 0.20 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งคานตัวอย่างเกิดการวิบัติ

และโดยมาตรฐานนี้การทดสอบสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การให้แรงกดหนึ่งจุดที่กึ่งกลางคาน (Center - Point Loading) และวิธีให้แรงกดคาน 2 จุด โดยกำหนดตำแหน่งของจุดทั้งสองเป็นตำแหน่งที่แบ่งคานออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน (Third – Point Loading) แต่โดยทั่วไปนิยมใช้วิธีให้แรงกดคาน 2 จุด ดังแสดงในภาพที่ 3-10 นอกจากนี้ในการทดสอบด้วยเครื่องกดทดสอบแบบไฮดรอลิกตัวอย่างจะเกิดการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งสามารถหาได้จากการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (Linear variable differential transducers, LVDT)

การให้น้ำหนักกระทำต่อคานสูงสุด โดยทั่วไปคานเกิดการหักออกเป็น 2 ท่อน ตรงบริเวณในช่วงระยะระหว่าง L/3 และ 2L/3 ซึ่งบริเวณดังกล่าวนั้นจะมีค่าโมเมนต์ดัดเกิดขึ้นสูงสุด และไม่มีแรงเฉือนเกิดขึ้น ดังนั้นจึงถือว่าคานเกิดการแตกหักโดยโมเมนต์เพียงอย่างเดียว โดยจากค่าที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปใช้ในการหาค่ากำลังรับแรงดัด ซึ่งคำนวนได้จากสมการ 3-6 และสมการ 3-7

เมื่อรอยแตกอยู่ในช่วงระหว่างคาน

$$R = \frac{PL}{2bd^2} \tag{3-6}$$

เมื่อ R คือ ค่ากำลังรับแรงดัด (เมกาปาสคาล, MPa)

P คือ ค่าแรงอัดประลัยที่กระทำต่อคาน (นิวตัน, N)

L คือ ความยาวช่วงคาน (มิลลิเมตร, mm)

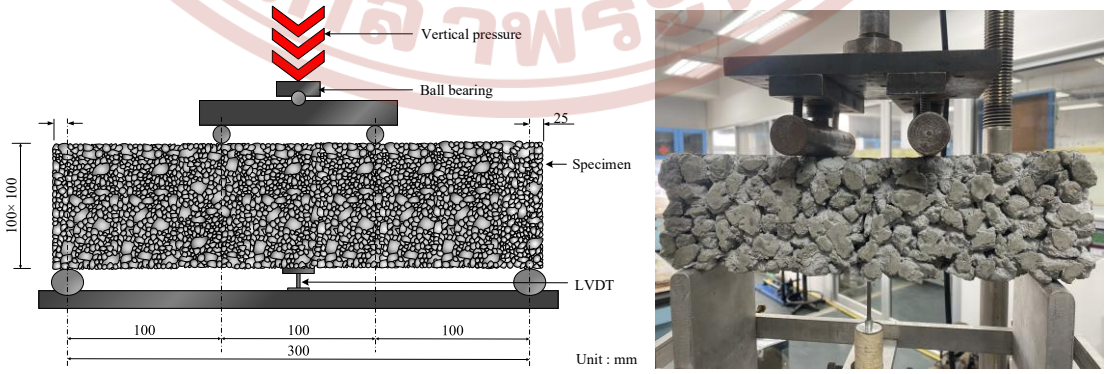
B คือ ความกว้างคานเฉลี่ยบริเวณรอยแตก (มิลลิเมตร, mm)

d คือ ความลึกคานเฉลี่ยบริเวณรอยแตก (มิลลิเมตร, mm)

เมื่อรอยแตกอยู่นอกช่วงกลางคาน และห่างจากตรงกลางคานไม่เกินร้อยละ 5 ของช่วงคาน

$$R = \frac{3Pa}{2bd^2} \tag{3-7}$$

เมื่อ a คือ ระยะเฉลี่ยจากรอยแตกถึงฐานรองคานด้านใกล้ที่สุด (มิลลิเมตร, mm)



ภาพที่ 3-10 แสดงตำแหน่งการติดตั้งการทดสอบกำลังรับแรงดัด

3.4 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างอันเกิดจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพและอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ด้วยการศึกษาดังต่อไปนี้

3.4.1 การศึกษาด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาพของอนุภาคด้วยการใช้เทคนิคทางภาพถ่าย เป็นที่นิยม และมีการยอมรับอย่างแพร่หลายในงานวิจัยต่างๆ เทคนิคการวิเคราะห์ด้วย SEM สามารถยืนยัน และเพิ่มความเชื่อมั่นให้กับผลการทดสอบได้ โดยแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก มีอิทธิพลโดยตรงต่อโครงสร้างระดับจุลภาค ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่ การเพิ่มขึ้นของ CSH, $Ca(OH)_2$ และการเรียงตัวของอนุภาคที่อายุการบ่มต่าง ๆ ในขั้นตอนการทดสอบ จะนำชิ้นส่วนตัวอย่างจากเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ที่ถูกทำให้แห้งด้วยการใช้ซิลิกาเจลในการดูดความชื้น ดังแสดงในภาพที่ 3-11 จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการเคลือบตัวอย่างด้วยทองหรือคาร์บอน และนำตัวอย่างเข้าสู่กระบวนการส่องด้วยอิเล็กตรอน ในการทดสอบจำเป็นจะต้องทราบช่วงกำลังขยายเบื้องต้น โดยการทดสอบเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาของสารเชื่อมประสานของตัวอย่าง จะใช้กำลังขยายเริ่มต้นที่ 100x จำนวนตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบนั้นจะคัดเลือกมาจากสัดส่วนผสมที่ผสมเถ้ายูคาลิปตัสที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด และต่ำสุดจำนวน 2 ค่า และไม่มีการผสมเถ้ายูคาลิปตัส 1 ค่า ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วันโดยใช้จำนวนตัวอย่างละ 3 ตัวอย่างต่อ 1 สัดส่วน



ภาพที่ 3-11 การดูดความชื้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบ SEM ด้วยซิลิกาเจล

3.4.2 การศึกษาด้วย X-ray diffraction (XRD)

X-ray diffraction หรือ XRD เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่าง ๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่าในตัวอย่างนั้น ๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาองค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหา ปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell ความเครียดของตัวอย่าง ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ ยังสามารถทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบาง และคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย ในการทดสอบจะนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ได้จากเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติกมาทำการบดละเอียดแล้วทำการร่อนผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 100 (150 ไมครอน) และจะถูกดูดความชื้นด้วยการใช้ซิลิกาเจล ดังแสดงในภาพที่ 3-12 แล้วจึงนำมาทำการทดสอบวิเคราะห์ต่อไป



ภาพที่ 3-12 การดูดความชื้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบ XRD ด้วยซิลิกาเจล

บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

เนื้อหาในบทนี้ เกี่ยวกับผลการศึกษา และวิเคราะห์ผล โดยการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ในส่วนแรกแสดงถึงผลการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก เพื่อหา ความพรุน กำลังรับแรงอัด มอดูลัสความยืดหยุ่น ความเครียดที่กำลังสูงสุด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน กำลังรับแรงดัด ในส่วนที่สองกล่าวถึงรูปแบบความเสียหายของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก และในส่วนที่สามกล่าวถึงการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาพของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ได้แก่ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) และการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วยรังสีเลี้ยวเบน (XRD)

4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก

ผลการศึกษาในส่วนนี้จะประกอบไปด้วย การทดสอบความพรุน การทดสอบกำลังรับแรงอัด มอดูลัสยืดหยุ่น ความเครียดที่กำลังสูงสุด การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก การทดสอบหาสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน และการทดสอบกำลังรับแรงดัด

4.1.1 ผลการศึกษาความพรุน (Porosity : n)

จากการศึกษาความพรุน (Porosity : n) ของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก พบว่าขนาดของมวลรวม ปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัส (Eucalyptus ash : EA) และปริมาณเส้นใยจากขวดพลาสติก (Plastic bottle fiber : F) ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณช่องว่างภายในของเสา จากการศึกษาพบว่าค่าความพรุนอยู่ในช่วง 33.20 – 44.92 % ดังแสดงในภาพที่ 4-1

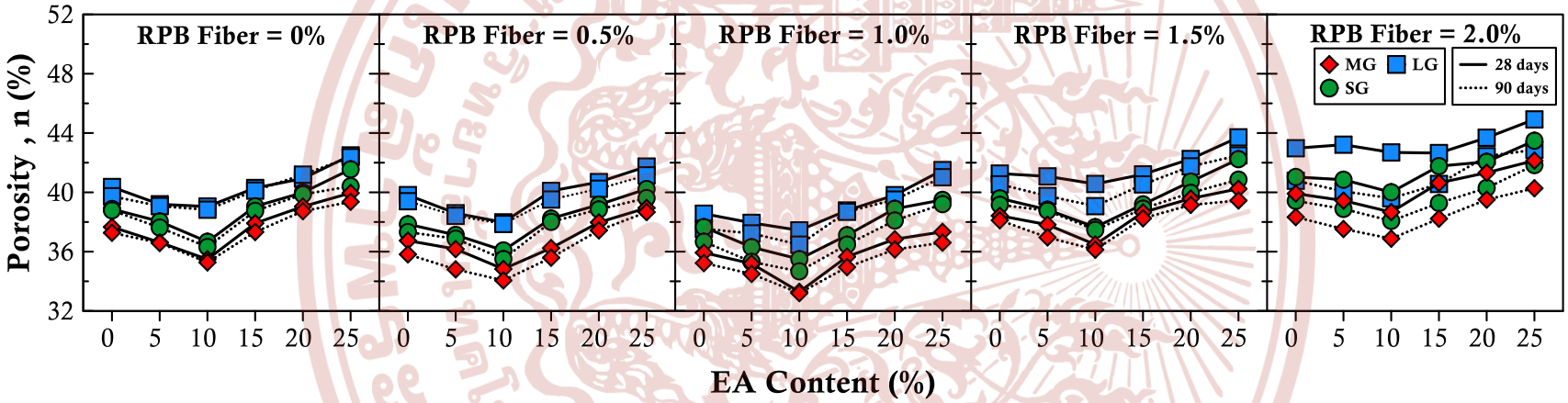
เมื่อพิจารณาถึงขนาดมวลรวม จากทุกปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัส ปริมาณเส้นใยเส้นใยขวดพลาสติก และทุกช่วงอายุการบ่ม พบว่าตัวอย่าง MG ซึ่งมีช่วงขนาดมวลรวมกว้างที่สุด ทำให้การจัดเรียงตัวและความอัดแน่นของอนุภาคได้ดีที่สุด ส่งผลให้มีค่าความพรุนต่ำที่สุด ขณะที่ตัวอย่าง LG ซึ่งมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมากที่สุด ให้ค่าความพรุนสูงที่สุด ส่วนตัวอย่าง SG มีช่องว่างระหว่างอนุภาคเล็กกว่าตัวอย่าง LG และมีช่วงขนาดของอนุภาคแคบกว่าตัวอย่าง MG ทำให้ความพรุนนั้นอยู่

ระหว่างช่วงของ MG และ LG ตัวอย่างเช่น เสา MG-EA0-F0, SG-EA0-F0 และ LG-EA0-F0 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ความพรุนของเสามีค่า 37.66, 38.87 และ 40.36 % ตามลำดับ

จากการศึกษายังพบว่าค่าความพรุนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสจาก 5% เป็น 10% และมีค่าความพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสมากกว่า 10% ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของขี้เถ้ายูคาลิปตัสมีขนาดเล็ก สามารถทำปฏิกิริยากับเนื้อปูนซีเมนต์ และแทรกตัวเพื่อเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้าง อีกทั้งยังมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานิก และวัสดุเติมเต็ม ส่งผลให้ความพรุนลดลง (Arulrajah, et al. 2016; Xu, et al. 2018; Yoobanpot, et al. 2020) ดังนั้นการแทนที่ปริมาณซีเมนต์ด้วยขี้เถ้ายูคาลิปตัสในอัตรา 10% จึงทำให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดช่องว่างภายในของตัวเสา ตัวอย่างเช่น เสา MG-EA10-F0, SG-EA10-F0 และ LG-EA10-F0 ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าความพรุนของเสานั้นมีค่า 35.48, 36.67 และ 39.04 % ตามลำดับ

อายุในการบ่มนั้นมีส่วนต่อความพรุนของเสาเช่นเดียวกัน โดยความพรุนของตัวเสามีค่าลดลงเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 28 เป็น 90 วัน ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของขี้เถ้ายูคาลิปตัสยังคงดำเนินต่อเนื่องในระยะยาว ช่วยเติมเต็มช่องว่างภายในของเสาเพิ่มเติม ตัวอย่างเช่น เสา MG-EA10-F0, SG-EA10-F0 และ LG-EA10-F0 ที่อายุการบ่ม 90 วัน พบว่าความพรุนของเสามีค่าลดลงเป็น 35.28 , 36.32 และ 38.83 % ตามลำดับ

และในส่วนของเส้นใยขวดพลาสติก พบว่า การนำเส้นใยขวดพลาสติกมาแทนที่วัสดุมวลรวมส่งผลทำให้ความพรุนมีค่าลดลง โดยจะลดลงมากที่สุดที่ปริมาณเส้นใยขวดพลาสติก 1.0% และมีค่าความพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยขวดพลาสติกมากกว่า 1.0% แสดงให้เห็นว่าการใส่เส้นใยขวดพลาสติกในตัวเสาสามารถทำให้ความพรุนลดลงได้ในช่วงปริมาณเส้นใยที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยสูงเกินไปจะส่งผลให้ความพรุนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและเกิดการจับกลุ่มกัน ซึ่งไปขัดขวางการเรียงตัวของมวลรวมและทำให้โครงสร้างรูพรุนไม่สม่ำเสมอ (Li, et al. 2023) ตัวอย่างเช่น เสา MG-EA10-F1 ที่อายุการบ่ม 28 วัน และที่อายุการบ่ม 90 วัน ความพรุนมีค่าอยู่ที่ 33.29 และ 33.20 % ตามลำดับ



ภาพที่ 4-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนต่อปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่เพิ่มขึ้น ที่ปริมาณเส้นใยขวดพลาสติก 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0% ตามลำดับ และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

4.1.2 ผลการศึกษากำลังรับแรงอัด (Compressive strength : q_u)

จากการศึกษาพบว่าค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength : q_u) ของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก อยู่ในช่วง 1.19 – 4.77 MPa หรือประมาณ 3.58 MPa ดังแสดงในภาพที่ 4-2

ขนาดของมวลรวมส่งผลต่อค่ากำลังแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ โดยตัวอย่าง MG ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า SG และ LG อย่างชัดเจน เนื่องจากขนาดคละที่ดีกว่า ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของอนุภาคที่มีประสิทธิภาพและการถ่ายเทแรงระหว่างอนุภาคที่ดี (Joshaghani, et al. 2015) ตัวอย่างเช่น เสา MG-EA0-F0, SG-EA0-F0 และ LG-EA0-F0 ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดของเสามีค่า 2.67, 2.46 และ 1.94 MPa ตามลำดับ

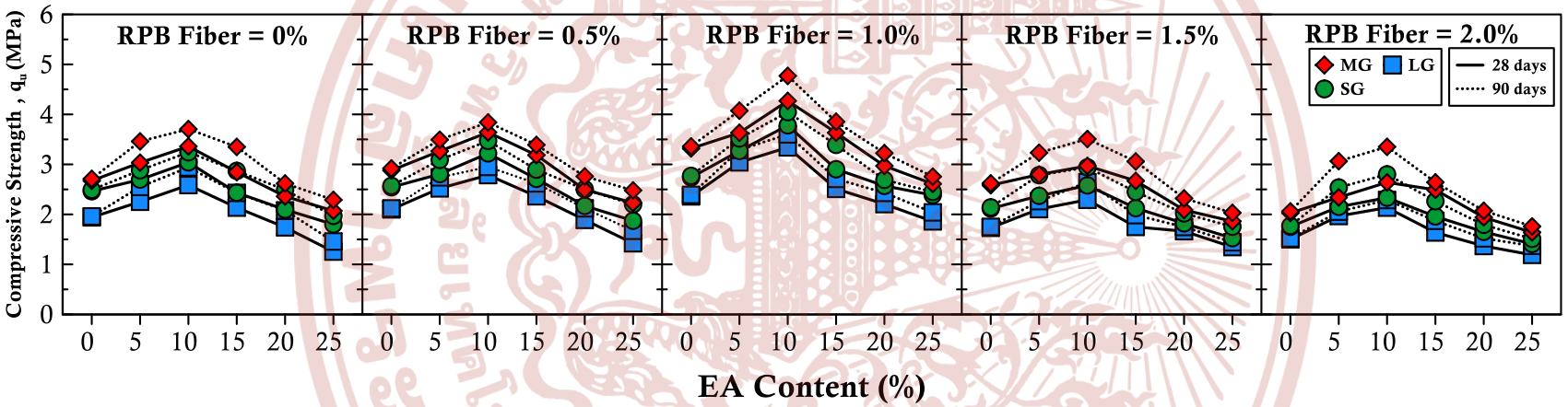
ในส่วนของปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัส สำหรับทุกขนาดมวลรวม ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่เพิ่มขึ้นจาก 5% เป็น 10% โดยตัวอย่างที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่ 10% ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด และกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสมากกว่า 10% ที่ทุกขนาดมวลรวม และที่ทุกอายุการบ่ม ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของขี้เถ้ายูคาลิปตัสมีขนาดเล็ก สามารถทำปฏิกิริยากับเนื้อปูนซีเมนต์ และแทรกตัวเพื่อเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้าง อีกทั้งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานิก และวัสดุเติมเต็ม ทำให้ช่องว่างรูพรุนภายในลดลง ส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น (Arulrajah, et al. 2016; Xu, et al. 2018; Yoobanpot, et al. 2020) ตัวอย่างเช่น เสา MG-EA10-F0, SG-EA10-F0 และ LG-EA10-F0 ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 3.36, 3.04 และ 2.59 MPa ตามลำดับ

นอกจากนี้ ยังพบว่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 28 เป็น 90 วัน โดยเฉพาะในตัวอย่างที่มีการผสมขี้เถ้ายูคาลิปตัส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกของขี้เถ้ายูคาลิปตัสยังคงดำเนินต่อเนื่องในระยะยาว ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น เสา MG-EA10-F0, SG-EA10-F0 และ LG-EA10-F0 ที่อายุการบ่ม 90 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดของเสามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 3.71, 3.24 และ 2.94 MPa ตามลำดับ

และในส่วนของเส้นใยขวดพลาสติก พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยขวดพลาสติกที่เพิ่มขึ้นจาก 0.5% เป็น 1.0% โดยค่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ปริมาณเส้นใย 1.0% ตัวอย่างเช่น เสา MG-EA10-F1 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มเป็น 4.27 MPa (เพิ่มขึ้น 27.08 %) และที่อายุการบ่ม 90 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มเป็น 4.77 MPa (เพิ่มขึ้น 28.57 %) เมื่อเทียบกับเสาที่ไม่มีการใส่เส้นใยขวดพลาสติก (MG-EA10-F0) การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดนั้นเนื่องมาจากเส้นใยช่วยถ่ายเทแรงและควบคุมการเกิดรอยร้าวขนาดเล็กภายในโครงสร้าง

และช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงของเสา อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณเส้นใยขวดพลาสติกมากกว่า 1.0% ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มที่จะลดลงตามปริมาณเส้นใยขวดพลาสติกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการกระจายตัวของเส้นใยที่ไม่สม่ำเสมอและการเกิดการจับกลุ่มของเส้นใย ทำให้เกิดช่องว่างเพิ่มขึ้นภายใน ส่งผลให้ความแข็งแรงของโครงสร้างเสาลดลง (Li, et al. 2023; Huynh, et al. 2023)

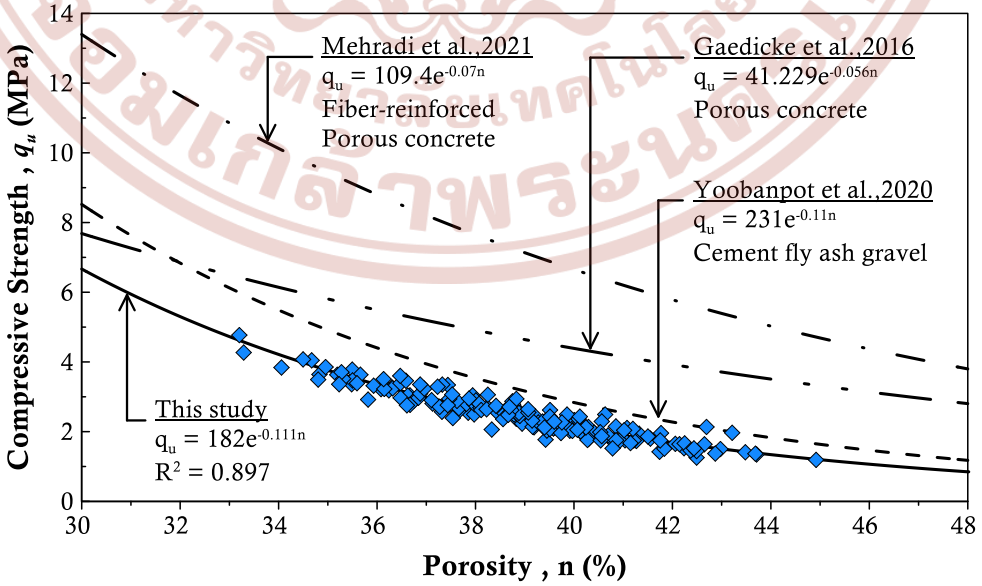
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ภาพที่ 4-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดต่อปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่เพิ่มขึ้น ที่ปริมาณเส้นใยขวดพลาสติก 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 % ตามลำดับ และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 และ 90 วันตามลำดับ

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังรับแรงอัดของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก โดยพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังรับแรงอัดมีความแปรผันแบบผกผันกัน โดยเมื่อช่องว่างความพรุนลดลงเนื่องมาจากผลของขนาดมวลรวม ขี้เถ้ายูคาลิปตัส และเส้นใยขวดพลาสติก ส่งผลทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงสามารถรับแรงได้มาก ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพรุน และค่ากำลังรับแรงอัด แสดงได้อยู่ในรูปแบบระบบสมการเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งในการศึกษานี้สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ในรูปแบบระบบสมการเอกซ์โพเนนเชียลเช่นเดียวกัน ดังแสดงในสมการที่ 4-1 จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับงานวิจัยของ (Gaedicke, et al. 2016) ซึ่งเป็นคอนกรีตพรุน โดยใช้มวลรวมหยาบ 3 ชนิดขนาด 19 mm ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และตะกรันเตาถลุงเหล็ก ที่ W/C 0.3 และมีการเติมสารผสมเพิ่มปรับความหนืดชนิด Type S รวมไปถึงมีการใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณมากสำหรับบางส่วนผสม ส่งผลให้งานวิจัยนี้ที่ความพรุนเท่ากัน มีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่า ในส่วนงานวิจัยของ (Yoobanpot, et al. 2020) ได้ทำเสาเข็มกรวดซีเมนต์เถ้าลอย โดยใช้ขนาดของมวลรวมหลักตั้งแต่ 4.75 – 19.5 mm มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน และใช้เถ้าลอยที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานิก ที่ W/C 0.32 โดยภาพรวมจะมีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่า และงานวิจัยของ (Mehradi, et al. 2021) ซึ่งเป็นคอนกรีตพรุน โดยใช้วัสดุมวลรวมหยาบ 2 ชนิด ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาประเภทที่ 1 มีการแทนที่ด้วยหินพัมมิซและปูนขาว และใส่เส้นใย 3 ชนิดได้แก่ เส้นใยเหล็ก, เส้นใยโลหะ และเส้นใยพอลิเมอร์เพื่อเสริมกำลัง ส่งผลทำให้มีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่า ดังแสดงในภาพที่ 4-3

$$q_u(MPa) = 182exp^{-0.111n(\%)} \qquad R^2 = 0.897 \tag{4-1}$$



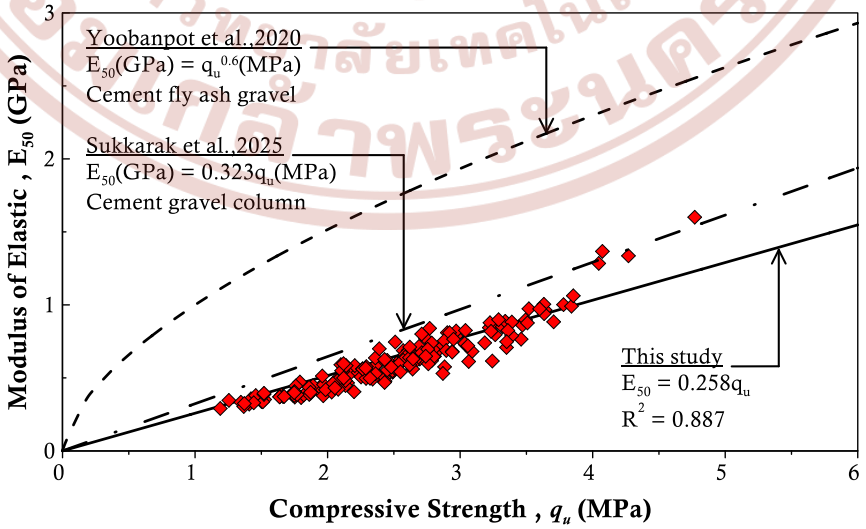
ภาพที่ 4-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังรับแรงอัด

4.1.2.1 มอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity : E_{50})

จากการศึกษาพบว่าค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity : E_{50}) ของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก มีแนวโน้มสอดคล้องกับกำลังรับแรงอัด ซึ่งเป็นผลจากขนาดของมวลรวม ปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัส และปริมาณเส้นใยจากขวดพลาสติก โดยค่ามอดูลัสยืดหยุ่นจากการศึกษานี้ อยู่ในช่วง 0.29–1.60 GPa หรือประมาณ 0.65 GPa

โดยจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและมอดูลัสยืดหยุ่นของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ดังแสดงในภาพที่ 4-4 โดยจากการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดต่อมอดูลัสยืดหยุ่นกับงานวิจัยของ (Yoobanpot, et al. 2020) และ (Sukkarak, et al. 2025) พบว่าค่ากำลังรับแรงอัด และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าที่ต่ำกว่า เมื่อนำข้อมูลจากงานวิจัยของ (Yoobanpot, et al. 2020) มาหาความสัมพันธ์ ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นเสาเข็มกรวดซีเมนต์เถ้าลอย โดยใช้ขนาดมวลรวม 4.75 – 19.5 mm และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน และใช้เถ้าลอยที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานิก ที่ W/C 0.32 และได้เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ (Sukkarak, et al. 2025) ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้เป็นเสาเข็มกรวดซีเมนต์ โดยใช้มวลรวมหยาบที่ 9.5 – 19 mm และมวลรวมละเอียดที่ 0.15 – 2 mm มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน ที่ W/C 0.5 เนื่องจากมีการใช้ W/C ที่สูงกว่าการศึกษานี้ ทำให้เกิดการไฮเดรชันได้มากขึ้นและพัฒนาโครงสร้างได้ดีกว่า ส่งผลให้มีกำลังรับแรงอัด และมอดูลัสยืดหยุ่นที่สูงที่กว่า ขณะที่งานวิจัยนี้ มีกำลังรับแรงอัดที่ 1.19 – 4.77 MPa และมอดูลัสยืดหยุ่นที่ 0.29 – 1.60 GPa โดยมอดูลัสยืดหยุ่นจะแปรผันตรงกับกำลังรับแรงอัด จากการศึกษาสามารถหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเนื่องจากกำลังรับแรงอัดได้จากสมการที่ 4-2

$$E_{50}(GPa) = 0.258q_u(MPa) \qquad R^2 = 0.887 \tag{4-2}$$



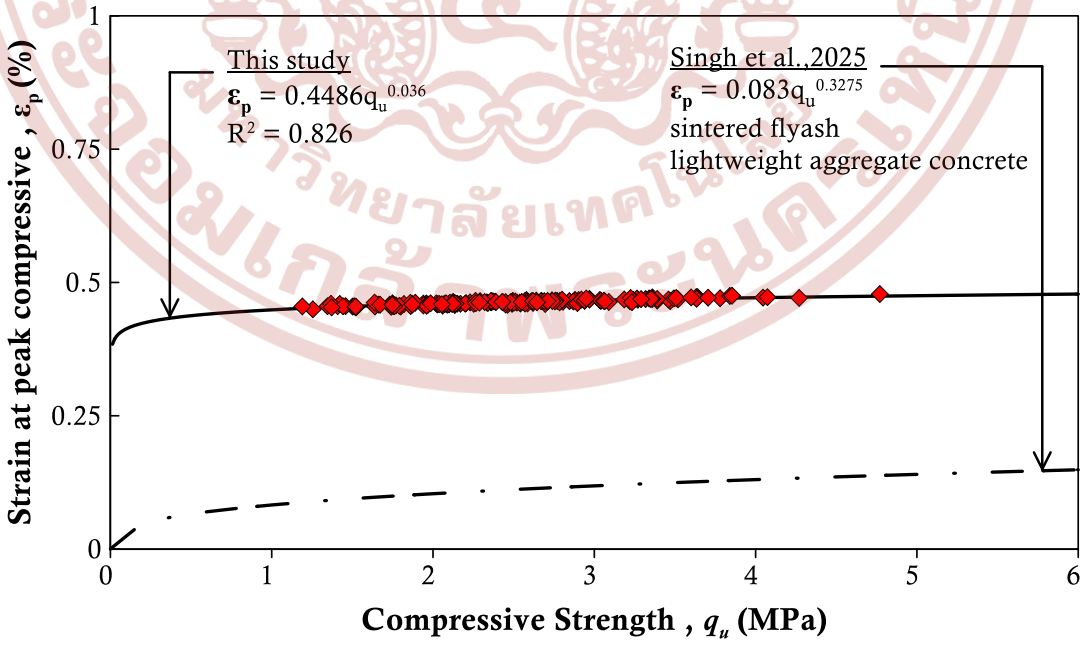
ภาพที่ 4-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและมอดูลัสยืดหยุ่น

4.1.2.2 ความเครียดที่กำลังสูงสุด (peak strain : ε_p)

จากการศึกษาความเครียดที่กำลังสูงสุด (peak strain : ε_p) ของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลจากขนาดของมวลรวม ปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัส และปริมาณเส้นใยจากขวดพลาสติก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ (Tasdemir, et al. 1998) ที่ว่ายิ่งค่ากำลังรับแรงอัดสูง ก็จะยิ่งทำให้ค่าความเครียด ณ จุดความเค้นสูงสุด มีค่าที่สูงขึ้น โดยขึ้นอยู่กับวัสดุผสมต่างๆที่นำมาใช้ โดยจากการศึกษานี้มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 1.19 – 4.77 MPa และความเครียดที่กำลังสูงสุดอยู่ในช่วง 0.29 – 0.66 %

โดยจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและความเครียดที่กำลังสูงสุดของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ดังแสดงในภาพที่ 4-5 ซึ่งพบว่าค่าความเครียดที่กำลังสูงสุดจะแปรผันตรงกับค่ากำลังรับแรงอัด โดยจากการศึกษานี้สามารถหาค่าความเครียดที่กำลังสูงสุดเนื่องจากกำลังรับแรงอัดได้จากสมการที่ 4-3 และจากการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดต่อความเครียดที่กำลังสูงสุดกับงานวิจัยของ (Singh, et al. 2025) พบว่าค่าความเครียดที่กำลังสูงสุด ที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าที่สูงกว่า โดยงานวิจัยของ (Singh, et al. 2025) เป็นคอนกรีตที่มีการใช้วัสดุมวลรวมหยาบน้ำหนักเบาที่ได้จากเถ้าลอยเผาผนึกที่พัฒนามาจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์และเถ้าลอยจากโรงฟ้า ร่วมกับการใช้ซิลิกาฟูม ผสมเข้าด้วยกันที่ w/b 0.3 – 0.7 และมีการใช้สารผสมเพิ่มชนิดโพลีคาร์บอกซิลิก

$$\varepsilon_p(\%) = 0.4486{q_u}^{0.036}(MPa) \qquad R^2 = 0.826 \tag{4-3}$$



ภาพที่ 4-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความเครียดที่กำลังสูงสุด

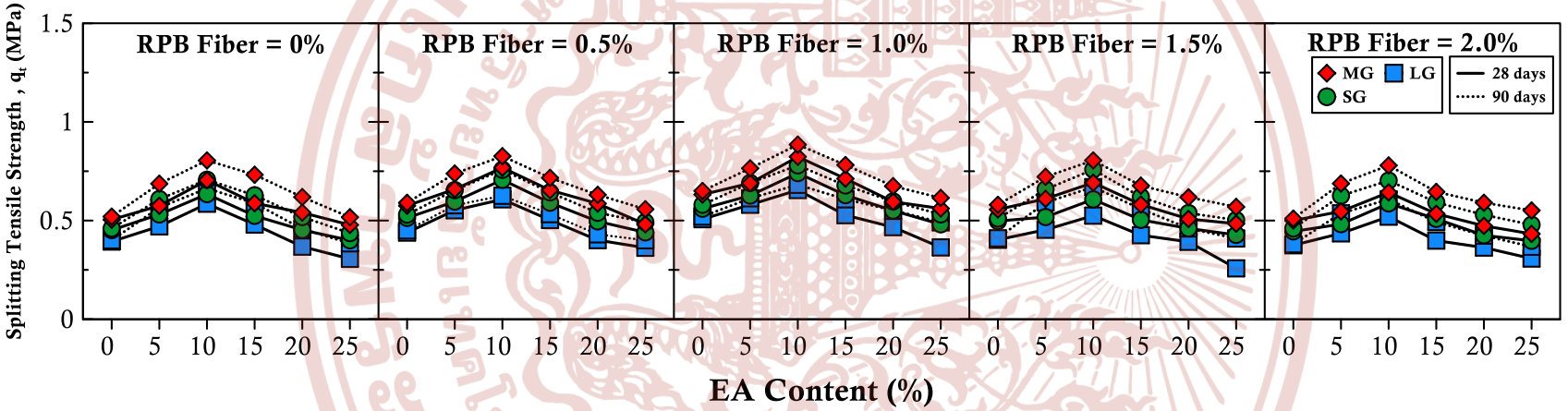
4.1.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting tensile strength : q_t)

ผลการศึกษาพบว่าค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting tensile strength : q_t) ของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก มีค่ากำลังอยู่ในช่วง 0.26–0.88 MPa หรือประมาณ 0.62 MPa โดยค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกมีแนวโน้มสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัด เนื่องมาจากผลของขนาดมวลรวม ปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัส และปริมาณเส้นใยจากขวดพลาสติก ดังแสดงในภาพที่ 4-6

จากการพิจารณาขนาดมวลรวมต่อค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก พบว่าที่ตัวอย่าง MG ให้กำลังรับแรงดึงมากที่สุด เมื่อเทียบกับตัวอย่าง SG และ LG ตัวอย่างเช่น เสา MG-EA0-F0, SG-EA0-F0 และ LG-EA0-F0 ที่อายุการบ่ม 28 ให้ค่ากำลังรับแรงดึงที่ 0.50, 0.45 และ 0.39 MPa ตามลำดับ

ในส่วนของปริมาณเถ้ายูคาลิปตัส จากการศึกษาพบว่า ที่ทุกช่วงขนาดมวลรวม และที่ทุกช่วงอายุการบ่ม ค่ากำลังรับแรงดึงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่เพิ่มขึ้นจาก 5% เป็น 10% โดยปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่ 10% ส่งผลให้กำลังรับแรงดึงมีค่ามากที่สุด ตัวอย่างเช่น เสา MG-EA10-F0, SG-EA10-F0 และ LG-EA10-F0 ที่อายุการบ่ม 28 วัน กำลังรับแรงดึงมีค่าอยู่ที่ 0.70, 0.63 และ 0.59 MPa ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 90 วัน เสา MG-EA10-F0, SG-EA10-F0 และ LG-EA10-F0 กำลังรับแรงดึงมีค่าอยู่ที่ 0.80, 0.71 และ 0.66 MPa ตามลำดับ

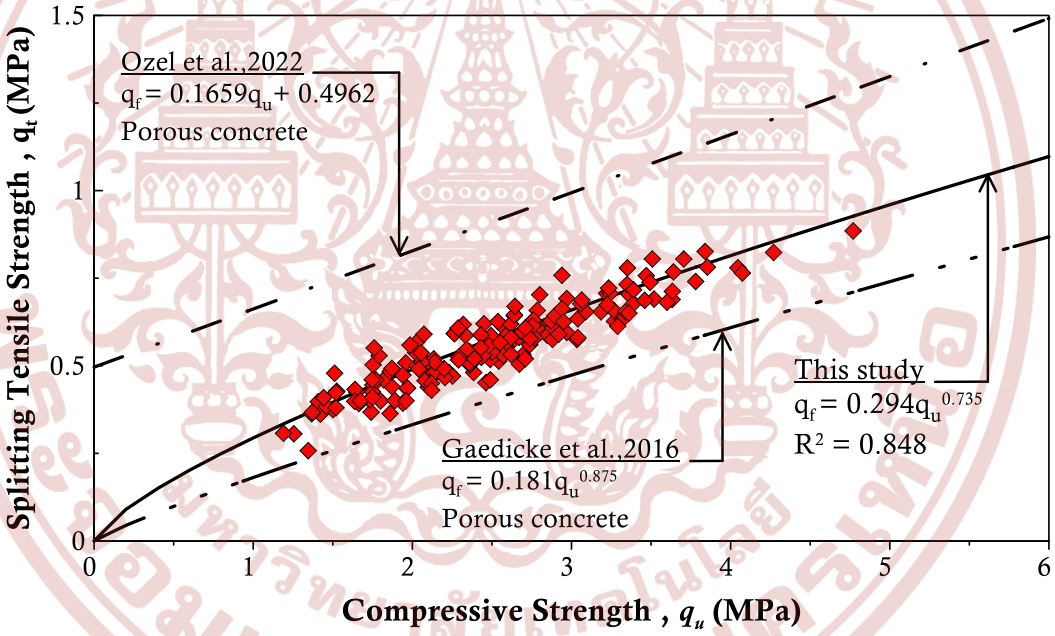
และในส่วนของเส้นใยขวดพลาสติก พบว่า ปริมาณเส้นใยขวดพลาสติกที่เพิ่มขึ้นจาก 0.5% เป็น 1% ส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยค่ากำลังรับแรงดึงจะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ปริมาณเส้นใยขวดพลาสติก 1.0% ตัวอย่างเช่น เสา MG-EA10-F1 ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงดึงที่ 0.82 MPa (เพิ่มขึ้น 17.14 %) และที่อายุการบ่ม 90 วัน มีค่ากำลังรับแรงดึงที่ 0.88 MPa (เพิ่มขึ้น 10 %) เมื่อเทียบกับเสาที่ไม่มีการใส่เส้นใยขวดพลาสติก (MG-EA10-F0)



ภาพที่ 4-6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกต่อปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่เพิ่มขึ้น ที่ปริมาณเส้นใยขวดพลาสติก 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0% ตามลำดับ และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 และ 90 วันตามลำดับ

ดังแสดงในภาพที่ 4-7 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด และค่ากำลังรับแรงดึง โดยเมื่อเปรียบเทียบจากงานวิจัยของ (Gaedicke, et al. 2016) ซึ่งเป็นคอนกรีตพรุน โดยใช้มวลรวมหยาบ 3 ชนิดผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และตะกรันเตาถลุงเหล็ก และมีการเติมสารผสมเพิ่มปรับความหนืดชนิด Type S พบว่าว่ามีค่ากำลังรับแรงดัดที่ต่ำกว่าการศึกษานี้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ งานวิจัยของ (Ozel, et al. 2022) ซึ่งเป็นคอนกรีตพรุน มีการใช้มวลรวมหยาบ 4 ชนิด โดยขนาดมวลรวมอยู่ในช่วง 5 – 19 mm ผสมกับปูนซีเมนต์ มีการใช้เส้นใยเหล็ก และเส้นใยโพลีโพรพิลีนในส่วนผสม พบว่าที่ช่วงกำลังรับแรงอัดเดียวกัน กำลังรับแรงดึงมีค่าที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับการศึกษานี้ โดยกำลังรับแรงดึงแปรผันโดยตรงกับกำลังรับแรงอัด ความสัมพันธ์นี้สามารถประเมินกำลังดัดของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ได้จากสมการที่ 4-4

$$q_t(MPA) = 0.294 q_u{}^{0.735}(MPa) \qquad R^2 = 0.848 \tag{4-4}$$



ภาพที่ 4-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

4.1.4 ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน (permeability coefficient : k)

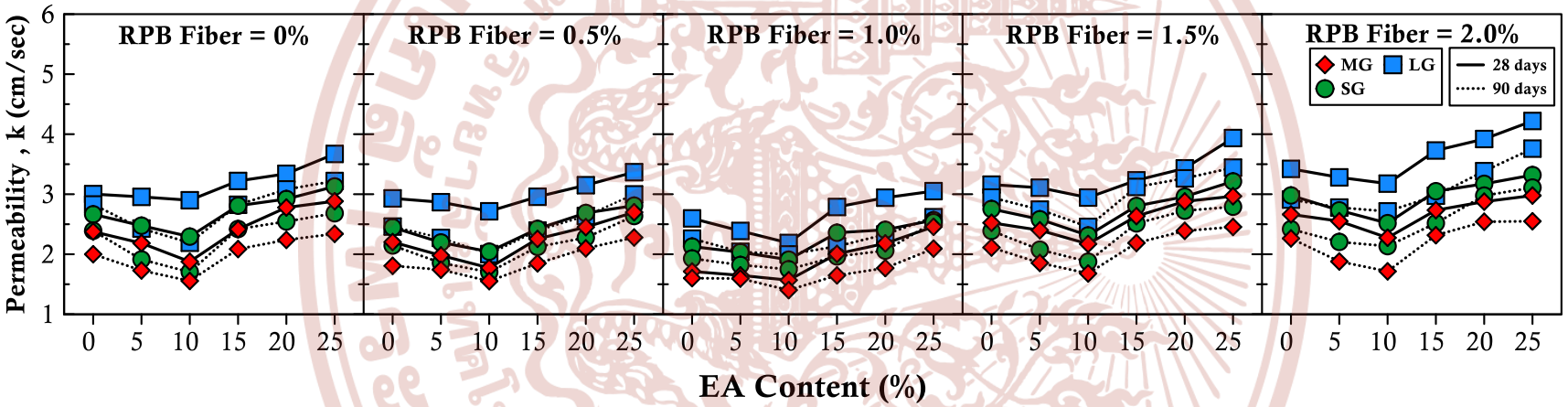
สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน (permeability coefficient, k) เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการประเมินความสามารถในการระบายน้ำของวัสดุคอนกรีตและวัสดุงานทาง จากการศึกษาพบว่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติกมีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างรูพรุนและระดับความต่อเนื่องของช่องว่างภายในวัสดุ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.40–4.22 cm/sec หรือประมาณ 2.82 cm/sec ดังแสดงในภาพที่ 4-8

เมื่อพิจารณาผลของขนาดมวลรวม พบว่าตัวอย่างเสา LG ให้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านสูงสุดในทุกปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสและทุกปริมาณเส้นใยขวดพลาสติก ที่ทุกช่วงอายุการบ่ม เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่และโครงสร้างรูพรุนที่เชื่อมต่อกันได้ดี ส่งผลให้การไหลของน้ำผ่านตัววัสดุเสาได้มาก ขณะที่ตัวอย่างเสา SG และ MG ให้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านต่ำกว่า โดยเฉพาะตัวอย่าง MG ซึ่งมีช่วงขนาดมวลรวมกว้างและมีการจัดเรียงตัวของอนุภาคที่แน่นกว่า ทำให้ช่องทางการไหลของน้ำถูกจำกัดมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ (Joshaghani, et al. 2015; Zhong and Wille, 2015; Zhang, et al, 2020) ที่ระบุว่าขนาดคละของมวลรวมเป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมพฤติกรรมการไหลซึมผ่านของคอนกรีตพรุน ตัวอย่างเช่น เสา MG-EA0-F0, SG-EA0-F0 และ LG-EA0-F0ที่อายุการบ่ม 28 วัน สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านมีค่า 2.38, 2.67 และ 3.00 cm/sec ตามลำดับ

ในส่วนของปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัส พบว่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสจาก 5% เป็น 10% โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่ 10% ให้สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของขี้เถ้ายูคาลิปตัสมีขนาดเล็กสามารถทำปฏิกิริยากับเนื้อปูนซีเมนต์ และแทรกตัวเพื่อเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้าง อีกทั้งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานิก และวัสดุเติมเต็ม ทำให้ช่องว่างรูพรุนภายในโครงสร้างลดลง ส่งผลให้ความต่อเนื่องของช่องทางการไหลของน้ำลดลงและเป็นผลทำให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่าลดลง (Arulrajah, et al. 2016; Yoobanpot, et al. 2020) ตัวอย่างเช่น เสา MG-EA10-F0, SG-EA10-F0 และ LG-EA10-F0 ที่อายุการบ่ม 28 วัน สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านมีค่า 1.88, 2.29 และ 2.90 cm/sec ตามลำดับ

เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 28 เป็น 90 วัน พบว่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการลดช่องว่างภายในเสาเพิ่มเติม ทำให้ช่องทางในการไหลผ่านของน้ำลดลง ตัวอย่างเช่น เสา MG-EA10-F0, SG-EA10-F0 และ LG-EA10-F0 ที่อายุการบ่ม 90 วัน สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านมีค่าลดลงเป็น 1.55, 1.70 และ 2.19 cm/sec ตามลำดับ

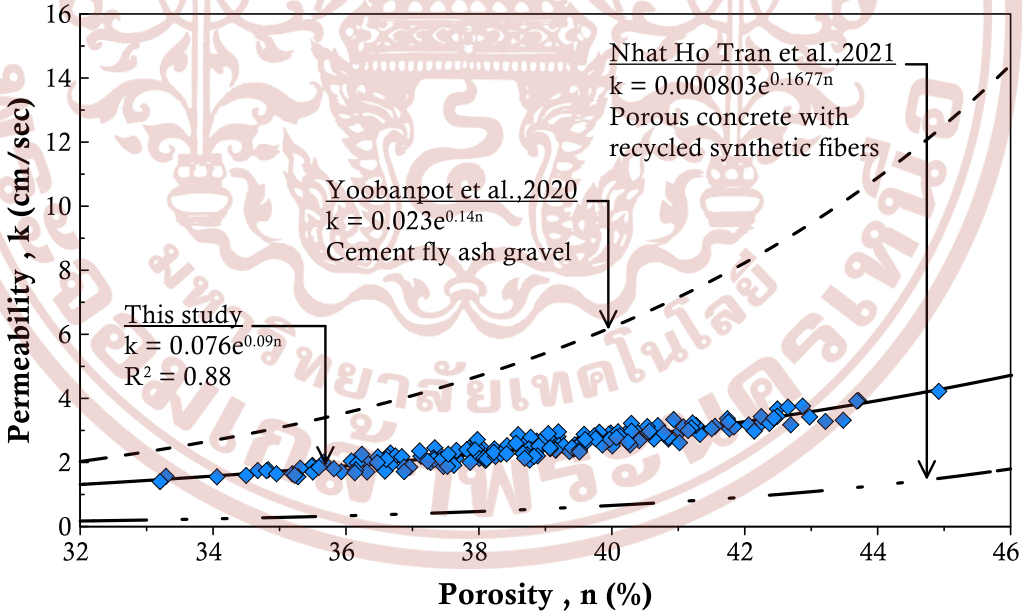
และในส่วนของเส้นใยขวดพลาสติก พบว่า สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยขวดพลาสติกเพิ่มขึ้นจาก 0.5% เป็น 1.0% เนื่องจากเส้นใยขวดพลาสติกช่วยลดช่องว่างรูพรุนภายในโครงสร้าง โดยค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านจะลดลงมากที่สุดที่ปริมาณเส้นใยขวดพลาสติก 1.0% ตัวอย่างเช่น เสา MG-EA10-F1 ที่อายุการบ่ม 28 วัน สัมประสิทธิ์การซึมผ่านอยู่ที่ 1.57 cm/sec (ลดลง 16.49 %) และที่อายุการบ่ม 90 วัน สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของเสาอยู่ที่ 1.40 cm/sec (ลดลง 9.68 %) เมื่อเทียบกับเสาที่ไม่ได้มีการแทนที่ด้วยเส้นใยขวดพลาสติก (MG-EA10-F0)



ภาพที่ 4-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่อปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่เพิ่มขึ้น ที่ปริมาณเส้นใยขวดพลาสติก 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0% ตามลำดับ และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 และ 90 วันตามลำดับ

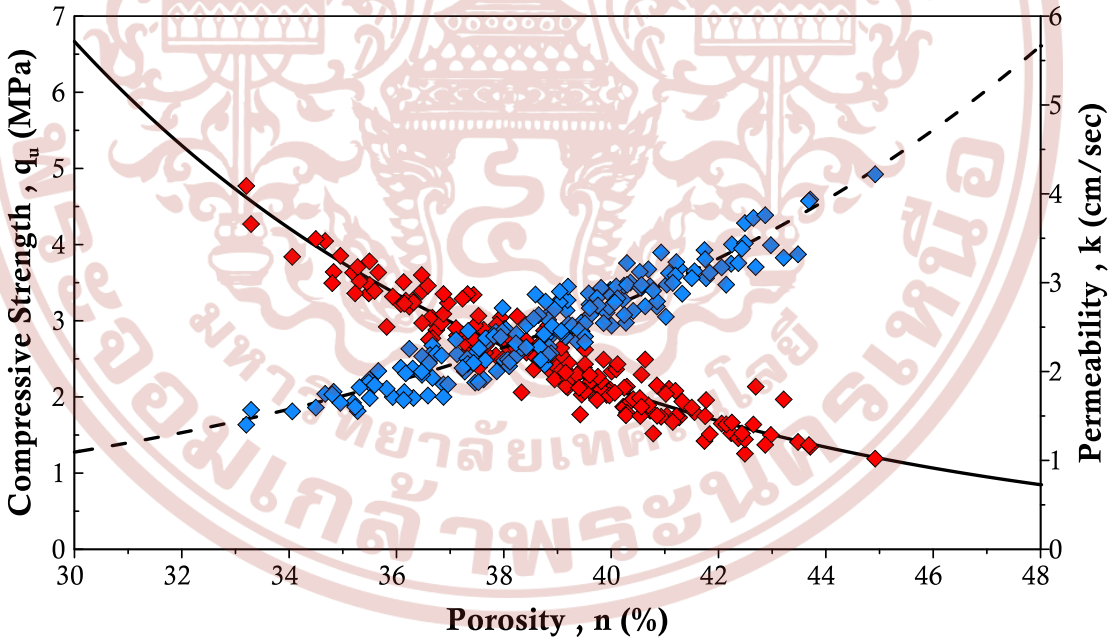
ดังแสดงในภาพที่ 4-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก โดยเมื่อวัสดุมีความพรุนเพิ่มมากขึ้น สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำก็จะเพิ่มขึ้นตาม จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพรุน และค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านสามารถแสดงได้อยู่ในรูปแบบระบบสมการเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งในการศึกษานี้สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ในรูปแบบระบบสมการเอกซ์โพเนนเชียลเช่นเดียวกัน ดังแสดงในสมการที่ 4-5 จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับงานวิจัยของ (Nhat Ho Tran, et al. 2021) ซึ่งเป็นคอนกรีตพรุนที่มีการผสมเส้นใยสังเคราะห์ที่ได้จากการรีไซเคิลถุงพลาสติก โดยใช้มวลรวมหยาบที่ขนาด 4.5 – 19 mm ซึ่งมีการใส่ซิลิกาฟูม และสารลดน้ำในตัวอย่างทดสอบ พบว่าที่ระดับความพรุนเดียวกัน มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการศึกษานี้ และได้เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ (Yoobanpot, et al. 2020) ที่เป็นเสาเข็มกรวดซีเมนต์เถ้าลอย โดยใช้ขนาดของมวลรวมหลักตั้งแต่ 4.75 – 19.5 mm มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน และใช้เถ้าลอยที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานิก โดยภาพรวมสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านมีค่าที่สูงกว่าการศึกษานี้ ที่ทุกระดับความพรุน

$$k(cm/sec) = 0.076exp^{0.09n(\%)} \qquad R^2 = 0.88 \tag{4-5}$$



ภาพที่ 4-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนต่อกำลังรับแรงอัดและ สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน ต่างก็มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน โดยที่กำลังรับแรงอัดจะแปรผกผันกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน โดยมีความพรุนเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของทั้ง 2 ค่า ในการศึกษานี้พบว่า เมื่อกำลังรับแรงอัดมีค่าที่สูง ค่าความพรุนจะต่ำ แต่เมื่อกำลังรับแรงอัดมีค่าที่ต่ำ ค่าความพรุนจะสูง เนื่องมาจากผลของขนาดมวลรวม ขี้เถ้ายูคาลิปตัส และเส้นใยขวดพลาสติก ส่งผลต่อช่องว่างความพรุนภายในโครงสร้าง แต่ในทางกลับกัน เมื่อความพรุนมีค่าสูง สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านจะมีค่าสูงตาม และเมื่อความพรุนมีค่าที่ต่ำ สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านจะมีค่าที่ต่ำเช่นเดียวกัน ซึ่งผลของความพรุน กำลังรับแรงอัด และค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่าน จากการศึกษานี้สามารถแสดงออกมาเป็นกราฟความสัมพันธ์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 4-10 เมื่อเปรียบเทียบแนวโน้มความสัมพันธ์ดังกล่าวกับผลการศึกษาของ (Yoobanpot, et al. 2020) พบว่าให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ กำลังรับแรงอัดแปรผกผันกับความพรุน ในขณะที่สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านแปรผันตรงกับความพรุน ซึ่งยืนยันความสอดคล้องเชิงกลไกของวัสดุที่ว่า ความพรุนเป็นตัวแปรควบคุมหลักที่ส่งผลต่อทั้งกำลังรับแรงและความสามารถในการระบายน้ำในทิศทางตรงข้ามกัน



ภาพที่ 4-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุน กำลังรับแรงอัด และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

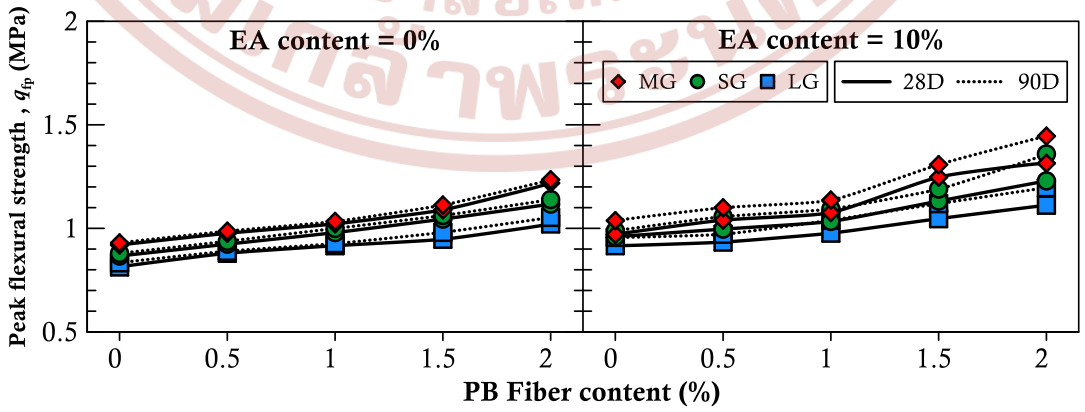
4.1.5 ผลการศึกษากำลังรับแรงดัด (Flexural strength : q_f)

จากผลการศึกษาของกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก ทำให้ทราบว่าที่ปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่ 10% ให้ค่ากำลังที่มากสุด ดังนั้นในการศึกษาค่ากำลังรับแรงดัดจึงได้ทำการทดสอบที่ปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัส 0% และ 10% สำหรับทุกช่วงขนาดมวลรวม และทุกปริมาณเส้นใย

สำหรับค่ากำลังดัดสูงสุด (Peak flexural strength : q_{fp}) ดังแสดงในภาพที่ 4-11 เมื่อพิจารณาจากทุกช่วงขนาดมวลรวม พบว่า ที่ตัวอย่าง MG ให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดมากที่สุด เมื่อเทียบกับตัวอย่าง SG และ LG โดยตัวอย่าง MG-EA0-F0, SG-EA0-F0 และ LG-EA0-F0 ที่อายุการบ่ม 28 ให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่ 0.92, 0.87 และ 0.81 MPa ตามลำดับ

ในส่วนของขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่เพิ่มขึ้นเป็น 10% ที่ทุกช่วงขนาดมวลรวม และทุกอายุการบ่ม พบว่า ส่งผลทำให้กำลังดัดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่าง MG-EA10-F0, SG-EA10-F0 และ LG-EA10-F0 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ค่ากำลังดัดสูงสุดมีค่าอยู่ที่ 0.97, 0.96 และ 0.92 MPa ตามลำดับ และสำหรับตัวอย่าง MG-EA10-F0, SG-EA10-F0 และ LG-EA10-F0 ที่อายุการบ่ม 90 วัน ค่ากำลังดัดสูงสุดมีค่าอยู่ที่ 1.04, 0.99 และ 0.96 MPa ตามลำดับ

และในส่วนของเส้นใยขวดพลาสติก พบว่า ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยขวดพลาสติกที่เพิ่มขึ้น โดยค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดจะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ปริมาณเส้นใย 2.0% ทั้งนี้เนื่องมาจากเส้นใยจะทำหน้าที่ในการรับกำลังต่อหลังจากเกิดการแตกร้าวครั้งแรก เป็นผลทำให้ตัวอย่างสามารถรับกำลังต่อไปได้ (Jamsawang, et al. 2018) ซึ่งเส้นใยจะมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ที่ปริมาณเส้นใยสูงจะมีค่ากำลังที่มากกว่าปริมาณเส้นใยต่ำ ตัวอย่างเช่น MG-EA10-F2 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดมีค่าอยู่ที่ 1.31 MPa (เพิ่มขึ้น 35.05 %) และที่อายุการบ่ม 90 วัน ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดมีค่าอยู่ที่ 1.45 MPa (เพิ่มขึ้น 39.42 %) เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการใส่เส้นใยขวดพลาสติก (MG-EA10-F0)



ภาพที่ 4-11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดสูงสุดต่อปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ที่ปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัส 0 และ 10% ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 และ 90 วันตามลำดับ

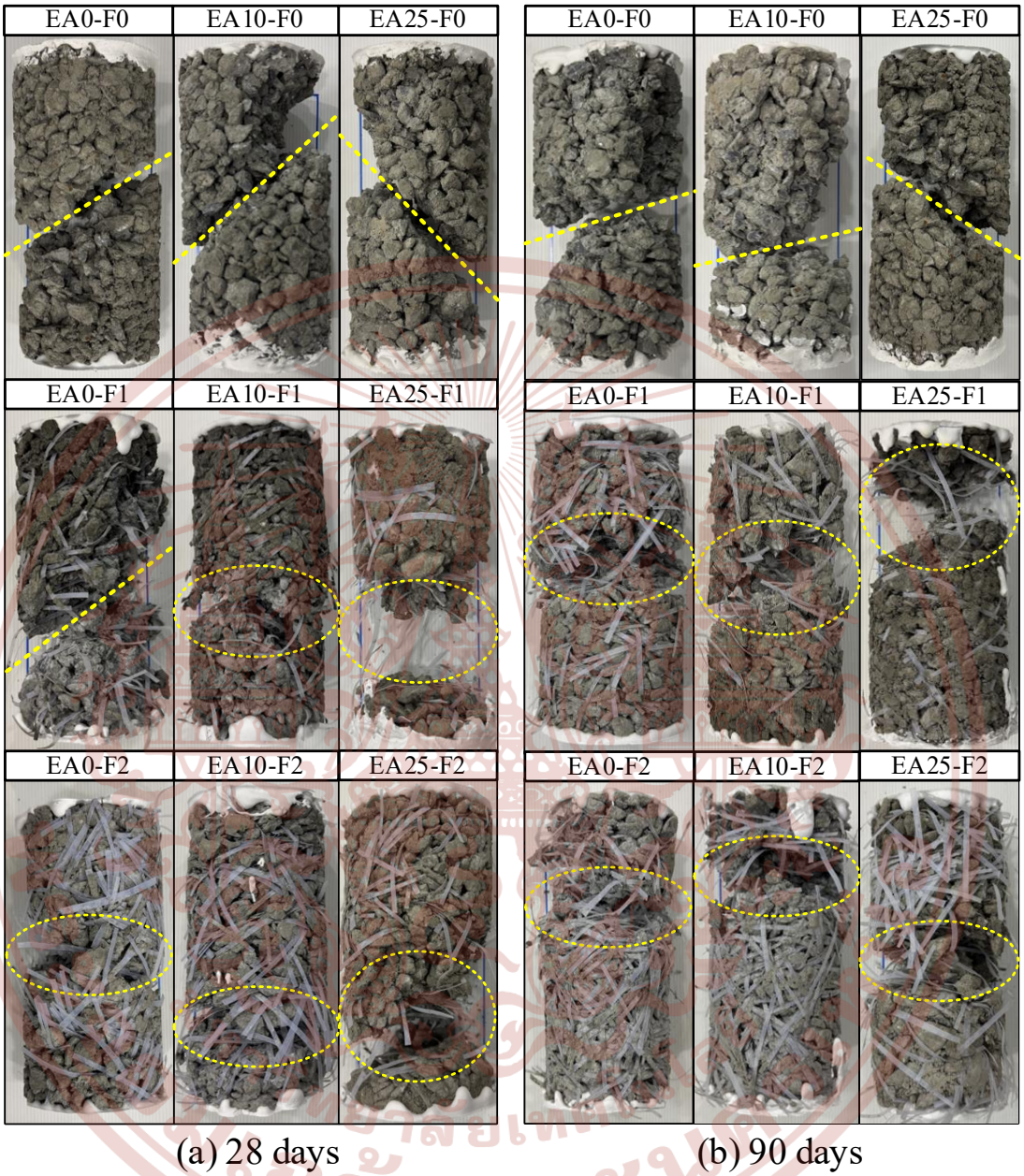
4.2 ลักษณะรูปแบบความเสียหายของตัวอย่างเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก

ภาพที่ 4-12 แสดงรูปแบบการวิบัติของตัวอย่างเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ภายหลังจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยพิจารณาที่ปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัส 0, 10 และ 25% (EA0, EA10 และ EA25) และที่ปริมาณเส้นใย 0, 1 และ 2% (F0, F1 และ F2) ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน

พบว่า ที่ตัวอย่างที่ไม่ได้มีการใส่เส้นใย (F0) เกิดการวิบัติแบบเฉือน (shear failure) อย่างชัดเจนในทุกสัดส่วนผสม โดยมีระนาบการวิบัติแบบเฉือนพาดผ่านตัวอย่างในแนวเฉียง ส่งผลทำให้ตัวอย่างแยกออกจากกันเป็นสองส่วนอย่างฉับพลันหลังจากรับกำลังแรงอัดสูงสุด

เมื่อมีการใส่เส้นใยในปริมาณ 1% (F1) พบว่ารูปแบบการวิบัติเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้มีการใส่เส้นใย (F0) โดยเป็นการวิบัติแบบเฉพาะบริเวณ (localized failure) ซึ่งเกิดจากเส้นใยที่กระจายตัวสม่ำเสมอในเนื้อซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นสะพานยึดเหนี่ยว (bridging effect) ต้านทานการขยายตัวของรอยแตกร้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวและการถ่ายแรงระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังช่วยช่วยในด้านการกระจายแรงเค้น ทำให้ตัวอย่างยังคงรูปทรงได้แม้ผ่านจุดรับแรงอัดสูงสุดไปแล้ว แสดงถึงพฤติกรรมการวิบัติแบบเหนียว (ductile failure) ที่ดี สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ปริมาณเส้นใย 1% (F1) ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด

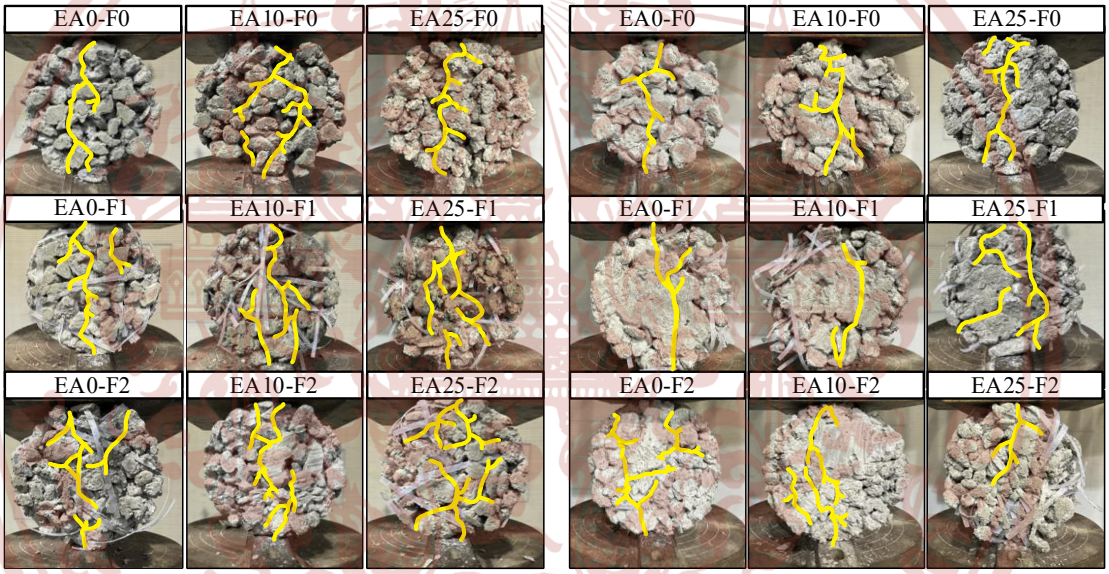
ในส่วนของปริมาณเส้นใย 2% (F2) พบว่า แสดงรูปแบบการวิบัติเฉพาะบริเวณคล้ายกับปริมาณเส้นใย 1% (F1) แต่เนื่องจากปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของเส้นใย (fiber clumping) ซึ่งส่งผลให้การกระจายตัวของเส้นใยในเนื้อซีเมนต์ไม่สม่ำเสมอ เกิดช่องว่างและจุดอ่อนแอ (weak point) บริเวณที่เส้นใยเกิดการรวมตัวกันหนาแน่น ทำให้ความหนาแน่นโดยรวมของตัวอย่างลดลง ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายแรงระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใยลดลง ส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ปริมาณเส้นใย 2% (F2) มีค่าลดลง แม้ว่าจะมีปริมาณเส้นใยที่มากกว่าก็ตาม



ภาพที่ 4-12 ความเสียหายจากกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก (a) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (b) ที่อายุการบ่ม 90 วัน

ภาพที่ 4-13 แสดงรูปแบบการวิบัติของตัวอย่างเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ภายหลังจากการทดสอบกำลังรับแรงดึง โดยพิจารณาที่ปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัส 0, 10 และ 25% (EA0, EA10 และ EA25) และที่ปริมาณเส้นใย 0, 1 และ 2% (F0, F1 และ F2) ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน

โดยลักษณะรูปแบบการวิบัติโดยส่วนใหญ่นั้น จะเกิดรอยร้าวบริเวณด้านบนกึ่งกลางของตัวอย่างเสมอ เนื่องจากเป็นจุดที่รับแรงมากที่สุด จากนั้นรอยร้าวจะมีลักษณะแปรปรวน โดยลักษณะรอยร้าวการวิบัติจะไปตามบริเวณที่มีความอ่อนแอมากที่สุด ซึ่งเป็นส่วนที่มีช่องว่างมากที่สุดภายในของตัวอย่าง ซึ่งเป็นลักษณะคล้ายกับกำลังรับแรงอัด



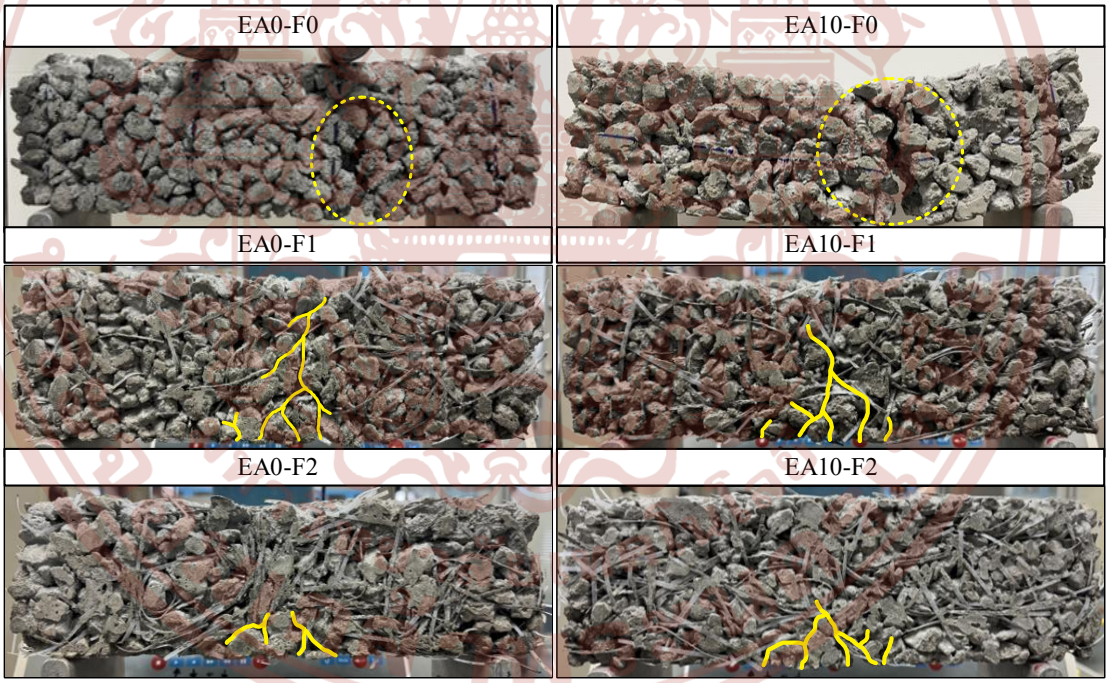
ภาพที่ 4-13 ความเสียหายจากกำลังรับแรงดึงของตัวอย่างเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก (a) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (b) ที่อายุการบ่ม 90 วัน

ภาพที่ 4-14 แสดงรูปแบบการวิบัติของตัวอย่างเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ภายหลังจากการทดสอบกำลังรับแรงดึง โดยพิจารณาที่ปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัส 0, 10 และ 25% (EA0, EA10 และ EA25) และที่ปริมาณเส้นใย 0, 1 และ 2% (F0, F1 และ F2) ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน

จากตัวอย่างที่ไม่ได้มีการใส่เส้นใย (EA0-F0 และ EA10-F0) เกิดการวิบัติแบบเปราะ (brittle failure) บริเวณนอกกึ่งกลางช่วงคาน ที่อายุการบ่ม 28 และบริเวณกึ่งกลางช่วงคาน (mid-span) ที่อายุการบ่ม 90 วัน และตัวอย่างสูญเสียความสามารถในการรับแรงทันทีภายหลังจุดวิบัติ

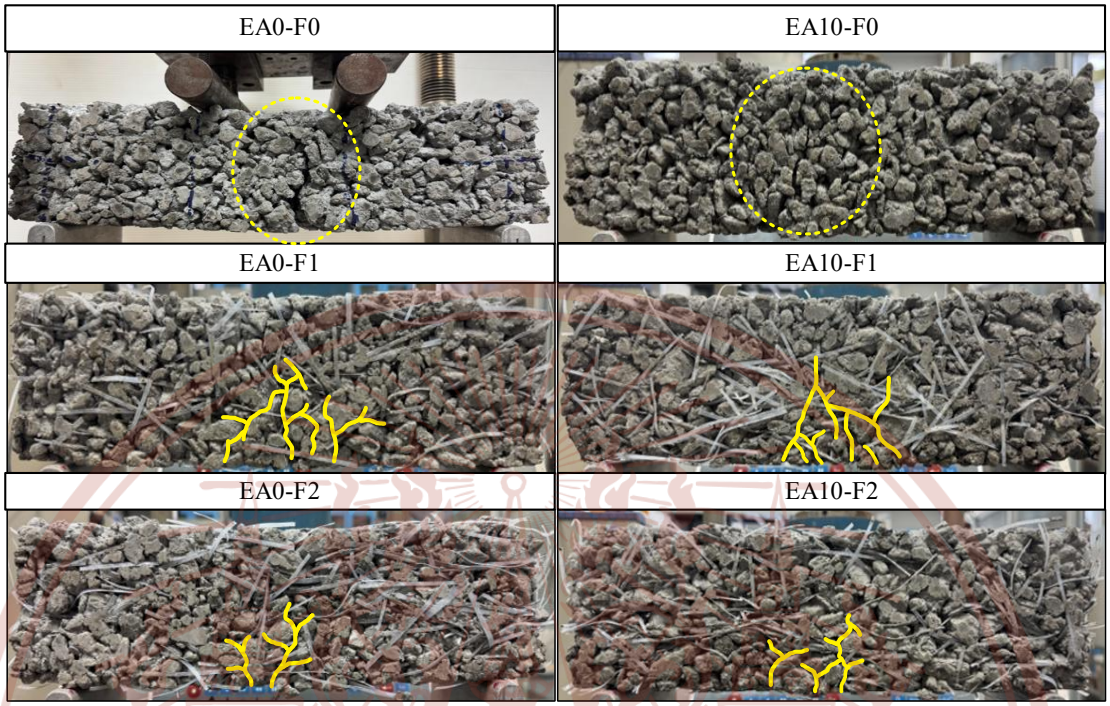
สำหรับตัวอย่างที่มีการใส่เส้นใยจากขวดพลาสติกที่ 1% และ 2% (F1- F2) แสดงถึงรูปแบบการวิบัติที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน โดยพบรอยแตกร้าวลักษณะแตกกิ่งก้าน (crack branching) แผ่กระจายจากจุดกึ่งกลางออกไปหลายทิศทาง แสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อวัสดุทำหน้าที่เป็นสะพานยึดเหนี่ยว (bridging effect) ต้านทานการขยายตัวของรอยแตกหลัก ส่งผลให้ตัวอย่างยังคงสภาพเป็นชิ้นเดียวได้แม้ผ่านจุดรับแรงดัดสูงสุดไปแล้ว

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างปริมาณเส้นใยจากขวดพลาสติกที่ 1% และ 2% พบว่าที่ปริมาณเส้นใย 2% รอยแตกร้าวที่เกิดจากการวิบัติจะมีขนาดที่เล็กกว่า ที่ปริมาณเส้นใย 1% ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมการรับแรงดัดของตัวอย่างขึ้นอยู่กับความสามารถของเส้นใยในการต้านทานแรงดึงบริเวณผิวล่างของคาน (tensile zone) เป็นหลัก การมีปริมาณเส้นใยที่มากขึ้นจึงช่วยเพิ่มจำนวนจุดยึดเหนี่ยวที่ต้านทานการขยายตัวของรอยแตกร้าวได้มากกว่า และส่งผลให้ที่ปริมาณเส้นใยสูงจะช่วยให้สามารถรับกำลังต่อหลังจากเกิดรอยแตกร้าว เนื่องจากการวิบัติ ได้มากกว่าที่ปริมาณเส้นใยต่ำ



(a) 28 days

ภาพที่ 4-14 ความเสียหายจากกำลังรับแรงดัดของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก (a) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (b) ที่อายุการบ่ม 90 วัน



(b) 90 days

ภาพที่ 4-14 (ต่อ)

4.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก

การศึกษาในส่วนนี้ประกอบด้วยการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการทดสอบ X-ray Diffraction (XRD) ของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก โดยจากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่า ส่วนผสม MG-EA10-F1 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เมื่อเทียบกับ MG-EA0-F1 ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพเพียงอย่างเดียว และ MG-EA25-F1 ซึ่งให้ค่ากำลังต่ำที่สุด ดังนั้น การศึกษานี้จึงเลือกทั้งสามส่วนผสมดังกล่าวในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาค ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน

4.3.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยการทดสอบ Scanning electron microscope (SEM)

ในส่วนของการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก จะทำการทดสอบด้วยวิธี (SEM) ที่ปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัส 0, 10 และ 25% (EA0, EA10 และ EA25) ที่อายุการบ่ม 28 วัน และ 90 วัน โดยพิจารณาบริเวณรอยต่อระหว่างเส้นใย

กับเนื้อซีเมนต์ ที่กำลังขยาย 100 เท่า และโครงสร้างจุลภาคภายในเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4-15

จากภาพที่ 4-15(a) ที่ตัวอย่าง EA0 แสดงให้เห็นการแยกตัวของรอยต่อระหว่างพันธะ (separation of bonded interface) อย่างชัดเจนระหว่างผิวเส้นใยกับเนื้อซีเมนต์เมทริกซ์ ซึ่งแสดงถึงการยึดเกาะที่ยังไม่สมบูรณ์ในช่วงต้นของการบ่ม เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายสูง พบผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันหลัก ได้แก่ Calcium Silicate Hydrate (CSH) กระจายตัวเป็นกลุ่มก้อน Ettringite ในลักษณะเข็มเล็ก ๆ Calcium Hydroxide ($Ca(OH)_2$) รูปแผ่นผลึกซ้อนกัน และช่องว่าง (void) กระจายอยู่ทั่วไป

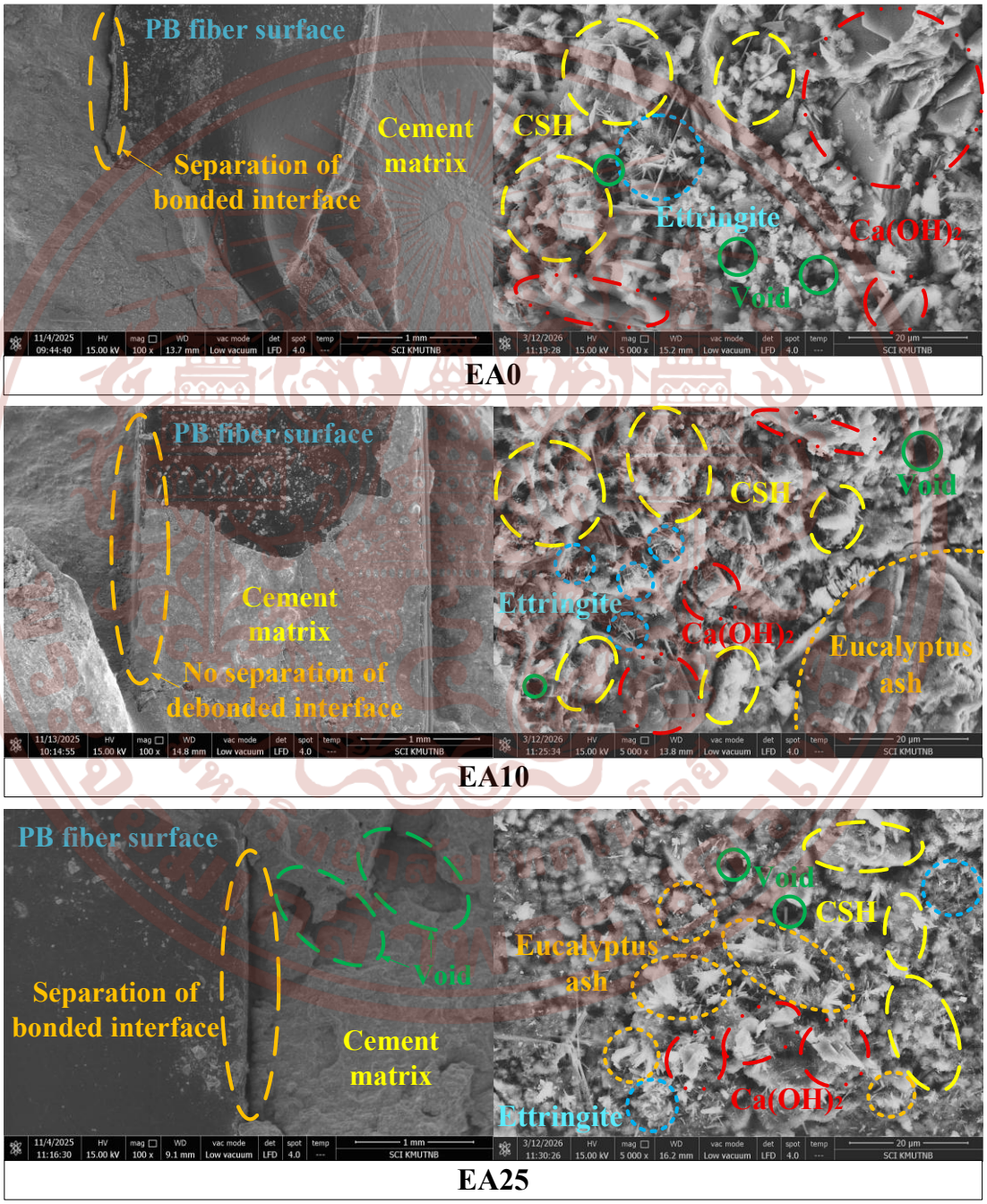
ที่ตัวอย่าง EA10 พบว่า ไม่มีการแยกตัวกันของรอยต่อ (no separation of debonded interface) ระหว่างเส้นใยกับเนื้อซีเมนต์เมทริกซ์ แสดงถึงการยึดเกาะที่ดีขึ้นตั้งแต่อายุ 28 วัน ในโครงสร้างจุลภาคพบอนุภาคขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่ยังหลงเหลืออยู่แทรกตัวร่วมกับ CSH, Ettringite และ $Ca(OH)_2$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคเถ้าบางส่วนได้เริ่มทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ $Ca(OH)_2$ ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ก่อให้เกิด CSH เพิ่มเติม ซึ่งช่วยเติมเต็มโครงสร้างและส่งเสริมการยึดเกาะบริเวณรอยต่อ ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับ (Chen, et al. 2024) ที่ระบุว่าการใช้วัสดุละเอียดช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมซีเมนต์ได้

ที่ตัวอย่าง EA25 ที่มีปริมาณการแทนที่ขี้เถ้ายูคาลิปตัสสูงสุด แสดงให้เห็นถึงการแยกตัวของรอยต่อระหว่างเส้นใยกับเนื้อซีเมนต์เมทริกซ์ และยังพบช่องว่างบริเวณใกล้กับรอยต่อ เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคพบว่าปริมาณอนุภาคขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาหลงเหลืออยู่เป็นจำนวนมาก แทรกปนกับ CSH, Ettringite, $Ca(OH)_2$ และช่องว่าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณเถ้าที่มากเกินไปทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกยังไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้โครงสร้างมีความพรุนสูงและการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเนื้อซีเมนต์ลดลง

เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 90 วัน ที่ตัวอย่าง EA0 พบว่า ยังคงแสดงถึงการแยกตัวของรอยต่อระหว่างเส้นใยกับเนื้อซีเมนต์ ในส่วนของโครงสร้างจุลภาคภายในเนื้อซีเมนต์นั้นมีความหนาแน่นของ CSH เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับที่อายุ 28 วัน ร่วมกับ $Ca(OH)_2$ และช่องว่างที่ลดลง ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่ดำเนินต่อเนื่องตามอายุการบ่ม

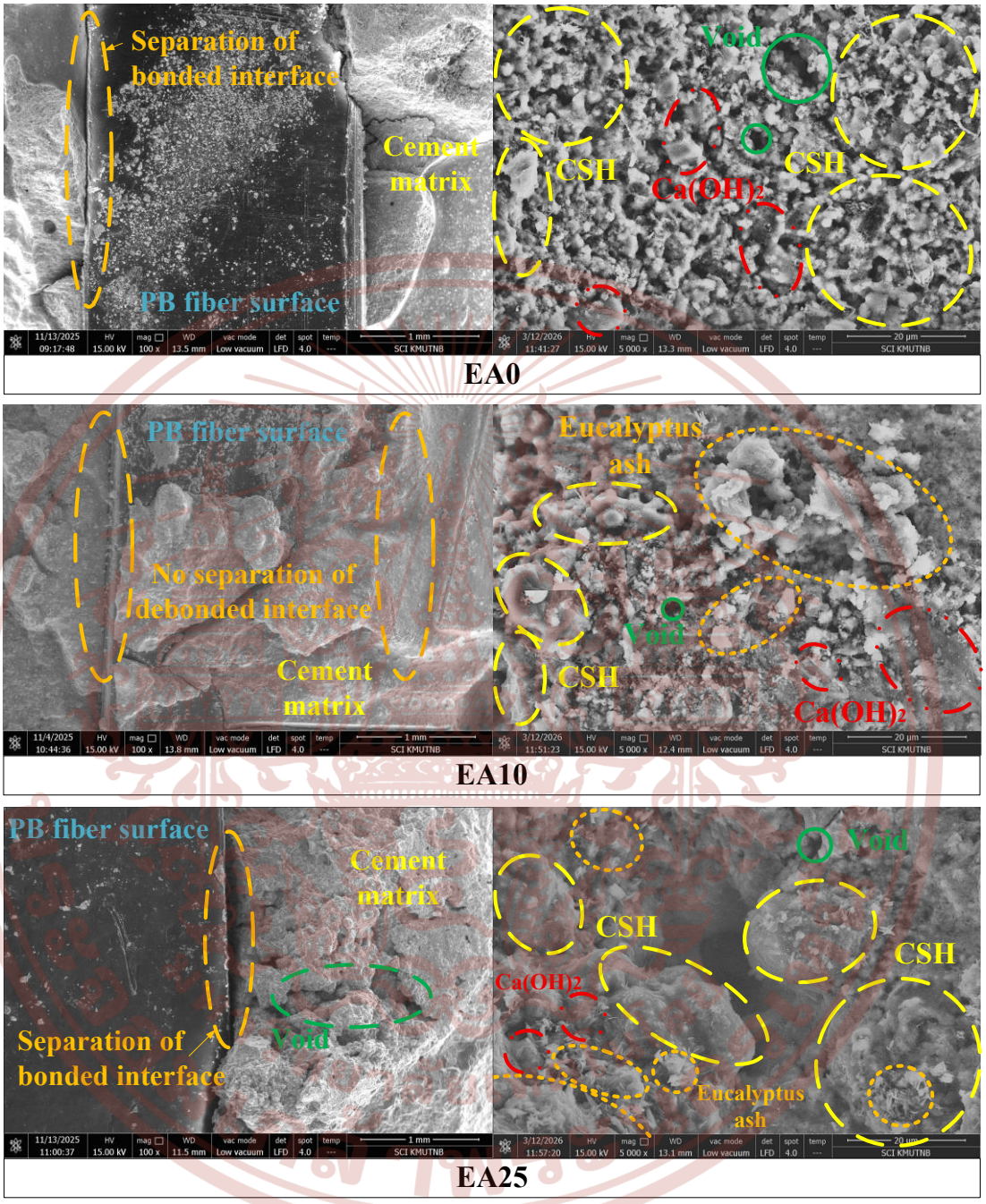
ที่ตัวอย่าง EA10 พบว่า ไม่มีการแยกตัวกันของรอยต่อเช่นเดียวกันกับที่อายุการบ่ม 28 วัน แสดงถึงเสถียรภาพการยึดเกาะในระยะยาว โครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นถึงอนุภาคขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่ถูกล้อมรอบด้วย CSH หนาแน่นมากขึ้น ในส่วน $Ca(OH)_2$ มีปริมาณลดลงและช่องว่างมีขนาดเล็กลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างขี้เถ้ายูคาลิปตัสกับ $Ca(OH)_2$ ดำเนินไปอย่างต่อเนื่องตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างมีความหนาแน่นมากขึ้น

ที่ตัวอย่าง EA25 พบว่า ยังคงปรากฏการแยกตัวของรอยต่อระหว่างพันธะร่วมกับช่องว่างอยู่ในส่วนของโครงสร้างจุลภาค พบว่า ปริมาณ CSH ในโครงสร้างเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่อนุภาคขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่ยังไม่ทำปฏิกิริยามีปริมาณที่ลดลง แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกในตัวอย่างที่มีปริมาณเถ้าสูงต้องใช้ระยะเวลานานกว่าจึงจะสามารถดำเนินไปอย่างสมบูรณ์



(a) 28 days

ภาพที่ 4-15 ภาพถ่าย SEM ของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก (a) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (b) ที่อายุการบ่ม 90 วัน



(b) 90 days

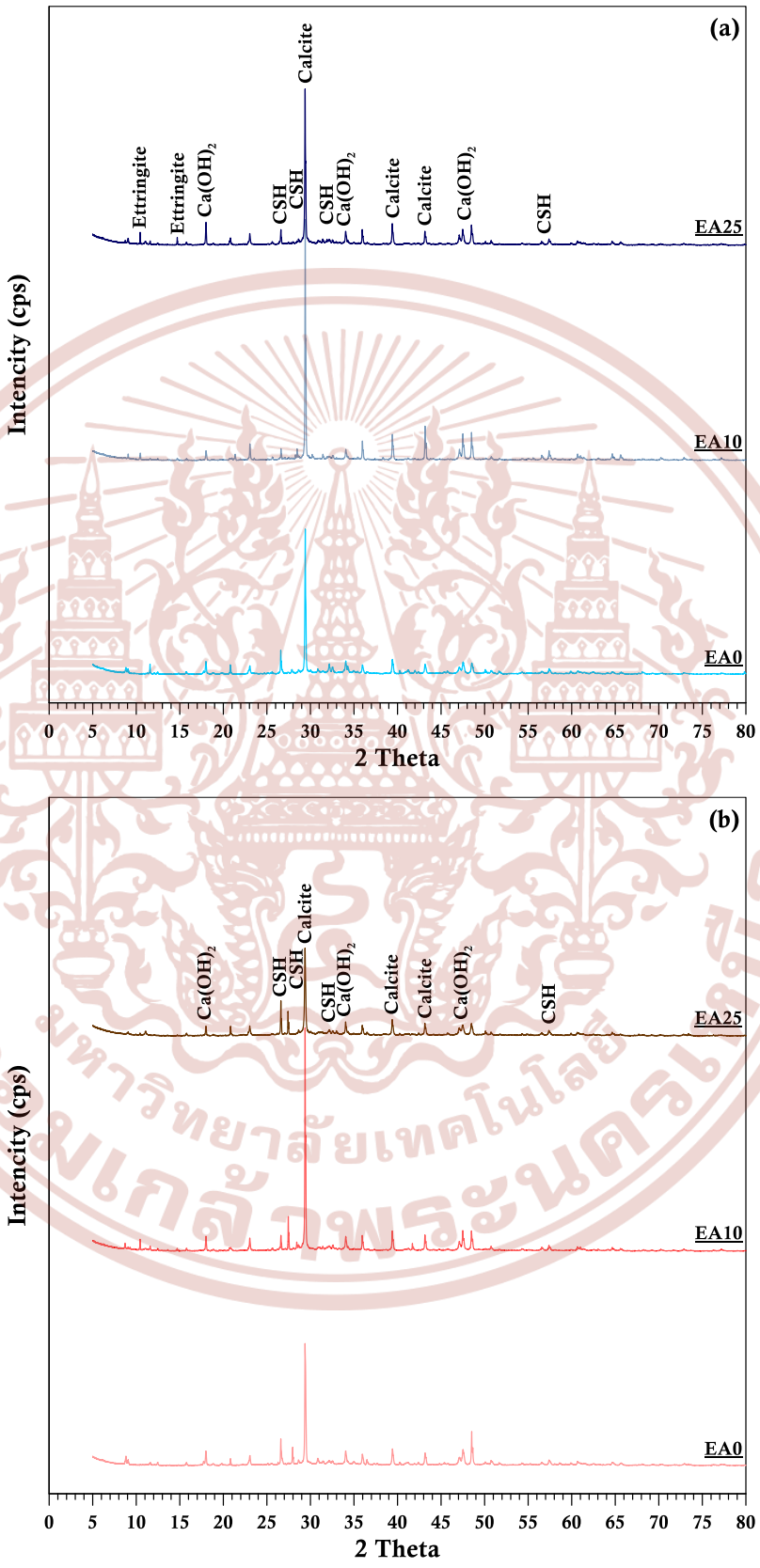
ภาพที่ 4-15 (ต่อ)

4.3.2 การวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ด้วยการทดสอบ X-ray diffraction (XRD)

การวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ดำเนินการโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) โดยตรวจวัดในช่วงมุม 2 เซต้า ระหว่าง 2-80 องศา สำหรับตัวอย่างที่มีสัดส่วนเถ้ายูคาลิปตัส 0, 10 และ 25% (EA0, EA10 และ EA25) ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 4-16 เพื่อเปรียบเทียบชนิดและปริมาณของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณเถ้ายูคาลิปตัสและระยะเวลาการบ่ม

ภาพที่ 4-16(a) แสดงถึงผลการวิเคราะห์ที่ 28 วัน พบพีคหลักของ Ettringite ปรากฏชัดเจนในช่วง ประมาณ 9-11 องศา แสดงให้เห็นว่าในระยะแรกของปฏิกิริยาเกิดการก่อตัวของ Ettringite มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบด้วย (SEM) ที่พบโครงสร้างผลึกรูปเข็มของ Ettringite ในตัวอย่างระยะบ่มช่วงต้น พีคที่มีความเข้มสูงสุดของทุกตัวอย่างปรากฏที่ตำแหน่งมุม 29-30 องศา ซึ่งเป็นพีคหลักของ Calcite ($CaCO_3$) โดยตัวอย่าง EA10 แสดงความเข้มของพีค Calcite ที่คมชัดและสูงที่สุดเมื่อเทียบกับ EA0 และ EA25 ในขณะที่ EA0 มีเส้นฐาน (baseline) ที่ค่อนข้างกว้างและพีคไม่คมชัดเท่าตัวอย่างที่ผสมเถ้า สะท้อนถึงความเป็นผลึก (crystallinity) ของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ยังตรวจพบพีคของ CSH (Calcium Silicate Hydrate) กระจายตัวอยู่หลายตำแหน่งร่วมกับพีคของ Ca(OH)2 ที่ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ภาพที่ 4-16(b) แสดงถึงผลการวิเคราะห์ที่ 90 วัน พบว่าพีคของ Ettringite ที่เคยปรากฏชัดในช่วงอายุ 28 วัน ลดความเข้มลงจนแทบไม่ปรากฏในทุกตัวอย่าง แสดงถึง Ettringite ที่เกิดขึ้นในช่วงต้นได้เปลี่ยนรูปหรือถูกใช้ไปในปฏิกิริยาต่อเนื่องแล้ว และพบว่าปริมาณ Ca(OH)2 มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับที่อายุ 28 วัน ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานิคในเถ้ายูคาลิปตัสกับ Ca(OH)2 ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ Ca(OH)2 ถูกใช้ไปเพื่อสร้าง CSH เพิ่มเติม ส่งผลให้พีค CSH ที่ตัวอย่างอายุ 90 วัน มีความเข้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับระยะ 28 วัน ในส่วนของพีค Calcite พบว่ายังคงเป็นพีคเด่นที่สุดในทุกตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่า Calcite ซึ่งเป็นองค์ประกอบผลึกหลักที่พบได้มากที่สุดในเถ้าไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการบด ทำหน้าที่เป็นสารเติมเต็มเชิงกล (filler effect) ที่ค่อนข้างเสถียรตลอดช่วงอายุการบ่ม ยังสามารถช่วยเข้าไปเติมเต็มช่องว่างขนาดเล็กระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ (Microstructure refinement) ช่วยลดรูพรุน ส่งผลให้โครงสร้างมวลรวมของมอร์ตาหรือคอนกรีตมีความหนาแน่นและแข็งแรงยิ่งขึ้น รวมไปถึงช่วยเร่งการตกผลึกของสารประกอบไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ ทำให้โครงสร้างแข็งตัวได้สมบูรณ์ขึ้น (Couto, et al. 2024)



ภาพที่ 4-16 ผลการวิเคราะห์การทดสอบ (XRD) (a) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (b) ที่อายุการบ่ม 90 วัน

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษา คุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ที่ได้มีการนำรูปแบบเสาแบบยืดหยุ่น (เสาหิน) ร่วมกับเสาแบบแข็ง (เสาคอนกรีตไวโบร) และมีการนำวัสดุประเภทเถ้าชีวมวล และขยะขวดพลาสติก มาใช้เป็นวัสดุในการผสม ซึ่งผลทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติในด้านกำลังการรับแรง ซึ่งเป็นหน้าที่หลักของเสาสำหรับรองรับน้ำหนักบรรทุกจากคันดินหรือองค์อาคารขนาดเล็ก และแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติความสามารถในการระบายน้ำซึ่งเป็นผลมาจากความพรุนภายในของคอนกรีต ทำให้สามารถระบายน้ำได้ในกรณีมีปัญหาเรื่องน้ำใต้ดิน โดยขนาดของมวลรวมหยาบ ปริมาณขี้เถ้ายูคาลิปตัส และเส้นใยขวดพลาสติก ล้วนมีผลต่อคุณสมบัติทั้งสองด้านของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ขนาดของมวลรวมหยาบ ในด้านความสามารถกำลังรับแรง มวลรวมแบบผสม MG (LG 50 : SG 50) นั้น ให้กำลังรับแรงดีที่สุด เป็นผลมาจากคละขนาดที่ดีทำให้อนุภาคภายในเรียงตัวแน่นกว่า ส่วนมวลรวมขนาดเดียว (LG) ให้ความพรุนและสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านที่ดีกว่า อันเนื่องมาจากขนาดที่ใหญ่ของมวลรวม ทำให้มีช่องว่างมากกว่าชนิดอื่น จึงส่งผลให้มีความสามารถในด้านการไหลซึมผ่านและความพรุนที่ดี

5.1.2 ขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ายูคาลิปตัสที่ 10% ให้ผลดีที่สุดในด้านกำลังรับแรงที่ทุกขนาดมวลรวม ที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน ในด้านความพรุนและสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านมีค่าต่ำที่สุด

5.1.3 เส้นใยจากขวดพลาสติกที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ พบว่าที่ปริมาณเส้นใย 1.0% ให้กำลังรับแรงอัดและแรงดึงดีที่สุด ส่วน 2.0% ให้กำลังรับแรงดัดดีที่สุด ในขณะที่ 1.0% ให้ค่าความพรุนและสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านต่ำที่สุด

5.1.4 ในด้านความสัมพันธ์ กำลังรับแรงกับความพรุน จะแปรผกผันกัน ยิ่งความพรุนมากกำลังรับแรงจะยิ่งต่ำ แต่ในทางกลับกัน สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านกับความพรุน จะแปรผันตรงกัน ยิ่งความพรุนมาก ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านจะยิ่งสูง

5.1.5 ลักษณะการวิบัติ ในด้านกำลังรับแรงอัดการวิบัติเป็นลักษณะแบบเฉือนในตัวอย่างที่ไม่ได้มีการใส่เส้นใย และเป็นการวิบัติแบบเฉพาะบริเวณสำหรับตัวอย่างที่มีเส้นใย โดยความเสียหาย

เกิดขึ้นที่ซีเมนต์เพสต์บริเวณจุดอ่อนแอที่สุด ส่วนความเสียหายของกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงดัดจะเกิดการแตกร้าวบริเวณศูนย์กลางของตัวอย่างที่ทดสอบ

5.1.6 การเลือกใช้สัดส่วนที่เหมาะของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ในด้านของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขี้เถ้ายูคาลิปตัส เพื่อความประหยัดและความสามารถสูงสุดควรเลือกใช้ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของการเลือกใช้ปริมาณเส้นใย ควรเลือกใช้ที่ปริมาณเส้นใย 1.0 เปอร์เซ็นต์ และในส่วนของการเลือกใช้ขนาดมวลรวมหยาบ หากต้องการความสามารถในด้านกำลังที่สูงควรเลือกใช้มวลรวมชนิด MG ซึ่งมีอัตราส่วนคละที่ดีส่งผลในด้านกำลังที่สูงกว่า แต่หากต้องการความสามารถในด้านการระบายน้ำควรใช้มวลรวมหยาบแบบขนาดเดียว ซึ่งจะส่งผลดีในด้านการไหลซึมผ่านมากกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการผสมเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ต้องผสม 1 เสา ต่อ 1 ครั้งการผสม เพื่อให้สามารถควบคุมปริมาณของวัสดุ และความพรุนได้ถูกต้อง ซึ่งถ้าผสมหลาย ๆ ตัวอย่างพร้อมกัน จะไม่สามารถควบคุมปริมาณวัสดุ และความพรุนได้เลย

5.2.2 การต่อยอดการศึกษาผลของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ในห้องปฏิบัติการเพิ่มเติม โดยการทดสอบกับดินจริงทั้งเสาเข็มแบบเดี่ยว และแบบกลุ่ม เพื่อทราบพฤติกรรมต่าง ๆ เพิ่มเติม ก่อนนำไปใช้ในภาคสนาม เพื่อให้ได้ผลที่สมบูรณ์ สามารถนำไปทดสอบจริงในภาคสนามกับเสาเข็มจริง เพื่อตรวจสอบความสามารถในการทำงานและยืนยันผลการทำงานของเสาเข็มว่าคุณสมบัติที่ศึกษามามีประโยชน์และสามารถใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินในด้านกำลังและการระบายน้ำได้

5.2.3 การต่อยอดการศึกษาผลของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก ในห้องห้องปฏิบัติการเพิ่มเติมนั้น ควรทดสอบที่อัตราส่วนส่วนผสมต่าง ๆ เพิ่มเติม อาทิเช่น อัตราส่วนปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ปริมาณต่าง ๆ หรือเปลี่ยนชนิดของวัสดุประสานที่ใช้ในการวิจัย เพื่อให้ได้ผลการวิจัยที่หลากหลาย และสามารถนำผลที่ได้ไปใช้ในงานทางวิศวกรรมที่หลากหลายมากขึ้น

บรรณานุกรม

ภาษาอังกฤษ

Adresi, M., Yamani, A., Tabarestani, M. K., & Rooholamini, H. (2023). A comprehensive review on pervious concrete. Construction and Building Materials, 407, Article 133308. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133308

Alam, A., & Haselbach, L. (2014). Estimating the modulus of elasticity of pervious concrete based on porosity. Advances in Civil Engineering Materials, 3(1), 256-269. https://doi.org/10.1520/ACEM20130094

American Concrete Institute (ACI) Committee 522. (2010). Report on pervious concrete (ACI 522R-10). American Concrete Institute.

Arulrajah, A., Mohammadinia, A., Horpibulsuk, S., & Samingthong, W. (2016). Influence of class F fly ash and curing temperature on strength development of fly ash-recycled concrete aggregate blends. Construction and Building Materials, 127, 743-750. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.046

ASTM International. (2016). ASTM C496/C496M-17: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International.

ASTM International. (2017a). ASTM C29/C29M-17a: Standard test method for bulk density (“unit weight”) and voids in aggregate. ASTM International.

ASTM International. (2017b). ASTM C127-15: Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate. ASTM International.

ASTM International. (2017c). ASTM C131/C131M-14: Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. ASTM International.

ASTM International. (2017d). ASTM C617/C617M-15: Standard practice for capping cylindrical concrete specimens. ASTM International.

ASTM International. (2017e). ASTM C1754/C1754M-12: Standard test method for density and void content of hardened pervious concrete. ASTM International.

ASTM International. (2017f). ASTM D5084-16a: Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter. ASTM International.

ASTM International. (2018a). ASTM C39/C39M-18: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International.

ASTM International. (2018b). ASTM C78/C78M-18: Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading). ASTM International.

Bhutta, M. A. R., Nor Hasanah, Nur Farhayu, Hussin, M. W., Tahir, M. M., & Mirza, J. (2013). Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). Construction and Building Materials, 47, 1243-1248. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.020

Bhutta, M. A. R., Tsuruta, K., & Mirza, J. (2012). Evaluation of high-performance porous concrete properties. Construction and Building Materials, 31, 67-73. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.096

Chen, S., Wang, Y., Dai, W., Yang, H., Wang, D., & Lv, Y. (2024). Recycled aggregate porous concrete: Pore structure, clogging properties and models. Construction and Building Materials, 417, Article 135344. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135344

Chindaprasirt, P., Hatanaka, S., Chareerat, T., Mishima, N., & Yuasa, Y. (2008). Cement paste characteristics and porous concrete properties. Construction and Building Materials, 22(5), 894-901. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.011

Do Couto, Á. F., Sandoval, G. F. B., Schwantes-Cezario, N., Christoni, A. R. F., Cruz, R. J. P., Da Silva, P. R. C., & Morales, G. (2024). Physicochemical evaluation of Eucalyptus Wood Ash as a mineral admixture in Portland cement matrices: A preliminary study. Case Studies in Construction Materials, 21, Article e03860. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03860

Gaedicke, C., Torres, A., Huynh, K. C. T., & Marines, A. (2016). A method to correlate splitting tensile strength and compressive strength of pervious concrete cylinders and cores. Construction and Building Materials, 125, 271-278. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.032

Hariyadi, & Tamai, H. (2015). Enhancing the performance of porous concrete by utilizing the pumice aggregate. Procedia Engineering, 125, 732-738. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.117

Huynh, T.-P., Le, T. H. M., & Ngan, N. V. C. (2023). An experimental evaluation of the performance of concrete reinforced with recycled fibers made from waste plastic bottles. Results in Engineering, 18, Article 101205. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101205

Ibrahim, A., Mahmoud, E., Yamin, M., & Patibandla, V. C. (2014). Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. Construction and Building Materials, 50, 524-529. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.045

Jamsawang, P., Poorahong, H., Yoobanpot, N., Smith Songpiriyakij, & Jongpradist, P. (2017). Improvement of soft clay with cement and bagasse ash waste. Construction and Building Materials, 154, 61-71. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.188

Jamsawang, P., Suansomjeen, T., Sukontasukkul, P., Jongpradist, P., & Bergado, D. T. (2018). Comparative flexural performance of compacted cement-fiber-sand. Geotextiles and Geomembranes, 46(4), 414-425. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.03.004

Joshaghani, A., Ramezanianpour, A. A., Ataei, O., & Golroo, A. (2015). Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method. Construction and Building Materials, 101, 317-325. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.094

Li, J., Xia, J., Di Sarno, L., & Gong, G. (2023). Fiber utilization in pervious concrete: Review on manufacture and properties. Construction and Building Materials, 406, Article 133372. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133372

Lian, C., & Zhuge, Y. (2010). Optimum mix design of enhanced permeable concrete - An experimental investigation. Construction and Building Materials, 24(12), 2664-2671. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.014

Lian, C., Zhuge, Y., & Beecham, S. (2011). The relationship between porosity and strength for porous concrete. Construction and Building Materials, 25(11), 4294-4298. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.009

Ling, T.-C., Kaliyavaradhan, S. K., & Poon, C. S. (2018). Global perspective on application of controlled low-strength material (CLSM) for trench backfilling - An overview. Construction and Building Materials, 158, 535-548. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.050

Mehrabi, P., Shariati, M., Kabirifar, K., Jarrah, M., Rasekh, H., Trung, N. T., Shariati, A., & Jahandari, S. (2021). Effect of pumice powder and nano-clay on the strength and permeability of fiber-reinforced pervious concrete incorporating recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials, 287, Article 122652. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122652

Muthaiyan, U. M., & Thirumalai, S. (2017). Studies on the properties of pervious fly ash-cement concrete as a pavement material. Cogent Engineering, 4(1), Article 1318802. https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1318802

Ozel, B. F., Sakallı, Ş., & Şahin, Y. (2022). The effects of aggregate and fiber characteristics on the properties of pervious concrete. Construction and Building Materials, 356, Article 129294. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129294

Shan, J., Zhang, Y., Wu, S., Lin, Z., Li, L., & Wu, Q. (2022). Pore characteristics of pervious concrete and their influence on permeability attributes. Construction and Building Materials, 327, Article 126874. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126874

Singh, B., Singh, S. B., Barai, S. V., Ojha, P. N., & Kumar, R. (2025). Experimental investigation for the determination of stress-strain relationship for sintered

flyash lightweight aggregate concrete. Construction and Building Materials, 489, Article 142339. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.142339

Sukkarak, R., Jongpradist, P., Voottipruex, P., Jamsawang, P., Keawsawasvong, S., Pansuwannakun, T., & Meepon, I. (2025). Using stone dust as an improvement material for cement gravel column. Case Studies in Construction Materials, 22, Article e04300. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04300

Tran, T. N. H., Puttiwongrak, A., Pongsopha, P., Intarabut, D., Jamsawang, P., & Sukontasukkul, P. (2021). Microparticle filtration ability of pervious concrete mixed with recycled synthetic fibers. Construction and Building Materials, 270, Article 121807. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121807

Xu, G., Shen, W., Huo, X., Yang, Z., Wang, J., Zhang, W., & Ji, X. (2018). Investigation on the properties of porous concrete as road base material. Construction and Building Materials, 158, 141-148. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.151

Yoobanpot, N., Jamsawang, P., Krairan, K., Jongpradist, P., & Likitlersuang, S. (2020). Laboratory investigation of the properties of cement fly ash gravel for use as a column-supported embankment. Construction and Building Materials, 257, Article 119493. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119493

Zhang, Y., Li, H., Abdelhady, A., & Yang, J. (2020). Comparative laboratory measurement of pervious concrete permeability using constant-head and falling-head permeameter methods. Construction and Building Materials, 263, Article 120614. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120614

Zhong, R., & Wille, K. (2015). Material design and characterization of high performance pervious concrete. Construction and Building Materials, 98, 51-60. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.027

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายธนกฤต ภู่ประดิษฐ์
ชื่อวิทยานิพนธ์	คุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสากรวดซีเมนต์เถ้ายูคาลิปตัสเสริมแรงด้วยเส้นใยจากขวดพลาสติก
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ประวัติ	ประวัติการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2562

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ