



Analisis Mikrostruktur Tanah Lempung Ariake Yang Tersemen Ringan Menggunakan Metode SEM, MIP, Dan XRD

Rayner Pairunan^{#a}, Alva N. Sarajar^{#b}, Agnes T. Mandagi^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
^araynerpairunan@gmail.com, ^balva.sarajar@unsrat.ac.id, ^cagnes.mandagi@unsrat.ac.id

Abstrak

Tanah lempung Ariake memiliki mikrostruktur lepas, porositas tinggi, dan sifat mekanis lemah akibat dominasi partikel lempung berlapis. Penelitian ini mengkaji perubahan mikrostruktur akibat stabilisasi semen ringan 3%, 4%, dan 5% pada berbagai kadar air menggunakan FE-SEM, MIP, dan XRD. Hasil FE-SEM menunjukkan tanah asli beragregat halus dengan pori besar, sedangkan penambahan semen membentuk produk hidrasi ettringite dan gel C-S-H yang mengikat partikel dan mengisi pori. Perbaikan mikrostruktur paling optimal terjadi pada kadar air 125% dengan 5% semen, ditandai oleh struktur padat dan ikatan antarpartikel yang kuat. Analisis MIP menunjukkan penurunan porositas total dan pergeseran distribusi pori dari makropori ke mesopori seiring peningkatan kadar semen. Sampel 125% dengan 5% semen memiliki densifikasi terbaik, sedangkan kadar air 150% dan 200% tetap berpori besar akibat kelebihan air. XRD mengonfirmasi peningkatan ettringite dan fase C-S-H, sementara mineral lempung dasar tetap dominan namun terlapisi produk hidrasi, sehingga meningkatkan stabilitas geoteknik tanah.

Kata kunci: lempung Ariake, stabilisasi semen ringan, FE-SEM; MIP, XRD, mikrostruktur, ettringite, C-S-H, porositas, hidrasi semen

1. Pendahuluan

Tanah lempung lunak di dataran Ariake memiliki daya dukung rendah, kompresibilitas tinggi, dan permeabilitas kecil sehingga bermasalah bagi konstruksi. Stabilisasi semen digunakan untuk memperbaiki sifat tanah, namun pemakaian semen dalam jumlah besar kurang ekonomis dan berdampak pada lingkungan. Karena itu, studi tanah tersemen ringan menjadi penting untuk memahami efektivitas kadar semen rendah. Tanah lempung Ariake memiliki struktur alami kompleks akibat pengendapan laut. Penambahan semen dalam jumlah kecil membentuk produk hidrasi seperti C-S-H dan ettringite yang mengikat partikel lempung, membentuk mikrostruktur campuran. Hubungan mikrostruktur dan perilaku mekanik ini menjelaskan peningkatan kekuatan dan perubahan sifat deformasi tanah tersemen ringan.

2. Landasan Teori

Tanah lempung Ariake merupakan lempung laut lunak berplastisitas tinggi yang didominasi mineral smektit (montmorillonit) dan illit, dengan karakteristik umum berupa kadar air alami sangat tinggi ($\pm 150-200\%$), indeks plastisitas tinggi ($PI \approx 80-120$), serta luas permukaan spesifik besar ($\pm 80-120 \text{ m}^2/\text{g}$). Perilaku tanah ini dikontrol oleh interaksi elektro-kimia antar partikel, khususnya keseimbangan antara gaya tarik van der Waals dan gaya tolak lapisan ganda listrik (diffuse double layer). Lingkungan laut kaya elektrolit (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ; $\text{pH} \approx 7-8$) menyebabkan lapisan ganda menipis dan mendorong terbentuknya struktur flocculated terbuka (open-flocculated) dengan kontak edge-to-face dan face-to-face yang lemah.

Analisis mikrostruktur tanah lempung Ariake tersemen ringan dilakukan menggunakan beberapa metode karakterisasi, yaitu Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM), Mercury Intrusion Porosimetry (MIP), dan X-Ray Diffraction (XRD). Metode-metode ini digunakan untuk mengevaluasi perubahan morfologi partikel, sistem pori, dan fase mineral akibat proses sementasi ringan, serta untuk menjelaskan mekanisme peningkatan sifat geoteknik tanah pada skala mikro:

1. Metode SEM (*Scanning Electron Microscopy*)

a. Perbesaran (*Magnification*)

$$M = \frac{L_{\text{image}}}{L_{\text{actual}}} \quad (1)$$

b. Resolusi SEM (d)

$$d \approx \frac{0.61\lambda}{\alpha} \quad (2)$$

2. Metode MIP (*Mercury Intrusion Porosimetry*)

a. Porositas Total

$$n = \frac{V_p}{V_t} \quad (3)$$

b. Distribusi ukuran pori diferensial

$$\frac{dV}{d \log D} \quad (4)$$

3. Metode XRD (*X-Ray Diffraction*)

a. Hukum Bragg

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (5)$$

b. Jarak Antarbidang Kristal

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (6)$$

c. Intensitas Relatif Puncak

$$I_r = \frac{I_h}{I_{\text{max}}} \quad (7)$$

Secara teoritis, kombinasi SEM, MIP, dan XRD digunakan untuk membangun hubungan sebab-akibat antara perubahan mikrostruktur, evolusi sistem pori, dan pembentukan fase mineral sekunder. Pendekatan ini memungkinkan penjelasan mekanisme peningkatan kekuatan dan stabilitas tanah tersemen ringan tanpa harus bergantung langsung pada parameter mekanik makroskopik.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di dua lokasi utama di Prefektur Saga, Jepang. Saga University digunakan sebagai lokasi persiapan dan pembuatan sampel, meliputi pengeringan awal tanah, pengaturan kadar air, pencampuran tanah dengan semen berkadar rendah, pencetakan, dan curing awal untuk memastikan homogenitas serta konsistensi kondisi awal sampel. Selanjutnya, Saga Ceramic Research Center, Prefecture Saga, Japan, digunakan sebagai lokasi pengujian mikrostruktur, yaitu FE-SEM untuk analisis morfologi dan fabric partikel, MIP untuk karakterisasi distribusi ukuran pori dan porositas, serta XRD untuk identifikasi mineralogi dan fase hidrasi semen. Pemisahan lokasi ini memungkinkan pemanfaatan fasilitas berpresisi tinggi sehingga hasil analisis mikrostruktur tanah lempung Ariake tersemen ringan diperoleh secara akurat dan representatif.

1. Metode Rekonstruksi untuk Pembuatan Tanah Berstruktur Buatan

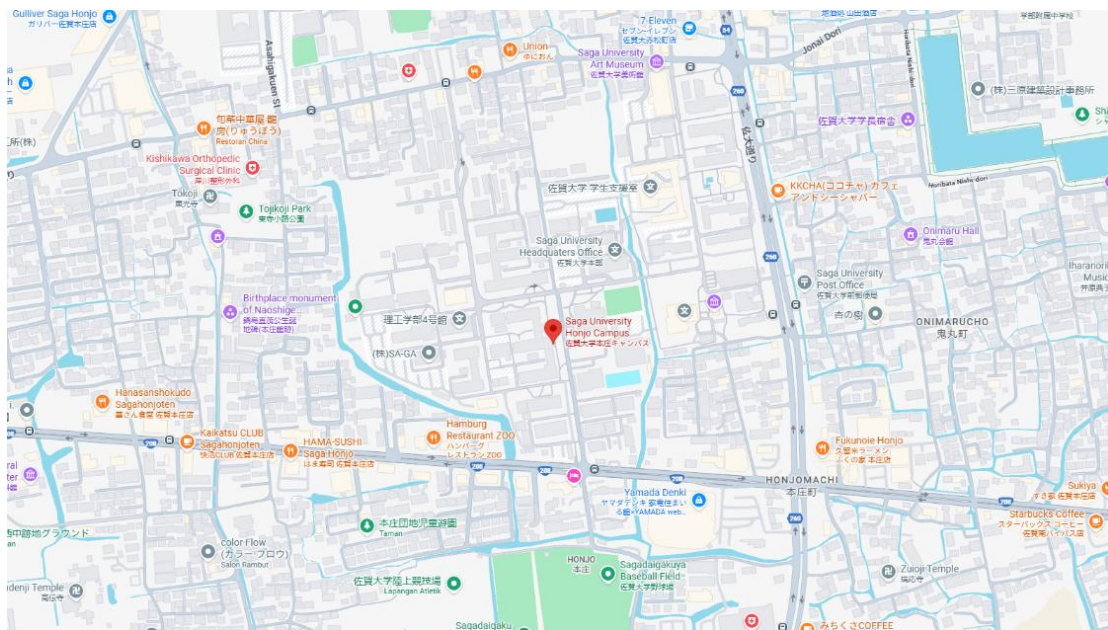
Dalam metode rekonstruksi untuk pembuatan tanah berstruktur buatan, digunakan Metode *Soil Cement Mixing (Light Cementation Technique)* dengan langkah – langkah sebagai berikut:

- a. Persiapan material dan pengujian karakteristik tanah.
- b. Penentuan kadar semen: 3%, 4%, dan 5% (berdasarkan *liquid limit* tanah).
- c. Mencampurkan semen ke tanah.
- d. Tambahkan *Distilled Water* dengan kadar yang telah di tentukan.
- e. Aduk dengan mixer hingga merata (5–10 menit).
- f. Tuang ke cetakan *pre consolidation tube* dengan beban 50kPa selama 10 hari
- g. Curing di ruang *temperature* selama 21 hari.

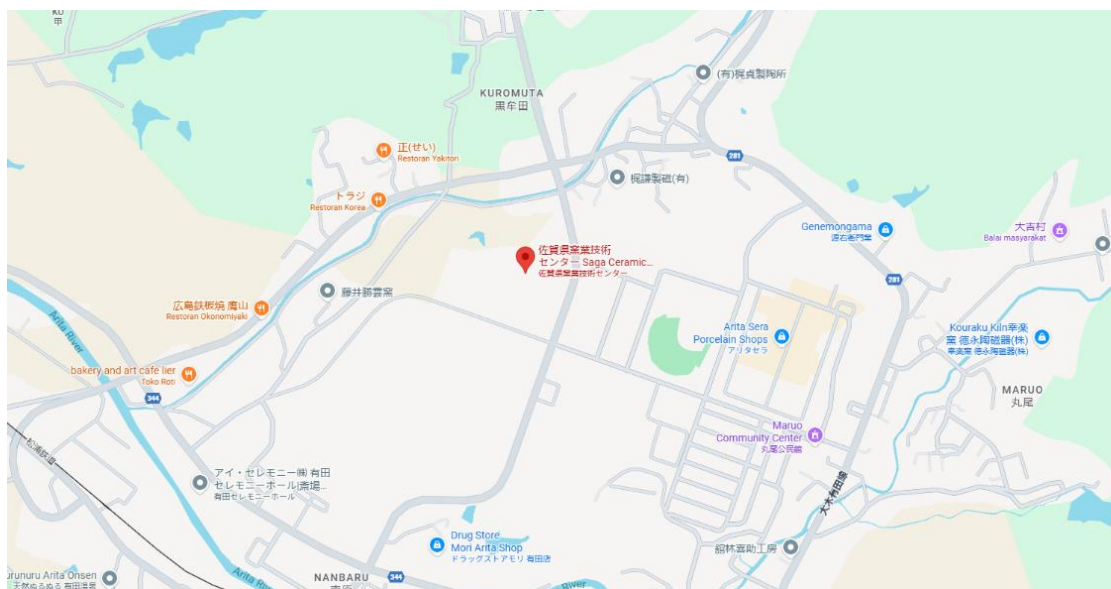
2. Metode Persiapan FE-SEM (*Scanning Electron Microscopy*)

- a. Ambil fragmen dengan ketebalan 2–5 mm.

- b. Sample dibekukan dengan cara merendamnya ke dalam nitrogen cair pada suhu di bawah -196°C .
- c. Lakukan vakum di *freeze-dryer* hingga kering (24 jam).
- d. Menempatkan sampel di stub aluminium dengan *carbon tape*.
- e. Sample di *Coating* dengan Au/Pd $\sim 5\text{--}10\text{ nm}$
- 3. Metode Persiapan MIP (*Mercury Intrusion Porosimetry*)
 - a. Potong potongan kecil 3–5 mm (kubus atau silinder kecil) cocok untuk holder MIP.
 - b. Ambil beberapa potongan dari lokasi berbeda (min. 3 rep per kondisi jika memungkinkan).
 - c. *Freeze-dry* adalah cara preferensi untuk mengurangi collapse pori. Setelah *freeze-dry*, simpan di desikator.
- 4. Metode Persiapan XRD (*X-ray Diffraction*)
 - a. Ambil $\sim 5\text{--}10\text{ g}$ bahan dari specimen (area tak merusak atau dari sisa bubuk).
 - b. Giling halus (agate mortar) hingga $\leq 63\ \mu\text{m}$ (atau finer) untuk powder random mount. Untuk clay fraction analysis, pisahkan $< 2\ \mu\text{m}$ fraksi (sedimentasi pipette atau centrifuge).



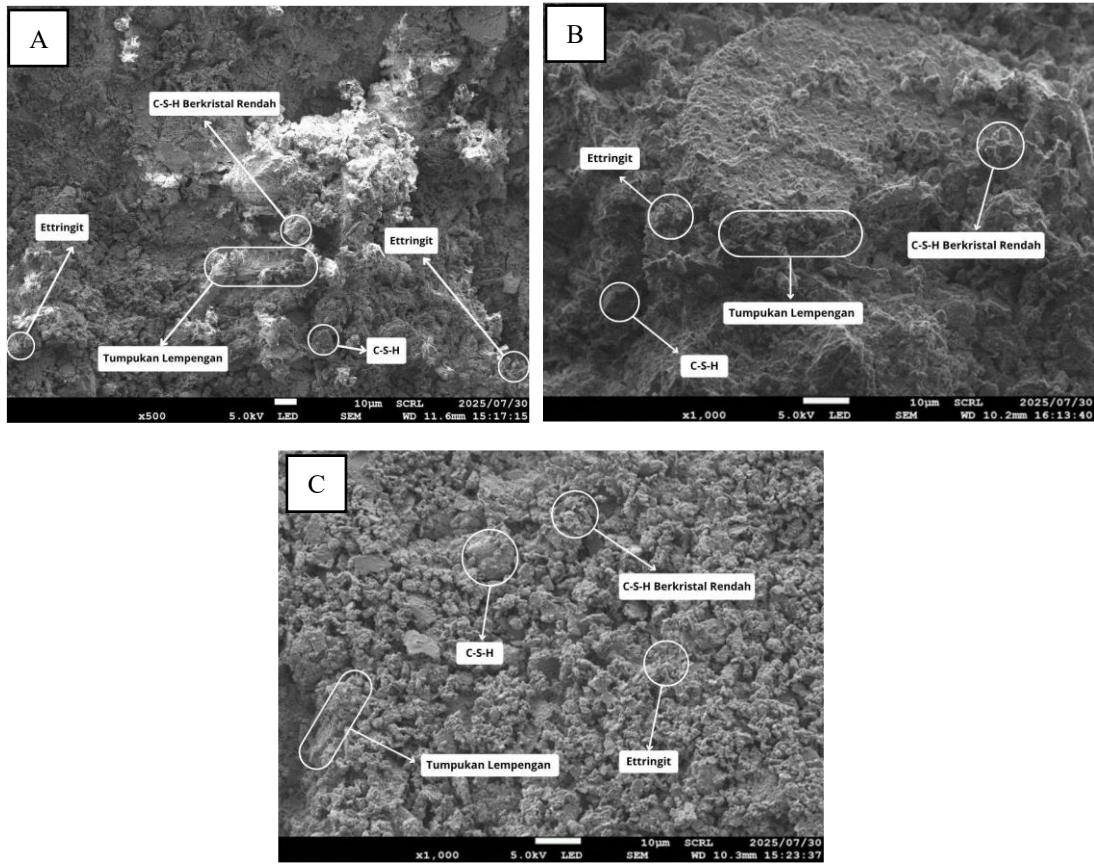
Gambar 1. Lokasi Saga University



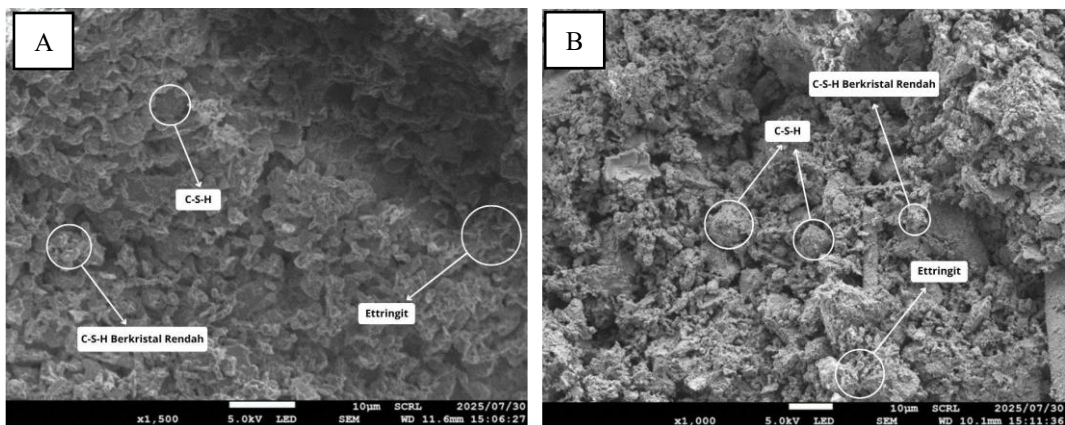
Gambar 2. Lokasi Saga Ceramic Research Center

4. Hasil dan Pembahasan

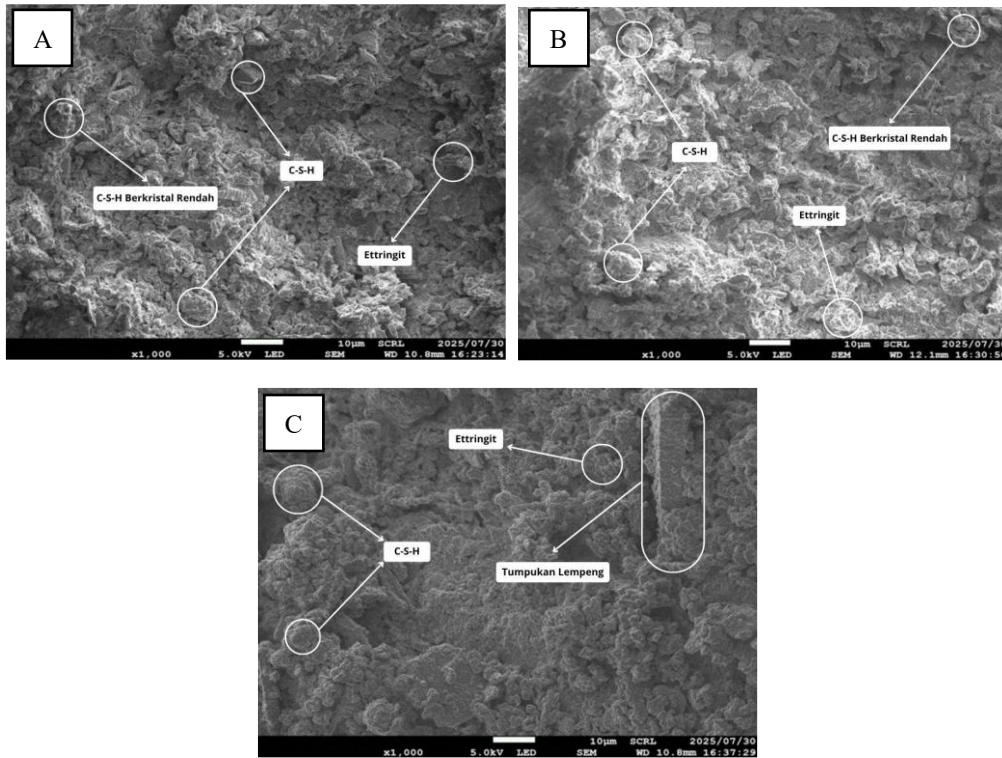
4.1. Hasil Analisis FE – SEM Pada Tanah Lempung Ariake Murni yang Disemen Ringan



Gambar 3. (A) Gambar morfologi tanah Ariake hasil rekonstruksi pada kadar air 125% dengan kadar semen 3%; (B) Gambar morfologi tanah Ariake hasil rekonstruksi pada kadar air 125% dengan kadar semen 4%; (C) Gambar morfologi tanah Ariake hasil rekonstruksi pada kadar air 125% dengan kadar semen 5%



Gambar 4. (A) Gambar morfologi tanah Ariake hasil rekonstruksi pada kadar air 150% dengan kadar semen 3%; (B) Gambar morfologi tanah Ariake hasil rekonstruksi pada kadar air 150% dengan kadar semen 5%



Gambar 5. (A) Gambar morfologi tanah Ariake hasil rekonstruksi pada kadar air 200% dengan kadar semen 3%; (B) Gambar morfologi tanah Ariake hasil rekonstruksi pada kadar air 200% dengan kadar semen 4%; (C) Gambar morfologi tanah Ariake hasil rekonstruksi pada kadar air 200% dengan kadar semen 5%

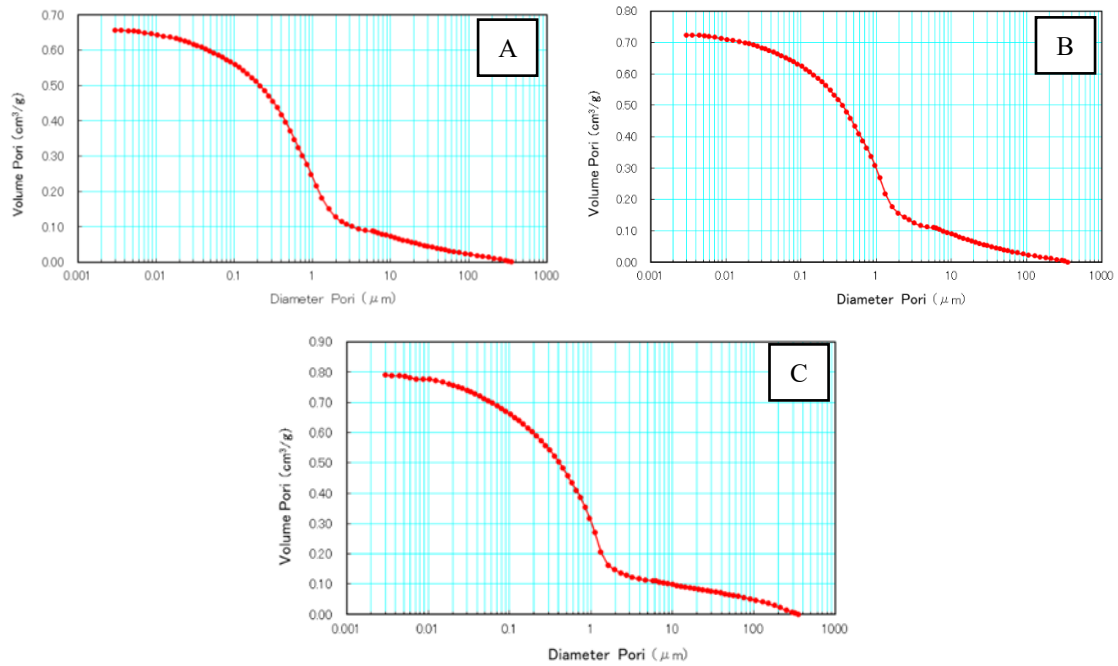
4.2. Hasil Analisis Pengukuran Pori dengan Metode MIP dan ImageJ

Tabel 1. Hasil Analisis MIP Sample Tanah Lempung Ariake dengan kadar air 125% terhadap Kadar Semen 3%, 4%, dan 5%.

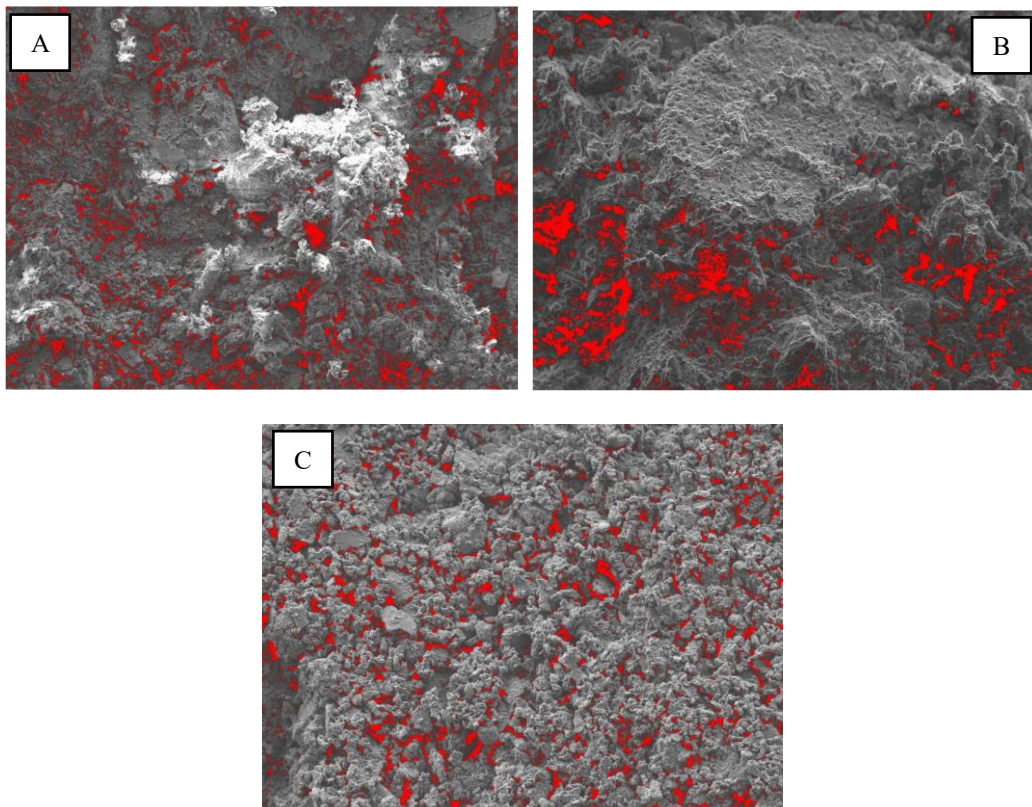
Tanah lempung Ariake dengan kadar air 125% kali batas cair (LL = 90%) dan dicampur dengan semen sebanyak 3% dari berat kering tanah Ariake				
1.	Volume pori	Volume total pori	0,6557	cm ³ /g
2.	Luas permukaan	Luas permukaan spesifik total pori	22,3189	m ² /g
3.	Diameter pori	Ukuran pori rata-rata (4V/A)	0,1175	μm
4.	Diameter pori rata-rata	Volume Standar	0,6505	μm
		Luas permukaan standar	0,0178	μm

Tanah lempung Ariake dengan kadar air 125% kali batas cair (LL = 90%) dan dicampur dengan semen sebanyak 4% dari berat kering tanah Ariake				
1.	Volume pori	Volume total pori	0,7228	cm ³ /g
2.	Luas permukaan	Luas permukaan spesifik total pori	22,6419	m ² /g
3.	Diameter pori	Ukuran pori rata-rata (4V/A)	0,1277	μm
4.	Diameter pori rata-rata	Volume Standar	0,7582	μm
		Luas permukaan standar	0,0182	μm

Tanah lempung Ariake dengan kadar air 125% kali batas cair (LL = 90%) dan dicampur dengan semen sebanyak 5% dari berat kering tanah Ariake				
1.	Volume pori	Volume total pori	0,7886	cm ³ /g
2.	Luas permukaan	Luas permukaan spesifik total pori	27,9207	m ² /g
3.	Diameter pori	Ukuran pori rata-rata (4V/A)	0,113	μm
4.	Diameter pori rata-rata	Volume Standar	0,7142	μm
		Luas permukaan standar	0,019	μm



Gambar 6. (A) Diagram Distribusi Kumulatif sample kadar air 125% dengan semen 3%; (B) Diagram Distribusi Kumulatif sample kadar air 125% dengan semen 4%; (C) Diagram Distribusi Kumulatif sample kadar air 125% dengan semen 5%

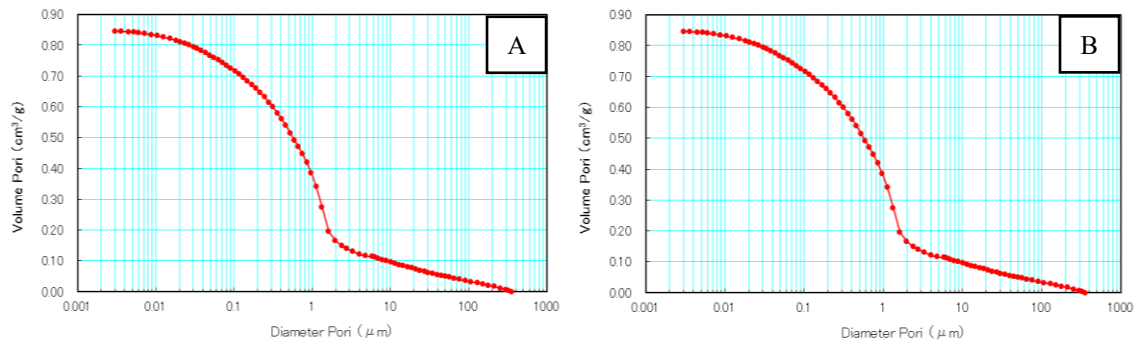


Gambar 7. Hasil analisis color thresholding (RED) menggunakan *ImageJ*: (A) Sampel kadar air 125% dengan kadar semen 3%; (B) Sampel kadar air 125% dengan kadar semen 4%; (C) Sampel kadar air 125% dengan kadar semen 5%

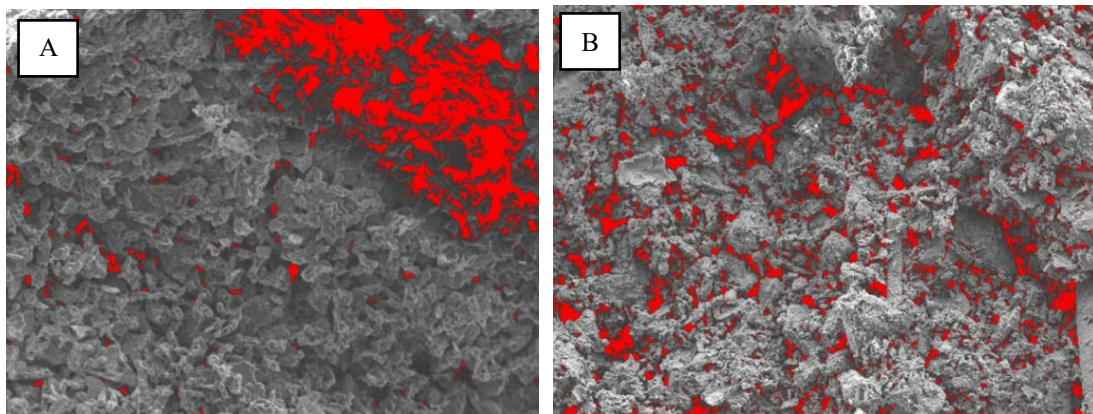
Tabel 2. Hasil Analisis *MIP* Sample Tanah Lempung Ariake dengan Kadar Air 150% terhadap Kadar Semen 3%, dan 5%.

Tanah lempung Ariake dengan kadar air 1.5% kali batas cair (LL = 90%) dan dicampur dengan semen sebanyak 3% dari berat kering tanah Ariake				
1.	Volume pori	Volume total pori	0,7164	cm ³ /g
2.	Luas permukaan	Luas permukaan spesifik total pori	25,9249	m ² /g
3.	Diameter pori	Ukuran pori rata-rata (4V/A)	0,1105	μm
4.	Diameter pori rata-rata	Volume Standar	0,6441	μm
		Luas permukaan standar	0,0156	μm

Tanah lempung Ariake dengan kadar air 1.5% kali batas cair (LL = 90%) dan dicampur dengan semen sebanyak 5% dari berat kering tanah Ariake				
1.	Volume pori	Volume total pori	0,8451	cm ³ /g
2.	Luas permukaan	Luas permukaan spesifik total pori	27,6200	m ² /g
3.	Diameter pori	Ukuran pori rata-rata (4V/A)	0,1224	μm
4.	Diameter pori rata-rata	Volume Standar	0,8416	μm
		Luas permukaan standar	0,0192	μm



Gambar 8. (A) Diagram Distribusi Kumulatif sample kadar air 150% dengan semen 3%
 (B) Diagram Distribusi Kumulatif sample kadar air 150% dengan semen 5%



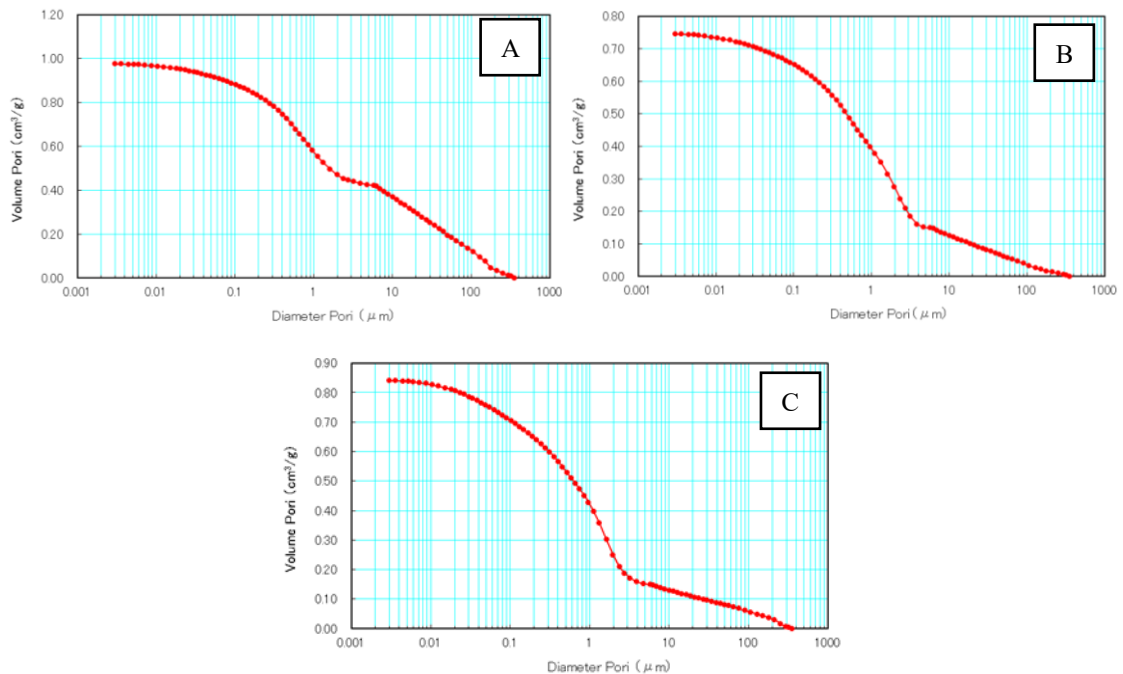
Gambar 9. Hasil analisis color thresholding (RED) menggunakan *ImageJ*:
 (A) Sampel kadar air 150% dengan kadar semen 3%; (B) Sampel kadar air 150% dengan kadar semen 5%

Tabel 3. Hasil Analisis MIP sample Tanah Lempung Ariake dengan Kadar Air 200% terhadap Kadar Semen 3%, 4%, dan 5%

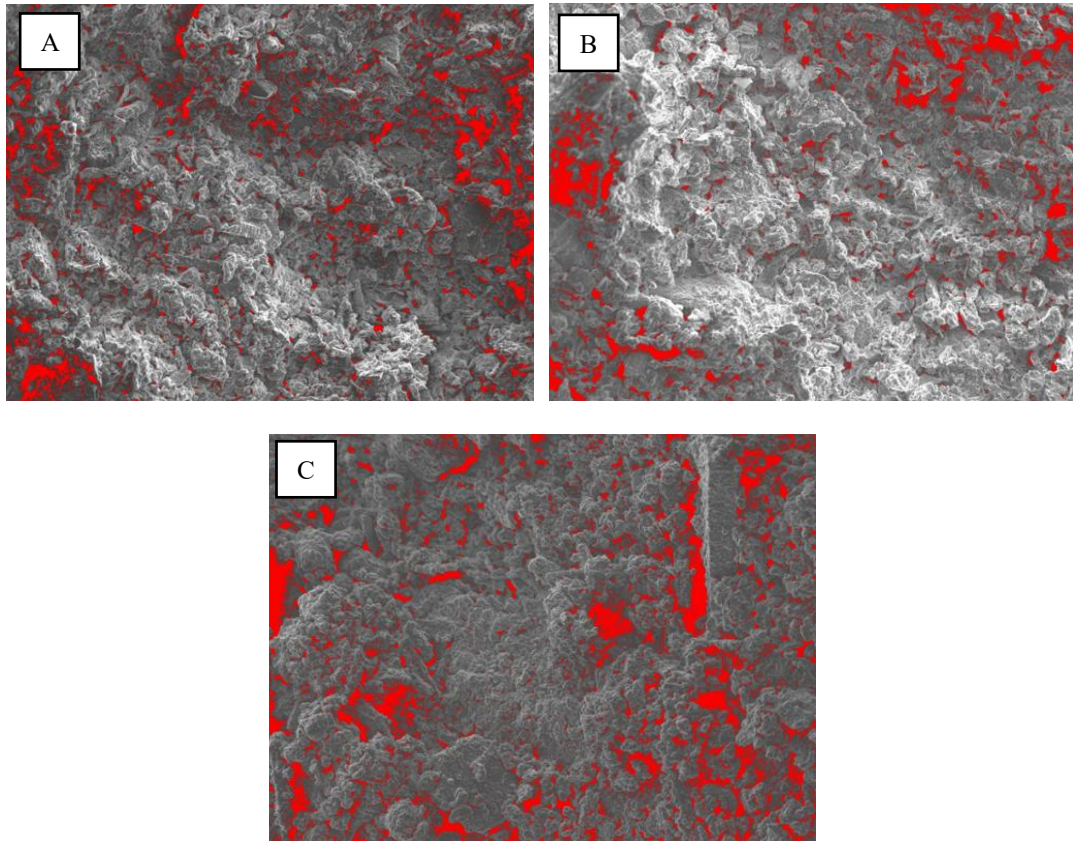
Tanah lempung Ariake dengan kadar air 2% kali batas cair (LL = 90%) dan dicampur dengan semen sebanyak 5% dari berat kering tanah Ariake			
1. Volume pori	Volume total pori	0,8393	cm ³ /g
2. Luas permukaan	Luas permukaan spesifik total pori	26,4693	m ² /g
3. Diameter pori	Ukuran pori rata-rata (4V/A)	0,1268	μm
4. Diameter pori rata-rata	Volume Standar	1,0135	μm
	Luas permukaan standar	0,0209	μm

Tanah lempung Ariake dengan kadar air 2% kali batas cair (LL = 90%) dan dicampur dengan semen sebanyak 3% dari berat kering tanah Ariake			
1. Volume pori	Volume total pori	0,9745	cm ³ /g
2. Luas permukaan	Luas permukaan spesifik total pori	20,2147	m ² /g
3. Diameter pori	Ukuran pori rata-rata (4V/A)	0,1928	μm
4. Diameter pori rata-rata	Volume Standar	1,7459	μm
	Luas permukaan standar	0,0207	μm

Tanah lempung Ariake dengan kadar air 2% kali batas cair (LL = 90%) dan dicampur dengan semen sebanyak 4% dari berat kering tanah Ariake			
1. Volume pori	Volume total pori	0,744	cm ³ /g
2. Luas permukaan	Luas permukaan spesifik total pori	20,6715	m ² /g
3. Diameter pori	Ukuran pori rata-rata (4V/A)	0,144	μm
4. Diameter pori rata-rata	Volume Standar	1,1524	μm
	Luas permukaan standar	0,0183	μm



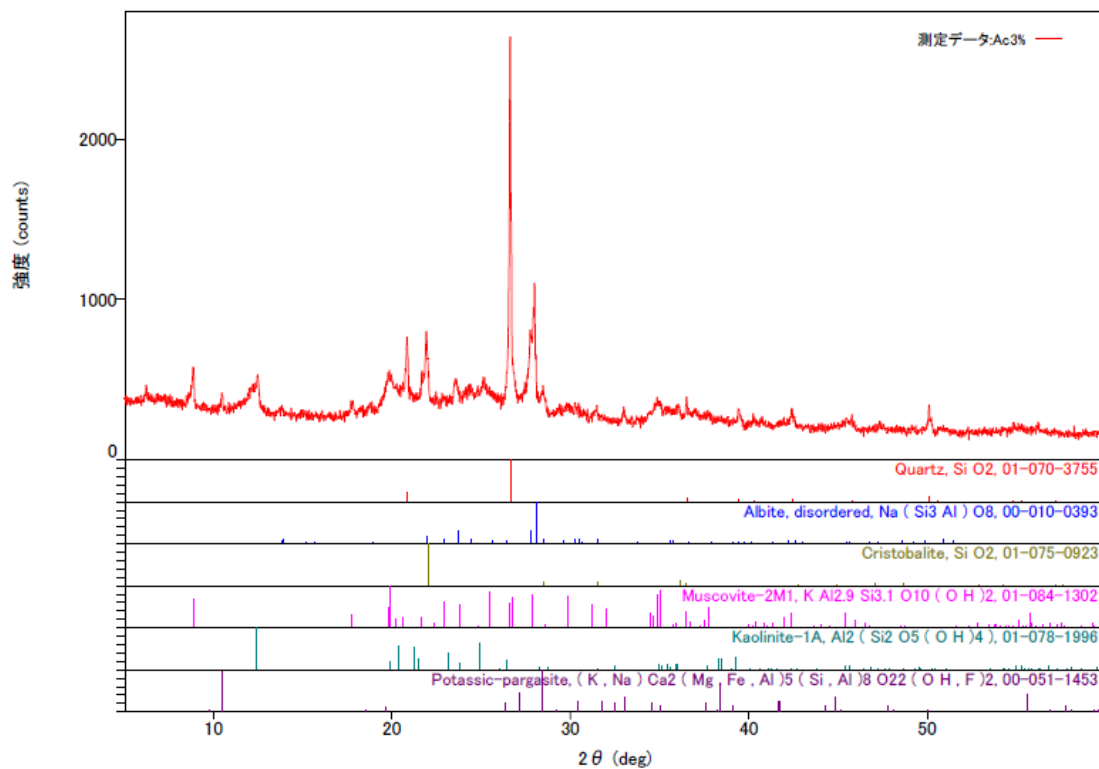
Gambar 10. (A) Diagram Distribusi Kumulatif sample kadar air 200% dengan semen 3%; (B) Diagram Distribusi Kumulatif sample kadar air 200% dengan semen 4%; (C) Diagram Distribusi Kumulatif sample kadar air 200% dengan semen 5%



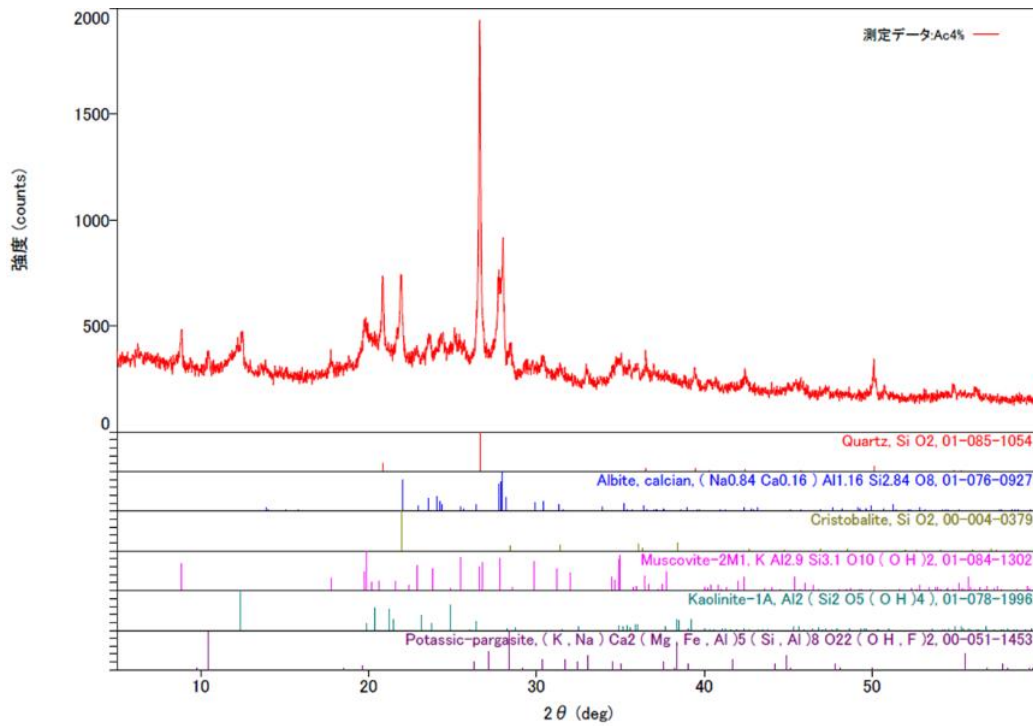
Gambar 11. Hasil analisis color thresholding (RED) menggunakan *ImageJ*:

- (A) Sampel kadar air 200% dengan kadar semen 3%
- (B) Sampel kadar air 200% dengan kadar semen 4%
- (C) Sampel kadar air 200% dengan kadar semen 5%

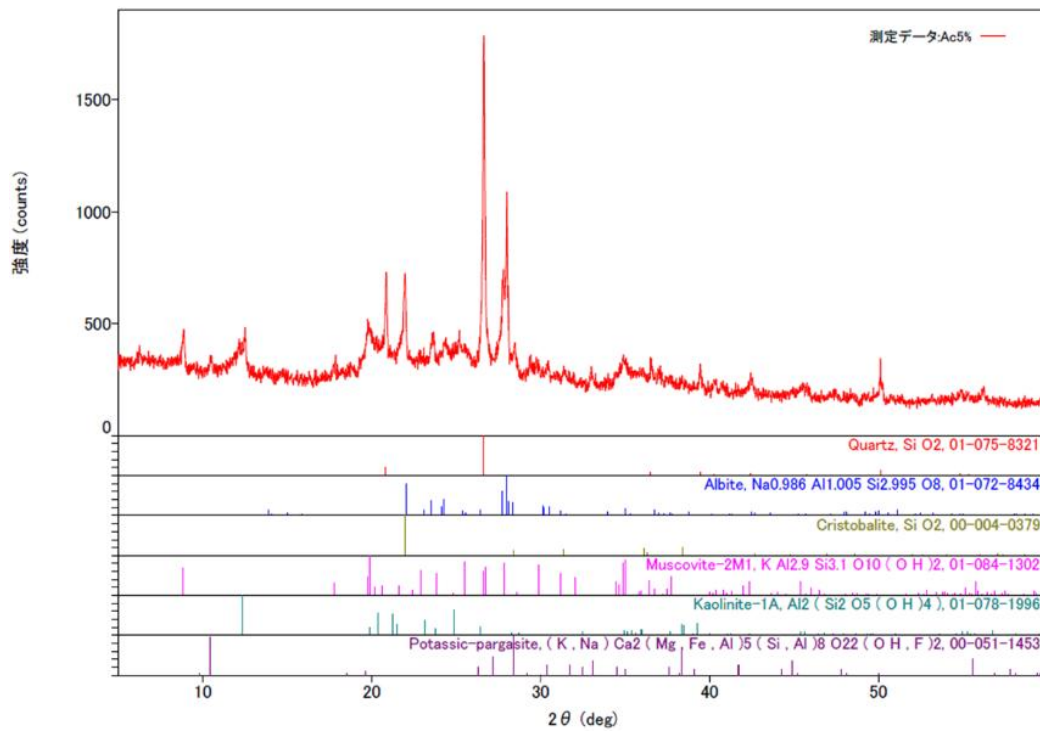
4.3. Hasil Analisis XRD (X-Ray Diffraction)



Gambar 12. Pola Difraksi XRD sampel Tanah Lempung Ariake dengan semen 3%



Gambar 13. Pola Difraksi XRD sampel Tanah Lempung Ariake dengan semen 4%



Gambar 14. Pola Difraksi XRD sampel Tanah Lempung Ariake dengan semen 5%

5. Kesimpulan

A. FE – SEM (Scanning Electron Microscopy)

1. Peningkatan kadar semen dari 3% → 5% pada seluruh variasi kadar air menyebabkan peningkatan pembentukan ettringite dan C–S–H, serta pengurangan pori.
2. Pada kadar air 1.25 LL:
 - a) Semen 3% menghasilkan ettringite dan C–S–H awal, namun pori besar masih terlihat.
 - b) Semen 4% membentuk matriks pengikat yang lebih kuat akibat flokulasi Ca^{2+} .
 - c) Semen 5% menghasilkan mikrostruktur paling padat, dengan ettringite dan C–S–H yang mengisi hampir seluruh pori inter-aggregate dan intra-aggregate.
3. Pada kadar air 1.5 LL, pembentukan produk hidrasi tetap terjadi dan struktur menjadi lebih rapat, namun kepadatannya masih lebih rendah dibanding 1.25 LL.
4. Pada kadar air 2.0 LL, semen 3–4% tidak mampu membentuk jaringan pengikat yang kuat; struktur mikro tetap longgar. Perbaikan mikrostruktur baru terlihat jelas pada semen 5%.
5. Sampel T3, T4, dan T10 menunjukkan mikrostruktur alami yang sangat longgar, berpori, dan tidak terkonsolidasi, tanpa keberadaan produk hidrasi.
6. Kondisi mikrostruktur paling efektif berdasarkan FE–SEM diperoleh pada kadar air 1.25 LL dengan semen 5%.

B. MIP (Mercury Intrusion Porosimetry)

1. Hasil MIP menunjukkan bahwa kadar air dan kadar semen berpengaruh signifikan terhadap Volume Total Pori (VTP) dan Luas Permukaan Spesifik (SSA).
2. Pada kadar air 1.25 LL:
3. Peningkatan semen meningkatkan VTP dan SSA.
4. Semen 5% menghasilkan SSA tertinggi (27,9207 m^2/g) dan perkembangan pori gel mikro paling intensif.
5. Pada kadar air 1.5 LL, VTP dan SSA lebih tinggi dibanding 1.25 LL – 3%, menunjukkan kelembapan memfasilitasi pembentukan jaringan pori, terutama pada semen 5%.
6. Pada kadar air 2.0 LL, semen 3% menghasilkan VTP tertinggi akibat dominasi pori makro besar dan SSA rendah; pori mikro baru berkembang signifikan pada semen 5%.
7. Untuk sampel alami:
8. T4 memiliki VTP dan SSA tertinggi (mikrostruktur paling terbuka).
9. T3 menunjukkan kondisi menengah.
10. T10 memiliki VTP dan SSA terendah (mikrostruktur paling padat).
11. Mikrostruktur paling efisien berdasarkan MIP diperoleh pada kadar air 1.25 LL dengan semen 5%.

C. XRD (X-Ray Diffraction)

1. Pola difraksi XRD pada sampel Ac3%, Ac4%, dan Ac5% menunjukkan komposisi mineralogi yang konsisten.
2. Quartz (SiO_2) merupakan mineral dominan pada seluruh sampel, menunjukkan kandungan silika kristalin yang sangat tinggi.
3. Cristobalite teridentifikasi jelas pada semua sampel, menegaskan dominasi fase silika.
4. Kaolinite-1A, Muscovite, dan Albite hadir dalam jumlah sedang dan relatif tidak berubah antar variasi semen.
5. Penambahan semen tidak menghasilkan perubahan signifikan pada fase mineral kristalin utama.

Referensi

- Muslim, A. F. (2024). *Study on Reproducing the Structured Soil through a Reconstituted Process with Lightly Cemented Clay*. Saga University.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.
- Horpibulsuk, S., Katkan, W., & Sirilerdwattana, W. (2007). *Some observations on the compressibility behavior of soft clay stabilized with cement*. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(2), 220–232.
- Katsumi, T., Inui, T., Kamon, M., & Liu, S. (2010). *Microstructure and strength development of Ariake Clay stabilized with cementitious materials*. *Soils and Foundations*, 50(3), 421–429.
- Hayashi, S., Nishimoto, S., & Takahashi, H. (2012). *Microstructure changes in Ariake Clay during consolidation process*. *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, 68(1), 1–10.
- Mitchell, J.K. & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior* (3rd ed.). Wiley.

- Han, Y.; Xia, J.; Chang, H.; Xu, J. The Influence Mechanism of Ettringite Crystals and Microstructure Characteristics on the Strength of Calcium-Based Stabilized Soil. *Materials* 2021, 14, 1359.
- Effects of Ettringite Formation on the Stability of Cement-Treated Sediments
- Inácio Soares Ribeiro¹, Diego de Freitas Fagundes² & Helena Paula Nierwinski¹. *Resources*, 2025, 14(5), 73.
- Ouhadi, V. R. & Yong, R. N. (2008). *Ettringite formation and behaviour in clayey soils*. *Applied Clay Science*, 42(1–2), 258-265.
- Abbaslou, H., Hadifard, H., & Ghanizadeh, A. R. (2020). *Effect of cations and anions on flocculation of dispersive clayey soils*. *Heliyon*, 6(2), e03462.
- Basga, S. D., Tsozué, D., Temga, J. P., Balna, J., & Nguetnkam, J. P. (2018). Land use impact on clay dispersion/flocculation in irrigated and flooded vertisols from Northern Cameroon. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(3), 237–244.
- Zhang, X., et al. (2013). Microstructure and strength of cemented clays. *Cement and Concrete Research*.
- Wang, L., Cui, Y. J., & Delage, P. (2019). Microstructural insight into the mechanical behavior of clayey soils: A review. *Engineering Geology*.
- Khalid, U., Ye, G.-L., Yadav, S. K., & Yin, Z.-Y. (2019). *A simple experimental method to regain the mechanical behavior of naturally structured marine clays*. *Applied Ocean Research*, 85, 102–111.