2026, Vol. 4, No. 3, pp. 190-205
E-ISSN: 3025-9444

Karakterisasi Material Geopolimer Berbasis Fly Ash, Kapur Padam, dan Tanah Laterit

Muh. Sayfullah. S [1]✉, Antonius [2], Prabowo Setiyawan [3]
(1,2,3) Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang, Indonesia

Abstract: The development of environmentally friendly construction materials has become one of the key efforts to reduce dependence on Portland cement, which significantly contributes to global carbon emissions. This study aims to characterize the constituent materials of a geopolymer system based on fly ash, hydrated lime, and lateritic soil sourced from Gowa Regency, South Sulawesi, and Baubau City, Southeast Sulawesi, Indonesia. The research employed a quantitative experimental approach through the analysis of the physical, chemical, and microstructural characteristics of the materials. Physical characterization included moisture content, specific gravity, Atterberg limits, and particle size distribution tests, while chemical and microstructural characterization was conducted using X-Ray Fluorescence (XRF) and Scanning Electron Microscopy (SEM). The results indicated that the lateritic soils were predominantly composed of fine particles, with Al_2O_3 as the major component in the Gowa sample (49.38%) and SiO_2 as the dominant component in the Baubau sample (67.82%). The fly ash samples exhibited high contents of SiO_2, Al_2O_3, and Fe_2O_3, while the Jeneponto fly ash contained a higher CaO content than the Baruta fly ash. SEM observations revealed particle morphologies that have the potential to support the geopolymerization process. Overall, the combination of lateritic soil, fly ash, and hydrated lime demonstrates favorable characteristics for utilization as locally sourced geopolymer raw materials, offering a promising alternative for sustainable and environmentally friendly construction materials.

Article history:
Received: 05 June 2026
Revised: 28 June 2026
Accepted: 01 July 2026
Published: 02 July 2026

Keyword:
geopolymer, lateritic soil, fly ash, hydrated lime, material characterization, XRF, SEM

Abstrak: Pengembangan material konstruksi ramah lingkungan menjadi salah satu upaya untuk mengurangi ketergantungan terhadap semen Portland yang berkontribusi terhadap emisi karbon global. Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi material penyusun geopolimer berbasis fly ash, kapur padam, dan tanah laterit yang berasal dari Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan dan Kota Baubau, Sulawesi Tenggara. Penelitian dilakukan menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental melalui pengujian karakteristik fisik, kimia, dan mikrostruktur material. Karakterisasi fisik meliputi pengujian kadar air, berat jenis, batas Atterberg, dan distribusi ukuran butiran, sedangkan karakterisasi kimia dan mikrostruktur dilakukan menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) dan Scanning Electron Microscopy (SEM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanah laterit didominasi oleh partikel halus dengan kandungan utama Al_2O_3 sebesar 49,38% pada sampel Gowa dan SiO_2 sebesar 67,82% pada sampel Baubau. Fly ash memiliki kandungan SiO_2, Al_2O_3, dan Fe_2O_3 yang tinggi, sedangkan fly ash Jeneponto memiliki kandungan CaO lebih besar dibandingkan fly ash Baruta. Hasil SEM menunjukkan morfologi partikel yang berpotensi mendukung proses geopolimerisasi. Secara keseluruhan, kombinasi tanah laterit, fly ash, dan kapur padam memiliki karakteristik yang mendukung pemanfaatannya sebagai bahan baku geopolimer berbasis sumber daya lokal yang berpotensi menjadi alternatif material konstruksi berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Keyword:
geopolimer, tanah laterit, fly ash, kapur padam, karakterisasi material, XRF, SEM

This is an open-access article under the CC-BY-SA License.

How to cite: S, M. S., Antonius, A., & Setiyawan, P. (2026). Karakterisasi Material Geopolimer Berbasis Fly Ash, Kapur Padam, dan Tanah Laterit. *RESWARA: Jurnal Riset Ilmu Teknik*, *4*(3), 190–205. https://doi.org/10.70716/reswara.v4i3.581

PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan material konstruksi yang ramah lingkungan telah mendorong pengembangan teknologi material alternatif yang mampu mengurangi ketergantungan terhadap semen

✉ *Corresponding author:* ***muh.sayfullahs@gmail.com***
Copyright © 2026, the author(s)

Portland. Produksi semen konvensional diketahui berkontribusi signifikan terhadap emisi karbon dioksida global dan konsumsi energi yang tinggi sehingga diperlukan material pengikat yang lebih berkelanjutan (Gaurav et al., 2024; Luhar & Luhar, 2022). Salah satu alternatif yang saat ini berkembang pesat adalah geopolimer, yaitu material anorganik hasil reaksi polimerisasi antara material kaya aluminosilikat dengan larutan alkali yang menghasilkan struktur tiga dimensi dengan sifat mekanik dan ketahanan kimia yang baik (de Matos Riscado et al., 2025). Selain mampu menurunkan emisi karbon, geopolimer juga memberikan peluang pemanfaatan limbah industri dan sumber daya lokal yang belum termanfaatkan secara optimal.

Fly ash merupakan salah satu material prekursor geopolimer yang paling banyak digunakan karena memiliki kandungan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) yang tinggi. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa fly ash mampu menghasilkan geopolimer dengan kuat tekan yang tinggi serta ketahanan yang baik terhadap lingkungan agresif (Gaurav et al., 2024; Luhar & Luhar, 2022; Rahmawati et al., 2021). Namun demikian, pemanfaatan fly ash sebagai bahan tunggal seringkali menghadapi keterbatasan akibat variasi komposisi kimia yang dipengaruhi oleh sumber pembakaran batubara dan kondisi operasional pembangkit listrik. Oleh karena itu, kombinasi fly ash dengan material lokal lainnya menjadi salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan untuk meningkatkan efektivitas proses geopolimerisasi.

Tanah laterit merupakan material alam yang banyak ditemukan di wilayah tropis, termasuk Indonesia, dan memiliki kandungan utama berupa silika, alumina, serta oksida besi yang berpotensi digunakan sebagai bahan penyusun geopolymer (Cyriaque Kaze et al., 2022; Nuru et al., 2025). Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan, merupakan salah satu daerah yang memiliki deposit tanah laterit yang cukup melimpah dan belum dimanfaatkan secara optimal sebagai material konstruksi bernilai tambah. Kandungan mineral tanah laterit yang berbeda pada setiap lokasi menyebabkan karakteristik geopolimer yang dihasilkan juga dapat berbeda. Oleh karena itu, identifikasi sifat kimia dan mikrostruktur tanah laterit menjadi langkah penting sebelum material tersebut digunakan sebagai prekursor geopolimer.

Selain tanah laterit dan fly ash, kapur padam [$Ca(OH)_2$] juga diketahui memiliki peran penting dalam sistem geopolimer karena berfungsi sebagai sumber kalsium yang dapat mempercepat pembentukan produk hidrasi dan meningkatkan densitas matriks pengikat. Kehadiran kalsium dalam sistem aluminosilikat memungkinkan terbentuknya gel calcium aluminosilicate hydrate (C-A-S-H) yang dapat bekerja secara sinergis dengan gel sodium aluminosilicate hydrate (N-A-S-H) sehingga meningkatkan kekuatan dan stabilitas mikrostruktur material (Lekshmi & Sudhakumar, 2022; Yadav et al., 2026). Dengan demikian, kombinasi fly ash, kapur padam, dan tanah laterit berpotensi menghasilkan material geopolimer yang memiliki performa lebih baik dibandingkan penggunaan material tunggal.

Karakterisasi material merupakan tahapan fundamental dalam pengembangan geopolimer karena kualitas produk akhir sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia dan morfologi material penyusunnya. Analisis menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) mampu memberikan informasi mengenai kandungan oksida utama seperti SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, dan K_2O yang berperan dalam reaksi geopolimerisasi (Nuru et al., 2025). Sementara itu, Scanning Electron Microscopy (SEM) digunakan untuk mengevaluasi bentuk partikel, tingkat porositas, distribusi butiran, dan perkembangan struktur mikro material (Rahmawati et al., 2021). Informasi tersebut sangat penting untuk memahami

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

hubungan antara karakteristik material awal dengan potensi reaktivitasnya dalam proses pembentukan geopolimer.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji pemanfaatan fly ash sebagai material geopolimer (Luhar & Luhar, 2022; Rahmawati et al., 2021), penggunaan tanah laterit sebagai sumber aluminosilikat alternatif (Nuru et al., 2025), serta pengaruh material berkalsium terhadap peningkatan sifat mekanik geopolimer (Lekshmi & Sudhakumar, 2022; Tesanasin et al., 2022)Namun demikian, penelitian yang secara khusus mengkaji karakterisasi material geopolimer berbasis tanah laterit Kabupaten Gowa, fly ash Kota Baubau, dan kapur padam masih sangat terbatas. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada pengujian kuat tekan dan performa mekanik, sementara kajian mendalam mengenai karakteristik kimia dan mikrostruktur material lokal dari wilayah Sulawesi masih belum banyak dilaporkan.

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat kesenjangan penelitian (research gap) terkait pemahaman karakteristik material penyusun geopolimer yang berasal dari sumber daya lokal Sulawesi, khususnya tanah laterit Kabupaten Gowa dan fly ash Kota Baubau. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkarakterisasi material geopolimer berbasis fly ash, kapur padam, dan tanah laterit melalui pengujian X-Ray Fluorescence (XRF) dan Scanning Electron Microscopy (SEM). Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada pemanfaatan kombinasi material lokal dari dua wilayah berbeda di Pulau Sulawesi serta evaluasi karakteristik kimia dan mikrostruktur sebagai dasar pengembangan geopolimer berkelanjutan berbasis sumber daya lokal Indonesia. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah terhadap pengembangan material konstruksi rendah karbon sekaligus meningkatkan nilai tambah sumber daya alam dan limbah industri daerah.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental yang bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis karakteristik fisik, kimia, dan mikrostruktur material penyusun geopolimer yang terdiri atas fly ash, tanah laterit, dan kapur padam. Pendekatan kuantitatif dipilih karena penelitian ini berfokus pada pengukuran parameter fisik dan kimia material yang dapat dianalisis secara numerik serta digunakan untuk mengevaluasi potensi material sebagai prekursor geopolimer.

Lokasi dan Sumber Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas tanah laterit, kapur padam dan fly ash yang diperoleh dari Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan dan Kota Baubau Sulawesi Tenggara yang digunakan sebagai sumber kalsium dalam sistem geopolimer. Pemilihan material dilakukan berdasarkan ketersediaan sumber daya lokal dan kandungan aluminosilikat yang berpotensi mendukung proses geopolimerisasi.

Proses Persiapan Sampel dan Karakterisasi Material Penyusun Beton Geopolimer

Sebelum proses pembuatan benda uji beton geopolimer dilakukan, diperlukan tahapan persiapan dan karakterisasi material penyusun untuk mengetahui sifat kimia dan morfologi masing-masing bahan yang digunakan. Material yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas tanah laterit, fly ash, dan kapur padam. Karakterisasi material dilakukan melalui pengujian *X-Ray Fluorescence (XRF)* dan *Scanning Electron Microscope (SEM).* Pengujian *X-Ray Fluorescence (XRF)* dilakukan untuk memperoleh informasi

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

kuantitatif mengenai komposisi kimia material penyusun beton geopolimer dan pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan untuk mengamati karakteristik mikrostruktur material, meliputi bentuk partikel, tekstur permukaan, distribusi ukuran partikel, serta keberadaan pori atau retakan mikro.

Pengujian Karakteristik Fisik

Karakterisasi fisik dilakukan untuk mengetahui sifat dasar material yang berpengaruh terhadap proses geopolimerisasi. Pengujian yang dilakukan meliputi: Karakterisasi fisik material dilakukan melalui pengujian kadar air, berat jenis, dan distribusi ukuran butiran tanah laterit. Pengujian kadar air mengacu pada ASTM D2216 untuk menentukan kandungan air alami dalam sampel tanah sebelum dilakukan proses pengolahan dan pengujian lanjutan (ASTM International.(2021)., n.d.). Sampel ditimbang dalam kondisi basah, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105 ± 5°C hingga mencapai berat konstan. Nilai kadar air dihitung berdasarkan perbandingan antara berat air yang hilang selama proses pengeringan terhadap berat kering tanah dan dinyatakan dalam persentase (%). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi awal material yang dapat memengaruhi karakteristik fisik dan proses pencampuran geopolimer (ASTM International.(2021)., n.d.).

Selanjutnya, pengujian berat jenis dilakukan menggunakan metode piknometer berdasarkan ASTM D854 untuk menentukan nilai specific gravity (Gs) yang menggambarkan karakteristik mineral penyusun tanah laterit (ASTM International.(2023)., n.d.). Selain itu, analisis distribusi ukuran butiran dilakukan menggunakan metode analisis saringan sesuai ASTM D6913 (ASTM International. (2021)., n.d.). Sampel tanah yang telah dikeringkan diayak menggunakan serangkaian saringan standar untuk memperoleh persentase lolos dan tertahan pada setiap ukuran bukaan saringan. Hasil pengujian digunakan untuk menentukan gradasi material serta mengevaluasi pengaruh ukuran partikel terhadap luas permukaan spesifik, reaktivitas material, dan homogenitas campuran geopolimer.

Pengujian Karakteristik Kimia

Karakterisasi kimia dilakukan menggunakan metode X-Ray Fluorescence (XRF). Pengujian ini bertujuan untuk menentukan kandungan oksida utama seperti SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, K_2O, Na_2O, dan TiO_2 pada tanah laterit, fly ash, dan kapur padam.

Pengujian Mikrostruktur

Karakterisasi mikrostruktur dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM). Pengujian SEM bertujuan untuk mengamati bentuk partikel, tekstur permukaan, distribusi pori, dan morfologi material pada skala mikroskopis. Pengamatan mikrostruktur digunakan untuk memahami hubungan antara bentuk partikel dan potensi reaktivitas material selama proses geopolimerisasi. Selain itu, hasil SEM juga digunakan untuk mengidentifikasi tingkat homogenitas material dan indikasi pembentukan struktur pengikat geopolimer (Rahmawati et al., 2021).

Teknik Analisis Data

Data hasil pengujian kadar air, berat jenis, analisis saringan, XRF, dan SEM dianalisis menggunakan metode statistik deskriptif. Data kuantitatif disajikan dalam bentuk tabel, grafik, dan gambar untuk memudahkan interpretasi.

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

Interpretasi hasil XRF difokuskan pada kandungan oksida utama yang berperan dalam pembentukan gel aluminosilikat, sedangkan hasil SEM dianalisis berdasarkan karakteristik morfologi partikel dan struktur mikro material. Selanjutnya dilakukan pembahasan mengenai hubungan karakteristik fisik, kimia, dan mikrostruktur material terhadap potensi penggunaannya sebagai bahan dasar geopolimer berbasis sumber daya lokal Sulawesi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karekteristik Fisik Material Tanah Laterit

Data hasil pengujian karakteristik material tanah laterit tanah laterit diperlihatkan pada Tabel 1:

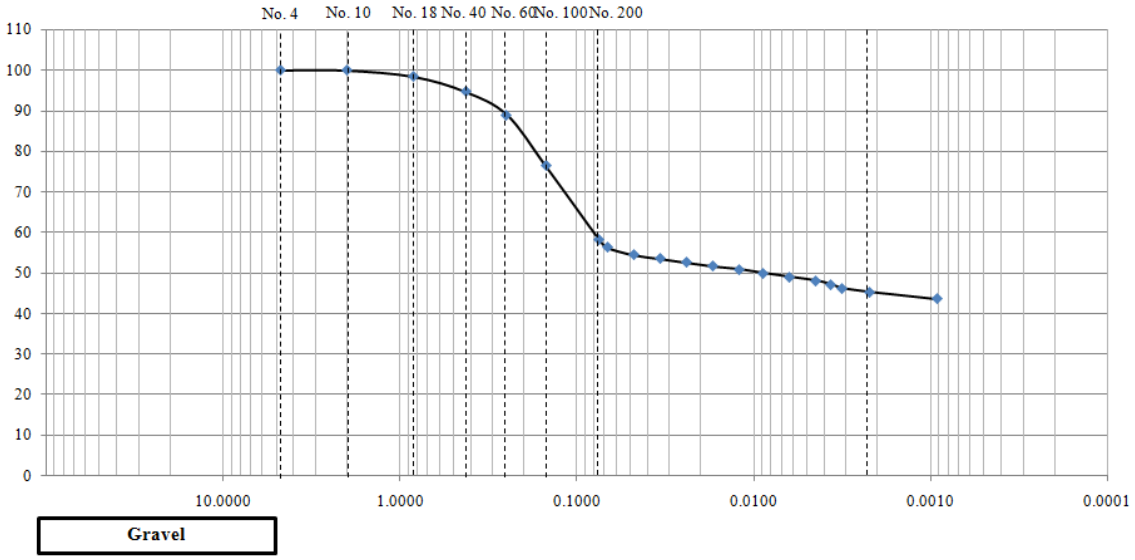
Tabel 1. Hasil Pemeriksaan Karakteristik Fisik Tanah Laterit

No.	Jenis Pemeriksaan	Hasil Pemeriksaan	
		Kab. Gowa Sulawesi Selatan	Kota Baubau Sulawesi Tenggara
1	Berat Jenis	2,74	2,675
2	Kadar Air	38,85 %	19,51%
3	Batas-batas Atterberg		
	Batas Cair (LL)	60,81 %	53,21%
	Batas Plastis (PL)	38,95 %	39,12%
	Indeks Plastis (PI)	21,86 %`	14,00%
4	Kompaksi		
	W_{opt}	31,38%	27,00%
	γ_{dry}	1,40 gr/cm^3	1,52 gr/cm^3
5	Analisa Saringan	> 50 % lolos saringan no.200	> 50 % lolos saringan no.200
6	Klasifikasi tanah		
	ASTM	CH (Lempung anorganik dengan Plastisitas tinggi, lempung“gemuk” (fat clays)	CH (Lempung anorganik dengan Plastisitas tinggi, lempung “gemuk” (fat clays)
	AASHTO	A – 7 – 5	A – 7 – 5
7	Kuat tekan	0,09 MPa	0,03 MPa

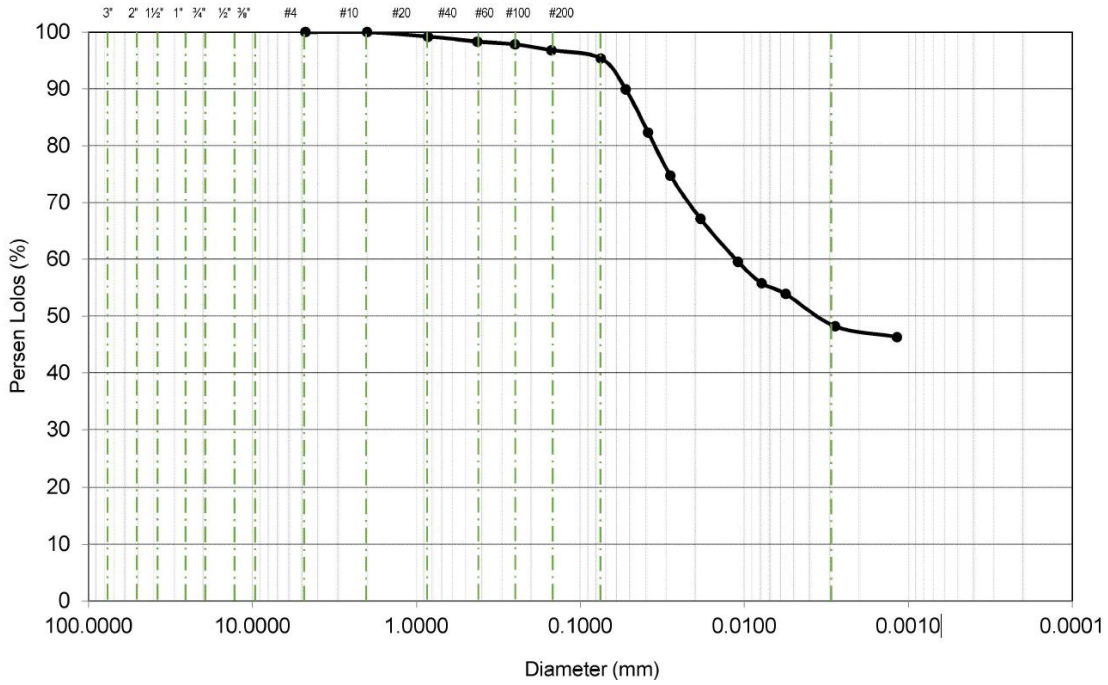
Berdasarkan Tabel 1 diatas hasil pengujian laboratorium, tanah dari Kabupaten Gowa dan Kota Baubau memiliki karakteristik yang hampir sama, yaitu tergolong lempung anorganik berplastisitas tinggi (CH) menurut klasifikasi USCS dan kelompok A-7-5 menurut AASHTO. Kedua tanah didominasi material halus dengan lebih dari 50% lolos saringan No. 200. Tanah Gowa memiliki kadar air, batas cair, indeks plastisitas, dan kuat tekan bebas yang lebih tinggi dibandingkan tanah Baubau, sedangkan tanah Baubau memiliki berat isi kering maksimum yang lebih besar dan kadar air optimum yang lebih rendah. Secara umum, kedua tanah memiliki daya dukung alami yang relatif rendah serta berpotensi mengalami

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

perubahan volume akibat perubahan kadar air, sehingga memerlukan perbaikan atau stabilisasi apabila digunakan sebagai tanah dasar konstruksi.



Gambar 1. Hubungan analisa saringan dan hidrometer Tanah Laterit Kab. Gowa



Gambar 2. Hubungan analisa saringan dan hidrometer Tanah Laterit Kota Baubau

Hasil analisa saringan gambar 1 dan gambar 2 menunjukkan bahwa tanah laterit dari Kabupaten Gowa dan Kota Baubau memiliki kandungan butiran halus yang sangat dominan, dengan persentase lolos saringan No. 200 (0,075 mm) masing-masing sebesar 76,03% dan 95,50%. Berdasarkan sistem klasifikasi AASHTO, kedua tanah termasuk dalam kelompok tanah berlempung (A-4, A-5, A-6, atau A-7). Dengan nilai batas cair (LL) sebesar 60,81% untuk tanah Gowa dan 53,21% untuk tanah Baubau, keduanya lebih lanjut diklasifikasikan ke dalam kelompok A-7-5, yaitu tanah lempung dengan

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

plastisitas tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa kedua tanah didominasi oleh fraksi halus, memiliki sifat kohesif, serta berpotensi mengalami perubahan volume yang cukup besar akibat perubahan kadar air.

Karakteristik Kimia Tanah Laterit

Tabel 2 menunjukan hasil pengujian X-Ray Fluorescence (XRF) bahwa tanah laterit dari Kabupaten Gowa dan Kota Baubau memiliki karakteristik kimia yang berbeda. Tanah laterit Kabupaten Gowa didominasi oleh Al_2O_3 sebesar 49,38% dan SiO_2 sebesar 34,81%, sedangkan tanah laterit Kota Baubau didominasi oleh SiO_2 sebesar 67,82% dan Fe_2O_3 sebesar 20,99%. Kandungan oksida lainnya seperti MnO, TiO_2, dan K_2O ditemukan dalam jumlah yang relatif kecil pada kedua sampel. Perbedaan komposisi ini menunjukkan adanya variasi proses pelapukan dan kondisi geologi pada masing-masing lokasi yang memengaruhi karakteristik mineral penyusun tanah laterit.

Tabel 2. Karakteristik Kimia Tanah Laterit dengan XRF

Komposisi	Konsentrasi (%)	
	Tanah Laterite Kab. Gowa	Tanah Laterite Kota Baubau
Fe_2O_3	12,49	20,99
Al_2O_3	49,38	0,57
SiO_2	34,81	67,82
MnO	0,10	0,48
TiO_2	1,39	10,00
K_2O	0,35	0,01

Kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 yang tinggi merupakan indikator penting dalam pengembangan material geopolimer karena kedua oksida tersebut berperan sebagai sumber utama aluminosilikat dalam proses geopolimerisasi. Tanah laterit Kabupaten Gowa berpotensi sebagai sumber alumina, sedangkan tanah laterit Kota Baubau berpotensi sebagai sumber silika. Selain itu, kandungan Fe_2O_3 yang relatif tinggi pada tanah laterit Kota Baubau dapat berkontribusi terhadap pembentukan struktur ferro-aluminosilikat yang berpengaruh terhadap sifat mekanik dan durabilitas geopolimer. Hasil ini menunjukkan bahwa kedua material memiliki potensi yang baik sebagai bahan prekursor geopolimer dan dapat saling melengkapi dalam menyediakan unsur-unsur utama yang diperlukan untuk pembentukan matriks aluminosilikat yang stabil (Kriven et al., 2024; Provis & van Deventer, 2014).

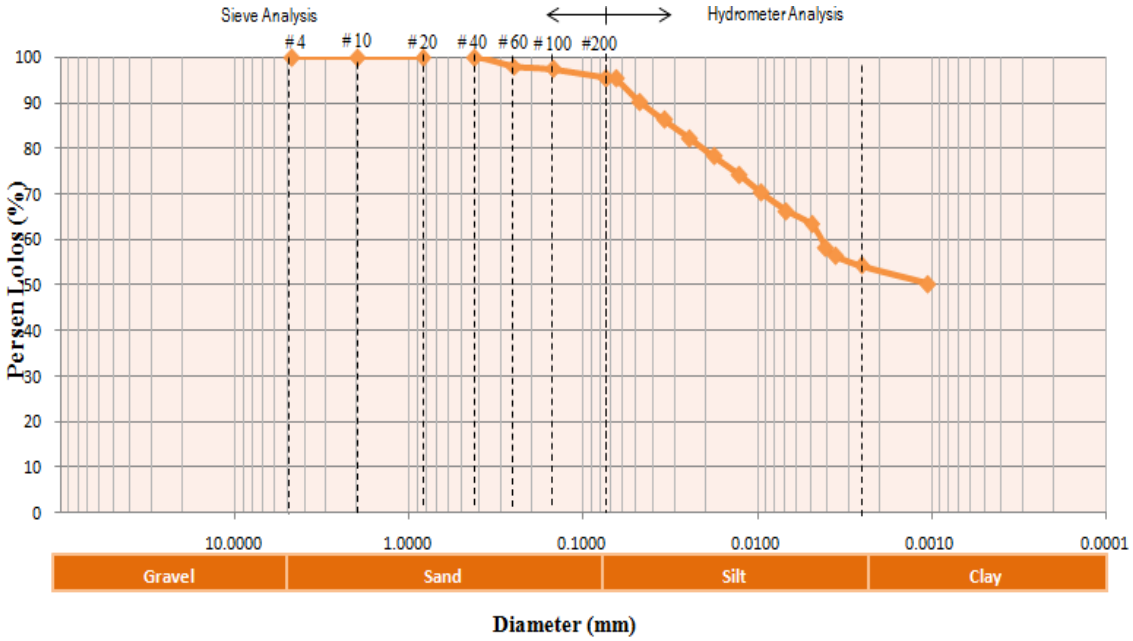
Karakteristik Fisik Abu Terbang

Tabel 3 menunjukan hasil pemeriksaan karakteristik fisik menunjukkan bahwa abu terbang dari PLTU Jeneponto memiliki berat jenis sebesar 2,65, sedangkan abu terbang dari PLTU Baruta sebesar 2,50. Selain itu, kedua sampel memiliki ukuran partikel yang sangat halus dengan lebih dari 90% material lolos saringan No. 200 (0,075 mm).

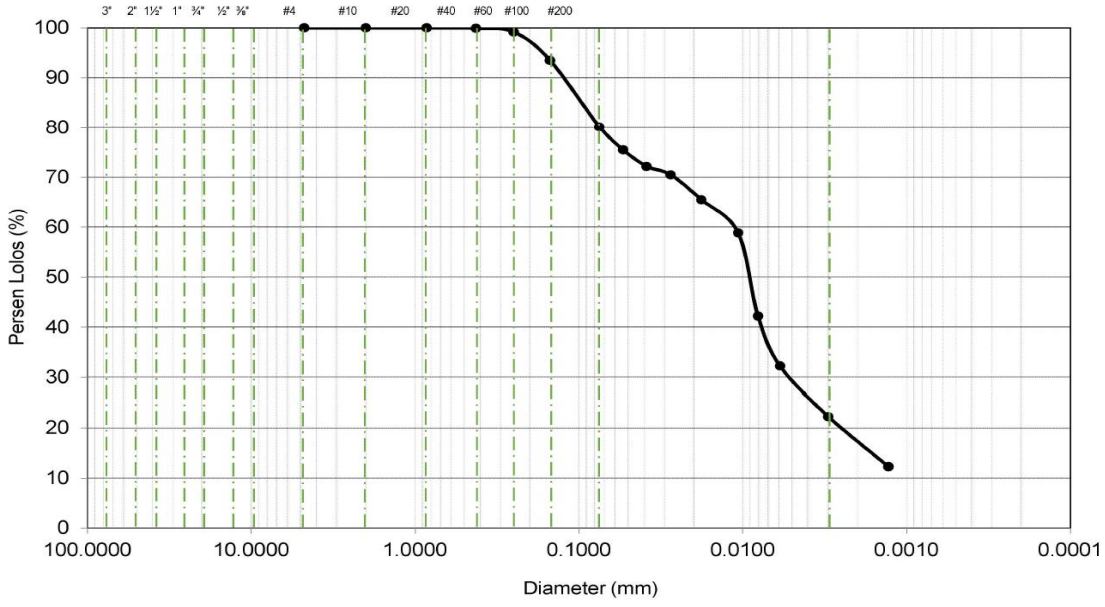
Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

Tabel 3. Hasil Pemeriksaan Karakteristik Fisik Abu Terbang

No.	Jenis Pemeriksaan	Hasil Pemeriksaan	
		Abu Terbang PLTU Jeneponto	Abu Terbang PLTU Baruta
1.	Berat Jenis	2,65	2.50
2.	Analisa Saringan dan Hidrometer	> 90 % lolos saringan no. 200	> 90 % lolos saringan no. 200



Gambar 3. Hubungan Analisa Saringan dan Hidrometer Abu Terbang PLTU Jeneponto



Gambar 4. Hubungan Analisa Saringan dan Hidrometer Abu Terbang PLTU Baruta

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

Gambar 3 dan gambar 4 menunjukan hasil analisis distribusi ukuran butiran pada kedua grafik menunjukkan bahwa tanah laterit didominasi oleh fraksi berbutir halus. Kurva gradasi memperlihatkan bahwa lebih dari 80–90% material lolos saringan No. 200 (0,075 mm), yang mengindikasikan dominasi partikel lanau (silt) dan lempung (clay) dibandingkan fraksi pasir dan kerikil. Pola kurva yang menurun secara bertahap menunjukkan distribusi ukuran partikel yang relatif kontinu, dengan proporsi partikel halus yang semakin meningkat pada ukuran di bawah 0,075 mm berdasarkan hasil analisis hidrometer. Karakteristik ini menunjukkan bahwa tanah laterit memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, sehingga berpotensi meningkatkan reaktivitas material dalam proses geopolimerisasi karena mempercepat pelarutan senyawa silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) selama reaksi aktivasi alkali. Dominasi fraksi halus pada tanah laterit juga sejalan dengan karakteristik umum material laterit yang terbentuk akibat proses pelapukan intensif di daerah tropis dan memiliki potensi yang baik sebagai prekursor geopolimer berbasis aluminosilikat (Abdullah et al., 2012; El Alouani et al., 2024; Nuru et al., 2025; Ricciotti et al., 2025; Xu et al., 2026).

Karakteristik Kimia Abu Terbang

Tabel 4 menunjukan hasil pengujian X-Ray Fluorescence (XRF) bahwa abu terbang dari PLTU Jeneponto dan PLTU Baruta didominasi oleh oksida utama SiO_2, Al_2O_3, dan Fe_2O_3, yang merupakan komponen penting dalam pembentukan material geopolimer. Abu terbang PLTU Baruta memiliki kandungan SiO_2 (45,75%), Al_2O_3 (23,79%), dan Fe_2O_3 (20,71%) yang lebih tinggi dibandingkan abu terbang PLTU Jeneponto, yaitu masing-masing sebesar 34,63%, 19,16%, dan 19,96%. Sebaliknya, abu terbang PLTU Jeneponto memiliki kandungan CaO (12,74%) dan MgO (8,10%) yang lebih tinggi dibandingkan abu terbang PLTU Baruta, yaitu 2,46% dan 2,96%. Tingginya kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 menunjukkan bahwa kedua abu terbang berpotensi baik sebagai sumber aluminosilikat untuk proses geopolimerisasi, sedangkan kandungan CaO yang lebih tinggi pada abu terbang PLTU Jeneponto dapat mempercepat pembentukan gel pengikat dan perkembangan kekuatan awal material geopolimer. Secara keseluruhan, kedua abu terbang memenuhi karakteristik kimia yang mendukung penggunaannya sebagai material prekursor geopolimer berkelanjutan (Luukkonen et al., 2018; Xu et al., 2026).

Tabel 4. Karakteristik Kimia Abu Terbang dengan XRF

Komposisi	Konsentrasi (%)	
	Abu Terbang PLTU Jeneponto	Abu Terbang PLTU Baruta
Fe_2O_3	19,96	20,71
Al_2O_3	19,16	23,79
SiO_2	34,63	45,75
MnO	0,25	-
TiO_2	1,26	0,84
K_2O	1,33	1,23
MgO	8,1	2,96

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

SO_3	1,80	1,52
CaO	12,74	2,46
Cr_2O_3	0,07	-
CoO	0,05	-
SrO	0,13	0,06
BaO	0,21	-
Pr_6O_{11}	0,05	-
Nd_2O_3	0,07	-

Karakteristik Fisik Kapur Padam

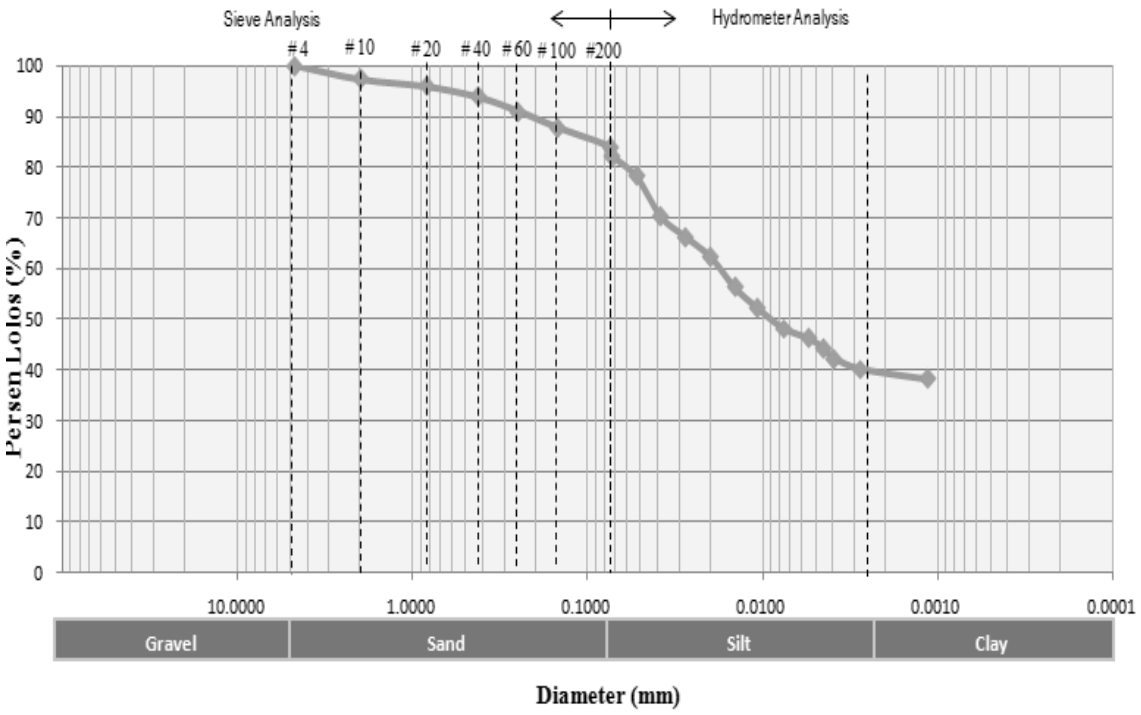
Tabel 4 menunjukan hasil pemeriksaan karakteristik fisik kapur padam bahwa kapur padam dari Kabupaten Gowa memiliki nilai berat jenis sebesar 2,25, sedangkan kapur padam dari Kota Baubau memiliki nilai berat jenis yang lebih tinggi yaitu 2,70. Perbedaan nilai berat jenis ini mengindikasikan adanya variasi komposisi mineral dan tingkat kemurnian material pada masing-masing sumber kapur padam. Selain itu, hasil analisis saringan dan hidrometer menunjukkan bahwa kedua sampel memiliki ukuran partikel yang relatif halus dengan lebih dari 50% material lolos saringan No. 200 (0,075 mm).

Tabel 4. Hasil Pemeriksaan Karakteristik Fisik Kapur Padam

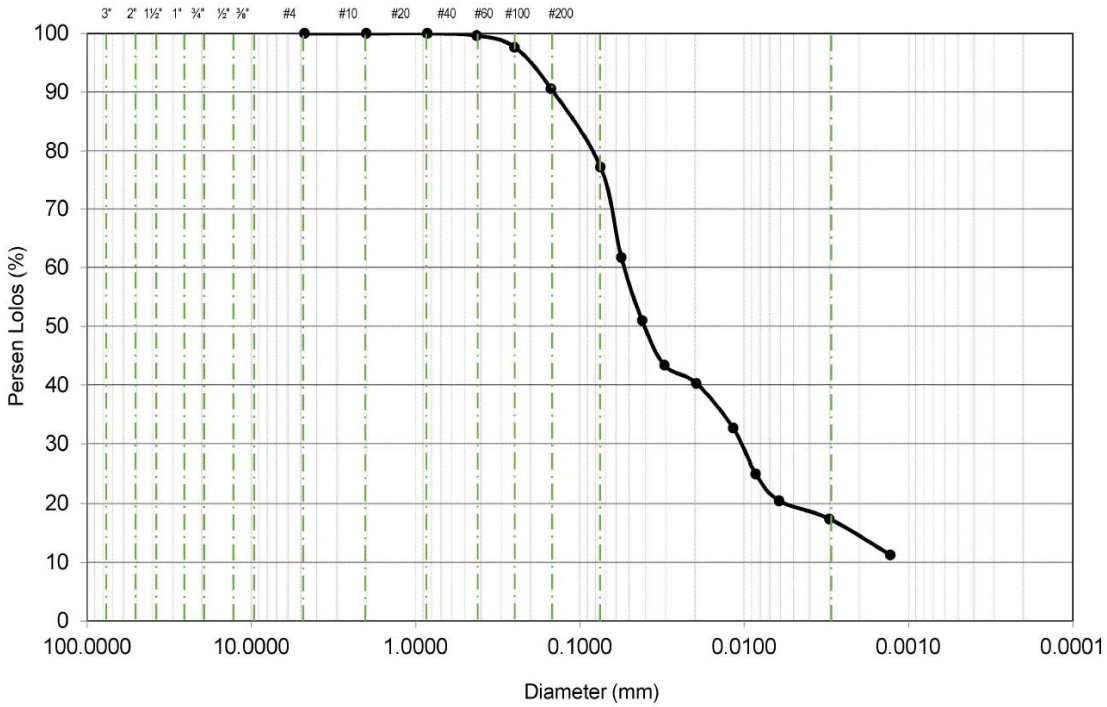
No.	Jenis Pemeriksaan	Hasil Pemeriksaan	
		Kapur Padam Kab. Gowa	Kapur Padam Kota Baubau
1.	Berat Jenis	2,25	2,70
2.	Analisa Saringan dan Hidrometer	> 50% lolos No.200	> 50% lolos No.200

Gambar 5 dan gambar 6 menunjukan hasil analisis distribusi ukuran butiran pada kedua grafik menunjukkan bahwa material kapur padam didominasi oleh partikel berukuran halus. Kurva gradasi memperlihatkan bahwa hampir seluruh material lolos saringan kasar hingga saringan No. 40, kemudian mengalami penurunan bertahap pada ukuran partikel yang lebih kecil berdasarkan hasil analisis saringan dan hidrometer. Pada saringan No. 200 (0,075 mm), lebih dari 50% material masih lolos, yang menunjukkan dominasi fraksi lanau (silt) dan partikel halus lainnya. Pola kurva yang relatif kontinu mengindikasikan distribusi ukuran partikel yang cukup seragam sehingga berpotensi menghasilkan campuran yang lebih homogen.

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.



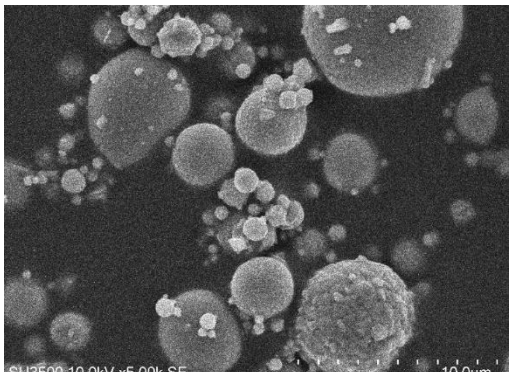
Gambar 5. Hubungan Analisa Saringan dan Hidrometer Kapur Padam Kab. Gowa



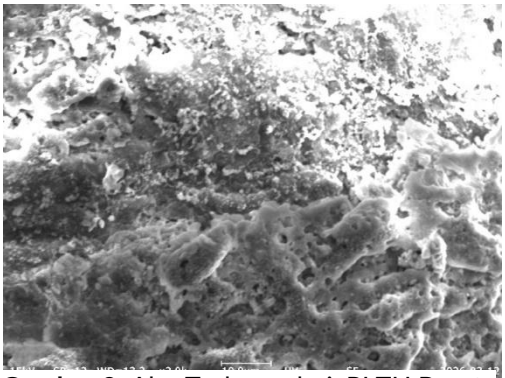
Gambar 6. Hubungan Analisa Saringan dan Hidrometer Kapur Padam Kota Baubau

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

Karakteristik Mikrostruktur Berdasarkan SEM

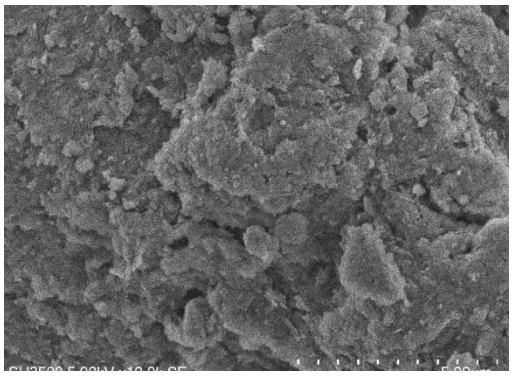


Gambar 7. Abu Terbang dari PLTU Jeneponto

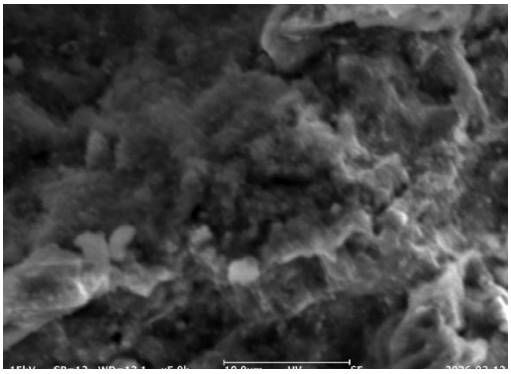


Gambar 8. Abu Terbang dari PLTU Baruta

Hasil pengamatan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menggunakan alat Coxem Model EM-30N User Manual NS 4.1.5 Version dari Korea menunjukkan bahwa abu terbang dari PLTU Jeneponto dan PLTU Baruta memiliki karakteristik morfologi yang berbeda. Abu terbang PLTU Jeneponto didominasi oleh partikel berbentuk sferis (*spherical particles*) dengan permukaan relatif halus dan ukuran yang bervariasi, yang merupakan ciri khas fly ash hasil pembakaran batubara pada temperatur tinggi. Bentuk partikel yang bulat mengindikasikan proses pelelehan mineral yang sempurna sehingga berpotensi meningkatkan kemampuan alir (*workability*) dan reaktivitas material selama proses geopolimerisasi. Sebaliknya, abu terbang PLTU Baruta menunjukkan morfologi yang lebih tidak beraturan dengan tekstur permukaan kasar, berpori, dan cenderung mengalami aglomerasi. Struktur ini mengindikasikan adanya partikel yang belum mengalami pelelehan sempurna selama proses pembakaran, sehingga menghasilkan luas permukaan spesifik yang lebih besar dan berpotensi meningkatkan interaksi dengan larutan aktivator alkali. Perbedaan morfologi tersebut menunjukkan bahwa abu terbang PLTU Jeneponto cenderung memiliki karakteristik yang lebih ideal sebagai prekursor geopolimer karena dominasi partikel sferis yang kaya aluminosilikat, sedangkan abu terbang PLTU Baruta memiliki potensi reaktivitas tambahan akibat tekstur permukaan yang lebih kasar dan berpori. Karakteristik mikrostruktur ini berperan penting dalam mekanisme pelarutan silika dan alumina serta pembentukan gel aluminosilikat yang menentukan kinerja akhir material geopolymer (Xu et al., 2026).



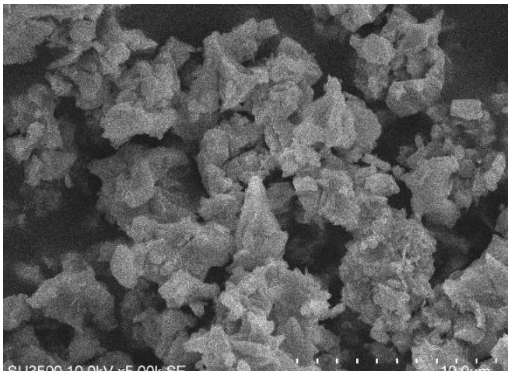
Gambar 9. Tanah Laterite dari Kab. Gowa



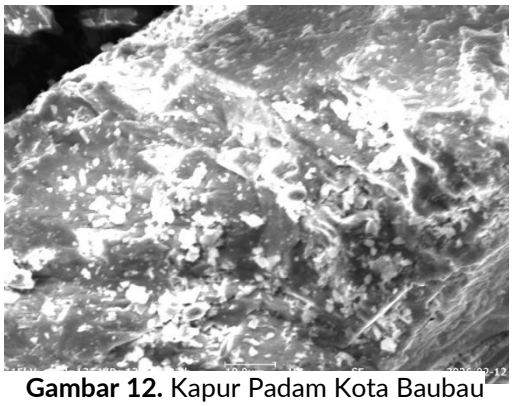
Gambar 10. Tanah Laterite dari Kota Baubau

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

Hasil pengamatan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menggunakan alat Coxem Model EM-30N User Manual NS 4.1.5 Version dari Korea menunjukkan bahwa tanah laterit dari Kabupaten Gowa dan Kota Baubau memiliki morfologi yang relatif berbeda. Tanah laterit Kabupaten Gowa memperlihatkan struktur partikel yang lebih padat dengan bentuk tidak beraturan (irregular), permukaan kasar, serta adanya aglomerasi butiran halus yang membentuk massa yang relatif kompak. Morfologi ini mengindikasikan dominasi mineral aluminosilikat hasil pelapukan yang masih terikat kuat dan berpotensi memberikan kestabilan struktur selama proses geopolimerisasi. Sebaliknya, tanah laterit Kota Baubau menunjukkan tekstur yang lebih berpori dengan struktur yang lebih longgar dan rongga-rongga mikro yang lebih jelas. Keberadaan pori dan permukaan yang kasar menunjukkan luas permukaan spesifik yang lebih besar sehingga berpotensi meningkatkan proses pelarutan silika dan besi selama aktivasi alkali. Perbedaan morfologi ini sejalan dengan hasil pengujian XRF yang menunjukkan bahwa tanah laterit Gowa kaya akan Al_2O_3, sedangkan tanah laterit Baubau didominasi oleh SiO_2 dan Fe_2O_3. Secara keseluruhan, kedua material memiliki karakteristik mikrostruktur yang mendukung pemanfaatannya sebagai prekursor geopolimer, dimana struktur yang lebih padat pada tanah laterit Gowa berpotensi meningkatkan stabilitas matriks, sedangkan struktur berpori pada tanah laterit Baubau dapat meningkatkan reaktivitas selama proses geopolimerisasi (Nuru et al., 2025; Xu et al., 2026).



Gambar 11. Kapur Padam dari Kab. Gowa



Gambar 12. Kapur Padam Kota Baubau

Hasil pengamatan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menggunakan alat Coxem Model EM-30N User Manual NS 4.1.5 Version dari Korea menunjukkan kapur padam dari Kabupaten Gowa dan Kota Baubau menunjukkan karakteristik yang berbeda. Kapur padam Kabupaten Gowa memiliki bentuk partikel yang tidak beraturan, berukuran relatif kecil, serta tersusun dalam agregat-agregat yang membentuk struktur berpori dengan permukaan yang kasar. Kondisi ini menunjukkan luas permukaan spesifik yang lebih besar sehingga berpotensi meningkatkan reaktivitas material dalam proses geopolimerisasi. Sementara itu, kapur padam Kota Baubau memperlihatkan struktur yang lebih padat dan teraglomerasi membentuk gumpalan yang lebih besar dengan permukaan yang cenderung lebih kompak. Adanya aglomerasi partikel mengindikasikan berkurangnya luas permukaan efektif yang dapat berinteraksi dengan larutan aktivator. Perbedaan morfologi tersebut menunjukkan bahwa kapur padam Kabupaten Gowa diperkirakan memiliki kemampuan reaksi yang lebih baik dibandingkan kapur padam Kota Baubau karena memiliki struktur yang lebih terbuka dan luas permukaan yang lebih besar. Karakteristik mikrostruktur ini dapat mempengaruhi proses pelarutan ion kalsium, pembentukan

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

produk geopolimer, serta perkembangan sifat mekanik beton geopolimer yang dihasilkan (Luukkonen et al., 2018; Nuru et al., 2025).

PEMBAHASAN

Karakteristik kimia tanah laterit menunjukkan bahwa tanah laterit Kabupaten Gowa kaya akan Al_2O_3 (49,38%), sedangkan tanah laterit Kota Baubau didominasi oleh SiO_2 (67,82%) dan Fe_2O_3 (20,99%). Kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 yang tinggi merupakan syarat utama material prekursor geopolimer karena berperan dalam pembentukan jaringan aluminosilikat yang menentukan kekuatan dan stabilitas material. Selain itu, keberadaan Fe_2O_3 pada tanah laterit Baubau berpotensi meningkatkan pembentukan struktur ferro-aluminosilikat yang dapat memperbaiki sifat mekanik dan durabilitas geopolimer. Dengan demikian, kombinasi kedua sumber laterit tersebut berpotensi menghasilkan komposisi kimia yang ideal untuk proses geopolimerisasi menunjukkan karakteristik yang sejalan dengan hasil penelitian Kriven et al., (2024); Madirisha et al., 2024; dan Ricciotti et al., (2025). yang melaporkan bahwa material laterit dengan kandungan aluminosilikat tinggi memiliki potensi besar sebagai prekursor geopolymer.

Karakterisasi fly ash menunjukkan bahwa abu terbang PLTU Baruta memiliki kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 yang lebih tinggi, sedangkan fly ash PLTU Jeneponto memiliki kandungan CaO yang lebih besar. Tingginya kandungan aluminosilikat pada fly ash mendukung pembentukan gel N-A-S-H, sementara kandungan kalsium yang tinggi dapat mempercepat pembentukan gel C-A-S-H yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan awal geopolimer. Kombinasi kedua mekanisme tersebut diketahui mampu menghasilkan matriks geopolimer yang lebih padat dan stabil sehingga meningkatkan performa material secara keseluruhan. Hasil ini sejalan dengan penelitian Luukkonen et al., (2018) dan Skane et al., (2025) yang menjelaskan bahwa kombinasi sistem aluminosilikat dan kalsium mampu menghasilkan matriks geopolimer yang lebih padat, meningkatkan kekuatan awal, serta memperbaiki sifat mekanik jangka panjang material.

Hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa fly ash Jeneponto memiliki morfologi partikel sferis yang lebih homogen, sedangkan fly ash Baruta dan tanah laterit Baubau memiliki permukaan yang lebih kasar dan berpori. Struktur berpori dan luas permukaan yang besar dapat meningkatkan reaktivitas material terhadap larutan aktivator alkali, sedangkan partikel sferis meningkatkan homogenitas dan workability campuran. Sementara itu, tanah laterit Gowa yang memiliki struktur lebih padat berpotensi meningkatkan kestabilan matriks geopolimer. Kondisi ini menunjukkan bahwa karakteristik mikrostruktur masing-masing material saling melengkapi dalam mendukung pembentukan geopolimer berbasis sumber daya lokal yang reaktif, padat, dan berkelanjutan, sebagimana dilaporkan oleh Kriven et al., (2024) dan Nuru et al., (2025).

KESIMPULAN

Material lokal berupa tanah laterit Kabupaten Gowa dan Kota Baubau, fly ash PLTU Jeneponto dan PLTU Baruta, serta kapur padam memiliki karakteristik fisik, kimia, dan mikrostruktur yang mendukung pemanfaatannya sebagai bahan penyusun geopolimer. Analisis XRF menunjukkan bahwa tanah laterit Gowa kaya akan Al_2O_3, tanah laterit Baubau kaya akan SiO_2 dan Fe_2O_3, sedangkan fly ash memiliki kandungan aluminosilikat dan kalsisum yang berperan penting dalam proses geopolimerisasi. Karakteristik fisik yang didominasi partikel halus serta hasil SEM yang menunjukkan morfologi reaktif dan luas permukaan yang tinggi mengindikasikan potensi yang baik dalam pembentukan matriks

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

geopolimer yang stabil. Dengan demikian, kombinasi material lokal tersebut berpotensi digunakan sebagai bahan baku geopolimer berkelanjutan yang dapat mendukung pengembangan material konstruksi ramah lingkungan sekaligus meningkatkan pemanfaatan sumber daya alam dan limbah industri lokal. Implikasi hasil penelitian menunjukkan bahwa tanah laterit, fly ash, dan kapur padam lokal berpotensi digunakan sebagai bahan baku beton geopolimer yang ramah lingkungan dan mendukung pengembangan material konstruksi berkelanjutan berbasis sumber daya lokal. Untuk penelitian selanjutnya melakukan analisis mikrostruktur setelah proses geopolimerisasi untuk memahami hubungan antara karakteristik material dan kinerja beton yang dihasilkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada laboratorium pengujian material dan seluruh pihak yang telah memberikan dukungan fasilitas, bantuan teknis, serta pendampingan selama pelaksanaan penelitian ini. Apresiasi juga disampaikan kepada instansi dan pihak terkait yang telah membantu dalam penyediaan sampel tanah laterit, fly ash, dan kapur padam yang digunakan dalam penelitian. Ucapan terima kasih turut diberikan kepada seluruh tenaga laboratorium dan pihak yang terlibat dalam proses pengujian karakteristik fisik, kimia, dan mikrostruktur material sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Dukungan dan kerja sama yang diberikan sangat berarti dalam penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Abdullah, M. M. A. B., Hussin, K., Bnhussain, M., Ismail, K. N., Yahya, Z., & Abdul Razak, R. (2012). Fly Ash-based Geopolymer Lightweight Concrete Using Foaming Agent. *International Journal of Molecular Sciences*, *13*(6), 7186–7198. https://doi.org/10.3390/ijms13067186

ASTM International.(2021). (n.d.). *ASTM D2216-19: Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. ASTM International.*

ASTM International.(2023). (n.d.). *ASTM D854-23: Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. ASTM International.*

ASTM International. (2021). (n.d.). *ASTM D6913/D6913M-17: Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis. ASTM International.*

Cyriaque Kaze, R., Naghizadeh, A., Tchadjie, L., Adesina, A., Noel Yankwa Djobo, J., Deutou Nemaleu, J. G., Kamseu, E., Chinje Melo, U., & Tayeh, B. A. (2022). Lateritic soils based geopolymer materials: A review. *Construction and Building Materials*, *344*, 128157. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128157

de Matos Riscado, A. L. L., Vieira, C. M. F., Monteiro, S. N., de Azevedo, A. R. G., & Marvila, M. T. (2025). Parameter optimization for fly ash geopolymer mixtures: molarity, silica modulus, and solution/binder influence. *Scientific Reports*, *15*(1), 20355. https://doi.org/10.1038/s41598-025-06076-9

El Alouani, M., Saufi, H., Aouan, B., Bassam, R., Alehyen, S., Rachdi, Y., El Hadki, H., El Hadki, A., Mabrouki, J., Belaaouad, S., Ez-Zaki, H., & Barka, N. (2024). A comprehensive review of synthesis, characterization, and applications of aluminosilicate materials-based geopolymers. *Environmental Advances*, *16*, 100524. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100524

Gaurav, G., Kandpal, S. C., Mishra, D., & Kotoky, N. (2024). A comprehensive review on fly ash-based geopolymer: a pathway for sustainable future. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, *13*(1), 100–144. https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2258122

Kriven, W. M., Leonelli, C., Provis, J. L., Boccaccini, A. R., Attwell, C., Ducman, V. S., Ferone, C., Rossignol, S., Luukkonen, T., van Deventer, J. S. J., Emiliano, J. V., & Lombardi, J. E. (2024). Why

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

geopolymers and alkali-activated materials are key components of a sustainable world: A perspective contribution. *Journal of the American Ceramic Society*, *107*(8), 5159–5177. https://doi.org/10.1111/jace.19828

Lekshmi, S., & Sudhakumar, J. (2022). Engineering and Durability Performances of Fly Ash Based Geopolymer Mortar Containing Aluminosilicate Rich Flood Soil Waste With and Without Lime Treatment. *Silicon*, *14*(11), 6141–6156. https://doi.org/10.1007/s12633-021-01391-y

Luhar, I., & Luhar, S. (2022). A Comprehensive Review on Fly Ash-Based Geopolymer. *Journal of Composites Science*, *6*(8), 219. https://doi.org/10.3390/jcs6080219

Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2018). One-part alkali-activated materials: A review. *Cement and Concrete Research*, *103*, 21–34. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.001

Madirisha, M. M., Dada, O. R., & Ikotun, B. D. (2024). Chemical fundamentals of geopolymers in sustainable construction. *Materials Today Sustainability*, *27*, 100842. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100842

Nuru, Z. K., Elsaigh, W. A., & Kearsley, E. P. (2025). Characteristics of Laterite Soil for Potential Geopolymer Applications. *Minerals*, *15*(7), 719. https://doi.org/10.3390/min15070719

Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (Ed.). (2014). *Alkali Activated Materials* (Vol. 13). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2

Rahmawati, C., Aprilia, S., Saidi, T., & Aulia, T. B. (2021). Mineralogical, Microstructural and Compressive Strength Characterization of Fly Ash as Materials in Geopolymer Cement. *Elkawnie*, *7*(1), 1. https://doi.org/10.22373/ekw.v7i1.7787

Ricciotti, L., Frettoloso, C., Franchino, R., Pisacane, N., & Aversa, R. (2025). Geopolymer Materials: Cutting-Edge Solutions for Sustainable Design Building. *Sustainability*, *17*(16), 7483. https://doi.org/10.3390/su17167483

Skane, R., Jones, F., van Riessen, A., Jamieson, E., Sun, X., & Rickard, W. D. A. (2025). Optimisation of activator solutions for geopolymer synthesis: Thermochemical stability, sequencing and standardisation. *Ceramics International*, *51*(28), 59419–59429. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.10.162

Tesanasin, T., Suksiripattanapong, C., Van Duc, B., Tabyang, W., Phetchuay, C., Phoo-ngernkham, T., Sukontasukkul, P., & Chindaprasirt, P. (2022). Engineering properties of marginal lateritic soil stabilized with one-part high calcium fly ash geopolymer as pavement materials. *Case Studies in Construction Materials*, *17*, e01328. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01328

Xu, L.-Y., Lao, J.-C., Shi, D.-D., Cai, J., Xie, T.-Y., & Huang, B.-T. (2026). Recent advances in High-Strength Engineered Geopolymer Composites (HS-EGC): Bridging sustainable construction and resilient infrastructure. *Cement and Concrete Composites*, *165*, 106307. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.106307

Yadav, J. S., Shekhawat, P., & Kumar, P. (2026). Mechanical and Microstructural Properties of Cohesive Soil Stabilized with Fly Ash and Lime Sludge Based Geopolymer. *Geotechnical and Geological Engineering*, *44*(1), 61. https://doi.org/10.1007/s10706-025-03587-0

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.