Jurnal Serambi Engineering JSE
Volume XI, No.3, Juli 2026 Hal 20930 - 20937
p-ISSN : 2528-3561
e-ISSN : 2541-1934

Pengaruh Variasi Konsentrasi Hidrogen Peroksida (H_2O_2) sebagai *Foaming Agent* terhadap Karakteristik Fisik *Foam Geopolimer* Berbasis *Fly ash*

Nur Fajar Aprilia Sari[1], Wiwik Dwi Pratiwi[2], Ayu Nindyapuspa[3], Laksmana Angga Parsada[4], Milasari[5], Indra Leo Firmansyah[6]

[1,2,3,6]Program Studi Teknik Pengolahan Limbah, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
[4]Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
[5]Program Studi Teknik Bangunan Kapal, Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
***Koresponden email**: nurfajar@ppns.ac.id

Diterima: 27 Juli 2026 Disetujui: 4 Agustus 2026

Abstract
The use of fly ash as a component in geopolymers is one way to increase the added value of coal combustion waste while supporting the development of more environmentally friendly construction materials. This study aims to utilize fly ash waste from coal-fired power plants as a geopolymer foam and to analyze the effect of varying H_2O_2 concentrations on the physical characteristics of fly ash-based geopolymer foam. The constituent materials were first characterized using X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), loss on ignition (LOI), and particle size analysis (PSA) tests. Next, geopolymer foam was prepared with H_2O_2 concentrations of 1%, 2%, 3%, and 4% by mass relative to the fly ash. The physical characteristics observed included density and water absorption. The results of the study indicate that fly ash has high silica and alumina content, thereby meeting the requirements as a geopolymer precursor. An increase in H_2O_2 concentration caused the density of the geopolymer foam to decrease from 736 kg/m³ to 570.7 kg/m³, while water absorption increased from 25% to 43.3%. MANOVA analysis confirmed a significant simultaneous effect on both parameters ($p < 0.001$). These results indicate that H_2O_2 concentration affects the physical characteristics of fly ash-based geopolymer foam.
Keywords*: density, fly ash, geopolymer foam, hydrogen peroxide, water absorption*

Abstrak
Pemanfaatan *fly ash* sebagai material penyusun geopolimer merupakan salah satu upaya untuk meningkatkan nilai tambah limbah hasil pembakaran batubara sekaligus mendukung pengembangan material konstruksi yang lebih ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan limbah *fly ash* dari PLTU sebagai *foam geopolimer* dan menganalisis pengaruh variasi konsentrasi H_2O_2 terhadap karakteristik fisik *foam geopolimer* berbasis *fly ash*. Material penyusun terlebih dahulu dikarakterisasi menggunakan pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF), *X-Ray Diffraction* (XRD), *Loss on Ignition* (LOI), dan *Particle Size Analysis* (PSA). Selanjutnya dilakukan pembuatan *foam geopolimer* dengan variasi konsentrasi H_2O_2 sebesar 1%, 2%, 3%, dan 4% terhadap massa *fly ash*. Karakteristik fisik yang diamati meliputi densitas dan daya serap air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki kandungan silika dan alumina yang tinggi sehingga memenuhi syarat sebagai prekursor geopolimer. Peningkatan konsentrasi H_2O_2 menyebabkan densitas *foam geopolimer* menurun berturut-turut sebesar 736 kg/m³; 664 kg/m³; 602,7 kg/m³; dan 570,7 kg/m³, sedangkan daya serap air meningkat berturut-turut sebesar 25%; 36,7%; 40,2%; dan 43,3%. Analisis MANOVA mengonfirmasi pengaruh signifikan secara simultan terhadap kedua parameter ($p < 0,001$). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa konsentrasi H_2O_2 berpengaruh terhadap karakteristik fisik *foam geopolimer* berbasis *fly ash*.
Kata Kunci: *densitas, fly ash, foam geopolimer, hidrogen peroksida, daya serap air*

1. Pendahuluan

Peningkatan aktivitas industri di berbagai sektor mengakibatkan meningkatnya jumlah limbah yang dihasilkan, dengan produksi limbah global diperkirakan mencapai 3,4 miliar ton pada tahun 2050 [1]. Salah satu limbah industri yang menjadi perhatian adalah *fly ash* (abu terbang), yaitu residu berbentuk partikel halus yang terbawa bersama gas buang hasil pembakaran batu bara [2]. Produksi *fly ash* secara global

diperkirakan mencapai lebih dari 800 juta ton setiap tahun [3]. Salah satu penyumbang terbesarnya adalah industri Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). *Fly ash* yang tidak dimanfaatkan kerap menimbulkan gangguan bagi masyarakat di sekitar lokasi pembangkit, seperti yang terjadi pada PLTU Paiton [4]. Hal ini sehingga diperlukan alternatif pemanfaatan yang dapat memberikan nilai tambah sekaligus mengurangi dampak pencemaran lingkungan.

Tingginya kandungan silika dan alumina pada *fly ash* membuka peluang pemanfaatannya sebagai bahan baku pembuatan beton ringan melalui teknologi geopolimer, dengan densitas beton ringan berkisar antara 300–1600 kg/m³ [5]. Salah satu inovasi yang berkembang adalah *geopolymer foam concrete* atau *foam geopolimer*, yaitu material yang diperoleh melalui penggabungan teknologi geopolimer dengan struktur berpori khas beton busa, sehingga dihasilkan material ringan dengan densitas rendah, kemampuan isolasi termal yang baik, serta emisi karbon yang lebih rendah dibandingkan binder sementasi konvensional [6]. Pembentukan pori pada *foam geopolimer* dapat dilakukan melalui pendekatan chemical foaming, salah satunya menggunakan hidrogen peroksida (H_2O_2) sebagai *foaming agent* yang terurai menghasilkan gas oksigen secara in-situ di dalam pasta geopolimer [7]. Penggunaan H_2O_2 sebagai *foaming agent* dilaporkan menghasilkan pori dengan bentuk lebih teratur, mendekati bulat, serta distribusi ukuran pori yang lebih seragam dibandingkan *foaming agent* lain [8].

Densitas dan daya serap air merupakan dua parameter fisik utama yang menentukan mutu dan potensi aplikasi *foam geopolimer*. Secara umum, *foam geopolimer* memiliki densitas berkisar 600–1300 kg/m³ [9]. Hal ini menyebabkan peningkatan konsentrasi *foaming agent* akan menurunkan nilai densitas seiring bertambahnya volume udara yang terperangkap di dalam matriks geopolimer [10]. Sebaliknya, semakin banyak rongga pori yang terbentuk, semakin besar pula kapasitas material dalam menyerap air, karena luas permukaan internal yang tersedia untuk menampung air turut meningkat [11]. Kedua parameter ini penting untuk dipahami karena berkaitan erat dengan performa *foam geopolimer* apabila diaplikasikan sebagai material konstruksi ringan maupun sebagai media fungsional berpori lainnya, mengingat *foam geopolimer* dengan struktur pori yang berbeda-beda dapat dimanfaatkan dalam beragam aplikasi [12].

Meskipun beberapa penelitian telah mengkaji pengaruh *foaming agent* terhadap sifat fisik *foam geopolimer*, kajian yang secara khusus menganalisis pengaruh variasi konsentrasi H_2O_2 terhadap densitas dan daya serap air *foam geopolimer* berbasis *fly ash* disertai pengujian statistik multivariat masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh konsentrasi massa H_2O_2 sebagai *foaming agent* terhadap karakteristik densitas dan daya serap air *foam geopolimer* berbasis *fly ash*, serta menguji signifikansi pengaruh tersebut secara statistik menggunakan uji normalitas, uji homogenitas, dan *Multivariate Analysis of Variance* (MANOVA).

2. Metode Penelitian

Bahan Penelitian

Bahan utama yang digunakan pada penelitian ini adalah *fly ash* yang berasal dari PLTU Paiton, Kabupaten Probolinggo, Jawa Timur. Material *fly ash* digunakan sebagai prekursor geopolimer karena memiliki kandungan silika dan alumina yang tinggi sehingga mampu bereaksi dengan larutan aktivator alkali membentuk matriks geopolimer. Aktivator alkali yang digunakan terdiri atas natrium hidroksida (NaOH) 10 M dan natrium silikat (Na_2SiO_3) dengan perbandingan massa sesuai rancangan campuran yang digunakan pada penelitian sebesar 1:2,5. Hidrogen peroksida (H_2O_2) 15% digunakan sebagai *chemical foaming agent* untuk menghasilkan struktur berpori pada material *foam geopolimer*, sedangkan *Sodium Dodecyl Sulfate* (SDS) digunakan sebagai *foam stabilizer* untuk mempertahankan kestabilan gelembung udara selama proses pembentukan pori.

Karakteristik Bahan Baku

Karakterisasi awal dilakukan untuk mengetahui sifat fisik dan kimia *fly ash* sebelum digunakan sebagai bahan penyusun *foam geopolimer*. Pengujian komposisi unsur dilakukan menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) untuk menentukan kandungan oksida utama penyusun material [13]. Identifikasi fase kristalin dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dengan membandingkan pola difraksi terhadap basis data standar JCPDS sehingga diperoleh fase mineral yang terkandung di dalam *fly ash* [14]. Kemudian dilakukan pengujian *Loss on Ignition* (LOI) untuk mengetahui besarnya kehilangan massa akibat pembakaran yang berkaitan dengan kandungan karbon tidak terbakar pada *fly ash*. Distribusi ukuran partikel dianalisis menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) untuk mengetahui ukuran rata-rata partikel yang berpengaruh terhadap reaktivitas selama proses geopolimerisasi.

Pembuatan *Foam Gepolimer*

Larutan aktivator alkali dibuat dengan mencampurkan natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3), kemudian didiamkan selama 24 jam agar suhu larutan stabil sebelum digunakan. Selanjutnya *fly ash* dicampurkan dengan larutan aktivator menggunakan *mixer* hingga diperoleh pasta yang homogen. Setelah tercampur merata pasta ditambahkan SDS sebagai penstabil busa nantinya agar busa yang dihasilkan H_2O_2 tidak mudah pecah. Hidrogen peroksida ditambahkan ke dalam pasta geopolimer dengan variasi konsentrasi sebesar 1%, 2%, 3%, dan 4% terhadap massa *fly ash*. Setelah penambahan H_2O_2, campuran segera diaduk hingga homogen kemudian dituangkan ke dalam cetakan berukuran 5x5x5 cm. Spesimen selanjutnya menjalani proses *curing* pada suhu ruang selama 28 hari sebelum dilakukan pengujian karakteristik fisik. Detail komposisi ditunjukan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Komposisi Bahan Pembuatan *Foam Geopolimer*

Code	*Fly ash* (%)	SDS (%)	H_2O_2 (%)	NaOH : Na_2SiO_3	L/S
FG-H1	100	0,5	1	1:2,5	0,45
FG-H2	100	0,5	2	1:2,5	0,45
FG-H3	100	0,5	3	1:2,5	0,45
FG-H4	100	0,5	4	1:2,5	0,45

Pengujian Densitas

Densitas atau berat jenis merupakan parameter penting yang menunjukkan hubungan antara massa dengan volume material. Pengujian densitas foam concrete dilakukan mengacu pada ASTM C642 tentang Standard Test Method for Specific Gravity, Absorption and Voids in Hardened Concrete [15].

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

dengan:
ρ = densitas (kg/m³)
m = massa benda uji (kg)
V = volume benda uji (m³)

Nilai densitas digunakan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan H_2O_2 terhadap pembentukan rongga udara pada material *foam geopolimer*. Semakin rendah nilai densitas menunjukkan semakin banyak rongga udara yang terbentuk di dalam matriks geopolimer.

Pengujian Daya Serap Air

Pengujian daya serap air dilakukan dengan metode perendaman menggunakan spesimen yang telah dikeringkan hingga massa konstan. Sampel ditimbang sebelum dan sesudah proses perendaman, kemudian persentase daya serap air dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$\text{Daya Serap Air} = \frac{W_b - W_k}{W_k} \times 100\% \quad (2)$$

dengan:
Wb = massa setelah perendaman (g)
Wk = massa kering (g)

Besarnya daya serap air digunakan sebagai indikator kemampuan material menyerap air yang dipengaruhi oleh jumlah rongga yang terbentuk akibat penambahan H_2O_2. Nilai daya serap air yang semakin tinggi menunjukkan bahwa volume rongga terbuka di dalam material semakin besar sehingga air lebih mudah masuk ke dalam struktur *Foam geopolimer*.

Pengujian Statistika (MANOVA)

Seluruh data dianalisis menggunakan Analisis Variansi Multivariat (MANOVA) dengan SPSS Statistics v.25 untuk menentukan pengaruh simultan konsentrasi H_2O_2 terhadap densitas dan daya serap air. Uji normalitas Shapiro-Wilk dan uji homogenitas Levene dilakukan sebagai prasyarat, dengan tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Uji *X-Ray Fluorescence* (XRF)

Karakterisasi awal dilakukan menggunakan pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui komposisi oksida penyusun *fly ash*. Komposisi kimia material merupakan faktor penting karena menentukan reaktivitas selama proses geopolimerisasi. *Fly ash* yang memiliki kandungan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) tinggi akan lebih mudah bereaksi dengan aktivator alkali sehingga menghasilkan struktur geopolimer yang lebih baik.

Tabel 2. Hasil Uji XRF Limbah *Fly ash*

Oksida	Kadar (%)
SiO_2	48,93
Al_2O_3	23,34
Fe_2O_3	9,02
CaO	7,02
SO_3	1,28

Hasil pengujian menunjukkan bahwa SiO_2 merupakan komponen dominan sebesar 48,93%, diikuti Al_2O_3 sebesar 23,34%, Fe_2O_3 sebesar 9,02%, dan CaO sebesar 7,02%. Jumlah kandungan SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 mencapai 81,29%, sehingga memenuhi persyaratan ASTM C618 untuk *fly ash* kelas F yang mensyaratkan jumlah ketiga oksida tersebut lebih dari 70%. Tingginya kandungan silika dan alumina menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki potensi yang baik sebagai prekursor geopolimer karena kedua unsur tersebut berperan dalam pembentukan jaringan aluminosilikat selama proses geopolimerisasi. Kandungan CaO yang relatif rendah juga mengindikasikan bahwa proses pengerasan lebih didominasi oleh reaksi geopolimer dibandingkan hidrasi semen.

Hasil Uji *X-Ray Diffraction* (XRD)

Analisis XRD dilakukan untuk mengetahui fase mineral penyusun *fly ash*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa material didominasi oleh fase amorf (*glass content*) sebesar 79,41%, sedangkan fase kristalin yang teridentifikasi antara lain kuarsa (*quartz*), mullite, magnetite, hematite, albite, dan beberapa mineral minor lainnya. Dominasi fase amorf merupakan karakteristik yang diharapkan pada bahan baku geopolimer karena fase tersebut memiliki reaktivitas yang tinggi terhadap larutan alkali. Sebaliknya, fase kristalin seperti kuarsa dan mullite cenderung bersifat inert sehingga berfungsi sebagai pengisi (*filler*) dan tidak banyak berpartisipasi dalam proses pembentukan gel geopolimer. Keberadaan *glass content* yang tinggi menunjukkan bahwa *fly ash* PLTU Paiton memiliki potensi yang baik untuk diaplikasikan sebagai bahan dasar *foam geopolimer*. Semakin tinggi kandungan fase amorf, semakin besar pula kemungkinan terbentuknya struktur geopolimer yang homogen dan stabil.

Hasil Uji *Loss on Ignition* (LOI)

Pengujian LOI dilakukan untuk mengetahui kehilangan massa setelah proses pembakaran pada temperatur tinggi yang berkaitan dengan kandungan karbon yang belum terbakar (*unburned carbon*). Nilai LOI yang rendah menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki kandungan karbon sisa yang kecil sehingga tidak mengganggu proses geopolimerisasi. Berdasarkan hasil pengujian pada penelitian ini, nilai LOI masih berada di bawah batas maksimum ASTM C618 yaitu 6%, sehingga *fly ash* memenuhi persyaratan sebagai bahan baku geopolimer. Nilai LOI yang rendah menunjukkan bahwa sebagian besar material telah mengalami pembakaran sempurna sehingga kandungan karbon residu relatif sedikit dan tidak menghambat reaksi antara aluminosilikat dengan larutan aktivator.

Hasil Uji *Particle Size Analysis* (PSA)

Distribusi ukuran partikel *fly ash* dianalisis menggunakan *Particle Size Analysis* (PSA). Ukuran partikel merupakan parameter penting karena memengaruhi luas permukaan spesifik material. Semakin kecil ukuran partikel, semakin besar luas permukaan yang tersedia untuk bereaksi dengan larutan alkali sehingga proses geopolimerisasi berlangsung lebih cepat. Hasil pengujian PSA menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki distribusi ukuran partikel yang relatif halus sehingga mendukung proses pelarutan silika dan alumina selama aktivasi alkali. Kondisi tersebut meningkatkan reaktivitas material dan mempercepat pembentukan gel geopolimer sehingga menghasilkan struktur yang lebih homogen.

Jurnal Serambi Engineering JSE
Volume XI, No.3, Juli 2026 Hal 20930 - 20937
p-ISSN : 2528-3561
e-ISSN : 2541-1934

Hasil Uji Densitas *Foam Geopolimer*

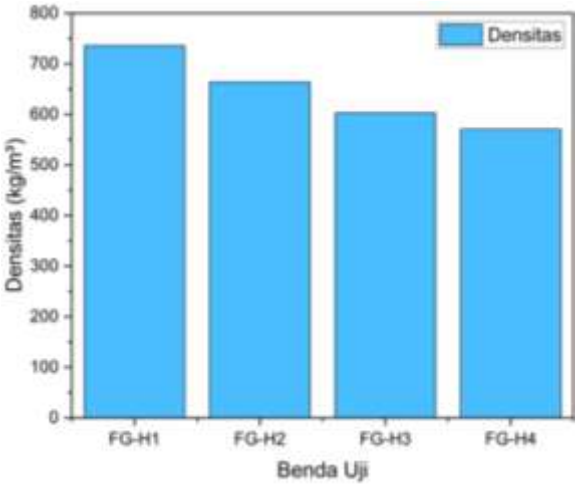
Pengujian densitas dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi konsentrasi hidrogen peroksida terhadap berat jenis *foam geopolimer*.

Tabel 3. Densitas *Foam Geopolimer*

Code	Dry Mass (gr)	Volume (cm^3)	Density (kg/m^3)	Average (kg/m^3)
FG-H1	93/91/92	125	744/728/736	736
FG-H2	86/80/82	125	688/648/656	664
FG-H3	74/75/77	125	592/600/616	602.7
FG-H4	70/71/73	125	560/568/584	570.7

Hasil tersebut menunjukkan adanya tren penurunan densitas seiring meningkatnya konsentrasi H_2O_2. Penambahan H_2O_2 mempercepat pembentukan gas oksigen selama proses dekomposisi sehingga jumlah gelembung udara di dalam pasta geopolimer semakin banyak. Setelah proses pengerasan selesai, gelembung tersebut berubah menjadi rongga sehingga massa jenis material menurun.

Penurunan densitas sebesar hampir 23% dari variasi 1% menuju 4% menunjukkan bahwa H_2O_2 efektif digunakan sebagai *chemical foaming agent* dalam pembuatan *foam geopolimer*. Nilai densitas yang diperoleh juga masih berada pada rentang densitas *foam geopolimer* yang dilaporkan pada berbagai penelitian sebelumnya, yaitu sekitar 600–1300 kg/m^3 untuk sebagian besar variasi spesimen.



Gambar 1. Grafik Hasil Uji Densitas *Foam Geopolimer*

Berdasarkan **Gambar 1**, terlihat jelas bahwa setiap peningkatan komposisi *foaming agent* H_2O_2 berbanding lurus dengan penurunan nilai densitas *foam geopolimer*. Fenomena ini terjadi akibat semakin banyaknya busa yang terbentuk selama proses pencampuran pasta geopolimer, sehingga pada saat proses pengeringan dan pengerasan berlangsung, rongga-rongga udara yang terperangkap di dalam matriks geopolimer semakin bertambah banyak. Meningkatnya jumlah rongga tersebut menyebabkan berkurangnya kerapatan massa per satuan volume, sehingga nilai densitas spesimen dengan komposisi *foaming agent* yang lebih tinggi cenderung lebih rendah dibandingkan spesimen dengan komposisi yang lebih kecil. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa semakin besar komposisi *foaming agent* H_2O_2 yang digunakan, maka semakin rendah pula nilai densitas *foam geopolimer* yang dihasilkan.

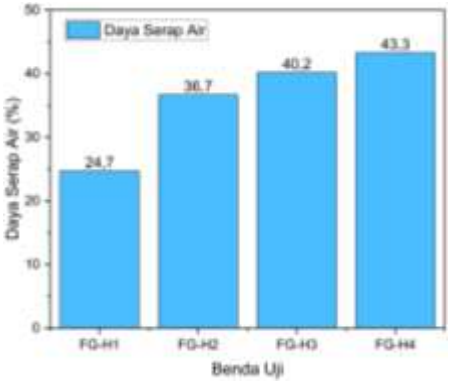
Hasil Uji Daya Serap Air *Foam Geopolimer*

Pengujian daya serap air dilakukan untuk mengetahui kemampuan *foam geopolimer* dalam menyerap air setelah proses perendaman selama 24 jam. Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi perubahan karakteristik fisik material akibat penambahan hidrogen peroksida (H_2O_2) sebagai *foaming agent*. Semakin tinggi daya serap air suatu material, semakin besar jumlah rongga terbuka (*open pores*) yang terbentuk di dalam struktur geopolimer sehingga air lebih mudah masuk ke dalam material.

Tabel 4. Hasil Uji Daya Serap Air *Foam Geopolimer*

Code	Massa Kering (gr)	Massa Jenuh (gr)	Daya Serap Air (kg/m³)	Rata-rata (kg/m³)
FG-H1	93/91/92	124/122/122	25/24.6/25,4	25
FG-H2	86/80/82	128/133/131	32,8/39,8/37,4	36,7
FG-H3	74/75/77	127/125/123	41,7/40/39	40,2
FG-H4	70/71/73	126/128/127	44,4/43/42,5	43,3

Berdasarkan **Tabel 4** terlihat bahwa peningkatan konsentrasi H_2O_2 menyebabkan nilai daya serap air *foam geopolimer* meningkat secara bertahap. Pada penambahan H_2O_2 sebesar 1% diperoleh daya serap air sebesar 25,0%, kemudian meningkat menjadi 36,7% pada konsentrasi 2%, 40,2% pada konsentrasi 3%, dan mencapai 43,3% pada konsentrasi 4%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi H_2O_2 yang digunakan, semakin besar kemampuan material dalam menyerap air. Peningkatan daya serap air terjadi karena H_2O_2 mengalami dekomposisi dalam suasana alkali dan menghasilkan gas oksigen (O_2). Gas yang terbentuk akan menghasilkan gelembung udara di dalam pasta geopolimer. Ketika proses pengerasan berlangsung, gelembung udara tersebut berubah menjadi rongga yang tersebar pada matriks geopolimer. Semakin banyak H_2O_2 yang ditambahkan, semakin banyak pula rongga yang terbentuk sehingga air lebih mudah masuk ke dalam material selama proses perendaman.



Gambar 2. Grafik Hasil Uji Daya Serap Air *Foam Geopolimer*

Berdasarkan **Gambar 2**, terlihat bahwa hasil pengujian daya serap air menunjukkan pola yang konsisten, yaitu nilai daya serap air *foam geopolimer* mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya komposisi *foaming agent* H_2O_2 pada setiap variasi campuran. Kondisi ini dapat dijelaskan melalui mekanisme pembentukan pori yang terjadi selama proses produksi spesimen, dimana semakin banyak H_2O_2 yang digunakan akan menghasilkan reaksi dekomposisi yang lebih intensif sehingga busa yang terbentuk semakin banyak. Busa tersebut kemudian terperangkap di dalam pasta geopolimer yang mengeras dan membentuk rongga-rongga pori di dalam struktur material. Semakin banyak rongga yang terbentuk maka semakin besar juga kapasitas material dalam menampung dan menyerap air yang masuk ke dalamnya. Oleh karena itu, dapat diambil kesimpulan bahwa terdapat korelasi positif antara peningkatan komposisi H_2O_2 dengan nilai daya serap air *foam geopolimer*, di mana variasi dengan dosis H_2O_2 yang lebih tinggi secara konsisten menghasilkan kemampuan daya serap air yang lebih besar.

Hasil Uji Statistika (MANOVA)

Hasil uji normalitas Shapiro-Wilk menegaskan bahwa seluruh data kepadatan dan penyerapan air pada setiap kelompok perlakuan berdistribusi normal ($p > 0,05$). Uji Levene menunjukkan bahwa data kepadatan memiliki varians yang homogen antar kelompok perlakuan ($p > 0,05$), sedangkan penyerapan air menunjukkan nilai $p = 0,041$ (tidak homogen). Namun, pelanggaran ini tidak membatalkan MANOVA, karena statistik Pillai's Trace digunakan sebagai pengganti Wilks' Lambda, yang terbukti lebih tangguh terhadap pelanggaran homogenitas matriks kovarians untuk ukuran sampel kecil. Hasil MANOVA ditunjukkan pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Hasil Uji MANOVA

Parameter	Significance Value	Significance Limit	Hypothesis	Conclusion
Density	< 0.001	0.05	H_1 Accepted	Significant
Water Absorption	< 0.001	0.05	H_1 Accepted	Significant

Hasil MANOVA pada **Tabel 5** menunjukan bahwa variasi konsentrasi H_2O_2 memiliki pengaruh simultan yang signifikan terhadap densitas dan daya serap air ($p < 0,001$ untuk kedua parameter). Karena $p < \alpha = 0,05$, H_1 diterima, yang berarti terdapat perbedaan signifikan pada kedua parameter fisik tersebut di antara keempat variasi konsentrasi H_2O_2.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh variasi konsentrasi hidrogen peroksida (H_2O_2) terhadap karakteristik fisik *foam geopolimer* berbasis *fly ash*, dapat disimpulkan bahwa *fly ash* yang digunakan memiliki kandungan SiO_2, Al_2O_3, dan Fe_2O_3 yang tinggi sehingga memenuhi persyaratan sebagai bahan baku geopolimer. Hasil karakterisasi menggunakan XRD menunjukkan dominasi fase amorf yang mendukung proses geopolimerisasi, sedangkan hasil LOI dan PSA menunjukkan bahwa material memiliki karakteristik yang sesuai untuk digunakan sebagai prekursor geopolimer.

Penambahan H_2O_2 sebagai *foaming agent* memberikan pengaruh nyata terhadap karakteristik fisik *Foam geopolimer*. Peningkatan konsentrasi H_2O_2 dari 1% menjadi 4% menyebabkan densitas material menurun dari 736 kg/m³ menjadi 570,7 kg/m³. Sebaliknya, daya serap air meningkat dari 25,0% menjadi 43,3%. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi H_2O_2, semakin banyak gas oksigen yang terbentuk sehingga menghasilkan struktur *Foam geopolimer* yang lebih ringan, namun memiliki kemampuan menyerap air yang lebih besar akibat meningkatnya jumlah rongga pada material.

Hasil uji statistik juga menunjukan bahwa variasi konsentrasi *foaming agent* berpengaruh secara statitik yang ditunjukan pada hasil uji MANOVA. Dapat disimpulkan bahwa hidrogen peroksida merupakan *foaming agent* yang efektif untuk menghasilkan *Foam geopolimer* ringan berbasis *fly ash*. Pemilihan konsentrasi H_2O_2 perlu disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi karena berpengaruh langsung terhadap keseimbangan antara densitas dan daya serap air material.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Perkapalan Negri Surabaya yang telah memberikan dana hibah penelitian DIPA 2026 untuk dukungan akademik dalam penyelesaian penelitian ini.

6. Daftar Pustaka

[1] Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Woerden, F. Van. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. World Bank Publications.

[2] Zierold, K. M., & Odoh, C. (2020). A review on fly ash from coal-fired power plants: chemical composition, regulations, and health evidence. *Reviews on environmental health*, *35*(4), 401-418.

[3] Kuźnia, M. (2024). A review of coal fly ash utilization: environmental, energy, and material assessment. *Energies*, *18*(1), 52.

[4] Tajunnisa, Y., Cahyani, A. A., Masrafat, H., Hariyanto, I. R., Wibowo, Y. N., Alfayet, M. R., & Halisah, V. N. (2024). FABAKO: Program Pemanfaatan Limbah Fly Ash dan Bottom Ash (FABA) sebagai Paving Jalan untuk Meningkatkan UMKM Masyarakat Paiton. *Sewagati*, *8*(5), 2205-2217.

[5] Kozłowski, M., & Kadela, M. (2018). Mechanical Characterization of Lightweight Foamed Concrete. Advances in Materials Science and Engineering, 2018. https://doi.org/10.1155/2018/6801258

[6] Dhasindrakrishna, K., Pasupathy, K., Ramakrishnan, S., & Sanjayan, J. (2021). Progress, current thinking and challenges in *geopolymer foam concrete* technology. Cement and Concrete Composites, 116, 103886. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103886

[7] Bazan, P., Łach, M., Kozub, B., Figiela, B., & Korniejenko, K. (2023). The Production Process of Foamed Geopolymers with the Use of Various *Foaming agent*s. In L. F. M. da Silva (Ed.), Materials Design and Applications IV (pp. 63–74). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18130-6_5

[8] Li, T., Wang, Z., Zhou, T., He, Y., & Huang, F. (2019). Preparation and properties of magnesium phosphate cement foam concrete with H_2O_2 as *foaming agent*. Construction and Building Materials, 205, 566–573. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.022

[9] Shilar, F. A., & Shilar, M. (2025). Review: Foam geopolimer synthesis macro- to micro-properties. Journal of Materials Science, 60(46), 23176–23226. https://doi.org/10.1007/s10853-025-11707-7

[10] Wang, T., Chen, Y., Jing, X., Wang, X., Zhang, L., & Yang, P. (2024). Preparation and properties of lightweight geopolymer by bio-based foaming agent. *Materials*, *17*(13), 3167.

[11] Ibrahim, M., Wan Ibrahim, W. M., Abdullah, M. M. A. B., Nabialek, M., Putra Jaya, R., Setkit, M., ... & Jeż, B. (2023). Synthesis of metakaolin based alkali activated materials as an adsorbent at different Na2SiO3/NaOH ratios and exposing temperatures for Cu2+ removal. *Materials*, *16*(3), 1221.

[12] Yu, Q., Li, X., Wang, Z., & Xue, J. (2022). Characterization and Performance Evaluation of Metakaolin-Based Geopolymer Foams Obtained by Adding Foam Stabilizer. Materials, vol. 15, no. 10, Art. no. 3570, May 2022. https://doi.org/10.3390/ma15103570.

[13] González, M. F., Saadatkhah, N., & Patience, G. S. (2024). Experimental methods in chemical engineering: X-ray fluorescence - XRF. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, *102*(6), 2004-2018.

[14] Taylor, P., Bunaciu, A. A., Gabriela, E., Tioiu, U. Ş., & Aboul-enein, H. Y. (2015). Critical Reviews in Analytical Chemistry X - Ray Diffraction : Instrumentation and Applications. https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616 April 2015, 37–41.

[15] Susanto, E. P., Soemardi, B. W., & Pane, I. (2011). Studi Penggunaan Dinding Foam Concrete (FC) dalam Efisiensi Energi dan Biaya untuk Pendinginan Udara (Air Conditioner). *Jurnal Teknik Sipil ITB*.