

Pengaruh Optimalisasi Fly Ash Pangkalan Susu Dengan Fly Ash Nagan Raya Terhadap Sifat Mekanis Mortar Geopolimer

Iqmal¹, Aiyub², Fajri³

1Mahasiswa, Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Konstruksi Bangunan Gedung, Jurusan Teknik Sipil,

Politeknik Negeri Lhokseumawe, email: abduliqmall@gmail.com

2 Dosen, Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Konstruksi Bangunan Gedung, Jurusan Teknik Sipil,

Politeknik Negeri Lhokseumawe, email: aiyubts@pnl.ac.id

3 Dosen, Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Konstruksi Bangunan Gedung, Jurusan Teknik Sipil,

Politeknik Negeri Lhokseumawe, email: fajri@pnl.ac.id

ABSTRAK

Mortar geopolimer merupakan polimer anorganik yang tersusun dari kandungan alumina, silikat, dan kalsium, pengikat pada geopolimer dihasilkan dari senyawa pozzolanik yang diaktifkan oleh larutan alkali. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui persentase optimum FANR (Fly Ash Nagan Raya) dan FAPS (Fly Ash Pangkalan Susu) terhadap sifat mekanis mortar geopolimer dari penggabungan kedua fly ash. Metode yang digunakan merupakan eksperimen laboratorium dengan desain variasi optimalisasi FAPS dan FANR yaitu 0%:100%, 20%:80%, 40%:60%, 60%:40%, 80%:20%, 100%:0%. Pengujian yang dilakukan meliputi uji XRF, SEM, FTIR, dan Kuat Tekan. Campuran mortar dibuat dalam dimensi kubus 5 x 5 x 5 cm dan diuji pada umur 3, 14, dan 28 hari. Hasil karakteristik menunjukkan bahwa FANR termasuk fly ash kelas F dengan kandungan SiO₂ sebesar 48,04%, Al₂O₃ 27,64%, dan CaO 6,44%, sedangkan FAPS termasuk fly ash kelas C dengan kandungan SiO₂ sebesar 39,03%, Al₂O₃ 23,08%, dan CaO 5,64%. Hasil SEM FANR menunjukkan morfologi yang berbentuk bola dengan permukaan yang berkabut, sedangkan FAPS menunjukkan morfologi yang melengkung dengan permukaan tidak rata. Hasil FTIR menunjukkan bahwa FANR cenderung membentuk ikatan Si-O-Si dan Si-O-Al yang menghasilkan gel N-A-S-H untuk mendukung kekuatan jangka panjang, sedangkan FAPS lebih banyak menghasilkan gel C-(A)-S-H yang berperan dalam mempercepat ikatan awal. Hasil pengujian kuat tekan terdapat nilai optimum pada campuran 60% FANR dan 40% FAPS, dengan kuat tekan 18,01 Mpa (rasio LA/FA 0,5). Kesimpulannya, bahwa FANR memiliki Si-Al-Ca tinggi yang dapat mendukung kekuatan jangka panjang dan mempercepat ikatan awal, tetapi kombinasi dari keduanya juga penting untuk meningkatkan dan memperbaiki kuat tekan mortar.

Kata Kunci: Fly Ash, Pangkalan Susu, Nagan Raya, Geopolimer, Kuat Tekan

PENDAHULUAN

Mortar geopolimer merupakan polimer anorganik yang tersusun dari kandungan alumina, silikat, dan kalsium. Pengikat pada geopolimer dihasilkan dari senyawa pozzolanik yang diaktifkan oleh larutan alkali berupa natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na₂SiO₃). Aktivasi pengikat ini dilakukan dengan basa ramah lingkungan yang membutuhkan energi relatif rendah dalam prosesnya. Limbah industri yang sesuai untuk bahan geopolimer harus mengandung silika (Si), aluminium (Al), dan kalsium (Ca), karena senyawa tersebut akan bereaksi dengan larutan alkali aktifator membentuk gel Si-O-Si dan Si-O-Al yang berpengaruh pada sifat mekanik beton, serta gel C-A-S-H atau N-A-S-H yang memengaruhi waktu pengerasan. Secara umum,

geopolimer tersusun atas dua komponen utama, yaitu material pozzolanik dan larutan alkali. Material pozzolanik mengandung alumina-silika yang kaya silikon (Si) dan alumina (Al), sedangkan larutan alkali biasanya berasal dari logam alkali yang mudah larut, seperti natrium (Na) atau kalium (K) (Fauzi et al., 2021). Mortar geopolimer tidak memanfaatkan semen sebagai bahan pengikat, melainkan menggunakan limbah industri yang memiliki sifat cementitious, seperti abu terbang (fly ash), yaitu sisa hasil pembakaran batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Penerapan mortar geopolimer memberikan beberapa manfaat, antara lain menekan eksploitasi sumber daya alam dalam produksi semen serta mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh limbah industri (Fajri et al., 2021) Fly ash (Abu Terbang) adalah limbah dari hasil pembakaran batu bara yang digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan ukuran partikel berkisar antara 5-100 μm . Abu batu bara yang merupakan limbah dari proses pembakaran pada pembangkit tenaga listrik tersebut dapat berupa abu terbang, abu dasar dan lumpur flue gas desulfurization. Produksi abu terbang batu bara (fly ash) didunia terutama di Indonesia akan terus bertambah seiring dengan bertambahnya penggunaan batu bara pada pembangkit listrik dalam menghasilkan energi (P.U., 2020).

A. Fly Ash

Fly ash merupakan salah satu bahan tambah dalam pembuatan beton yang cukup populer sebagai pengganti semen. Fly ash yaitu serbuk sisa pembakaran batu bara yang ukuran butirannya lebih halus daripada sement portland. Fly ash tidak memiliki kemampuan mengikat yang baik seperti semen akan tetapi fly ash mengandung senyawa silika dan alumina yang mempunyai kemampuan mengikat (non-cementitious) yang memiliki sifat pozzolanik sehingga fly ash banyak digunakan untuk pengganti semen (Jalil Bangun, Tarigan and Perwira, 2021). Fly ash digunakan sebagai pengganti semen karena mengandung silika dan alumunium yang bisa dijadikan bahan pengikat yang kuat melalui proses (Salwan, Rizal and Miswar, 2021). Dimana fly ash merupakan sisa-sisa pembakaran batu bara yang dialirkan dari ruang pembakaran melalui semburan asap, yang berbentuk partikel halus dan merupakan bahan anorganik yang terbentuk dari perubahan bahan mineral karena proses pembakaran batubara pada unit pembangkit uap (boiler) (Simanjuntak and Wardhono, 2022).

B. Karakteristik

Penelitian menggunakan metode XRF (X-Ray Fluorescence) yang telah dilakukan sebelumnya menunjukkan bahwa bahwa Fly Ash Pangkalan Susu (FAPS) memiliki kandungan kalsium oksida (CaO) sebesar 11,39% dan membentuk gel N-A-S-H pada proses geopolimerisasi mortar, sehingga mengakibatkan waktu ikat yang lebih lama (long setting time). Hal ini berbeda dengan penelitian sebelumnya, di mana FAPS memiliki kadar CaO yang lebih tinggi, yaitu 25,39%, dan membentuk gel C-A-S-H yang menunjukkan bahwa reaksi geopolimer berlangsung sangat cepat (short setting time) (Fauzi et al., 2021).

Hasil analisis ikatan kimia pada butiran dan pasta geopolimer FAPS menunjukkan puncak pita butir pasta geopolimer FAPS 3000 cm^{-1} mengindikasikan keberadaan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang merupakan proses reaksi kandungan kimia Ca dengan air yang ada pada larutan alkalin. Puncak pita 1900 cm^{-1} - 3500 cm^{-1} mengindikasikan keberadaan water bands yang mengalami peregangan dan pembengkakan pada butiran dan pasta geopolimer FAPS.

Puncak yang lebih tajam pada pita butiran FAPS dibandingkan dengan pasta geopolimer menunjukkan bahwa pasta tersebut memiliki kandungan air yang lebih sedikit. Hal ini kemungkinan disebabkan banyaknya larutan aktivator yang digunakan pada reaksi geopolimer dengan material FAPS (Fauzi et al., 2022). Berdasarkan hasil analisis menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) pada material fly ash Nagan Raya (FANR) menunjukkan bahwa partikel-partikelnya memiliki bentuk amorf menyerupai bola, berukuran ramping, dan tampak berkabut. Kondisi permukaan FANR yang berkabut tersebut membuat partikel lebih mudah menyerap larutan alkali dalam campuran geopolimer, sehingga berpotensi menurunkan tingkat workability (Aisyah Qifty Muda, 2023).

Tabel 1 Persentase Komposisi Kimia FAPS

Senyawa Kandungan	Persentase Kandungan FAPS
Si	27,81
Al	17,92
Fe	19,49
Ca	11,39

C. Sifat Mekanis

Berdasarkan hasil penelitian terdahulu, bahwa perkembangan kuat tekan mortar geopolimer dengan variasi rasio air terhadap semen (FAS) menunjukkan tren yang berbeda pada setiap umur pengujian. Pada rasio FAS 0,5, nilai kuat tekan mencapai hasil tertinggi dibandingkan dengan variasi rasio lainnya, yaitu mendekati 30 MPa pada umur 28 hari. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kondisi rasio air yang lebih rendah, ikatan antar partikel menjadi lebih rapat sehingga menghasilkan struktur mortar yang lebih padat dan kuat. Sebaliknya, pada rasio FAS yang lebih tinggi (2 hingga 3,5), terjadi penurunan nilai kuat tekan. Meskipun masih mengalami peningkatan seiring bertambahnya umur (1, 3, 7, hingga 28 hari), namun hasilnya tidak setinggi pada FAS 0,5. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar rasio FAS dapat menyebabkan kelebihan air yang tidak berpartisipasi dalam proses reaksi geopolimerisasi, sehingga membentuk pori-pori yang menurunkan kepadatan dan kekuatan mortar (Aiyub, 2022).

D. Rheologi

Berdasarkan hasil penelitian terdahulu, pengujian Workability mortar geopolimer menunjukkan bahwa semakin banyak FANR yang terdapat dalam pencampuran FANR dan FAPS menyebabkan terjadinya penurunan pada nilai flow table. Hal ini kemungkinan diakibatkan oleh butir fly ash Nagan Raya lebih berkabut sehingga lebih banyak menyerap cairan (Farid, 2024). Berdasarkan hasil penelitian terdahulu, pengujian setting time mortar geopolimer dengan menggunakan larutan NaOH 10M, rasio LA 3,5 dan rasio LA/FA 0,9 dan perbandingan pencampuran mortar geopolimer yaitu 0;100, 20;80, 40;60, 60;40, 80;20, 100;0, menunjukkan trend diagram dimana semakin banyak FANR yang dicampurkan dengan FAPS maka waktu yang dibutuhkan untuk proses polimerisasi dari keadaan plastis ke keadaan statis (mengeras) lebih cepat. Pada pencampuran mortar geopolimer segar dengan waktu setting time terlama pada perbandingan

FANR dan FAPS 20;80 (FANR 20% dan FAPS 80%) menunjukkan initial setting time dengan waktu yang lama yaitu 870 menit, sedangkan final setting time relatif lebih cepat yaitu 195 menit. Waktu setting time tercepat terjadi pada pencampuran mortar geopolimer segar dengan perbandingan FANR dan FAPS 80;20 (FANR 80% dan FAPS 20%) menunjukkan initial setting time yang cepat yaitu 330 menit, sedangkan final setting time 120 menit, hal ini dikarenakan FANR memiliki kadar Ca lebih banyak dibanding FAPS (Farid, 2024).

METODOLOGI

Penelitian ini merupakan eksperimen laboratorium yang dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil Politeknik Negeri Lhokseumawe. Bahan yang akan digunakan pada penelitian ini adalah Fly Ash Pembangkit Listrik Tenaga Uap Pangkalan Susu dan Pembangkit Listrik Tenaga Uap Nagan Raya sebagai pengganti semen, agregat halus dan untuk bahan kimia dapat dibeli dari toko bahan kimia. yang akan digunakan pada penelitian ini terdapat dari Laboratorium Uji Bahan Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Lhokseumawe. Peralatan yang akan digunakan seperti concrete mixer, alat uji kuat tekan, oven, saringan No.200, timbangan digital, gelas ukur, dan lain-lain, serta Universal Testing Machine (UTM) untuk uji kuat tekan berdasarkan SNI 03-6825-2002. Untuk analisis karakteristik material digunakan alat XRF untuk identifikasi komposisi kimia, FTIR untuk analisis gugus fungsi dan ikatan kimia, dan SEM untuk melihat morfologi permukaan.

Desain campuran mortar dibuat dengan tiga variasi FAS, yaitu 0,60, 0,55, dan 0,50. Pada setiap variasi FAS, FANR digunakan sebagai substitusi semen PCC dengan persentase 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, dan 30%. Total jumlah benda uji yang dibuat adalah 252 sampel, dengan masing-masing variasi diuji pada umur 1, 3, 7, dan 28 hari untuk pengujian kuat tekan. Langkah-langkah penelitian dimulai dengan persiapan material, di mana FAPS dan FANR dikeringkan dan diayak untuk memastikan tidak ada gumpalan atau material asing.

Pasir disaring agar bersih dari lumpur atau kotoran. Selanjutnya dilakukan perancangan mix design dengan mengacu pada SNI 03-6825-2002 untuk menetapkan komposisi FAPS, FANR, pasir, dan alkali sesuai dengan variasi LA dan persentase optimalisasi fly ash yang direncanakan. Pencampuran mortar dilakukan dengan mencampurkan FAPS dan FANR secara kering sesuai dengan variasi yg direncanakan hingga merata, kemudian ditambahkan pasir dan diaduk selama 30 detik. Setelah itu air NaOH dan Na₂SiO₃ dimasukkan sesuai kebutuhan LA dan campuran diaduk kembali selama 90 detik hingga homogen. Mortar segar kemudian dituangkan ke dalam cetakan kubus berukuran 5 cm × 5 cm × 5 cm. Cetakan digetarkan untuk menghilangkan gelembung udara yang terperangkap dan dibiarkan selama 24 jam±. Setelah itu, uji kuat tekan dilakukan dengan Universal Testing Machine pada umur 3, 14, dan 28 hari. Selain itu, dilakukan pula pengujian karakteristik mikrostruktur menggunakan XRF, SEM, dan FTIR terhadap FAPS dan FANR untuk mendukung hasil mekanis yang diperoleh.

Data hasil pengujian dianalisis dan disajikan dalam bentuk grafik dan tabel untuk memperlihatkan hubungan antara variasi LA, persentase FAPS dan FANR, serta kinerja mortar.

Data ini dibandingkan dengan standar SNI, ASTM, dan referensi penelitian terdahulu untuk menarik kesimpulan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan data terkait karakteristik mikrostruktur material, serta kuat tekan mortar dengan variasi fly ash dan LA. Semua data yang diperoleh dianalisis secara komparatif terhadap standar yang berlaku serta didiskusikan berdasarkan teori dan literatur relevan.

A. X-Ray Fluorescence (XRF)

Pengujian XRF dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia oksida utama dalam FAPS dan FANR. Hasil analisis XRF terhadap FAPS dan FANR menunjukkan perbedaan komposisi kimia yang cukup signifikan. FAPS terdiri atas SiO₂ sebesar 39,3% dan Al₂O₃ sebesar 23,8%. Kandungan silika dan alumina yang cukup tinggi ini menegaskan bahwa FAPS memiliki sifat pozzolanik yang baik serta potensi reaktivitas yang mendukung proses pembentukan geopolimer. Selain itu, FAPS juga mengandung Fe₂O₃ sekitar 8,84% dan CaO sebesar 5,64%, yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan material sekaligus mempercepat mekanisme ikatan pada campuran berbasis semen maupun geopolimer. Unsur oksida lain seperti MgO (1,08%), K₂O (0,79%), dan TiO₂ (0,92%) hadir dalam jumlah sedang, sedangkan senyawa minor seperti P₂O₅, SO₃, MnO, NiO, CuO, ZnO, SrO, Y₂O₃, serta ZrO₂ hanya terdeteksi dalam persentase sangat kecil di bawah 1%. Secara keseluruhan, profil kimia ini memperlihatkan bahwa FAPS kaya akan kandungan silika, alumina, dan oksida besi, sehingga sangat potensial digunakan sebagai bahan alternatif pengikat ramah lingkungan dalam pembuatan mortar maupun beton berbasis geopolimer.

Sementara itu, FANR didominasi oleh kandungan silika (SiO₂) sebesar 48,04%, diikuti oleh alumina (Al₂O₃) 27,62% dan besi oksida (Fe₂O₃) 11,78%. Kandungan ini menegaskan bahwa FANR termasuk dalam kategori FA tipe F berdasarkan ASTM C618, yang kaya akan unsur-unsur pozzolan aktif. Selain itu, FANR mengandung kalsium oksida (CaO) sebesar 6,44%, kalium oksida (K₂O) 0,98%, serta jumlah kecil mangan oksida (MnO) 0,21%. Nilai Loss on Ignition (LoI) FA adalah 4,94%, yang masih dalam batas wajar untuk material pozzolan.

Tabel 2 Komposisi Kimia dari FAPS dan FANR

Oxide Component	FAPS (%)	FANR (%)
SiO ₂	39.03	48.04
Al ₂ O ₃	23.08	27.64
Fe ₂ O ₃	8.84	11.78
CaO	5.64	6.44

B. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Hasil analisis FTIR pada Fly Ash Nagan Raya (FANR) dan Fly Ash Pangkalan Susu (FAPS) menunjukkan perbedaan signifikan dalam jumlah serta intensitas pita serapan yang

teridentifikasi. FAPS memiliki jumlah pita puncak lebih banyak pada daerah serapan gugus $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{H}-\text{O}-\text{H}$, CaCO_3 , serta ikatan $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}/\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$ dibanding FANR. Hal ini menandakan bahwa FAPS lebih kaya akan gugus fungsional yang berperan penting dalam proses geopolimerisasi, seperti peregangan ikatan silikat dan aluminat yang menjadi dasar pembentukan gel aluminosilikat. Sebaliknya, FANR cenderung menunjukkan pita yang lebih sedikit, meskipun pada rentang $680-800 \text{ cm}^{-1}$ ditemukan kandungan alkali yang lebih tinggi, yang dapat mendukung aktivasi kimia pada proses awal reaksi. Kecenderungan ini juga terlihat jelas pada grafik FTIR, dimana spektrum FAPS (garis orange) menunjukkan banyak lekukan dan puncak serapan kuat pada berbagai bilangan gelombang, khususnya di daerah sekitar 3440 cm^{-1} , 1630 cm^{-1} , dan 1000 cm^{-1} . Sementara itu, spektrum FANR (garis biru) relatif datar dengan lebih sedikit variasi puncak, yang sejalan dengan data jumlah pita pada gambar. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa FAPS memiliki potensi reaktivitas kimia lebih tinggi karena mengandung lebih banyak gugus aktif yang dapat mempercepat proses pozzolan dan geopolimerisasi, sedangkan FANR lebih berperan dalam memberikan kontribusi kandungan alkali yang menjaga kestabilan sistem ikatan pada mortar geopolimer.

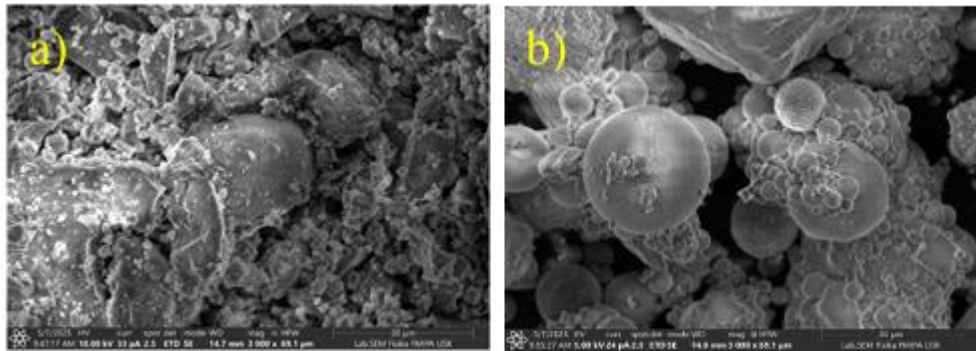


Gambar 1 Grafik FTIR dari FAPS dan FANR

C. Scanning Electron Microscope (SEM)

Berdasarkan citra tersebut, terlihat bahwa partikel-partikel material memiliki bentuk dominan sferis hingga semi-sferis dengan ukuran bervariasi antara $\pm 10-20 \mu\text{m}$. Di sekeliling partikel utama terdapat butiran halus yang saling menempel sehingga membentuk gumpalan (aglomerasi). Permukaan partikel tampak tidak rata, dipenuhi tonjolan kecil serta pecahan yang menempel, yang menunjukkan sifat amorf dan potensi terbentuknya pori-pori mikro. Morfologi ini merupakan ciri khas fly ash, di mana bentuk bola terbentuk akibat proses pendinginan cepat saat pembakaran batubara. Adanya partikel-partikel berukuran kecil turut memperluas permukaan spesifik sehingga dapat meningkatkan kecepatan reaksi pozzolanik maupun geopolimerisasi ketika berinteraksi dengan larutan aktivator. Dengan demikian, hasil SEM ini menegaskan bahwa fly ash Pangkalan Susu (FAPS) memiliki karakter morfologi yang mendukung penggunaannya sebagai bahan dasar dalam pembuatan mortar maupun geopolimer, karena mampu membantu pembentukan struktur mikro yang lebih rapat dan meningkatkan kekuatan material yang dihasilkan. Gambar FANR ditunjukkan pada Gambar 2 (b). Material FANR menunjukkan partikel-partikel berbentuk bola dan semi-bola dengan ukuran partikel sekitar $20 \mu\text{m}$. Terlihat adanya bola-bola kecil yang menempel pada permukaan bola-bola yang lebih besar, dan permukaan partikel-partikel ini tampak halus dengan permukaan yang berkabut (misty surface). Kecenderungan partikel yang saling terhubung dan menggumpal menunjukkan terjadinya

aglomerasi. Kombinasi karakteristik bentuk bola dan permukaan berkabut menunjukkan proses pembekuan cepat (rapid solidification) serta interaksi energi permukaan yang tinggi.



Gambar 2 Gambar Citra SEM Morphologi permukaan (a) FAPS (b) FANR

D. Kuat Tekan b)

Citra SEM Morphologi permukaan (a) FAPS (b) FANR Berdasarkan grafik kuat tekan mortar geopolimer dengan rasio LA/FA 0,6 dan 0,5, terlihat bahwa seluruh variasi campuran mengalami peningkatan nilai kuat tekan seiring bertambahnya umur pengujian. Pada rasio 0,6, nilai kuat tekan maksimum dicapai oleh campuran 60% FANR : 40% FAPS dan 80% : 20% dengan hasil sekitar 16 MPa pada umur 28 hari. Meskipun demikian, kuat tekan yang dihasilkan masih lebih rendah dibandingkan dengan rasio 0,5. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan larutan alkali yang terlalu tinggi dapat menghambat proses polikondensasi, karena kelebihan ion OH^- berpotensi menimbulkan porositas pada struktur mortar, sehingga mengurangi kepadatan dan kekuatannya.



Gambar 3 Grafik Kuat Tekan Mortar Geopolimer dengan LA 0.6

Sementara itu, pada rasio LA/FA 0,5 diperoleh hasil kuat tekan yang lebih tinggi pada semua variasi campuran. Campuran 60% FANR : 40% FAPS menunjukkan nilai optimum dengan kuat tekan mencapai 18 MPa pada umur 28 hari, lebih tinggi dibandingkan dengan rasio 0,6. Hal ini membuktikan bahwa rasio 0,5 lebih efektif dalam memfasilitasi reaksi geopolimerisasi sehingga menghasilkan ikatan matriks yang lebih padat. Selain itu, penggunaan fly ash secara

tunggal baik FANR maupun FAPS memberikan hasil yang rendah, menegaskan bahwa kombinasi kedua material memberikan efek sinergis dalam meningkatkan kekuatan mortar geopolimer.



Gambar 4 Grafik Kuat Tekan Mortar Geopolimer dengan LA 0.5

Proses polimerisasi pada geopolimer berlangsung ketika material kaya silika (Si) dan alumina (Al), seperti fly ash, bereaksi dengan larutan alkali. Reaksi ini dimulai dengan pelarutan senyawa Si dan Al dari permukaan partikel oleh larutan natrium hidroksida (NaOH), kemudian dilanjutkan dengan polikondensasi yang menghasilkan gel aluminosilikat tiga dimensi. Gel ini mengeras seiring waktu dan membentuk struktur pengikat yang kuat serta stabil. Mekanisme ini menciptakan matriks yang padat sehingga mengurangi porositas dan meningkatkan kekuatan mekanik dari material geopolimer. Jadi unsur kimia yang paling berpengaruh terhadap kuat tekan mortar geopolimer adalah silika (Si), alumina (Al), dan kalsium (Ca). Silika dan alumina berfungsi membentuk kerangka gel aluminosilikat yang kuat, sementara kalsium mempercepat reaksi awal dan mendukung pembentukan gel tambahan. Dikarnakan dari hasil pengujian X-Ray Fluorescence (XRF) tercatat bahwa FAPS terdiri atas SiO₂ sementara FANR didominasi oleh SiO₂ sebesar 39,03% dan Al₂O₃ sebesar 48,04% dan Al₂O₃ sebesar 23,08%, sebesar 27,64%. Kandungan silika dan alumina yang cukup tinggi ini menegaskan sifat pozzolanik yang baik serta potensi reaktivitas, sedangkan CaO berkontribusi terhadap percepatan ikatan dan peningkatan kekuatan material. Dengan demikian, keseimbangan kandungan Si, Al, dan Ca sangat menentukan mutu akhir serta kuat tekan mortar geopolimer.

SIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa Fly Ash Pangkalan Susu (FAPS) berbentuk agak melengkung dengan permukaan kasar, sedangkan Fly Ash Nagan Raya (FANR) berbentuk bola amorf halus. FANR lebih cepat bereaksi terhadap alkali dibandingkan FAPS. Berdasarkan XRF, FAPS tergolong kelas C dengan dominasi SiO₂, Al₂O₃, dan CaO, sedangkan FANR tipe F dengan kandungan silika dan alumina lebih tinggi. Analisis FTIR menunjukkan FANR cenderung membentuk gel N-A-S-H yang mendukung kekuatan jangka panjang, sedangkan FAPS menghasilkan gel C-(A)-S-H yang mempercepat ikatan awal. Uji kuat tekan menunjukkan bahwa komposisi optimum diperoleh pada campuran 60% FANR dan 40% FAPS, dengan kuat tekan

18,01 MPa (rasio LA/FA 0,5) dan 16,00 MPa (rasio 0,6) pada umur 28 hari. Campuran tunggal menghasilkan kuat tekan rendah, yakni 1,42 MPa (100% FANR) dan 5,86 MPa (100% FAPS) pada umur 3 hari. Hal ini membuktikan bahwa FANR memiliki Si-Al-Ca tinggi yang dapat mendukung kekuatan jangka panjang dan mempercepat ikatan awal, tetapi kombinasi dari keduanya juga penting untuk meningkatkan dan memperbaiki kuat tekan mortar.

DAFTAR PUSTAKA

- Aisyah Qifty Muda. (2023). SKRIPSI Aisyah Qifty Muda Aiyub (2022) ‘Perbandingan Karakteristik Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Nagan Raya Terhadap Mortar Konvensional dengan FAS 0,5’, *Jurnal Teknik Sipil Unaya*, 8(2), pp. 171–181. Available at: <http://jurnal.abulyatama.ac.id/tekniksipilunaya>.
- Fajri et al. (2021) ‘Penerapan Mortar Geopolimer Ringan Berbasis Fly Ash PLTU Pangkalan Susu dengan Penambahan EPS untuk Elemen Non Struktural’, *Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, 5(1), pp. 185–189. Available at: <https://panca-cipta.com/>.
- Fajri et al. (2022) ‘Pengaruh Penambahan Serat Polypropylene dari Limbah Karung Beras terhadap Sifat Mekanis Mortar Geopolimer Berbasis Fly ash PLTU Pangkalan Susu’, *Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, 6(1), pp. 49–54.
- Farid, (2024) ‘Treatment optimalisasi pencampuran dua jenis fly ash terhadap sifat rheologi dan mekanis mortar geopolimer’.
- Fauzi, A. et al. (2021) ‘KUAT TEKAN MORTAR GEOPOLIMER’, 5(1), pp. 71–76.
- Fauzi, A. et al. (2022) ‘Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe Analisa Studi Pasta Geopolimer dengan Menggunakan Fly Ash PLTU Pangkalan Susu untuk Mengatasi Retak pada Beton’, *Analisa Studi Pasta Geopolimer dengan Menggunakan Fly Ash PLTU Pangkalan Susu untuk Mengatasi Retak pada Beton*, 6(2598–3954), pp. 101–106.
- Jalil Bangun, A., Tarigan, J. and Perwira, A. (2021) ‘Pengaruh Variasi Molar pada Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Pltu Pangkalan Susu’, *Jurnal Syntax Admiration*, 2(4), pp. 546–557. Available at: <https://doi.org/10.46799/jsa.v2i4.218>.
- P.U., M.G. (2020) ‘Media Ilmiah Teknik Sipil , Volume 8 , Nomor 2 , Juni 2020(: 79-87 Media Ilmiah Teknik Sipil , Volume 8 , Nomor 2 , Juni 2020(: 79-87’, 8(1), pp. 79–87.
- Salwan, A.A., Rizal, F. and Miswar, K. (2021) ‘Analisa Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbasis Fly Ash Nagan Raya Dengan Metode Dry Mix’, *Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe* , 5(1), pp. 40–45.
- Simanjuntak, D.M. and Wardhono, A. (2022) ‘ANALISIS KUAT TEKAN DAN POROSITAS MORTAR GEOPOLIMER MENGGUNAKAN ABU SEKAM PADI SEBAGAI BAHAN SUBSTITUSI FLY ASH PADA MOLARITAS 8 Devi Maria Simanjuntak Arie Wardhono’, *Rekayasa Teknik Sipil*, 4(3), pp. 1–10.