

Pengaruh Rasio Air–Pengikat terhadap Waktu Pengikatan dan Kuat Tekan Pasta Geopolimer

Suci Amalia Namira Wahidin^{*1a}, Moh Iqbal Rasyid^{*2}, Andi Arham Adam^{*3}, Sri Nur Akifa^{*4}, Bayu Rahmat Ramadhan^{*5}

Submit:
30 Juni 2025

Review:
22 Juli 2025

Revised:
02 Agustus 2025

Published :
14 Agustus 2025

^{*1} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia, scnamira@gmail.com

^{*2} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia, iqbalrasyid@gmail.com

^{*3} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia, andi.arham@untad.ac.id

^{*4} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia, srinurakifa@untad.ac.id

^{*5} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia, bayurramadhan@untad.ac.id

^{1a*}Corresponding Author: scnamira@untad.ac.id

Abstrak

Industri konstruksi merupakan penyumbang emisi CO₂ yang besar, dimana produksi semen Portland menyumbang sekitar 7% dari total emisi global. Sebagai solusi geopolimer dikembangkan sebagai bahan alternatif yang lebih ramah lingkungan. Geopolimer berbasis aluminosilikat dan diaktivasi oleh larutan alkali ini mampu menghasilkan kekuatan mekanik tinggi dengan emisi karbon yang lebih rendah. Salah satu bahan utama yang digunakan adalah abu terbang (*fly ash*), limbah padat dari pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Penelitian ini mengevaluasi pengaruh rasio air terhadap bahan pengikat (*water-to-binder ratio*) terhadap waktu pengikatan dan kuat tekan pasta geopolimer. Abu terbang tipe F berasal dari PLTU Mpanau, Palu, dengan penambahan 10% kapur padam (Ca(OH)₂). Aktivator yang digunakan adalah campuran sodium silikat, sodium hidroksida, dan air demineral. Variasi kadar Na₂O adalah 6%, 8%, dan 10% dengan rasio air terhadap bahan pengikat antara 0,24 – 0,42. Kuat tekan tertinggi 22,68 MPa dicapai pada umur 28 hari dengan kadar Na₂O 10% dan rasio 0,28.

Kata kunci: Abu terbang, aktivator alkali, geopolimer, kapur padam, kuat tekan

Abstract

The construction industry is a major contributor to CO₂ emissions, with Portland cement production accounting for approximately 7% of total global emissions. As a solution, geopolymers have been developed as a more environmentally friendly alternative material. These aluminosilicate-based geopolymers, activated by alkaline solutions, can achieve high mechanical strength with lower carbon emissions. One of the main raw materials used is fly ash, a solid waste by-product from coal-fired power plants. This study evaluates the effect of the water-to-binder ratio on the setting time and compressive strength of geopolymer paste. The Class F fly ash was sourced from the Mpanau Power Plant in Palu, with the addition of 10% hydrated lime (Ca(OH)₂). The activator used was a mixture of sodium silicate, sodium hydroxide, and demineralized water. Na₂O concentrations were varied at 6%, 8%, and 10%, with water-to-binder ratios ranging from 0.24 to 0.42. The highest compressive strength of 22.68 MPa was obtained at 28 days with 10% Na₂O and a 0.28 ratio.

Keywords: alkali activator, compressive strength, geopolymer, fly ash, hydrated lime

PENDAHULUAN

Industri konstruksi global saat ini menghadapi tantangan besar terkait pengurangan emisi karbon dioksida (CO_2), dimana produksi semen Portland menyumbang sekitar 7% dari total emisi karbon dunia [1]. Untuk mengatasi permasalahan ini, dikembangkanlah alternatif material ramah lingkungan seperti penggunaan limbah sebagai substitusi agregat sejalan dengan pengembangan material geopolimer yang ramah lingkungan. Inovasi ini mendukung upaya pengurangan emisi karbon dan pemanfaatan limbah dalam konstruksi berkelanjutan [2]. Geopolimer merupakan material berbasis aluminosilikat yang diaktivasi dengan larutan alkali, dan mampu memberikan performa mekanik tinggi dengan jejak karbon yang jauh lebih rendah dibandingkan semen konvensional [3]. Salah satu bahan baku utama dalam pembuatan geopolimer adalah abu terbang (*fly ash*), yaitu limbah padat hasil pembakaran batu bara di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Di Indonesia, khususnya di wilayah Sulawesi Tengah, penggunaan PLTU terus meningkat seiring dengan perkembangan kawasan industri, seperti kawasan industri Morowali (IMIP). Menurut data dari Kementerian ESDM dan RUPTL 2021–2030, Sulawesi Tengah termasuk dalam provinsi dengan jumlah PLTU terbanyak di Kawasan Timur Indonesia [4]. Hal ini menyebabkan produksi limbah abu terbang yang cukup tinggi, sehingga diperlukan strategi pemanfaatan yang berkelanjutan agar tidak mencemari lingkungan. Salah satu solusinya adalah mengonversi limbah abu terbang menjadi material geopolimer.

Efektivitas geopolimer sangat bergantung pada formulasi campurannya, terutama rasio air terhadap bahan pengikat (*water-to-binder ratio*) dan kadar aktivator alkali. Rasio air berpengaruh besar terhadap laju reaksi polimerisasi, waktu pengikatan, serta kekuatan tekan akhir material [5]. Aktivator alkali seperti sodium silikat (Na_2SiO_3) dan sodium hidroksida (NaOH) memainkan peran penting dalam melarutkan silika dan alumina dari abu terbang, yang selanjutnya membentuk struktur jaringan polimer anorganik [6]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penurunan rasio air dapat meningkatkan kekuatan tekan, namun menyebabkan penurunan *workability* [7]. Sementara itu, peningkatan kadar aktivator alkali dapat mempercepat proses polimerisasi dan pengikatan awal, namun juga berisiko menurunkan stabilitas struktur jika tidak dikontrol secara tepat [8]. Komposisi optimal sangat bergantung pada karakteristik lokal abu terbang dan jenis aktivator yang digunakan dalam campuran [9].

Meskipun telah banyak dilakukan studi terkait geopolimer berbasis abu terbang atau *fly ash*, kajian tentang pengaruh variasi kadar Na_2O dan rasio air terhadap bahan pengikat secara spesifik terhadap waktu pengikatan dan kuat tekan masih terbatas, terutama pada penggunaan abu terbang tipe F dari PLTU di Sulawesi Tengah. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh kedua parameter tersebut terhadap karakteristik awal dan mekanik pasta geopolimer yang memanfaatkan limbah lokal, dengan menambahkan kapur padam sebagai sumber kalsium untuk mempercepat pengikatan.

METODOLOGI

Penelitian ini merupakan studi eksperimental laboratorium yang bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh rasio air terhadap bahan pengikat serta variasi kadar alkali (Na_2O) terhadap waktu pengikatan dan kuat tekan pasta geopolimer berbasis abu terbang tipe F. Bahan utama yang digunakan dalam penelitian meliputi abu terbang dari PLTU Mpanau Palu, kapur padam ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), larutan sodium silikat, sodium hidroksida, dan air murni tanpa mineral.

1. Pemeriksaan dan Karakterisasi Bahan

Sebelum proses pencampuran dilakukan, seluruh bahan yang digunakan dalam penelitian ini melalui tahap pemeriksaan awal untuk memastikan kesesuaian terhadap standar material pembentuk geopolimer. Bahan

pertama yang diuji adalah kapur padam (Ca(OH)_2), yang berfungsi sebagai sumber kalsium tambahan untuk mempercepat reaksi pengikatan awal. Pemeriksaan terhadap kapur padam meliputi analisis komposisi kimia menggunakan X-Ray *Fluorescence* (XRF), kehalusan melalui metode ayakan, kadar air dengan oven *drying*, berat jenis dengan metode piknometer, serta kehilangan pemijaran (*Loss on Ignition/LOI*) yang menunjukkan kestabilan termal material.

Tabel 1. Komposisi Kapur Padam

No.	Parameter	Abu Terbang%
1	CaO	85,04
2	SrO	2,17
3	Cl	1,06
4	K ₂ O	1,03
5	Fe ₂ O ₃	0,35
6	TiO ₂	0,03
7	Oksida Lain	0,10
8	Hilang Pijar	10,25
Total		100

Selanjutnya, abu terbang tipe F dari PLTU Mpanau Palu diuji secara menyeluruh untuk menentukan potensi reaktifitasnya dalam sistem geopolimer. Pengujian dilakukan terhadap komposisi kimia utama (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3), berat jenis, kehalusan partikel, kadar air, dan LOI. Analisis ini mengacu pada standar ASTM C311 [10] dan digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi apakah abu terbang tersebut memenuhi kriteria sebagai bahan dasar geopolimer.

Tabel 2. Komposisi Abu Terbang

No.	Parameter	Abu Terbang%
1	SiO ₂	56,04
2	Fe ₂ O ₃	21,27
3	Al ₂ O ₃	12,99
4	CaO	5,18
5	K ₂ O	1,62
6	TiO ₂	0,90
7	MnO	0,26
8	P ₂ O ₅	0,25
9	Oksida Lain	0,57
10	Hilang Pijar	0,9
Total		100

Alkali aktivator yang digunakan terdiri dari larutan sodium silikat (Na_2SiO_3) dan sodium hidroksida (NaOH) dengan molaritas 10M. Karakterisasi larutan aktivator dilakukan untuk mengetahui kandungan Na_2O dan SiO_2 dalam sodium silikat serta berat jenis dan kadar air masing-masing larutan. Rasio $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ dari sodium silikat juga diperhatikan karena berpengaruh terhadap viskositas dan reaktivitas larutan alkali.

2. Mix Design

Perencanaan campuran dilakukan dengan memvariasikan rasio air terhadap bahan pengikat sebesar 0,24 hingga 0,42 dengan interval 0,02. Sementara itu, konsentrasi kadar alkali (dihitung sebagai Na₂O setara) divariasikan sebesar 6%, 8%, dan 10% terhadap berat bahan pengikat total. Aktivator disiapkan dari campuran sodium hidroksida 10M dan sodium silikat dengan rasio tetap sesuai penelitian sebelumnya [11]

Tabel 3. Desain Campuran

Mix Code	Kadar Na ₂ O(%)	Rasio Air / Bahan Pengikat	Komposisi Kapur Padam (%)
G6W24	6	0,24	10
G6W26	6	0,26	10
G6W28	6	0,28	10
G6W30	6	0,30	10
G6W32	6	0,32	10
G6W34	6	0,34	10
G6W36	6	0,36	10
G6W38	6	0,38	10
G6W40	6	0,40	10
G6W42	6	0,42	10
G8W24	8	0,24	10
G8W26	8	0,26	10
G8W28	8	0,28	10
G8W30	8	0,30	10
G8W32	8	0,32	10
G8W34	8	0,34	10
G8W36	8	0,36	10
G8W38	8	0,38	10
G8W40	8	0,40	10
G8W42	8	0,42	10
G10W24	10	0,24	10
G10W26	10	0,26	10
G10W28	10	0,28	10
G10W30	10	0,30	10
G10W32	10	0,32	10
G10W34	10	0,34	10
G10W36	10	0,36	10
G10W38	10	0,38	10
G10W40	10	0,40	10
G10W42	10	0,42	10

3. Pasta Geopolimer

Setelah bahan memenuhi spesifikasi, dilakukan pencampuran pasta geopolimer menggunakan *mixer* kecepatan sedang selama 5 menit hingga homogen. Pasta segar diuji untuk waktu pengikatan awal dan akhir menggunakan metode Vicat [12]. Selanjutnya, pasta dituangkan ke dalam cetakan silinder berdiameter 2,5 cm dan tinggi 5 cm. Spesimen disimpan pada suhu ruang (27 ± 2 °C) selama 24 jam sebelum dilakukan *curing* dalam kondisi laboratorium hingga waktu pengujian.

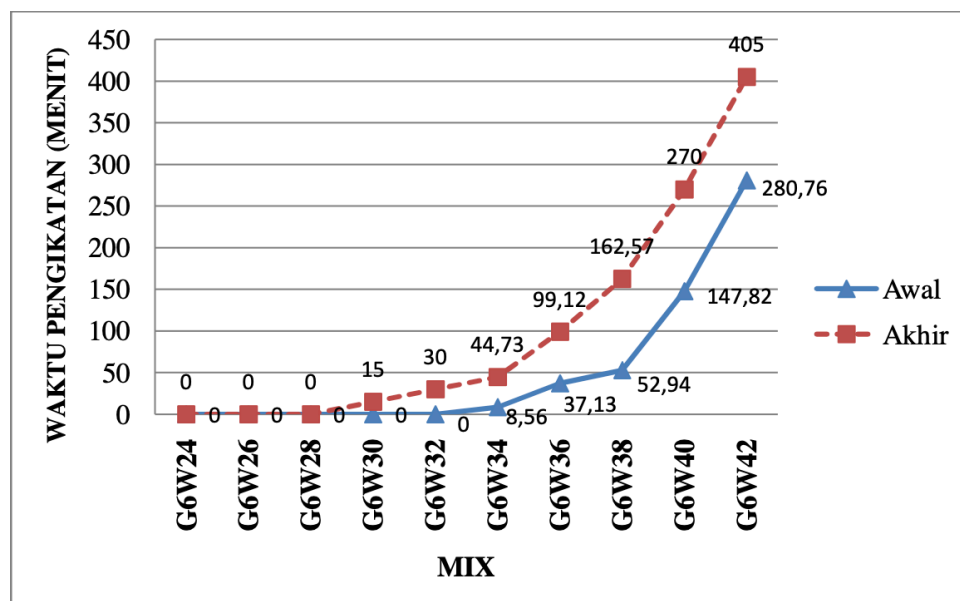
Uji kuat tekan dilakukan pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari menggunakan alat uji tekan hidrolik sesuai ASTM C109 / C109M. Setiap variasi dilakukan dengan minimal tiga pengulangan untuk memperoleh hasil rerata yang representatif. Data hasil pengujian dianalisis untuk melihat hubungan antara rasio air terhadap bahan pengikat dan kadar Na_2O terhadap dua parameter utama: waktu pengikatan dan kuat tekan. Evaluasi dilakukan untuk mengidentifikasi komposisi campuran yang memberikan waktu pengikatan optimal serta kekuatan maksimum, sekaligus menilai tren reaktivitas dan kekompakan struktur geopolimer berdasarkan variabel yang diuji.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji waktu pengikatan dilakukan pada sampel pasta geopolimer menggunakan alat Vicat untuk menentukan waktu pengikatan awal dan akhir. Pengujian dilakukan terhadap variasi kadar Na_2O dan rasio air terhadap bahan pengikat. Penambahan kapur padam (CaO) memungkinkan pengerasan pasta geopolimer pada suhu ruang. Hal ini diduga akibat reaksi antara kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dengan alumino silikat terlarut atau sodium silikat, yang berpotensi membentuk fase kalsium silikat hidrat (C-S-H) atau kalsium alumino silikat hidrat (C-A-S-H). Mekanisme ini menyerupai reaksi hidrasi pada semen *portland*, dimana kalsium silikat bereaksi dengan air membentuk C-S-H sebagai produk utama pengerasan. Oleh karena itu, keberadaan kapur padam dapat mempercepat proses pengerasan pada suhu ruang tanpa perlakuan panas tambahan (*curing oven*).

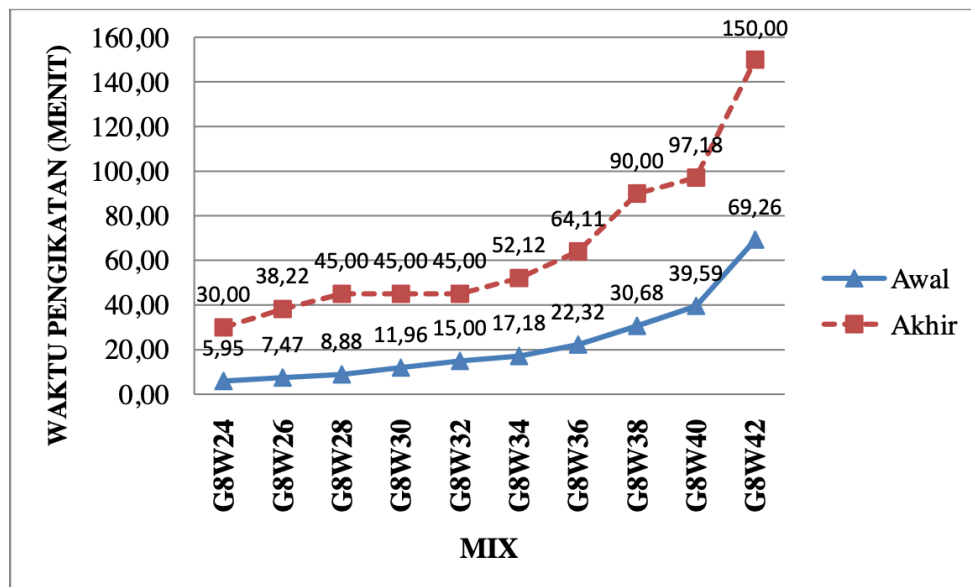
1. Pemeriksaan dan Karakterisasi Bahan

Pada pasta geopolimer dengan kadar Na_2O sebesar 6%, hubungan rasio air terhadap bahan pengikat menunjukkan peningkatan positif dengan waktu pengikatan. Semakin tinggi rasio air, semakin lama waktu pengikatan dan semakin encer konsistensi pasta yang terbentuk. Berdasarkan pengujian, tidak ditemukan rasio air terhadap bahan pengikat yang secara pasti memenuhi rentang waktu pengikatan ideal menurut standar semen *portland*, yaitu 60–120 menit sesuai Gambar 1. Namun, rasio air sebesar 0,38 hingga 0,40 mendekati kisaran tersebut. Rasio air sebesar 0,24 hingga 0,38 menghasilkan waktu pengikatan awal kurang dari 60 menit, sedangkan pada rasio 0,40 hingga 0,42, waktu pengikatan melebihi 120 menit. Hal ini menunjukkan bahwa rasio air yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menyebabkan deviasi signifikan terhadap waktu pengikatan yang diharapkan pada aplikasi praktis.



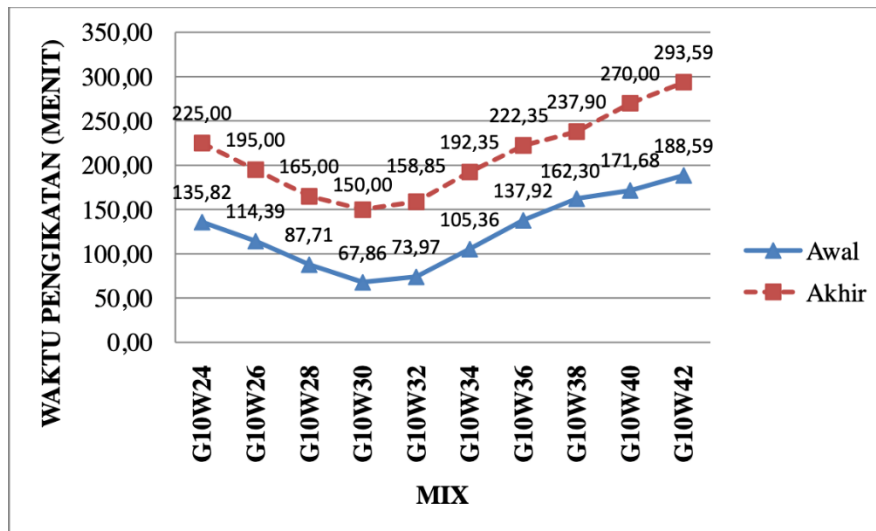
Gambar 1. Hubungan Antara Rasio air/Bahan Pengikat terhadap waktu Pengikatan pada Kadar Na_2O 6%

Peningkatan rasio air terhadap bahan pengikat dari 0,24 hingga 0,34 menunjukkan pengaruh yang relatif kecil terhadap waktu pengikatan, dengan rata-rata peningkatan hanya sebesar 1,71 menit. Bahkan, pada rasio 0,24 hingga 0,32, waktu pengikatan awal tercatat sebesar 0 menit, yang mengindikasikan reaksi awal terjadi secara sangat cepat. Sebaliknya, peningkatan rasio air ke rentang 0,36 hingga 0,42 menyebabkan lonjakan signifikan pada waktu pengikatan, dengan rata-rata peningkatan sebesar 68,05 menit. Berdasarkan hasil penelitian oleh Sofyani [13] Hal ini disebabkan oleh bertambahnya jumlah air bebas dalam campuran, yang mengencerkan larutan aktivator dan menurunkan konsentrasi ion aktif, sehingga memperlambat reaksi polimerisasi. Tren serupa juga diamati pada pasta geopolimer dengan kadar Na_2O sebesar 8%, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hubungan Antara Rasio air/Bahan Pengikat terhadap waktu Pengikatan pada Kadar Na_2O 8%

Variasi rasio air terhadap bahan pengikat pada kadar Na_2O sebesar 8% menunjukkan tren serupa dengan kadar 6%, yaitu semakin tinggi rasio air, semakin lama waktu pengikatan. Berdasarkan hasil pengujian, kadar Na_2O 8% memerlukan jumlah air yang lebih tinggi untuk mencapai waktu pengikatan ideal sesuai standar semen *portland* (60–120 menit). Waktu pengikatan yang mendekati standar tersebut tercapai pada rasio air sebesar 0,42, sedangkan rasio 0,24 hingga 0,40 menghasilkan waktu pengikatan di bawah 60 menit. Berbeda dengan kadar 6%, pada kadar 8%, rasio air 0,24 telah menunjukkan waktu pengikatan awal sebesar 5,95 menit. Sebagai perbandingan, pada kadar 6%, waktu pengikatan awal masih 0 menit hingga rasio air 0,34. Peningkatan rasio air dari 0,24 hingga 0,34 memberikan pengaruh kecil terhadap waktu pengikatan, dengan rata-rata kenaikan sebesar 2,25 menit. Namun, pada rentang rasio 0,34 hingga 0,42, peningkatan waktu pengikatan menjadi signifikan, dengan rata-rata peningkatan sebesar 13,02 menit. Hal ini menunjukkan bahwa sensitivitas waktu pengikatan terhadap rasio air menjadi lebih nyata pada rentang rasio tinggi. Namun, kecenderungan peningkatan waktu pengikatan dengan bertambahnya rasio air tidak terjadi secara linier pada kadar Na_2O sebesar 10%, sebagaimana terlihat pada Gambar 3. Fenomena ini sejalan dengan temuan oleh Zheng [14] yang menyatakan bahwa peningkatan kandungan air pada geopolimer tidak hanya mempengaruhi kecepatan polimerisasi, tetapi juga struktur pori dan kerapatan mikrostruktur, sehingga dapat menghasilkan waktu pengikatan yang tidak terprediksi secara linier.



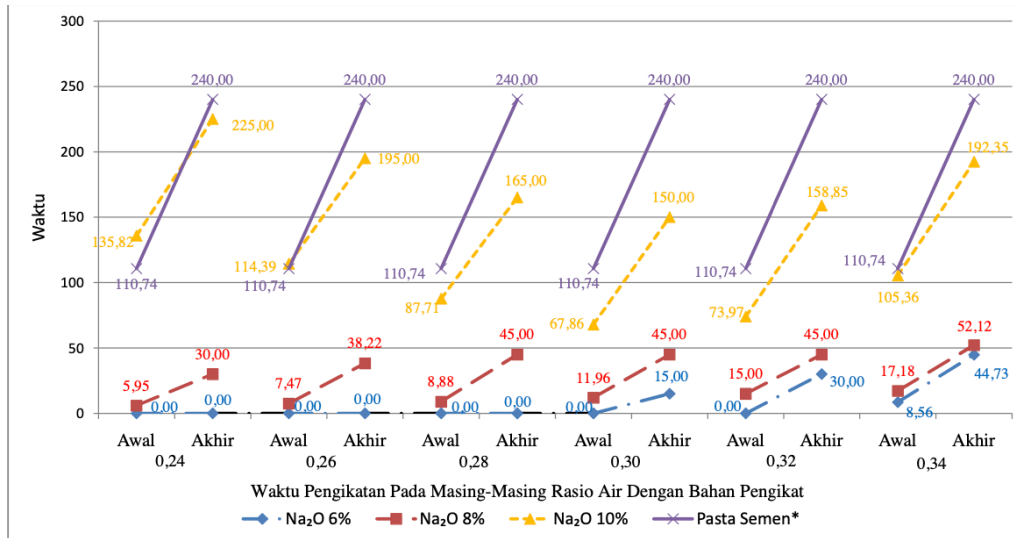
Gambar 3. Hubungan Antara Rasio air/Bahan Pengikat terhadap waktu Pengikatan pada Kadar Na_2O 10%

Secara umum, peningkatan rasio air terhadap bahan pengikat menyebabkan waktu pengikatan menjadi lebih lama. Hal ini disebabkan oleh bertambahnya jumlah air bebas dalam campuran, yang membuat konsistensi pasta semakin encer dan memperlambat proses pengerasan. Namun, pengecualian terjadi pada kadar Na_2O sebesar 10%, di mana peningkatan rasio air dari 0,24 hingga 0,30 justru mempercepat waktu pengikatan. Percepatan ini belum dapat dijelaskan secara pasti, namun diduga terjadi akibat jumlah air yang masih belum mencukupi untuk reaksi kimia secara optimal, terutama reaksi antara kalsium hidroksida dengan silikat dari abu terbang. Kekurangan air menyebabkan sebagian abu terbang tidak bereaksi sempurna dan hanya berperan sebagai bahan pengisi, bukan sebagai bahan pengikat aktif. Akibatnya, proses pengerasan dapat terjadi lebih cepat seiring peningkatan rasio air hingga titik tertentu (0,30), sebelum efek kelebihan air kembali memperlambat reaksi pada rasio yang lebih tinggi.

Setiap kadar aktivator (Na_2O) menunjukkan kebutuhan rasio air terhadap bahan pengikat yang berbeda untuk mencapai waktu pengikatan ideal sesuai standar semen *portland* (60–120 menit). Kadar Na_2O 10% memerlukan rasio air paling rendah, sedangkan kadar 8% membutuhkan rasio air paling tinggi untuk memenuhi rentang waktu pengikatan yang sesuai. Hal ini menegaskan bahwa kombinasi rasio air dan kadar aktivator harus dioptimalkan untuk menghasilkan performa pengikatan yang sesuai dengan standar.

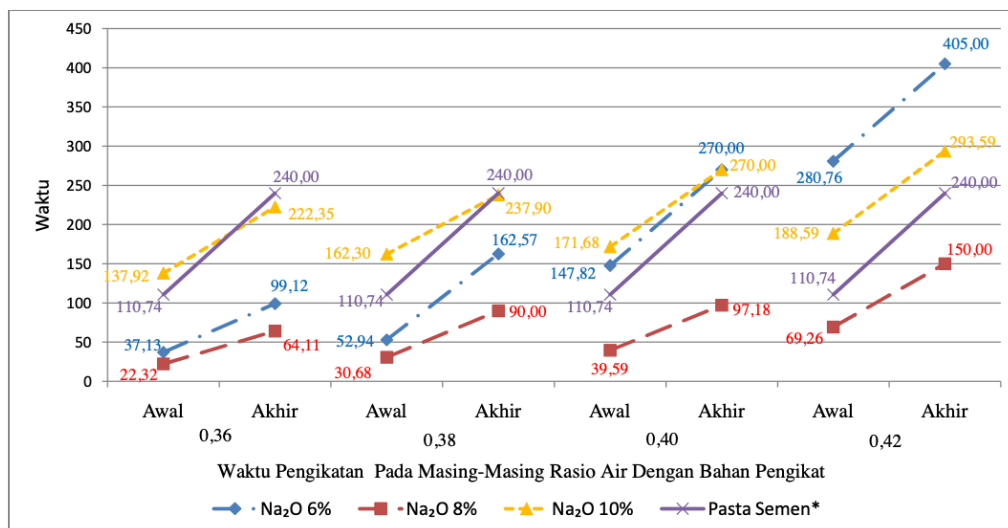
2. Waktu Pengikatan Setiap Kadar Na_2O Dengan Rasio Air Dengan Bahan Pengikat Yang Sama

Penelitian menunjukkan bahwa pada rasio air terhadap bahan pengikat (w/b) 0,24–0,34, waktu pengikatan terlama terjadi pada kadar aktivator Na_2O sebesar 10%, sementara waktu pengikatan tercepat tercatat pada kadar 6%. Waktu pengikatan dengan kadar Na_2O 10% mendekati waktu pengikatan pasta semen *portland* konvensional, khususnya pada rasio (w/b) 0,26–0,34 yang sesuai dengan standar. Sebaliknya, kadar 6% dan 8% menunjukkan waktu pengikatan yang jauh lebih cepat dibandingkan pasta semen standar. Rata-rata selisih antara waktu pengikatan awal dan akhir pada masing-masing kadar Na_2O 6%, 8%, dan 10% adalah sebesar 11,03 menit, 31,48 menit, dan 85,52 menit secara berturut-turut yang dijelaskan pada Gambar 4.



Gambar 4. Waktu Pengikatan Kadar Na₂O pada Rasio Air/Bahan Pengikat 0,24 - 0,34

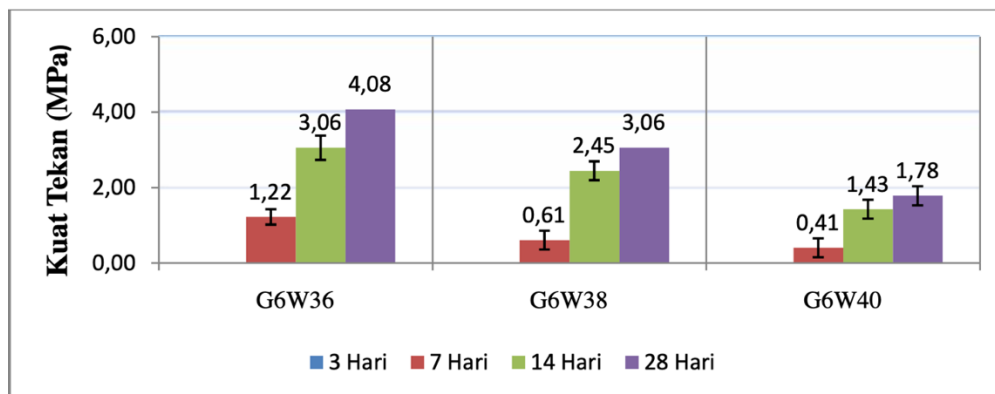
Gambar 5 menunjukkan perbedaan karakteristik dibandingkan variabel sebelumnya. Pada rasio air terhadap bahan pengikat (w/b) 0,36–0,40, waktu pengikatan terlama terjadi pada kadar Na₂O sebesar 10%, sedangkan waktu tercepat tercatat pada kadar 8%. Namun, peningkatan signifikan waktu pengikatan justru terjadi pada kadar 6%, khususnya pada rasio (w/b) 0,42, di mana waktu pengikatan terlama dicapai oleh kadar Na₂O 6%. Pada rasio (w/b) 0,36, waktu pengikatan dengan kadar 10% mendekati karakteristik pasta semen portland. Sementara itu, pada (w/b) 0,40, kadar 6% juga mendekati waktu pengikatan semen, namun telah melampaui ambang batas standar maksimum yaitu 120 menit (1). Pada rasio (w/b) 0,42, kadar Na₂O 8% menunjukkan waktu pengikatan mendekati standar semen portland yang berada dalam kisaran 60–120 menit. Rata-rata selisih antara waktu pengikatan awal dan akhir untuk rasio (w/b) 0,36–0,42 pada kadar Na₂O 6%, 8%, dan 10% berturut-turut adalah 104,51 menit, 59,86 menit, dan 90,84 menit.



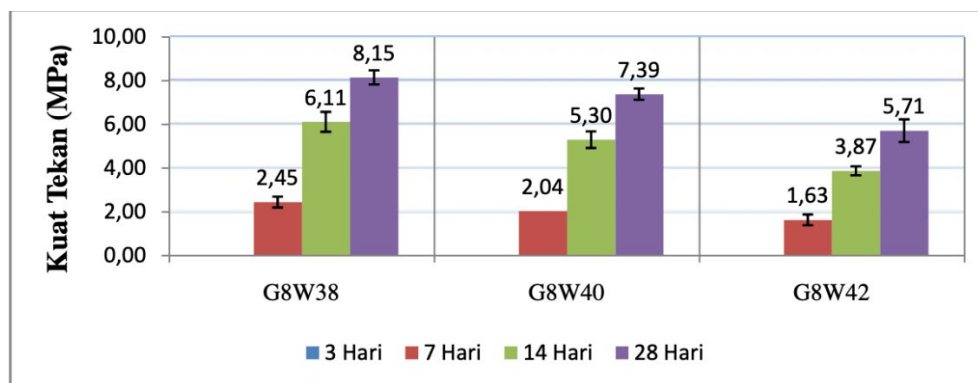
Gambar 5. Waktu Pengikatan Kadar Na₂O pada Rasio Air/Bahan Pengikat 0,36 - 0,42

3. Kuat Tekan Pasta Geopolimer

Pengujian waktu pengikatan melibatkan 30 variasi campuran (*mix*), namun hanya 15 campuran yang berhasil dicetak menjadi benda uji, yang terdiri dari 3 *mix* dengan kadar Na_2O 6%, 3 *mix* kadar 8%, dan 9 *mix* kadar 10%. Campuran yang gagal dicetak disebabkan oleh pengerasan yang terlalu cepat, terutama pada kadar Na_2O 6% dengan rasio air terhadap bahan pengikat (w/b) 0,24–0,34 dan kadar 8% pada rasio (w/b) 0,24–0,36. Selain itu, beberapa campuran tidak dicetak karena terlalu cair dan menunjukkan waktu pengikatan yang sangat lambat, terutama pada rasio (w/b) 0,42 untuk kadar Na_2O 6% dan 10%. Data lengkap hasil pengujian kuat tekan pasta geopolimer berbahan dasar abu terbang dan kapur padam disajikan pada Gambar 6, 7 dan 8.

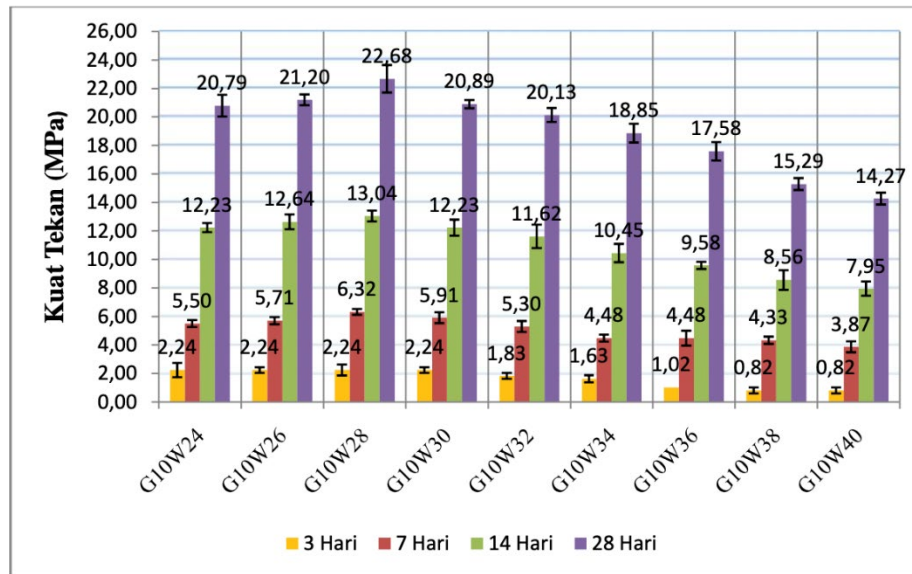


Gambar 6. Hubungan antara Kuat Tekan dengan Umur Pasta Geopolimer pada Kadar Na_2O 6%



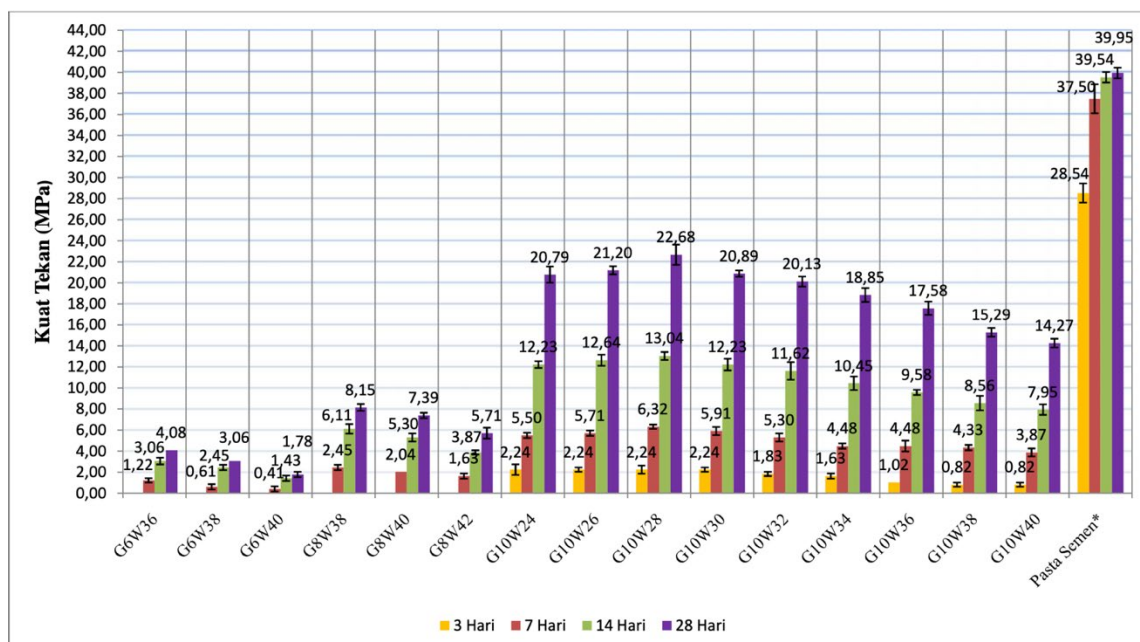
Gambar 7. Hubungan antara Kuat Tekan dengan Umur Pasta Geopolimer pada Kadar Na_2O 8%

Pengaruh rasio air terhadap bahan pengikat (w/b) pada pasta geopolimer berbahan dasar abu terbang dan kapur padam dengan tiga variasi kadar Na_2O , yaitu 6%, 8%, dan 10%. Secara umum, peningkatan rasio (w/b) cenderung menurunkan kuat tekan akhir, sejalan dengan temuan dalam literatur terkait pasta geopolimer. Pada kadar Na_2O 6% dan 8%, seluruh variasi sampel menunjukkan kuat tekan 0 MPa pada pengujian umur 3 hari, mengindikasikan reaksi awal yang lambat. Peningkatan kuat tekan tertinggi untuk kedua kadar ini terjadi pada umur 14 hari, yang menandakan dominasi reaksi polimerisasi pada fase menengah umur perawatan. Nilai tertinggi pada kadar 6% dicapai pada rasio (w/b) 0,36 sebesar 4,08 MPa, sedangkan pada kadar 8% dicapai pada rasio (w/b) 0,38 sebesar 8,15 MPa. Kedua kadar menunjukkan penurunan kuat tekan seiring meningkatnya rasio (w/b), terutama pada rasio 0,42.



Gambar 8. Hubungan antara Kuat Tekan dengan Umur Pasta Geopolimer pada Kadar Na_2O 10%

Berbeda dengan kedua kadar sebelumnya, pasta dengan kadar Na_2O 10% menunjukkan pola yang sedikit berbeda. Kuat tekan meningkat seiring kenaikan rasio (w/b) dari 0,24 hingga 0,28, dan kemudian menurun setelahnya. Nilai tertinggi tercapai pada rasio (w/b) 0,28 sebesar 22,68 MPa pada umur 28 hari, dengan peningkatan rata-rata signifikan dari umur 3 hari hingga 28 hari. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat rasio (w/b) optimum dalam rentang 0,26–0,30 yang memungkinkan reaksi aktivator dan bahan pozzolan berlangsung secara efektif [15].



Gambar 9. Kuat Tekan Pasta Geopolimer untuk semua Variasi dan Pasta Semen

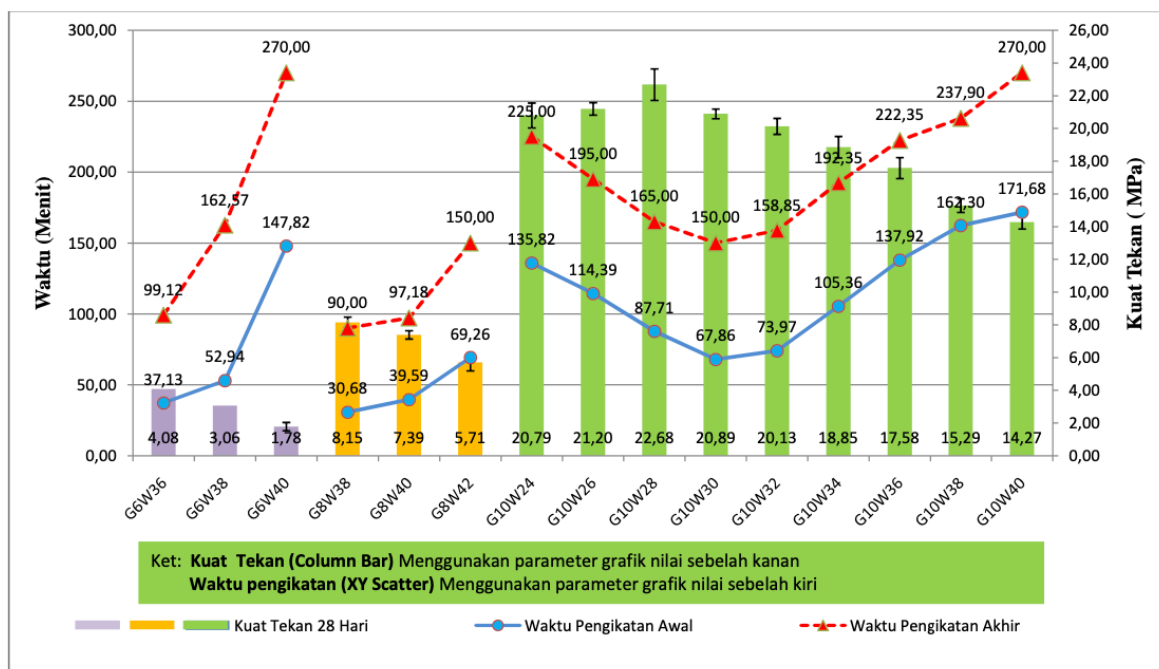
Fenomena penurunan kuat tekan pada rasio (w/b) tinggi ($>0,30$) dapat dijelaskan oleh peningkatan volume pori akibat kelebihan air pencampur, yang mengurangi densitas dan kohesi mikrostruktur [16]. Sebaliknya, pada rasio (w/b) yang terlalu rendah (0,24–0,26), kekurangan air dapat membatasi reaksi pembentukan gel polimerik akibat tidak sempurnanya pelarutan abu terbang, menjadikan partikel tak bereaksi hanya berperan

sebagai *filler*. Meskipun nilai kuat tekan tertinggi pada kadar 10% relatif lebih baik dibandingkan kadar lain, seluruh sampel geopolimer masih berada di bawah kuat tekan pasta semen konvensional pada umur 28 hari, yaitu 39,95 MPa. Ini menegaskan bahwa formulasi dan optimasi parameter aktivator sangat krusial dalam meningkatkan performa mekanik pasta geopolimer.

4. Hubungan Kuat Tekan dan Waktu Pengikatan

Secara umum, hubungan antara waktu pengikatan dan kuat tekan pada pasta geopolimer menunjukkan tren berbanding terbalik, yang konsisten untuk seluruh variasi kadar Na_2O (6%, 8%, dan 10%). Pada kadar Na_2O 6% dan 8%, peningkatan waktu pengikatan cenderung menyebabkan penurunan kuat tekan. Hal ini mengindikasikan bahwa waktu pengikatan yang terlalu lama dapat memperlambat pembentukan struktur jaringan polimer, sehingga menurunkan kekuatan akhir [17]. Pola yang sama juga diamati pada kadar Na_2O 10%. Untuk rasio air terhadap bahan pengikat 0,24 hingga 0,28, penurunan waktu pengikatan berkorelasi dengan peningkatan kuat tekan, menunjukkan terjadinya reaksi awal yang lebih efektif antara aktivator dan prekursor. Namun, pada rasio lebih tinggi (0,30 hingga 0,40), peningkatan waktu pengikatan justru berkaitan dengan penurunan kuat tekan, yang mengindikasikan bahwa pelarutan material aktif menjadi tidak optimal dan terjadi pembentukan mikrostruktur yang kurang rapat [18]

Temuan ini diperkuat oleh beberapa studi sebelumnya yang melaporkan bahwa kinetika reaksi alkali-aktivasi sangat dipengaruhi oleh waktu pengikatan. Waktu pengikatan yang terlalu cepat dapat menyebabkan kekakuan prematur dan menghambat pematangan struktur, sedangkan waktu pengikatan yang terlalu lambat mengakibatkan pembentukan pori dan defisiensi jaringan geopolimer [19]



Gambar 10. Hubungan antara waktu pengikatan dengan Kuat Tekan pada variasi Mix Pasta Geopolimer

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa rasio air terhadap bahan pengikat (w/b) berperan signifikan dalam menentukan waktu pengikatan dan kuat tekan pasta geopolimer berbahan dasar abu terbang dan kapur padam. Setiap kadar aktivator Na_2O memerlukan rasio air yang berbeda untuk mencapai waktu pengikatan awal yang sesuai dengan standar SNI 15-2049-2004 (60–120 menit). Kadar Na_2O 10% menunjukkan rentang rasio air

efektif antara 0,26–0,34, sementara kadar 8% hanya memenuhi standar pada rasio 0,42, dan kadar 6% pada kisaran 0,38–0,40. Kuat tekan optimum tercapai pada umur 28 hari untuk seluruh kadar, dengan nilai tertinggi sebesar 22,68 MPa pada kadar Na₂O 10% dengan rasio air 0,28 dan waktu pengikatan 87,71 menit. Pada kadar 8% dan 6%, kuat tekan maksimum masing-masing tercatat sebesar 8,15 MPa dan 4,08 MPa pada rasio air 0,38 dan 0,36. Meskipun demikian, seluruh nilai kuat tekan tersebut masih berada di bawah performa pasta semen konvensional yang mencapai 39,95 MPa pada umur yang sama. Secara umum, peningkatan rasio air dengan bahan pengikat menyebabkan penurunan kuat tekan dan memperpanjang waktu pengikatan. Namun, pada kadar Na₂O 10%, peningkatan rasio air dari 0,24 hingga 0,30 justru mempercepat waktu pengikatan, mengindikasikan pengaruh dominan dari komposisi aktivator terhadap kinetika reaksi geopolimerisasi pada konsentrasi tertentu.

REFERENSI

- [1] L. Li, Q. Liu, T. Huang, and W. Peng, “Mineralization and utilization of CO₂ in construction and demolition wastes recycling for building materials: A systematic review of recycled concrete aggregate and recycled hardened cement powder,” *Sep Purif Technol*, vol. 298, p. 121512, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.seppur.2022.121512.
- [2] M. Boro Allo *et al.*, “Evaluasi Perilaku Mekanik Mortar Berkelanjutan Menggunakan Butiran Plastik PET (Polyethylene Terephthalate) Sebagai Substitusi Agregat Halus,” *Paulus Civil Engineering Journal*, vol. 7, no. 22, pp. 342–348, Jun. 2025.
- [3] S. S. Purohit, “Solid-State NMR & FT-IR Spectroscopic Analysis of Anhydrous & Hydrated Mixtures of Portland Cement and Calcined Clay Blended with Maize Cob & Saw Dust: An Innovative Utilization of Bio-Waste Products as Supplementary Cementitious Material,” *American Journal of Chemistry*, vol. 13, no. 3, pp. 68–82, 2023, doi: 10.5923/j.chemistry.20231303.02.
- [4] PT PLN Persero, “Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021–2030,” 2021. [Online]. Available: www.pln.co.id
- [5] J. Rostami, A. R. Sahneh, R. Sedighardekani, M. Latifinowsoud, and R. Rostami, “Influence of phase change material and nano silica aerogel aggregates on the characteristics of cementitious composite: An experimental and predictive study,” *Journal of Building Engineering*, vol. 82, p. 108148, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.jobbe.2023.108148.
- [6] S. R. Vempada, K. Vamsi, S. M. Rao, and S. Shrihari, “Effect of molarity of sodium hydroxide and molar ratio of alkaline activator solution on the strength development of geopolymer concrete,” *E3S Web of Conferences*, vol. 309, p. 01058, Oct. 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202130901058.
- [7] A. S. Albidah, “Shear behaviour of metakaolin-fly ash based geopolymer concrete deep beams,” *Eng Struct*, vol. 275, p. 115271, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.115271.
- [8] A. W. Ourgessa, A. T. Tasew, and R. A. Hafa, “The Effect of Alkaline Concentration and Curing Temperature on the Durability of Fly Ash Geopolymer Mortar,” *Adv Mat Res*, vol. 1172, pp. 95–107, Jun. 2022, doi: 10.4028/p-ceit32.
- [9] M. Alhawati, A. Ashour, G. Yildirim, A. Aldemir, and M. Sahmaran, “Properties of geopolymers sourced from construction and demolition waste: A review,” *Journal of Building Engineering*, vol. 50, p. 104104, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104104.

- [10] A. C. / C.-23 International, *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete*. United States, 2023. [Online]. Available: <http://www.aci-int.org>.
- [11] I. H. Emeraldi, “Pengaruh Komposisi Aktivator terhadap Kuat Tekan Mortar dengan Bahan Pengikat Alkali Activated Slag,” Skripsi, Universitas Tadulako, Palu, 2023.
- [12] ASTM C109 / C109M, “Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars,” Jan. 15, 2020, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/C0109_C0109M-20.
- [13] A. S. Sofyani and N. Chairunnisa, “CHARACTERISTICS OF FLY ASH-BASED GEOPOLYMER MORTAR WITH VARIATION OF TYPES AND DOSAGES OF ADMIXTURE AND CURING SYSTEMS,” *Cerucuk*, vol. 8, no. 7, pp. 299–306, 2024.
- [14] Y. Zheng, B. He, and Y. Xiao, “Strength and microstructure of geopolymer recycled brick aggregate concrete after high temperatures,” *Constr Build Mater*, vol. 448, p. 138263, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138263.
- [15] P. Janardhan and R. V. Krishnaiah, “Strength characteristics of flyash and GGBS-based geopolymer concrete blended with hybrid fibers,” in *AIP Conference Proceedings*, 2024, p. 060012. doi: 10.1063/5.0236175.
- [16] A. Z. Khalifa, Ö. Cizer, Y. Pontikes, A. Heath, and P. Patureau, “Advances in alkali-activation of clay minerals,” *Cem Concr Res*, vol. 132, p. 106050, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106050.
- [17] H. Castillo, H. Collado, T. Droguett, and S. Sánchez, “Factors Affecting the Compressive Strength of Geopolymers: A Review,” *Minerals*, vol. 11, no. 12, p. 1317, Nov. 2021, doi: 10.3390/min11121317.
- [18] W. Tu and M. Zhang, “Behaviour of alkali-activated concrete at elevated temperatures: A critical review,” *Cem Concr Compos*, vol. 138, p. 104961, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2023.104961.
- [19] O. O. Ojedokun and P. S. Mangat, “Chemical composition and physico-mechanical properties of carbonated alkali activated concrete and mortar,” *Journal of Building Engineering*, vol. 71, p. 106480, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.jobee.2023.106480.