



Terbit *online* pada laman web jurnal :
<https://ejournal.sttp-yds.ac.id/index.php/js/index>

SAINSTEK

| ISSN (Print) 2337-6910 | ISSN (Online) 2460-1039 |



Optimasi Pengaruh Substitusi *Portland Composite Cement* (PCC) pada Pasta Geopolimer Abu Sawit Terhadap Waktu Pengerasan (*Setting Time*)

Harriad Akbar Syarif^{a*}, Antonius^b, Prabowo Setiyawan^b

^aMahasiswa Program Doktor Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung Semarang, Jalan Raya Kaligawe km.4 Terboyo Kulon, Genuk, Semarang, Jawa Tengah Indonesia, 50112

^bDosen Program Doktor Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung Semarang, Jalan Raya Kaligawekm.4 Terboyo Kulon, Genuk, Semarang, Jawa Tengah Indonesia, 50112

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi: 29 Mei 2026

Revisi Akhir: 27 Juni 2026

Diterbitkan *Online*: 28 Juni 2026

KATA KUNCI

Pasta Geopolimer
 Abu Sawit
 Waktu Pengerasan
 Geopolimer Abu Sawit

KORESPONDENSI

Telepon: -

E-mail: harriadakbarsyarif@upp.ac.id

ABSTRACT

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi substitusi PCC dengan abu sawit terhadap nilai waktu ikat pasta geopolimer. Waktu yang dibutuhkan dalam proses pengerasan pada pasta geopolimer membutuhkan waktu lama. Sehingga dengan substitusi PCC tersebut akan mendapatkan waktu optimum sesuai dengan standar pada semen. Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan beberapa variasi persentase substitusi PCC yaitu sebesar 10%, 20%, 30%, 40% dan 50% terhadap total masa binder (PCC-POFA). Alkali aktivator yang digunakan adalah Larutan Natrium Hidroksida (NaOH) 14M dan Natrium silikat (Na_2SiO_3) Be 52 dengan perbandingan 2,5. Pengujian waktu ikat dilakukan menggunakan alat *Vicat* sesuai standar pengujian pasta semen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan variasi substitusi PCC berpengaruh terhadap waktu pengerasan, variasi 10% membutuhkan waktu pengerasan paling lama dengan waktu ikat awal pada menit ke-225, yang selanjutnya tercapai waktu ikat akhir pada menit ke-285. Sedangkan untuk waktu pengerasan paling cepat pada variasi 50%, dibuktikan dengan waktu ikat awal pada menit ke-20,77 dan berakhir pada menit ke-75. Proses ini mempengaruhi reaksi geopolimer yang menyebabkan perubahan nilai waktu ikat. Percepatan waktu ikat disebabkan oleh kandungan kalsium yang terdapat dalam PCC pada proses hidrasi yang mempercepat pembentukan produk reaksi seperti gel C-S-H dan C-A-S-H yang bekerja bersamaan dengan proses geopolimerisasi. Pada variasi 20% diperoleh karakteristik pasta yang memenuhi persyaratan waktu ikat standar yang direkomendasikan (waktu ikat awal ≥ 45 menit dan waktu ikat akhir ≤ 390 menit) karena memberikan keseimbangan antara waktu kerja dan waktu pengerasan yang menunjukkan bahwa PCC memiliki potensi sebagai material substitusi abu sawit dalam pasta geopolimer.

1. PENDAHULUAN

Geopolimer merupakan material pengikat anorganik yang terbentuk melalui proses geopolimerisasi antara material kaya silika dan alumina dengan larutan aktivator alkali [1]. Dibandingkan dengan semen konvensional, material geopolimer memiliki beberapa keunggulan,

<https://doi.org/10.35583/js.v14i1.445>

seperti emisi karbon yang lebih rendah, ketahanan terhadap suhu tinggi, serta durabilitas yang baik terhadap lingkungan agresif. Salah satu limbah yang berpotensi digunakan sebagai bahan dasar geopolimer adalah abu sawit. Abu sawit merupakan limbah hasil pembakaran biomassa dari industri kelapa sawit yang ketersediaannya sangat melimpah di Indonesia [2]. Pemanfaatan abu sawit sebagai material substitusi semen dapat menjadi solusi

[Attribution-NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Some rights reserved

dalam mengurangi limbah agroindustri sekaligus meningkatkan nilai ekonomis limbah tersebut [3].

Abu sawit memiliki kandungan senyawa silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan kalsium oksida (CaO) yang memungkinkan material ini berperan sebagai material pozzolan dalam campuran geopolimer [4]. Kandungan kimia tersebut dapat mempengaruhi proses pembentukan gel geopolimer yang berperan terhadap sifat fisik dan mekanik pasta [5]. Namun demikian, penggunaan abu sawit dalam jumlah tertentu dapat menyebabkan perubahan karakteristik material, terutama pada aspek *workability*, waktu ikat, porositas, serta kuat tekan. Oleh karena itu, diperlukan optimasi terhadap proporsi substitusi PCC agar diperoleh komposisi campuran yang mampu memberikan performa terbaik.

Optimalisasi substitusi PCC pada pasta geopolimer menjadi penting karena persentase penggunaan abu sawit yang terlalu rendah dapat menyebabkan pemanfaatan limbah kurang maksimal, sedangkan penggunaan yang terlalu tinggi berpotensi menurunkan kualitas pasta akibat berkurangnya kandungan kalsium aktif yang mendukung proses hidrasi. Selain itu, reaksi geopolimerisasi sangat dipengaruhi oleh komposisi binder dan rasio aktivator alkali yang digunakan [2]. Dengan menentukan komposisi optimum substitusi semen, diharapkan dapat diperoleh pasta geopolimer yang memiliki sifat teknis yang baik serta lebih ramah lingkungan.

Sampai saat ini belum terdapat kesepakatan mengenai kadar PCC yang paling sesuai untuk menghasilkan waktu ikat yang memadai tanpa mengurangi potensi pemanfaatan abu sawit sebagai bahan utama geopolimer. Informasi mengenai pengaruh variasi PCC terhadap percepatan waktu ikat pada sistem geopolimer berbasis abu sawit juga masih terbatas, sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memahami perilaku pasta geopolimer pada berbagai tingkat substitusi PCC.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan abu sawit sebagai bahan substitusi semen mampu meningkatkan keberlanjutan material konstruksi dan memberikan pengaruh terhadap karakteristik pasta maupun mortar geopolimer [6]. Akan tetapi, penelitian terkait optimasi kadar substitusi semen pada pasta geopolimer abu sawit masih memerlukan kajian lebih lanjut, khususnya untuk menentukan proporsi terbaik berdasarkan parameter sifat fisik dan mekanik material. Penelitian mengenai optimasi ini penting dilakukan agar penggunaan abu sawit tidak hanya berfungsi sebagai

pengganti semen, tetapi juga mampu menghasilkan performa material yang optimal.

Pasta dan mortar geopolimer POFA telah banyak diteliti sebagai alternatif material ramah lingkungan untuk mengurangi penggunaan semen *Portland*. Beberapa penelitian melaporkan bahwa pemanfaatan abu sawit mampu menghasilkan material geopolimer dengan sifat mekanik yang baik dan emisi karbon yang lebih rendah dibandingkan material berbasis semen konvensional. Namun, salah satu kendala utama penggunaan abu sawit sebagai prekursor geopolimer adalah waktu ikat yang relatif lambat, terutama pada campuran dengan kandungan kalsium yang rendah.

Berbagai upaya telah dilakukan untuk mempercepat proses pengerasan geopolimer melalui penambahan material berkalsium tinggi, seperti semen *Portland*, kapur, dan slag. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu lebih banyak berfokus pada pengaruh bahan tambahan tersebut terhadap kuat tekan dan durabilitas, sedangkan kajian mengenai karakteristik waktu ikat pasta geopolimer abu sawit dengan substitusi *Portland Composite Cement* (PCC) masih relatif terbatas. Selain itu, penelitian yang secara khusus mengevaluasi hubungan antara peningkatan kadar PCC dan perubahan waktu ikat pasta geopolimer abu sawit pada berbagai tingkat substitusi yang masih belum banyak diteliti.

Variasi PCC sebesar 10%–50% dipilih untuk merepresentasikan rentang substitusi rendah hingga menengah yang masih memungkinkan abu sawit tetap berperan sebagai material pengikat utama dalam sistem geopolimer. Batas bawah 10% dipilih untuk mengevaluasi pengaruh awal keberadaan PCC terhadap waktu ikat, sedangkan batas atas 50% dipilih untuk mengamati perubahan karakteristik pengerasan pada kondisi kandungan kalsium yang lebih tinggi tanpa menghilangkan dominasi abu sawit sebagai prekursor utama. Rentang variasi tersebut juga banyak digunakan dalam penelitian material geopolimer hibrida untuk mengevaluasi pengaruh material berbasis semen terhadap sifat fisik dan mekanik campuran.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh substitusi PCC sebesar 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% terhadap karakteristik waktu ikat pasta geopolimer abu sawit. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai efektivitas PCC dalam mempercepat proses pengerasan serta menentukan komposisi yang memberikan keseimbangan antara waktu kerja dan waktu ikat pada aplikasi geopolimer berbasis abu sawit.

2.1. Pasta

Pasta adalah campuran bahan padat dan cair yang membentuk massa plastis atau kental [7]. Fungsi pasta pada konstruksi adalah sebagai bahan pengikat yang menyelimuti dan merekatkan agregat sehingga terbentuk mortar atau beton yang kompak, mengisi rongga di antara agregat, memberikan kecacakan pada campuran, serta mengeras dan menghasilkan kekuatan setelah proses hidrasi [8].

2.2. Geopolimer

Geopolimer adalah bahan pengikat anorganik yang terbentuk melalui reaksi polimerisasi antara material yang kaya akan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3), seperti fly ash atau slag, dengan larutan alkali sebagai aktivator, sehingga menghasilkan struktur polimer anorganik yang keras dan stabil [9]. Proses pembentukan geopolimer tidak memerlukan pembakaran pada suhu tinggi seperti pada semen *Portland*, sehingga lebih ramah lingkungan dan mampu menurunkan emisi karbon [10].

2.3. Abu Sawit (*Palm Oil Fuel Ash/POFA*)

Palm Oil Fuel Ash (POFA) atau abu hasil pembakaran limbah kelapa sawit merupakan limbah padat yang dihasilkan dari proses pembakaran serat dan cangkang kelapa sawit (*palm fiber and shell*) pada tungku atau boiler di pabrik kelapa sawit [11]. Abu ini terbentuk sebagai hasil samping dari proses pembangkitan energi panas untuk menggerakkan turbin atau memproduksi uap dalam proses pengolahan minyak sawit.

Tabel 1. Komposisi Abu Sawit

Parameter Uji	Hasil Analisis (%)	Metode Analisis
SiO_2	46,41	SNI 2049:2015, butir 7.1.3.2
Al_2O_3	7,47	SNI 2049:2015, butir 7.1.3.8
Fe_2O_3	1,15	SNI 2049:2015, butir 7.1.3.4
CaO	5,71	SNI 2049:2015, butir 7.1.3.9
K_2O	2,37	SNI 2049:2015, butir 7.1.3.13
P_2O_5	0,93	SNI 2049:2015, butir 7.1.3.5
Kadar Air	10,36	SNI 02-2804-2005, butir 6.4

]

Karakteristik yang dimiliki Abu Sawit diantaranya adalah berbentuk partikel Abu Sawit yang tidak beraturan, ada yang memiliki butiran bulat panjang, bulat dan bersegi dengan ukuran butiran 0-2,3 mm serta memiliki warna Abu-Abu kehitaman [2]. POFA juga mengandung kapur, tetapi kandungannya lebih rendah daripada *Ordinary Portland Cement* (OPC). Oleh karena itu, POFA memiliki potensi sebagai bahan alternatif pengganti sebagian Semen pada campuran Beton diketahui bahwa pembakaran kembali Abu Sawit dalam

keadaan terpapar langsung dalam *furnace* memberikan kuat tekan Mortar lebih tinggi dari pada pembakaran tertutup [12].

Menurut SNI 2460:2014, spesifikasi *Pozzolan* untuk Bahan Campuran Semen *Portland*, *pozzolan* didefinisikan sebagai bahan yang mengandung silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) dalam jumlah yang cukup, yang dengan sendirinya tidak memiliki sifat mengikat, tetapi bila dalam bentuk halus dan dengan adanya air akan bereaksi kimia dengan kalsium hidroksida [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] pada suhu normal untuk membentuk senyawa yang bersifat mengikat (sementasi), seperti kalsium silikat hidrat (C-S-H) [13].



Gambar 1. Abu Sawit

2.4. Larutan Alkali Aktivator ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$)

Larutan alkali merupakan larutan yang bersifat basa kuat karena mengandung ion hidroksida (OH^-) dalam jumlah tinggi. Dalam bidang teknik sipil dan material, larutan alkali umumnya tersusun dari campuran Natrium hidroksida (NaOH) dan Natrium silikat (Na_2SiO_3). Kedua bahan ini digunakan secara bersamaan untuk menghasilkan larutan aktivator alkali yang berfungsi sebagai bahan pengikat alternatif pengganti semen *Portland* pada pembuatan beton geopolimer [9].

Kedua bahan ini terdiri dari Na_2SiO_3 yang berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi produksi dari PT. Sinar Sakti Kimia, Jawa Tengah. Sedangkan NaOH dengan konsentrasi 14M yang diperoleh dengan melarutkan NaOH dalam bentuk padat sebesar 560 gram pada 1 liter air. Selama pembuatan larutan NaOH akan menghasilkan panas *eksoterm* sehingga larutan dibiarkan selama 24 jam kemudian disimpan dalam wadah yang tertutup hingga proses campuran Mortar dilakukan.



Gambar 2. Larutan Alkali Aktivator

2.5 *Portland Composite Cement (PCC)*

Semen *Portland* adalah bahan pengikat hidrolis yang dihasilkan dari penggilingan klinker bersama dengan bahan anorganik lain. Bahan anorganik tersebut antara lain terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), *pozzoland*, senyawa *silicat*, batu kapur dengan kadar total bahan anorganik 6%-35% dari massa Semen [14].

Tabel 2. Kandungan PCC

Nama Senyawa	Hasil (%)
Al ₂ O ₃	7,4
CaO	57,38
SiO ₃	23,04
Fe ₂ O ₃	3,36

2.6 Waktu Ikat

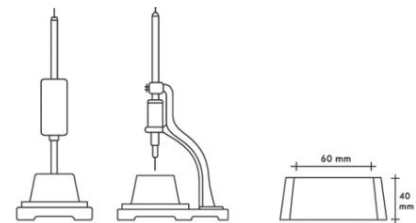
Waktu ikat (*setting time*) adalah periode yang dibutuhkan oleh pasta semen sejak mulai dicampur dengan air hingga mencapai tingkat kekerasan tertentu, yang menandai dimulainya dan berakhirnya proses pengerasan. Pengujian waktu ikat bertujuan untuk mengetahui kecepatan reaksi hidrasi semen, sehingga dapat dipastikan bahwa semen tersebut memiliki sifat pengerasan yang sesuai untuk pekerjaan beton di lapangan [15].

SNI 2049:2015 mengatur bahwa pengujian waktu ikat dilakukan menggunakan alat *Vicat*, sesuai dengan prosedur yang dijelaskan dalam SNI 03-6827-2002 tentang Cara Uji Waktu Ikat dan Kekuatan Tekan Pasta Semen *Portland* [16]. Alat ini dilengkapi dengan jarum standar untuk mengukur kedalaman penetrasi pada pasta semen. Hasil pengujian digunakan untuk menentukan dua parameter penting, yaitu waktu ikat awal (*initial setting time*) dan waktu ikat akhir (*final setting time*) [17].

Initial setting time atau waktu ikat awal adalah waktu yang dihitung sejak air pertama kali dicampurkan dengan semen hingga saat pasta semen mulai kehilangan sifat plastisnya dan menunjukkan tanda-tanda awal pengerasan [17]. Pada tahap ini, campuran semen masih dapat dikerjakan (*workable*), tetapi sudah mulai mengeras akibat reaksi hidrasi antara senyawa semen dengan air. waktu ikat awal semen *portland* tidak boleh kurang dari 45 menit. Artinya, semen harus tetap memiliki waktu kerja minimal 45 menit agar proses pencampuran, pengangkutan, dan pengecoran dapat dilakukan dengan baik sebelum campuran mulai mengeras. (SNI 2049:2015).

Final setting time atau waktu ikat akhir adalah waktu yang dihitung sejak pencampuran air dengan semen hingga pasta semen benar-benar mengeras dan tidak dapat dibentuk lagi. Pada tahap ini, jarum penetapan pada alat

Vicat tidak lagi meninggalkan bekas pada permukaan pasta, yang menandakan semen telah mencapai kondisi padat dan reaksi hidrasi berlangsung secara signifikan. waktu ikat akhir semen *portland* tidak boleh lebih dari 390 menit (sekitar 6 jam 15 menit). Batas maksimum ini ditetapkan agar pengerasan semen tidak berlangsung terlalu lama, karena waktu pengerasan yang terlalu lambat dapat mengganggu jadwal pekerjaan dan menurunkan efisiensi konstruksi [16]. Penetapan kadar PCC optimum dilakukan berdasarkan pertimbangan bahwa pasta geopolimer harus memiliki waktu kerja yang memadai selama proses pencampuran dan pencetakan, namun tetap mampu mencapai pengerasan dalam waktu yang relatif cepat.

Gambar 3. Posisi *Vicat* Saat Pengujian

3. METODOLOGI

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium. Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif melalui perbandingan nilai waktu ikat pada setiap variasi substitusi PCC serta interpretasi kecenderungan hubungan antara kadar PCC dan karakteristik waktu ikat pasta geopolimer abu sawit. Jumlah sampel disetiap variasi substitusi PCC diuji sebanyak tiga kali pengulangan (triplicate) dengan nilai waktu ikat merupakan nilai rata-rata dari seluruh hasil pengujian. Pendekatan eksperimen pengujian yang dilaksanakan di laboratorium bertujuan mendapatkan nilai variasi yang optimal dalam substitusi semen terhadap waktu ikat pasta geopolimer (*Setting Time*). Metode ini digunakan untuk meneliti sampel tertentu dengan menggunakan alat ukur penelitian *Vicat Test* untuk pengumpulan data. Pengujian dilakukan pada setiap variasi substitusi PCC dengan tiga kali pengulangan. Hasil pengujian kemudian diolah dengan menghitung nilai rata-rata untuk merepresentasikan karakteristik waktu ikat masing-masing variasi campuran.

3.1 Pengujian Konsistensi Normal

Pengujian konsistensi normal semen merupakan salah satu pengujian dasar yang bertujuan untuk menentukan jumlah air yang dibutuhkan untuk memperoleh pasta semen dengan keenceran atau

plastisitas normal. Pasta semen dengan konsistensi normal ini menjadi acuan untuk melakukan pengujian lain seperti waktu ikat awal dan akhir (*setting time*) serta uji kekuatan. Secara prinsip, konsistensi normal semen ditetapkan sebagai kondisi ketika jarum *Vicat* (*Vicat Apparatus*) dengan diameter 10mm dan berat tertentu menembus pasta semen hingga kedalaman 10 mm dari permukaan atas cincin uji (SNI 2049:2015).

$$\text{Konsistensi (\%)} = \frac{\text{Jumlah liquid}}{\text{Jumlah solid}} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

Selain mengacu pada standar SNI, metode ini juga mengacu pada standar internasional seperti ASTM C187-16 “*Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste*”. Pengujian dengan metode ini memastikan bahwa semen memiliki karakteristik reaksi hidrasi yang seragam serta dapat digunakan untuk perbandingan mutu antar jenis semen, seperti semen *Ordinary Portland Cement* (OPC), semen *Portland Pozzolan Cement* (PPC), maupun semen campuran *Portland Composite Cement* (PCC). Nilai konsistensi normal yang sesuai standar umumnya berkisar antara 26% hingga 33% dari berat semen, tergantung jenis dan merek semen yang diuji [18].



Gambar 4. Pengujian Konsistensi Normal

3.2 Pengujian Waktu Ikat (*Setting Time*)

Waktu ikat awal adalah waktu yang diperlukan oleh pasta semen untuk mengubah sifatnya dari kondisi cair menjadi padat [16]. Perhitungan Waktu ikat awal (*Initial Setting Time*) ditentukan dari grafik penetrasi waktu, yaitu waktu dimana penetrasi jarum *vicat* mencapai nilai 25 mm. Jumlah alkali aktivator pada setiap campuran disesuaikan berdasarkan kebutuhan *workability* dan target aktivator pada konsistensi normal terhadap binder/pasta yang telah ditetapkan selama proses perencanaan campuran. Penyesuaian tersebut dilakukan untuk memastikan seluruh campuran dapat dicetak dan memiliki konsistensi yang relatif seragam dan perhitungan Waktu ikat akhir (*Final Setting Time*) ditentukan dari grafik penetrasi waktu, yaitu Dimana waktu penetrasi jarum *vicat* mencapai nilai 0 mm atau tidak menembus sama sekali.



Gambar 5. Pengujian Waktu Ikat

Tabel 3. Komposisi Variasi Sampel

Variasi sampel	Berat PCC (gr)	Berat POFA (gr)	Alkali Aktivator (gr)
10%	30	270	415
20%	60	240	380
30%	90	210	350
40%	120	180	330
50%	150	150	300

Binder pada penelitian ini terdiri atas abu sawit (POFA) dan *Portland Composite Cement* (PCC). Variasi PCC sebesar 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% dihitung berdasarkan total massa binder, sehingga peningkatan kadar PCC dilakukan dengan mengurangi massa POFA dalam jumlah yang sama. Dengan demikian, massa total binder pada setiap campuran tetap konstan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengujian Konsistensi Normal

Tabel 4. Hasil Konsistensi Normal

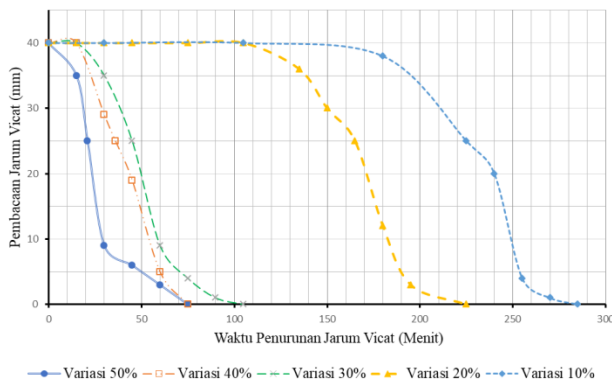
Variasi sampel	Konsistensi (%)	Penurunan (mm)
10%	138,3	10
20%	126,6	9
30%	116,6	11
40%	110	10
50%	100	11

Berdasarkan Tabel 4, hasil pengujian konsistensi normal menunjukkan bahwa jenis bahan pengikat serta persentase substitusi PCC berpengaruh terhadap kebutuhan alkali dan nilai konsistensi pasta. Hal ini menunjukkan bahwa semen PCC memiliki kebutuhan air relatif rendah akibat sifat hidrasi yang cepat dan ukuran partikel yang lebih halus. Pada setiap kenaikan persentase PCC terjadi penurunan nilai konsistensi. Nilai konsistensi normal tertinggi terjadi pada variasi 10% yaitu 138,3% dan konsistensi terendah pada variasi 50% yaitu 100%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kandungan POFA dalam pasta geopolimer menyebabkan meningkatnya reaktivitas campuran terhadap alkali,

sehingga membutuhkan jumlah alkali yang lebih besar untuk mencapai kondisi plastis normal [19].

4.2. Hasil Pengujian Waktu Ikat (Setting Time)

Berdasarkan Gambar 6, hasil pengujian waktu ikat pada campuran PCC 10% menunjukkan bahwa penurunan jarum Vicat pada fase awal pengujian berlangsung sangat lambat. Hingga menit ke-105, nilai penetrasi jarum masih berada pada 40 mm, yang mengindikasikan bahwa pasta masih berada dalam kondisi plastis dan belum menunjukkan tanda-tanda terjadinya proses pengikatan awal. Waktu ikat awal pada campuran ini terjadi pada menit ke-225, yang ditandai dengan penetrasi jarum sebesar 25 mm sesuai dengan kriteria pengujian Vicat. Selanjutnya, nilai penetrasi jarum mengalami penurunan yang cukup signifikan hingga mencapai 0 mm pada menit ke-285, yang menandakan tercapainya waktu ikat akhir dan pasta telah kehilangan sifat plastisnya secara keseluruhan. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa substitusi PCC sebesar 10% dalam campuran menyebabkan proses pengikatan berlangsung lebih lambat dibandingkan dengan substitusi PCC 50%, serta menjadikan variasi 10 sebagai campuran dengan waktu ikat paling lambat di antara seluruh variasi



Gambar 6. Hasil Pengujian Waktu Ikat

Hasil pengujian waktu ikat variasi 20% menunjukkan bahwa penurunan jarum Vicat berlangsung sangat lambat pada tahap awal. Hingga menit ke-105, penetrasi jarum masih berada pada 40 mm, yang menandakan pasta masih bersifat plastis. Waktu ikat awal terjadi pada menit ke-165 dengan penetrasi jarum sebesar 25 mm. Selanjutnya, penetrasi jarum menurun secara signifikan hingga mencapai 0 mm pada menit ke-225 sebagai waktu ikat akhir. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan kadar POFA hingga 80% menyebabkan proses pengikatan berlangsung lebih lambat dibandingkan dengan PCC 100%, Dan Juga lebih lambat dibandingkan variasi dengan kadar POFA yang lebih rendah. Namun tetap lebih cepat dibandingkan dengan POFA 100%.

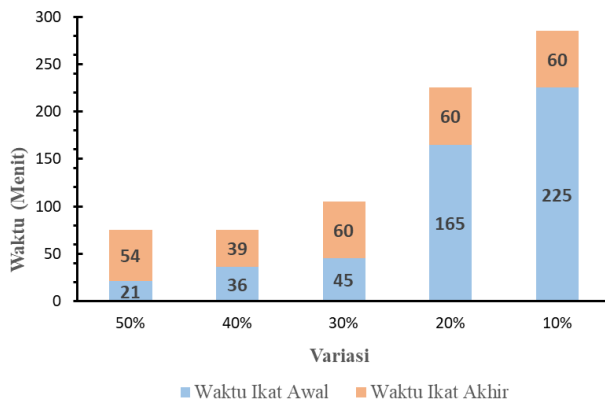
Pengaruh substitusi PCC terhadap *setting time* dalam tidak sepenuhnya dapat dipisahkan dari pengaruh perubahan rasio aktivator/binder.

Hasil pengujian waktu ikat variasi 30% menunjukkan bahwa penurunan jarum Vicat berlangsung secara bertahap seiring dengan bertambahnya waktu pengujian. Pada rentang waktu menit ke-0 hingga menit ke-30, jarum Vicat masih memperlihatkan nilai penetrasi yang relatif tinggi, yang menandakan bahwa pasta masih berada dalam kondisi plastis dan belum mengalami proses pengikatan awal. Waktu ikat awal pada campuran ini terjadi pada menit ke-45, yang ditunjukkan oleh nilai penetrasi jarum sebesar 25 mm sesuai dengan kriteria pengujian Vicat. Selanjutnya, seiring berjalannya waktu, nilai penetrasi jarum terus mengalami penurunan secara signifikan hingga mencapai 0 mm pada menit ke-105, yang menandakan tercapainya waktu ikat akhir dan pasta telah kehilangan sifat plastisnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa penggunaan POFA dengan persentase sebesar 70% dalam campuran berpengaruh terhadap perlambatan proses pengikatan pasta jika dibandingkan dengan campuran PCC 40%–POFA 60%. Namun demikian, waktu ikat campuran PCC 30%–POFA 70% ini masih tergolong lebih cepat apabila dibandingkan dengan campuran PCC 100% maupun POFA 100%, sehingga menunjukkan bahwa keberadaan PCC tetap berperan dalam mempercepat proses pengikatan pada sistem pasta geopolimer berbasis POFA.

Hasil pengujian waktu ikat campuran PCC 40% dan POFA 60% menunjukkan bahwa kedalaman penetrasi jarum *Vicat* menurun seiring bertambahnya waktu pengujian. Pada menit awal hingga menit ke-15, pembacaan jarum masih sebesar 40 mm, menandakan pasta masih bersifat plastis. Waktu ikat awal terjadi pada menit ke-36 saat penetrasi jarum mencapai 25 mm, sedangkan waktu ikat akhir tercapai pada menit ke-75 ketika penetrasi jarum mencapai 0 mm. Grafik menunjukkan penurunan yang relatif cepat setelah waktu ikat awal, yang mengindikasikan bahwa peningkatan kadar POFA hingga 60% menyebabkan proses pengikatan berlangsung lebih lambat dibandingkan variasi PCC 50%.

Hasil pengujian waktu ikat campuran PCC 50% dan POFA 50% menunjukkan bahwa kedalaman penetrasi jarum *Vicat* menurun cepat seiring bertambahnya waktu pengujian. Pada menit awal, pembacaan jarum masih sebesar 40 mm, menandakan pasta masih bersifat plastis. Waktu ikat awal terjadi pada menit ke-20,77 saat penetrasi jarum mencapai 25 mm, sedangkan waktu ikat akhir tercapai pada menit ke-75 ketika penetrasi jarum mencapai 0 mm. Grafik menunjukkan penurunan yang tajam setelah waktu ikat awal, yang mengindikasikan

bahwa penambahan variasi 50% mempercepat proses pengikatan dibandingkan variasi lainnya.



Gambar 7. Hasil Pengujian Waktu Ikat Berdasarkan Variasi

Berdasarkan Gambar 6, hasil pengujian waktu ikat pasta geopolimer abu sawit menunjukkan bahwa penambahan PCC sebagai bahan substitusi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap percepatan proses pengerasan pasta. Variasi substitusi semen sebesar 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% dari berat abu sawit memperlihatkan kecenderungan semakin tingginya kadar semen maka waktu ikat awal maupun waktu ikat akhir pasta menjadi semakin cepat.

Tabel 5. Persyaratan Waktu Ikat

Variasi sampel	Waktu Ikat Awal	Syarat \geq 45 menit	Waktu Ikat Akhir	Syarat \leq 390 menit
10%	225	Memenuhi	285	Memenuhi
20%	165	Memenuhi	225	Memenuhi
30%	45	Memenuhi	105	Memenuhi
40%	36	Tidak memenuhi	75	Memenuhi
50%	21	Tidak Memenuhi	75	Memenuhi

Berdasarkan Tabel 5, variasi substitusi PCC sebesar 10%, 20%, dan 30% menghasilkan waktu ikat awal masing-masing 225 menit, 165 menit, dan 45 menit, sehingga masih memenuhi persyaratan waktu ikat awal minimum 45 menit. Sementara itu, seluruh variasi menghasilkan waktu ikat akhir antara 75–285 menit, sehingga masih berada di bawah batas maksimum 390 menit. Dengan demikian, seluruh campuran memenuhi persyaratan waktu ikat akhir, sedangkan hanya variasi 40% dan 50% PCC yang tidak memenuhi persyaratan waktu ikat awal.

Dari sudut pandang aplikasi di lapangan, waktu ikat awal merupakan parameter yang menentukan

lamanya waktu kerja (*working time*) yang tersedia untuk proses pencampuran, pengangkutan, penempatan, pemadatan, dan perataan mortar sebelum material mulai kehilangan plastisitasnya. Variasi 10% PCC dengan waktu ikat awal 225 menit memberikan waktu kerja yang sangat panjang sehingga memudahkan pelaksanaan pekerjaan pada proyek berskala besar atau pekerjaan yang membutuhkan waktu distribusi material yang lebih lama. Namun, waktu pengerasan yang relatif lama dapat memperpanjang waktu tunggu sebelum tahap pekerjaan berikutnya dapat dilakukan.

Tabel 6. Evaluasi Aplikasi Penggunaan Setiap Variasi di Lapangan

Variasi sampel	Evaluasi Aplikasi di Lapangan
10%	Sangat mudah diaplikasikan karena waktu kerja panjang, tetapi waktu tunggu menuju pengerasan lebih lama.
20%	Memberikan keseimbangan terbaik antara waktu kerja dan kecepatan pengerasan, sehingga cocok untuk sebagian besar pekerjaan konstruksi.
30%	Masih memenuhi standar, tetapi membutuhkan pelaksanaan yang lebih cepat karena waktu kerja relatif singkat.
40%	Waktu ikat awal terlalu cepat, sehingga berisiko menyulitkan pencampuran dan penempatan pasta pada mortar.
50%	Waktu ikat awal sangat singkat, sehingga kurang direkomendasikan untuk aplikasi lapangan tanpa pengendalian proses yang ketat.

Pada variasi 20% PCC, waktu ikat awal sebesar 165 menit masih memberikan waktu kerja yang cukup untuk proses aplikasi di lapangan, tetapi dengan waktu pengerasan yang lebih cepat dibandingkan variasi 10%. Kondisi ini menunjukkan keseimbangan antara kemudahan pelaksanaan pekerjaan dan efisiensi waktu konstruksi, sehingga variasi ini lebih sesuai untuk pekerjaan yang memerlukan produktivitas tinggi.

Variasi 30% PCC menghasilkan waktu ikat awal tepat pada batas minimum standar, yaitu 45 menit. Meskipun masih memenuhi persyaratan, waktu kerja yang tersedia menjadi relatif singkat sehingga proses pencampuran, pengangkutan, dan penempatan mortar harus dilakukan dengan lebih cepat. Pengendalian waktu pelaksanaan menjadi lebih penting agar mortar tidak mulai mengeras sebelum selesai diaplikasikan.

Sebaliknya, variasi 40% dan 50% PCC menghasilkan waktu ikat awal masing-masing 36 menit dan 21 menit, sehingga tidak memenuhi persyaratan minimum. Waktu kerja yang sangat singkat tersebut berpotensi menimbulkan kesulitan dalam proses

pencampuran, pengangkutan, dan penempatan mortar, terutama pada pekerjaan dengan volume besar atau lokasi yang jauh dari tempat pencampuran. Kondisi ini dapat meningkatkan risiko terjadinya cold joint, kesulitan pemadatan, serta penurunan kualitas hasil pekerjaan apabila tidak didukung oleh metode pelaksanaan yang cepat dan terkoordinasi.

Meskipun demikian, seluruh variasi masih memenuhi persyaratan waktu ikat akhir karena seluruh nilai berada di bawah 390 menit. Hal ini menunjukkan bahwa setelah proses pengikatan dimulai, mortar masih mampu mencapai kondisi pengerasan akhir dalam rentang waktu yang dipersyaratkan. Oleh karena itu, berdasarkan aspek kemudahan pelaksanaan di lapangan dan kesesuaian terhadap standar waktu ikat, variasi 20% PCC dapat dipertimbangkan sebagai komposisi yang paling seimbang karena masih memberikan waktu kerja yang cukup sekaligus mempercepat proses pengerasan dibandingkan variasi dengan kadar PCC yang lebih rendah.



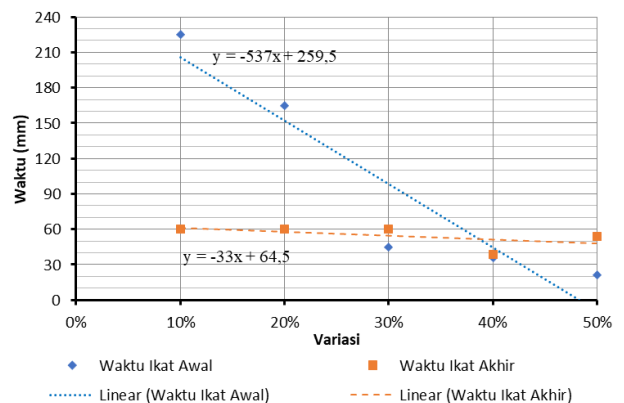
Gambar 8. Tampak Atas Sampel Pasta Geopolimer Abu Sawit Setelah Dilakukan Pengujian

Pada variasi substitusi semen 10%, pasta geopolimer masih menunjukkan waktu pengerasan yang relatif lama. Hal ini disebabkan kandungan abu sawit masih mendominasi sistem pengikat sehingga proses polimerisasi berlangsung lebih lambat. Abu sawit umumnya memiliki kandungan silika dan *alumina amorf* yang membutuhkan aktivator alkali untuk membentuk rantai geopolimer secara bertahap [20]. Reaksi geopolimerisasi yang dominan menyebabkan pembentukan struktur gel berlangsung lebih lambat dibandingkan hidrasi semen *Portland* [21].

Ketika substitusi semen ditingkatkan menjadi 20%, terjadi percepatan waktu pengerasan yang cukup signifikan. Kondisi ini dipengaruhi oleh mulai meningkatnya reaksi hidrasi semen yang menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) [22]. Kehadiran senyawa kalsium dari semen mampu mempercepat pembentukan struktur padat dalam gel pasta geopolimer. Selain itu, ion Ca^{2+} dari semen berperan dalam mempercepat reaksi antara silika dan alumina dari abu sawit dengan larutan aktivator alkali sehingga terbentuk gel C-A-S-H dan N-A-S-H secara bersamaan [3].

Kombinasi kedua gel tersebut menyebabkan struktur pasta menjadi lebih cepat mengeras. Jumlah alkali aktivator yang digunakan pada masing-masing variasi campuran mengalami penyesuaian sesuai kebutuhan desain campuran. Oleh karena itu, perubahan waktu ikat yang diamati tidak hanya dipengaruhi oleh peningkatan kadar PCC, tetapi juga berpotensi dipengaruhi oleh perubahan rasio aktivator terhadap binder.

Pada substitusi PCC 30%, 40% dan 50%, waktu pengerasan menjadi relatif paling cepat dibandingkan variasi lainnya. Tingginya kandungan semen menyebabkan mekanisme hidrasi semen lebih dominan daripada proses geopolimerisasi abu sawit. Reaksi hidrasi semen berlangsung cepat dan menghasilkan panas hidrasi yang lebih tinggi sehingga mempercepat pembentukan ikatan antarpartikel. Pasta menjadi lebih cepat kehilangan plastisitas dan memasuki fase pengerasan akhir. Selain itu, peningkatan kandungan kalsium juga mempercepat pembentukan matriks padat yang mengurangi waktu ikat pasta.



Gambar 9. Hubungan Variasi Terhadap Waktu Ikat Awal dan Akhir

Berdasarkan Gambar 9, hubungan antara kadar substitusi PCC dan waktu pengerasan (waktu ikat awal dan akhir) pasta geopolimer abu sawit pada grafik menunjukkan pola linier menurun atau berbanding terbalik. Hal ini berarti bahwa semakin besar persentase substitusi PCC yang digunakan, maka semakin singkat waktu pengerasan pasta geopolimer yang dihasilkan. Pola tersebut terlihat dari arah garis regresi yang menurun dari kiri atas menuju kanan bawah pada grafik hubungan kadar semen terhadap waktu pengerasan.

Secara matematis, hubungan tersebut dapat dinyatakan melalui persamaan garis regresi linear [23] $y = -bx + a$ dengan :
 y = Waktu pengerasan pasta geopolimer,
 x = Kadar substitusi semen (%),

- a = konstanta atau waktu pengerasan awal/akhir ketika tidak ada substitusi semen,
- b = Koefisien penurunan waktu pengerasan akibat penambahan semen.

Nilai persamaan untuk waktu ikat awal adalah $y = -537x + 259,5$ dan untuk waktu ikat akhir adalah $y = -33x + 64,5$. Nilai pada persamaan ini menunjukkan nilai koefisien negatif bahwa peningkatan kadar semen menyebabkan penurunan waktu pengerasan. Semakin besar nilai x , maka nilai y akan semakin kecil. Kondisi ini mengindikasikan bahwa PCC berperan sebagai material yang mempercepat proses *setting* pasta geopolimer abu sawit.

Secara mekanisme, percepatan pengerasan terjadi karena semen mengandung senyawa kalsium (CaO) yang tinggi. Ketika semen bereaksi dengan air dan aktivator alkali, terbentuk produk hidrasi berupa gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang mampu mempercepat pembentukan struktur padat dalam pasta [24]. Selain itu, ion kalsium dari semen juga mempercepat reaksi geopolimerisasi abu sawit sehingga pembentukan matriks pengikat menjadi lebih cepat [25].

Fenomena ini sejalan dengan berbagai penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa material berbasis geopolimer dengan kandungan kalsium tinggi cenderung memiliki waktu ikat lebih cepat dibandingkan geopolimer berkalsium rendah. Kandungan CaO dalam semen mempercepat proses pembentukan gel pengikat dan meningkatkan laju reaksi awal [26]. Namun demikian, waktu pengerasan yang terlalu cepat juga dapat menurunkan *workability* pasta sehingga perlu diperhatikan proporsi optimum substitusi semen agar diperoleh keseimbangan antara kemudahan pengerjaan dan kecepatan pengerasan [12]. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan material konstruksi ramah lingkungan berbasis limbah agroindustri.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pembahasan, maka dapat disimpulkan bahwa :

- a. Penambahan semen pada pasta geopolimer abu sawit efektif dalam mempercepat waktu pengerasan.
- b. Variasi 50% menghasilkan waktu ikat tercepat, yaitu waktu ikat awal pada menit ke-21 dan waktu ikat akhir pada menit ke-75 sedangkan waktu ikat terlama variasi 10% dengan waktu ikat awal awal pada menit ke-225 dan waktu ikat akhir pada menit ke-285.

- c. Variasi 20% menjadi rentang yang cukup optimal karena mampu mempercepat *setting time* tanpa menyebabkan pengerasan yang terlalu cepat.
- d. Variasi 30%, 40% dan 50% menghasilkan pengerasan paling cepat, namun berpotensi mengurangi waktu kerja pada proses pencetakan dan pengerjaan pasta geopolimer abu sawit.

Dari hasil kesimpulan tersebut, disarankan agar penelitian selanjutnya adalah melanjutkan penelitian dengan persentase substitusi PCC yang lebih rendah dan tidak hanya berfokus pada pengujian waktu ikat, tetapi juga mengevaluasi pengaruh terhadap sifat mekanik, seperti kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas. Penelitian ini hanya mengevaluasi variasi substitusi PCC pada rentang 10–50%, sehingga hasil yang diperoleh tidak dapat digunakan untuk menggambarkan perilaku campuran pada kondisi tanpa PCC (0%) maupun PCC penuh (100%). Selain itu, adanya perubahan jumlah aktivator pada setiap variasi menyebabkan pengaruh PCC terhadap waktu ikat belum dapat dipisahkan secara murni dari pengaruh rasio aktivator terhadap binder. Oleh karena itu, penelitian lanjutan dengan campuran kontrol yang lengkap dan rasio aktivator/binder yang konstan sangat diperlukan. Dengan demikian, diharapkan dapat diperoleh komposisi campuran PCC–POFA yang lebih optimal, efisien, dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] O. K. Wattimena, Antoni, and D. Hardjito, "A review on the effect of fly ash characteristics and their variations on the synthesis of fly ash based geopolymer," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1887, no. September, 2017, doi: 10.1063/1.5003524.
- [2] Y. S. D. Satya, E. Saputra, and M. Olivia, "Performance of blended fly ash (FA) and palm oil fuel ash (POFA) geopolymer mortar in acidic peat environment," *Mater. Sci. Forum*, vol. 841, pp. 83–89, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.841.83.
- [3] R. Yanuari, D. Septari, J. A. Rindy, and M. Olivia, "Geopolymer hybrid fly ash concrete for construction and conservation in peat environment: A review," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 847, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/847/1/012031.
- [4] M. Olivia, G. Wibisono, and E. Saputra, "Early strength of various fly ash based concrete in peat environment," *MATEC Web Conf.*, vol. 276, p. 01022, 2019, doi: 10.1051/mateconf/201927601022.
- [5] R. Bayuaji, A. K. Yasin, T. E. Susanto, and M. S. Darmawan, "A review in geopolymer binder with dry mixing method (geopolymer cement)," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1887, no. September, 2017, doi: 201

- 10.1063/1.5003505.
- [6] H. A. Syarif, A. Rahmi, and A. Ariyanto, "Kuat Tekan dan Absorpsi Mortar Geopolimer Abu Sawit Portland Composite Cement dengan Variasi Suhu Tinggi," *Aptek*, vol. 15, no. 1, pp. 34–41, 2022.
- [7] M. Kaya, M. Uysal, K. Yilmaz, O. Karahan, and C. D. Atis, "Mechanical properties of class C and F fly ash geopolimer mortars," *Gradjevinar*, vol. 72, no. 4, pp. 297–309, 2020, doi: 10.14256/JCE.2421.2018.
- [8] M. Olivia, L. Mona Tambunan, and E. Saputra, "Properties of Palm Oil Fuel Ash (POFA) Geopolymer Mortar Cured at Ambient Temperature," *MATEC Web Conf.*, vol. 97, 2017, doi: 10.1051/mateconf/20179701006.
- [9] Saloma, Hanafiah, D. O. Elysandi, and D. G. Meykan, "Effect of Na₂SiO₃/NaOH on mechanical properties and microstructure of geopolimer mortar using fly ash and rice husk ash as precursor," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1903, no. 2017, 2017, doi: 10.1063/1.5011552.
- [10] H. Li *et al.*, "Effect of fine aggregate particle characteristics on mechanical properties of fly ash-based geopolimer mortar," *Minerals*, vol. 11, no. 8, 2021, doi: 10.3390/min11080897.
- [11] M. Olivia, C. Wulandari, I. R. Sitompul, L. Darmayanti, and Z. Djauhari, "Study of fly ash (FA) and palm oil fuel ash (POFA) geopolimer mortar resistance in acidic peat environment," *Mater. Sci. Forum*, vol. 841, pp. 126–132, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.841.126.
- [12] F. Rizal, A. P. Pratama, Khamistan, A. Fauzi, Syarwan, and A. Azka, "Effect of H₂O₂ as the Foaming Agent on the Geopolimer Mortar using Curing of Room Temperature," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 854, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/854/1/012022.
- [13] SNI 2460, "Penggunaan Abu Terbang dalam Campuran Beton Sedikit Semen Portland," *Standar Nas. Indones.*, no. September, 2019.
- [14] SNI 15-0302, "Semen Portland Pozolan," *Standar Nas. Indones.*, p. 9, 2004, [Online]. Available: http://www.bbk.go.id/uploads/media/sni-15-0302-2004_semen-portland-pozolan.pdf
- [15] "SNI 2049," *Standar Nas. Indones.*, pp. 10–12, 2015.
- [16] SNI-03-6827, "Cara Uji Waktu Ikat dan Kekuatan Tekan Pasta Semen Portland," 2002.
- [17] A. N. Nafiah, L. Legasari, and N. Anaser, "Pengaruh Suhu Dan Kelembapan Terhadap Nilai Setting Time Pada Semen PCC (Portland Composite Cement) dan OPC (Ordinary Portland Cement)," *Paradig. J. Multidiscip. Res. Innov.*, vol. 3, no. 01, pp. 32–41, 2025.
- [18] R. Cornelis *et al.*, "Studi Perilaku Pasta Geopolimer Ordinary Portland Cement Hybrid," vol. 12, no. 2, pp. 473–482, 2022.
- [19] M. B. Karakoç, I. Türkmen, M. M. Maraş, F. Kantarci, R. Demirboğa, and M. Uğur Toprak, "Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolimer paste and mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 72, pp. 283–292, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.021.
- [20] S. V. Patankar, Y. M. Ghugal, and S. S. Jamkar, "Effect of Concentration of Sodium Hydroxide and Degree of Heat Curing on Fly Ash-Based Geopolymer Mortar," *Indian J. Mater. Sci.*, vol. 2014, pp. 1–6, 2014, doi: 10.1155/2014/938789.
- [21] N. Rizaldi, H. Abdurrahman, M. F. Wijaya, G. Wibisono, and M. Olivia, "Durability of fly ash geopolimer hybrid concrete in seawater, sulfuric acid, and fire resistant - A review," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2049, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2049/1/012088.
- [22] G. Fahim Huseien, J. Mirza, M. Ismail, S. K. Ghoshal, and A. Abdulameer Hussein, "Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, no. February 2016, pp. 54–74, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.076.
- [23] H. U. Ahmed, A. A. Abdalla, A. S. Mohammed, A. A. Mohammed, and A. Mosavi, "Statistical Methods for Modeling the Compressive Strength of Geopolymer Mortar," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 5, 2022, doi: 10.3390/ma15051868.
- [24] I. Hager, M. Sitarz, and K. Mróz, "Fly-ash based geopolimer mortar for high-temperature application – Effect of slag addition," *J. Clean. Prod.*, vol. 316, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128168.
- [25] O. A. Abdulkareem, A. M. Mustafa Al Bakri, H. Kamarudin, I. Khairul Nizar, and A. A. Saif, "Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolimer paste, mortar and lightweight concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 50, pp. 377–387, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.047.
- [26] M. Kaya, M. Uysal, K. Yilmaz, and C. D. Atis, "Behaviour of geopolimer mortars after exposure to elevated temperatures," *Medziagotyra*, vol. 24, no. 4, pp. 428–436, 2018, doi: 10.5755/j01.ms.24.4.18829.