PERKEMBANGAN TEKNOLOGI BAHAN MORTAR PADA BETON GEOPOLIMER: TINJAUAN ARTIKEL

Narendra Dafa Wardana, Vernando Alex Ardhi Wicaksono, Dany Malik Ageta Putra, Nafil Atha Izdihar, Aditya Wahyu Saputra, Reyhandika Erdy Sutanto, Yenny Nurchasannah*
Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jawa Tengah,
**Email: yn205@ums.ac.id*

Abstrak

Metode analisis berbasis tinjauan artikel dengan fokus penilaian pada aspek – aspek tertentu yang relevan dengan pendekatan kajian pustaka. Mortar merupakan bahan perekat antara pasir, batu, dan kerikil dalam sebuah pembuatan beton. Mortar sendiri memiliki berbagai jenis seperti mortar semen, mortar kapur, hingga mortar campuran. Namun penggunaan mortar semen *portland* sebagai bahan pengikat utama dalam konstruksi menimbulkan dampak lingkungan serius, terutama emisi CO_2. Untuk menjawab tantangan ini, penelitian dan inovasi difokuskan pada pengembangan geopolimer sebagai alternatif ramah lingkungan. Geopolimer berbahan dasar *fly ash* dan abu sekam padi, diaktivasi dengan larutan alkali seperti *natrium hidroksida* dan *natrium silikat*, menunjukkan potensi besar dalam mengurangi emisi dan meningkatkan performa beton. Studi ini merangkum berbagai pendekatan inovatif, termasuk penggunaan bahan nanokomposit, serat baja dan bendrat, serta pemanfaatan limbah polimer, untuk meningkatkan kekuatan tekan, ketahanan lentur, dan durabilitas mortar dan beton geopolimer. Hasil kajian menunjukkan bahwa beton geopolimer berbasis *fly ash* lebih unggul dibanding abu sekam padi dalam hal kekuatan tekan dan kestabilan struktur, sementara serat baja terbukti lebih efektif daripada serat kawat bendrat dalam meningkatkan sifat mekanis. Selain itu hal yang berpengaruh pada performa beton yaitu pemilihan rasio alkali. Secara keseluruhan, teknologi beton geopolimer menawarkan solusi berkelanjutan untuk masa depan industri konstruksi.

Kata kunci: beton geopolymer, beton mortar, kuat tekan, ramah lingkungan

Abstract

A review article-based analysis method focusing on the assessment of certain aspects relevant to the literature review approach. Mortar is a binding material used to adhere sand, stone, and gravel in concrete production. There are various types of mortar, such as cement mortar, lime mortar, and mixed mortar. However, the use of Portland cement mortar as the primary binding agent in construction has raised serious environmental concerns, particularly due to CO_2 emissions. To address this challenge, research and innovation have shifted toward the development of geopolymers as environmentally friendly alternatives. Geopolymers, made from fly ash and rice husk ash activated with alkaline solutions like sodium hydroxide and sodium silicate, have demonstrated significant potential in reducing emissions while enhancing concrete performance. This study summarizes several innovative approaches, including the incorporation of nanocomposite materials, steel and bendrat fibers, and recycled polymer waste, to improve the compressive strength, flexural resistance, and durability of geopolymer mortar and concrete. Findings indicate that fly ash–based geopolymer concrete outperforms that made from rice husk ash in terms of compressive strength and structural stability. Moreover, steel fibers are shown to be more effective than bendrat wire fibers in enhancing mechanical properties. Another key factor influencing concrete performance is the selection of the alkali ratio. Overall, geopolymer concrete technology offers a sustainable solution for the future of the construction industry.

***Keywords**: compressive strength, environmentally friendly, geopolymer concrete, mortar concrete*

1. PENDAHULUAN

Mortar adalah bahan bangunan yang sangat penting, berfungsi sebagai perekat dalam proses konstruksi. Di Indonesia, kualitas mortar diatur oleh Standar Nasional Indonesia (SNI), yang diterbitkan oleh Badan Standardisasi Nasional (BSN). Pada umumnya, mortar terbuat dari campuran semen, pasir, air, dan bahan tambahan lainnya. Salah satu faktor yang sangat mempengaruhi pembuatan mortar adalah rasio air terhadap semen (Faktor Air Semen/FAS). Dengan memahami pengaruh FAS dan menentukan rasio yang tepat, kita dapat menghasilkan mortar yang memiliki kualitas dan kekuatan yang optimal, yang sangat diperlukan untuk menyatukan batu bata, beton, atau batu alam dalam berbagai jenis konstruksi (Ferdyansah, 2024).

Mengetahui mortar merupakan hal yang sangat penting, terutama bagi siapa pun yang berkecimpung di dunia konstruksi. Mortar berperan sebagai perekat yang menyatukan bata, batu, atau blok sehingga struktur bangunan tetap kokoh dan stabil. Jika pemilihan mortar tidak tepat, bangunan bisa menjadi mudah rapuh dan rentan rusak. Selain itu, kualitas dan jenis mortar juga memengaruhi ketahanan bangunan terhadap cuaca, getaran, serta mencegah munculnya retak dan pelapukan. Dari sisi estetika, mortar turut menentukan tampilan akhir dinding, baik warna maupun teksturnya yang akhirnya menambah nilai keindahan bangunan. Dengan memahami berbagai jenis mortar, kita bisa memilih material yang paling sesuai dengan kebutuhan proyek. Hal ini tidak hanya membantu menghemat biaya, tapi juga mendukung pembangunan yang ramah lingkungan.

Dalam dunia konstruksi, mortar dibedakan berdasarkan bahan utama dan kegunaan khususnya. Seperti mortar semen Portland yang terkenal kuat, tahan cuaca, dan cepat mengering, sehingga sangat cocok untuk pembangunan gedung bertingkat, jalan, dan struktur beton yang membutuhkan daya tahan tinggi. Ada juga mortar kapur yang memiliki sifat elastis dan mudah diaplikasikan, sangat ideal untuk memperbaiki bangunan lama tanpa merusak kestabilan aslinya. Untuk menggabungkan kelebihan kedua jenis tersebut, mortar campuran semen dan kapur dibuat, yang menawarkan kekuatan semen sekaligus kelenturan kapur, sehingga sering digunakan dalam berbagai proyek bangunan umum karena mudah dibentuk dan tahan retak. Sementara itu, mortar pasir yang hanya menggunakan pasir tanpa bahan perekat memiliki kekuatan terbatas dan biasanya dipakai untuk pekerjaan sederhana atau aplikasi sementara. Oleh karena itu, pemahaman mendalam tentang jenis-jenis mortar ini sangat penting agar pemilihan material dapat disesuaikan dengan kebutuhan teknis dan karakteristik struktur yang akan dibangun, sehingga hasil konstruksi menjadi lebih optimal dan tahan lama.

Peningkatan penggunaan semen sebagai bahan perekat dalam konstruksi berdampak langsung pada naiknya produksi industri semen, yang pada akhirnya turut menyumbang emisi gas CO_2 dalam jumlah besar serta mempercepat kerusakan lingkungan akibat aktivitas penambangan bahan baku semen. Kondisi ini mendorong perlunya inovasi dalam mencari alternatif yang lebih ramah lingkungan untuk menggantikan semen Portland. Salah satu solusi yang tengah dikembangkan adalah material geopolimer.

Geopolimer adalah material inovatif yang berasal dari polimer anorganik dan terbentuk melalui proses geokimia menggunakan bahan dasar mineral yang mengandung alumina dan silika. Bahan-bahan seperti abu terbang (*fly ash*) dan abu sekam padi, yang kaya akan kandungan *oksida silika* dan *alumina*, dapat dimanfaatkan sebagai bahan utama dalam sintesis geopolimer. Secara khusus, abu sekam padi memiliki potensi besar sebagai bahan pengganti binder dalam campuran geopolimer. Sebagai limbah pertanian yang dihasilkan dari proses pengolahan padi, abu sekam padi selama ini hanya dimanfaatkan secara terbatas, misalnya sebagai campuran pakan ternak atau bahan bakar oleh petani. Padahal, di daerah seperti Sumatera Barat, ketersediaan sekam padi sangat melimpah, namun pemanfaatannya dalam bidang konstruksi, khususnya sebagai bahan baku geopolimer, masih belum digali secara optimal (Udjianto dkk., 2021). Inovasi terkini menunjukkan bahwa sekam padi yang dibakar menghasilkan abu yang kaya akan kandungan silika (SiO_2), menjadikannya berpotensi tinggi sebagai bahan tambahan dalam pembuatan beton dan mortar (Farhan dkk., 2023). Kandungan *silika* yang tinggi, yaitu mencapai lebih dari 90%, terbukti mampu meningkatkan kekuatan tekan beton dan mortar saat digunakan sebagai bahan campuran. Sayangnya, potensi ini belum dimanfaatkan secara optimal, karena minimnya informasi dan sosialisasi mengenai manfaat besar dari abu sekam padi tersebut dalam dunia konstruksi.

Abu sekam padi adalah limbah yang dihasilkan dari pembakaran kulit luar butir padi, yang mengandung banyak *silika* (SiO_2). Dengan alkali aktivator seperti *natrium hidroksida* dan *natrium silikat*, *silika* dalam abu sekam padi dapat membentuk ikatan polimer aluminosilikat, yang menghasilkan material yang memiliki kekuatan mekanis yang baik. Abu sekam padi tidak hanya memanfaatkan limbah pertanian tetapi juga menghasilkan beton geopolimer yang tahan terhadap serangan kimia dan membantu mengembangkan bahan konstruksi yang lebih ramah lingkungan (Hikmah dkk., 2024).

Selain abu sekam padi, terdapat limbah yang dapat digunakan sebagai bahan perekat yaitu *fly ash*. Hal ini dijelaskan oleh Khalifa (2022) proses pembakaran batu bara menghasilkan *fly ash*, yaitu debu halus yang terbawa bersama gas buang dan keluar melalui cerobong asap. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, *fly ash* digolongkan sebagai limbah non-B3. Pemanfaatan *fly ash* sebagai produk berguna merupakan salah satu cara untuk mengelola limbah ini, sekaligus meningkatkan nilai ekonomisnya dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Saat ini, *fly ash* banyak digunakan sebagai bahan campuran dalam pembuatan beton karena kandungan senyawa kimia *pozzolan*, seperti *alumina* dan *silika*, yang dimilikinya. Hal ini menjadikan *fly ash* sebagai bahan yang cocok untuk digunakan dalam konstruksi bangunan. Namun, *fly ash* tidak dapat bereaksi

secara mandiri dalam proses pengikatan, melainkan memerlukan senyawa *alkali*, seperti *NaOH*, sebagai aktivator dan Na_2SiO_3 sebagai katalisator untuk memicu reaksi kimianya.

Penggunaan *fly ash* ini juga diterapkan untuk beberapa peneliti seperti Solikin dkk. (2023). *Fly ash* merupakan limbah dari pengolahan batubara yang sudah tidak digunakan lagi. Pemanfaatan *fly ash* tidak hanya memberikan solusi terhadap bahan limbah tetapi juga memberikan kontribusi untuk meningkatkan kualitas beton terutama pada peningkatan kemampuan kerja beton segar, peningkatan kuat tekan, penurunan permeabilitas beton, dan peningkatan ketahanan terhadap *sulfat*. Pendapat tersebut juga diperkuat oleh Indrayani dkk. (2022). Beton geopolimer yang terbuat dari limbah batu bara digunakan sebagai pengganti semen dan mengurangi penggunaan semen. Terdapat pendapat lain yang berisi tentang Penggantian semen portland dengan bahan sisa pabrik industri dianggap lebih efisien dan ramah lingkungan. Geopolimer dibuat dari beton geosintetik dengan reaksi pengikatan polimerisasi. *Silika* (*Si*) dan alumunium (*Al*) merupakan hal yang penting dalam reaksi polimerisasi (Gandina & Setiyarto, 2020).

Hal ini diperkuat lagi oleh Iskandar dkk. (2023) yang berpendapat bahwa alkali aktivator merupakan bahan kimia yang digunakan untuk mengaktifkan binder sehingga mendapatkan ikatan polimerisasi yang kuat dan juga mempercepat reaksi yang terjadi. Alkali aktivator yang paling sering digunakan pada percobaan pembuatan beton geopolimer adalah dengan menggunakan *Natrium Silikat* (Na_2SiO_3) dan *Natrium Hidroksida (NaOH)*.

2. TEKNOLOGI MORTAR OLEH PARA PENELITI

Mortar merupakan komponen penting dalam konstruksi bangunan. Mortar sendiri berfungsi sebagai perekat antara unit-unit bangunan seperti batu bata dan blok beton. Seiring dengan perkembangan teknologi material, berbagai inovasi telah diterapkan untuk meningkatkan performa mortar, baik dari segi kekuatan mekanik, durabilitas, maupun keberlanjutan.

Hal tersebut diperkuat lagi oleh pendapat Sujatmiko (2024) bahwa fungsi utama mortar dalam konstruksi adalah sebagai perekat yang menyatukan elemen-elemen bangunan, seperti batu bata atau batu alam, agar membentuk struktur yang kuat dan stabil. Daya rekat dan ketahanan ikatan mortar sangat dipengaruhi oleh kohesi antara pasta semen dan partikel agregat halus yang digunakan. Meskipun porsinya dalam struktur tergolong kecil, peran mortar sangat penting. Mortar juga harus memiliki ketahanan terhadap penyerapan air serta kekuatan geser yang cukup untuk menahan gaya-gaya yang bekerja padanya. Jika mortar terlalu cepat atau terlalu banyak menyerap air, proses pengeringan bisa terjadi secara tidak merata, yang pada akhirnya akan menyebabkan kehilangan daya rekat atau adhesi, sehingga menurunkan kekuatan dan keawetan struktur secara keseluruhan.

Mortar yang sering dikenali salah satunya ialah semen. Penggunaan semen sebagai bahan perekat beton dalam dunia konstruksi akan meningkatkan produksi industri semen yang berakibat semakin meningkatnya polutan gas emisi CO_2 dan meningkatnya kerusakan alam dari hasil penambangan bahan penyusun semen itu sendiri (Ekaputri dkk., 2014). Hal ini menyebabkan perlunya melakukan inovasi untuk mengganti semen portland sebagai bahan perekat dengan bahan geopolimer. Mortar geopolimer ialah material ramah lingkungan yang dikembangkan menjadi alternatif pengganti semen. Bahan banyak inovasi – inovasi bermunculan dari peneliti tentang adanya terobosan baru yakni memanfaatkan mortar polimer. Dengan penggunaan mortar geopolimer, kita dapat menciptakan alternatif dari semen konvensional guna meningkatkan kuat tekan. Beton geopolimer adalah jenis beton geosintetik yang dibuat tanpa menggunakan semen portland. Sebagai pengganti semen *portland*, digunakanlah abu sekam padi dan *fly ash* dicampur dengan alkali aktivator serta bahan tambah lainnya (Korompis, 2023).

3. TEORI TENTANG GEOPOLIMER

Menurut Setiawati dkk. (2022), bahan anorganik yang kaya akan *silika* (SiO_2) dan *alumina* (Al_2O_3) yang bereaksi dengan alkali aktivator menjadi material bersifat seperti semen disebut sebagai geopolimer. Turner & Collins (2013) menyebutkan bahwa beton geopolimer adalah beton yang dibuat tanpa semen tetapi menggunakan *silika (SiO2)* dan *alumina* (Al_2O_3) dengan alkali aktivator yang berfungsi sebagai bahan pengikat.

Geopolimer adalah material pengikat anorganik yang terbentuk melalui aktivasi alkali terhadap bahan *aluminosilikat* seperti *fly ash*, *metakaolin*, atau *slag*. Proses pembentukannya, yang dikenal sebagai geopolimerisasi, melibatkan beberapa tahap utama yaitu pelarutan bahan baku, *polikondensasi silika* dan *alumina*, serta reorganisasi struktur menjadi jaringan tiga dimensi. Pemahaman mendalam mengenai kinetika

dan mekanisme pembentukan geopolimer sangat penting untuk merancang material dengan sifat yang sesuai untuk aplikasi tertentu (Siyal dkk., 2024).

Dalam konteks keberlanjutan, Siyal dkk. (2024) juga menjelaskan bahwa geopolimer menawarkan alternatif yang ramah lingkungan terhadap semen *Portland* konvensional. Penggunaan geopolimer dapat mengurangi emisi CO_2 secara signifikan, tergantung pada lokasi geografis, skenario transportasi, proses produksi aktivator, dan desain campuran. Hal ini menjadikan geopolimer sebagai solusi potensial dalam upaya mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi. Namun, geopolimer memiliki tantangan dalam lingkup luas yang meliputi agresivitas aktivator alkali, kondisi curing suhu tinggi, kompleksitas desain campuran, dan keterbatasan studi durabilitas jangka panjang. Meskipun demikian, minat dari industri, peneliti, dan lembaga regulasi terhadap inovasi dan potensi komersialisasi geopolimer menunjukkan prospek yang menjanjikan untuk pengembangan material ini di masa depan.

4. MORTAR GEOPOLIMER

Mortar geopolimer merupakan alternatif ramah lingkungan pengganti semen konvensional yang selama ini dikenal berdampak negatif terhadap lingkungan. Mortar ini dibuat dari material yang mengandung *silikat* dan *aluminat*, seperti *fly ash*, yang kemudian direaksikan dengan larutan alkali seperti *natrium silikat* (Na_2SiO_3) dan *natrium hidroksida* (*NaOH*). Namun, proses pembuatannya masih tergolong rumit dan umumnya hanya dapat dilakukan di laboratorium, karena belum tersedia dalam bentuk serbuk siap pakai akibat sifat bahan bakunya yang sangat basa. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada pengembangan mortar geopolimer berbasis *fly ash* dalam bentuk serbuk, dengan tujuan menemukan komposisi optimal dari campuran Na_2SiO_3 dan *NaOH* agar dapat diaplikasikan secara praktis di lapangan, khususnya untuk kebutuhan beton geopolymer (Teknika dkk., 2022).

Salah satu material yang dapat digunakan dalam pembentukan mortar geopolimer yaitu abu sekam padi. Menurut Hikmah dkk. (2024), abu sekam padi adalah limbah yang dihasilkan dari pembakaran kulit luar butir padi, yang mengandung banyak *silika* (SiO_2). Dengan alkali aktivator seperti *natrium hidroksida* dan *natrium silikat*, *silika* dalam abu sekam padi dapat membentuk ikatan polimer *aluminosilikat*, yang menghasilkan material yang memiliki kekuatan mekanis yang baik. Abu sekam padi tidak hanya memanfaatkan limbah pertanian tetapi juga menghasilkan beton geopolimer yang tahan terhadap serangan kimia dan membantu mengembangkan bahan konstruksi yang lebih ramah lingkungan.

Lestari & Nasrullah (2021) menjelaskan bahwa abu sekam padi, yang biasanya hanya dianggap sebagai limbah tak berguna sebenarnya memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai bahan pengganti semen. Pemanfaatan ini tidak hanya membantu mengurangi dampak limbah, tetapi juga bisa membuka peluang ekonomi baru bagi masyarakat. Kandungan silika yang tinggi dalam abu sekam padi menjadikannya bahan yang cocok untuk dijadikan geopolimer, yaitu alternatif ramah lingkungan sebagai pengganti semen biasa. Abu sekam yang akan digunakan sebagai mortar sudah disaring hingga halus agar sesuai dengan kebutuhan konstruksi dan bahan bangunan.

Pendapat tersebut diperkuat lagi oleh Farlianti dkk., (2023) yang menjelaskan pemanfaatan abu sekam padi dalam campuran beton geopolimer semakin mendapat perhatian karena dinilai mampu meningkatkan kualitas beton, baik dari segi kekuatan, daya tahan, maupun aspek keberlanjutannya. Sebagai limbah pertanian yang dihasilkan dari proses penggilingan padi, abu sekam padi dapat diolah melalui pembakaran pada suhu tertentu untuk menghasilkan material yang kaya akan *silika*. Kandungan *silika* ini memberikan sifat *pozzolan* alami, menjadikannya bahan tambahan yang sangat cocok dalam pembuatan beton geopolimer. Sifat *pozzolan* tersebut membantu meningkatkan kekuatan tekan serta ketahanan beton terhadap berbagai kondisi lingkungan. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan abu sekam padi memberikan hasil penyusutan yang sebanding dengan bahan lain seperti abu cangkang inti sawit, menandakan bahwa material ini layak dipertimbangkan sebagai alternatif pengganti semen *Portland*. Selain memperbaiki kinerja beton, kandungan *silika* dalam abu sekam juga berperan sebagai sumber silika untuk proses aktivasi alkali, yang membantu meningkatkan efisiensi pencampuran beton. Lebih jauh, penggunaan abu sekam padi juga mendukung konsep konstruksi berkelanjutan karena mampu mengurangi limbah pertanian yang selama ini belum banyak dimanfaatkan secara optimal.

Selain abu sekam padi, terdapat solusi untuk menciptakan mortar yang lebih ramah lingkungan yaitu dengan menggunakan *fly ash* (abu terbang). Menurut Solikin dkk. (2023), *fly ash*, yang dulunya hanya dianggap sebagai limbah dari proses pembakaran batu bara, kini mulai dimanfaatkan kembali sebagai bahan campuran dalam beton. Penggunaan kembali material ini tidak hanya menjadi solusi untuk mengurangi limbah industri, tapi juga membawa banyak manfaat bagi kualitas beton yang terbentuk dari mortar geopolimer itu

sendiri. *Fly ash* membantu membuat beton lebih mudah diolah saat masih dalam kondisi segar, meningkatkan kekuatan tekan, mengurangi daya serap air, dan membuat beton lebih tahan terhadap zat agresif seperti *sulfat*. Dengan kata lain, *fly ash* tak hanya membantu menjaga lingkungan, tapi juga mendukung terciptanya beton yang lebih kuat dan tahan lama.

Pendapat tersebut juga diperkuat oleh Indrayani dkk. (2022) dan Gandina & Setiyarto (2020) yang menyatakan bahwa mortar geopolimer kini mulai digunakan sebagai alternatif ramah lingkungan untuk menggantikan semen konvensional. Terutama dengan memanfaatkan limbah batu bara seperti *fly ash*. Penggunaan material sisa dari industri ini dinilai lebih efisien dan berkelanjutan karena mampu mengurangi ketergantungan terhadap semen portland yang proses produksinya menghasilkan emisi karbon tinggi. Mortar geopolimer sendiri terbentuk melalui proses polimerisasi, yaitu reaksi kimia yang mengikat partikel menjadi struktur yang kuat. Dalam proses ini, unsur silika dan alumunium berperan penting sebagai komponen utama yang memungkinkan terbentuknya ikatan yang solid dan tahan lama. Dengan pendekatan ini, beton geopolimer tidak hanya menawarkan performa struktural yang baik, tetapi juga mendukung upaya pelestarian lingkungan.

Menurut Kaselle dkk. (2021), mortar geopolimer terbentuk melalui reaksi kimia yang berbeda dari beton konvensional, yang umumnya mengandalkan reaksi hidrasi antara semen dan air. Pada beton geopolimer, proses yang terjadi disebut polimerisasi, yaitu reaksi antara larutan alkali dengan material yang mengandung unsur *Silikon (Si)* dan *Aluminium (Al)*, seperti *fly ash*. Ketika larutan alkali bereaksi dengan mineral tersebut, terbentuklah ikatan kimia yang menghasilkan struktur polimerik yang kuat dan stabil. Karena material pembentuknya berasal dari sumber geologi, seperti *fly ash* yang kaya akan silika dan alumina, beton ini dikenal sebagai beton geopolimer berbasis *fly ash*. Proses ini menghasilkan pengikat alternatif yang tidak memerlukan semen, menjadikan mortar geopolimer sebagai pilihan yang lebih ramah lingkungan dengan performa struktural yang tidak kalah dari semen konvensional.

5. BAHAN TAMBAH PADA BETON GEOPOLIMER

Penelitian ini bersifat komprehensif dan menyatukan beberapa teknik untuk inovasi beton yang lebih ramah lingkungan. Isi dari penelitian ini adalah dari hasil uji yang dilakukan oleh para peneliti dan di-*review* sehingga dapat ditarik beberapa informasi.

5.1. Peranan Alkali Aktivator pada Proses Pembuatan Beton Geopolimer Berbahan Dasar *Fly Ash*

Alkali aktivator merupakan komponen kunci dalam pembuatan beton geopolimer. Fungsi utama dari alkali aktivator adalah mengaktifkan material berbasis silika dan alumina, seperti *fly ash* dan *slag*, untuk memulai reaksi polimerisasi yang membentuk struktur ikatan kuat pada beton.

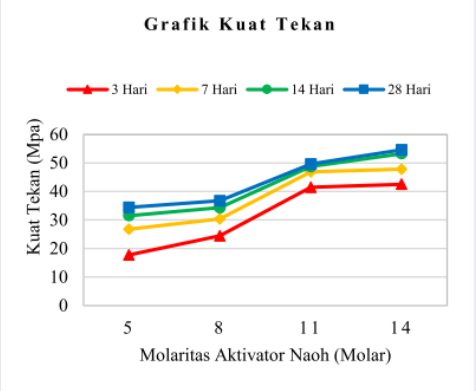
Pemanfaatan *fly ash* sebagai pengganti semen, bahkan hingga 100%, menghasilkan beton geopolymer yang diharapkan beton geopolimer berpotensi mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh proses produksi semen, yang merupakan salah satu penyumbang utama emisi gas rumah kaca. Beton jenis ini tidak menggunakan semen sama sekali, melainkan memanfaatkan *fly ash* yang mengandung *silika* dan *alumina* dalam jumlah tinggi. Untuk membentuk ikatan dan struktur beton geopolimer, kandungan *silika* dan *alumina* dalam *fly ash* diaktifkan melalui larutan alkali seperti natrium hidroksida dan natrium silikat (Bawono & Muin, 2024).

Menurut penelitian oleh Iskandar dkk. (2023), penggunaan *sodium silikat* sangat berpengaruh dalam mempercepat reaksi pembentukan struktur geopolimer, sementara *natrium hidroksida* bertugas memastikan reaksi kimia antara alumina dan silika dapat berlangsung dengan efektif. Campuran *fly ash* dengan natrium hidroksida menghasilkan struktur beton yang sangat padat dan kuat tanpa banyak retakan.

Dalam penelitian Sulistyorini dkk. (2023), dijelaskan penggunaan aktivator alkali dalam pembuatan beton geopolimer sangat penting untuk memicu reaksi kimia antara komponen-komponen yang terkandung dalam *fly ash*, sehingga memungkinkan binder geopolimer mengikat agregat dengan efektif (Hertianisya & Prasetya, 2023). Aktivator yang sering digunakan dalam proses ini adalah *natrium hidroksida* (*NaOH*) dan *natrium silikat* (Na_2SiO_3) (Davidovits, 1994). Salah satu cara untuk mengurangi dampak limbah industri adalah dengan mengubah *fly ash*, yang sebelumnya tidak dimanfaatkan, menjadi bahan yang lebih berguna, yaitu sebagai bahan campuran dalam pembuatan beton. *Fly ash*, yang kaya akan kandungan silika dan alumina, dapat digunakan dalam pembuatan beton geopolimer yang tidak mengandalkan semen sebagai bahan pengikat utama. Beton jenis ini memanfaatkan material yang terkandung dalam limbah industri, seperti *fly ash* yang dihasilkan dari pembakaran batu bara, sebagai komponen dasar pengikat. Dengan memanfaatkan *fly ash* dalam pembuatan geopolimer, tidak hanya dihasilkan beton yang kuat dan tahan lama, tetapi juga membantu dalam pengelolaan limbah industri secara lebih berkelanjutan (Manuahe dkk., 2014).

Peneliti Farlianti dkk. (2023) menjelaskan bahwa aktivator seperti *natrium hidroksida (NaOH)* dan *natrium silikat (Na_2SiO_3)* berfungsi memicu reaksi antara *silika (SiO_2)* dan *alumina (Al_2O_3)* dalam beton geopolimer, membentuk struktur *aluminosilikat* yang kuat. *NaOH* mempercepat pelarutan senyawa aktif, sementara *Na_2SiO_3* memperkuat matriks hasil reaksi. Penambahan yang tepat meningkatkan kekuatan dan ketahanan beton, namun jika berlebihan dapat menurunkan workability dan menyebabkan retak dini.

Dapat dibuktikan juga dari percobaan yang dilakukan Bawono & Muin (2024) yang ditunjukkan pada Gambar 1. kuat tekan beton geopolymer berbahan dasar limbah *fly ash*. Dari grafik tersebut dapat dilihat terjadi kenaikan kuat tekan beton geopolimer berbasis *fly ash*. Nilai tersebut berbanding lurus dengan penambahan molaritas dari aktivator *NaOH*. Maka dari itu dapat diambil hasil semakin tinggi molaritas dari *NaOH*, semakin tinggi juga nilai kuat tekan betonnya.



Gambar 1. Grafik kuat tekan beton terhadap penambahan aktivator. (Bawono & Muin, 2024)

Dengan demikian, alkali aktivator merupakan faktor esensial dalam pengembangan beton geopolimer, di mana komposisi, rasio, serta jenis aktivator (SS/SH) sangat menentukan performa akhir beton baik secara fisik maupun mekanik. Beton geopolimer sama sekali tidak menggunakan semen dalam proses pembuatannya dan memiliki ketersediaan bahan baku yang bahkan melimpah di Indonesia. Semen diganti dengan *fly ash* dan ditambah larutan alkali aktivator yang akan bereaksi dengan kandungan *silika* dan *alumina* pada *fly ash* yang kemudian membentuk binder beton geopolimer.

5.2. Perbandingan Antara Beton Geopolimer yang Berbasis *Fly Ash* dengan Beton Geopolimer Berbasis Abu Sekam Padi

Untuk mengurangi ketergantungan terhadap semen portland, berbagai penelitian telah mengembangkan beton geopolimer yang dibuat dengan material berbasis limbah, khususnya abu sekam padi dan *fly ash*. Beton geopolimer yang terbuat dari *fly ash* menunjukkan kinerja yang sangat baik. Menurut Septiastuti dkk. (2023), beton yang menggunakan *fly ash* dengan aktivator alkali *NaOH* dan *Na_2SiO_3* dapat mencapai kuat tekan hingga 30 MPa selama 28 hari. *Fly ash* yang banyak memiliki kandungan silika dan alumina terbukti sangat efektif bereaksi dengan larutan alkali untuk membentuk struktur polimer yang kuat. Kaselle dkk. (2021) telah melakukan penelitian dimana ditemukan bahwa *fly ash* sebagai pengikat utama mortar geopolimer yang menghasilkan karakteristik tekan yang kuat. Terlebih lagi ketika dikombinasikan dengan pasir dasar sebagai agregat halus.

Pernyataan tersebut diperkuat oleh pendapat (Loekito & Wardhono, 2021). Penggunaan alkali sebagai aktivator dalam beton geopolimer adalah faktor utama yang menggantikan semen Portland yang berdampak negatif pada lingkungan. *Natrium hidroksida (NaOH)* dan *natrium silikat (Na_2SiO_3)* berperan penting dalam memicu polimerisasi senyawa silika dan alumina dalam bahan *pozzolan* seperti *fly ash*. *NaOH* mempercepat reaksi kimia, sedangkan *Na_2SiO_3* memperkuat struktur akhir material. Namun, efektivitas alkali bergantung pada keseimbangan antara keduanya. Penggunaan alkali yang berlebihan dapat menurunkan kualitas mekanik beton dan menyebabkan ketidakhomogenan. Oleh karena itu, pemahaman tentang karakteristik bahan sangat penting untuk memastikan kinerja optimal geopolimer dalam jangka panjang.

Menurut Solikin (2021) beton geopolimer dibentuk dari mortar geopolimer berbasis *fly ash* menunjukkan kuat tekan tinggi terutama pada molaritas tinggi (16M). Selain itu, *fly ash* memiliki keunggulan dalam meningkatkan durabilitas dan mengurangi porositas beton Fitriahsari, 2018, serta secara ekonomis lebih murah dibanding bahan lainnya, menjadikannya pilihan berkelanjutan untuk konstruksi ramah lingkungan.

Berbeda dengan sekam padi menurut Maria Lestari & Nasrullah (2021). Sekam padi, limbah dari penggilingan padi yang memiliki kandungan silika yang tinggi. Kandungan silikanya mencapai 80%, dan dapat digunakan sebagai sumber potensial untuk produksi geopolimer. Untuk penelitian ini, abu sekam padi yang lolos saringan no. 200 digunakan (Fitri, 2016). Abu sekam padi dapat berfungsi sebagai alternatif bahan utama pengganti *fly ash* dalam pembuatan beton geopolimer. *Fly ash*, yang merupakan residu dari pembakaran batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Limbah tersebut dikategorikan sebagai limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) oleh BAPEDAL karena berpotensi mencemari lingkungan serta membahayakan kesehatan manusia (Wijanarko, 2008).

Peneliti menyarankan bahwa dalam beton berkualitas tinggi, pengaruh *fly ash* terletak pada butiran *fly ash* yang halus. Butiran halus itulah yang mengisi rongga antara agregat dan membuat beton lebih padat, memanfaatkan sifat *pozzolan fly ash* dan mengurangi ukuran pori-pori. Selain itu, terbukti bahwa menggunakan *fly ash* dalam jumlah tertentu dapat meningkatkan kekuatan beton. Namun, temuan penelitian ini menunjukkan sebaliknya. Penggunaan abu sekam padi (ASP) bersamaan dengan *fly ash* dapat meningkatkan porositas beton (Muis dkk., 2021).

Dari keseluruhan studi ini, dapat disimpulkan bahwa *fly ash* memiliki reaktivitas dan karakteristik yang lebih ideal untuk pembuatan beton geopolimer berkekuatan tinggi. Sementara itu, abu sekam padi lebih cocok digunakan sebagai bahan tambahan minor dalam campuran, atau untuk beton non-struktural yang tidak memerlukan kekuatan tekan tinggi. Secara umum, untuk tujuan struktural dan penggantian penuh semen portland, beton geopolimer berbasis *fly ash* menawarkan performa yang jauh lebih unggul dibandingkan beton berbasis abu sekam padi.

5.3. Pengaruh Penambahan Larutan *NaOH* dan *Sodium Silikat*

Beton geopolimer adalah jenis beton baru yang tidak menggunakan semen Portland sebagai bahan pengikat. Beton geopolimer memanfaatkan bahan pozzolan yang kaya akan unsur *Alumina ($A_{l2}O_3$) dan Silika (SiO2)*, seperti *fly ash* (abu terbang), sebagai pengganti semen. Bahan tersebut dicampurkan dengan larutan alkali aktivator yang terdiri dari *Natrium Hidroksida (NaOH)* dan *Natrium Silikat (Na_2SiO_3)* dalam rasio tertentu (Setiawati dkk., 2022).

Beton geopolimer terdiri dari agregat halus dan kasar. Agregat halus digunakan dari pasir Cimalaka dengan gradasi sesuai daerah nomor 2 dan agregat kasar digunakan dari material yang lolos saringan ukuran maksimal 20 mm, sesuai dengan SNI 03-2834-2000. Untuk meningkatkan kekuatan struktural beton, agregat ini digunakan sebagai pengisi. Larutan alkali sangat penting untuk campuran beton geopolimer. *Sodium silika* mempercepat proses polimerisasi dengan membentuk ikatan kimia yang kuat antara partikel *silika* dan *alumina*, sedangkan *natrium hidroksida* membantu melarutkan komponen aktif dalam *fly ash*. Untuk memastikan reaksi pembentukan ikatan polimer berlangsung dengan benar dan menghasilkan beton dengan sifat mekanis yang paling baik, proporsi antara *NaOH* dan *Na_2SiO_3* harus diperhatikan dengan cermat (Maksum dkk., 2024).

Molaritas larutan NaOH sangat penting untuk kekuatan akhir beton geopolimer. Dengan molaritas yang tepat, proses pelarutan *silika* dan *alumina* dapat dipercepat. Ditambah juga pembentukan struktur geopolimer dapat dipercepat. Di sisi lain, penggunaan molaritas yang berlebihan menyebabkan larutan menjadi kental sehingga dapat menghambat pencampuran yang mengakibatkan kuat tekan beton menurun. Studi dengan variasi molaritas 8M, 10M, 12M, dan 14M menunjukkan bahwa molaritas 10M memiliki kuat tekan tertinggi dengan nilai 12,92 MPa pada umur 14 hari. Setelah mencapai titik terendah ini, peningkatan molaritas justru menyebabkan penurunan kuat tekan (Korompis, 2023).

Oleh karena itu, pemilihan molaritas larutan *NaOH* yang tepat sangat penting untuk menghasilkan beton geopolimer berbasis *fly ash* dengan kuat tekan yang ideal dan ketahanan lingkungan yang baik. Beton geopolimer ini tidak hanya memiliki kekuatan struktural yang cukup, tetapi juga merupakan opsi yang tidak mencemari lingkungan untuk mengurangi efek gas rumah kaca yang dikeluarkan oleh semen konvensional (Korompis, 2023).

5.4. Perbandingan Penggunaan Serat Kawat Bendrat dan Serat Baja pada Beton Geopolimer

Beton geopolimer adalah bahan konstruksi baru yang menggunakan *fly ash* sebagai pengganti semen konvensional. Beton geopolimer sendiri memiliki dua keuntungan utama, yaitu mengurangi emisi karbon dan memanfaatkan limbah industri (Budiningrum dkk., 2021). Namun, beton geopolimer lebih getas dan rentan terhadap retak daripada beton biasa. Terutama ketika menghadapi beban lentur. Beberapa penelitian telah melihat penambahan serat ke dalam campuran beton geopolimer untuk mengatasi kekurangan ini (Putra & Noorhidana, 2020).

Pada jurnal yang dibahas, terdapat dua penggunaan Solusi untuk mengatasi kekurangan diatas. Solusi yang pertama yaitu dengan menambahkan serat baja. Serat baja ditambahkan ke beton geopolimer untuk meningkatkan kekuatan tarik, kekuatan lentur, dan daktilitasnya. Dengan mendistribusikan tegangan lebih merata pada struktur beton, serat baja dapat membantu mencegah retak. Penggunaan serat baja sebesar 0,25% hingga 1% terhadap berat beton dapat meningkatkan kuat lentur beton secara signifikan, menurut penelitian. Setelah 28 hari perawatan, penambahan 0,5% serat baja menghasilkan kuat lentur rata-rata sebesar 75,47 kg/cm2 pada rasio larutan alkali terhadap *fly ash* sebesar 0,45. Ini menunjukkan bahwa serat baja sangat membantu meningkatkan kinerja mekanis beton geopolimer (Putra & Noorhidana, 2020).

Solusi yang dapat diterapkan kedua yaitu penambahan serat kawat bendrat. Berdasarkan jurnal yang terkait, serat kawat bendrat menunjukkan hasil yang lebih beragam. Sebagai bagian dari konsep beton terikat serat baja (SFRC), serat kawat bendrat membantu mengurangi keretakan dan meningkatkan ketahanan tarik beton. Namun, beton geopolimer kurang efektif daripada beton biasa. Sebuah penelitian yang menggunakan variasi serat bendrat 0,5% dan 1,0% menemukan bahwa kekuatan lentur beton geopolimer hanya 0,055 MPa dan 0,104 MPa pada 28 hari, yang menunjukkan bahwa penambahan serat bendrat kurang efektif untuk meningkatkan kekuatan lentur daripada pada beton biasa (Indrayani dkk., 2022).

Dalam perbandingan ini, terlihat bahwa penambahan serat baja lebih baik dalam meningkatkan kinerja beton geopolimer daripada serat kawat bendrat. Serat bendrat meningkatkan kekuatan lentur dan sifat daktilitas beton geopolimer. Meskipun serat bendrat berfungsi baik pada beton biasa, serat bendrat tidak dapat meningkatkan kekuatan yang signifikan pada beton geopolimer. Oleh karena itu, untuk mengembangkan beton geopolimer yang memiliki kinerja mekanis yang luar biasa dapat menggunakan penambahan serat baja dibanding serat kawat bendrat (Afif dkk., 2024).

6. PROSPEK TEKNOLOGI MORTAR PADA BETON GEOPOLIMER

Penggunaan mortar geopolimer pada beton geopolimer menawarkan prospek yang sangat menjanjikan sebagai solusi inovatif di bidang konstruksi yang ramah lingkungan. Mortar geopolimer dikembangkan sebagai alternatif pengganti semen *Portland*, yang selama ini diketahui menyumbang emisi CO_2 tinggi dan menimbulkan kerusakan lingkungan akibat eksploitasi bahan baku. Dengan memanfaatkan bahan-bahan kaya silika dan alumina seperti *fly ash* dan abu sekam padi, mortar geopolimer tidak hanya mengurangi dampak lingkungan, tetapi juga memanfaatkan limbah industri serta pertanian yang selama ini kurang termanfaatkan. Abu sekam padi merupakan sisa hasil pembakaran dari kulit padi yang kaya kandungan silika, sehingga sangat potensial untuk meningkatkan kekuatan tekan dan daya tahan beton geopolimer. Demikian pula, *fly ash* yang dihasilkan dari pembakaran batu bara, selain mengurangi limbah industri, juga terbukti mampu meningkatkan kualitas beton dari segi kekuatan tekan, ketahanan terhadap *sulfat*, dan menurunkan permeabilitas beton.

Secara teknis, mortar geopolimer menunjukkan performa mekanik yang sangat baik, terutama dalam hal kuat tekan dan ketahanan struktur. Penggunaan alkali aktivator seperti *natrium hidroksida (NaOH)* dan *natrium silikat* (Na_2SiO_3) menjadi kunci dalam proses polimerisasi, membentuk ikatan aluminosilikat yang kuat dan stabil. Penelitian juga menunjukkan bahwa beton geopolimer berbasis *fly ash* cenderung lebih unggul dibandingkan yang berbasis abu sekam padi, terutama dari segi kekuatan tekan dan kestabilan struktur. Selain itu, inovasi penambahan serat baja pada mortar geopolimer terbukti dapat meningkatkan sifat mekanis, seperti kekuatan lentur dan durabilitas, sehingga semakin memperluas aplikasi mortar geopolimer dalam berbagai jenis konstruksi.

Dari sisi keberlanjutan, penggunaan mortar geopolimer pada beton geopolimer mampu secara signifikan menurunkan emisi karbon dan membantu mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam yang tidak terbarukan. Hal ini sejalan dengan tren global menuju konstruksi hijau dan berkelanjutan. Di Indonesia sendiri, potensi pemanfaatan limbah seperti abu sekam padi dan *fly ash* sangat besar, namun masih memerlukan sosialisasi dan pengembangan teknologi agar dapat diadopsi secara luas di industri konstruksi. Tantangan yang dihadapi antara lain adalah proses sintesis mortar geopolimer yang masih lebih rumit dibandingkan mortar semen konvensional, serta perlunya penelitian lebih lanjut terkait durabilitas jangka panjang dan optimasi komposisi campuran.

Secara keseluruhan, prospek penggunaan mortar geopolimer pada beton geopolimer sangat cerah, baik dari aspek teknis, lingkungan, maupun ekonomi. Dengan dukungan riset yang berkelanjutan dan kolaborasi antara akademisi, industri, serta pemerintah, mortar geopolimer dapat menjadi pilar penting dalam mewujudkan konstruksi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan di masa depan.

7. KESIMPULAN

Penggunaan mortar geopolimer dalam beton geopolimer menawarkan prospek sebagai solusi inovatif yang lebih ramah lingkungan, menggantikan semen *Portland* yang berkontribusi pada tingginya emisi CO_2 dan kerusakan lingkungan. Dengan memanfaatkan limbah yang kaya akan *silika* dan *alumina*, seperti *fly ash* dan abu sekam padi, mortar geopolimer tidak hanya mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, tetapi juga meningkatkan kualitas beton, termasuk dalam hal kekuatan tekan dan ketahanan terhadap *sulfat*. Dari segi teknis, mortar geopolimer menunjukkan kinerja mekanik yang baik, terutama dengan penggunaan aktivator alkali seperti *natrium hidroksida* dan *natrium silikat*. Meskipun terdapat tantangan seperti kompleksitas proses sintesis dan kebutuhan untuk penelitian lebih lanjut, potensi pemanfaatan limbah di Indonesia sangat besar. Dengan dukungan penelitian dan kolaborasi antara akademisi, industri, dan pemerintah, mortar geopolimer dapat menjadi komponen kunci dalam mewujudkan konstruksi yang lebih berkelanjutan di masa depan.

Secara umum, *fly ash* terbukti lebih unggul dibandingkan abu sekam padi, terutama dalam hal kekuatan tekan, kepadatan struktur, dan stabilitas jangka panjang. Namun, abu sekam padi tetap memiliki potensi besar sebagai bahan tambahan, terutama dalam meningkatkan keberlanjutan konstruksi dan memanfaatkan limbah pertanian yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal.

Keberhasilan beton geopolimer sangat bergantung pada komposisi dan perbandingan larutan aktivator alkali, yaitu *Natrium Hidroksida (NaOH)* dan *Natrium Silikat* (Na_2SiO_3). Komposisi yang tepat dapat mempercepat reaksi pembentukan ikatan polimer aluminosilikat yang kuat, menghasilkan beton yang tidak hanya padat dan kuat, tetapi juga tahan terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem. Penelitian menunjukkan bahwa molaritas *NaOH* sebesar 10M menghasilkan kekuatan tekan yang optimal, menekankan pentingnya kontrol yang ketat terhadap variabel ini.

Selain itu, inovasi dalam penambahan bahan tambahan seperti serat baja menunjukkan hasil yang signifikan dalam meningkatkan kekuatan lentur dan daktilitas beton geopolimer, menjadikannya lebih cocok untuk aplikasi struktural. Di sisi lain, serat kawat bendrat belum menunjukkan efektivitas yang setara, terutama dalam lingkungan beton geopolimer yang lebih rapuh dibandingkan beton konvensional.

Meskipun teknologi ini masih menghadapi tantangan, seperti kebutuhan curing pada suhu tinggi, ketergantungan pada bahan kimia alkali, dan proses *sintesis* yang lebih kompleks, potensinya untuk mendukung pembangunan berkelanjutan sangat besar. Implementasi yang lebih luas masih memerlukan kolaborasi antara industri, akademisi, dan pembuat kebijakan untuk memperluas adopsi teknologi ini.

Prospek penggunaan mortar geopolimer dalam industri konstruksi sangat cerah sebagai solusi inovatif yang lebih ramah lingkungan. Dengan memanfaatkan limbah industri seperti *fly ash* dan abu sekam padi yang kaya *silika* dan *alumina*, mortar geopolimer tidak hanya membantu mengurangi emisi CO_2, tetapi juga meningkatkan kekuatan tekan dan daya tahan beton. Meskipun proses pembuatan mortar geopolimer lebih rumit dibandingkan dengan mortar semen konvensional, penelitian menunjukkan bahwa beton geopolimer yang berbasis *fly ash* seringkali lebih unggul dalam dampak terhadap lingkungan. Dengan dukungan penelitian yang berkelanjutan dan kolaborasi antara akademisi, industri, dan pemerintah, mortar geopolimer memiliki potensi besar untuk mendukung pembangunan infrastruktur yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

Afif, M., Nurmeyliandari, R., & Devi, D. S. (2024). *Karakteristik Kuat Tarik Beton Polimer Dengan Variasi Serat Kawat Bendrat*. *9*, 107–116.

Bawono, D., & Muin, R. B. (2024). Efek Molaritas Aktivator (NaOH) pada Beton Geopolymer dengan Bahan Pengikat Limbah Fly Ash PLTU Lontar. *Cantilever: Jurnal Penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, *12*(2), 111–120. https://doi.org/10.35139/cantilever.v12i2.253

Budiningrum, D. S., Kustirini, A., Purnijanto, B., Mahasukma, D., & Utama, T. Y. (2021). Studi Experimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Pltu Tanjungjati B Jepara. *Bangun Rekaprima*, *7*(2), 55. https://doi.org/10.32497/bangunrekaprima.v7i2.2997

Farlianti, S., Hasyim, S., & Aminuddin, K. M. (2023). *TEKNIKA : Jurnal Teknik Penggunaan Abu Sekam Padi Sebagai Bahan Tambahan Pada Campuran Beton Geopolimer : Review Kinerja antara Al 2 O 3 dan SiO 2 dalam material menjadi cair dan mengalami geopolimerisasi , menghasilkan matriks aluminosilikat amorf tiga d*. *11*(2), 81–90.

Ferdyansah. (2024). *Skripsi pengaruh faktor air semen dan steam curing terhadap kekuatan dan durabilitas mortar*.

Gandina, N. L., & Setiyarto, Y. D. (2020). Studi Eksperimental Beton Geopolimer Dengan Memanfaatkan Fly Ash Sebagai Pengganti Semen Dan Serat Mat Sebagai Aditif. *CRANE: Civil Engineering Research Journal*, *1*(1), 26–36. https://doi.org/10.34010/crane.v1i1.4181

Hikmah, P. N., Nurjaya, D. W. I. M., Sumarno, A., & Ash, R. H. (2024). *Jurnal Teknologi Lingkungan Pengaruh Rasio Campuran Abu Sekam Padi dan Zeolit terhadap Waktu Ikat , Berat Isi , dan Kuat Tekan Mortar Geopolimer Ramah Lingkungan The Mixed Ratio Effect of Rice Husk Ash and Zeolite on the Setting Time , Density , and Compr*. *25*(2), 348–354.

Indrayani, I., Tilik, L. F., Suhirkam, D., Suhadi, S., Wardana, M. P., & Milawati, I. (2022). Pengaruh Penambahan Serat Kawat Bendrat Terhadap Kuat Lentur Beton Geopolimer. *Bentang : Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, *10*(1), 69–76. https://doi.org/10.33558/bentang.v10i1.2941

Iskandar, T. H., Miranti, M. G., Sutiadiningsih, A., & Handajani, S. (2023). JIPTEK : Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik dan Kejuruan) Green Skills. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik dan Kejuruan*, *16*(2), 90–103.

Kaselle, H., Ruga, S., & A, S. A. Z. (2021). Karakteristik Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Dan Bottom Ash. *Seminar Nasional Hasil Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat*, *6*(1), 66–71.

Khalifa, N. (2022). *Studi Reduksi Bising Dengan Menggunakan Material Insulasi Geopolimer Fly Ash – Serbuk Kayu*. *33*(1), 1–12.

Korompis, S. E. W. S. O. D. (2023). Analisis Pengaruh Variasi Molaritas NaOH Terhadap Kuat Tekan DanModulus Elastisitas Pada Eksperimen Beton GeopolimerBerbasis Abu Terbang (Fly Ash). *ejournal Tekno , 21*(85), 1482–1490.

Loekito, I. P. & Wardhono, A. (2021). Pengaruh Variasi NaOH Dan Na2SiO3 Terhadap Kuat Tekan Dry Geopolimer Mortar Pada Kondisi Rasio Fly ash Terhadap Aktifator 2,5 : 1. *Teknik Sipil*, *October 2018*, 1–7.

Lestari, E. L., & Nasrullah, A. (2021). Pengaruh Konsentrasi Larutan NaOH Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer Abu Sekam Padi. *Jurnal Ilmiah Bering'S*, *8*(01), 1–6. https://doi.org/10.36050/berings.v8i01.298

Maksum, H. A., Istiqomah, I., & Novarro Batubara, B. (2024). Penambahan Serat Polypropylene Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Belah Campuran Beton Geopolimer. *Jurnal Teknik Sipil Cendekia (JTSC)*, *5*(1), 759–768. https://doi.org/10.51988/jtsc.v5i1.172

Muis, A., Bahri, S., Sulaiman, & Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan dan Jembatan, P. (2021). Pengaruh Penggunaan Fly Ash Dengan Volume Tinggi Dan Abu Sekam Padi Terhadap Kuat Lentur Beton Mutu Tinggi. *Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lholseumawe*, *Vol.5*(No.1), 1–4.

Putra, A. M., & Noorhidana, V. A. (2020). *1366-6684-1-Pb*. *8*(2), 367–384.

Septiastuti, F., Rahardjo, P. P., & Indrayana, R. K. (2023). Evaluasi Shear Strength dan Stress History Tanah Lunak pada Pekerjaan Vacuum Preloading Menggunakan Uji CPTu. *Jurnal Teknik Sipil*, *30*(3), 391–396. https://doi.org/10.5614/jts.2023.30.3.7

Setiawati, M., Martini, S., & Nurulita, R. (2022). Variasi Molaritas Naoh Dan Alkali Aktivator Beton Geopolimer. *Jurnal Deformasi*, *7*(1), 56. https://doi.org/10.31851/deformasi.v7i1.7983

Siyal, A. A., Radin Mohamed, R. M. S., Shamsuddin, R., & Ridzuan, M. B. (2024). A comprehensive review of synthesis kinetics and formation mechanism of geopolymers. *RSC Advances*, *14*(1), 446–462. https://doi.org/10.1039/d3ra06205h

Solikin, M. (2021). Analisis Pemakaian Kombinasi Fly Ash Tipe F Dan Slag 1:1 Pada Beton Geopolymer Dengan Na2SiO3 Dan NaOH Sebagai Alkali Aktivator: Sebuah Kajian Literatur. *Dinamika Teknik Sipil: Majalah Ilmiah Teknik Sipil*, *14*(1), 13–20. https://doi.org/10.23917/dts.v14i1.15274

Solikin, M., Sahid, M. N., Ujianto, M., Trinugroho, S., Rustama, D. I., & Mubarak, F. (2023). The mechanical properties of high and normal-strength of fly ash concrete strengthened by polypropylene and steel fiber. *Civil Engineering and Architecture*, *11*(4), 1695–1704. https://doi.org/10.13189/cea.2023.110406

Sujatmiko, H. (2024). Pengaruh Variasi Komposisi Campuran Mortar Terhadap Kuat Tekan Effect Of Variations in Mortar Mix Composition on Compressive Strength. *Nusantara Hasana Journal*, *3*(8), Page.

Sulistyorini, D., Galuh, D. L. C., Prayogi, Y. O., Ardiansyah, M. T., & Hakim, A. R. (2023). Studi Eksperimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Molaritas Rendah Dengan Variasi Alkali Aktivator 1,5 Dan 2,5. *Bangun Rekaprima*, *9*(1), 106. https://doi.org/10.32497/bangunrekaprima.v9i1.4603

Teknika, S., Hadi, M., Studi, P., Teknik, M., Universitas, P., & Darma, B. (2022). *Pengaruh Penggunaan Semen Geopolymer Berbasis Fly Ash pada Campuran Mortar Geopolymer*. *1*, 8–16.