

## REVIEW PENGARUH JENIS ALKALI AKTIVATOR TERHADAP SIFAT BETON GEOPOLIMER

Irvebry Ayu Wulandary<sup>1</sup>, Estu Ema Apriliana<sup>2</sup>, Andantino Putra Palsamu<sup>3</sup>,  
Debora Lau<sup>4</sup>

Program Studi Teknik Sipil Universitas Tanjungpura<sup>1,2,3</sup>

Program Studi Teknik Sipil Universitas Nusa Cendana<sup>4</sup>

E-mail : Irvebryayuwulandary@civil.untan.ac.id<sup>1</sup>, estu.apriliana@civil.untan.ac.id<sup>2</sup>,  
andantino@civil.untan.ac.id<sup>3</sup>, debora.lau@staf.undana.ac.id<sup>4</sup>

### ABSTRAK

Paper ini meninjau pengaruh jenis aktivator alkali terhadap sifat mekanik dan durabilitas beton geopolimer. Material ini dikembangkan sebagai alternatif ramah lingkungan pengganti semen Portland dengan memanfaatkan sumber aluminosilikat seperti abu terbang dan slag yang diaktivasi oleh larutan alkali. Aktivator yang umum digunakan meliputi NaOH, KOH, serta kombinasi dengan natrium atau kalium silikat. Hasil kajian dari berbagai penelitian menunjukkan bahwa jenis dan konsentrasi aktivator sangat memengaruhi reaksi geopolisasi dan pembentukan gel N–A–S–H maupun C–A–S–H. Kombinasi NaOH dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dengan rasio optimal menghasilkan kekuatan tekan dan ketahanan kimia lebih tinggi, sedangkan rasio silikat/hidroksida berlebih menurunkan *workability* dan stabilitas mikrostruktur. Tantangan utama meliputi sifat korosif aktivator, variasi bahan baku, dan belum adanya standar formulasi yang baku. Secara keseluruhan, pemilihan jenis aktivator yang tepat berperan penting dalam meningkatkan kinerja dan keberlanjutan beton geopolimer, sekaligus membuka peluang penerapan luas pada konstruksi hijau masa depan.

**Kata Kunci :** Beton Geopolimer, Alkali Aktivator, NaOH, KOH, rasio SS/SH

### PENDAHULUAN

Industri konstruksi merupakan salah satu penyumbang terbesar emisi CO<sub>2</sub> global serta kerusakan lingkungan, terutama akibat produksi dan penggunaan beton berbasis semen Portland konvensional (PCC) atau semen Portland biasa (OPC) (Khasawneh, 2025; Zerfu & Ekaputri, 2016). Selain itu, emisi karbon dioksida yang dihasilkan dari reaksi kimia *chemical CO<sub>2</sub>* dapat berkontribusi sekitar 15–20% terhadap total emisi karbon dioksida global, dengan sebagian besar berasal dari proses produksi semen dan industri besi (Joseph Davidovits, 1994).

Konsep pembangunan berkelanjutan mendorong pencarian bahan dan teknologi ramah lingkungan

sebagai alternatif dari metode tradisional yang mampu mengurangi emisi CO<sub>2</sub> ke atmosfer, meminimalkan pencemaran lingkungan, serta mengurangi konsumsi energi dan biaya produksi (Meskhi dkk., 2023). Salah satu penerapan teknologi tersebut adalah pengembangan beton geopolimer (Meskhi dkk., 2023). Beton geopolimer kini menjadi pilihan yang berkelanjutan dan berkinerja tinggi sebagai pengganti beton semen Portland konvensional, karena memberikan manfaat yang lebih besar baik dari segi lingkungan maupun sifat tekniknya (Khasawneh, 2025).

Beton geopolimer merupakan material yang berbasis pada senyawa aluminosilikat dan diaktifkan menggunakan larutan alkali,

menghasilkan ikatan kimia yang mirip dengan struktur gel silikat hidrat pada beton semen, namun melalui mekanisme pembentukan yang berbeda. Tidak seperti beton semen Portland yang terbentuk melalui reaksi hidrasi, beton geopolimer mengalami proses geopolisasi - yakni reaksi kimia antara bahan sumber yang kaya silika dan alumina dengan larutan aktivator alkali. Hasil dari proses ini adalah material yang memiliki kekuatan tinggi, ketahanan terhadap suhu ekstrem, serta durabilitas yang baik terhadap lingkungan agresif (Remigildus Cornelis & Iwan Rustendi, 2020).

Salah satu aspek utama yang memengaruhi mutu beton geopolimer adalah jenis serta komposisi aktivator alkali yang digunakan (Ramadhany dkk., 2025). Aktivator ini berperan penting dalam melarutkan kandungan silika dan alumina dari bahan dasar, yang kemudian bereaksi membentuk jaringan polimer anorganik tiga dimensi. Variasi jenis aktivator seperti natrium hidroksida (NaOH), kalium hidroksida (KOH), atau campurannya dengan natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) maupun kalium silikat ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ) akan memberikan pengaruh yang berbeda terhadap kekuatan mekanik dan ketahanan beton geopolimer. Oleh karena itu, perbedaan dalam jenis, konsentrasi, serta rasio antar komponen aktivator menjadi faktor penting dalam menentukan performa optimal material tersebut.

Pada *review* ini akan dibahas beberapa hasil penelitian yang berkaitan dengan pengaruh variasi jenis aktivator alkali terhadap karakteristik beton geopolimer. Fokus pembahasan mencakup jenis alkali aktivator, mekanisme kerja dan sifat alkali aktivator terhadap beton geopolimer. Dengan demikian, review ini diharapkan dapat memberikan pemahaman komprehensif mengenai peranan penting aktivator alkali sekaligus menjadi landasan dalam pengembangan beton geopolimer yang lebih efisien dan berwawasan lingkungan di masa depan.

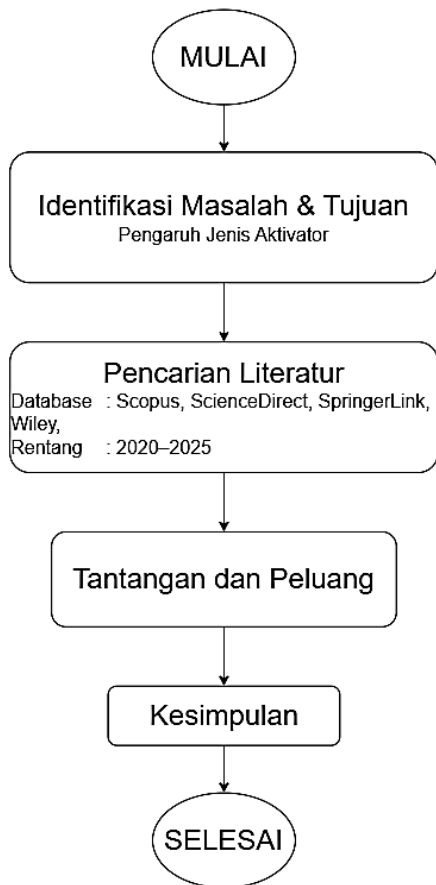
## TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian ini memiliki nilai penting karena beton geopolimer hadir sebagai solusi ramah lingkungan pengganti semen Portland, dengan kemampuan menurunkan emisi karbon, meningkatkan ketahanan terhadap suhu tinggi, serta memperkuat daya tahan kimia di kondisi lingkungan agresif (Remigildus Cornelis & Iwan Rustendi, 2020). Meski demikian, performa akhir beton geopolimer sangat bergantung pada jenis, kadar, serta perbandingan komponen aktivator alkali yang digunakan. Analisis terhadap variasi aktivator berperan dalam menentukan parameter proses yang paling efektif untuk mencapai kekuatan mekanik, ketahanan jangka panjang, dan efisiensi produksi yang optimal, sekaligus menekan biaya serta dampak negatif terhadap lingkungan (Mohapatra dkk., 2022).

Secara praktis, hasil dari tinjauan ini diharapkan mampu memberikan pedoman bagi peneliti dan praktisi dalam menentukan jenis aktivator yang sesuai, seperti NaOH, KOH, atau kombinasi  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ , serta kondisi proses yang ideal, mencakup tingkat molaritas, rasio antara silikat dan hidroksida, serta pengaturan suhu dan waktu curing (Sasui dkk., 2020). Dengan demikian, kajian ini diharapkan dapat menjembatani perbedaan hasil penelitian di tingkat laboratorium dengan kebutuhan penerapan teknis di skala industri yang lebih luas.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *systematic literature review* (SLR) untuk menelaah pengaruh jenis alkali aktivator terhadap sifat mekanik dan durabilitas beton geopolimer. Dapat dilihat pada Gambar.1 Diagram Alir Penelitian.



Gambar. 1 Diagram Alir Penelitian

## HASIL PENELITIAN

Hasil kajian literatur pada Jenis Aktivator Alkali dan Mekanisme Kerja, Pengaruh Alkali Aktivator Pada Sifat Beton Geopolimer, serta tantangan dan peluang dijelaskan pada poin berikut ini.

Secara keseluruhan, temuan penelitian ini mempertegas bahwa pemilihan dan pengelolaan aktivator alkali yang tepat menawarkan peluang besar dalam menghasilkan beton geopolimer yang lebih ramah lingkungan dan berpotensi menggantikan semen Portland pada konstruksi berkelanjutan. Namun demikian, berbagai tantangan teknis masih perlu dikaji untuk meningkatkan konsistensi performa dan pemahaman mekanismenya.

### Jenis Aktivator Alkali dan Mekanisme Kerja

Beton geopolimer merupakan material berbasis aluminosilikat yang

dibentuk melalui proses aktivasi menggunakan larutan alkali. Larutan aktivator ini berfungsi penting dalam memicu reaksi pelarutan senyawa silika dan alumina dari material asal (precursor), yang kemudian berpolimerisasi membentuk jaringan anorganik tiga dimensi. Aktivator yang umum digunakan mencakup larutan hidroksida alkali, seperti natrium hidroksida (NaOH) dan kalium hidroksida (KOH). Natrium hidroksida sering dipilih karena ketersediaannya luas dan biaya yang relatif rendah, sedangkan kalium hidroksida mampu mempercepat reaksi tetapi membutuhkan biaya lebih besar (Lin dkk., 2023; Martínez & Miller, 2023). Selain itu, aktivator berbasis silikat seperti natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) dan kalium silikat ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ) kerap digunakan bersama larutan hidroksida untuk meningkatkan kandungan silika terlarut, yang berpengaruh terhadap pembentukan gel dan kekuatan akhir beton geopolimer (Efe dkk., 2024; Sasui dkk., 2024). Rasio antara silikat dan hidroksida (SS/SH ratio) menjadi parameter utama yang menentukan sifat akhir material tersebut.

Mekanisme kerja aktivator alkali dalam proses geopolisasi berlangsung melalui beberapa tahap utama, yakni pelarutan (dissolution), pembentukan dan migrasi oligomer, serta proses polikondensasi (polycondensation). Pada tahap awal, ion hidroksida ( $\text{OH}^-$ ) bereaksi dengan senyawa silika ( $\text{SiO}_2$ ) dan alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dari bahan precursor, menghasilkan spesies terlarut seperti  $\text{Si}(\text{OH})_4$  dan  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ . Selanjutnya, oligomer-oligomer ini berinteraksi dan mengalami polikondensasi untuk membentuk jaringan gel N-A-S-H (sodium aluminosilicate hydrate) pada sistem rendah kalsium, atau C-A-S-H (calcium aluminosilicate hydrate) pada sistem dengan kandungan kalsium tinggi (El Fadili dkk., 2025). Berbeda dengan reaksi hidrasi semen Portland yang menghasilkan kalsium hidroksida, mekanisme geopolisasi membentuk

struktur tiga dimensi yang lebih tahan terhadap suhu tinggi dan serangan kimia.

Selain aktivator kimia konvensional, penelitian terbaru juga mengkaji potensi penggunaan aktivator yang berasal dari limbah industri seperti abu kaca, abu biomassa, maupun residu alkali dari proses kimia. Pendekatan ini tidak hanya menurunkan biaya produksi tetapi juga berkontribusi pada pengurangan emisi karbon dan pemanfaatan limbah secara berkelanjutan (Carrillo Beltran dkk., 2025; Mohapatra dkk., 2022). Pemilihan jenis aktivator, konsentrasi larutan, serta kondisi curing yang sesuai sangat mempengaruhi sifat mekanik, porositas, dan ketahanan beton geopolimer. Dengan demikian, pemahaman komprehensif mengenai peran setiap komponen aktivator menjadi kunci utama dalam pengembangan beton geopolimer yang kuat, efisien, dan ramah lingkungan.

#### **Pengaruh Alkali Aktivator Pada Sifat Beton Geopolimer**

Jenis dan komposisi aktivator alkali berperan sangat penting dalam menentukan karakteristik beton geopolimer, terutama dalam hal kekuatan mekanik, workability, dan durabilitas. Secara umum, natrium hidroksida (NaOH) lebih banyak digunakan dibandingkan kalium hidroksida (KOH) karena ketersediaannya yang melimpah dan biaya yang lebih rendah. Namun demikian, KOH diketahui mampu mempercepat laju pelarutan material prekursor seperti fly ash atau slag, sehingga menghasilkan peningkatan kekuatan awal yang lebih cepat. Walau demikian, hasil kekuatan pada umur 28 hari sering kali sebanding atau bahkan lebih tinggi pada sistem berbasis NaOH, khususnya ketika dikombinasikan dengan natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) sebagai sumber silika tambahan (Ulloa dkk., 2024)

Peran penting lain berasal dari penambahan silikat larut seperti  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  atau  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ , yang berfungsi

meningkatkan kandungan silika terlarut dan mempercepat pembentukan gel polimer N–A–S–H (sodium aluminosilicate hydrate). Peningkatan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  terhadap NaOH (SS/SH ratio) umumnya meningkatkan kekuatan tekan hingga titik optimum, karena menghasilkan mikrostruktur yang lebih rapat dan berpori rendah. Namun, jika rasio tersebut terlalu tinggi, viskositas campuran meningkat, workability menurun, dan terbentuk fase sekunder yang dapat memperlemah jaringan gel serta meningkatkan permeabilitas ion seperti klorida (Sasui dkk., 2024). Oleh sebab itu, pengendalian rasio SS/SH bersama total kadar alkali menjadi faktor penting dalam perancangan campuran beton geopolimer yang stabil.

Selain jenis aktivator, konsentrasi alkali atau molaritas larutan hidroksida juga memiliki pengaruh signifikan terhadap performa beton geopolimer. Meningkatnya molaritas NaOH atau KOH mempercepat pelarutan silika dan alumina dari material precursor, mempercepat pembentukan gel dan meningkatkan kekuatan awal. Namun, molaritas yang terlalu tinggi dapat menyebabkan presipitasi terlalu cepat, menghasilkan struktur pori yang tidak homogen, retak susut kimia, dan bahkan menurunkan kekuatan jangka panjang akibat pembentukan mikroretak internal (Ulloa dkk., 2024). Beberapa studi menyimpulkan bahwa rentang molaritas optimal berkisar antara 8–12 M untuk fly ash, tergantung pada rasio air terhadap padatan dan suhu curing.

Dalam hal workability dan waktu ikat (*setting time*), peningkatan rasio silikat atau molaritas aktivator biasanya menyebabkan waktu ikat lebih cepat dan menurunkan kelecakan (*workability*). Kondisi ini menuntut penyesuaian rasio air/padat atau penggunaan bahan tambahan seperti superplasticizer berbasis polikarboksilat yang kompatibel dengan sistem alkali. Selain itu, metode curing juga memiliki pengaruh besar: curing

termal (pada suhu 60–80 °C) terbukti mempercepat reaksi polikondensasi dan meningkatkan kekuatan tekan terutama untuk material precursor berdaya reaktif rendah seperti *fly ash* kelas F. Sebaliknya, curing pada suhu ruang memerlukan waktu lebih lama dan dapat menghasilkan gel yang kurang padat jika sistem aktivator tidak dioptimalkan (Efe dkk., 2024).

Dari aspek durabilitas, komposisi aktivator memengaruhi langsung pembentukan gel N–A–S–H atau C–A–S–H (pada sistem tinggi kalsium), yang menentukan ketahanan terhadap penetrasi ion klorida, sulfat, serta paparan suhu tinggi. Campuran dengan densitas gel tinggi dan porositas rendah menunjukkan ketahanan kimia yang lebih baik dibandingkan beton Portland biasa. Namun, rasio aktivator yang tidak seimbang dapat menyebabkan struktur pori terbuka, meningkatkan permeabilitas, dan menurunkan ketahanan terhadap lingkungan agresif (Alahmari dkk., 2023)

Dalam beberapa tahun terakhir, muncul minat besar terhadap aktivator berbasis limbah (waste-derived activators) yang berasal dari sumber seperti abu kaca, abu biomassa, atau residu alkali industri. Pendekatan ini menawarkan alternatif ramah lingkungan dengan potensi pengurangan biaya dan emisi karbon secara signifikan. Walau hasil awal menunjukkan performa mekanik dan durabilitas yang kompetitif dengan aktivator komersial, variabilitas komposisi limbah menuntut pengendalian mutu dan penyesuaian formulasi agar hasilnya konsisten (Mohapatra dkk., 2022)

Secara keseluruhan, hasil-hasil penelitian terbaru menunjukkan bahwa pemilihan jenis, konsentrasi, dan rasio aktivator merupakan kunci untuk menghasilkan beton geopolimer dengan kombinasi kekuatan, kelecakan, dan ketahanan yang optimal serta mendukung prinsip konstruksi berkelanjutan.

## Tantangan dan Peluang

Meskipun beton geopolimer memiliki potensi besar sebagai material konstruksi ramah lingkungan, implementasinya di lapangan masih dihadapkan pada sejumlah kendala teknis maupun praktis, terutama terkait pemilihan serta penanganan alkali aktivator. Permasalahan utama muncul akibat sifat korosif dan berisiko tinggi dari larutan alkali pekat seperti NaOH dan KOH, yang menimbulkan tantangan keselamatan kerja dan kesulitan operasional pada produksi skala besar (El Alouani dkk., 2024). Selain itu, kebutuhan pengendalian yang ketat terhadap parameter seperti molaritas, rasio silikat terhadap hidroksida, serta kondisi curing membuat proses pembuatan beton geopolimer jauh lebih kompleks dibandingkan dengan beton Portland konvensional. Variasi sifat kimia dan mineralogi bahan precursor seperti abu terbang, slag, maupun metakaolin juga menyulitkan penyusunan standar formulasi aktivator yang seragam untuk berbagai aplikasi (Carrillo Beltran dkk., 2025; Mohapatra dkk., 2022).

Dari segi ekonomi, harga serta ketersediaan natrium silikat komersial masih menjadi faktor pembatas di beberapa wilayah, sehingga turut memengaruhi biaya keseluruhan produksi beton geopolimer. Di sisi lain, perbedaan jenis aktivator menyebabkan variasi perilaku reologi dan waktu ikat, yang berdampak pada kesulitan pengendalian workability di lapangan (Efe dkk., 2024). Tantangan tambahan muncul akibat belum adanya standar teknis internasional yang komprehensif untuk klasifikasi, pengujian, serta kompatibilitas antara jenis aktivator, bahan sumber, dan metode curing (Kolade dkk., 2025). Akibatnya, hasil penelitian dari berbagai studi sering kali sulit dibandingkan secara langsung, yang pada akhirnya menghambat penerapan beton geopolimer di industri konstruksi.

Kendati demikian, peluang pengembangan beton geopolimer tetap terbuka luas sejalan dengan meningkatnya tuntutan terhadap material konstruksi berkelanjutan. Inovasi dalam pemanfaatan aktivator berbasis limbah industri seperti abu kaca, abu biomassa, dan residu alkali hasil proses kimia telah menunjukkan prospek besar dalam menekan biaya sekaligus mengurangi emisi karbon selama proses produksi (Wan dkk., 2025). Selain itu, penggunaan aktivator padat (solid activators) dinilai lebih aman dan efisien dibandingkan larutan alkali cair, karena mempermudah penanganan dan pengangkutan bahan. Kemajuan dalam pemodelan berbasis kecerdasan buatan (AI) dan machine learning juga membuka jalan baru untuk memprediksi performa beton geopolimer berdasarkan variasi komposisi aktivator, sehingga dapat mempercepat perancangan campuran optimum tanpa memerlukan banyak percobaan eksperimental (Matsimbe dkk., 2024).

## KESIMPULAN

Jenis, konsentrasi, dan rasio aktivator alkali memiliki peran penting dalam menentukan kekuatan, mikrostruktur, serta durabilitas beton geopolimer. Kombinasi antara hidroksida (NaOH/KOH) dan silikat alkali ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{K}_2\text{SiO}_3$ ) terbukti meningkatkan densitas gel dan kekuatan tekan hingga titik optimum tertentu. Namun, molaritas yang terlalu tinggi dapat menurunkan kualitas mikrostruktur dan ketahanan jangka panjang. Pemilihan aktivator yang tepat harus disesuaikan dengan jenis precursor seperti abu terbang, slag, atau metakaolin. Inovasi penggunaan aktivator berbasis limbah industri dan aktivator padat menawarkan solusi yang lebih aman, ekonomis, dan ramah lingkungan.

Secara keseluruhan, optimalisasi sistem aktivator alkali menjadi kunci dalam menghasilkan beton geopolimer berkinerja tinggi dan berkelanjutan, serta

berpotensi besar mendukung dekarbonisasi industri konstruksi di masa depan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alahmari, T. S., Abdalla, T. A., & Rihan, M. A. M. (2023). Review of Recent Developments Regarding the Durability Performance of Eco-Friendly Geopolymer Concrete. Dalam *Buildings* (Vol. 13, Nomor 12). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/buildings13123033>
- Carrillo Beltran, R., Picazo Camilo, E., Perea Toledo, G., & Corpas Iglesias, F. A. (2025). Geopolymers Manufactured by the Alkali Activation of Mining and Ceramic Wastes Using a Potential Sustainable Activator from Olive Stone Bottom Ashes. *Materials*, 18(3). <https://doi.org/10.3390/ma18030688>
- Efe, M., Öz, A., Bayrak, B., Kaplan, G., & Aydın, A. C. (2024). Effect of  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  rate and natural zeolite content on basalt fiber reinforced eco-efficient slag-based geopolymer mortar synthesis. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 24(4). <https://doi.org/10.1007/s43452-024-01021-5>
- El Alouani, M., Saufi, H., Aouan, B., Bassam, R., Alehyen, S., Rachdi, Y., El Hadki, H., El Hadki, A., Mabrouki, J., Belaouad, S., Ez-Zaki, H., & Barka, N. (2024). A comprehensive review of synthesis, characterization, and applications of aluminosilicate materials-based geopolymers. *Environmental Advances*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100524>

- El Fadili, H., Ait-Khouia, Y., Ouffa, N., Taha, Y., Moukannaa, S., & Benzaazoua, M. (2025). Comprehensive review on alkaline dissolution of aluminosilicates and its role in the mechanisms and properties of geopolymers and alkali-activated materials. *Case Studies in Construction Materials*, 23, e05330. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05330>
- Joseph Davidovits. (1994). *Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries Davidovits-1*. [www.geopolymer.org](http://www.geopolymer.org)
- Khasawneh, M. A. (2025). Geopolymer concrete in construction projects: a review. *Discover Civil Engineering*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00281-1>
- Kolade, A. S., Ikotun, B. D., Oyejobi, D. O., Aderinto, G. E., & Madirisha, M. M. (2025). Performance Evaluation of Geopolymer Mortars Prepared with Waste Glass Powder-Derived Sodium Silicate Solution. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40996-025-01952-w>
- Lin, J., Zhang, Y., & Yang, Z. (2023). A Review of Recent Advances in Alkali-activated Materials from Silica-rich Wastes Derived Sodium Silicate Activators. Dalam *Journal of Advanced Concrete Technology* (Vol. 21, Nomor 3, hlm. 189–203). Japan Concrete Institute. <https://doi.org/10.3151/JACT.21.189>
- Martínez, A., & Miller, S. A. (2023). A review of drivers for implementing geopolymers in construction: Codes and constructability. Dalam *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 199). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107238>
- Matsimbe, J., Dinka, M., Olukanni, D., & Musonda, I. (2024). Fundamental machine learning algorithms and statistical models applied in strength prediction of geopolymers: a systematic review. Dalam *Discover Applied Sciences* (Vol. 6, Nomor 10). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06244-y>
- Meskhi, B., Beskopylny, A. N., Stel'makh, S. A., Shcherban', E. M., Mailyan, L. R., Shilov, A. A., El'shaeva, D., Shilova, K., Karalar, M., Aksoylu, C., & Özkılıç, Y. O. (2023). Analytical Review of Geopolymer Concrete: Retrospective and Current Issues. Dalam *Materials* (Vol. 16, Nomor 10). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ma16103792>
- Mohapatra, S. S., Mishra, J., Nanda, B., & Patro, S. K. (2022). A review on waste-derived alkali activators for preparation of geopolymer composite. *Materials Today: Proceedings*, 56, 440–446. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.400>
- Ramadhany, A., Herwani, H., & Faisal, F. (2025). Impact of Activator Ratio on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Jurnal Teknik Sipil*, 25(1), 1784–1793. <https://doi.org/10.26418/jts.v25i1.88511>
- Remigildus Cornelis, & Iwan Rustendi. (2020). REVIEW DURABILITY BETON GEOPOLYMER BERBASIS FLY ASH. *TEODOLITA*, 21.
- Sasui, S., Kim, G., Nam, J., Koyama, T., & Chansomsak, S. (2020). Strength and microstructure of class-C fly ash and GGBS blend geopolymer activated in NaOH & NaOH + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. *Materials*, 13(1).

<https://doi.org/10.3390/ma13010059>

- Sasui, S., Kim, G., van Riessen, A., Lim, C., Eu, H., Park, J., & Nam, J. (2024). Effects of Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH ratio in alkali activator on the microstructure, strength and chloride ingress in fly ash and GGBS based alkali activated concrete. *Journal of Building Engineering*, 98. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111255>
- Ulloa, N., Onyelowe, K. C., Ebid, A. M., Curay Yaulema, C. S., Zuiga Rodriguez, M. G., Adrade Vally, A. I., & Onyia, M. E. (2024). Influence of alkali molarity on compressive strength of high-strength geopolymer concrete using machine learning techniques based on curing regimes and temperature. *Frontiers in Built Environment*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1455915>
- Wan, X., Ren, L., Lv, T., Wang, D., & Wang, B. (2025). Research on Alkali-Activated Systems Based on Solid Waste-Derived Activators: A Review. Dalam *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 17, Nomor 1). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su17010254>
- Zerfu, K., & Ekaputri, J. J. (2016). Review on alkali-activated fly ash based geopolymer concrete. *Materials Science Forum*, 841, 162–169. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.841.162>