

## Efek Pengempaan Pada Proses Pembuatan Bata Ringan Geopolimer

Julham Adingku<sup>1)</sup>, Mufti Amir Sultan<sup>2)</sup>, Kusnadi<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Khairun

<sup>2,3)</sup>Program Studi Teknik Sipil Universitas Khairun

Email: [adingkuljulham@gmail.com](mailto:adingkuljulham@gmail.com)<sup>1)</sup>, [muftiasltn@unkhair.ac.id](mailto:muftiasltn@unkhair.ac.id)<sup>2)</sup>  
[kusnadi.0506@gmail.com](mailto:kusnadi.0506@gmail.com)<sup>3)</sup>

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v14i2.1151>

(Received: 14 July 2024 / Revised: 15 August 2024 / Accepted: 06 September 2024)

### Abstrak

Pasir batu apung sebagai bahan baku pembuatan bata ringan dengan menggunakan geopolimer sebagai pengikat menggantikan semen. Geopolimer terbentuk dari bahan baku yang banyak mengandung unsur silika dan alumina. Penelitian ini menggunakan perbandingan volume agregat pengisi berupa pasir batu apung sebesar 50% dan binder 50%. Binder terdiri atas 55% fly ash dan 45% aktivator, di mana aktivator merupakan campuran dari  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dan larutan NaOH 10M dengan perbandingan 1:1. Proses produksi bata dengan pengempaan bervariasi 3,3 MPa, 6,7 MPa, 10,0 MPa, dan 13,3 MPa. Benda uji kontrol tidak dilakukan pengempaan. Untuk mempercepat proses polimerisasi badan uji dipanaskan dengan menggunakan oven pada suhu  $80^\circ\text{C}$  selama 8 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi pengempaan yang diberikan pada proses produksi bata cenderung meningkatkan kuat tekan dan berbanding terbalik dengan penyerapan air. Pada pengempaan 10,0 MPa dan 13,30 MPa masing-masing menghasilkan mutu bata III dan IV.

Kata kunci: *pasir batu apung, bata ringan, geopolimer, mutu bata*

### Abstract

Pumice sand as a raw material for making lightweight bricks using geopolymer as a binder to replace cement. Geopolymers are formed from raw materials that contain lots of silica and alumina elements. This research uses a volume ratio of aggregate filler in the form of pumice sand at 50% and binder at 50%. The binder consists of 55% fly ash and 45% activator, where the activator is a mixture of  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  and 10M NaOH solution in a ratio of 1:1. The brick production process with compression varies from 3.3 MPa, 6.7 MPa, 10.0 MPa, and 13.3 MPa. The control test specimen was not pressed. To speed up the polymerization process, the test bed was heated using an oven at  $80^\circ\text{C}$  for 8 hours. The research results show that the higher the compression given in the brick production process tends to increase the compressive strength and this is inversely proportional to water absorption. At 10.0 MPa and 13.30 MPa compression, they produce brick grades III and IV respectively.

Keywords: *pumice sand, light brick, geopolymer, brick quality*

## 1. Latar Belakang

Batu bata merupakan jenis konstruksi yang digunakan sebagai pemisah antara ruangan pada sebuah bangunan. Bangunan pada umumnya menggunakan batu bata sekitar 25% dari keseluruhan bahan bangunan (Gawatre and Vairagade, 2014). Batu bata awalnya terbuat dari tanah liat, namun seiring dengan perkembangan muncul bata semen atau bata beton. Jenis bata ini umumnya digunakan oleh masyarakat Maluku Utara sebagai material dinding, dalam bahasa lokal dinamakan batu tela (Kabir, Imran and Sultan, 2018). Bata beton atau bata semen memberikan kesan pertama yang kuat. Bata beton atau bata semen memiliki lebih banyak manfaat dibandingkan kualitas visualnya yang mencolok. Bata ini meredam kebisingan luar, memberikan perlindungan dari kebisingan lalu lintas, pesawat terbang dan berbagai gangguan lainnya. Perlindungan terhadap kebakaran adalah manfaat lain seperti halnya pengurangan pemeliharaan. Terakhir, dinding bata beton dapat meningkatkan kualitas massa termal dinding eksterior. Bata semen terbuat dari agregat halus, semen dan air. Bata semen umumnya mempunyai bobot yang lebih berat dari batu bata tanah liat, untuk mereduksi berat tersebut maka digunakan pasir batu apung yang banyak tersebar di Indonesia termasuk Maluku Utara sebagai pengganti pasir (Ishak, Sultan and Yudasaputra, 2020).

Semen portland adalah bahan yang paling banyak digunakan dalam konstruksi sebagai bahan pengikat utama untuk pembuatan beton dan mortar (Khan, Lao and Dai, 2022; Li *et al.*, 2022), dengan tingkat konsumsi tahunan di seluruh dunia melebihi 30 miliar ton (Alhawat *et al.*, 2022). Proses produksi semen portland menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> yang berdampak serius terhadap lingkungan serta penyumbang pemanasan global (Khan and Ali, 2019; Wilberforce *et al.*, 2019). Industri konstruksi memberikan dampak besar terhadap lingkungan, menyumbang sebagian besar emisi CO<sub>2</sub>. Setiap ton semen yang diproduksi mengeluarkan sekitar 0,8 ton CO<sub>2</sub> (Kumar and Prasad, 2019; Meng *et al.*, 2019), dan secara signifikan produksi semen meningkat secara global karena meningkatnya kebutuhan beton (Khan *et al.*, 2021).

Dibutuhkan sekitar 1,5 ton bahan mentah untuk membuat satu ton semen portland (PC), yang menghasilkan sekitar 0,55 ton karbon dioksida secara langsung, sedangkan pembakaran bahan bakar menghasilkan sekitar 0,4 ton karbon dioksida, dengan total 0,8–1,0 ton karbon dioksida (Wei and Cen, 2019). Industri semen mengkonsumsi bahan bakar fosil dalam jumlah besar, yang menyumbang sekitar 12–15% energi industri (Thwe, Khatiwada and Gasparatos, 2021).

Di seluruh dunia, produksi PC diperkirakan menyebabkan sekitar 1.350 juta ton gas rumah kaca setiap tahunnya, yang menyumbang 6–9% emisi gas rumah kaca dunia (Mohamad *et al.*, 2021). Emisi ini terutama disebabkan oleh pembakaran bahan bakar di boiler, konsumsi energi listrik, dan dekarbonasi batu kapur (Sousa and Bogas, 2021). Karena proses produksi PC menyumbang emisi gas rumah kaca terbesar dari produksi beton, maka penting untuk mengembangkan berbagai strategi mitigasi (Miller and Moore, 2020). Pendekatan alternatif yang paling banyak diadopsi adalah mengganti PC dalam beton dengan bahan tambahan semen seperti *fly ash* (FA), *silika fume* (SF), abu sekam padi (ASP), abu ampas tebu, dan terak tanur (Siddique, 2011).

Selama tiga dekade terakhir, meningkatnya kesadaran akan kesulitan ekologi yang terkait dengan produksi beton konvensional telah mendorong para peneliti dan

sektor bangunan untuk mencari teknik alternatif untuk menghasilkan bahan ramah lingkungan (Amran, Debbarma and Ozbakkaloglu, 2021). Reaksi aluminosilikat padat dengan alkali hidroksida atau larutan silikat menghasilkan alkali aluminosilikat yang secara umum disebut 'geopolimer' (Davidovits, 1994), lebih tepat disebut sebagai disebut 'polimer anorganik' (Costello *et al.*, 1974). Bahan-bahan ini bisa memberikan kinerja yang sebanding dengan semen tradisional sebagai bahan, tetapi dengan keuntungan tambahan dari berkurangnya emisi rumah kaca secara signifikan (Gartner, 2004).

Karena geopolimer merupakan teknologi yang relatif baru, maka geopolimer tidak memiliki pedoman desain dibandingkan dengan beton konvensional; dengan demikian, studi lebih lanjut dan pengujian eksperimental diperlukan untuk mengurangi kesenjangan dalam aplikasi geopolimer (Billong, Oti and Kinuthia, 2021).

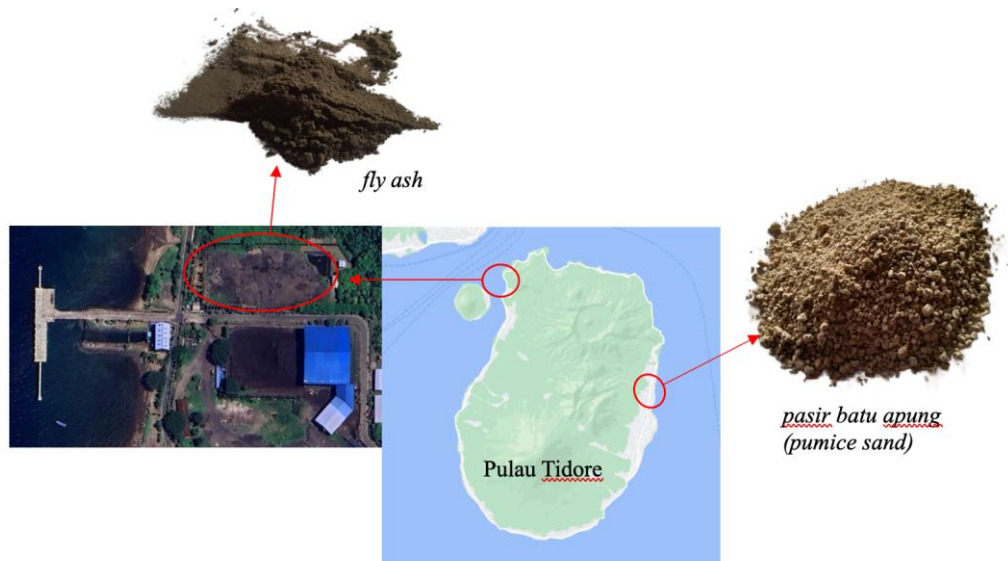
Karena geopolimer membutuhkan bahan mentah dengan konsentrasi aluminosilikat yang lebih tinggi dibandingkan bahan limbah, penggunaan kembali jenis bahan tersebut untuk memproduksi geopolimer akan mengurangi pencemaran lingkungan (McLellan *et al.*, 2011; Reddy, Dinakar and Rao, 2018).

Penelitian telah menunjukkan bahwa meskipun abu limbah industri dimanfaatkan kembali untuk memproduksi geopolimer pada suhu kamar, jumlah gas rumah kaca yang dilepaskan ke lingkungan dapat diturunkan sebesar 26–80% dibandingkan dengan semen Portland (Van Deventer *et al.*, 2010). Turner dan Collins menunjukkan bahwa emisi CO<sub>2</sub> beton geopolimer 9% lebih rendah dibandingkan beton berbasis PC (Turner and Collins, 2013).

Disisi lain berkembang industri energi di Maluku Utara salah satunya PLTU Rum Tidore. PLTU ini mulai beroperasi tahun 2017, dalam pengoperasiannya menggunakan batu bara sebagai sumber energi. Salah satu limbah yang dihasilkan dari proses ini adalah abu terbang atau *fly ash*. Limbah ini tidak dapat diolah untuk dikembalikan ke proses awalnya sehingga ditumpuk pada areal terbuka, sehingga dapat berakibat buruk terhadap lingkungan (Sultan, Kusnadi and Adingku, 2022). Pada penelitian ini digunakan pasir batu apung sebagai pengganti agregat halus dan limbah *fly ash* sebagai bahan baku pembentuk geopolimer yang akan dijadikan bahan pengikat bata ringan tersebut. Dalam proses pembuatannya akan diberi tekanan, karena pemberian tekanan dapat meningkatkan bata ringan yang dihasilkan (Sultan, Kusnadi and Yudasaputra, 2018).

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen, pengambilan data dilakukan di laboratorium. Benda uji bata ringan geopolimer menggunakan komposisi binder dengan perbandingan aktivator dan *fly ash* sebesar 45%:55%. Komposisi aktivator NaOH berbanding Na<sub>2</sub>SiO<sub>2</sub> adalah 1:1 dengan larutan NaOH 10M. Pemanasan benda uji dengan menggunakan oven pada suhu 80°C dengan durasi 8 jam. Campuran bata ringan geopolimer terdiri atas agregat pasir batu apung 50% dan binder 50% pada perbandingan volume. Untuk mengetahui kualitas bata ringan geopolimer yang dihasilkan maka dilakukan uji kuat tekan dan penyerapan. Lokasi pengambilan pasir batu apung dan *fly ash* ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1 Lokasi pengambilan material pasir batu apung dan *fly ash*

Proses pembuatan bata ringan geopolimer dengan beberapa tahapan sebagai berikut:

- 1) Membuat larutan NaOH 10M, NaOH dalam bentuk serpihan sehingga untuk memperoleh larutan NaOH 10M maka dicampur dengan air dengan perbandingan tertentu. Dalam proses pembuatan larutan NaOH 10M menghasilkan panas maka larutan dihasilkan didiamkan selama 24 jam agar suhu turun dan siap digunakan.
- 2) Setelah larutan NaOH siap digunakan, kemudian dilanjutkan dengan membuat larutan alkali aktivator, larutan NaOH dicampur dengan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dengan perbandingan 1:1.
- 3) Masukkan agregat pasir batu apung dan *fly ash* ke dalam mesin pengaduk sampai campuran merata.
- 4) Masukkan alkali aktivator sedikit demi sedikit hingga adukan merata kurang lebih 5 menit.
- 5) Masukkan adukan ke dalam cetakan, pada saat pencetakan diberi beban atau pengempaan sesuai rencana seperti ditunjukkan pada tabel 1.
- 6) Diamkan campuran selama 24 jam hingga campuran mengeras.
- 7) Lepas benda uji dari cetakan lalu masukkan ke dalam oven, selanjutnya dilakukan pemanasan pada suhu  $80^\circ\text{C}$  dengan durasi 8 jam.
- 8) Keluarkan benda uji dari oven lalu diamkan sampai dingin selanjutnya dilakukan pengujian kuat tekan dan penyerapan.

Tabel 1 Variasi pembebanan pada benda uji

No	Kode Benda Uji	Pengempaan (MPa)	Jumlah Benda Uji (buah)
1.	Mr-0	0,00	9
2.	Mr-1	3,30	9
3.	Mr-2	6,70	9

4.	Mr-3	10,0	9
5.	Mr-4	13,3	9

Mutu bata diklasifikasikan sesuai dengan SNI, adapun untuk klasifikasi bata beton untuk pasangan dinding terbagi menjadi 4 tingkatan mutu dari tingkat mutu I sampai IV seperti diuraikan pada tabel 2.

Tabel 2 Syarat fisis bata beton

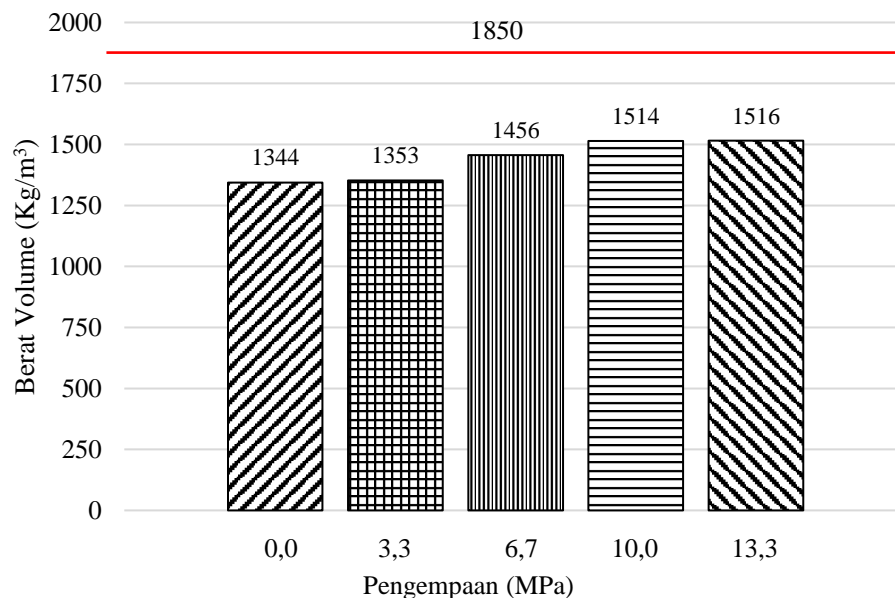
Syarat Fisis	Satuan	Tingkat mutu bata beton pejal				Tingkat mutu bata beton berongga			
		I	II	II	IV	I	II	III	IV
Kuat tekan bruto rata-rata min	kg/cm <sup>2</sup>	100	70	40	25	70	50	35	25
Kuat tekan bruto masing-masing benda uji	kg/cm <sup>2</sup>	90	65	35	21	65	45	30	17
Penyerapan air rata-rata, maks	%	25	35	-	-	25	35	-	-

Sumber: (SNI 0349, 1989)

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Berat Volume Bata Geopolimer

Hubungan antara berat volume bata dengan pengempaan dalam proses produksi seperti ditunjukkan pada gambar 2.

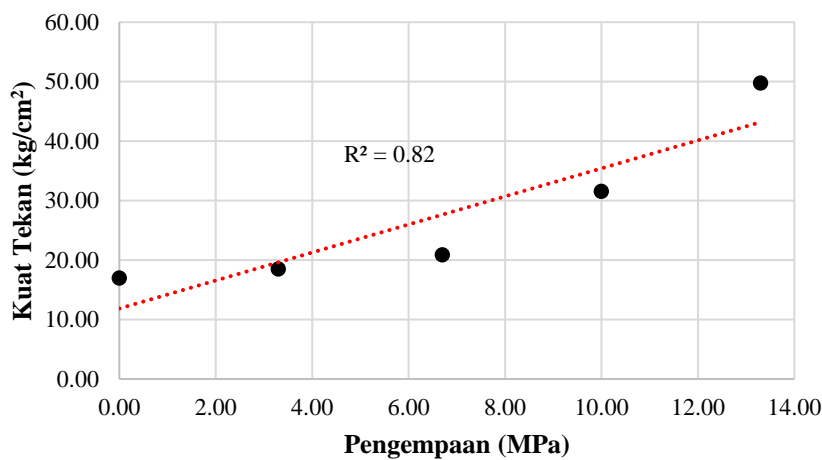


Gambar 2 Hubungan berat volume bata dengan pengempaan

Berdasarkan gambar 2 menunjukkan kecenderungan peningkatan berat volume bata yang dihasilkan, namun bata yang dihasilkan masih lebih rendah dari  $1850 \text{ kg/m}^3$  sehingga termasuk bata beton ringan. Pengempaan atau kompresi mengurangi jumlah ruang antar partikel dan menurunkan volume keseluruhan materi, sehingga meningkatkan kepadatan partikel, meningkatkan massa dan berat keseluruhan (Padilla *et al.*, 2015).

### 3.2 Kuat Tekan Bata Geopolimer

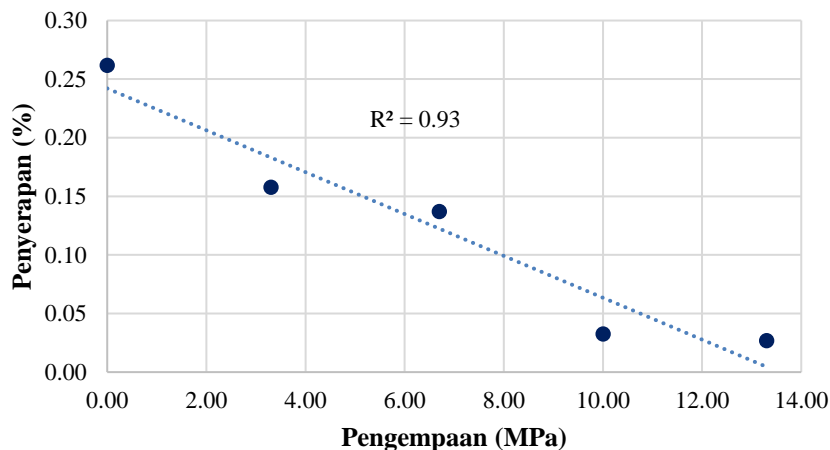
Hasil uji kuat tekan bata geopolimer menunjukkan bahwa pengempaan pada saat pencetakan akan mempengaruhi kuat tekan. Gambar 3 menunjukkan hubungan antara pengempaan dan kuat tekan bata geopolimer secara keseluruhan; bata geopolimer yang dipadatkan secara manual memiliki kuat tekan yang lebih rendah daripada bata geopolimer yang dipadatkan dengan pengempaan saat pencetakan.



Gambar 3 Hubungan kuat tekan dengan pengempaan

### 3.3 Penyerapan Bata Geopolimer

Grafik hubungan antara pengempaan dengan serapan air bata geopolimer dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Hubungan penyerapan dengan pengempaan

Hasil pengujian serapan air bata geopolimer menunjukkan bahwa gaya pengempaan yang lebih besar menyebabkan serapan air bata geopolimer yang lebih kecil. Ini menunjukkan bahwa pemadatan yang dilakukan dengan tekanan yang tepat selama proses pencetakan menghasilkan bata geopolimer dengan nilai serapan air yang rendah, yang membuat bata geopolimer cukup tahan terhadap rembesan air.

### 3.4 Mutu Bata Geopolimer

Mutu bata yang dihasilkan berdasarkan kuat tekan dan penyerapan sesuai SNI ditampilkan pada tabel 3.

Tabel 3 Hasil syarat fisis bata

Pengempaan (MPa)	Kuat Tekan (kg/cm <sup>2</sup> )	Penyerapan (%)	Tingkat Mutu Bata
0,00	17,00	26,17	-
3,30	18,50	15,76	-
6,70	20,89	13,69	-
10,0	31,56	3,26	IV
13,3	49,78	2,67	III

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel 3 maka bata ringan geopolimer yang dihasilkan pada pengempaan 13,3 MPa termasuk mutu kelas III, di mana bata dapat digunakan untuk konstruksi yang tidak memikul beban dan terlindungi. Pengempaan 10,0 MPa menghasilkan bata kelas mutu IV, bata dapat digunakan untuk konstruksi yang tidak memikul beban dan terlindung dari cuaca luar.

## 4. Kesimpulan dan Saran

### 4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis maka dapat disimpulkan bahwa dengan pengempaan pada proses produksi bata berbahan dasar pasir batu apung dengan pengikat geopolimer dapat meningkatkan mutu bata ringan yang dihasilkan. Pada pengempaan 13,30 MPa menghasilkan bata ringan geopolimer pada kelas mutu III dan pada pengempaan 10,00 menghasilkan kelas mutu IV sesuai dengan SNI 0349.

### 4.2 Saran

Berdasarkan hasil analisis maka dapat disarankan untuk penelitian selanjutnya dengan memvariasikan perbandingan antara pasir batu apung dengan binder serta memvariasikan perbandingan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dengan NaOH.

## Ucapan Terima Kasih

Tim peneliti mengucapkan terima kasih ke Direktur Riset, Teknologi dan Pengabdian Kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Kementerian Pendidikan, Kebudayaan Riset dan Teknologi yang telah membiayai penelitian ini melalui hibah PPS-PTM tahun 2024.

### Daftar Kepustakaan

- Alhawat, M. *et al.* (2022) 'Properties of Geopolymers Sourced from Construction and Demolition Waste: A Review', *Journal of Building Engineering*, 50, pp. 1–26. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104104>.
- Amran, M., Debbarma, S. and Ozbakkaloglu, T. (2021) 'Fly Ash-Based Eco-Friendly Geopolymer Concrete: A Critical Review of The Long-Term Durability Properties', *Construction and Building Materials*, 270. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121857>.
- Billong, N., Oti, J. and Kinuthia, J. (2021) 'Using Silica Fume Based Activator in Sustainable Geopolymer Binder for Building Application', *Construction and Building Materials*, 275, pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122177>.
- Costello, A.J.R. *et al.* (1974) 'Structure and Properties of the Condensed Phosphates. XVIII Ring-Chain and Other Equilibria in Organic Solvents', *Inorganic Chemistry*, 13(5), pp. 1226–1230.
- Davidovits, J. (1994) 'Properties of Geopolymer Cements', in *Alkaline Cements and Concretes*, KIEV Ukraine, pp. 1–20. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/284651826>.
- Van Deventer, J.S.J. *et al.* (2010) 'Chemical Research and Climate Change as Drivers in the Commercial Adoption of Alkali Activated Materials', *Waste and Biomass Valorization*, 1(1), pp. 145–155. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12649-010-9015-9>.
- Gartner, E. (2004) 'Industrially Interesting Approaches to "Low-CO<sub>2</sub>" Cements', *Cement and Concrete Research*, 34(9), pp. 1489–1498. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>.
- Gawatre, D.W. and Vairagade, L.N. (2014) 'Strength Characteristics of Different Types of Bricks', *International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN*, 3(10), pp. 2247–2252. Available at: [www.ijsr.net](http://www.ijsr.net).
- Ishak, M., Sultan, M.A. and Yudasaputra, M.T. (2020) 'Kuat Tekan dan Kuat Lekat Pasangan Bata Semen Pasir Apung', *Clapeyron: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 1(2), pp. 66–73.
- Kabir, D., Imran, I. and Sultan, M.A. (2018) 'Penggunaan Fly Ash Sebagai Bahan Tambah pada Proses Pembuatan Mortar Dengan Bahan Dasar Pasir Apung', *Techno*, 7(2), pp. 157–164.
- Khan, M. *et al.* (2021) 'Efficiency of Basalt Fiber Length and Content on Mechanical and Microstructural Properties of Hybrid Fiber Concrete', *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 44(8), pp. 2135–2152. Available at: <https://doi.org/10.1111/ffe.13483>.
- Khan, M. and Ali, M. (2019) 'Improvement in Concrete Behavior with Fly Ash, Silica-Fume and Coconut Fibres', *Construction and Building Materials*, 203, pp. 174–187. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.103>.
- Khan, M., Lao, J. and Dai, J.-G. (2022) 'Comparative Study of Advanced Computational Techniques for Estimating the Compressive Strength of UHPC', *Journal of Asian Concrete Federation*, 8(1), pp. 51–68. Available at: <https://doi.org/10.18702/acf.2022.6.8.1.51>.



- Kumar, V.V.P. and Prasad, D.R. (2019) 'Influence of Supplementary Cementitious Materials on Strength and Durability Characteristics of Concrete', *Advances in Concrete Construction*, 7(2), pp. 75–85. Available at: <https://doi.org/10.12989/acc.2019.7.2.075>.
- Li, G. *et al.* (2022) 'Fly Ash Application as Supplementary Cementitious Material: A Review', *Materials*, 15(7), pp. 1–23. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma15072664>.
- McLellan, B.C. *et al.* (2011) 'Costs and Carbon Emissions for Geopolymer Pastes in Comparison to Ordinary Portland Cement', *Journal of Cleaner Production*, 19(9–10), pp. 1080–1090. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>.
- Meng, Y. *et al.* (2019) 'Enhancement of High Temperature Performance of Cement Blocks Via CO<sub>2</sub> Curing', *Science of the Total Environment*, 671, pp. 827–837. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.411>.
- Miller, S.A. and Moore, F.C. (2020) 'Climate and Health Damages From Global Concrete Production', *Nature Climate Change*, 10, pp. 439–443.
- Mohamad, N. *et al.* (2021) 'Environmental Impact of Cement Production and Solutions: A Review', in *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd, pp. 741–746. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.212>.
- Reddy, M.S., Dinakar, P. and Rao, B.H. (2018) 'Mix Design Development of Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag Based Geopolymer Concrete', *Journal of Building Engineering*, 20, pp. 712–722. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.09.010>.
- Siddique, R. (2011) 'Utilization of Silica Fume in Concrete: Review of Hardened Properties', *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), pp. 923–932. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.012>.
- SNI 0349 (1989) *Bata Beton Untuk Pasangan Dinding*. Badan Standardisasi Nasional Indonesia.
- Sousa, V. and Bogas, J.A. (2021) 'Comparison of Energy Consumption and Carbon Emissions from Clinker and Recycled Cement Production', *Journal of Cleaner Production*, 306, pp. 1–13. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127277>.
- Sultan, M.A., Kusnadi, K. and Adingku, J. (2022) 'Determination of Geopolymer Mortar Characterization Using Fly Ash and Pumice Sand', *International Journal of GEOMATE*, 23(100). Available at: <https://doi.org/10.21660/2022.100.3630>.
- Sultan, M.A., Kusnadi, K. and Yudasaputra, M.T. (2018) 'Effect of Pressure on Making of Cement Bricks From Pumice', *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 9(5), pp. 1084–1091. Available at: <http://www.iaeme.com/IJCIET/index.asp1084http://www.iaeme.com/ijciet/issues.asp?JType=IJCIET&VType=9&IType=5http://www.iaeme.com/ijciet/issues.asp?JType=IJCIET&VType=9&IType=5http://www.iaeme.com/IJCIET/index.asp1085>.
- Thwe, E., Khatiwada, D. and Gasparatos, A. (2021) 'Life Cycle Assessment of A Cement Plant in Naypyitaw, Myanmar', *Cleaner Environmental Systems*, 2, pp. 1–9. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2020.100007>.

- Turner, L.K. and Collins, F.G. (2013) ‘Carbon Dioxide Equivalent (CO<sub>2</sub>-e) Emissions: A Comparison Between Geopolymer and OPC Cement Concrete’, *Construction and Building Materials*, 43, pp. 125–130. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>.
- Wei, J. and Cen, K. (2019) ‘Empirical Assessing Cement CO<sub>2</sub> Emissions Based on China’s Economic And Social Development During 2001–2030’, *Science of the Total Environment*, 653, pp. 200–211. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.371>.
- Wilberforce, T. *et al.* (2019) ‘Outlook of Carbon Capture Technology and Challenges’, *Science of the Total Environment*, 657, pp. 56–72. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.424>.