

Beton Berkelanjutan Berbasis GGBS dan Abu Limbah: Tinjauan Literatur atas Aspek Kinerja dan Ketahanan Material

Fasikhullisan¹, Muhammad Ismail Hasan²

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung
Jalan Raya Kaligawe Km 4, Terboyo Kulon, Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah 50112

²Jurusan Sipil dan Perencanaan, Fakultas Vokasi, Universitas Diponegoro
Jl. Gubernur Mochtar, Tembalang, Kec. Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah 50275
Email: fasikhullisan@std.unissula.ac.id

Abstrak

Penggunaan beton berkelanjutan menjadi salah satu upaya penting dalam mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi, terutama akibat tingginya konsumsi semen Portland. Salah satu alternatif yang banyak dikembangkan adalah pemanfaatan ground granulated blast furnace slag (GGBS) dan abu limbah sebagai bahan pengganti sebagian semen. Artikel ini bertujuan untuk meninjau berbagai penelitian terkait beton berkelanjutan berbasis GGBS dan abu limbah, khususnya dari aspek kinerja mekanik dan ketahanan material. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Systematic Literature Review (SLR) terhadap artikel jurnal internasional yang diterbitkan pada rentang tahun 2020–2025. Proses penelusuran literatur dilakukan melalui basis data Scopus dengan kata kunci yang berkaitan dengan beton berkelanjutan, GGBS, abu limbah, kinerja, dan durabilitas beton. Hasil kajian menunjukkan bahwa penggunaan GGBS dan abu limbah secara umum mampu meningkatkan kuat tekan, memperbaiki ketahanan terhadap lingkungan agresif, serta mengurangi penetrasi klorida dan serangan sulfat. Selain itu, pemanfaatan material limbah ini juga memberikan kontribusi positif terhadap pengurangan emisi karbon dan pemanfaatan limbah industri. Dengan demikian, beton berbasis GGBS dan abu limbah memiliki potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai material konstruksi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Kata kunci: beton berkelanjutan, GGBS, abu limbah, kinerja beton, ketahanan material

Pendahuluan

Industri konstruksi memiliki peran yang sangat besar dalam mendukung pembangunan infrastruktur, namun di sisi lain juga menjadi salah satu penyumbang emisi karbon dan konsumsi sumber daya alam terbesar di dunia. Penggunaan semen Portland sebagai bahan utama beton berkontribusi signifikan terhadap emisi CO₂ global akibat proses produksi yang intensif energi. Kondisi ini mendorong berkembangnya penelitian terkait beton berkelanjutan yang bertujuan untuk menekan dampak lingkungan tanpa mengurangi kinerja struktural dan umur layan material.

Salah satu strategi yang banyak dikembangkan adalah pemanfaatan material limbah industri sebagai bahan pengganti sebagian atau seluruh semen, di antaranya *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBS) dan berbagai jenis abu limbah seperti *fly ash*, *rice husk ash*, dan abu biomassa lainnya. GGBS merupakan produk samping industri baja yang memiliki sifat hidrolis laten dan pozzolanik, sehingga mampu berkontribusi terhadap pembentukan produk hidrasi yang lebih padat dan stabil. Sementara itu, abu limbah umumnya kaya akan silika dan alumina yang berperan penting dalam reaksi pozzolanik pada sistem beton konvensional maupun beton geopolimer.

Berbagai studi menunjukkan bahwa penggunaan GGBS dan abu limbah dapat meningkatkan kinerja mekanik beton, seperti kuat tekan dan kuat tarik belah, sekaligus memperbaiki sifat durabilitas, termasuk ketahanan terhadap penetrasi ion klorida, serangan sulfat, karbonasi, dan permeabilitas air. Selain itu, beton berbasis material limbah juga dinilai lebih ramah lingkungan karena mampu menurunkan konsumsi semen dan memanfaatkan produk samping industri yang sebelumnya berpotensi menjadi beban lingkungan. Namun demikian, hasil penelitian yang dilaporkan dalam literatur menunjukkan variasi yang cukup signifikan, bergantung pada proporsi campuran, karakteristik material limbah, metode aktivasi, serta kondisi perawatan beton.

Seiring dengan meningkatnya perhatian terhadap pembangunan berkelanjutan, kajian yang bersifat komprehensif terhadap pemanfaatan GGBS dan abu limbah dalam beton menjadi sangat penting. Tinjauan literatur diperlukan untuk merangkum perkembangan penelitian terkini, mengidentifikasi kecenderungan hasil penelitian, serta menyoroti tantangan dan peluang pengembangan beton berkelanjutan di masa mendatang. Oleh karena itu, artikel ini disusun sebagai tinjauan literatur yang membahas secara sistematis aspek kinerja mekanik dan ketahanan material beton

berkelanjutan berbasis GGBS dan abu limbah, dengan harapan dapat menjadi referensi bagi peneliti dan praktisi dalam pengembangan material konstruksi ramah lingkungan.

Literature Review

Beton berkelanjutan dikembangkan untuk mengurangi dampak lingkungan akibat penggunaan semen Portland. Berbagai studi menunjukkan bahwa pemanfaatan *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBS) dan abu limbah sebagai bahan pengganti semen mampu meningkatkan kinerja beton dan memperbaiki ketahanan material melalui struktur pori yang lebih padat (Shi et al., 2011; Juang & Kuo, 2023). Selain itu, beton berbasis GGBS dan abu limbah memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap penetrasi ion dan serangan kimia, sehingga berpotensi digunakan sebagai material konstruksi ramah lingkungan (Thomas & Bamforth, 1999; Nayak et al., 2022).

Beton Berkelanjutan

Beton berkelanjutan dikembangkan untuk menekan dampak lingkungan dari penggunaan semen Portland yang menghasilkan emisi CO₂ tinggi. Pendekatan utama yang digunakan adalah pengurangan kandungan semen melalui substitusi material ramah lingkungan tanpa menurunkan kinerja struktural beton. Literatur menyebutkan bahwa penggunaan material alternatif mampu menurunkan jejak karbon sekaligus menjaga performa beton dalam jangka panjang.

GGBS dalam Beton

Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) merupakan produk samping industri baja yang memiliki sifat hidrolik laten. Dalam campuran beton, GGBS berperan dalam pembentukan gel C–S–H tambahan yang memperbaiki mikrostruktur dan meningkatkan kuat tekan, khususnya pada umur beton lanjut. Selain itu, GGBS diketahui mampu menurunkan panas hidrasi dan meningkatkan ketahanan beton terhadap lingkungan agresif.

Abu Limbah sebagai Bahan Pozzolan

Abu limbah seperti *fly ash* dan *rice husk ash* banyak diteliti sebagai bahan pozzolanik karena kandungan silika dan alumina yang tinggi. Reaksi pozzolanik antara abu limbah dan kalsium hidroksida menghasilkan produk ikatan tambahan yang meningkatkan kekuatan beton dan menurunkan porositas. Selain meningkatkan performa teknis, pemanfaatan abu limbah juga membantu mengurangi volume limbah industri.

GGBS dan Abu Limbah terhadap Kinerja Mekanik

Beberapa penelitian melaporkan bahwa kombinasi GGBS dan abu limbah dalam beton mampu meningkatkan kuat tekan dan kuat tarik belah dibandingkan beton konvensional. Peningkatan ini terutama terlihat pada umur beton menengah hingga panjang, seiring berjalannya reaksi hidrolik dan pozzolanik yang lebih lambat namun berkelanjutan.

Beton Berbasis Material Limbah

Dari aspek durabilitas, beton dengan GGBS dan abu limbah menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap penetrasi ion klorida, serangan sulfat, dan lingkungan agresif lainnya. Hal ini disebabkan oleh struktur pori yang lebih rapat dan berkurangnya kandungan kalsium hidroksida bebas dalam matriks beton, sehingga memperpanjang umur layan struktur.

Research Methods

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode **Systematic Literature Review (SLR)** untuk menyajikan analisis yang objektif dan terstruktur terkait beton berkelanjutan berbasis *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBS) dan abu limbah. Pendekatan yang digunakan bersifat kualitatif dengan tujuan mengkaji secara komprehensif perkembangan pemanfaatan material tersebut terhadap kinerja mekanik dan ketahanan material beton.

Proses penelusuran literatur dilakukan melalui beberapa basis data ilmiah, yaitu **Elsevier Scopus**. Basis data tersebut dipilih karena menyediakan artikel jurnal internasional bereputasi dan relevan dengan topik penelitian. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian meliputi: **GGBS ditemukan 4837 dokumen di filter dengan menggunakan tahun antara 2020-2025 ditemukan 3318 dokumen . Selanjutnya difilter menggunakan subject area checklist bagian engineering, material sciences, dan environmental sciences ditemukan 3014 dokumen. Difilter dengan dokumen tipe dan menchecklist beberapa artikel, conferences paper, confernces review dihasilkan 2907 dokumen, selanjutnya difilter dengan menggunakan Bahasa Inggris ditemukan 2840 dokumen dan menggunakan filter keywords dengan menchecklist Grand Granulated Blast Furnace Slag ditemukan 1238 difilter berdasarkan negara yang berada di Asia Tenggara dan dipilih negara Malaysia ditemukan 53 dokumen.**

Result dan Discussion

Berdasarkan hasil penelusuran artikel dan jurnal yang diperoleh, terdapat **53 (lima puluh tiga) referensi** yang judulnya sesuai dengan kata kunci pencarian yang telah ditetapkan. Dari total 53 artikel tersebut, **seluruh artikel**

menggunakan bahasa Inggris dan berasal dari jurnal internasional bereputasi. Selanjutnya dilakukan proses penyaringan berdasarkan kesesuaian topik, jenis artikel, serta rentang tahun publikasi.

No.	Author	Year	Title	Journal
1	Salman, A.M. et al.	2023	Mechanical and durability properties of geopolymer concrete incorporating waste materials	Construction and Building Materials
2	Salman, A.M. et al.	2024	Durability performance of sustainable geopolymer concrete with industrial by-products	Journal of Cleaner Production
3	Yi, T.Y. et al.	2022	Performance evaluation of geopolymer concrete using industrial waste materials	Materials Today: Proceedings
4	Mohd Nasir, N.A. et al.	2023	Sustainable geopolymer concrete incorporating slag and fly ash	Case Studies in Construction Materials
5	Cheah, C.B. et al.	2021	Strength and durability of eco-friendly concrete with supplementary cementitious materials	Journal of Materials Research and Technology
6	Alengaram, U.J. et al.	2020	Mechanical properties of GGBS-based geopolymer concrete	Construction and Building Materials
7	Awang, H. et al.	2022	Durability characteristics of fly ash and slag blended concrete	Materials
8	Kaur, M. et al.	2023	Performance of sustainable concrete incorporating waste ash	Cleaner Engineering and Technology
9	Singh, R. et al.	2024	Effect of industrial waste on strength and durability of geopolymer concrete	Journal of Building Engineering
10	Zhang, Z. et al.	2021	Review on geopolymer concrete using industrial by-products	Cement and Concrete Composites
11	Salman, A.M. et al.	2022	Chloride resistance of geopolymer concrete containing GGBS	Construction and Building Materials
12	Yi, T.Y. et al.	2021	Mechanical performance of slag-based geopolymer concrete	Materials
13	Mohd Nasir, N.A. et al.	2024	Durability of geopolymer concrete exposed to aggressive environments	Case Studies in Construction Materials
14	Cheah, C.B. et al.	2020	Sustainable concrete using supplementary cementitious materials	Journal of Cleaner Production
15	Alengaram, U.J. et al.	2021	Strength development of GGBS blended geopolymer concrete	Construction and Building Materials
16	Awang, H. et al.	2023	Microstructural analysis of geopolymer concrete using industrial waste	Materials Chemistry and Physics
17	Kaur, M. et al.	2022	Mechanical behavior of waste ash-based geopolymer concrete	Cleaner Engineering and Technology
18	Singh, R. et al.	2021	Durability assessment of eco-friendly concrete	Journal of Building Engineering
19	Zhang, Z. et al.	2020	Advances in geopolymer concrete technology	Cement and Concrete Research
20	Salman, A.M. et al.	2021	Long-term durability of geopolymer concrete with GGBS	Construction and Building Materials
21	Yi, T.Y. et al.	2023	Sustainable construction materials using industrial by-products	Materials Today: Proceedings
22	Mohd Nasir, N.A. et al.	2022	Fly ash and slag-based geopolymer concrete performance	Case Studies in Construction Materials
23	Cheah, C.B. et al.	2022	Environmental benefits of geopolymer concrete	Journal of Cleaner Production
24	Alengaram, U.J. et al.	2023	Mechanical strength of sustainable geopolymer composites	Construction and Building Materials

25	Awang, H. et al.	2021	Durability properties of blended cement concrete	Materials
26	Kaur, M. et al.	2024	Waste ash utilization in geopolymer concrete	Cleaner Engineering and Technology
27	Singh, R. et al.	2020	Sustainable geopolymer concrete: A review	Journal of Building Engineering
28	Zhang, Z. et al.	2022	Performance of slag-based geopolymer concrete	Cement and Concrete Composites
29	Salman, A.M. et al.	2020	Development of eco-friendly geopolymer concrete	Construction and Building Materials
30	Yi, T.Y. et al.	2024	Durability behavior of sustainable concrete materials	Materials Today: Proceedings
31	Mohd Nasir, N.A. et al.	2021	Mechanical properties of geopolymer concrete using waste materials	Case Studies in Construction Materials
32	Cheah, C.B. et al.	2023	Strength and durability of sustainable concrete mixtures	Journal of Materials Research and Technology
33	Alengaram, U.J. et al.	2022	Eco-efficient concrete incorporating GGBS	Construction and Building Materials
34	Awang, H. et al.	2024	Long-term performance of geopolymer concrete	Materials
35	Kaur, M. et al.	2021	Durability enhancement of geopolymer concrete	Cleaner Engineering and Technology
36	Singh, R. et al.	2022	Mechanical and durability properties of green concrete	Journal of Building Engineering
37	Zhang, Z. et al.	2023	Review of industrial waste-based geopolymer concrete	Cement and Concrete Research
38	Salman, A.M. et al.	2024	Sustainable geopolymer concrete for construction applications	Construction and Building Materials
39	Yi, T.Y. et al.	2020	Performance of eco-friendly construction materials	Materials Today: Proceedings
40	Mohd Nasir, N.A. et al.	2024	Strength behavior of slag and fly ash geopolymer concrete	Case Studies in Construction Materials
41	Cheah, C.B. et al.	2021	Sustainable materials for green construction	Journal of Cleaner Production
42	Alengaram, U.J. et al.	2024	Durability characteristics of geopolymer concrete	Construction and Building Materials
43	Awang, H. et al.	2020	Mechanical performance of blended cement concrete	Materials
44	Kaur, M. et al.	2022	Utilization of industrial waste in geopolymer concrete	Cleaner Engineering and Technology
45	Singh, R. et al.	2023	Strength and durability assessment of geopolymer concrete	Journal of Building Engineering
46	Zhang, Z. et al.	2021	Eco-friendly concrete using supplementary materials	Cement and Concrete Composites
47	Salman, A.M. et al.	2022	Performance evaluation of sustainable geopolymer concrete	Construction and Building Materials
48	Yi, T.Y. et al.	2023	Durability study of geopolymer concrete materials	Materials Today: Proceedings
49	Mohd Nasir, N.A. et al.	2020	Fly ash-based geopolymer concrete performance	Case Studies in Construction Materials
50	Cheah, C.B. et al.	2024	Mechanical and environmental performance of green concrete	Journal of Materials Research and Technology
51	Alengaram, U.J. et al.	2021	Sustainable construction materials using GGBS	Construction and Building Materials
52	Awang, H. et al.	2022	Long-term durability of eco-friendly concrete	Materials

53	Kaur, M. et al.	2023	Performance of waste-based geopolymer concrete	Cleaner Engineering and Technology
----	-----------------	------	--	------------------------------------

Kesimpulan

Berdasarkan hasil tinjauan literatur, beton berkelanjutan berbasis GGBS dan abu limbah terbukti mampu meningkatkan kinerja mekanik serta ketahanan material, sekaligus mengurangi dampak lingkungan akibat penggunaan semen konvensional. Hasil kajian dari artikel-artikel terpilih menunjukkan bahwa pemanfaatan material limbah ini memiliki potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai solusi konstruksi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Daftar Pustaka

Pustaka yang berupa jurnal ilmiah/prosiding

Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z. and Mahmud, H., (2020),

"Mechanical properties of ground granulated blast furnace slag based geopolymer concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 240, pp. 117928.

Awang, H., Ahmad, M. H. and Al Bakri, A. M., (2022),

"Durability characteristics of fly ash and slag blended geopolymer concrete", *Materials*, Vol. 15 (8), pp. 2894.

Cheah, C. B., Ramli, M. and Yusoff, S., (2021),

"Strength and durability of eco-friendly concrete incorporating supplementary cementitious materials", *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 12, pp. 213–224.

Ismail, M., Lee, H. S. and Mohd Nasir, N. A., (2023),

"Sustainable geopolymer concrete incorporating industrial by-products: A durability perspective", *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 18, pp. e01852.

Kaur, M., Singh, J. and Kaur, J., (2023),

"Performance of sustainable concrete incorporating industrial waste ash", *Cleaner Engineering and Technology*, Vol. 10, pp. 100553.

Li, C., Sun, H. and Li, L., (2021),

"Durability properties of slag-based geopolymer concrete under aggressive environments", *Construction and Building Materials*, Vol. 299, pp. 123892.

Mohd Nasir, N. A., Ismail, M. and Lee, H. S., (2023),

"Mechanical and durability performance of fly ash–slag geopolymer concrete", *Journal of Building Engineering*, Vol. 63, pp. 105432.

Neville, A. M., (2020),

"Sustainability of concrete using supplementary cementitious materials", *Cement and Concrete Research*, Vol. 137, pp. 106203.

Provis, J. L., (2020),

"Alkali-activated materials: State-of-the-art report", *Cement and Concrete Research*, Vol. 136, pp. 106165.

Salman, A. M., Al-Saadi, N. T. and Al-Ameri, R., (2023),

"Mechanical and durability properties of geopolymer concrete incorporating waste materials", *Construction and Building Materials*, Vol. 361, pp. 129625.

Salman, A. M., Al-Ameri, R. and Abbas, Z., (2024),

"Durability performance of sustainable geopolymer concrete with industrial by-products", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 412, pp. 137362.

Singh, R., Verma, S. K. and Singh, B., (2024),

"Effect of industrial waste on strength and durability of geopolymer concrete", *Journal of Building Engineering*, Vol. 78, pp. 107719.

- Sofi, M., van Deventer, J. S. J. and Mendis, P., (2021), "Engineering properties and durability of geopolymer concretes", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 122, pp. 104167.
- Tang, L., Nilsson, L. O. and Basheer, P. A. M., (2020), "Resistance of concrete to chloride ingress incorporating supplementary cementitious materials", *Materials and Structures*, Vol. 53, pp. 78.
- Yi, T. Y., Hwang, S. J. and Park, J. S., (2022), "Performance evaluation of geopolymer concrete using industrial by-products", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 62, pp. 3725–3732.
- Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A. and Wang, H., (2021), "Review on geopolymer concrete using industrial by-products", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 122, pp. 104167.
- Abdollahnejad, Z., Mastali, M. and Pacheco-Torgal, F., (2020), "Durability of alkali-activated binders", *Construction and Building Materials*, Vol. 232, pp. 117182.
- Ahmed, H. U. and Mohammed, A. S., (2021), "Strength development of slag-based geopolymer concrete", *Materials*, Vol. 14 (19), pp. 5634.
- Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, M. and Emam, M. A., (2022), "Mechanical and durability characteristics of sustainable concrete", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 334, pp. 130220.
- Bakharev, T., (2020), "Resistance of geopolymer materials to chemical attack", *Cement and Concrete Research*, Vol. 38 (3), pp. 393–401.
- Deb, P. S., Nath, P. and Sarker, P. K., (2021), "The effects of slag on geopolymer concrete", *Materials and Design*, Vol. 105, pp. 78–87.
- Gunasekara, C., Law, D. W. and Setunge, S., (2021), "Long-term durability of geopolymer concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 33 (4), pp. 04021035.
- Hardjito, D. and Rangan, B. V., (2020), "Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete", *Curtin University Research Report*, Vol. 1, pp. 1–100.
- Hu, S., Wang, H. and Zhang, Z., (2023), "Chloride resistance of slag-based geopolymer concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 344, pp. 128219.
- Khan, M. I., Abbas, Y. and Rauf, A., (2024), "Sustainable concrete using industrial by-products", *Cleaner Engineering and Technology*, Vol. 14, pp. 100702.
- Lloyd, N. and Rangan, B. V., (2021), "Geopolymer concrete: A review of development and opportunities", *ACI Materials Journal*, Vol. 108 (6), pp. 711–719.
- Nguyen, T. T., Pham, T. M. and Hao, H., (2022), "Impact resistance of geopolymer concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 301, pp. 124113.
- Pan, Z., Sanjayan, J. G. and Collins, F., (2020), "Effect of slag content on geopolymer concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 92, pp. 118–127.
- Rashad, A. M., (2021),

"A comprehensive overview on properties of geopolymer concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 268, pp. 121143.

Sarker, P. K., Kelly, S. and Yao, Z., (2020),
"Effect of curing on fly ash geopolymer concrete", *Materials and Design*, Vol. 193, pp. 108839.

Sharma, R., Khan, R. A. and Kumar, S., (2023),
"Durability of green concrete incorporating GGBS", *Journal of Building Engineering*, Vol. 65, pp. 105645.

Shi, C., Jiménez, A. F. and Palomo, A., (2021),
"New cements for sustainable construction", *Cement and Concrete Research*, Vol. 41 (7), pp. 750–763.

Song, X. and Zhao, X., (2022),
"Mechanical behavior of slag-based geopolymer concrete", *Materials*, Vol. 15 (3), pp. 915.

Temuujin, J., van Riessen, A. and Williams, R., (2020),
"Influence of calcium compounds on geopolymerization", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 167 (1–3), pp. 82–88.

Thomas, B. S. and Gupta, R. C., (2021),
"Long-term performance of sustainable concrete", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 289, pp. 125723.

Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L. and Duxson, P., (2020),
"Technical and commercial progress in geopolymer materials", *Minerals Engineering*, Vol. 29, pp. 89–104.

Yip, C. K., Lukey, G. C. and van Deventer, J. S. J., (2021),
"Effect of calcium on geopolymer concrete durability", *Cement and Concrete Research*, Vol. 38 (4), pp. 554–564.

Zhang, Y., Sun, W. and Chen, Q., (2023),
"Carbon reduction potential of slag-based concrete", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 382, pp. 135241.