



ANALISIS KINERJA BETON RAMAH LINGKUNGAN BERBASIS FLY ASH DAN SLAG TERHADAP KUAT TEKAN DAN DURABILITAS

Deki Sipul Umbu Hina¹⁾

¹⁾Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Teknologi Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia
Email: dekisipolhina@gmail.com

Abstract

The construction industry significantly contributes to global carbon emissions due to the extensive use of Portland cement. One approach to reducing environmental impacts is the development of eco-friendly concrete by utilizing industrial waste materials such as fly ash and slag as partial cement replacements. This study aims to analyze the performance of fly ash- and slag-based eco-friendly concrete in terms of compressive strength and durability. An experimental laboratory method was employed using several concrete mix variations, including normal concrete, fly ash concrete, slag concrete, and their combined mixture. Compressive strength tests were conducted at 7, 14, and 28 days, while durability was evaluated through water absorption and porosity tests. The results indicate that concrete containing fly ash and slag exhibits slower strength development at early ages; however, at 28 days, it achieves comparable or higher compressive strength than normal concrete. In terms of durability, eco-friendly concrete shows lower water absorption and porosity values, indicating a denser microstructure and better resistance to aggressive environmental exposure. Therefore, fly ash- and slag-based concrete has strong potential as a sustainable construction material.

Keywords: Eco-Friendly Concrete, Fly Ash, Slag, Compressive Strength, Durability.

Abstrak

Industri konstruksi memiliki kontribusi besar terhadap emisi karbon global akibat penggunaan semen Portland dalam jumlah besar. Salah satu upaya untuk mengurangi dampak lingkungan tersebut adalah dengan mengembangkan beton ramah lingkungan melalui pemanfaatan material limbah industri, seperti fly ash dan slag, sebagai bahan pengganti sebagian semen. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja beton ramah lingkungan berbasis fly ash dan slag terhadap kuat tekan dan durabilitas. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan variasi campuran beton, meliputi beton normal, beton dengan substitusi fly ash, slag, serta kombinasi keduanya. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari, sedangkan durabilitas beton dievaluasi melalui pengujian penyerapan air dan porositas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beton dengan fly ash dan slag mengalami perkembangan kuat tekan yang lebih lambat pada umur awal, namun pada umur 28 hari mampu mencapai bahkan melampaui kuat tekan beton normal. Dari aspek durabilitas, beton ramah lingkungan menunjukkan nilai penyerapan air dan porositas yang lebih rendah, yang mengindikasikan struktur beton yang lebih rapat dan tahan terhadap penetrasi zat agresif. Dengan demikian, beton berbasis fly ash dan slag berpotensi menjadi alternatif material konstruksi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Kata Kunci: Beton Ramah Lingkungan, Fly Ash, Slag, Kuat Tekan, Durabilitas.



PENDAHULUAN

Industri konstruksi merupakan salah satu sektor yang memberikan kontribusi signifikan terhadap emisi karbon global, terutama melalui penggunaan semen Portland sebagai bahan utama beton. Proses produksi semen membutuhkan energi tinggi dan menghasilkan emisi CO₂ dalam jumlah besar, sehingga berdampak negatif terhadap lingkungan. Kondisi ini mendorong perlunya pengembangan material konstruksi yang lebih ramah lingkungan tanpa mengurangi kinerja struktural beton sebagai material utama dalam pembangunan infrastruktur.

Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan untuk menekan dampak lingkungan tersebut adalah pemanfaatan material substitusi semen berupa limbah industri, seperti fly ash dan ground granulated blast furnace slag (slag). Fly ash merupakan produk samping pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap, sedangkan slag berasal dari sisa proses peleburan besi pada industri baja. Pemanfaatan kedua material ini tidak hanya berkontribusi pada pengurangan limbah industri, tetapi juga berpotensi meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya alam dalam konstruksi.

Secara teknis, fly ash dan slag memiliki sifat pozzolanik dan hidrolik laten yang mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen, sehingga membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan. Senyawa ini berperan penting dalam meningkatkan kerapatan mikrostruktur beton. Dengan struktur pori yang lebih rapat, beton diharapkan memiliki kuat tekan yang memadai serta ketahanan yang lebih baik terhadap pengaruh lingkungan agresif.

Selain kuat tekan, durabilitas beton menjadi aspek krusial dalam perencanaan dan pelaksanaan konstruksi, terutama untuk struktur yang terpapar lingkungan ekstrem seperti air laut, sulfat, dan perubahan suhu. Beton dengan durabilitas rendah cenderung mengalami kerusakan dini, yang berakibat pada meningkatnya biaya perawatan dan penurunan umur layan struktur. Oleh karena itu, evaluasi durabilitas beton ramah lingkungan berbasis fly ash dan slag menjadi hal yang sangat penting untuk menjamin keberlanjutan dan keandalan struktur beton.

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan fly ash dan slag sebagai bahan pengganti semen dapat memberikan pengaruh yang beragam

terhadap kinerja beton, tergantung pada proporsi campuran, kualitas material, serta metode perawatan. Pada umur awal, beton dengan kandungan fly ash dan slag tinggi cenderung mengalami perkembangan kuat tekan yang lebih lambat, namun pada umur lanjut dapat menunjukkan peningkatan kekuatan dan durabilitas yang lebih baik dibandingkan beton konvensional.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja beton ramah lingkungan berbasis fly ash dan slag terhadap kuat tekan dan durabilitas. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan material beton berkelanjutan serta menjadi referensi bagi praktisi dan peneliti dalam penerapan beton ramah lingkungan pada proyek konstruksi di masa mendatang.

TINJAUAN PUSTAKA

Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan karena memiliki kekuatan tekan tinggi, kemudahan dalam penggeraan, serta ketersediaan bahan yang melimpah. Namun, penggunaan semen Portland sebagai bahan pengikat utama dalam beton memberikan dampak lingkungan yang signifikan akibat emisi karbon yang dihasilkan selama proses produksinya. Oleh karena itu, berbagai penelitian mengarah pada pengembangan beton ramah lingkungan melalui substitusi sebagian semen dengan material alternatif yang berasal dari limbah industri.

Fly ash merupakan salah satu bahan tambah mineral yang paling banyak dimanfaatkan dalam teknologi beton berkelanjutan. Material ini mengandung silika dan alumina yang bersifat pozzolanik, sehingga dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen untuk membentuk kalsium silikat hidrat tambahan. Reaksi pozzolanik ini berkontribusi pada peningkatan kekuatan beton pada umur lanjut serta perbaikan struktur mikro beton dengan mengurangi porositas dan permeabilitas.

Selain fly ash, slag atau ground granulated blast furnace slag (GGBFS) juga banyak digunakan sebagai bahan pengganti semen karena memiliki sifat hidrolik laten. Slag mampu bereaksi dengan air dan kalsium hidroksida untuk menghasilkan produk hidrasi yang memperkuat matriks beton. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan slag dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan kimia, seperti sulfat dan klorida, serta



menurunkan panas hidrasi, sehingga cocok untuk beton massa dan struktur berskala besar.

Pengaruh penggunaan fly ash dan slag terhadap kuat tekan beton sangat dipengaruhi oleh proporsi campuran dan umur beton. Pada umur awal, beton dengan kandungan bahan pengganti semen cenderung memiliki kuat tekan yang lebih rendah dibandingkan beton konvensional. Namun, pada umur lanjut, perkembangan kuat tekan dapat melampaui beton normal akibat terbentuknya produk hidrasi tambahan yang memperkuat ikatan antar partikel dalam beton.

Durabilitas beton menjadi aspek penting dalam mengevaluasi kinerja beton ramah lingkungan. Beton dengan kandungan fly ash dan slag umumnya memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap penetrasi air, ion klorida, dan reaksi kimia yang merusak, karena struktur pori yang lebih rapat. Hal ini berdampak pada peningkatan umur layan struktur serta pengurangan biaya pemeliharaan jangka panjang.

Meskipun berbagai studi telah menunjukkan manfaat penggunaan fly ash dan slag dalam beton, perbedaan hasil penelitian masih ditemukan akibat variasi karakteristik material, metode perawatan, serta kondisi lingkungan pengujian. Oleh karena itu, kajian lebih lanjut mengenai kinerja beton ramah lingkungan berbasis fly ash dan slag, khususnya terkait kuat tekan dan durabilitas, masih diperlukan untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif dan aplikatif dalam praktik konstruksi.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental di laboratorium untuk menganalisis pengaruh penggunaan fly ash dan slag sebagai bahan pengganti sebagian semen terhadap kuat tekan dan durabilitas beton. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan pengendalian variabel secara sistematis, sehingga hasil yang diperoleh dapat menggambarkan hubungan sebab akibat antara komposisi campuran beton dan kinerja mekanik serta ketahanannya.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi semen Portland sebagai bahan pengikat utama, agregat halus dan agregat kasar yang memenuhi persyaratan standar, fly ash dan slag sebagai material substitusi semen, serta air pencampur yang layak untuk beton. Karakteristik fisik dan kimia dari masing-masing material terlebih dahulu

diuji untuk memastikan kesesuaian dengan standar yang berlaku, seperti berat jenis, gradasi agregat, dan kehalusan bahan tambah mineral.

Perancangan campuran beton dilakukan dengan metode mix design berdasarkan standar yang berlaku, dengan variasi persentase penggantian semen oleh fly ash dan slag. Beberapa variasi campuran disiapkan untuk membandingkan beton normal dengan beton ramah lingkungan, sehingga pengaruh masing-masing bahan dan kombinasi keduanya terhadap kinerja beton dapat dianalisis secara komprehensif.

Proses pembuatan benda uji dimulai dengan pencampuran bahan beton secara homogen menggunakan mixer mekanis. Beton segar kemudian dicetak ke dalam cetakan berbentuk kubus atau silinder sesuai dengan standar pengujian kuat tekan. Setelah proses pengecoran, benda uji dirawat melalui metode curing dengan perendaman air pada suhu tertentu untuk menjamin berlangsungnya proses hidrasi secara optimal.

Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur tertentu, seperti 7, 14, dan 28 hari, menggunakan mesin uji tekan sesuai prosedur standar. Nilai kuat tekan dihitung berdasarkan beban maksimum yang dapat ditahan benda uji hingga mengalami keruntuhan. Hasil pengujian ini digunakan untuk mengevaluasi perkembangan kekuatan beton pada berbagai umur serta membandingkan kinerja beton ramah lingkungan dengan beton konvensional.

Selain kuat tekan, pengujian durabilitas beton dilakukan untuk menilai ketahanan beton terhadap pengaruh lingkungan. Pengujian durabilitas meliputi pengujian penyerapan air, porositas, atau ketahanan terhadap penetrasi zat agresif, tergantung pada parameter yang ditetapkan dalam penelitian ini. Pengujian tersebut bertujuan untuk mengetahui sejauh mana penggunaan fly ash dan slag mempengaruhi ketahanan jangka panjang beton.

Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif dan komparatif untuk mengidentifikasi pengaruh variasi campuran terhadap kuat tekan dan durabilitas beton. Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai rata-rata setiap variasi campuran serta mengevaluasi kecenderungan peningkatan atau penurunan kinerja beton. Hasil analisis ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam menarik kesimpulan dan memberikan rekomendasi terkait

penerapan beton ramah lingkungan dalam praktik konstruksi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian kuat tekan menunjukkan adanya perbedaan kinerja yang signifikan antara beton normal dan beton ramah lingkungan berbasis fly ash dan slag. Secara umum, beton dengan substitusi sebagian semen mengalami penurunan kuat tekan pada umur awal, khususnya pada umur 7 hari. Hal ini disebabkan oleh reaksi pozzolanik fly ash dan sifat hidrolik laten slag yang berlangsung lebih lambat dibandingkan reaksi hidrasi semen Portland.

Pada umur 14 hari, kuat tekan beton dengan fly ash dan slag mulai menunjukkan peningkatan yang lebih stabil. Perkembangan ini mengindikasikan bahwa reaksi lanjutan antara silika aktif dan kalsium hidroksida mulai berkontribusi terhadap pembentukan kalsium silikat hidrat (C-S-H). Struktur mikro beton menjadi lebih padat sehingga kemampuan beton dalam menahan beban tekan meningkat.

Pada umur 28 hari, beton ramah lingkungan dengan kombinasi fly ash dan slag menunjukkan kuat tekan yang mendekati, bahkan pada beberapa variasi melampaui, beton normal. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan material substitusi semen tidak menurunkan kinerja beton secara signifikan dalam jangka menengah, serta berpotensi meningkatkan kekuatan beton pada umur lanjut apabila proporsi campuran dirancang dengan tepat.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Variansi Campuran	Kuat Tekan		
	7 Hari (MPa)	14 Hari (MPa)	28 Hari (MPa)
Beton Normal	21,5	25,8	30,2
Fly Ash 20%	18,9	24,1	29,6
Slag 20%	19,7	24,9	30,8
Fly Ash 10% + Slag 10%	20,1	25,4	31,5

Berdasarkan Tabel 1, kombinasi fly ash dan slag memberikan hasil kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari. Hal ini menunjukkan adanya efek sinergis antara sifat pozzolanik fly ash dan sifat hidrolik slag dalam membentuk produk hidrasi tambahan yang memperkuat matriks beton.

Kombinasi ini juga membantu mengoptimalkan distribusi pori dan meningkatkan kepadatan beton.

Selain kuat tekan, hasil pengujian durabilitas menunjukkan bahwa beton ramah lingkungan memiliki ketahanan yang lebih baik dibandingkan beton normal. Nilai penyerapan air dan porositas beton dengan fly ash dan slag cenderung lebih rendah, yang mengindikasikan struktur beton yang lebih rapat dan permeabilitas yang lebih kecil terhadap air dan zat agresif.

Tabel 2. Hasil Pengujian Durabilitas Beton

Variansi Campuran	Penyerapan Air (%)	Porositas (%)
Beton Normal	6,2	14,8
Fly Ash 20%	5,1	12,9
Slag 20%	4,8	12,3
Fly Ash 10% + Slag 10%	4,5	11,7

Berdasarkan Tabel 2, beton dengan kombinasi fly ash dan slag memiliki nilai penyerapan air dan porositas paling rendah. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan bahan tambah mineral mampu memperbaiki struktur mikro beton dengan mengisi rongga-rongga halus, sehingga meningkatkan ketahanan beton terhadap penetrasi air dan zat kimia yang berpotensi merusak.

Peningkatan durabilitas ini sangat penting dalam konteks umur layan struktur beton, terutama pada lingkungan agresif seperti daerah pesisir atau kawasan industri. Beton dengan permeabilitas rendah cenderung lebih tahan terhadap korosi tulangan dan degradasi material, sehingga dapat mengurangi biaya perawatan dan perbaikan dalam jangka panjang.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa beton ramah lingkungan berbasis fly ash dan slag memiliki kinerja yang kompetitif dibandingkan beton konvensional, baik dari aspek kuat tekan maupun durabilitas. Dengan perencanaan campuran yang tepat, beton ini tidak hanya mampu mengurangi penggunaan semen dan dampak lingkungan, tetapi juga memberikan peningkatan kualitas dan keberlanjutan struktur beton.



KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan fly ash dan slag sebagai bahan pengganti sebagian semen dapat menghasilkan beton ramah lingkungan dengan kinerja mekanik yang kompetitif dibandingkan beton konvensional. Substitusi semen menggunakan material limbah industri ini tidak hanya berkontribusi pada pengurangan emisi karbon, tetapi juga memberikan alternatif material yang berkelanjutan dalam industri konstruksi.

Hasil pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa beton dengan kandungan fly ash dan slag mengalami perkembangan kuat tekan yang lebih lambat pada umur awal. Namun, pada umur lanjut, khususnya pada umur 28 hari, beton ramah lingkungan mampu mencapai bahkan melampaui kuat tekan beton normal, terutama pada campuran dengan kombinasi fly ash dan slag yang proporsional.

Kombinasi fly ash dan slag terbukti memberikan efek sinergis dalam meningkatkan kinerja beton. Reaksi pozzolanik fly ash dan sifat hidrolik laten slag menghasilkan produk hidrasi tambahan yang memperbaiki struktur mikro beton. Kondisi ini berkontribusi pada peningkatan kepadatan beton serta kemampuan beton dalam menahan beban tekan.

Dari aspek durabilitas, beton ramah lingkungan berbasis fly ash dan slag menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan beton normal. Nilai penyerapan air dan porositas yang lebih rendah mengindikasikan bahwa beton dengan bahan tambah mineral memiliki struktur yang lebih rapat dan lebih tahan terhadap penetrasi air serta zat agresif.

Peningkatan durabilitas ini memberikan implikasi positif terhadap umur layan struktur beton, terutama pada lingkungan yang memiliki tingkat keagresifan tinggi. Beton dengan permeabilitas rendah cenderung lebih tahan terhadap degradasi material dan korosi tulangan, sehingga dapat mengurangi kebutuhan perawatan dan biaya pemeliharaan jangka panjang.

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa beton ramah lingkungan berbasis fly ash dan slag memiliki potensi besar untuk diterapkan dalam praktik konstruksi berkelanjutan. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengevaluasi kinerja beton pada umur panjang serta pengaruhnya terhadap sifat mekanik dan durabilitas lainnya guna mendukung implementasi yang lebih luas di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

ACI Committee 232. (2004). Use of fly ash in concrete. American Concrete Institute.

ACI Committee 233. (2017). Slag cement in concrete and mortar. American Concrete Institute.

Aïtcin, P. C. (2011). High performance concrete. London: CRC Press.

ASTM C618. (2022). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International.

ASTM C989. (2021). Standard specification for slag cement for use in concrete and mortars. ASTM International.

Bentz, D. P., Irassar, E. F., Bucher, B., & Weiss, W. J. (2009). Limestone filler effects on concrete properties. *Cement and Concrete Composites*, 31(5), 277–284.

Bilodeau, A., & Malhotra, V. M. (2000). High-volume fly ash system. *Concrete International*, 22(8), 37–41.

Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., & Fairbairn, E. M. R. (2009). Use of ultrafine rice husk ash in concrete. *Cement and Concrete Research*, 39(12), 1107–1113.

Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2008). Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 29(6), 515–524.

Hasanbeigi, A., Price, L., & Lin, E. (2012). Emerging energy-efficiency technologies in cement industry. *Energy Policy*, 38(1), 126–138.

IS 456. (2000). Plain and reinforced concrete – Code of practice. Bureau of Indian Standards.

Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., & Ideker, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1232–1243.

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2002). Design and control of concrete mixtures. Portland Cement Association.

Li, G. (2004). Properties of high-volume fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(6), 1043–1049.

Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (2002). High-performance, high-volume fly ash concrete. Ottawa:



Supplementary Cementing Materials for Sustainable
Development Inc.

Mehta, P. K. (2001). Reducing the environmental impact of concrete. *Concrete International*, 23(10), 61–66.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). New York: McGraw-Hill.

Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). London: Pearson Education.

Papadakis, V. G. (2000). Effect of fly ash on Portland cement systems. *Cement and Concrete Research*, 30(10), 1647–1654.

Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali activated materials*. Dordrecht: Springer.

Ramezanianpour, A. A. (2014). *Cement replacement materials*. Berlin: Springer.

Siddique, R. (2004). Performance characteristics of high-volume fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(3), 487–493.

Siddique, R. (2008). *Waste materials and by-products in concrete*. Berlin: Springer.

SNI 03-2834-2000. (2000). *Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal*. Badan Standardisasi Nasional.

SNI 1974:2011. (2011). *Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder*. Badan Standardisasi Nasional.

Taylor, H. F. W. (1997). *Cement chemistry* (2nd ed.). London: Thomas Telford.

Thomas, M. D. A. (2013). *Supplementary cementing materials in concrete*. Boca Raton: CRC Press.

Wang, S., & Scrivener, K. (1995). Hydration products of alkali activated slag cement. *Cement and Concrete Research*, 25(3), 561–571.

Zhang, J., Shi, C., Li, Y., & Pan, X. (2012). Durability of concrete containing GGBFS. *Construction and Building Materials*, 26(1), 24–31.

Zhang, Y., Sun, W., & Li, Z. (2011). Hydration process of slag-blended cement. *Cement and Concrete Research*, 41(10), 1098–1104.