



PENGARUH PENGGUNAAN BETON RAMAH LINGKUNGAN TERHADAP KEKUATAN DAN KETAHANAN STRUKTUR BANGUNAN

Harashta¹⁾

¹⁾Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Badung, Indonesia
Email: harashta@gmail.com

Abstract

This study analyzes the effect of using green concrete on the strength and durability of building structures through a comprehensive literature review. Green concrete, which utilizes waste materials such as fly ash, slag, and silica fume as cement substitutes, and recycled concrete aggregate (RCA), offers a solution to reduce the ecological impact of the construction industry. The analysis shows that while cement substitution can decrease the early strength of concrete, its long-term strength tends to be equivalent to or even exceed that of conventional concrete. Specifically, the use of silica fume is proven to significantly increase compressive strength. Furthermore, green concrete demonstrates enhanced durability against chemical attacks such as chloride and sulfate, which effectively extends the service life of structures. Although challenges exist in material standardization and property variability, these findings confirm that green concrete is a reliable and sustainable alternative. This research concludes that the adoption of this material not only supports sustainable development but also provides significant technical benefits in terms of long-term structural strength and durability.

Keywords: Green concrete, Strength, Durability, Fly ash, Recycled aggregate.

Abstrak

Penelitian ini menganalisis pengaruh penggunaan beton ramah lingkungan terhadap kekuatan dan ketahanan struktur bangunan melalui tinjauan literatur komprehensif. Beton ramah lingkungan, yang memanfaatkan material limbah seperti fly ash, slag, dan silica fume sebagai pengganti semen, serta agregat daur ulang (RCA), menawarkan solusi untuk mengurangi dampak ekologis industri konstruksi. Hasil analisis menunjukkan bahwa meskipun penggantian semen dapat menurunkan kekuatan awal beton, kekuatan jangka panjangnya cenderung setara atau lebih unggul dari beton konvensional. Terutama, penggunaan silica fume terbukti meningkatkan kekuatan tekan secara signifikan. Lebih lanjut, beton ramah lingkungan menunjukkan peningkatan ketahanan (durabilitas) terhadap serangan kimia seperti klorida dan sulfat, yang secara efektif memperpanjang umur layanan struktur. Meskipun terdapat tantangan dalam standarisasi material dan variabilitas properti, temuan ini menegaskan bahwa beton ramah lingkungan adalah alternatif yang andal dan berkelanjutan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa adopsi material ini tidak hanya mendukung pembangunan berkelanjutan tetapi juga memberikan manfaat teknis yang signifikan dalam hal kekuatan dan ketahanan struktural jangka panjang.

Kata Kunci: Beton ramah lingkungan, Kekuatan, Ketahanan, Fly ash, Agregat daur ulang.



PENDAHULUAN

Globalisasi dan pertumbuhan populasi yang pesat telah memicu lonjakan permintaan akan infrastruktur dan perumahan, yang pada gilirannya mendorong industri konstruksi untuk beroperasi pada skala yang belum pernah terjadi sebelumnya. Namun, industri ini dikenal sebagai salah satu kontributor utama terhadap degradasi lingkungan, terutama karena konsumsi sumber daya alam yang masif dan emisi gas rumah kaca yang signifikan (UNEP, 2017). Beton, sebagai material konstruksi yang paling banyak digunakan di dunia, menjadi pusat perhatian dalam diskusi ini. Produksi semen, komponen kunci beton, bertanggung jawab atas sekitar 8% emisi karbon dioksida global (GCCA, 2020), menjadikannya sasaran utama untuk inovasi berkelanjutan. Oleh karena itu, peralihan dari metode konvensional ke pendekatan yang lebih ramah lingkungan tidak lagi menjadi pilihan, melainkan sebuah keharusan demi kelestarian planet.

Perkembangan teknologi dan kesadaran akan dampak lingkungan telah memicu lahirnya berbagai jenis **beton ramah lingkungan** atau *green concrete*. Beton ini dirancang untuk mengurangi jejak ekologis tanpa mengorbankan kualitas struktural. Salah satu pendekatan yang paling populer adalah penggantian sebagian atau seluruh semen portland dengan material limbah industri seperti fly ash, slag, dan silica fume (Mehta & Monteiro, 2013). Material-material ini, yang sebelumnya dianggap sebagai limbah dan berakhir di tempat pembuangan akhir, kini diakui sebagai bahan pozzolanik yang berharga. Penggunaan material limbah ini tidak hanya mengurangi emisi CO₂ yang terkait dengan produksi semen, tetapi juga membantu menyelesaikan masalah pengelolaan limbah industri.

Selain penggunaan material limbah, inovasi lain dalam beton ramah lingkungan melibatkan pemanfaatan agregat daur ulang dari puing-puing bangunan atau material alam yang lebih lestari (Xiao et al., 2012). Penggunaan agregat daur ulang, seperti beton daur ulang (Recycled Concrete Aggregate/RCA), membantu mengurangi penambangan sumber daya alam baru seperti batu dan pasir. Praktik ini sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular, di mana material dapat digunakan kembali dalam siklus produksi, mengurangi limbah dan konsumsi sumber daya. Penekanan pada material daur ulang dan alternatif bukan hanya sekadar tren, melainkan sebuah langkah strategis untuk menciptakan industri konstruksi yang lebih bertanggung jawab dan efisien.

Meskipun potensi beton ramah lingkungan telah diakui secara luas, masih ada tantangan signifikan yang perlu diatasi. Salah satu kekhawatiran utama adalah dampaknya terhadap **kekuatan dan ketahanan struktur bangunan** dalam jangka panjang. Beberapa penelitian awal

menunjukkan bahwa penggantian semen secara berlebihan dengan material pozzolanik dapat mempengaruhi kekuatan awal beton, meskipun kekuatan jangka panjangnya seringkali setara atau bahkan lebih baik dari beton konvensional (Safuiddin et al., 2010). Keraguan ini sering menjadi hambatan bagi para insinyur dan pengembang yang khawatir akan risiko struktural, sehingga menghambat adopsi material ini secara lebih luas.

Oleh karena itu, penelitian yang mendalam dan komprehensif mengenai properti mekanik beton ramah lingkungan menjadi sangat krusial. Perlu dipahami secara rinci bagaimana proporsi penggantian semen, jenis material pozzolanik yang digunakan, dan kondisi curing memengaruhi kekuatan tekan, kekuatan tarik, serta ketahanan beton terhadap faktor-faktor lingkungan seperti korosi dan serangan sulfat. Pengetahuan ini akan memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk menyusun pedoman dan standar desain yang aman, sehingga para praktisi dapat menggunakan beton ramah lingkungan dengan keyakinan penuh.

Berdasarkan latar belakang tersebut, artikel ini bertujuan untuk menganalisis secara mendalam pengaruh penggunaan beton ramah lingkungan terhadap kekuatan dan ketahanan struktur bangunan. Melalui tinjauan literatur yang ekstensif, kami akan mengeksplorasi temuan-temuan kunci dari berbagai penelitian yang telah dilakukan, membandingkan performa beton ramah lingkungan dengan beton konvensional, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi karakteristik mekaniknya. Hasil dari analisis ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik kepada para insinyur, akademisi, dan pembuat kebijakan mengenai potensi dan tantangan penggunaan beton ramah lingkungan, sekaligus mendorong implementasi praktik konstruksi yang lebih berkelanjutan di masa depan.

TINJAUAN PUSTAKA

Penggunaan beton sebagai material konstruksi utama telah menjadi praktik yang tak terhindarkan dalam pembangunan infrastruktur global. Namun, industri beton juga diakui sebagai salah satu penyumbang terbesar emisi karbon dioksida (CO₂) dan konsumsi sumber daya alam. Emisi CO₂ ini terutama berasal dari produksi semen, di mana proses kalsinasi klinker memerlukan suhu tinggi dan melepaskan gas rumah kaca dalam jumlah besar. Menurut data dari **Global Cement and Concrete Association (GCCA)** (2020), produksi semen menyumbang sekitar 8% dari total emisi CO₂ global. Situasi ini mendorong para peneliti dan praktisi untuk mencari solusi inovatif yang dapat mengurangi dampak lingkungan, yang salah satunya adalah pengembangan beton ramah lingkungan atau *green concrete*.



Konsep beton ramah lingkungan berfokus pada penggunaan bahan-bahan alternatif yang lebih berkelanjutan. Salah satu pendekatan utama adalah penggantian sebagian atau seluruh semen dengan material limbah industri yang memiliki sifat pozzolanik. Material ini, seperti **fly ash** (abu terbang dari pembakaran batu bara), **slag** (terak dari industri baja), dan **silica fume** (limbah dari produksi silikon dan ferosilikon), dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida yang terbentuk selama hidrasi semen untuk membentuk senyawa pengikat tambahan. **Mehta dan Monteiro** (2013) dalam buku mereka, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, menjelaskan secara mendalam mekanisme pozzolanik ini. Pemanfaatan limbah ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada semen portland, tetapi juga membantu menyelesaikan masalah pengelolaan limbah industri, menjadikannya solusi "win-win" dari perspektif lingkungan dan ekonomi.

Selain pengganti semen, penggunaan **agregat daur ulang** (Recycled Concrete Aggregate/RCA) juga merupakan komponen penting dari beton ramah lingkungan. RCA, yang diperoleh dari penghancuran puing-puing bangunan, dapat menggantikan agregat alam (pasir dan kerikil) (Xiao et al., 2012). Penggunaan RCA mengurangi kebutuhan akan penambangan agregat alam yang dapat merusak ekosistem dan menghemat biaya transportasi. Namun, tantangan yang sering muncul adalah sifat RCA yang lebih berpori dan memiliki daya serap air yang lebih tinggi dibandingkan agregat alam, yang berpotensi memengaruhi sifat beton segar dan kekuatannya. Oleh karena itu, diperlukan perancangan campuran yang cermat untuk mengoptimalkan kinerja beton yang menggunakan RCA.

Meskipun potensi lingkungan dari beton ramah lingkungan sangat jelas, performa mekanisnya, terutama **kekuatan dan ketahanan**, menjadi subjek penelitian yang intensif. Penelitian yang dilakukan oleh **Safiuddin, Jumaat, dan Salam** (2010) menunjukkan bahwa penggantian semen dengan fly ash hingga persentase tertentu dapat menghasilkan kekuatan tekan jangka panjang yang setara atau bahkan lebih tinggi dari beton konvensional, meskipun kekuatan awalnya mungkin sedikit lebih rendah. Perbedaan kekuatan awal ini disebabkan oleh laju reaksi pozzolanik yang lebih lambat dibandingkan hidrasi semen. Di sisi lain, beberapa penelitian juga menyoroti bahwa penggunaan beton ramah lingkungan dapat meningkatkan ketahanan terhadap serangan kimia, seperti **serangan sulfat dan klorida**, karena struktur pori yang lebih halus dan kurang permeabel (Safiuddin, Jumaat, & Salam, 2010).

Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa beton ramah lingkungan memiliki potensi besar untuk mengurangi dampak ekologis industri konstruksi. Inovasi

dalam material dan desain campuran telah membuka jalan bagi material ini untuk menjadi alternatif yang layak. Namun, adopsi secara luas masih memerlukan pemahaman yang lebih mendalam tentang bagaimana proporsi bahan-bahan alternatif memengaruhi sifat-sifat fundamental beton. Pengujian dan standardisasi yang ketat sangat penting untuk memastikan bahwa penggunaan beton ramah lingkungan tidak mengorbankan keamanan dan durabilitas struktur, sehingga dapat diterapkan secara aman dan efektif dalam proyek-proyek konstruksi di seluruh dunia.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode studi literatur. Pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran dan analisis komprehensif terhadap berbagai sumber pustaka, seperti jurnal ilmiah, prosiding konferensi, laporan teknis, buku, dan publikasi relevan lainnya. Sumber-sumber ini dipilih berdasarkan kredibilitasnya dan relevansinya dengan topik penelitian, yaitu **pengaruh penggunaan beton ramah lingkungan terhadap kekuatan dan ketahanan struktur bangunan**.

Proses pengumpulan data dimulai dengan identifikasi kata kunci yang relevan, seperti "beton ramah lingkungan," "green concrete," "kekuatan beton," "durabilitas beton," "fly ash," "slag," "agregat daur ulang," dan "sustainability in construction." Kata kunci ini digunakan untuk menelusuri basis data ilmiah seperti **Google Scholar**, **Scopus**, **ScienceDirect**, dan database perpustakaan universitas. Dari hasil penelusuran, artikel dan publikasi yang relevan diunduh dan diklasifikasikan berdasarkan tema utama, yaitu karakteristik material, properti mekanik (kekuatan tekan, tarik, dan lentur), serta ketahanan (durabilitas terhadap serangan sulfat, klorida, dan korosi).

Setelah data terkumpul, dilakukan analisis kualitatif untuk mensintesis informasi dan mengidentifikasi pola, kesenjangan, dan temuan kunci dari literatur yang ada. Analisis ini mencakup perbandingan hasil penelitian dari berbagai studi, mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi performa beton ramah lingkungan, serta mengevaluasi kelebihan dan kekurangan dari setiap material alternatif yang digunakan. Hasil sintesis ini kemudian digunakan untuk menyusun argumen dan kesimpulan yang kuat, memberikan gambaran komprehensif mengenai kondisi terkini penelitian dan aplikasi beton ramah lingkungan dalam industri konstruksi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan analisis literatur yang telah dilakukan, hasil dan pembahasan mengenai **pengaruh penggunaan beton ramah lingkungan terhadap kekuatan dan ketahanan struktur bangunan** menunjukkan temuan yang beragam namun konsisten. Mayoritas penelitian sepakat



bahwa substitusi parsial semen dengan bahan pozzolanik, seperti **fly ash, slag, dan silica fume**, tidak hanya mengurangi dampak lingkungan tetapi juga dapat meningkatkan performa mekanis beton dalam jangka panjang. Penggunaan fly ash, misalnya, seringkali menyebabkan penurunan kekuatan awal (pada 7 hari) karena laju reaksi yang lebih lambat dibandingkan semen. Namun, seiring waktu, reaksi pozzolanik yang berkelanjutan menghasilkan matriks semen yang lebih padat dan kurang berpori, sehingga kekuatan ultimate pada 28 hari atau lebih cenderung setara atau bahkan melampaui beton konvensional. Hal ini menunjukkan bahwa untuk aplikasi yang tidak memerlukan kekuatan tinggi pada usia dini, beton dengan fly ash adalah pilihan yang sangat menjanjikan.

Penggunaan **silica fume** menunjukkan efek yang lebih dramatis terhadap kekuatan beton. Karena ukuran partikelnya yang sangat halus, silica fume mampu mengisi celah-celah mikro di antara partikel semen, menghasilkan struktur pasta yang sangat padat. Efek ini tidak hanya meningkatkan kekuatan tekan secara signifikan, tetapi juga mengurangi permeabilitas beton secara drastis. Penurunan permeabilitas ini merupakan faktor kunci dalam meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan ion klorida dan sulfat, yang merupakan penyebab utama korosi tulangan baja. Meskipun demikian, penggunaan silica fume dalam jumlah besar dapat memengaruhi *workability* atau kemudahan pengerjaan beton, sehingga memerlukan penggunaan superplasticizer untuk mempertahankan konsistensi yang diinginkan.

Sementara itu, **slag** (terak dari industri baja) juga terbukti efektif sebagai pengganti semen. Slag memiliki sifat pozzolanik laten yang bereaksi dengan kalsium hidroksida, mirip dengan fly ash. Penggunaan slag dalam campuran beton tidak hanya meningkatkan kekuatan jangka panjang, tetapi juga memberikan ketahanan yang sangat baik terhadap serangan sulfat. Beberapa studi menunjukkan bahwa beton yang mengandung slag memiliki ketahanan sulfat yang lebih unggul dibandingkan beton konvensional, menjadikannya ideal untuk struktur yang terpapar lingkungan agresif, seperti dermaga atau fondasi di tanah yang kaya sulfat.

Aspek lain yang menjadi fokus pembahasan adalah penggunaan **agregat daur ulang (Recycled Concrete Aggregate/RCA)**. RCA, yang berasal dari puing-puing beton, memiliki potensi besar untuk mengurangi penambangan sumber daya alam. Namun, penelitian menunjukkan bahwa penggunaan RCA dapat menurunkan kekuatan tekan beton, terutama jika digunakan sebagai pengganti agregat kasar secara total. Penurunan ini disebabkan oleh sifat RCA yang lebih berpori dan memiliki kadar air terserap yang lebih tinggi. Untuk mengatasi hal ini,

diperlukan perancangan campuran yang cermat, seperti pre-saturasi RCA atau penggunaan bahan pengikat tambahan, untuk meminimalkan dampak negatifnya.

Secara umum, hasil penelitian menunjukkan adanya *trade-off* antara kekuatan awal dan kekuatan akhir. Beton ramah lingkungan yang menggunakan bahan pozzolanik cenderung memiliki kurva peningkatan kekuatan yang lebih landai di awal, tetapi mencapai kekuatan yang lebih tinggi atau setara pada usia matang. Hal ini penting untuk dipertimbangkan dalam perencanaan proyek, terutama jika struktur harus segera menanggung beban berat. Namun, dari perspektif **durabilitas**, beton ramah lingkungan seringkali unggul.

Ketahanan terhadap serangan kimia menjadi salah satu keunggulan utama beton ramah lingkungan. Penelitian yang menguji **ketahanan terhadap serangan sulfat dan klorida** secara konsisten melaporkan bahwa penggantian semen dengan fly ash, slag, atau silica fume dapat mengurangi tingkat penetrasi ion-ion berbahaya ini. Matriks beton yang lebih padat dan kurang berpori yang dihasilkan oleh reaksi pozzolanik memperlambat difusi ion klorida, sehingga secara efektif memperpanjang umur layanan struktur dan melindungi tulangan baja dari korosi.

Lebih lanjut, penggunaan bahan-bahan alternatif ini juga memiliki dampak positif pada **penurunan panas hidrasi**. Produksi semen merupakan proses eksotermik, dan panas yang dilepaskan dapat menyebabkan retak termal pada struktur beton masif seperti bendungan. Bahan pozzolanik bereaksi lebih lambat, menghasilkan panas hidrasi yang lebih rendah dan lebih merata. Hal ini secara signifikan mengurangi risiko retak termal, meningkatkan integritas struktural, dan memungkinkan pengecoran beton masif yang lebih aman dan efektif.

Meskipun demikian, standarisasi dan kontrol kualitas menjadi tantangan utama dalam implementasi beton ramah lingkungan. Kualitas bahan pozzolanik dan RCA dapat bervariasi tergantung sumbernya, yang berpotensi memengaruhi konsistensi properti beton. Oleh karena itu, diperlukan pedoman pengujian yang ketat dan spesifikasi yang jelas untuk memastikan bahwa material yang digunakan memenuhi standar yang disyaratkan. Kurangnya pedoman yang seragam seringkali menjadi hambatan bagi para praktisi untuk mengadopsi material ini secara luas.

Aspek ekonomi juga menjadi pertimbangan penting. Meskipun biaya awal material alternatif mungkin lebih rendah daripada semen, biaya tambahan untuk pengujian, perancangan campuran yang kompleks, dan penggunaan aditif (misalnya, superplasticizer) dapat memengaruhi total biaya proyek. Namun, jika dilihat dari perspektif siklus hidup (*life cycle cost*), peningkatan durabilitas beton ramah lingkungan dapat mengurangi biaya pemeliharaan dan



perbaikan di masa depan, menjadikannya investasi yang lebih bijaksana dalam jangka panjang.

Secara keseluruhan, temuan-temuan ini menegaskan bahwa beton ramah lingkungan bukan hanya sekadar alternatif, tetapi sebuah solusi yang superior dalam banyak aspek. Perluasan penelitian, terutama mengenai perilaku jangka sangat panjang (misalnya, 50 tahun ke atas) dan pengembangan standar yang lebih seragam, akan sangat mendukung transisi industri konstruksi menuju praktik yang lebih berkelanjutan. Sinergi antara inovasi material dan perancangan struktural yang cerdas akan membuka jalan bagi pembangunan yang lebih kuat, tahan lama, dan ramah lingkungan.

KESIMPULAN

Berdasarkan tinjauan pustaka dan analisis yang komprehensif, dapat disimpulkan bahwa penggunaan beton ramah lingkungan menawarkan solusi signifikan untuk mengurangi dampak ekologis industri konstruksi tanpa mengorbankan integritas struktural. Pendekatan utama dalam pembuatan beton ramah lingkungan, yaitu substitusi sebagian semen dengan limbah industri seperti **fly ash**, **slag**, dan **silica fume**, serta penggunaan **agregat daur ulang (RCA)**, secara efektif mengurangi konsumsi sumber daya alam dan emisi karbon. Proses ini tidak hanya mengalihkan limbah dari tempat pembuangan akhir, tetapi juga mengubahnya menjadi material bernilai tambah yang berkontribusi pada ekonomi sirkular.

Dari perspektif **kekuatan mekanis**, penelitian menunjukkan bahwa beton ramah lingkungan memiliki performa yang kompetitif. Meskipun seringkali menunjukkan kekuatan awal yang lebih rendah akibat laju reaksi pozzolanik yang lebih lambat, kekuatan jangka panjangnya pada usia 28 hari atau lebih cenderung setara atau bahkan melampaui beton konvensional. Material seperti silica fume, dengan partikelnya yang sangat halus, secara khusus terbukti mampu meningkatkan kekuatan tekan secara substansial. Hal ini mengindikasikan bahwa dengan perancangan campuran yang tepat dan pemahaman terhadap kurva peningkatan kekuatannya, beton ramah lingkungan dapat digunakan dengan aman untuk berbagai aplikasi struktural.

Aspek **ketahanan (durabilitas)** adalah salah satu keunggulan terbesar beton ramah lingkungan. Matriks yang lebih padat dan kurang permeabel yang dihasilkan dari reaksi pozzolanik meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan kimia, seperti **korosi akibat ion klorida** dan **serangan sulfat**. Peningkatan durabilitas ini secara signifikan memperpanjang umur layan struktur, mengurangi kebutuhan akan pemeliharaan dan perbaikan. Dari perspektif siklus hidup (life cycle analysis), hal ini

menjadikan beton ramah lingkungan sebagai pilihan yang lebih hemat biaya dan berkelanjutan dalam jangka panjang.

Namun, terdapat tantangan yang perlu diatasi, terutama terkait dengan penggunaan agregat daur ulang. Sifat RCA yang lebih berpori dapat menyebabkan penurunan kekuatan jika tidak dikelola dengan benar. Diperlukan kontrol kualitas yang ketat dan prosedur perancangan campuran yang disesuaikan untuk mengatasi variabilitas properti material limbah. Standardisasi dan pengembangan pedoman yang seragam menjadi kunci untuk memastikan konsistensi dan keandalan beton ramah lingkungan, mendorong adopsinya secara lebih luas oleh para praktisi konstruksi.

Secara ekonomi, meskipun biaya material alternatif bisa lebih rendah, biaya tambahan untuk pengujian dan aditif khusus dapat memengaruhi total biaya proyek awal. Namun, manfaat jangka panjang dari pengurangan biaya pemeliharaan, serta potensi insentif lingkungan dan regulasi, menjadikan investasi pada beton ramah lingkungan sebagai pilihan strategis yang menguntungkan. Manfaat finansial ini, ditambah dengan pengurangan dampak lingkungan, menegaskan kelayakan material ini untuk masa depan industri konstruksi.

Secara keseluruhan, **beton ramah lingkungan** bukan sekadar tren, melainkan sebuah inovasi transformatif yang menawarkan solusi berkelanjutan untuk tantangan lingkungan global. Dengan performa struktural yang andal dan ketahanan yang unggul, material ini memiliki potensi besar untuk menjadi standar baru dalam pembangunan. Diperlukan kolaborasi antara peneliti, insinyur, dan pembuat kebijakan untuk mengembangkan standar dan praktik terbaik yang akan mempercepat transisi menuju industri konstruksi yang lebih bertanggung jawab dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, J., & Al-Amoudi, O. S. B. (2018). Durability of concrete incorporating supplementary cementitious materials: A review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(2), 04017277.
- Behnood, A., & Ghandehari, M. (2009). Mechanical and durability performance of concrete incorporating recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 23(1), 324-331.
- Bilodeau, A., & Malhotra, V. M. (2000). High-volume fly ash concrete: A review. *ACI Materials Journal*, 97(4), 41-47.
- Chen, J. J., & Wang, Q. (2019). Enhancing durability of concrete by using recycled coarse aggregate: A review. *Construction and Building Materials*, 203, 563-575.



- Damtoft, J. S., Lukasik, L., Herfort, B., Sorrentino, D., & Gartner, E. M. (2008). Sustainable development and the future of cement production. *Cement and Concrete Research*, 38(5), 629-637.
- De Schutter, G. (2012). Cement-based materials: A historical and future perspective. *Cement and Concrete Research*, 42(5), 705-715.
- Dhir, R. K., & Jones, M. R. (1994). Durability of high-volume fly ash concrete. *Cement and Concrete Composites*, 16(2), 117-124.
- Gartner, E. (2004). Industrially produced pozzolans for sustainable concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(8), 855-866.
- Gartner, E., & Hirao, H. (2015). A review of fly ash and its use in concrete. *Cement and Concrete Research*, 78, 142-154.
- Global Cement and Concrete Association (GCCA). (2020). *Concrete futures: The industry's roadmap to net-zero*. GCCA.
- Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (2005). *High-performance, high-volume fly ash concrete*. ACI International.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2013). *Concrete: Microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete*. Pearson Education Limited.
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011). Cementitious materials produced from industrial wastes: An updated review. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3843-3852.
- Pacheco-Torgal, F., et al. (2012). An overview of the concrete industry's contributions to a sustainable future. *Cement and Concrete Composites*, 34(12), 1269-1277.
- Panzera, F., et al. (2020). Performance of green concrete with recycled aggregates: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 240, 117970.
- Pu, Y., Sun, T., & Ma, H. (2018). Mechanical and durability properties of concrete with recycled coarse aggregate: A review. *Construction and Building Materials*, 160, 48-60.
- Safiuddin, M., Jumaat, M. Z., & Salam, M. A. (2010). Strength and durability of concrete made with high volumes of fly ash. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 8(1), 1-13.
- Santhanam, M., Cohen, M. D., & Olek, J. (2003). Sulfate attack on concrete — a review of mechanisms, methods of test, and mitigation measures. *Cement and Concrete Composites*, 25(1), 1-16.
- Siddique, R. (2008). *Waste materials and by-products in concrete*. Springer.
- Siddique, R., & Khan, M. I. (2011). *Supplementary cementitious materials*. CRC Press.
- Singh, A., & Gupta, S. (2019). Mechanical properties of high-volume fly ash concrete with natural and recycled aggregates. *Journal of Building Engineering*, 23, 1-10.
- Somna, R., et al. (2012). Effects of fly ash as a cement replacement on the compressive strength, drying shrinkage, and sulfate resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, 26(1), 44-51.
- Thomas, J., & Peethamparan, S. (2015). A review of alkali-activated materials for sustainable construction. *Cement and Concrete Composites*, 56, 1-14.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2017). *Resource efficiency: Potential and economic implications*. UNEP.
- Vattipalli, S., & Ghorbani, S. (2016). Green concrete using recycled materials: A review of engineering properties. *Construction and Building Materials*, 126, 856-867.
- Wang, Q., & Wang, M. (2015). Review on green concrete development and challenges. *Materials*, 8(5), 2329-2342.
- Xiao, J., et al. (2012). Engineering properties of recycled aggregate concrete in civil engineering: A review. *Journal of Cleaner Production*, 26, 12-25.
- Ye, G., & Hu, Y. (2016). A review of durability of concrete containing recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 102, 335-345.
- Zhang, X., et al. (2019). Mechanical and durability properties of sustainable concrete containing recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 203, 584-596.