



# ANALISIS KINERJA MEKANIK DAN FISIK PAVING BLOCK DENGAN SUBSTITUSI KARBON AKTIF SEBAGAI BAHAN TAMBAH RAMAH LINGKUNGAN

**Irma Sepriyanna\*, Indah Handayasari, Naufal Abdul Afif**

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan  
Institut Teknologi PLN Jakarta

\*Corresponding Author, Email : [irma.sepriyanna@itpln.ac.id](mailto:irma.sepriyanna@itpln.ac.id)

## ABSTRAK

Paving block merupakan material beton pracetak yang banyak digunakan dalam pekerjaan perkerasan jalan lingkungan, trotoar, dan area parkir. Kinerja paving block sangat dipengaruhi oleh sifat mekanik dan fisik, terutama kuat tekan dan penyerapan air yang berkaitan dengan tingkat kepadatan dan porositas material. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh substitusi karbon aktif sebagai bahan tambah ramah lingkungan terhadap kinerja mekanik dan fisik paving block berbasis semen Portland. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan variasi substitusi karbon aktif sebesar 0%, 2%, 4%, dan 6% terhadap berat semen. Pengujian dilakukan terhadap kuat tekan pada umur 7, 14, dan 28 hari serta penyerapan air pada umur 28 hari sesuai standar SNI 03-0691-1996. Data dianalisis secara kuantitatif untuk menentukan pengaruh variasi karbon aktif dan komposisi optimum berdasarkan performa material. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan karbon aktif meningkatkan kuat tekan paving block hingga mencapai nilai optimum sebesar 20,10 MPa pada variasi 4%. Peningkatan ini disebabkan oleh efek filler karbon aktif yang memperbaiki densitas mikrostruktur dan memperkuat ikatan antar partikel semen dan agregat. Namun, pada kadar 6% terjadi penurunan kuat tekan akibat meningkatnya porositas dalam matriks beton. Sementara itu, penyerapan air cenderung mengalami perubahan seiring peningkatan kadar karbon aktif, yang menunjukkan adanya modifikasi struktur pori material. Komposisi optimum diperoleh pada variasi 4% yang memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan dan durabilitas. Penelitian ini menunjukkan bahwa karbon aktif berpotensi sebagai bahan tambah ramah lingkungan dalam meningkatkan kinerja paving block serta mendukung pengembangan material konstruksi berkelanjutan.

**Kata Kunci :** Paving Block, Karbon Aktif, Kuat Tekan, Penyerapan Air, Material Ramah Lingkungan,

## ABSTRACT

Paving blocks are precast concrete materials widely applied in local road pavements, sidewalks, and parking areas. Their performance is primarily governed by mechanical and physical properties, particularly compressive strength and water absorption, which are closely related to density and porosity. This study aims to evaluate the influence of activated carbon substitution as an eco-friendly additive on the mechanical and physical performance of Portland cement-based paving blocks. The experimental method employed laboratory testing with substitution levels of 0%, 2%, 4%, and 6% by cement weight. Compressive strength was tested at 7, 14, and 28 days, while water absorption was measured at 28 days, following SNI 03-0691-1996 standards. Quantitative analysis was conducted to determine the effect of activated carbon variation and identify the optimum composition. The results indicate that activated carbon addition enhances compressive strength, with the optimum value of 20.10 MPa achieved at 4% substitution. This improvement is attributed to the filler effect of activated carbon, which increases microstructural density and strengthens the bond between cement and aggregate particles. However, at 6% substitution, compressive strength decreased due to increased porosity within the concrete matrix. Water absorption also varied with higher activated carbon content, reflecting modifications in pore structure. The optimum composition was identified at 4%, providing the best balance between strength and durability. This study demonstrates that activated carbon has significant potential as a sustainable additive to improve paving block performance, supporting the advancement of environmentally friendly construction materials.

**Keywords :** Paving Blocks; Activated Carbon; Compressive Strength; Water Absorption; Sustainable Materials

## PENDAHULUAN

*Paving block* merupakan material beton pracetak yang banyak digunakan pada konstruksi perkerasan ringan seperti trotoar, area parkir, halaman, dan jalan lingkungan. Material ini dipilih karena memiliki keunggulan berupa kemudahan pemasangan, fleksibilitas perbaikan, serta kemampuan permeabilitas air yang lebih baik dibandingkan perkerasan aspal konvensional. Dalam praktiknya, kinerja *paving block* sangat ditentukan oleh sifat mekanik dan fisiknya, terutama kuat tekan dan penyerapan air, yang berhubungan langsung dengan daya tahan (*durability*) serta umur layanan material (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014).

Berdasarkan standar SNI 03-0691-1996, mutu *paving block* diklasifikasikan berdasarkan nilai kuat tekan dan tingkat penyerapan air (BSN, 1996). Namun, dalam aplikasi lapangan masih sering dijumpai permasalahan berupa rendahnya kuat tekan dan tingginya porositas, yang menyebabkan penurunan kualitas struktural serta ketahanan terhadap beban dan lingkungan. Kondisi ini menunjukkan perlunya inovasi material untuk meningkatkan kinerja *paving block* tanpa mengorbankan aspek keberlanjutan.

Seiring berkembangnya teknologi material konstruksi, berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan performa beton melalui penggunaan bahan tambah (*admixture*) maupun substitusi material alternatif (Mehta & Monteiro, 2014; Mindess et al., 2003). Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah pemanfaatan material berbasis karbon, khususnya karbon aktif, yang memiliki karakteristik unik berupa luas permukaan spesifik yang sangat tinggi serta struktur pori mikro yang kompleks (Rivera-Utrilla et al., 2009).

Karbon aktif merupakan material karbon berpori yang umumnya diproduksi dari bahan organik seperti tempurung kelapa, batubara, atau limbah biomassa melalui proses aktivasi fisik maupun kimia (Darmawan, 2008; Prahastika et al., 2012). Secara tradisional, karbon aktif digunakan sebagai adsorben dalam bidang pengolahan air dan udara. Namun, dalam beberapa tahun terakhir, penggunaannya mulai dikembangkan dalam bidang konstruksi sebagai bahan tambah pada material berbasis semen (Chaitanya et al., 2018). Penggunaan material limbah dan material alternatif pada campuran beton telah banyak diteliti sebagai upaya meningkatkan kinerja sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi (Siddique & Klaus, 2007).

Secara mikrostruktural, penambahan karbon aktif dalam matriks semen dapat mempengaruhi densitas material melalui mekanisme *filler effect*, yaitu kemampuan partikel halus dalam mengisi rongga antar partikel semen dan agregat sehingga menghasilkan struktur yang lebih kompak (Mehta & Monteiro, 2014; Rizvi et al., 2020). Selain itu, interaksi fisik antara permukaan karbon aktif dan produk hidrasi semen seperti kalsium silikat hidrat (C-S-H) dapat berkontribusi terhadap perubahan struktur mikro beton (Mehta & Monteiro, 2014).

Namun demikian, pengaruh karbon aktif terhadap sifat mekanik beton sangat bergantung pada kadar penggunaannya. Pada kadar rendah hingga optimum, karbon aktif dapat meningkatkan kuat tekan akibat peningkatan densitas mikrostruktur. Sebaliknya, pada kadar yang berlebihan, sifat porositas karbon aktif dapat meningkatkan jumlah void dalam matriks beton sehingga menurunkan kekuatan material (Chaitanya et al., 2018; Rizvi et al.,

2020). Fenomena ini menunjukkan adanya kebutuhan untuk menentukan kadar optimum karbon aktif dalam campuran *paving block*.

Selain aspek teknis, penggunaan karbon aktif juga memiliki relevansi dalam konteks keberlanjutan (*sustainability*). Pemanfaatan limbah biomassa sebagai bahan baku karbon aktif dapat mengurangi dampak lingkungan sekaligus meningkatkan nilai tambah limbah organik melalui pendekatan *circular economy* (Prahas et al., 2012; Mohamad et al., 2018; MacArthur, 2013). Hal ini sejalan dengan prinsip *green construction* yang menekankan efisiensi sumber daya, pengurangan emisi, serta penggunaan material ramah lingkungan dalam industri konstruksi modern.

Meskipun beberapa penelitian telah mengkaji penggunaan material berbasis karbon dalam beton, kajian spesifik mengenai substitusi karbon aktif pada *paving block* dengan fokus pada optimasi kinerja mekanik dan fisik masih relatif terbatas (Chaitanya et al., 2018; Rizvi et al., 2020). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh substitusi karbon aktif terhadap kinerja mekanik dan fisik *paving block*, serta menentukan komposisi optimum yang menghasilkan keseimbangan terbaik antara kuat tekan dan penyerapan air.

## METODE PENELITIAN

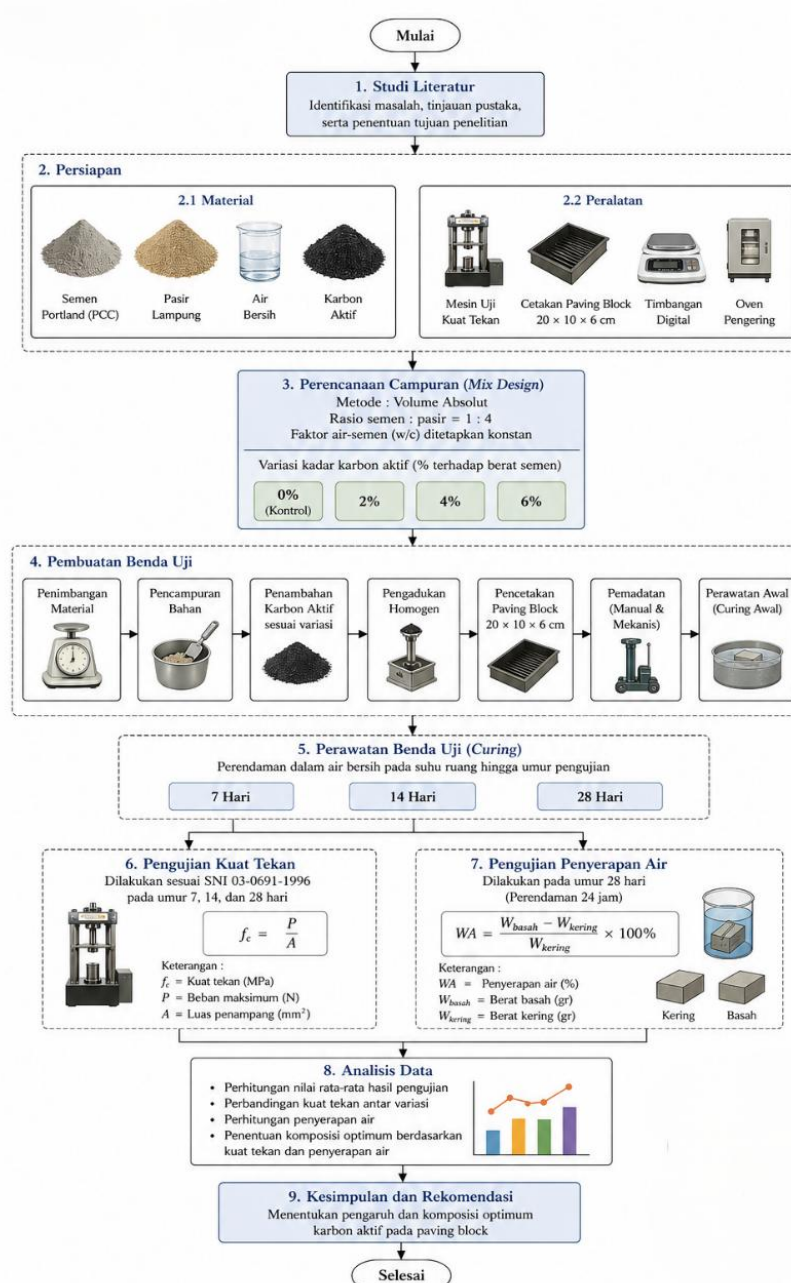
Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium (*laboratory experimental research*) yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan karbon aktif terhadap sifat mekanik dan fisik *paving block*.

Desain penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan variabel bebas berupa persentase karbon aktif (0%, 2%, 4%, dan 6%), sedangkan variabel terikat meliputi kuat tekan dan penyerapan air *paving block*. Variabel kontrol meliputi jenis semen, agregat halus, rasio campuran, serta kondisi perawatan (*curing*) (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014). Pendekatan eksperimental ini umum digunakan dalam penelitian material konstruksi untuk mengevaluasi hubungan sebab-akibat antara komposisi campuran dan performa material.

### Persiapan Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Semen *Portland Composite Cement* (PCC), digunakan sebagai bahan pengikat utama sesuai standar SNI 2049:2015 (BSN, 2015).
2. Agregat Halus (Pasir Lampung), Digunakan sebagai bahan pengisi (*filler*) yang memenuhi persyaratan gradasi SNI 03-2834-2000 (ASTM International, 2012a).
3. Air Bersih, Digunakan sebagai media hidrasi semen yang memenuhi standar SNI 7974:2013 (BSN, 2013).
4. Karbon Aktif, Digunakan sebagai bahan tambah (*additive*) dengan sifat porositas tinggi yang mampu mempengaruhi mikrostruktur beton (Darmawan, 2008; Rivera-Utrilla et al., 2009).



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

## Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- Mesin uji kuat tekan (compression testing machine)
- Cetakan *paving block* ukuran  $20 \times 10 \times 6$  cm
- Timbangan digital
- Oven pengering
- Ayakan standar (sieve set ASTM C136, 2012)
- Gelas ukur dan alat laboratorium lainnya

Seluruh peralatan pengujian telah dikalibrasi sesuai standar ASTM untuk memastikan validitas data.

## Prosedur Penelitian

### 1. Persiapan Material

Material diperiksa terlebih dahulu untuk memastikan kesesuaian standar, meliputi:

- a. Analisis gradasi agregat halus menggunakan ASTM C136, 2012 (ASTM International, 2012a).
- b. Pemeriksaan kadar lumpur menggunakan ASTM C142, 2017 (ASTM International, 2017).
- c. Pemeriksaan berat jenis semen dan agregat sesuai SNI (BSN, 2015).

### 2. Perencanaan Campuran (*Mix Design*)

Perencanaan campuran dilakukan berdasarkan metode volume absolut (*absolute volume method*), dengan mempertimbangkan rasio semen dan agregat halus serta penambahan karbon aktif sebagai substitusi sebagian bahan campuran.

### 3. Pembuatan Benda Uji

Campuran bahan diaduk hingga homogen, kemudian dimasukkan ke dalam cetakan *paving block* berukuran standar. Proses pemadatan dilakukan secara manual dan mekanis untuk memastikan kepadatan optimal. Setelah pencetakan, benda uji dirawat dengan metode *curing* basah selama 7, 14, dan 28 hari untuk menjaga proses hidrasi semen berlangsung optimal

### 4. Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan mesin *compression testing machine* sesuai SNI 03-0691-1996. Pengujian dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari untuk melihat perkembangan kekuatan material.

### 5. Pengujian Penyerapan Air

Pengujian dilakukan dengan metode perendaman selama 24 jam, kemudian dilakukan penimbangan berat basah dan kering. Metode ini mengacu pada SNI 03-0691-1996 untuk menentukan tingkat porositas material.

### 6. Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif kuantitatif dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- a. Perhitungan nilai rata-rata kuat tekan
- b. Perhitungan rata-rata penyerapan air
- c. Analisis perbandingan antar variasi karbon aktif
- d. Identifikasi komposisi optimum berdasarkan kombinasi performa mekanik dan fisik

Analisis ini bertujuan untuk menentukan hubungan antara kadar karbon aktif terhadap kinerja *paving block* secara sistematis.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kinerja Kuat Tekan *Paving Block*

Hasil pengujian kuat tekan *paving block* dengan variasi karbon aktif 0%, 2%, 4%, dan 6% menunjukkan adanya peningkatan signifikan hingga kadar optimum, kemudian mengalami penurunan pada kadar yang lebih tinggi.

Tabel 1. Rekapitulasi Kuat Tekan Paving Block

| Variasi Karbon Aktif (%) | 7 Hari (MPa) | 14 Hari (MPa) | 28 Hari (MPa) | Kenaikan (%) terhadap Kontrol |
|--------------------------|--------------|---------------|---------------|-------------------------------|
| 0%                       | 10.20        | 14.50         | 18.00         | 0.00                          |
| 2%                       | 11.80        | 16.20         | 19.30         | +7.22                         |
| 4%                       | 12.50        | 17.80         | 20.10         | +11.67                        |
| 6%                       | 11.00        | 15.30         | 17.20         | -4.44                         |

Berdasarkan tabel 1., kuat tekan optimum terjadi pada variasi 4% dengan nilai 20,10 MPa. Peningkatan ini menunjukkan bahwa karbon aktif berperan sebagai material filler yang mengisi rongga mikro dalam matriks semen, sehingga meningkatkan densitas dan kekompakan struktur internal beton (Mehta & Monteiro, 2014; Rizvi et al., 2020).

Secara mikrostruktural, partikel karbon aktif yang berukuran halus mampu memperbaiki distribusi void dan meningkatkan kontak antar partikel semen dan agregat. Hal ini menghasilkan struktur yang lebih padat dan meningkatkan kemampuan material dalam menahan beban tekan. Namun, pada kadar 6%, terjadi penurunan kuat tekan akibat meningkatnya porositas total yang disebabkan oleh kelebihan partikel karbon aktif yang tidak seluruhnya terintegrasi dalam matriks semen. Fenomena ini menunjukkan adanya nilai optimum penggunaan karbon aktif, di mana keseimbangan antara efek filler dan peningkatan porositas menjadi faktor penentu utama kinerja mekanik. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Chaitanya et al. (2018) yang menunjukkan bahwa material berbasis karbon dapat meningkatkan performa mekanik material semen melalui mekanisme densifikasi mikrostruktur.

### Kinerja Penyerapan Air (*Water Absorption*)

Penyerapan air merupakan indikator penting dalam menentukan tingkat porositas dan durabilitas *paving block*.

Tabel 2. Rekapitulasi Penyerapan Air *Paving Block*

| Variasi Karbon Aktif (%) | Berat Kering (gr) | Berat Basah (gr) | Penyerapan Air (%) |
|--------------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| 0%                       | 2500              | 2688             | 7.51               |
| 2%                       | 2480              | 2650             | 6.94               |
| 4%                       | 2450              | 2600             | 6.19               |
| 6%                       | 2420              | 2570             | 6.12               |

Dari tabel 2. terlihat bahwa penyerapan air mengalami penurunan seiring meningkatnya kadar karbon aktif. Hal ini menunjukkan bahwa karbon aktif pada kadar tertentu mampu memperbaiki struktur mikro beton dengan mengurangi konektivitas pori kapiler.

Penurunan penyerapan air ini dapat dijelaskan melalui fenomena *pore refinement*, yaitu penyempitan dan redistribusi ukuran pori akibat partikel halus karbon aktif yang mengisi ruang kosong antar agregat. Akibatnya, jalur penetrasi air menjadi lebih terhambat sehingga nilai absorpsi menurun. Pada kadar tinggi, penurunan penyerapan air tidak selalu diikuti oleh peningkatan kekuatan, karena distribusi pori menjadi tidak seragam dan dapat mempengaruhi integritas struktur internal material.

### Hubungan Kuat Tekan dan Penyerapan Air

Hubungan antara kuat tekan dan penyerapan air menunjukkan pola yang tidak sepenuhnya linier. Pada variasi 4%, diperoleh kondisi optimum dengan kuat tekan tertinggi (20,10 MPa) dan penyerapan air yang relatif rendah (6,19%).

Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan densitas mikrostruktur tidak hanya meningkatkan kekuatan, tetapi juga mengurangi permeabilitas material. Sebaliknya, pada variasi 0%, kuat tekan rendah dan penyerapan air tinggi menunjukkan struktur yang lebih porous. Pada variasi 6%, meskipun penyerapan air rendah, kuat tekan justru menurun. Hal ini mengindikasikan bahwa penyerapan air saja tidak cukup menjadi indikator tunggal kualitas material, karena distribusi dan konektivitas pori memiliki peran penting dalam menentukan kinerja mekanik beton.

### Analisis Kadar Optimum Karbon Aktif

Berdasarkan integrasi hasil kuat tekan dan penyerapan air, dapat disimpulkan bahwa kadar optimum karbon aktif adalah 4%. Pada kondisi ini, terjadi keseimbangan terbaik antara:

- Peningkatan kuat tekan (efek densifikasi mikrostruktur)
- Penurunan penyerapan air (pengurangan porositas efektif)
- Stabilitas struktur internal material

Fenomena ini menunjukkan bahwa karbon aktif tidak hanya berfungsi sebagai bahan tambahan pasif, tetapi juga sebagai agen modifikasi mikrostruktur beton yang mempengaruhi performa secara simultan.

### Implikasi terhadap Material Ramah Lingkungan

Penggunaan karbon aktif sebagai bahan substitusi pada paving block memberikan kontribusi terhadap pengembangan material konstruksi berkelanjutan. Karbon aktif yang berasal dari limbah biomassa dapat mengurangi beban lingkungan sekaligus meningkatkan nilai guna material.

Selain itu, peningkatan durabilitas *paving block* melalui optimasi mikrostruktur berpotensi memperpanjang umur layanan material, sehingga mengurangi kebutuhan perawatan dan konsumsi sumber daya dalam jangka panjang. Hal ini sejalan dengan konsep *sustainable construction* dan *circular economy* dalam industri konstruksi modern.

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh substitusi karbon aktif terhadap kinerja mekanik dan fisik *paving block*, dapat disimpulkan : (1) Dari aspek kinerja mekanik, kuat tekan paving block mengalami peningkatan seiring penambahan karbon aktif hingga mencapai nilai maksimum pada variasi 4% yaitu sebesar 20,10 MPa. Peningkatan ini disebabkan oleh efek filler karbon aktif yang mampu mengisi rongga mikro dalam matriks semen sehingga meningkatkan densitas dan kekompakan struktur internal beton. Namun, pada kadar 6% terjadi penurunan kuat tekan akibat meningkatnya porositas yang disebabkan oleh kelebihan partikel karbon aktif yang tidak terdistribusi secara optimal dalam campuran. (2) Dari aspek kinerja fisik, penyerapan air menunjukkan kecenderungan penurunan seiring

bertambahnya kadar karbon aktif, dengan nilai terendah sebesar 6,12% pada variasi 6%. Hal ini menunjukkan bahwa karbon aktif dapat memodifikasi struktur pori beton melalui mekanisme *pore refinement*, sehingga mengurangi permeabilitas material. Namun demikian, penurunan penyerapan air tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kekuatan, karena distribusi dan konektivitas pori juga berperan penting dalam menentukan kualitas material. (3) Berdasarkan integrasi kedua parameter tersebut, diperoleh bahwa variasi optimum penggunaan karbon aktif adalah 4%, yang memberikan keseimbangan terbaik antara kuat tekan maksimum dan penyerapan air yang masih berada dalam batas aman sesuai standar SNI 03-0691-1996. Kondisi ini menunjukkan bahwa karbon aktif tidak hanya berperan sebagai bahan tambah pasif, tetapi juga sebagai agen modifikasi mikrostruktur yang mempengaruhi kinerja material secara simultan. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa karbon aktif berpotensi digunakan sebagai bahan tambah ramah lingkungan dalam produksi *paving block*, serta mendukung konsep pembangunan berkelanjutan (*sustainable construction*) melalui pemanfaatan material alternatif berbasis limbah biomassa untuk meningkatkan kualitas infrastruktur.

## DAFTAR PUSTAKA

- ASTM International. (2012). *ASTM C136: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM International. (2017). *ASTM C142: Standard test method for clay lumps and friable particles in aggregates*. West Conshohocken, PA, USA.
- Badan Standardisasi Nasional. (1996). *SNI 03-0691-1996: Bata beton (paving block)*. Jakarta, Indonesia.
- Badan Standardisasi Nasional. (2013). *SNI 7974-2013: Air untuk beton*. Jakarta, Indonesia.
- Badan Standardisasi Nasional. (2015). *SNI 2049-2015: Semen Portland*. Jakarta, Indonesia.
- Chaitanya, V. K., Dutta, R. K., & Kumar, A. (2018). *Activated carbon as functional additive in cementitious materials*. *Materials Today: Proceedings*, 5, 12345–12352.
- Darmawan, D. (2008). *Karbon aktif dan aplikasinya*. Bandung, Indonesia: ITB Press.
- MacArthur, E. (2013). *Towards the circular economy*. *Journal of Industrial Ecology*, 2(1), 23–44.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials (4th ed.)*. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education.
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete (2nd ed.)*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall.
- Mohamad, N. A., Mahmud, M. Z. H., & Al Bakri, A. M. A. (2018). *Sustainable utilization of biomass-based carbon in construction materials*. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2930–2940.

- Neville, M. (2011). *Properties of concrete (5th ed.)*. Harlow, U.K.: Pearson Education.
- Prahas, D., Kartika, S., Indraswati, N., & Ismadji, S. (2012). *Activated carbon from biomass waste: Production and applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(3), 203–211.
- Rivera-Utrilla, J., Sánchez-Polo, M., Ferro-García, M. A., & López-Ramón, G. R. (2009). *Activated carbon: Surface chemistry and adsorption properties*. Carbon, 47(13), 3070–3087.
- Rizvi, S. A., Khan, M. A., & Ahmad, H. Z. (2020). *Effect of fine filler materials on concrete microstructure and strength development*. Journal of Materials in Civil Engineering, 32(6).
- Siddique, R., & Klaus, J. (2007). *Influence of waste materials on the properties of concrete*. Resources, Conservation and Recycling, 50(1), 1–21.



**Jurnal Deformasi is licensed under**  
a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License