

Kajian Studi Eksperimental Kompratif Beton HSC dengan Penambahan Serat Baja dan Abu Cangkang Sawit

Heri Sutiyo^{1*}, Nursyamsi Nursyamsi², Johannes Tarigan³, Ricky Bakara⁴, Soraya Muthma Innah Nasution⁵

Universitas Sumatera Utara, Indonesia^{1,2,3}

Politeknik Negeri Medan, Indonesia^{4,5}

Email: herisutiyo@students.usu.ac.id*, nursyamsi@usu.ac.id, johannes.tarigan@usu.ac.id, rickybakara@polmed.ac.id, sorayamuthma@polmed.ac.id

Kata kunci:

abu cangkang sawit, serat baja, beton mutu tinggi, kuat tekan, kuat lentur, beton komposit

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan abu cangkang sawit (ACS) sebagai bahan pengganti 15% semen dan penambahan serat baja 2% terhadap sifat mekanis beton mutu tinggi (High Strength Concrete/HSC). Pengujian meliputi uji beton segar (slump flow, T50 time, V-funnel, L-box) dan beton keras (kuat tekan, kuat tarik belah, kuat lentur). Hasil menunjukkan seluruh parameter beton segar memenuhi standar EFNARC untuk Self-Compacting Concrete (SCC). Kuat tekan meningkat signifikan dari 30,89 MPa (beton normal) menjadi 90,25 MPa (HSC)—peningkatan 192% atau 65,7% lebih tinggi dari target mutu. Kuat tarik belah meningkat dari 2,95 MPa menjadi 5,63 MPa (90,8%), sedangkan kuat lentur meningkat dari 6,27 MPa menjadi 16,69 MPa (166%) pada balok komposit dengan lapisan HSC 5 cm. Peningkatan ini disebabkan oleh reaksi pozzolanik abu cangkang sawit yang menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan dan kontribusi serat baja dalam menahan propagasi retak serta meningkatkan daktilitas. Analisis displacement menunjukkan peningkatan ketebalan lapisan HSC meningkatkan kekakuan lentur dan menurunkan lendutan maksimum. Kombinasi ACS 15% dan serat baja 2% terbukti efektif meningkatkan performa mekanis dan struktural beton hingga tiga kali lipat dibanding beton normal, sekaligus mendukung material ramah lingkungan dalam teknologi beton modern dengan memanfaatkan limbah industri kelapa sawit.

Keywords:

palm shell ash, steel fibre, high strength concrete, compressive strength, flexural strength, composite concrete

ABSTRACT

This study aims to analyse the effect of palm shell ash (PSA) as a 15% partial cement replacement combined with 2% steel fibres on the mechanical properties of High Strength Concrete (HSC). Testing included fresh concrete tests (slump flow, T50 time, V-funnel, L-box) and hardened concrete tests (compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength). Results showed all fresh concrete parameters met EFNARC standards for Self-Compacting Concrete (SCC). Compressive strength increased significantly from 30.89 MPa (normal concrete) to 90.25 MPa (HSC)—a 192% improvement or 65.7% higher than the target strength. Splitting tensile strength rose from 2.95 MPa to 5.63 MPa (90.8%), while flexural strength increased from 6.27 MPa to 16.69 MPa (166%) in composite beams with 5 cm HSC layers. The enhancement is attributed to the pozzolanic reaction of palm shell ash producing additional calcium silicate hydrate (C-S-H) and the reinforcing effect of steel fibres in crack resistance and ductility improvement. Displacement analysis revealed that increasing HSC layer thickness improved flexural stiffness and reduced maximum deflection. The combination of 15% palm shell ash and 2% steel fibres effectively enhanced mechanical and structural performance of concrete up to three times compared to normal concrete, while

PENDAHULUAN

Beton mutu tinggi (High Strength Concrete, HSC) menjadi pilihan utama dalam konstruksi modern karena kemampuan menahan beban tekan yang tinggi, namun memiliki kelemahan pada sifat tarik dan keretakan yang relatif rapuh (Fendria et al., 2024). HSC umumnya didefinisikan sebagai beton dengan kuat tekan rata-rata silinder melebihi 50-60 MPa pada usia 28 hari, tergantung standar setempat (Neville, 2012). Peningkatan kuat tekan HSC sering diiringi dengan penurunan daktilitas dan kapasitas deformasi pasca-retak, sehingga beton menjadi lebih rapuh dan sensitif terhadap retak mendadak, terutama dalam kondisi beban lentur dan tarik (Song & Hwang, 2004). Fenomena ini menciptakan kebutuhan mendesak untuk mengembangkan teknologi beton yang tidak hanya memiliki kekuatan tinggi tetapi juga daktilitas memadai untuk aplikasi struktural kritis (Hakiki, 2025).

Penambahan serat baja (steel fiber) pada campuran beton telah banyak diteliti sebagai alternatif untuk meningkatkan ketangguhan, menahan propagasi retak, dan memperbaiki perilaku pasca-retak beton sehingga meningkatkan daya tahan struktur. Studi komprehensif oleh Bai et al. (2023) menunjukkan bahwa beton bertulang serat baja (Steel Fiber Reinforced Concrete/SFRC) secara konsisten memberikan peningkatan signifikan pada kekuatan tarik (20-40%), toughness (energi serap hingga kegagalan meningkat 300-500%), dan kontrol retak dibanding beton normal. Serat baja bekerja melalui mekanisme crack-bridging yang menghambat propagasi mikroretak menjadi makroretak, mengubah mode kegagalan dari brittle failure menjadi ductile failure yang lebih terkontrol.

Serat baja bekerja sebagai jembatan retak (crack-bridging) yang menghambat propagasi mikroretak dan memperbaiki perilaku pasca-retak, sehingga meningkatkan toughness dan kapasitas deformasi beton (Kumar et al., 2023). Studi eksperimen menunjukkan bahwa penambahan serat baja meningkatkan kekuatan tarik belah, kapasitas lentur, energi yang diserap sampai kegagalan, dan mengubah pola retak dari rapuh menjadi lebih terkontrol (Song & Hsu, 2009). Namun, besar pengaruh bergantung pada bentuk dan ukuran serat, aspek rasio, distribusi, orientasi acak, dan persentase volume serat (Li et al., 2016). Penambahan serat biasanya tidak menaikkan kuat tekan secara signifikan pada volume rendah, tetapi secara jelas meningkatkan post-crack behavior (toughness) dan kapasitas lentur.

Di sisi lain, isu keberlanjutan dalam industri konstruksi semakin mendesak mengingat produksi semen Portland menyumbang sekitar 8% dari total emisi CO₂ global (Scrivener et al., 2018). Sektor konstruksi bertanggung jawab atas 39% emisi karbon global dan konsumsi 50% sumber daya alam, menjadikan inovasi material ramah lingkungan sebagai prioritas strategis dalam pembangunan berkelanjutan. Substitusi parsial semen dengan material pozzolanik dari limbah industri menawarkan solusi ganda: mengurangi jejak karbon sekaligus mengelola limbah industri yang melimpah (Amstrong & Saputra, 2025; Aulia et al., 2025; Istiyani et al., 2025; Sikki et al., 2025).

Abu cangkang sawit (ACS) merupakan hasil pembakaran limbah padat dari industri pengolahan minyak kelapa sawit yang memiliki potensi sebagai bahan pengganti parsial semen karena kandungan silika yang cukup tinggi. Indonesia sebagai produsen minyak sawit terbesar dunia menghasilkan sekitar 20-25 juta ton limbah cangkang sawit per tahun (Olutoge et al.,

2016). Hanya sebagian kecil yang dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler, sisanya dibuang ke lingkungan dan berpotensi mencemari tanah dan air. Pemanfaatan abu cangkang sawit dalam produksi beton menawarkan solusi inovatif untuk mengelola limbah ini sambil mengurangi ketergantungan pada semen Portland. Menurut penelitian Muhammad et al. (2021), abu cangkang sawit sebagai pengganti sebagian semen menunjukkan peningkatan signifikan dalam kekuatan tekan beton setelah 56 hari curing, melebihi kekuatan beton Portland biasa (OPC). Penelitian mengindikasikan bahwa campuran beton dengan PSA memerlukan waktu curing lebih lama (optimal pada 56-90 hari dibanding 28 hari untuk OPC) namun memberikan hasil kekuatan akhir yang lebih optimal secara keseluruhan. PSA berperan sebagai bahan pozzolan yang bereaksi dengan kalsium hidroksida Ca(OH)_2 —produk sampingan hidrasi semen—menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan yang memperkuat struktur mikro beton dan mengurangi porositas.

Penelitian yang dilakukan oleh Olutoge et al. (2016) menunjukkan bahwa beton dengan campuran abu cangkang sawit sampai 10% penggantian semen menghasilkan kekuatan tekan yang meningkat dan stabil. Studi ini menemukan bahwa substitusi optimal berada pada rentang 10-15%, di mana pada persentase ini aktivitas pozzolanik maksimal tanpa mengorbankan workability beton segar. Pada substitusi di atas 20%, terjadi penurunan kuat tekan karena kandungan semen yang tidak mencukupi untuk reaksi hidrasi awal. Abu cangkang sawit memiliki kandungan silika dioksida (SiO_2) yang cukup tinggi sehingga berfungsi baik sebagai pozzolan. Penggunaan abu ini selain meningkatkan kekuatan jangka panjang juga bermanfaat untuk mengurangi biaya produksi (pengurangan 10-15% penggunaan semen dapat menurunkan biaya hingga 8-12%) dan dampak lingkungan dari produksi semen (setiap ton semen yang digantikan mengurangi emisi CO_2 sekitar 0,9 ton).

Meskipun penelitian terdahulu telah mengeksplorasi penambahan serat baja atau pemanfaatan abu cangkang sawit secara terpisah, kajian yang mengintegrasikan kedua material ini untuk menghasilkan beton HSC masih sangat terbatas, khususnya di Indonesia. Tinjauan literatur sistematis terhadap database Scopus dan Web of Science (2015-2024) menunjukkan bahwa dari 347 publikasi tentang steel fiber reinforced concrete dan 89 publikasi tentang palm shell ash concrete, hanya 3 publikasi (<1%) yang mengkaji kombinasi keduanya, dan tidak ada satupun yang fokus pada aplikasi beton HSC dengan analisis komprehensif terhadap perilaku lentur balok komposit. Kekosongan penelitian ini menciptakan gap pengetahuan signifikan mengingat potensi sinergi antara sifat pozzolanik abu cangkang sawit dengan efek penguatan serat baja dapat menghasilkan material superior yang memenuhi tuntutan struktural dan keberlanjutan secara simultan.

Urgensi penelitian ini semakin tinggi dalam konteks pembangunan infrastruktur Indonesia yang masif, di mana kebutuhan beton berkualitas tinggi terus meningkat sejalan dengan proyek-proyek strategis nasional seperti jalan tol, jembatan bentang panjang, dan bangunan tinggi. Industri konstruksi Indonesia mengkonsumsi sekitar 80 juta ton semen per tahun dengan pertumbuhan 6-8% annually, menghasilkan jejak karbon yang sangat besar. Di sisi lain, industri kelapa sawit Indonesia yang menghasilkan 20-25 juta ton limbah cangkang per tahun menghadapi tantangan pengelolaan limbah yang belum optimal. Penelitian ini menjawab tantangan ganda ini dengan mengembangkan teknologi beton yang lebih kuat, durable, dan ramah lingkungan melalui pemanfaatan limbah industri lokal.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dirancang untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan kritis berikut: (1) Berapa besarnya peningkatan kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur beton HSC dengan kombinasi abu cangkang sawit 15% dan serat baja 2% dibandingkan beton normal? (2) Bagaimana karakteristik beton segar (workability) dengan penambahan kedua material tersebut, apakah masih memenuhi standar Self-Compacting Concrete (SCC)? (3) Bagaimana pengaruh variasi ketebalan lapisan HSC (1 cm, 3 cm, 5 cm) terhadap kapasitas lentur dan pola deformasi balok komposit? (4) Bagaimana validasi hasil eksperimental dengan analisis teoritis (metode Unit Load) dan numerik (SAP2000)? (5) Bagaimana analisis cost-benefit dari penggunaan beton HSC ini dalam konteks aplikasi struktural praktis?

Tujuan utama penelitian ini adalah: (1) Menganalisis secara kuantitatif besarnya peningkatan kuat tekan, kuat tarik langsung, dan kuat lentur pada beton normal dan beton HSC dengan kombinasi serat baja 2% dan abu cangkang sawit 15% sebagai pengganti sebagian semen; (2) Membandingkan karakteristik beton segar dan keras antara beton normal dan beton HSC, dengan evaluasi terhadap parameter workability (slump flow, T50 time, V-funnel, L-box) dan compliance terhadap standar EFNARC untuk Self-Compacting Concrete; (3) Mengukur dan menganalisis nilai kuat lentur dari balok komposit yang terdiri dari kombinasi beton normal dan beton HSC dengan variasi ketebalan lapisan HSC (0 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm) untuk menentukan konfigurasi optimal dari perspektif kinerja struktural; (4) Menghitung dan membandingkan deformasi maksimum balok menggunakan metode analitis (Unit Load/Castigliano), simulasi numerik (SAP2000), dan validasi eksperimental laboratorium untuk mengevaluasi akurasi prediksi teoritis; serta (5) Menganalisis perbandingan biaya produksi antara beton normal dan beton HSC dengan berbagai variasi lapisan untuk menilai feasibilitas ekonomis dan efisiensi material.

Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan baik secara akademis maupun praktis. Secara teoritis, penelitian ini memperkaya body of knowledge tentang interaksi antara material pozzolanik (abu cangkang sawit) dan fiber reinforcement (serat baja) dalam meningkatkan sifat mekanis beton HSC, khususnya terkait mekanisme pada tingkat mikro-struktur. Secara praktis, penelitian ini menghasilkan data eksperimental komprehensif yang dapat dijadikan referensi untuk desain campuran beton HSC ramah lingkungan, memberikan solusi inovatif pemanfaatan limbah industri kelapa sawit yang melimpah di Indonesia, serta mendukung target pemerintah dalam pembangunan infrastruktur berkelanjutan (green construction) sebagaimana diamanatkan dalam Sustainable Development Goals (SDGs) khususnya Goal 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure) dan Goal 12 (Responsible Consumption and Production). Hasil penelitian ini juga dapat menjadi basis untuk pengembangan standar nasional penggunaan abu cangkang sawit dalam produksi beton struktural.

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Rekayasa dan Bahan Beton Program Studi Teknik Sipil Universitas Sumatera Utara. Persyaratan mutu beton normal adalah $f_c \geq 25$ MPa, sedangkan persyaratan mutu beton HSC adalah $f_c \geq 50$ MPa. Perawatan benda uji dilakukan di Laboratorium Rekayasa Konstruksi Teknik Sipil Universitas Sumatera Utara. Beton yang

diuji berumur 28 hari, yang merupakan waktu standar untuk mencapai kekuatan maksimum pada beton.

Material Penelitian

Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- a. Semen Portland biasa (Ordinary Portland Cement, OPC) sebagai bahan dasar yang diperoleh dari PT Agung Beton di Siantar
- b. Abu cangkang sawit (ACS) dari PT. London Sumatera yang digunakan sebagai pengganti 15% dari berat semen
- c. Agregat halus (pasir) yang lolos ayakan berukuran 1,18 mm (no.16)
- d. Agregat kasar berupa kerikil (split 1x1 cm) dari stone crusher plant di Binjai, Sumatera Utara
- e. Serat baja sebesar 2% dari volume beton yang diperoleh dari online
- f. Bahan kimia superplasticizer Tancem 60 RA (SikaViscocrete 3115N dari PT Sika Indonesia)
- g. Air bersih untuk campuran dan perawatan beton

Pengujian Properties Agregat

Pengujian properties agregat dilakukan untuk memastikan kualitas material memenuhi standar yang berlaku. Pengujian yang dilakukan meliputi:

- a. Analisis saringan agregat halus dan kasar sesuai SNI 03-1968-1990 untuk mengetahui distribusi ukuran butiran dan menilai kesesuaian gradasi. Nilai Fineness Modulus (FM) dihitung untuk mengklasifikasikan agregat.
- b. Berat jenis dan penyerapan air agregat sesuai SNI 03-1970-1990 untuk agregat halus dan SNI 03-1969-1990 untuk agregat kasar.
- c. Kadar air agregat sesuai SNI 03-1971-1999 untuk menentukan jumlah air yang tersimpan dalam agregat sebelum pencampuran.
- d. Kandungan lumpur agregat sesuai SNI 03-4142-1996 untuk menentukan persentase partikel halus yang menempel pada permukaan agregat.
- e. Berat isi agregat sesuai SNI 03-4804-1998 untuk menentukan massa agregat per satuan volume.

Abu cangkang sawit dianalisis komposisi kimianya menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) di UPT Laboratorium Penelitian Terpadu Universitas Sumatera Utara untuk mengetahui kandungan silika dan unsur kimia lainnya.

Komposisi Campuran Beton

Komposisi campuran beton disusun berdasarkan beberapa variasi percobaan yang mengacu pada rekomendasi ACI 239-19 (2019). Desain campuran untuk beton normal dan beton kuat tinggi (High Strength Concrete/HSC) menggunakan bahan penyusun utama berupa Ordinary Portland Cement (OPC), abu cangkang sawit, serat baja, serta superplasticizer sebagai bahan tambahan untuk meningkatkan kinerja campuran.

Pembuatan Benda Uji

Penelitian ini menggunakan tiga jenis benda uji dengan spesifikasi sebagai berikut:

- a. Sampel silinder berukuran Ø100 mm x 200 mm sebanyak 3 buah untuk setiap variasi beton normal dan beton HSC untuk pengujian kuat tekan
- b. Spesimen Dog Bone sebanyak 3 sampel untuk setiap variasi untuk pengujian kuat tarik langsung

- c. Sampel balok komposit yang terdiri dari kombinasi beton normal dan HSC dengan variasi ketebalan lapisan HSC (1 cm, 3 cm, dan 5 cm) dengan dimensi 15x15 cm, 15x16 cm, 15x18 cm, 15x20 cm masing-masing dengan bentang 60 cm, sebanyak 3 sampel untuk setiap variasi

Proses pembuatan benda uji diawali dengan pencampuran agregat halus dan agregat kasar hingga merata, kemudian ditambahkan semen dan material inovatif yang telah ditentukan, lalu diaduk kembali sampai campuran menjadi homogen. Setelah seluruh material tercampur dengan baik, air ditambahkan sesuai dengan proporsi campuran yang telah direncanakan, dan proses pengadukan dilanjutkan hingga campuran dalam molen mencapai kondisi homogen.

Perawatan Benda Uji

Setelah proses pengecoran dan pencetakan beton selesai, benda uji dibiarkan di ruang terbuka selama 24 jam sebelum dilakukan pembongkaran cetakan. Tahap berikutnya adalah pemberian identitas atau penandaan pada setiap benda uji untuk memudahkan proses identifikasi saat pengujian dilakukan. Perawatan beton (curing) dilaksanakan dengan metode perendaman dalam air selama 28 hari guna memastikan proses hidrasi berlangsung optimal dan kekuatan beton berkembang secara maksimal. Proses curing dilakukan untuk menjamin bahwa reaksi hidrasi semen berlangsung optimal tanpa mengalami gangguan. Setelah melewati tahap perendaman selama 28 hari, benda uji diangkat dari bak perendaman dan dikeringkan selama 24 jam sebelum dilakukan pengujian.

Pengujian Beton Segar

Pengujian pada beton segar High Strength Concrete (HSC) dalam penelitian ini dilakukan dengan mengacu pada pedoman The European Federation of National Associations Representing for Concrete (EFNARC, 2005) yang mencakup parameter-parameter berupa slump flow, T50, V-funnel, dan L-shape box. Pengujian ini bertujuan untuk menilai sifat aliran, kemampuan mengisi cetakan, kemampuan melewati tulangan, serta risiko segregasi beton segar sebelum proses pengerasan berlangsung.

Pengujian Sifat Mekanis Beton

Pengujian sifat mekanis beton dilakukan setelah benda uji mencapai umur 28 hari dengan menggunakan peralatan sebagai berikut:

- a. Uji Kuat Tekan: Menggunakan mesin uji tekan (Compression Testing Machine) di Laboratorium Bahan dan Rekayasa Beton, dengan pembebanan secara bertahap dan kontinu tanpa hentakan hingga benda uji mengalami kehancuran total. Beban maksimum yang mampu ditahan dicatat dan nilai kuat tekan dihitung berdasarkan perbandingan antara beban maksimum dengan luas penampang benda uji.
- b. Uji Kuat Tarik Langsung: Menggunakan mesin uji tarik (Tensile Strength Test Machine) di Laboratorium Struktur dengan spesimen Dog Bone. Beban diberikan secara bertahap hingga benda uji mengalami retak atau terbelah.
- c. Uji Kuat Lentur: Menggunakan mesin uji kuat lentur (Flexural Strength Test Machine) di Laboratorium Struktur dengan metode pembebanan dua titik. Beban diberikan secara bertahap dan merata hingga benda uji mengalami retak atau patah pada bagian tengah bentangnya.

Analisis Deformasi

Deformasi balok yang terjadi di bawah beban dianalisis melalui dua pendekatan: pertama, perhitungan manual menggunakan metode Unit Load (Castigliano), dan kedua, simulasi numerik menggunakan perangkat lunak SAP2000 untuk validasi hasil. SAP2000 adalah program komputer komprehensif yang dikembangkan oleh Computers and Structures, Inc. (CSI) untuk melakukan analisis struktural dan perancangan pada bangunan maupun infrastruktur lainnya dengan memanfaatkan Metode Elemen Hingga (Finite Element Method – FEM) serta metode kekakuan (stiffness method).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Material Properties

Hasil pengujian properties agregat menunjukkan bahwa material yang digunakan memenuhi standar mutu yang berlaku. Untuk agregat halus (pasir), diperoleh nilai Fineness Modulus (FM) sebesar 2,75 yang termasuk dalam kategori pasir sedang sesuai SNI 03-1968-1990 (rentang $2,60 < FM < 2,90$). Berat jenis SSD pasir adalah 2,62 dengan absorpsi 1,85%, sedangkan berat jenis SSD agregat kasar adalah 2,68 dengan absorpsi 0,92%. Kadar lumpur pada pasir sebesar 2,34% dan agregat kasar 0,87%, keduanya memenuhi persyaratan SNI 03-4142-1996 yang mensyaratkan kadar lumpur maksimum 5% untuk agregat halus dan 1% untuk agregat kasar.

Hasil pengujian abu cangkang sawit menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) di UPT Laboratorium Penelitian Terpadu Universitas Sumatera Utara menunjukkan komposisi kimia utama berupa Silicon Oxide (SiO_2) sebesar 13,35% dan Calcium Oxide (CaO) sebesar 32%. Kandungan SiO_2 yang cukup tinggi mengindikasikan potensi aktivitas pozzolanik material ini dalam campuran beton, di mana SiO_2 dapat bereaksi dengan $Ca(OH)_2$ hasil hidrasi semen untuk membentuk kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan yang memperkuat struktur beton.

Hasil Pengujian Beton Segar

Pengujian beton segar dilakukan dengan mengacu pada pedoman EFNARC (2005) untuk mengevaluasi kemampuan alir (filling ability), kemampuan melewati tulangan (passing ability), dan stabilitas campuran (segregation resistance) dari Self-Compacting Concrete (SCC). Tabel 1 menyajikan hasil lengkap pengujian beton segar untuk beton normal dan beton HSC.

Tabel 1. Hasil Pengujian Beton Segar

Parameter	Beton Normal	Beton HSC	Standar EFNARC
Slump Flow (mm)	765	610	550-850
T50 Time (detik)	5,83	6,03	2-6
V-Funnel (detik)	11,29	18,15	<25
L-Box Ratio	0,95	0,907	>0,8

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh parameter memenuhi standar EFNARC (2005) untuk Self-Compacting Concrete (SCC). Nilai slump flow untuk beton HSC sebesar 610 mm berada dalam rentang standar 550-850 mm, meskipun lebih rendah dibandingkan beton normal (765 mm). Penurunan nilai slump flow ini disebabkan oleh penambahan serat baja yang meningkatkan kohesi internal campuran dan sedikit mengurangi kemampuan alir. Nilai T50 time untuk beton HSC sebesar 6,03 detik masih berada dalam batas standar EFNARC

(2-6 detik), mengindikasikan viskositas campuran yang sedikit lebih tinggi namun masih dapat diterima.

Uji V-funnel menghasilkan waktu alir sebesar 18,15 detik untuk beton HSC, yang masih jauh di bawah batas maksimum 25 detik yang disyaratkan EFNARC. Hal ini menunjukkan bahwa beton HSC memiliki kemampuan mengalir melalui celah sempit yang baik dan risiko segregasi yang rendah. Nilai L-box ratio sebesar 0,907 untuk beton HSC ($>0,8$) mengindikasikan kemampuan passing ability yang sangat baik, di mana beton dapat melewati celah antar tulangan tanpa mengalami blocking atau pemisahan agregat. Secara keseluruhan, hasil pengujian beton segar membuktikan bahwa meskipun terdapat penambahan abu cangkang sawit 15% dan serat baja 2%, campuran beton HSC masih memenuhi seluruh kriteria Self-Compacting Concrete dengan karakteristik alir, stabilitas, dan passing ability yang baik.

Hasil Uji Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan dilakukan untuk menentukan mutu tekan material dengan menggunakan mesin uji tekan setelah beton mencapai umur 28 hari. Tabel 2 menyajikan hasil uji kuat tekan untuk setiap sampel beton normal dan beton HSC.

Tabel 2. Hasil Uji Kuat Tekan Beton pada Umur 28 Hari

Jenis Beton	Sampel 1 (MPa)	Sampel 2 (MPa)	Sampel 3 (MPa)	Rata-rata (MPa)	Peningkatan (%)
Beton Normal (0% ACS + 0% SF)	32,86	30,23	29,58	30,89	-
Beton HSC (15% ACS + 2% SF)	79,51	93,16	98,08	90,25	192,2

Hasil pengujian menunjukkan peningkatan kuat tekan yang sangat signifikan pada beton HSC dengan kombinasi abu cangkang sawit dan serat baja. Kuat tekan rata-rata beton normal sebesar 30,89 MPa meningkat menjadi 90,25 MPa pada beton HSC, atau terjadi peningkatan sebesar 192,2% (hampir tiga kali lipat). Nilai kuat tekan tertinggi mencapai 98,08 MPa pada sampel HSC-3, menunjukkan konsistensi campuran yang baik dengan variasi nilai yang relatif kecil antar sampel (79,51 - 98,08 MPa).

Peningkatan kekuatan yang signifikan ini disebabkan oleh beberapa faktor sinergis. Pertama, reaksi pozzolanik abu cangkang sawit dengan Ca(OH)_2 hasil hidrasi semen membentuk kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan yang memperkuat matriks beton. Kedua, penggunaan rasio air-semen (w/c) yang lebih rendah pada beton HSC (sekitar 0,40) dibandingkan beton normal (0,45) mengurangi porositas dan meningkatkan kepadatan matriks. Ketiga, penambahan superplasticizer SikaViscocrete 3115N meningkatkan dispersi partikel semen sehingga hidrasi berlangsung lebih optimal dan menghasilkan struktur mikro yang lebih padat. Keempat, kontribusi serat baja dalam menahan mikroretak dan meningkatkan kohesi internal matriks beton, meskipun efek serat baja terhadap kuat tekan tidak sebesar efeknya terhadap kuat tarik dan lentur.

Hasil Uji Kuat Tarik Belah

Pengujian kuat tarik belah dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan beton dalam menahan gaya tarik menggunakan spesimen Dog Bone. Tabel 3 menyajikan hasil uji kuat tarik belah untuk beton normal dan beton HSC.

Tabel 3. Hasil Uji Kuat Tarik Belah Beton

Jenis Beton	Sampel 1 (MPa)	Sampel 2 (MPa)	Sampel 3 (MPa)	Rata-rata (MPa)	Peningkatan (%)
Beton Normal (0% ACS + 0% SF)	2,87	2,95	3,03	2,95	-
Beton HSC (15% ACS + 2% SF)	5,35	6,01	5,53	5,63	90,8

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kuat tarik belah rata-rata meningkat dari 2,95 MPa pada beton normal menjadi 5,63 MPa pada beton HSC, atau terjadi peningkatan sebesar 90,8%. Nilai kuat tarik tertinggi mencapai 6,01 MPa pada sampel HSC-2. Peningkatan ini terutama disebabkan oleh keberadaan serat baja yang berfungsi sebagai crack-bridging mechanism, di mana serat-serat ini menahan tegangan tarik dan mendistribusikan beban secara lebih merata dalam matriks beton.

Serat baja efektif menghambat propagasi mikroretak menjadi makroretak, sehingga meningkatkan daktilitas dan kapasitas deformasi pasca-retak beton. Ketika beton mulai mengalami retak, serat baja bertindak sebagai jembatan yang menahan pergerakan retakan, sehingga meningkatkan kapasitas deformasi dan energi serap beton. Selain itu, reaksi pozzolanik abu cangkang sawit juga berkontribusi dalam meningkatkan kerapatan matriks dan ikatan antara pasta semen dengan agregat, yang pada gilirannya meningkatkan kemampuan beton dalam menahan gaya tarik. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Bentur et al. (2007) yang menyatakan bahwa penambahan serat baja dapat meningkatkan kuat lentur dan kuat tarik belah beton hingga 25–50% tergantung pada rasio volume serat, bentuk, dan panjang serat yang digunakan.

Hasil Uji Kuat Lentur Balok Komposit

Pengujian kuat lentur dilakukan pada balok komposit yang terdiri dari kombinasi beton normal di bagian atas dan beton HSC di bagian bawah dengan variasi ketebalan lapisan HSC (0 cm, 1 cm, 3 cm, dan 5 cm). Tabel 4 menyajikan hasil uji kuat lentur untuk setiap variasi balok komposit.

Tabel 4. Hasil Uji Kuat Lentur Balok Komposit

Variasi Balok	Beban Maks (kN)	Displacement (mm)	Kuat Lentur (MPa)	Peningkatan (%)
Beton Normal (0 cm HSC)	21,5	7,4	6,27	-
Komposit HSC 1 cm	33,4	5,8	10,45	66,7
Komposit HSC 3 cm	49,1	4,5	15,32	144,3

Komposit HSC 5 cm	47,0	5,6	16,69	166,2
----------------------	------	-----	-------	-------

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan lapisan HSC pada bagian bawah balok secara signifikan meningkatkan kapasitas lentur. Kuat lentur meningkat dari 6,27 MPa pada beton normal menjadi 16,69 MPa pada balok komposit dengan lapisan HSC 5 cm, atau terjadi peningkatan sebesar 166,2%. Peningkatan ketebalan lapisan HSC dari 1 cm menjadi 3 cm menunjukkan peningkatan kuat lentur yang konsisten dan signifikan (dari 10,45 MPa menjadi 15,32 MPa), namun peningkatan dari 3 cm ke 5 cm relatif lebih kecil (dari 15,32 MPa menjadi 16,69 MPa), mengindikasikan adanya ketebalan optimal di mana penambahan material HSC memberikan efisiensi struktural maksimum.

Nilai displacement maksimum menurun dari 7,4 mm pada beton normal menjadi 4,5 mm pada balok komposit HSC 3 cm, menunjukkan peningkatan kekakuan struktural balok komposit. Namun, displacement meningkat kembali menjadi 5,6 mm pada balok komposit HSC 5 cm, yang dapat disebabkan oleh variasi dalam pengujian atau pola retak yang berbeda. Beban maksimum yang mampu ditahan meningkat secara konsisten dari 21,5 kN pada beton normal menjadi 49,1 kN pada balok komposit HSC 3 cm, atau peningkatan sebesar 128,4%.

Mekanisme peningkatan kuat lentur dapat dijelaskan sebagai berikut: lapisan HSC yang ditempatkan pada zona tarik (bagian bawah balok) memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi dibanding beton normal, sehingga mampu menahan momen lentur yang lebih besar sebelum terjadi keruntuhan. Serat baja dalam lapisan HSC berperan menahan propagasi retak yang terjadi pada zona tarik, mengubah pola keruntuhan dari brittle failure menjadi ductile failure yang lebih terkontrol. Reaksi pozzolanik abu cangkang sawit menghasilkan C-S-H tambahan yang memperkuat ikatan antara pasta semen dan agregat, meningkatkan ketahanan terhadap tegangan tarik pada zona lentur. Kombinasi ketiga faktor ini menghasilkan peningkatan kapasitas lentur yang sangat signifikan pada balok komposit.

Analisis Deformasi dan Validasi Numerik

Analisis deformasi balok dilakukan menggunakan tiga metode berbeda untuk validasi hasil: (1) perhitungan manual menggunakan metode Unit Load (Castigliano); (2) simulasi numerik menggunakan perangkat lunak SAP2000; dan (3) pengujian eksperimental di laboratorium. Tabel 5 menyajikan perbandingan nilai displacement dari ketiga metode.

Tabel 5. Perbandingan Displacement Balok dari Berbagai Metode

Variasi Balok	Unit Load (mm)	SAP2000 (mm)	Eksperimental (mm)	Selisih Teoritis-Eksperimental
Beton Normal	0,34	1,88	7,40	6,52 mm
Komposit HSC 1 cm	0,28	1,65	5,80	5,15 mm
Komposit HSC 3 cm	0,22	1,45	4,50	3,05 mm
Komposit HSC 5 cm	0,19	1,32	5,60	4,28 mm

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai displacement dari metode Unit Load dan simulasi SAP2000 secara signifikan lebih kecil dibanding hasil eksperimental. Perbedaan ini terjadi karena perhitungan teoritis dan simulasi numerik diasumsikan berada dalam kondisi elastis linear dan dibatasi hingga batas layan ($L/240 = 2,5$ mm untuk balok bentang 600 mm), sedangkan pengujian eksperimental dilakukan hingga balok mengalami keruntuhan total (crack atau failure). Dalam kondisi pembebanan hingga failure, beton mengalami deformasi plastis, retak yang menyebar, dan degradasi kekakuan yang tidak dapat diprediksi oleh analisis elastis linear.

Metode Unit Load menghasilkan nilai displacement paling kecil (0,19 - 0,34 mm) karena hanya mempertimbangkan deformasi elastis murni tanpa memperhitungkan faktor-faktor seperti retak, deformasi plastis, atau degradasi material. Simulasi SAP2000 memberikan hasil yang sedikit lebih besar (1,32 - 1,88 mm) karena memperhitungkan distribusi tegangan yang lebih kompleks melalui metode elemen hingga, namun tetap dalam asumsi elastis linear. Hasil eksperimental menunjukkan displacement yang jauh lebih besar (4,50 - 7,40 mm) karena mencakup seluruh perilaku non-linear beton hingga keruntuhan.

Namun demikian, trend penurunan displacement seiring dengan peningkatan ketebalan lapisan HSC konsisten antara hasil teoritis, numerik, dan eksperimental. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan ketebalan lapisan HSC efektif meningkatkan kekakuan struktural balok komposit. Untuk beton normal, displacement menurun dari baseline, dan dengan penambahan lapisan HSC 3 cm menghasilkan displacement eksperimental terendah (4,50 mm), menunjukkan konfigurasi yang paling kaku. Meskipun terdapat perbedaan kuantitatif yang signifikan, validasi kualitatif menunjukkan bahwa ketiga metode memberikan trend yang sama, sehingga dapat digunakan untuk prediksi perilaku struktural dalam tahap desain awal.

Analisis Biaya Produksi

Analisis biaya dilakukan untuk membandingkan biaya produksi per meter kubik beton normal dan beton HSC dengan berbagai variasi ketebalan lapisan. Tabel 6 menyajikan rincian biaya untuk setiap variasi beton.

Tabel 6. Analisis Biaya Produksi Beton per m³

Jenis Beton	Biaya Total (Rp/m ³)	Peningkatan Biaya (%)	Peningkatan Kuat Tekan (%)
Beton Normal	1.245.000	-	-
Beton HSC 1 cm	1.968.750	58,1	66,7
Beton HSC 3 cm	3.416.250	174,4	144,3
Beton HSC 5 cm	4.875.000	291,6	166,2

Hasil analisis menunjukkan bahwa biaya produksi beton HSC secara signifikan lebih tinggi dibandingkan beton normal. Untuk beton HSC dengan lapisan 5 cm, biaya mencapai Rp 4.875.000/m³ atau sekitar 3,9 kali lebih mahal dibandingkan beton normal (Rp 1.245.000/m³). Peningkatan biaya ini terutama disebabkan oleh harga serat baja yang tinggi (sekitar Rp 15.000/kg) dan penggunaan superplasticizer (sekitar Rp 45.000/liter). Material abu cangkang

sawit relatif murah karena merupakan limbah industri, sehingga tidak memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan biaya.

Meskipun biaya produksi lebih tinggi, peningkatan kekuatan yang sangat signifikan (192% untuk kuat tekan, 90,8% untuk kuat tarik, dan hingga 166% untuk kuat lentur) dapat dijustifikasi pada aplikasi tertentu. Penggunaan beton HSC memungkinkan pengurangan dimensi elemen struktural, yang dapat menghasilkan penghematan dalam hal volume material, beban mati struktur, dan ukuran pondasi. Selain itu, durabilitas yang lebih baik dan umur layanan yang lebih panjang dapat mengurangi biaya perawatan dan perbaikan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, analisis biaya harus mempertimbangkan life cycle cost dan bukan hanya initial cost.

Dari perspektif keberlanjutan, penggunaan abu cangkang sawit sebagai pengganti 15% semen memberikan manfaat lingkungan yang signifikan. Produksi semen merupakan salah satu penyumbang emisi CO₂ terbesar di industri konstruksi, sehingga pengurangan penggunaan semen melalui substitusi dengan limbah industri seperti abu cangkang sawit dapat mengurangi jejak karbon secara keseluruhan. Hal ini sejalan dengan konsep green construction yang semakin menjadi prioritas dalam pembangunan infrastruktur modern.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kombinasi abu cangkang sawit 15% sebagai pengganti sebagian semen dan penambahan serat baja 2% secara signifikan meningkatkan performa mekanis beton. Hasil pengujian material menunjukkan bahwa pasir, batu pecah, dan abu cangkang sawit memenuhi standar mutu material beton, dengan abu cangkang sawit memiliki kandungan utama Silicon Oxide (SiO₂) sebesar 13,35% dan Calcium Oxide (CaO) sebesar 32% yang menunjukkan sifat pozzolanik potensial. Pengujian beton segar menunjukkan bahwa seluruh parameter (slump flow 610-765 mm, T50 time 5,83-6,03 detik, V-funnel 11,29-18,15 detik, L-box ratio 0,907-0,95) memenuhi standar EFNARC untuk Self-Compacting Concrete, mengindikasikan kemampuan alir, passing ability, dan stabilitas campuran yang baik. Pengujian sifat mekanis menunjukkan peningkatan kuat tekan dari 30,89 MPa menjadi 90,25 MPa (peningkatan 192%), kuat tarik belah dari 2,95 MPa menjadi 5,63 MPa (peningkatan 90,8%), dan kuat lentur dari 6,27 MPa menjadi 16,69 MPa (peningkatan 166%) pada balok komposit dengan lapisan HSC 5 cm. Peningkatan kekuatan ini disebabkan oleh reaksi pozzolanik abu cangkang sawit yang menghasilkan C-S-H tambahan dan kontribusi serat baja dalam menahan propagasi retak serta meningkatkan daktilitas beton. Analisis deformasi menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan lapisan HSC efektif meningkatkan kekakuan struktural dan menurunkan displacement maksimum, dengan trend yang konsisten antara metode Unit Load, SAP2000, dan eksperimental meskipun terdapat perbedaan nilai absolut. Dari sisi biaya, beton HSC dengan lapisan 5 cm memiliki biaya produksi sekitar 3,9 kali lebih tinggi dibanding beton normal, namun peningkatan kekuatan yang sangat signifikan dapat dijustifikasi pada aplikasi struktur yang menuntut kapasitas beban tinggi dan mempertimbangkan life cycle cost serta manfaat keberlanjutan lingkungan. Penelitian ini membuktikan potensi pemanfaatan limbah industri kelapa sawit sebagai material ramah lingkungan dalam produksi beton mutu tinggi dengan performa struktural yang superior, mendukung konsep green construction dalam industri konstruksi modern.

REFERENSI

- ACI Committee 239-19. (2019). *Ultra-high-performance concrete: An emerging technology report*. American Concrete Institute.
- Amstrong, M. L., & Saputra, A. D. (2025). Optimalisasi pengelolaan sampah untuk mendukung energi terbarukan di Indonesia. *Cerdika: Jurnal Ilmiah Indonesia*.
- Aulia, Q., Sodikin, S., & Hasrianti, H. (2025). Analisis meta-data penggunaan teknologi ramah lingkungan dalam manajemen produksi pertanian untuk mengurangi jejak karbon. *EL-JUGHRAFIYAH*.
- Bai, J., Wang, H., & Zhang, X. (2023). Effects of steel fiber on mechanical properties and durability of high-strength concrete: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 362, 129756.
- Bentur, A., & Mindess, S. (2007). *Fibre reinforced cementitious composites* (2nd ed.). Taylor & Francis.
- EFNARC. (2005). *The European guidelines for self-compacting concrete: Specification, production and use*. European Federation of National Associations Representing for Concrete.
- Fendria, R., Irwan, I., & Sumantri, A. (2024). Desain beton high early strength (HES) dengan campuran superplasticizer.
- Hakiki, R. (2025). Evaluasi kinerja energi serap balok jembatan komposit kayu laminasi–beton berlapis CFRP pada beban statis. *Jurnal Jalan Jembatan*.
- Istiyani, A., Putra, Y. S., & Riyanti, B. (2025). Peningkatan praktik ekonomi sirkular minyak jelantah berbasis masyarakat di Kota Salatiga. *Yumary: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*.
- Kumar, S., Singh, A., & Sharma, R. (2023). Enhancement of mechanical properties of concrete through steel fiber reinforcement: A state-of-the-art review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5678–5685.
- Li, Z., Wang, L., & Wang, Y. (2016). Compressive and flexural properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(4), 04015186.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Muhammad, N. H., Ismail, M., & Bunnori, N. M. (2021). Utilization of palm oil shell ash as partial cement replacement in high strength concrete. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125563.
- Neville, A. M. (2012). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Olutoge, F. A., Quadri, H. A., & Olafusi, O. S. (2016). Assessment of the suitability of palm kernel shell ash as partial replacement for cement in concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 96(1), 012079.
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.
- Sikki, N., Sari, R. D., Komara, E., Wahyuni, S., Yustisio, B., Firmansyah, A. M., & Mutiara, R. (2025). Sistem pengelolaan sampah berkelanjutan dan pengaruhnya terhadap netralitas karbon pada komunitas urban. *Prosiding Seminar Sosial Politik Bisnis Akuntansi dan Teknik*.
- Song, P. S., & Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18(9), 669–673.



© 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).