



Studi Eksperimental Sinergi Beton HSC dan Beton Normal Dengan Penambahan Pozzolan Abu Sekam Padi dan Serat Bambu Terhadap Perkuatan Lentur Balok

**Priaji Yudha Astomo^{1*}, Nursyamsi Nursyamsi², Johannes Tarigan³, Ricky Bakara⁴,
Indra Jhon Fischer⁵**

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

Politeknik Negeri Medan, Indonesia^{4,5}

Email: priajiyudhaa@gmail.com*, nursyamsi@usu.ac.id, johannes.tarigan@usu.ac.id,
rickybakara@polmed.ac.id, indrajhon@polmed.ac.id

Kata kunci:

beton berkekuatan tinggi, abu sekam padi, serat bambu, kuat lentur, balok komposit.

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis sinergi beton berkekuatan tinggi (High Strength Concrete/HSC) dan beton normal dengan penambahan abu sekam padi (ASP) sebagai pozzolan dan serat bambu sebagai penguat terhadap peningkatan kuat lentur balok komposit. Abu sekam padi dengan kandungan silika tinggi (90–95%) menggantikan sebagian semen untuk meningkatkan kekuatan dan durabilitas, sedangkan serat bambu meningkatkan ketangguhan dan ketahanan retak. Metode eksperimental dilakukan di Laboratorium Rekayasa dan Bahan Beton, Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara dengan variasi lapisan HSC setebal 1 cm, 3 cm, dan 5 cm pada bagian atas balok beton normal. Pengujian dilakukan terhadap beton segar (slump flow, T50, V-funnel, L-box) dan beton keras pada umur 28 hari (kuat tekan, kuat tarik, kuat lentur). Hasil menunjukkan penambahan 10% abu sekam padi dan 1% serat bambu meningkatkan kuat tekan dan lentur secara signifikan. Kuat lentur tertinggi diperoleh pada balok dengan lapisan HSC 3 cm, menunjukkan peningkatan kapasitas beban dan penurunan lendutan. Analisis metode momen-area dan SAP 2000 memperkuat hasil laboratorium dengan selisih lendutan dalam batas toleransi. Kombinasi HSC, abu sekam padi, dan serat bambu memberikan efek sinergis terhadap peningkatan performa mekanis beton dan mendukung pengembangan material konstruksi berkelanjutan.

Keywords:

High strength concrete, rice husk ash, bamboo fiber, flexural strength, composite beam.

ABSTRACT

This study analyzes the synergy between High Strength Concrete (HSC) and normal concrete with the addition of rice husk ash (RHA) as pozzolan and bamboo fiber as reinforcement to improve the flexural strength of composite beams. Rice husk ash with high silica content (90–95%) replaces part of the cement to enhance strength and durability, while bamboo fiber increases toughness and crack resistance. The experimental method was conducted at the Concrete Engineering and Materials Laboratory, Faculty of Engineering, University of Sumatera Utara, with HSC layer variations of 1 cm, 3 cm, and 5 cm thickness on top of normal concrete beams. Tests were performed on fresh concrete (slump flow, T50, V-funnel, L-box) and hardened concrete at 28 days (compressive strength, tensile strength, flexural strength). Results showed that the addition of 10% rice husk ash and 1% bamboo fiber significantly increased compressive and flexural strength. The highest flexural strength was obtained in beams with 3 cm HSC layer, showing increased load capacity and reduced deflection. Analysis using the moment-area method and SAP 2000 reinforced laboratory results with deflection differences within tolerance limits. The combination of HSC, rice husk ash, and bamboo fiber provides a synergistic

PENDAHULUAN

Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan di seluruh dunia karena ketersediaan bahan penyusunnya yang melimpah, kemudahan dalam pembentukan, serta kekuatan dan daya tahan yang tinggi (Zhang & Li, 2020). Dalam beberapa dekade terakhir, perkembangan teknologi beton telah menghasilkan jenis beton berkekuatan tinggi (High Strength Concrete atau HSC) yang memiliki kuat tekan melebihi 60 MPa (ACI Committee 363, 2010). Penggunaan HSC memberikan keuntungan berupa peningkatan kapasitas beban struktur, efisiensi dimensi elemen, serta ketahanan yang lebih baik terhadap lingkungan agresif (Mehta & Monteiro, 2014). Selain itu, penggunaan HSC juga memungkinkan konstruksi dengan elemen yang lebih ramping dan lebih ringan, yang mengurangi biaya dan mempermudah proses konstruksi (Al-Mashhadani & Liew, 2021). Beton dengan kekuatan tinggi juga menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap retak dan korosi, sehingga meningkatkan umur layanan struktur (Baggio et al., 2022). Namun, meskipun memberikan banyak keuntungan, HSC juga menuntut perencanaan yang lebih hati-hati dalam proses pembuatannya dan kontrol kualitas yang lebih ketat (Siddique et al., 2023).

Namun demikian, produksi beton berkekuatan tinggi sering kali memerlukan jumlah semen yang lebih besar, yang berdampak pada peningkatan emisi karbon dioksida dan biaya produksi (Hossain et al., 2021). Oleh karena itu, berbagai penelitian telah diarahkan pada upaya substitusi sebagian semen dengan material pozzolan alami atau limbah industri yang bersifat ramah lingkungan (Li & Wang, 2020). Salah satu material tersebut adalah abu sekam padi (Rice Husk Ash atau RHA), yang memiliki kandungan silika amorf tinggi dan dapat bereaksi secara pozzolanik dengan kalsium hidroksida untuk membentuk kalsium silikat hidrat (C-S-H), sehingga meningkatkan kekuatan dan keawetan beton (Zain et al., 2010; Chindaprasirt & Rukzon, 2008). Penggunaan RHA dalam beton juga dapat mengurangi dampak lingkungan yang dihasilkan dari produksi semen (Siddique & Lobo, 2022). Beberapa penelitian terbaru menunjukkan bahwa substitusi RHA dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan sulfat dan pengaruh lingkungan yang keras (Yang et al., 2021). Selain itu, penggunaan RHA dalam beton juga memberikan manfaat ekonomi, karena mengurangi ketergantungan pada semen yang lebih mahal (Setién et al., 2021).

Selain peningkatan kekuatan, aspek ketangguhan (ductility) beton juga menjadi perhatian penting, terutama pada beton berkekuatan tinggi yang cenderung bersifat getas (Sutarno, 2023). Penambahan serat alam, seperti serat bambu, telah diteliti sebagai salah satu solusi untuk meningkatkan ketahanan retak dan kapasitas lentur beton (Li et al., 2019; Zhang et al., 2020). Serat bambu memiliki kekuatan tarik yang tinggi, ringan, serta mudah diperoleh, sehingga berpotensi sebagai bahan penguat alternatif yang ekonomis dan berkelanjutan (Tan et al., 2011; Kumar et al., 2022). Selain itu, penggunaan serat bambu juga dapat mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh material beton konvensional (Hossain et al., 2023). Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa serat bambu dapat meningkatkan daya tahan beton terhadap beban statis dan dinamis (Wang et al., 2021).

Dengan demikian, kombinasi penggunaan abu sekam padi sebagai bahan substitusi semen dan serat bambu sebagai penguat pada beton berkekuatan tinggi diharapkan dapat menghasilkan material yang tidak hanya kuat dan tahan lama, tetapi juga ramah lingkungan serta ekonomis. Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi kedua bahan tersebut terhadap sifat mekanik beton, baik pada beton normal maupun beton HSC, sehingga dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan material konstruksi berkelanjutan di masa depan.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan sinergis yang mengintegrasikan tiga komponen inovatif: (1) penggunaan HSC sebagai lapisan perkuatan dengan variasi ketebalan spesifik (1 cm, 3 cm, 5 cm); (2) substitusi semen dengan abu sekam padi 10% untuk meningkatkan ikatan matriks; dan (3) penambahan serat bambu 1% untuk meningkatkan ketangguhan. Kombinasi ini belum banyak dieksplorasi dalam literatur, khususnya pada balok komposit dengan variasi ketebalan lapisan HSC yang sistematis. Penelitian sebelumnya umumnya mengevaluasi HSC atau beton dengan serat secara terpisah, namun belum menganalisis efek sinergis ketiganya terhadap perilaku lentur balok komposit.

Urgensi penelitian ini didorong oleh kebutuhan industri konstruksi akan material berkinerja tinggi namun berkelanjutan. Dengan memanfaatkan limbah pertanian (abu sekam padi) dan sumber daya alam terbarukan (serat bambu), penelitian ini berkontribusi pada pengembangan teknologi beton hijau yang mengurangi ketergantungan pada semen Portland sekaligus meningkatkan performa struktural.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan karakteristik mekanik beton normal dan High Strength Concrete (HSC) dengan penambahan serat bambu serta abu sekam padi (ASP) sebagai bahan pozzolan, meliputi kuat tekan, kuat tarik langsung, dan kuat lentur beton, serta pengaruhnya terhadap mikrostruktur dan deformasi maksimum yang dianalisis menggunakan metode momen-area dengan bantuan perangkat lunak SAP 2000 dan dibandingkan dengan hasil pengujian laboratorium. Rumusan masalah difokuskan pada besarnya nilai kuat tekan, kuat tarik langsung, dampak penggunaan serat bambu terhadap mikrostruktur beton, serta perilaku deformasi maksimum beton yang diuji.

Penelitian ini dibatasi pada pengujian yang dilakukan di Laboratorium Rekayasa dan Bahan Beton Program Studi Teknik Sipil USU dengan mutu beton normal f'_c 20–40 MPa dan HSC minimum 50 MPa, menggunakan benda uji silinder, dog bone specimen, dan balok lentur dengan variasi dimensi dan bentang tertentu, material substitusi berupa ASP dan serat bambu, semen OPC, superplasticizer Tancem 60 RA, serta umur beton 28 hari. Manfaat penelitian ini adalah menambah wawasan dan pengetahuan mengenai pemanfaatan limbah pertanian dan serat alami sebagai bahan tambah beton ramah lingkungan, serta menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya dalam pengembangan beton dengan kinerja mekanik yang lebih baik.

METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan fokus pada pemanfaatan abu sekam padi (Rice Husk Ash/RHA) sebagai bahan pozzolan dan serat bambu sebagai material penguat pada High Strength Concrete (HSC). Pendekatan eksperimental dipilih untuk menganalisis secara langsung pengaruh kedua bahan tambahan tersebut terhadap peningkatan kuat lentur beton melalui serangkaian pengujian laboratorium yang terkontrol. Penelitian

eksperimental ini memungkinkan pengukuran dan perbandingan kinerja beton dengan berbagai variasi komposisi, sehingga dapat ditentukan formula optimum yang menghasilkan kuat lentur terbaik. Seluruh rangkaian eksperimen dilaksanakan di Laboratorium Bahan dan Rekayasa Beton serta Laboratorium Struktur, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara.

Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah beton mutu tinggi (High Strength Concrete) dengan berbagai variasi komposisi bahan penyusun. Sampel penelitian terdiri dari tiga jenis benda uji, yaitu silinder berukuran 20 cm x 10 cm sebanyak 6 buah (3 sampel beton normal dan 3 sampel HSC), Dog Bone Specimen sebanyak 6 buah (3 sampel normal dan 3 sampel HSC), serta balok uji lentur dengan variasi ketebalan lapisan HSC sebanyak 12 buah. Balok uji lentur dibuat dengan dimensi 15x15x60 cm untuk beton normal, 15x16x60 cm untuk komposit dengan lapisan HSC 1 cm, 15x18x60 cm untuk lapisan HSC 3 cm, dan 15x20x60 cm untuk lapisan HSC 5 cm, masing-masing sebanyak 3 sampel. Total keseluruhan benda uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah 24 sampel dengan komposisi campuran yang bervariasi sesuai dengan desain eksperimen.

Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini menggunakan dua sumber, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh secara langsung melalui hasil pengujian laboratorium yang meliputi pemeriksaan properties agregat (analisa saringan, berat jenis, absorpsi, berat isi, kadar lumpur, dan kadar air), pengujian beton segar (slump flow test dan V-funnel test), serta pengujian beton keras setelah perawatan 28 hari (uji kuat tekan, kuat tarik, dan kuat lentur). Setiap pengujian dilakukan dengan mengikuti standar yang berlaku seperti SNI dan ASTM untuk memastikan validitas dan reliabilitas data. Data sekunder dikumpulkan dari berbagai referensi ilmiah berupa jurnal, buku, dan penelitian terdahulu yang relevan dengan topik abu sekam padi dan serat bambu sebagai material inovatif dalam pembuatan beton mutu tinggi.

Teknik Analisis Data

Teknik analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis deskriptif kuantitatif dengan membandingkan hasil pengujian dari berbagai variasi campuran beton. Data hasil pengujian laboratorium diolah untuk menentukan variasi optimum substitusi semen dengan abu sekam padi serta penambahan serat bambu terhadap peningkatan kuat lentur beton. Proses analisis meliputi perhitungan nilai kuat tekan, kuat tarik, dan kuat lentur dari setiap benda uji, kemudian dilakukan perbandingan kinerja antara beton normal dengan HSC yang mengandung 10% abu sekam padi dan 1% serat bambu. Hasil analisis disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan interpretasi dan perbandingan, serta untuk menjawab rumusan masalah dan mencapai tujuan penelitian yang telah ditetapkan. Analisis juga mencakup pengamatan visual terhadap pola kerusakan dan retakan yang terjadi pada benda uji untuk memahami perilaku mekanis beton komposit tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Beton Segar

Pengujian beton segar dalam penelitian ini dilakukan mengacu pada standar yang ditetapkan oleh EFNARC (2005). Jenis pengujian yang dilakukan meliputi uji slump flow, T50, V-Funnel, dan L-Box untuk menilai kemampuan alir serta kestabilan campuran beton.

1. Hasil Pengujian Slump Flow

(filling ability) pada beton dapat diketahui melalui pengujian slump flow. Uji ini bertujuan untuk menilai sejauh mana beton mampu mengalir dan mengisi cetakan tanpa mengalami segregasi atau kehilangan homogenitas. Berdasarkan standar EFNARC (2005), nilai slump flow yang disyaratkan berada pada rentang 550 hingga 850 mm, yang menunjukkan tingkat kelecakan beton yang baik untuk aplikasi struktural. Hasil pengujian slump flow pada penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1, dan secara umum menunjukkan bahwa nilai yang diperoleh telah memenuhi kriteria tersebut.

Tabel 1. Hasil Pengujian slump Flow

NO	Variasi	Benda Uji ASP	Serat	Slump Flow (mm)	Slump Flow classes
1	BN	0%	0%	765	SF3
2	HSC	10%	1%	700	SF2

2. Hasil Pengujian T₅₀

Berdasarkan ketentuan EFNARC (2005), waktu pengujian T₅₀ untuk Self Compacting Concrete (SCC) idealnya berada dalam kisaran 2 hingga 6 detik. Pengujian ini dilakukan bersamaan dengan uji slump flow, dan berfungsi untuk menilai tingkat kelecakan serta kestabilan aliran beton segar. Selain itu, uji T₅₀ juga memberikan gambaran awal mengenai viskositas campuran, di mana waktu alir yang lebih cepat umumnya menunjukkan beton dengan viskositas rendah, sedangkan waktu yang lebih lama menandakan viskositas yang lebih tinggi. Melalui pengujian ini, dapat pula diamati indikasi adanya segregasi atau bleeding yang mungkin terjadi selama proses aliran. Penentuan viskositas beton dapat dilakukan baik dari waktu T₅₀ pada uji slump flow, maupun dengan uji V-Funnel yang mengukur waktu keluarnya beton dari corong secara vertikal. Hasil pengujian T₅₀ yang diperoleh pada penelitian ini disajikan pada Tabel 2, dan secara umum menunjukkan bahwa nilai yang didapat telah sesuai dengan batasan standar EFNARC.

Tabel 1. Hasil Pengujian T₅₀

NO	Variasi	Benda Uji ASP	Serat	T ₅₀ (s)	T ₅₀ classes
1	BN	0%	0%	5.83	SF3
2	HSC	10%	1%	5.90	SF2

3. Hasil Pengujian V-Funnel

Uji V-Funnel digunakan untuk mengevaluasi kemampuan beton dalam mengisi ruang sempit serta menentukan waktu alir campuran melalui celah berbentuk corong. Pengujian ini juga berfungsi untuk menilai tingkat viskositas dari Self Compacting Concrete (SCC), yaitu seberapa mudah beton dapat mengalir tanpa mengalami penyumbatan. Berdasarkan pedoman EFNARC (2005), waktu alir yang direkomendasikan tidak boleh melebihi 25 detik. Proses pengukuran dimulai ketika pintu bawah corong V-Funnel dibuka dan dihentikan saat seluruh beton keluar sepenuhnya dari alat. Nilai waktu yang diperoleh dari pengujian ini digunakan untuk menilai kestabilan campuran serta kecenderungan beton terhadap segregasi. Seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 2. Hasil Pengujian V-Funnel

NO	Variasi	Benda Uji ASP	Serat	T50 (s)	T50 <i>classes</i>
1	BN	0%	0%	11.29	SF3
2	HSC	10%	1%	16.14	SF2

4. Hasil Pengujian L-Shape Box

Pengujian L-Shape Box dilakukan untuk menilai kemampuan beton Self Compacting Concrete (SCC) dalam melewati celah sempit di antara tulangan baja, atau yang dikenal dengan istilah *passing ability*. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa beton segar mampu mengalir secara merata dan menembus daerah dengan kepadatan tulangan tinggi tanpa mengalami penyumbatan ataupun segregasi. Prosedur pengujian dilakukan dengan menuangkan campuran beton ke dalam alat berbentuk huruf “L”, kemudian diukur tinggi beton yang berhasil melewati susunan tulangan hingga mencapai ujung kotak. Nilai perbandingan antara tinggi beton di ujung dan di awal aliran disebut sebagai *passing ratio*. Berdasarkan panduan EFNARC (2005), nilai *passing ratio* yang ideal untuk menunjukkan kemampuan alir yang baik adalah lebih dari 0,8. Hasil pengujian L-Shape Box dalam penelitian ini ditampilkan pada Tabel 4, dan menunjukkan bahwa beton memenuhi kriteria yang dipersyaratkan tersebut.

Tabel 3. Hasil Pengujian L_Shape Box

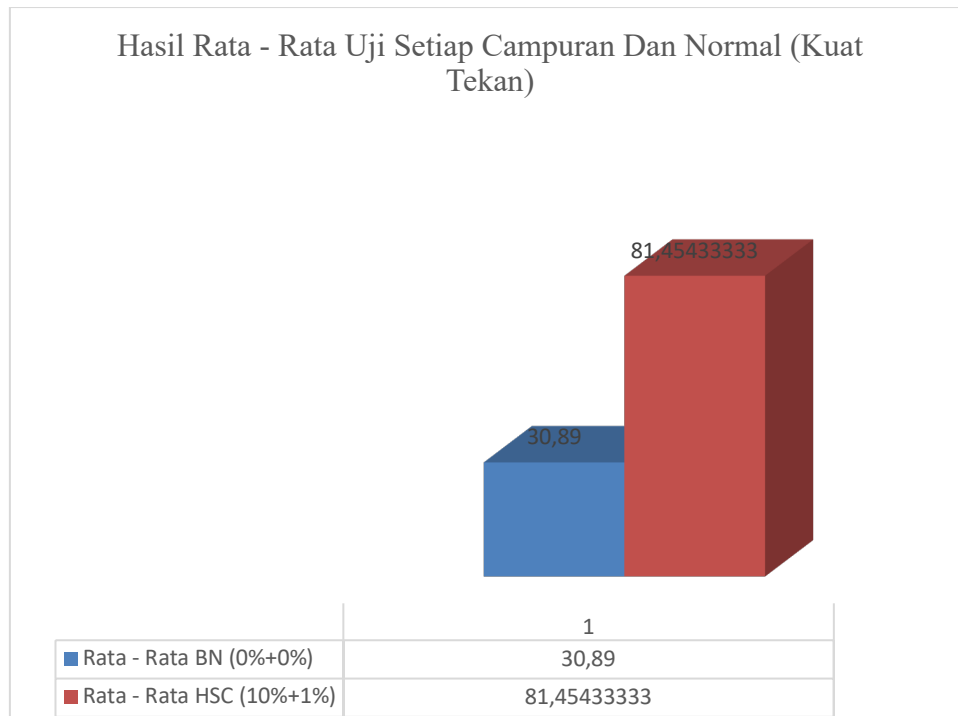
NO	Variasi	Benda Uji ASP	Serat	Nilai	Kelas
1	BN	0%	0%	0.95	PA2
2	HSC	10%	1%	0.85	PA2

Hasil Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui besarnya kemampuan beton dalam menahan beban tekan pada setiap variasi campuran yang digunakan. Melalui pengujian ini, dapat ditentukan sejauh mana pengaruh penambahan material tambahan terhadap peningkatan kekuatan beton. Selain itu, hasil uji kuat tekan juga digunakan untuk mengidentifikasi variasi campuran yang menghasilkan performa paling optimal, yaitu dengan nilai kuat tekan tertinggi dan stabilitas struktur yang baik. Data hasil pengujian kuat tekan secara lengkap disajikan pada tabel 5.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kuat Tekan

No	Benda Uji	ASP+Serat	Rata-rata Kuat Tekan (Mpa)	Rata - Rata Kuat Tekan
1	BN 1	0% + 0%	32.86	30.89
2	BN 2	0% + 0%	30.23	
3	BN 3	0% + 0%	29.58	
4	HSC 1	10% + 1%	70.14	81.4543333
5	HSC 2	10% + 1%	86.51	
6	HSC 3	10% + 1%	87.713	



Gambar 1. Grafik Perbandingan Beton Normal dan HSC

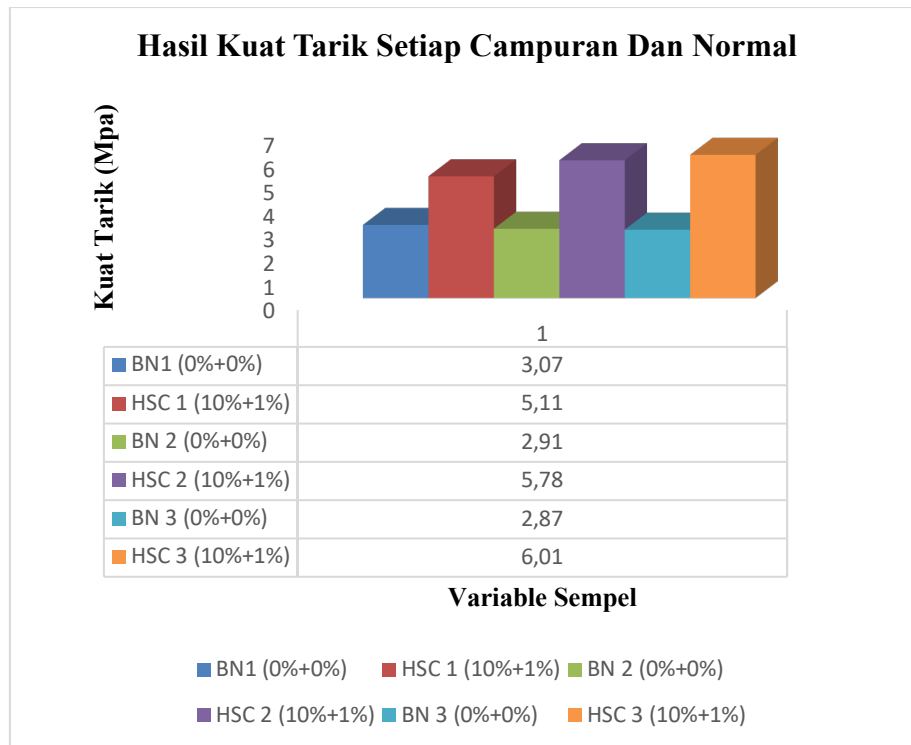
Berdasarkan Gambar 1, diketahui bahwa kuat tekan beton normal rata-rata mencapai 30.89 MPa mencapai target dari kuat tekan yang diperkirakan. Setelah dilakukan substitusi semen dengan abu sekam padi sebesar 10% dan penambahan serat bambu, dengan campuran mix desain yang sudah disesuaikan dengan spesifikasi beton HSC terjadi peningkatan rata-rata kuat tekan menjadi 81.45 MPa. Dari sini dapat dilihat perbandingan kuat tekan yang signifikan antara variasi beton normal dan beton HSC dengan campuran abu sekam padi dan serat bambu.

Hasil Pengujian Kuat Tarik

Uji kuat tarik belah pada beton HSC dengan campuran 10% abu sekam padi dan 1% serat bambu dilakukan untuk mengamati pengaruhnya terhadap ketahanan tarik tidak langsung. Hasil pengujian diharapkan menunjukkan peningkatan kemampuan beton dalam menahan retak awal serta perbaikan sifat keuletan dan ketahanan terhadap beban dinamis. Dengan hasil pengujian kuat tarik dapat di lihat pada gambar 6 yang di tuangkan dalam bentuk grafiik.

Tabel 5. Hasil kuat tarik

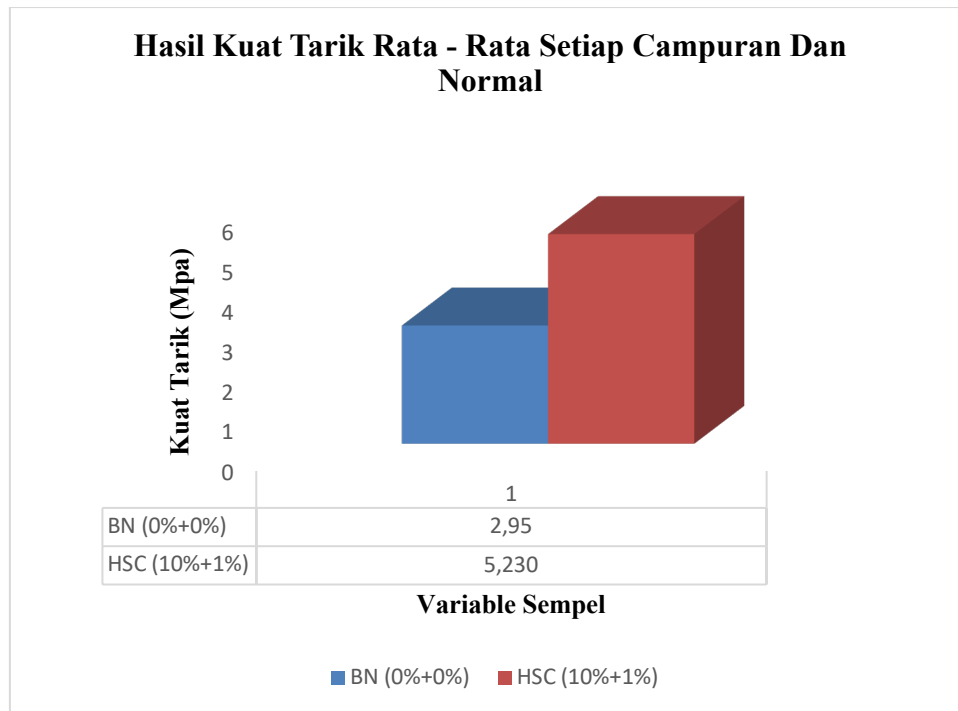
No	Benda Uji	Beban (N)	Rata-rata Kuat Tarik (Mpa)
1	BN 1	3831.85	3.07
2	BN 2	3656.53	2.91
3	BN 3	3603.93	2.87
4	HSC 1	5897.33	4.56
5	HSC 2	6166.58	5.34
6	HSC 3	6179.54	5.79



Gambar 2. Grafik kuat Tarik

Tabel 6. kuat tarik rata – rata

No	Benda Uji	Beban rata (N)	Rata- Kuat Tarik (Mpa)	Rata-rata Kuat Tarik (Mpa)
1	BN 1	3831.85	3.07	2.95
2	BN 2	3656.53	2.91	
3	BN 3	3603.93	2.87	
4	HSC 1	5897.33	4.56	5.230
5	HSC 2	6166.58	5.34	
6	HSC 3	6179.54	5.79	



Gambar 3. Grafik rata – rata kuat Tarik

Berdasarkan hasil analisis kuat tarik yang membandingkan antara beton normal (BN = 0% + 0%) dan beton campuran dengan penambahan abu sekam padi sebesar 10% serta serat bambu 1%, diperoleh rata-rata nilai kuat tarik pada beton normal sebesar 2,95 MPa, sedangkan pada beton mutu tinggi (HSC) sebesar 5.230 MPa.

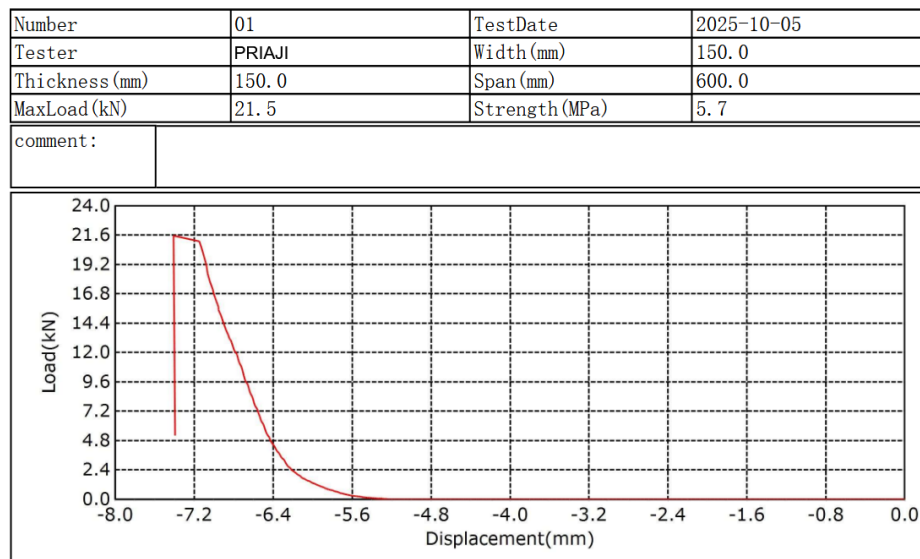
Hasil Pengujian Kuat Lentur

Pengujian kuat lentur pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan spesimen berbentuk balok yang terdiri dari beton komposit, yaitu kombinasi antara Beton Normal dan Beton High Strength Concrete (HSC). Setiap benda uji diuji pada umur 28 hari untuk memastikan bahwa beton telah mencapai kekuatan optimalnya sesuai standar pengujian struktural. Dalam penelitian ini, lapisan beton HSC diterapkan pada bagian bawah balok dengan variasi ketebalan yang berbeda, yakni 1 cm, 3 cm, dan 5 cm, guna mengetahui pengaruh tebal lapisan terhadap peningkatan kekuatan lentur keseluruhan.

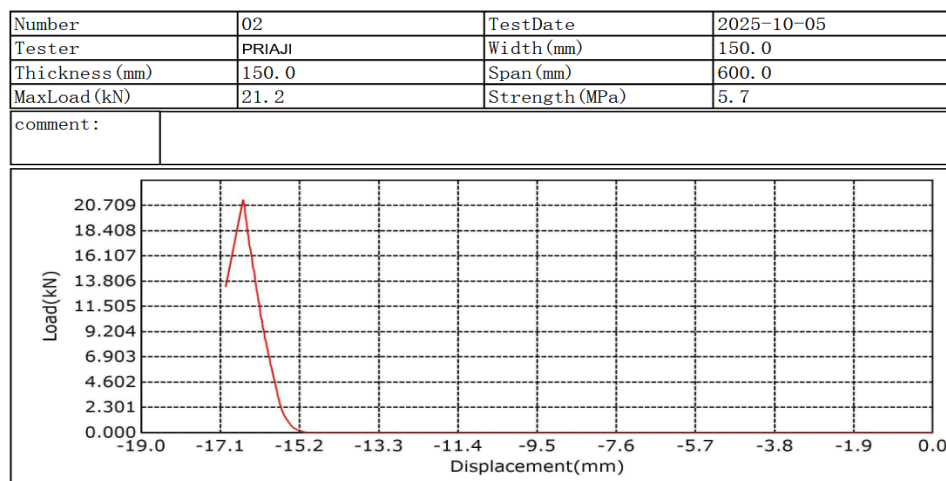
Campuran beton HSC yang digunakan dalam penelitian ini juga dimodifikasi dengan penambahan abu sekam padi sebagai bahan pozzolan sebesar 10% dari berat semen, serta serat bambu sebanyak 1% dari total volume beton, yang berfungsi meningkatkan ikatan internal serta ketahanan terhadap retak akibat beban lentur. Setiap variasi campuran dan ketebalan lapisan diuji untuk menilai respon beban terhadap deformasi yang terjadi pada saat pembebanan.

Hasil dari uji kuat lentur tersebut disajikan dalam bentuk grafik yang menggambarkan hubungan antara beban (N) dan perpindahan (displacement, mm), Setiap grafik merepresentasikan perilaku satu benda uji dari masing-masing variasi beton komposit, yang memperlihatkan perbedaan nilai beban maksimum dan pola deformasi sebelum terjadinya kegagalan struktur. Dengan demikian, hasil ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai kontribusi kombinasi Beton Normal dan HSC terhadap peningkatan kekuatan lentur balok.

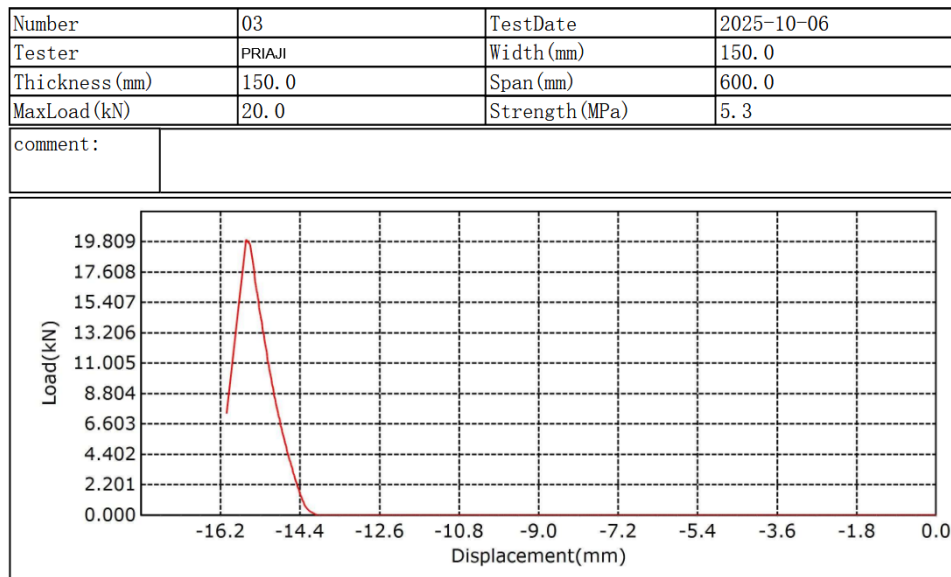
1. Hasil Grafik Hubungan Load dan Displacement BN Sampel 1- Sampel 3 Umur 28 hari



Gambar 4. Grafik Hubungan Load dan Displacement BN 1 Umur 28 hari



Gambar 4. Grafik Hubungan Load dan Displacement BN 2 Umur 28 hari

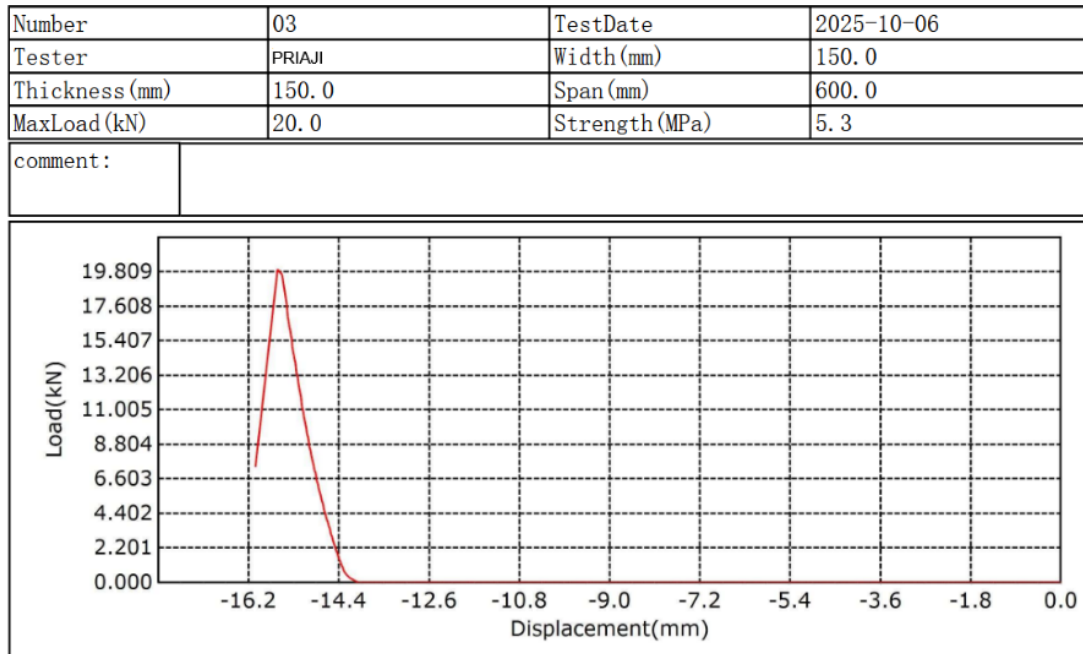


Gambar 5. Grafik Hubungan Load dan Displacement BN 3 Umur 28 hari.

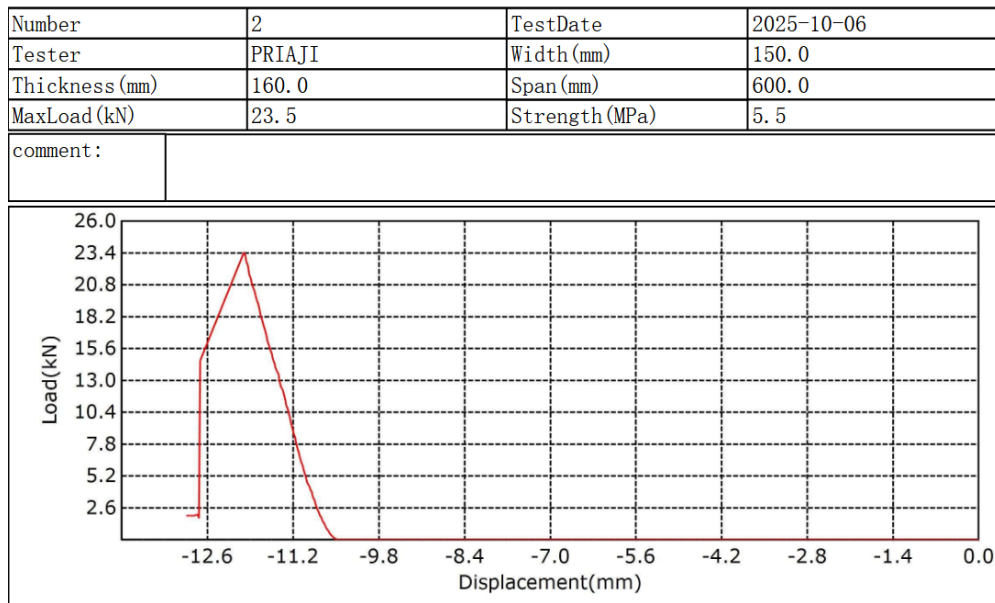
Berdasarkan hasil gambar 4 - 6 grafik hubungan antara beban (load) dan perpindahan (displacement) pada sampel BN 1, BN 2, dan BN 3 pada umur 28 hari secara umum menunjukkan pola respons yang khas untuk beton tanpa perkuatan yang bersifat getas. Pada ketiga sampel, kurva awal pembebanan selalu menanjak secara bertahap, menandakan bahwa balok berada pada fase elastis dan belum mengalami kerusakan signifikan. Setelah fase elastis, masing-masing sampel mencapai beban maksimum pada kisaran 20–21,5 kN, yaitu titik kapasitas lentur tertinggi sebelum terjadinya keruntuhan. Sampel BN 1 mencapai beban puncak 21,5 kN dengan perpindahan sekitar –7 mm, sedangkan BN 2 mencapai 21,2 kN dengan perpindahan sekitar –15 mm. Sementara itu, BN 3 mencapai beban maksimum sekitar 20 kN yang menghasilkan kuat lentur sebesar 5,3 MPa.

Pada ketiga grafik, setelah melewati titik puncak, kurva menunjukkan penurunan beban yang sangat tajam, menandakan bahwa balok beton mengalami keruntuhan secara mendadak akibat terbentuknya retak lentur utama, tanpa adanya kemampuan mempertahankan beban setelah puncak terlampaui. Pola ini menunjukkan bahwa seluruh sampel memiliki karakteristik keruntuhan getas dengan deformasi plastis yang sangat terbatas, sejalan dengan nilai kuat tekan beton yang rendah. Secara keseluruhan, ketiga grafik menggambarkan bahwa balok hanya mampu menahan beban hingga batas tertentu sebelum mengalami kehilangan kapasitas dukung yang cepat setelah titik maksimum tercapai.

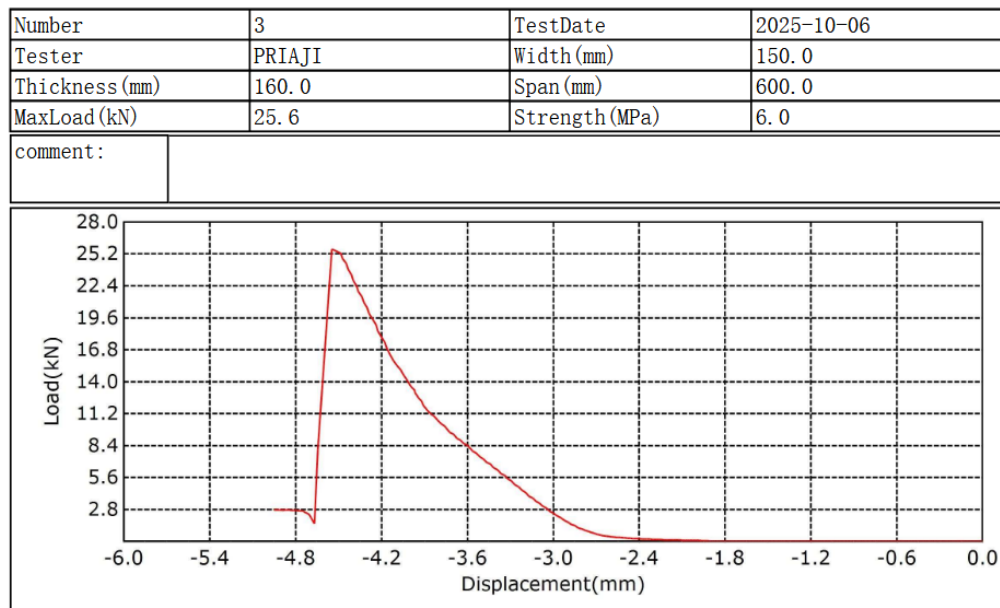
2. Hasil Grafik Hubungan Load dan Displacement HSC Ketebalan 1cm Sampel 1- Sampel 3 Umur 28 hari



Gambar 6. Grafik Hubungan Load dan Displacement HSC ketebalan 1 cm Sampel 1 Umur 28 hari



Gambar 7. Grafik Hubungan Load dan Displacement HSC ketebalan 1 cm Sampel 2 Umur 28 hari



Gambar 8. Grafik Hubungan Load dan Displacement HSC ketebalan 1 cm Sampel 3 Umur 28 hari

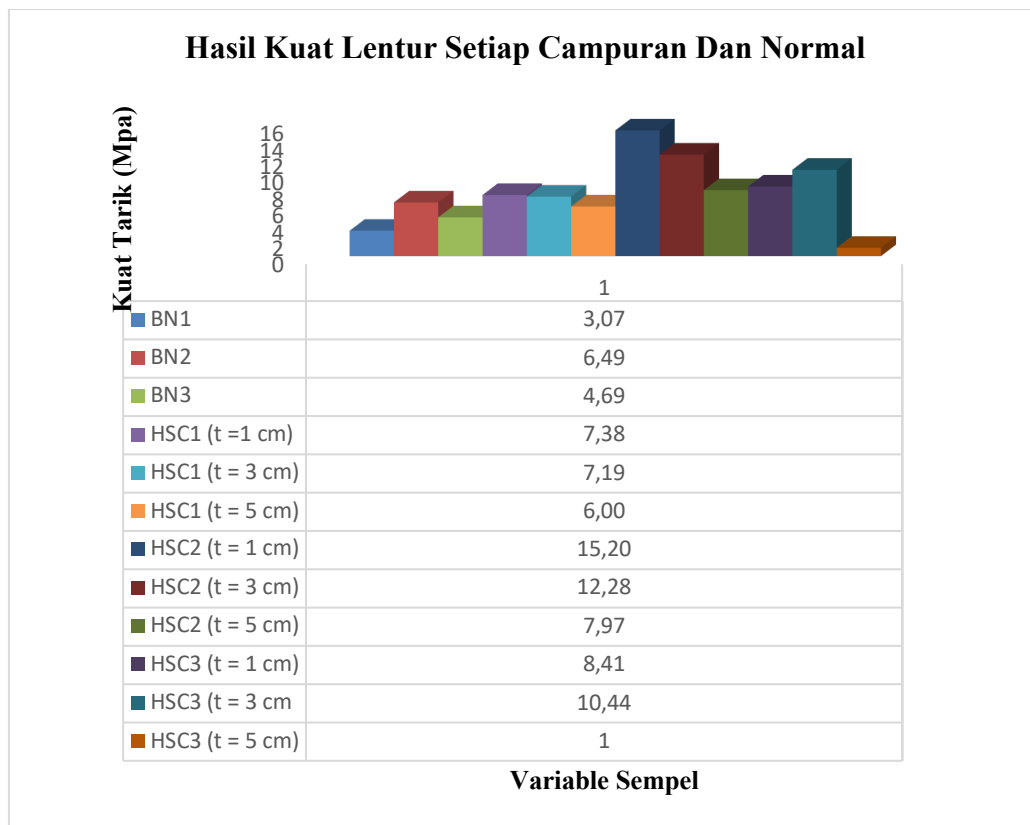
Berdasarkan hasil Gambar 7 – 9 pada sampel HSC dengan ketebalan 1 cm dan umur 28 hari, masing-masing grafik hubungan antara beban (load) dan perpindahan (displacement) menunjukkan perilaku khas beton berkekuatan tinggi yang bersifat getas. Pada sampel pertama, kurva pembebanan memperlihatkan peningkatan beban secara bertahap sejak awal pengujian, menandakan bahwa material masih berada dalam kondisi elastis. Beban terus meningkat hingga mencapai nilai maksimum sebesar 20,0 kN, setelah itu grafik menurun tajam sebagai tanda terjadinya keruntuhan mendadak akibat retak lentur utama. Pola ini menunjukkan bahwa deformasi plastis yang terjadi sangat terbatas sebelum beton kehilangan kapasitas dukungnya.

Hasil grafik pada sampel kedua juga menunjukkan kecenderungan yang sama, di mana beban meningkat secara bertahap sejak awal pembebanan. Kurva kemudian mencapai titik puncak pada beban maksimum sebesar 23,5 kN. Setelah mencapai nilai tersebut, terjadi penurunan beban yang sangat cepat, yang menunjukkan bahwa keruntuhan terjadi secara tiba-tiba saat retakan utama mulai berkembang. Hal ini memperlihatkan bahwa beton pada sampel ini bersifat getas dengan kemampuan deformasi yang terbatas.

Sampel ketiga memperlihatkan pola pembebanan yang serupa. Pada fase awal, kurva menunjukkan peningkatan beban yang stabil hingga mencapai nilai maksimum sebesar 25,6 kN. Setelah titik puncak tercapai, kurva kembali menurun tajam, yang mengindikasikan hilangnya kapasitas dukung secara cepat akibat retak lentur. Grafik ini menunjukkan bahwa material mengalami keruntuhan getas dengan deformasi yang relatif kecil sebelum titik maksimum pembebanan.

Tabel 7. Hasil Pengujian Kuat Tarik

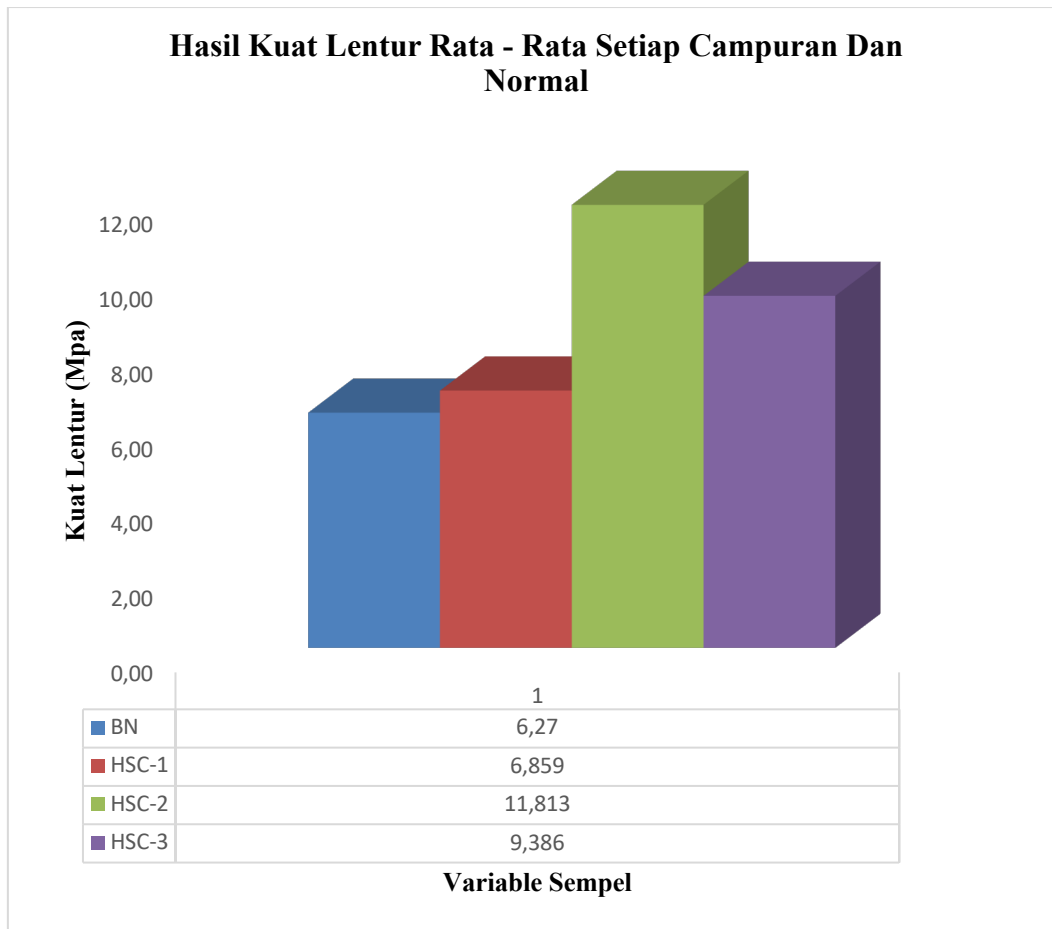
No	Benda Uji	Beban Tekan	Dimensi		Jarak Tumpuan Ke Beban (a)	Tinggi Efektif	Panjang balok (L)	Kuat Lentur	Rata-rata Kuat Tarik
		(kN)	b (mm)	h (mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(Mpa)	(Mpa)
1	BN 1	21.5	150	150	150	130	600	7.63	6.27
2	BN 2	21.2	150	160	150	140	600	6.49	
3	BN 3	20	150	180	150	160	600	4.69	
4	HSC 1 (t = 1 cm)	20.8	150	150	150	130	600	7.38	6.859
5	HSC 1 (t = 3 cm)	23.5	150	160	150	140	600	7.19	
6	HSC 1 (t = 5 cm)	25.6	150	180	150	160	600	6.00	
4	HSC 2 (t = 1 cm)	42.8	150	150	150	130	600	15.20	11.813
5	HSC 2 (t = 3 cm)	40.1	150	160	150	140	600	12.28	
6	HSC 2 (t = 5 cm)	34	150	180	150	160	600	7.97	
4	HSC 3 (t = 1 cm)	23.7	150	150	150	130	600	8.41	9.386
5	HSC 3 (t = 3 cm)	34.1	150	160	150	140	600	10.44	
6	HSC 3 (t = 5 cm)	39.7	150	180	150	160	600	9.30	



Gambar 9. Perbandingan Kuat Lentur Sampel Rata-rata

Tabel 8. Hasil Pengujian Kuat Lentur

No	Benda Uji	Beban Tekan	Dimensi		Jarak Tumpuan Ke Beban (a)	Tinggi Efektif	Panjang balok (L)	Kuat Lentur	Rata-rata Kuat Tarik
		(kN)	b (mm)	h (mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(Mpa)	(Mpa)
1	BN 1	21.5	150	150	150	130	600	7.63	6.27
2	BN 2	21.2	150	160	150	140	600	6.49	
3	BN 3	20	150	180	150	160	600	4.69	
4	HSC 1 (t = 1 cm)	20.8	150	150	150	130	600	7.38	6.859
5	HSC 1 (t = 3 cm)	23.5	150	160	150	140	600	7.19	
6	HSC 1 (t = 5 cm)	25.6	150	180	150	160	600	6.00	
4	HSC 2 (t = 1 cm)	42.8	150	150	150	130	600	15.20	11.813
5	HSC 2 (t = 3 cm)	40.1	150	160	150	140	600	12.28	
6	HSC 2 (t = 5 cm)	34	150	180	150	160	600	7.97	
4	HSC 3 (t = 1 cm)	23.7	150	150	150	130	600	8.41	9.386
5	HSC 3 (t = 3 cm)	34.1	150	160	150	140	600	10.44	
6	HSC 3 (t = 5 cm)	39.7	150	180	150	160	600	9.30	



Gambar 10. Perbandingan Kuat Lentur Sampel Rata-rata

Berdasarkan hasil pengujian kuat lentur pada beton komposit yang menggabungkan lapisan *High Strength Concrete* (HSC) dan beton normal dengan ketebalan variasi 1 cm, 3 cm, dan 5 cm, diperoleh bahwa nilai kuat lentur pada variasi lapisan HSC 1 cm dan 5 cm menunjukkan hasil yang lebih rendah dibandingkan dengan beton lapisan HSC 3 cm. Fenomena ini menunjukkan bahwa peningkatan lapisan HSC tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kekuatan lentur balok. Beberapa faktor penyebab yang memengaruhi terjadinya penurunan nilai kuat lentur tersebut.

Lapisan HSC dengan ketebalan 1 cm tergolong terlalu tipis untuk memberikan kontribusi yang signifikan terhadap daya tahan lentur balok. Pada kondisi pembebanan, lapisan tersebut berada pada zona tarik yang mengalami regangan maksimum. Ketebalan yang sangat kecil menyebabkan tegangan tarik tidak dapat terdistribusi secara merata, sehingga lapisan mudah mengalami retak awal (*microcrack*) atau bahkan terlepas dari beton normal di atasnya akibat tegangan geser di bidang antarmuka. Oleh sebab itu, lapisan HSC setebal 1 cm dianggap tidak efektif dalam meningkatkan kapasitas lentur beton komposit.

Sebaliknya, pada variasi dengan ketebalan 5 cm, penurunan kuat lentur juga terjadi meskipun volume lapisan HSC lebih besar. Hal ini dapat disebabkan oleh adanya perbedaan modulus elastisitas dan sifat deformasi antara HSC dan beton normal. HSC memiliki kekakuan yang lebih tinggi, sehingga saat beban lentur bekerja, distribusi regangan antar lapisan menjadi tidak seimbang. Kondisi ini menyebabkan timbulnya tegangan geser tinggi pada bidang kontak yang berpotensi menimbulkan *slip* atau delaminasi antara kedua lapisan.

Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tidak semua variasi ketebalan lapisan HSC memberikan peningkatan kekuatan lentur. Kondisi optimum kemungkinan dicapai pada ketebalan lapisan menengah, yaitu sekitar 3 cm, di mana keseimbangan antara ikatan antarmuka, distribusi tegangan, dan kontribusi lapisan HSC terhadap daya tahan lentur dapat tercapai dengan baik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh abu sekam padi (ASP) sebagai bahan pozzolan dan serat bambu sebagai material penguat pada beton normal dan High Strength Concrete (HSC), dapat disimpulkan bahwa penggunaan ASP sebagai substitusi parsial semen mampu meningkatkan kekuatan tekan dan durabilitas beton secara signifikan hingga mencapai kadar optimum akibat tingginya kandungan silika yang bersifat pozzolanik, sementara penambahan serat bambu sebesar 1% terbukti meningkatkan ketangguhan dan kuat lentur beton melalui mekanisme pengendalian retak mikro. Selain itu, variasi ketebalan lapisan HSC memberikan pengaruh nyata terhadap perilaku lentur balok beton komposit, di mana ketebalan optimum 3 cm menunjukkan keseimbangan terbaik antara distribusi tegangan, kekakuan, dan kekuatan lentur dibandingkan ketebalan 1 cm yang kurang efektif dan 5 cm yang menimbulkan perbedaan kekakuan antarlapisan. Hasil analisis deformasi juga menunjukkan kesesuaian yang baik antara data pengujian laboratorium dan pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak SAP2000, sehingga menegaskan validitas hasil penelitian serta menunjukkan bahwa kombinasi ASP dan serat bambu berpotensi meningkatkan performa mekanik beton sekaligus mendukung penerapan material ramah lingkungan dalam industri konstruksi.

REFERENSI

- ACI Committee 363. (2010). *Report on high-strength concrete (ACI 363R-10)*. American Concrete Institute. <https://www.concrete.org>
- Al-Mashhadani, M., & Liew, J. Y. R. (2021). High-strength concrete for structural applications: A review of recent developments. *Journal of Structural Engineering*, 147(2), 04020130. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002713](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002713)
- Baggio, A., Cavarretta, I., & Rossi, A. (2022). Durability performance of high strength concrete exposed to aggressive environments. *Cement and Concrete Research*, 147, 106517. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106517>
- Chindaprasirt, P., & Rukzon, S. (2008). Utilization of rice husk ash in high-strength concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(8), 585–589. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:8\(585\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:8(585))
- EFNARC. (2005). *The European guidelines for self-compacting concrete*. EFNARC.
- Hossain, K., Sarker, P. K., & Islam, M. (2021). Environmental impact of high-strength concrete production and the potential for alternative materials. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123635. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123635>
- Hossain, M. S., Mahmud, I. M., & Islam, M. R. (2023). Environmental benefits of bamboo fiber in high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 310, 125190. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125190>
- Kumar, A., Sharma, R., & Mishra, S. (2022). Bamboo fibers as sustainable reinforcement for concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, 50(10), 1360–1367. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.238>

- Li, J., Zhang, X., & Chen, Z. (2019). Effect of bamboo fibers on the mechanical properties and durability of concrete: An experimental study. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107213. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107213>
- Li, L., & Wang, X. (2020). The role of pozzolanic materials in reducing the environmental impact of concrete. *Construction and Building Materials*, 250, 118812. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118812>
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Setién, J., García, R., & González, M. (2021). Economic and environmental performance of rice husk ash in the production of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 118, 103953. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103953>
- Siddique, R., Khatib, J., & Stern, N. (2023). Sustainable construction materials: High-strength concrete and its environmental benefits. *Materials Science and Engineering*, 41(4), 101230. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.101230>
- Siddique, R., & Lobo, S. (2022). Rice husk ash as a sustainable pozzolanic material for concrete: A review. *Journal of Environmental Management*, 295, 113029. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113029>
- Sutarno, S. (2023). *Efektivitas pengekanan terhadap perilaku beton mutu tinggi berserat baja* [Skiripsi, Universitas Islam Sultan Agung].
- Tan, H., Wang, W., & Liu, F. (2011). Bamboo fibers as a sustainable material for concrete reinforcement. *Construction and Building Materials*, 25(7), 2901–2909. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.02.027>
- Wang, Z., Zhang, H., & Xu, J. (2021). The effect of bamboo fiber addition on the fracture toughness of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 117, 103775. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103775>
- Yang, Y., Liu, F., & Song, Y. (2021). Durability and mechanical properties of rice husk ash concrete: A review. *Materials and Structures*, 54(1), 18. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01513-2>
- Zain, M. F. M., Hussin, M. W., & Sulaiman, S. (2010). The use of rice husk ash in concrete: A review. *Journal of Civil Engineering and Management*, 16(2), 180–190. <https://doi.org/10.3846/jcem.2010.20>
- Zhang, X., & Li, M. (2020). Advances in high strength concrete technology: Properties and applications. *Construction and Building Materials*, 257, 119456. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119456>

