

Pemanfaatan Abu Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Material Beton Hijau untuk Mendukung Konstruksi Berkelanjutan

Albert Sinambela¹, Samsul Abdul Rahman Sidik Hasibuan²

^{1,2}Department of Civil Engineering, Universitas Medan Area
Jalan Kolam Nomor 1 Medan Estate / Jalan Gedung PBSI, Medan 20223

²E-mail: samsulrahman@staff.uma.ac.id

Abstract — The construction industry contributes significantly to carbon emissions, especially through the use of cement in concrete. Therefore, environmentally friendly alternatives are needed to reduce these impacts. This study aims to evaluate the use of Empty Oil Palm Bunch Ash (OPAF) as a partial cement substitute in green concrete to support sustainable construction. The variations of OPAF used were 0%, 5%, 10%, 15%, and 20%, with compressive strength and splitting tensile strength tests at the ages of 7, 14, and 28 days. The method used was mechanical testing of concrete with analysis of the relationship between OPAF substitution and compressive strength and splitting tensile strength. The results showed that the higher the percentage of OPAF substitution, the lower the compressive strength and splitting tensile strength of concrete. However, up to 10% substitution, concrete still meets the required structural strength standards. The relationship between OPAF substitution and compressive strength and splitting tensile strength was identified by a linear regression equation. Utilization of OPAF can reduce the use of Portland cement, which contributes to reducing carbon emissions and increasing the utilization of palm oil industry waste, making it an environmentally friendly alternative material in construction. In addition, this research is also expected to open opportunities for the use of ATKS in various other concrete applications, as well as contribute to the development of more sustainable and efficient concrete materials.

Keywords: empty oil palm bunch ash; green concrete; sustainable construction; compressive strength; cement substitution.

Abstrak — Industri konstruksi memberikan kontribusi signifikan terhadap emisi karbon, terutama melalui penggunaan semen dalam beton. Oleh karena itu, diperlukan alternatif yang ramah lingkungan untuk mengurangi dampak tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pemanfaatan Abu Tandan Kosong Kelapa Sawit (ATKS) sebagai substitusi sebagian semen dalam beton hijau guna mendukung konstruksi berkelanjutan. Variasi ATKS yang digunakan adalah 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%, dengan pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah pada umur 7, 14, dan 28 hari. Metode yang digunakan adalah pengujian mekanis beton dengan analisis hubungan substitusi ATKS terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase substitusi ATKS, semakin menurun kuat tekan dan kuat tarik belah beton. Namun, hingga 10% substitusi, beton masih memenuhi standar kekuatan struktural yang dipersyaratkan. Hubungan antara substitusi ATKS dan kuat tekan serta kuat tarik belah diidentifikasi dengan persamaan regresi linear. Pemanfaatan ATKS dapat mengurangi penggunaan semen Portland, yang berkontribusi dalam mengurangi emisi karbon serta meningkatkan pemanfaatan limbah industri kelapa sawit, menjadikannya sebagai material alternatif yang ramah lingkungan dalam konstruksi. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat membuka peluang untuk penggunaan ATKS dalam berbagai aplikasi beton lainnya, serta memberikan kontribusi dalam pengembangan material beton yang lebih berkelanjutan dan efisien.

Kata-kata kunci: abu tandan kosong kelapa sawit; beton hijau; konstruksi berkelanjutan; kuat tekan; substitusi semen.

I. PENDAHULUAN

Industri konstruksi berperan penting dalam pembangunan infrastruktur global, tetapi juga merupakan salah satu penyumbang utama emisi karbon dan eksploitasi sumber daya alam (Priadi et al., 2024). Penggunaan semen sebagai bahan utama dalam produksi beton, yang merupakan komponen vital dalam konstruksi, menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂) dalam jumlah besar, sehingga berkontribusi terhadap perubahan iklim dan degradasi lingkungan (Imran, 2018).

Tantangan utama industri ini adalah mengurangi dampak lingkungan tanpa mengorbankan kualitas dan kekuatan material yang digunakan dalam konstruksi (Amalia et al., 2024). Dalam upaya mengurangi dampak lingkungan, beton hijau telah dikembangkan sebagai solusi alternatif dengan menggantikan sebagian bahan baku beton dengan material yang lebih ramah lingkungan (Editama, 2024). Salah satu bahan yang menjanjikan adalah abu tandan kosong kelapa sawit (ATKS), limbah biomassa hasil sampingan

dari industri kelapa sawit. Potensi ATKS sebagai bahan pozzolan dalam campuran beton masih memerlukan penelitian lebih lanjut, terutama terkait pengaruh variasi substitusi terhadap sifat mekanis dan durabilitas beton (Mowo & Arumningsih, 2021). Indonesia, sebagai salah satu produsen kelapa sawit terbesar di dunia, menghasilkan limbah biomassa dalam jumlah besar yang dapat dimanfaatkan sebagai substitusi sebagian semen dalam campuran beton (Hudori, 2017). Dengan mengintegrasikan ATKS ke dalam campuran beton, tidak hanya mengurangi ketergantungan pada semen, tetapi juga berpotensi menekan dampak negatif limbah industri kelapa sawit terhadap lingkungan (Manurung et al., 2025). Penelitian ini akan menganalisis dua variabel utama, yaitu substitusi ATKS dalam campuran beton dan pengaruhnya terhadap sifat mekanis beton, seperti kuat tekan dan kuat tarik belah. Selain itu, penelitian ini juga akan mengevaluasi dampak substitusi ATKS terhadap durabilitas beton, termasuk ketahanannya terhadap lingkungan yang agresif (Turuallo, 2013). Meskipun pemanfaatan limbah pertanian dan industri sebagai bahan substitusi semen telah banyak diteliti, pemanfaatan ATKS dalam beton hijau masih memerlukan eksplorasi lebih lanjut (Hasibuan et al., 2023). Berbagai penelitian sebelumnya telah meneliti penggunaan material limbah lain dalam beton, seperti limbah kulit kerang (Katrina, 2014), serbuk cangkang telur ayam (Wuwung et al., 2023), serta abu ampas tebu (Admojo, 2017). Studi ini juga didasarkan pada penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa penggunaan material alternatif dalam beton dapat meningkatkan efisiensi konstruksi sekaligus mengurangi dampak lingkungan yang dihasilkan dari industri konstruksi (Utsman et al., 2019). Penelitian ini akan mengevaluasi pengaruh ATKS dalam beton hijau pada berbagai variasi substitusi. Selain itu, penelitian ini akan menambahkan analisis komprehensif tentang durabilitas beton, yang membedakannya dari penelitian sebelumnya yang lebih fokus pada kuat tekan saja. Tujuan utama penelitian ini adalah menganalisis pengaruh substitusi ATKS terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah beton, serta mengevaluasi dampaknya terhadap durabilitas beton. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan beton hijau sebagai material konstruksi berkelanjutan dengan menghadirkan alternatif material yang lebih

ramah lingkungan, sehingga dapat mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan meningkatkan efisiensi sumber daya dalam industri beton (Farras, 2024).

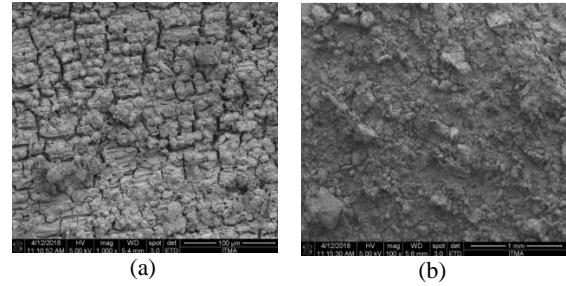
II. TINJAUAN PUSTAKA

Beton hijau merupakan inovasi dalam industri konstruksi yang bertujuan untuk mengurangi dampak lingkungan akibat penggunaan semen konvensional (Zainuri & Soehardi, 2021). Industri semen diketahui menyumbang emisi karbon yang signifikan (Farras, 2024), sehingga diperlukan alternatif material yang lebih ramah lingkungan. Beton hijau dikembangkan dengan memanfaatkan bahan daur ulang, limbah industri, serta material berbasis pozzolan guna mengurangi konsumsi semen dan meningkatkan efisiensi sumber daya (Hamdi et al., 2022). Penggunaan beton hijau diharapkan dapat mendukung konstruksi berkelanjutan dengan tetap mempertahankan atau bahkan meningkatkan performa beton dalam hal kekuatan, daya tahan, dan efisiensi biaya. Di Indonesia, regulasi terkait penggunaan beton ramah lingkungan semakin diperhatikan, terutama dengan adanya dorongan untuk mengurangi ketergantungan pada bahan baku yang berkontribusi terhadap jejak karbon tinggi (Anggreani et al., 2024). Standar nasional dan kebijakan terkait material konstruksi berkelanjutan terus dikembangkan untuk mendorong penggunaan bahan alternatif yang lebih ramah lingkungan (Nainggolan et al., 2023). Dalam konteks ini, penelitian terhadap berbagai material limbah sebagai bahan tambahan dalam beton menjadi semakin relevan, salah satunya adalah pemanfaatan abu tandan kosong kelapa sawit (ATKS) sebagai material pozzolan. ATKS merupakan limbah hasil pembakaran tandan kosong kelapa sawit yang memiliki potensi sebagai material pozzolan dalam beton. Secara kimia, ATKS mengandung senyawa silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) dalam jumlah yang cukup tinggi, yang memungkinkan terjadinya reaksi pozzolanik ketika dikombinasikan dengan semen. Reaksi ini dapat meningkatkan kinerja beton, terutama dalam aspek kuat tekan, kuat tarik, serta daya tahan terhadap lingkungan agresif. Berdasarkan hasil uji X-ray Fluorescence (XRF) dan Scanning Electron Microscope (SEM) yang dilakukan oleh Rahmat et al. (2021), komposisi kimia ATKS menunjukkan dominasi kandungan silika yang tinggi, sebagaimana ditampilkan pada

Tabel 1. Kandungan ini memungkinkan ATKs berfungsi sebagai material tambahan yang dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap reaksi kimia yang merusak. Selain itu, analisis SEM mengungkapkan bahwa struktur mikro ATKs memiliki karakteristik berpori, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, yang dapat mempengaruhi porositas serta kinerja mekanis beton. Dengan karakteristik ini, ATKs memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai material tambahan dalam beton hijau guna meningkatkan keberlanjutan konstruksi. Pemanfaatan limbah pertanian dalam beton telah menjadi fokus penelitian dalam beberapa tahun terakhir. Berbagai jenis limbah dengan kandungan pozzolanik telah digunakan untuk menggantikan sebagian semen dalam campuran beton, seperti abu sekam padi dan abu ampas tebu. Abu sekam padi memiliki kandungan silika yang tinggi dan telah terbukti mampu meningkatkan kuat tekan dan ketahanan beton terhadap serangan kimia (Ednor et al., 2017; Chrismaningwang et al., 2016). Sementara itu, abu ampas tebu juga memiliki karakteristik serupa yang dapat berkontribusi terhadap peningkatan durabilitas beton (Herli, 2024; Yusuf et al., 2017; Hatmoko & Handoko, 2019). Dibandingkan dengan abu sekam padi dan abu ampas tebu, ATKs memiliki keunggulan dalam hal ketersediaan di wilayah perkebunan kelapa sawit, khususnya di Sumatera Utara. Dengan jumlah limbah yang melimpah, ATKs berpotensi menjadi solusi yang efektif dalam mengurangi dampak lingkungan sekaligus meningkatkan efisiensi konstruksi. Oleh karena itu, penting untuk mengevaluasi karakteristik ATKs secara komprehensif serta membandingkannya dengan material pozzolan lainnya guna memastikan efektivitasnya dalam mendukung beton hijau dan konstruksi berkelanjutan.

Tabel 1. Komposisi kimia Abu Tandan Kosong Kelapa Sawit (ATKS)

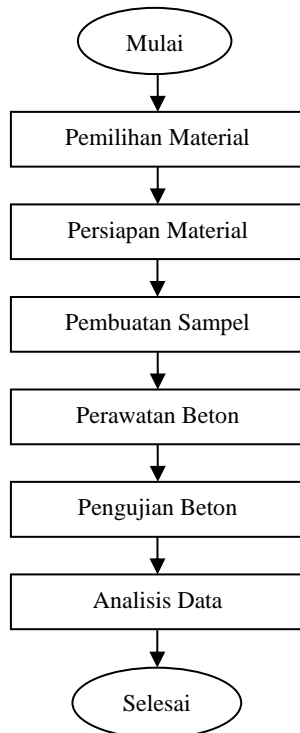
Komposisi	600°C (%)	700°C (%)	800°C (%)
CaO	40	52,2	39,2
K ₂ O	40,2	29,8	35,2
SiO ₂	5,6	6,9	9,5
P ₂ O ₅	2,9	4,2	4,2
Fe ₂ O ₃	2,4	1,5	2,6
Cl	5,9	3	2,5
SO ₃	1,7	1,3	2,1



Gambar 1. Scanning Electron Microscope (SEM) dari abu limbah kelapa sawit yang dibakar pada suhu 800°C (a) sebelum dan (b) setelah proses pencucian

III. METHOD

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan utama, yaitu pemilihan material dan peralatan, desain campuran beton, pengujian beton, serta analisis data. Metode yang digunakan bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh substitusi abu tandan kosong kelapa sawit (ATKS) terhadap sifat mekanis dan durabilitas beton. Gambar 3 menunjukkan skema penelitian yang menggambarkan alur dari pemilihan material hingga pengujian beton. Material utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi semen Portland, agregat halus, agregat kasar, air, dan ATKs sebagai bahan substitusi sebagian semen. Semen Portland digunakan sebagai bahan pengikat utama, sementara agregat halus dan kasar berfungsi sebagai material struktural dalam campuran beton. Air yang digunakan merupakan air bersih yang memenuhi persyaratan standar beton. ATKs diperoleh dari hasil pembakaran tandan kosong kelapa sawit dan dikarakterisasi sebelum digunakan dalam campuran beton. Karakteristik fisik agregat ditentukan melalui pengujian berat jenis, absorpsi air, kadar lumpur, serta analisis modulus halus butiran. Hasil pengujian sifat fisik agregat disajikan dalam Tabel 2, yang mencakup parameter seperti berat jenis, absorpsi air, dan kadar lumpur. Selain itu, hasil analisis modulus halus butiran agregat halus dan kasar yang diperoleh melalui uji saringan ditampilkan dalam Tabel 3 dan Tabel 4. Kurva gradasi agregat halus dan kasar yang diperoleh dari hasil analisis ini dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 2. Diagram alur penelitian

Tabel 2. Pengujian sifat fisik agregat

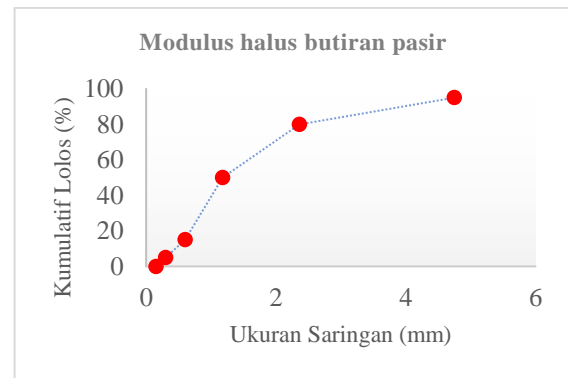
Parameter	Agregat Halus	Agregat Kasar
Berat Jenis (kg/m ³)	2,6	2,7
Absorpsi Air (%)	2,5	1,2
Kadar Lumpur (%)	3	0,5
Modulus Halus Butiran	2,7	6,5
Gradasi (mm)	0,15 – 4,75	2,36 – 38,10

Tabel 3. Modulus halus butiran pasir

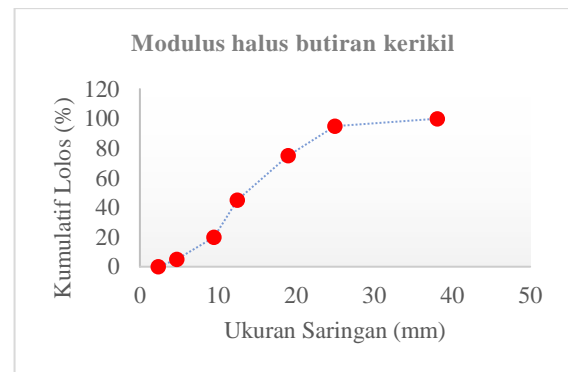
Ukuran Saringan (mm)	Berat Tertahan (g)	Kumulatif Tertahan (%)	Kumulatif Lolos (%)
4,75	50	5	95
2,36	150	20	80
1,18	300	50	50
0,6	350	85	15
0,3	100	95	5
0,15	50	100	0

Tabel 4. Modulus halus butiran kerikil

Ukuran Saringan (mm)	Berat Tertahan (g)	Kumulatif Tertahan (%)	Kumulatif Lolos (%)
38,1	0	0	100
25	50	5	95
19	200	25	75
12,5	300	55	45
9,5	250	80	20
4,75	150	95	5
2,36	50	100	0



Gambar 3. Kurva gradasi agregat halus

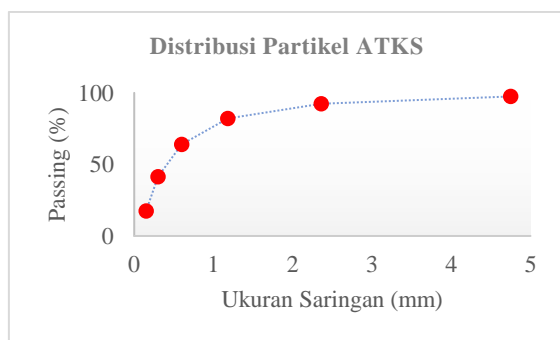


Gambar 4. Kurva gradasi agregat kasar

Desain campuran beton dalam penelitian ini mengacu pada SNI 7656:2012, yang mengatur tata cara pemilihan campuran beton normal, beton berat, dan beton massa. Beton dirancang untuk mencapai mutu 22.5 MPa pada umur 28 hari, dengan benda uji berbentuk silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Variasi substitusi Abu Tandan Kosong Sawit (ATKS) yang digunakan dalam campuran beton adalah 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% sebagai pengganti sebagian semen. Setiap variasi campuran memiliki 15 benda uji kuat tekan dan 15 benda uji kuat tarik belah, yang masing-masing diuji pada umur 7, 14, dan 28 hari untuk mengevaluasi perkembangan kekuatan beton seiring waktu. Komposisi campuran beton dengan berbagai variasi substitusi ATKS disajikan dalam Tabel 4. Selain itu, distribusi ukuran partikel ATKS dianalisis menggunakan metode Particle Size Analysis (PSA) atau granulometri untuk memahami karakteristik material yang digunakan. Hasil distribusi partikel ATKS ditampilkan dalam Gambar 5.

Tabel 4. Komposisi campuran beton dengan variasi ATKS (kg/m³)

Material	0% ATKS	5% ATKS	10% ATKS	15% ATKS	20% ATKS
Semen	350	332,5	315	297,5	280
ATKS	0	17,5	35	52,5	70
Agregat Halus	750	750	750	750	750
Agregat Kasar	1050	1050	1050	1050	1050
Air	175	175	175	175	175
Faktor Air/Semen	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Jumlah Benda Uji Kuat Tekan	15 (5 per umur)	15 (5 per umur)	15 (5 per umur)	15 (5 per umur)	15 (5 per umur)
Jumlah Benda Uji Kuat Tarik Belah	15 (5 per umur)	15 (5 per umur)	15 (5 per umur)	15 (5 per umur)	15 (5 per umur)



Gambar 5. Distribusi partikel ATKS

Untuk mengevaluasi performa beton, dilakukan serangkaian pengujian mekanis dan durabilitas. Uji kuat tekan dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari sesuai dengan standar SNI 1974:2023, yang mengatur metode pengujian kuat tekan beton silinder. Selanjutnya, uji kuat tarik belah dilakukan pada umur yang sama berdasarkan standar SNI 2491:2014, yang mengatur metode pengujian kekuatan tarik belah spesimen beton silinder. Sebagai bagian dari evaluasi durabilitas, dilakukan pengujian absorpsi air, ketahanan terhadap sulfat, dan ketahanan terhadap karbonasi untuk mengetahui ketahanan beton terhadap lingkungan agresif. Hasil pengujian beton dianalisis dengan membandingkan berbagai variasi campuran untuk mengevaluasi dampak substitusi ATKS terhadap sifat mekanis dan durabilitas beton. Data hasil uji kuat tekan dan kuat tarik belah dibandingkan dalam bentuk tabel dan grafik guna mempermudah interpretasi. Perbandingan hasil pengujian antar variasi campuran beton dianalisis menggunakan metode statistik untuk mengidentifikasi tren perubahan kuat tekan, kuat tarik, serta parameter durabilitas

beton. Dengan metode yang telah dirancang, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih luas mengenai pemanfaatan ATKS sebagai material alternatif dalam beton hijau serta kontribusinya terhadap konstruksi berkelanjutan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari untuk setiap variasi substitusi Abu Tandan Kosong Sawit (ATKS). Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil uji kuat tekan beton (MPa)

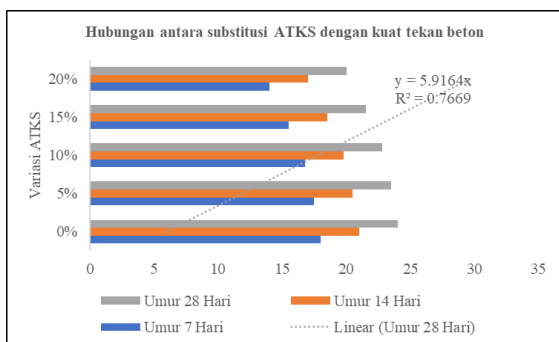
Variasi ATKS	Umur 7 Hari	Umur 14 Hari	Umur 28 Hari
0%	18	21	24
5%	17,5	20,5	23,5
10%	16,8	19,8	22,8
15%	15,5	18,5	21,5
20%	14	17	20

Dari Tabel 5, dapat dilihat bahwa peningkatan kadar ATKS dalam campuran beton menyebabkan penurunan kuat tekan beton. Hal ini disebabkan oleh karakteristik ATKS yang memiliki kandungan silika amorf lebih tinggi dibandingkan semen, sehingga mengurangi reaksi hidrasi semen yang berkontribusi terhadap pembentukan kekuatan beton. Hasil analisis linear menunjukkan bahwa hubungan antara substitusi ATKS dengan kuat tekan beton dapat dinyatakan dengan persamaan $y = 5,9164x$ dan dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,7669$ yang menunjukkan bahwa variabel substitusi ATKS memiliki pengaruh yang cukup kuat terhadap perubahan kuat tekan beton. Grafik hubungan substitusi ATKS terhadap kuat tekan beton ditampilkan pada Gambar 6. Pengujian kuat tarik belah beton dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari untuk setiap variasi substitusi ATKS. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 6. Terlihat bahwa semakin tinggi persentase ATKS yang digunakan, semakin rendah nilai kuat tarik belah beton. Hal ini dapat dijelaskan oleh sifat ATKS yang kurang berkontribusi dalam pembentukan ikatan antar partikel beton dibandingkan dengan semen, sehingga menurunkan daya ikat dan ketahanan terhadap tarik. Hasil analisis linear menunjukkan bahwa hubungan antara substitusi ATKS dengan kuat tarik belah beton dapat dinyatakan dengan persamaan $y = 0,6655x$ dan dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,7496$ yang menunjukkan bahwa terdapat hubungan kuat

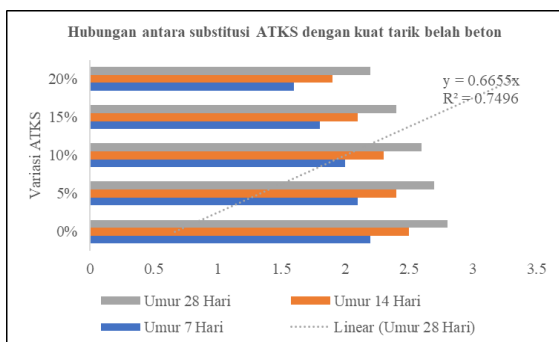
antara substitusi ATKS dengan kuat tarik belah beton. Grafik hubungan substitusi ATKS terhadap kuat tarik belah beton dapat dilihat pada Gambar 7.

Tabel 6. Hasil uji kuat tarik belah beton (MPa)

Variasi ATKS	Umur 7 Hari	Umur 14 Hari	Umur 28 Hari
0%	2,2	2,5	2,8
5%	2,1	2,4	2,7
10%	2	2,3	2,6
15%	1,8	2,1	2,4
20%	1,6	1,9	2,2



Gambar 6. Grafik hubungan substitusi ATKS terhadap kuat tekan beton



Gambar 7. Grafik hubungan substitusi ATKS terhadap kuat tarik belah beton

V. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan abu tandan kosong kelapa sawit (ATKS) sebagai material tambahan dalam campuran beton hijau dapat meningkatkan kinerja mekanis beton sekaligus mendukung konsep konstruksi berkelanjutan. Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah, variasi substitusi ATKS memberikan pengaruh terhadap sifat mekanis beton, di mana peningkatan persentase ATKS cenderung menurunkan kuat tekan dan kuat tarik belah beton dibandingkan dengan beton tanpa substitusi. Namun, pada kadar tertentu, beton dengan ATKS masih memenuhi standar kekuatan yang dipersyaratkan untuk aplikasi

struktural. Hubungan antara substitusi ATKS dengan kuat tekan beton menunjukkan persamaan regresi linear $y = 5,9164x$ dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,7669$ sedangkan hubungan antara substitusi ATKS dengan kuat tarik belah beton diperoleh persamaan $y = 0,6655x$ dengan $R^2 = 0,7496$, yang mengindikasikan korelasi yang cukup kuat. Selain itu, dari aspek lingkungan, penggunaan ATKS sebagai pengganti sebagian semen Portland berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon dan pemanfaatan limbah industri kelapa sawit secara efektif, sehingga berpotensi mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Dengan demikian, beton berbasis ATKS dapat menjadi alternatif material konstruksi yang lebih ramah lingkungan. Meskipun demikian, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi ketahanan jangka panjang beton dengan ATKS, terutama terhadap lingkungan agresif, serta analisis ekonomi guna memastikan kelayakan implementasinya dalam skala industri.

REFERENCES

Admojo, E. S. (2017). Pemanfaatan limbah abu ampas tebu serta batu gamping sebagai bahan substitusi semen terhadap karakteristik paving block [Dissertation]. University of Technology Yogyakarta.

Amalia, N., et al. (2024). Penerapan prinsip lean construction dalam sistem manajemen mutu konstruksi untuk meningkatkan produktivitas dan kualitas. *Journal of Comprehensive Science (JCS)*, 3(5).

Anggreani, N. A., Mayank, D. A. M., & Nugroho, D. H. (2024). Penggunaan material limbah untuk pembangunan berkelanjutan pada konstruksi jalan raya. *Jurnal Daktilitas*, 4(2), 74-82.

Badan Standardisasi Nasional. (2012). SNI 7656:2012 - Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa. BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (2014). SNI 2491:2014 - Metode uji kekuatan tarik belah spesimen beton. BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (2023). SNI 1974:2023 - Metode uji untuk kekuatan tekan spesimen beton silinder. BSN.

Chrismaningwang, G., et al. (2016). Pengaruh curing air laut terhadap serapan dan permeabilitas beton mutu tinggi dengan bahan tambah abu sekam padi.

Editama, P. (2024). Penerapan teknologi konstruksi ramah lingkungan dalam proyek infrastruktur. *Circle Archive*, 1(6).

Ednor, M., Sitompul, I. R., & Olivia, M. (2017). Kuat tekan dan perubahan berat mortar menggunakan bahan tambah abu sekam padi (rice husk ash) di air gambut. *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil dan Perencanaan (KN-TSP)*.

Farras, Y. (2024). Uji tanpa merusak, kuat tekan dan emisi karbon dioksida beton yang mengandung semen campuran dan abu terbang [Dissertation]. Universitas Hasanuddin.

- Hamdi, F., et al. (2022). Teknologi beton. Tohar Media.
- Hasibuan, S. A. R. S., Prayuda, H., Zuhanda, M. K., & Anisa, Y. (2023). Enhancing concrete strength and sustainability: the role of Medan Barangan banana skin powder as a cement substitute. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*, 10(109), 1731.
- Hatmoko, J. T., & Handoko, L. (2019). Pengaruh perubahan kadar air pada sifat-sifat tanah organik yang distabilisasi dengan limbah karbit dan abu ampas tebu. *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil*, 2(2), 97-108.
- Herli, H. (2024). Evaluasi durabilitas beton geopolimer dengan penambahan plastik PET [Dissertation]. Universitas Hasanuddin Makassar.
- Hudori, M. (2017). Perbandingan kinerja perkebunan kelapa sawit Indonesia dan Malaysia. *Jurnal Citra Widya Edukasi*, 9(1), 93-112.
- Imran, M. (2018). Material konstruksi ramah lingkungan dengan penerapan teknologi tepat guna. *Radial*, 6(2), 146-157.
- Katrina, G. (2014). Pemanfaatan limbah kulit kerang sebagai substitusi pasir dan abu ampas tebu sebagai substitusi semen pada campuran beton mutu K-225. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 2(3), 308-313.
- Manurung, E. H., Prajoko, A., & Dasrah, I. (2025). Analisis penggunaan alternatif material ramah lingkungan proyek dalam konstruksi penggunaan: Studi kasus dari berbagai konstruksi. *Scientica: Jurnal Ilmiah Sains dan Teknologi*, 3(3), 516-522.
- Mowo, C. L., & Arumningsih, D. (2021). Beton memadat sendiri ramah lingkungan menggunakan limbah serbuk beton, limbah serbuk batu bata dan limbah debu pemotongan marmer. *Jurnal Teknik Sipil dan Arsitektur*, 26(2), 29-39.
- Nainggolan, H., et al. (2023). Green technology innovation: Transformasi teknologi ramah lingkungan berbagai sektor. PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Priadi, D., et al. (2024). Strategi pengelolaan sumber daya alam tidak dapat diperbaharui: Tinjauan kritis terhadap penelitian sebelumnya. *Jurnal Media Akademik (JMA)*, 2(11).
- Rahmat, F., et al. (2021). Synthesis and characterization of ZnO-SiO₂ composite using oil palm empty fruit bunch as a potential silica source. *Molecules*, 26(4), 1061.
- Turuallo, G. (2013). Kinerja ground granulated blast furnace slag (GGBS) sebagai bahan pengganti sebagian semen untuk sustainable development. *Jurnal Teknik Sipil, Universitas Tadulako, Palu*.
- Utsman, M. R., Suroto, W., & Winarto, Y. (2019). Penerapan prinsip arsitektur hijau pada bangunan kantor sewa di Surakarta. *Senthong*, 2(2).
- Wuwung, M. P., Windah, R. S., & Mondoringin, M. R. I. A. (2023). Studi eksperimental uji kuat tekan beton dengan memakai serbuk cangkang telur ayam sebagai substitusi parsial agregat halus. *TEKNO*, 21(85), 1707-1714.
- Yusuf, Y., Aziz, H., & Jaslia, P. R. S. (2017). Pengaruh penambahan abu ampas tebu terhadap sifat kimia air rendaman (pH, TDS, dan kesadahan total) dan sifat kuat tekan mortar semen PCC pada perendaman air laut. *Jurnal Zarah*, 5(2), 13-20.
- Zainuri, Z., & Soehardi, F. (2021). Stabilitas tanah gambut menggunakan bottom ash abu tandan sawit terhadap nilai California Bearing Ratio. *Inersia Jurnal Teknik Sipil*, 13(2), 55-60.