

Pengaruh Penggunaan Bahan Tambah Sebagai Substitusi Semen dan Agregat Terhadap Nilai Kuat Tarik Belah Beton Mutu Tinggi Hybrid

Ade Dwinta^{1✉}, Hilma Erliana², Chaira³

^{1,2} Konstruksi Pondasi Beton dan Pengaspalan Jalan, Akademi Komunitas Negeri Aceh Barat, Indonesia

³ Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diserahkan : 08-09-2024

Direvisi : 26-09-2024

Diterima : 01-10-2024

Kata Kunci:

Beton mutu tinggi,
Material alternatif, Kuat
tarik belah

Keywords :

High-strength concrete,
Alternative materials,
Splitting tensile strength

Corresponding Author :

Ade Dwinta

Konstruksi Pondasi Beton dan Pengaspalan Jalan, Akademi Komunitas Negeri Aceh Barat, Indonesia
Jl. Iskandar Muda-Kompleks STTU Alue Peunyareng, Meulaboh – Aceh Barat

Email: adedwinta@aknacehbarat.ac.id

ABSTRAK

Beton merupakan material utama konstruksi, dengan agregat sebagai komponen utamanya. Namun, untuk memenuhi tuntutan konstruksi yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis, diperlukan material alternatif seperti bongkahan cangkang sawit (BCS), pasir pozzolan, fly ash, dan bijih besi. Penelitian ini bertujuan untuk menguji kinerja beton dengan menggunakan variasi agregat dan bahan tambahan tersebut. Metode yang digunakan meliputi pengujian sifat fisis dan mekanis, seperti berat jenis, absorpsi, keausan, serta kuat tarik belah pada umur 28 dan 56 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa agregat Split dan BCS memenuhi standar keausan $< 50\%$, dengan Split lebih tahan lama. Beton hybrid (BMT-FBPP) yang menggunakan fly ash dan pasir pozzolan mengalami peningkatan kuat tarik belah sebesar $19,85\%$ pada 28 hari dan $24,57\%$ pada 56 hari dibanding beton normal. Maka dapat disimpulkan bahwa material alternatif ini mampu meningkatkan kinerja beton, sehingga cocok untuk konstruksi berkelanjutan.

ABSTRACT

Concrete is a primary construction material, with aggregate as its main component. However, to meet the demands for more environmentally friendly and economical construction, alternative materials such as palm shell chunks (BCS), pozzolan sand, fly ash, and iron ore are needed. This study aims to evaluate the performance of concrete using variations of these aggregates and additional materials. The method employed includes testing the physical and mechanical properties, such as specific gravity, absorption, abrasion, and split tensile strength at 28 and 56 days. The results indicate that Split and BCS aggregates meet the abrasion standard of $< 50\%$, with Split showing greater durability. The hybrid concrete (BMT-FBPP) using fly ash and pozzolan sand experienced a split tensile strength increase of 19.85% at 28 days and 24.57% at 56 days compared to normal concrete. It can be concluded that these alternative materials can enhance concrete performance, making them suitable for sustainable construction.

PENDAHULUAN

Beton merupakan material konstruksi yang sangat penting dalam industri pembangunan. Kualitas dan ketahanan beton sangat bergantung pada kualitas bahan-bahan pembentuknya, terutama agregat. Agregat, yang terdiri dari pasir, kerikil, atau batu pecah, memberikan struktur dan kekuatan pada beton. Oleh karena itu, pemilihan agregat yang tepat merupakan faktor krusial dalam memastikan kinerja dan daya tahan beton (Mulyono, 2019). Sifat fisis agregat, seperti berat volume, berat jenis, absorpsi, dan susunan butiran, mempengaruhi banyak aspek dari beton, termasuk kekuatan tekan, keausan, dan workability (Alkhaly, 2016). Berat volume agregat mempengaruhi densitas beton, sedangkan berat jenis dan absorpsi berhubungan dengan daya serap air dan kepadatan agregat (Faqihuddin et al., 2021). Susunan butiran yang baik penting untuk pencampuran beton yang homogen dan optimal. Oleh karena itu, penting untuk melakukan pemeriksaan mendalam terhadap sifat-sifat ini untuk memastikan bahwa agregat memenuhi standar kualitas yang diperlukan (Ozyildirim & Carino, 2006).

Seiring dengan kebutuhan akan material konstruksi yang berkualitas tinggi, muncul pula kebutuhan untuk mencari alternatif yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis (Somalinggi et al., 2020). Material alternatif seperti bongkahan cangkang sawit (BCS), pasir pozzolan, fly ash batu bara, dan bijih besi menawarkan potensi untuk meningkatkan sifat beton serta mengurangi dampak lingkungan dari penggunaan agregat konvensional (Alkhaly, 2016). Material ini tidak hanya dapat mengurangi ketergantungan pada bahan baku konvensional tetapi juga dapat meningkatkan performa beton dalam hal kekuatan dan ketahanan. Penerapan material alternatif dalam campuran beton tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanis tetapi juga untuk mengurangi konsumsi energi dan emisi karbon yang terkait dengan produksi beton (Suwindu et al., 2020). Dalam hal ini, penggunaan superplasticizer seperti *Viscocrete-10* dapat membantu mencapai *workability* yang diinginkan sambil mengurangi jumlah air yang diperlukan, serta memperbaiki struktur mikro beton (Nugraheni, 2011).

Penggunaan material berkualitas tinggi dalam konstruksi beton sangat penting untuk menjamin kekuatan, ketahanan, dan keandalan struktur bangunan. Beton, sebagai material konstruksi yang paling umum digunakan, membutuhkan agregat berkualitas baik untuk mencapai sifat mekanis yang diinginkan (Ahmad et al., 2021; Tobing & Risdianto, 2019). Agregat berperan penting dalam menentukan berat, keausan, dan kekuatan beton. Sifat fisis seperti berat volume, berat jenis, absorpsi, dan susunan butiran agregat sangat mempengaruhi kinerja beton. Oleh karena itu, penting untuk mengevaluasi sifat-sifat ini secara cermat sebelum digunakan dalam campuran beton (Dewi, 2016; Pramanda et al., 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji sifat fisis agregat konvensional seperti split dan pasir, serta material alternatif seperti bongkahan cangkang sawit (BCS), pasir pozzolan, fly ash batu bara, dan bijih besi. Penggunaan material alternatif ini diharapkan dapat meningkatkan kinerja beton sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari pemanfaatan sumber daya alam yang berlebihan. Berdasarkan standar yang ditetapkan oleh Mulyono (2004), Troxell yang dikutip oleh Parmawati (2014), dan ASTM (2004), penelitian ini bertujuan untuk menilai kelayakan agregat dan material alternatif sebagai bahan pembentuk beton mutu tinggi. Selain itu juga menyusun rancangan campuran untuk beton mutu tinggi normal dan beton mutu tinggi hybrid. Beton mutu tinggi hybrid menggabungkan fly ash batu bara, agregat BCS, pasir pozzolan, dan bijih besi untuk memperbaiki sifat mekanis, mengurangi penggunaan semen, dan meningkatkan efisiensi. Penggunaan superplasticizer jenis *Viscocrete-10* diharapkan dapat meningkatkan workability beton dan memperbaiki struktur mikro beton.

Pengujian kuat tarik belah pada beton dilakukan pada umur 28 hari dan 56 hari untuk mengevaluasi efektivitas campuran hybrid ini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beton mutu tinggi hybrid dengan bahan tambah fly ash, BCS, pasir pozzolan, dan nanomaterial bijih besi menghasilkan kuat tarik belah yang lebih tinggi dibandingkan beton mutu tinggi normal. Temuan ini menunjukkan potensi penggunaan material alternatif untuk meningkatkan performa beton, memberikan solusi yang lebih ramah lingkungan, dan mengurangi penggunaan bahan baku konvensional. Dengan memperhatikan hasil penelitian ini, diharapkan dapat memberikan

kontribusi terhadap pengembangan beton mutu tinggi yang lebih efisien dan berkelanjutan, yang pada akhirnya akan meningkatkan kualitas dan durabilitas struktur beton di masa depan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dirancang untuk mengkaji pengaruh penggunaan material alternatif dalam komposisi beton mutu tinggi, serta menilai kinerja mekanis beton yang dihasilkan. Fokus utama penelitian ini adalah pada evaluasi sifat fisis agregat, perencanaan campuran beton, dan pengujian kuat tarik belah beton. Metodologi penelitian terdiri dari beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen di Laboratorium Konstruksi dan Bahan Bangunan (LKBB), Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala. Metodologi penelitian ini melibatkan beberapa tahapan yang sistematis, yaitu penyediaan dan pembersihan material, pengujian sifat fisis material, perencanaan campuran beton (mix design), pembuatan dan perawatan benda uji, serta pengujian benda uji. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan material alternatif seperti bongkahan cangkang sawit (BCS), pasir pozzolan, fly ash batu bara, dan bijih besi terhadap sifat mekanis dan fisis beton mutu tinggi.

2. Pengumpulan Data dan Pemilihan Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi split (diameter ϕ 12 mm dan ϕ 4,76 mm) dan pasir (diameter ϕ 2,38 mm). Pemilihan agregat konvensional didasarkan pada standar yang telah ditetapkan oleh (Mulyono, 2005) dan ASTM (2004). Sedangkan untuk material alternatif yang digunakan meliputi bongkahan cangkang sawit (BCS), pasir pozzolan, fly ash batu bara, dan bijih besi. Material ini dipilih berdasarkan potensinya untuk meningkatkan kinerja mekanis beton dan mengurangi dampak lingkungan. Untuk bahan tambah admixture yang dipakai adalah Superplasticizer Viscocrete-10 digunakan untuk meningkatkan workability beton dan memperbaiki struktur mikro beton.

3. Pengujian Sifat Fisis Agregat

Pengujian sifat fisis agregat meliputi berat volume dan berat jenis agregat, absorpsi dan susunan butiran (Prayuda, 2018; Tuwanakotta et al., 2023):

- Pengujian berat volume dan berat Jenis yang dilakukan untuk menentukan berat volume dan berat jenis material (termasuk kondisi *saturated surface-dry* (SSD) dan *oven-dry* OD) menggunakan metode uji standar. Data hasil pengukuran ditampilkan dalam tabel untuk setiap jenis agregat.
- Pengujian absorpsi dilakukan untuk mengetahui kemampuan material menyerap air, yang mempengaruhi workability dan durabilitas beton.
- Susunan Butiran: Analisis dilakukan dengan menggunakan uji saringan untuk menentukan fineness modulus dari setiap jenis agregat. Tujuannya adalah untuk menilai distribusi ukuran butiran dan memastikan homogenitas campuran.

4. Perencanaan Campuran Beton

Campuran beton dirancang untuk beton mutu tinggi normal (BMT-N) dan beton mutu tinggi hybrid (BMT-FBPP). Desain campuran ini mempertimbangkan penggunaan material alternatif (fly ash, pasir pozzolan, dan BCS) sebagai substitusi parsial dari agregat konvensional dan semen. Penggunaan bijih besi dan superplasticizer Viscocrete-10 juga diperhitungkan untuk meningkatkan performa beton. Komposisi setiap varian campuran beton diatur dengan perbandingan tertentu (misalnya, rasio air-semen (FAS), jumlah semen, fly ash, agregat, dan superplasticizer) untuk mencapai kualitas yang diinginkan.

5. Pembuatan dan Pemeliharaan Benda Uji

Pembuatan beton dicampur dan dicetak menjadi benda uji silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Proses pencampuran dan pengecoran dilakukan sesuai dengan prosedur standar untuk memastikan keseragaman dan kualitas benda uji. Sedangkan Pemeliharaan benda uji yang telah dicetak disimpan dalam kondisi lembab dan dipelihara hingga mencapai usia pengujian yang telah ditentukan (28 hari dan 56 hari).

6. Pengujian Sifat Mekanis Beton

Pengujian kuat tarik belah dilakukan pada umur 28 hari dan 56 hari untuk mengevaluasi kuat tarik belah beton. Pengujian ini menggunakan metode uji silinder sesuai standar ASTM. Hasil pengujian dibandingkan antara beton mutu tinggi normal (BMT-N) dan beton mutu tinggi hybrid (BMT-FBPP) untuk menilai efektivitas penggunaan material alternatif. Data hasil pengujian kuat tarik belah dianalisis dan dibandingkan untuk setiap varian campuran beton. Hasil perhitungan disajikan dalam tabel dan grafik untuk menunjukkan perbandingan performa mekanis antara beton mutu tinggi normal dan hybrid.

7. Analisis dan Interpretasi Hasil

Evaluasi performansi material dari hasil pengujian sifat fisis dan mekanis dianalisis untuk menilai kualitas agregat dan material alternatif yang digunakan. Parameter seperti berat jenis, absorpsi, dan keausan dinilai untuk memastikan bahwa material tersebut memenuhi persyaratan standar. Data hasil pengujian kuat tarik belah digunakan untuk membandingkan performa beton mutu tinggi normal (BMT-N) dengan beton mutu tinggi hybrid (BMT-FBPP). Peningkatan kuat tarik belah dianalisis untuk menentukan efektivitas penggunaan fly ash, pasir pozzolan, BCS, dan bijih besi. Hasil penelitian dievaluasi terhadap standar-standar yang relevan (ASTM, Mulyono, Troxell) untuk memastikan bahwa campuran beton yang dihasilkan memenuhi atau melampaui persyaratan yang telah ditetapkan.

HASIL PEMBAHASAN

1. Sifat Fisis Bahan Agregat

Hasil pemeriksaan sifat fisik agregat meliputi berat volume, berat jenis, absorpsi, dan susunan butiran agregat akan disajikan dalam subbab di bawah ini.

a. Berat Volume

Hasil Pengukuran berat volume rata-rata yang diperoleh untuk setiap jenis agregat diperlihatkan pada tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 1 Hasil Perhitungan Berat Volume Agregat

No	Jenis Agregat	Berat Volume (kg/l)	Batas Izin
1.	Split ϕ 12 mm	1,445	> 1,2 kg/l
2.	Split ϕ 4,76 mm	1,381	
3.	Pasir ϕ 2,38 mm	1,675	

Dari tabel 1 di atas hasil pengukuran yang diperoleh, dapat dilihat bahwa terdapat tiga jenis agregat yang diuji, yaitu Split ϕ 12 mm, Split ϕ 4,76 mm, dan Pasir ϕ 2,38 mm. Masing-masing jenis agregat memiliki berat volume yang berbeda-beda, yang hasilnya Split ϕ 12 mm memiliki berat volume sebesar 1,445 kg/l. Nilai ini berada di atas batas izin yang ditetapkan, yaitu lebih dari 1,2 kg/l. Hal ini menunjukkan bahwa Split ϕ 12 mm memiliki kerapatan yang cukup baik dan memenuhi standar yang diperlukan untuk digunakan dalam konstruksi. Split ϕ 4,76 mm: Berat volume untuk agregat ini tercatat sebesar 1,381 kg/l. Sama seperti agregat sebelumnya, nilai ini juga lebih tinggi dari batas izin yang ditentukan (1,2 kg/l), menunjukkan bahwa agregat Split ϕ 4,76 mm memiliki kepadatan yang memadai untuk tujuan konstruksi. Pasir ϕ 2,38 mm: Jenis agregat ini memiliki berat volume tertinggi di antara ketiga jenis agregat yang diuji, yaitu 1,675 kg/l. Hasil ini jauh melampaui batas izin 1,2 kg/l, menunjukkan bahwa pasir ini memiliki tingkat kepadatan yang sangat baik, menjadikannya sangat cocok untuk digunakan sebagai bahan campuran dalam berbagai aplikasi konstruksi, terutama yang memerlukan agregat dengan tingkat kepadatan yang tinggi.

b. Berat Jenis dan Absorpsi

Hasil pengukuran berat jenis dan absorpsi yang diperoleh untuk setiap jenis agregat dapat dilihat pada tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2 Hasil Perhitungan Berat Jenis

Material	Berat Jenis SG (SSD)	Berat Jenis SG (OD)	Batas Izin Berat Jenis (Troxell)
Split ϕ 12 mm	2,758	2,737	2,5 – 2,8
Split ϕ 4,76 mm	2,793	2,793	2,5 – 2,8
Pasir ϕ 2,38 mm	2,671	2,617	2,0 – 2,7

Tabel 4.2 menunjukkan hasil pengukuran berat jenis untuk tiga jenis agregat, yaitu Split ϕ 12 mm, Split ϕ 4,76 mm, dan Pasir ϕ 2,38 mm. Pengukuran dilakukan dengan dua metode, yaitu kondisi *Saturated Surface Dry* (SSD) dan *Oven Dry* (OD). Agregat Split ϕ 12 mm menunjukkan berat jenis sebesar 2,758 dalam kondisi SSD dan 2,737 dalam kondisi OD. Kedua nilai ini berada dalam rentang batas izin yang ditetapkan (2,5 – 2,8), yang menunjukkan bahwa agregat ini memiliki kualitas yang baik dan memenuhi standar yang disyaratkan untuk digunakan dalam campuran beton atau aplikasi konstruksi lainnya. Agregat Split ϕ 4,76 mm memiliki berat jenis yang sama dalam kondisi SSD dan OD, yaitu 2,793. Nilai ini juga berada dalam batas izin yang ditetapkan, menunjukkan bahwa agregat ini memiliki tingkat kepadatan yang sangat baik dan cocok untuk digunakan dalam berbagai aplikasi konstruksi yang memerlukan agregat dengan kualitas tinggi. Pasir dengan ukuran ϕ 2,38 mm menunjukkan berat jenis 2,671 dalam kondisi SSD dan 2,617 dalam kondisi OD. Nilai ini juga memenuhi batas izin yang berlaku, yaitu 2,0 – 2,7. Hasil ini menunjukkan bahwa pasir ini memiliki kualitas yang baik dan dapat digunakan sebagai material dalam campuran beton, terutama dalam aplikasi yang memerlukan agregat dengan kepadatan tinggi dan sifat absorpsi yang terkontrol.

c. Susunan Butiran Agregat

Pasir dengan nilai fineness modulus dalam rentang ini biasanya digunakan untuk campuran beton yang memerlukan kehalusan tinggi, misalnya untuk beton permukaan atau plesteran, di mana kualitas permukaan yang halus lebih diutamakan.

Tabel 3 Hasil Nilai Fineness Modulus Agregat

No	Jenis Agregat	Fineness Modulus	Batas Izin (ASTM)
1.	Split (<i>Coarse Sand</i>)	5,870	5,5 – 8,0
2.	Pasir (<i>Fine Sand</i>)	2,332	2,2 – 2,6

Tabel 3 menampilkan hasil pengukuran nilai fineness modulus (modulus kehalusan) dari dua jenis agregat, yaitu Split (*Coarse Sand*) dan Pasir (*Fine Sand*). Fineness modulus adalah ukuran dari distribusi ukuran butir agregat, yang digunakan untuk menilai tekstur dan karakteristik agregat. Agregat jenis Split (*Coarse Sand*) memiliki nilai fineness modulus sebesar 5,870. Nilai ini berada di dalam rentang batas izin yang ditetapkan oleh standar ASTM, yaitu antara 5,5 dan 8,0. Hal ini menunjukkan bahwa agregat ini tergolong kasar dan cocok untuk digunakan dalam campuran beton yang memerlukan agregat kasar. Agregat dengan nilai fineness modulus dalam rentang ini biasanya digunakan untuk meningkatkan kekuatan struktural beton dan memberikan stabilitas pada campuran. Pasir (*Fine Sand*) menunjukkan nilai fineness modulus sebesar 2,332. Nilai ini juga berada dalam rentang batas izin yang ditetapkan oleh standar ASTM, yaitu antara 2,2 dan

2,6. Nilai ini menunjukkan bahwa pasir tersebut termasuk dalam kategori pasir halus. Pasir dengan nilai fineness modulus dalam rentang ini biasanya digunakan untuk campuran beton yang memerlukan kehalusan tinggi, misalnya untuk beton permukaan atau plesteran, di mana kualitas permukaan yang halus lebih diutamakan.

d. Pengujian Keausan Agregat Kasar Split dan BCS

Perhitungan hasil pengujian keausan agregat kasar split dan bongkahan cangkang sawit (BCS) diperlihatkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 4 Nilai Keausan Agregat Kasar

No	Jenis Agregat	Keausan (%)	Batas Izin (PUBI 1982)
1.	Split	18,326	< 50%
2.	Bongkahan Cangkang Sawit	44,132	

Tabel 4 menampilkan hasil pengujian keausan untuk dua jenis agregat kasar, yaitu Split dan Bongkahan Cangkang Sawit (BCS). Nilai keausan ini diukur dalam persentase, yang menunjukkan tingkat ketahanan agregat terhadap abrasi dan keausan. Standar batas izin yang digunakan untuk referensi adalah PUBI 1982, di mana nilai keausan yang diizinkan adalah kurang dari 50%. Agregat jenis Split memiliki nilai keausan sebesar 18,326%. Nilai ini jauh di bawah batas izin 50% yang ditetapkan oleh PUBI 1982. Hal ini menunjukkan bahwa Split memiliki tingkat ketahanan yang sangat baik terhadap abrasi dan keausan, menjadikannya pilihan yang cocok untuk digunakan dalam aplikasi konstruksi yang membutuhkan agregat dengan daya tahan tinggi, seperti pada perkerasan jalan, beton struktural, dan proyek-proyek lainnya yang memerlukan material yang tahan lama. Agregat jenis Bongkahan Cangkang Sawit menunjukkan nilai keausan sebesar 44,132%. Meskipun nilai ini lebih tinggi dibandingkan dengan nilai keausan dari Split, namun masih berada dalam batas izin yang diperbolehkan oleh PUBI 1982 (< 50%). Ini menunjukkan bahwa BCS memiliki ketahanan yang cukup terhadap abrasi, meskipun tidak sebaik Split. Agregat jenis ini masih bisa digunakan untuk keperluan konstruksi, tetapi mungkin lebih cocok untuk aplikasi di mana tingkat abrasi yang lebih tinggi dapat ditoleransi atau dalam campuran yang tidak menanggung beban berat.

2. Sifat Fisis Material Alternatif

Data sifat fisis material alternatif ini meliputi agregat kasar BCS, pasir BCS, pasir pozzolan, fly ash batu bara, abu pozzolan, abu cangkang sawit, dan bijih besi. Hasil perhitungan sifat fisis material alternatif dapat dilihat pada Tabel 5 dan 6 berikut ini.

Tabel 5. Hasil Pemeriksaan Sifat Fisis Material Alternatif

Material	Berat Volume (kg/l)	Berat Jenis SG (SSD) (kg/l)	Berat Jenis SG (OD) (kg/l)
Agregat Kasar BCS ϕ 4,76 mm	1,110	2,041	2,034
Agregat Kasar BCS ϕ 12 mm	1,020	1,872	1,870
Pasir Pozzolan	1,222	1,798	1,620
Fly Ash Batu Bara	0,878	2,327	2,309
Bijih Besi	2,378	3,811	3,782

Tabel 5 menyajikan hasil pemeriksaan berat volume dan berat jenis dari berbagai material alternatif, yang meliputi agregat kasar Bongkahan Cangkang Sawit (BCS), pasir pozzolan, fly ash

batu bara, dan bijih besi. Analisis dilakukan dengan mengukur berat volume dan berat jenis baik dalam kondisi Saturated Surface Dry (SSD) maupun Oven Dry (OD). Agregat kasar BCS dengan ukuran ϕ 4,76 mm memiliki berat volume relatif rendah dibandingkan dengan material lainnya. Berat jenis yang berada sekitar 2,041 (SSD) dan 2,034 (OD) menunjukkan bahwa material ini cukup ringan namun memiliki kerapatan yang cukup baik, menjadikannya alternatif yang layak dalam aplikasi konstruksi dengan kebutuhan tertentu. Agregat kasar BCS dengan ukuran ϕ 12 mm memiliki berat volume yang lebih rendah dibandingkan agregat dengan ukuran ϕ 4,76 mm, dan juga memiliki berat jenis yang sedikit lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa material ini lebih ringan dan dapat digunakan untuk aplikasi yang memerlukan bahan yang lebih ringan atau yang memerlukan sifat penyerap kejutan. Pasir pozzolan menunjukkan nilai berat volume dan berat jenis yang lebih rendah dibandingkan agregat kasar BCS. Hal ini menunjukkan bahwa pasir pozzolan memiliki struktur yang lebih ringan dan mungkin lebih porous, membuatnya cocok digunakan sebagai bahan aditif yang meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan kimia atau pengurangan panas hidrasi. Fly ash batu bara memiliki berat volume yang sangat rendah dibandingkan material lainnya, menunjukkan bahwa material ini sangat ringan dan berfungsi sebagai filler dalam campuran beton untuk meningkatkan kepadatan tanpa menambah berat signifikan. Berat jenis yang tinggi menunjukkan keefektifan dalam menambah kekuatan campuran beton. Bijih besi memiliki berat volume dan berat jenis yang tertinggi di antara semua material yang diuji. Ini menunjukkan bahwa bijih besi sangat padat dan berat, yang mungkin sangat cocok untuk aplikasi khusus yang memerlukan bahan dengan kekuatan tinggi dan densitas yang sangat tinggi, seperti dalam beton berat untuk aplikasi struktural dan proteksi radiasi.

Tabel 6. Nilai Fineness Modulus Material Alternatif

No	Jenis Agregat	Fineness Modulus
1.	Agregat Kasar BCS	5,801
2.	Pasir Pozzolan	2,544

Tabel 6 menampilkan nilai fineness modulus untuk dua jenis material alternatif, yaitu agregat kasar BCS dan pasir pozzolan. Nilai fineness modulus sebesar 5,801 menunjukkan bahwa agregat kasar BCS ini memiliki karakteristik yang sangat kasar, membuatnya cocok digunakan sebagai agregat kasar dalam beton struktural yang membutuhkan daya tahan mekanis tinggi. Pasir pozzolan dengan nilai fineness modulus 2,544 tergolong sebagai pasir yang cukup halus. Ini menunjukkan bahwa material ini dapat memberikan permukaan yang halus dan dapat digunakan dalam campuran mortar dan plesteran atau sebagai aditif yang meningkatkan workability dan ketahanan kimia dalam beton.

3. Rancangan Campuran Beton

Perhitungan rancangan campuran beton (mix design) setiap variasi beton mutu tinggi normal dan beton mutu tinggi hybrid untuk komposisi 1 m³ beton dapat di lihat pada tabel 7 di bawah ini.

Tabel 7. Perencanaan Rancangan Campuran Beton Mutu Tinggi 1 m3

Material	Beton Mutu Tinggi Normal BMTN	Beton Mutu Tinggi Hybrid BMT-FBPP
Air (kg)	180,00	153,00
FAS	0,30	0,30
Semen (kg)	600,00	510,00
Abu Fly Ash Batu Bara	-	90,00
Pasir ϕ 2,38 mm (kg)	649,59	530,91
Pasir Pozzolan ϕ 2,38 mm (kg)	-	58,99
Split ϕ 12 mm (kg)	974,38	530,91
Agregat Kasar BCS ϕ 12mm (kg)	-	353,94
Bijih Besi (kg)	36	30,60
Viscocrete-10 (kg)	9	7,65

4. Hasil Pengujian Sifat Mekanis Beton Mutu Tinggi

a. Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Umur 28 Hari dan 56 Hari

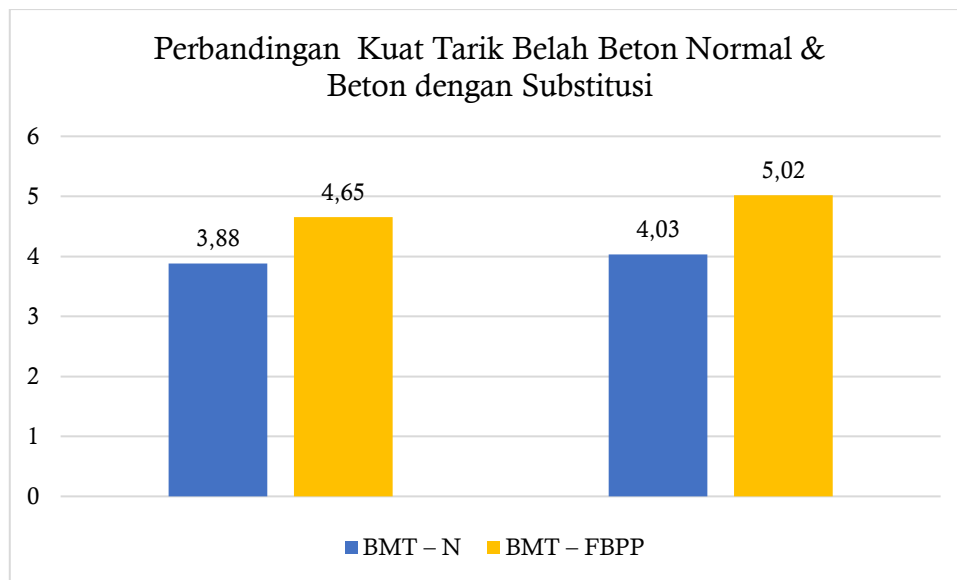
Pengujian kuat tarik belah dilakukan pada beton saat berumur 28 hari dan 56 hari dengan menggunakan benda uji silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Data hasil pengujian kuat tarik belah ditampilkan pada Tabel 8 dan Gambar 1 pada grafik perbandingan kuat tarik belah umur 28 hari dan 56 hari di bawah ini.

Tabel 8 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah pada Umur 28 Hari dan 56 Hari

Kode Benda Uji	P	Kuat Tarik Belah 28 Hari	Kuat Tarik Belah Rata-rata 28 Hari (MPa)	P	Kuat Tarik Belah 56 Hari	Kuat Tarik Belah Rata-rata 56 Hari (MPa)
	(Ton)	(MPa)		(Ton)	(MPa)	
BMT – N	26	3,62	3,88	31	4,31	4,03
	31	4,28		28	390	
	27	3,74		28	3,87	
BMT – FBPP	31	4,28	4,65	39	5,35	5,02
	33	4,58		36	4,95	
	37	5,1		36	4,77	

Tabel 8 menyajikan data hasil pengujian kuat tarik belah pada beton dengan dua variasi campuran, yaitu Beton Mutu Tinggi Normal (BMT-N) dan Beton Mutu Tinggi Hybrid (BMT-FBPP), pada umur 28 hari dan 56 hari. Pengujian dilakukan dengan menggunakan benda uji silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Analisis Beton Mutu Tinggi Normal (BMT-N) terjadi peningkatan kuat tarik belah dari 3,88 MPa pada umur 28 hari menjadi 4,03 MPa pada umur 56 hari. Peningkatan ini menunjukkan bahwa beton dengan campuran normal (tradisional) memiliki perkembangan kekuatan tarik seiring bertambahnya umur beton, meskipun peningkatannya relatif kecil. Analisis Beton Mutu Tinggi Hybrid (BMT-FBPP) BMT-FBPP terjadi peningkatan kuat tarik belah dari 4,65 MPa pada umur 28 hari menjadi 5,02 MPa pada umur 56 hari. Peningkatan ini lebih signifikan dibandingkan dengan campuran BMT-N, yang menunjukkan bahwa

penggunaan fly ash batu bara dan pozzolan dalam campuran beton dapat meningkatkan kekuatan tarik seiring waktu.



Gambar 1. Grafik Perbandingan Kuat Tarik Belah pada Umur 28 Hari dan 56 Hari

Dari gambar di atas, dapat disimpulkan bahwa penggunaan fly ash batu bara dan pozzolan (BMT-FBPP) dapat memberikan peningkatan yang lebih baik terhadap kuat tarik belah beton dibandingkan dengan campuran normal (BMT-N). Ini membuktikan bahwa bahan-bahan alternatif tersebut tidak hanya meningkatkan kekuatan awal beton, tetapi juga meningkatkan kinerja jangka panjangnya. Penggunaan material alternatif seperti ini dapat menjadi solusi yang efektif dalam aplikasi konstruksi yang memerlukan peningkatan kekuatan dan durabilitas beton.

b. Perbandingan Nilai Kuat Tarik Belah, Kuat Tarik Lentur, dan Absorpsi Beton Mutu Tinggi Hybrid Menggunakan Substitusi Aditif, Agregat dan Nanomaterial Bijih Besi

Perbandingan beton mutu tinggi normal (BMT-N) dan beton mutu tinggi hybrid menggunakan variasi bahan tambah fly ash batu bara, cangkang sawit, dan pasir pozzolan sebagai substitusi aditif, agregat halus dan agregat kasar serta penambahan filler nanomaterial bijih besi serta penambahan superplasticizer jenis viscocrete-10 sebanyak 1,5% dari berat semen terhadap nilai kuat tarik belah pada umur 28 hari dan 56 hari dapat dilihat pada Tabel 9 di bawah ini.

Tabel 9. Perbandingan Penggunaan Substitusi Aditif, Agregat dan Nanomaterial Bijih Besi Terhadap Kuat Tarik Belah

Umur Pengujian	Variasi	Kuat Tarik Belah Rata-rata (Mpa)	Perbandingan Kuat Tarik Belah Rata-rata Terhadap BMT-N	
			(%)	Selisih (%)
28 Hari	BMT-N	3.88	100	0
	BMT-FBPP	4.65	119.85	19.85
56 Hari	BMT-N	4.03	100	0
	BMT-FBPP	5.02	124.57	24.57

Tabel 9 menampilkan hasil perbandingan kuat tarik belah rata-rata pada dua jenis beton, yaitu beton mutu tinggi normal (BMT-N) dan beton mutu tinggi hybrid yang menggunakan variasi

bahan tambah (BMT-FBPP). BMT-FBPP merupakan beton yang menggunakan bahan tambahan seperti fly ash batu bara, cangkang sawit, pasir pozzolan sebagai substitusi aditif, agregat halus, dan agregat kasar. Selain itu, beton ini juga menggunakan filler nanomaterial bijih besi dan superplasticizer jenis viscocrete-10 sebanyak 1,5% dari berat semen. Pada umur 28 hari, BMT-FBPP menunjukkan peningkatan kuat tarik belah yang signifikan sebesar 19,85% dibandingkan dengan BMT-N. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan fly ash, cangkang sawit, pasir pozzolan, dan nanomaterial bijih besi, serta penambahan superplasticizer, memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan kekuatan tarik awal beton. Bahan tambahan ini meningkatkan ikatan antar partikel dalam matriks beton, meningkatkan kekompakan, dan mengurangi porositas. Pada umur 56 hari, BMT-FBPP menunjukkan peningkatan kuat tarik belah yang lebih besar sebesar 24,57% dibandingkan dengan BMT-N. Peningkatan ini menunjukkan bahwa manfaat penggunaan bahan tambahan berlanjut seiring waktu, dan memberikan kontribusi pada peningkatan kekuatan tarik jangka panjang. Peningkatan ini dapat disebabkan oleh proses hidrasi fly ash dan pozzolan yang berkelanjutan, serta efek filler dari nanomaterial bijih besi yang meningkatkan densitas matriks beton.

Beton mutu tinggi hybrid (BMT-FBPP) yang menggunakan variasi bahan tambah menunjukkan peningkatan kuat tarik belah yang signifikan dibandingkan beton mutu tinggi normal (BMT-N) baik pada umur 28 hari maupun 56 hari. Peningkatan ini disebabkan oleh kombinasi dari fly ash, pozzolan, nanomaterial bijih besi, dan superplasticizer yang secara efektif memperkuat struktur mikro beton, mengurangi porositas, dan meningkatkan ikatan antar partikel. Penggunaan material alternatif seperti fly ash, cangkang sawit, dan pasir pozzolan sebagai substitusi agregat dan aditif tidak hanya mendukung pembangunan yang lebih berkelanjutan dengan memanfaatkan limbah industri, tetapi juga meningkatkan kinerja mekanis beton. Nanomaterial bijih besi sebagai filler memperkuat efek ini dengan meningkatkan kepadatan dan kekuatan. Penambahan superplasticizer viscocrete-10 sebesar 1,5% dari berat semen membantu meningkatkan workability beton tanpa mengurangi kekuatannya, memungkinkan pencampuran material tambahan secara merata dan efektif. Penelitian ini menunjukkan bahwa inovasi dalam penggunaan bahan tambahan dapat secara signifikan meningkatkan kinerja beton dan membuka jalan menuju solusi konstruksi yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Adapun penelitian terdahulu yang menjadi acuan dari penelitian di atas adalah penelitian oleh (Cakrawijaya et al., 2022) dengan judul “Pengaruh Substitusi Pasir Silika sebagai Agregat Halus pada Sifat Mekanik Beton Mutu Tinggi” ini menunjukkan bahwa pasir silika dapat digunakan sebagai substitusi agregat halus dalam campuran beton dengan pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanik beton. Substitusi pasir silika sebanyak 10% menghasilkan peningkatan optimal pada kuat tekan sebesar 42,09 MPa dan kuat tarik belah sebesar 4,48 MPa setelah 28 hari. Namun, penambahan pasir silika lebih dari 10%, khususnya pada 20%, menyebabkan penurunan performa baik dalam hal kuat tekan maupun kuat tarik belah. Selanjutnya penelitian oleh (Khaira et al., 2023) dengan judul “Kuat Tarik Belah Beton Mutu Tinggi menggunakan Tanah Diatomae sebagai Substitusi Semen Dengan Penambahan Serat Polypropylene dan Serat Kaca” menyimpulkan bahwa penambahan serat polypropylene dan serat kaca pada beton mutu tinggi dapat meningkatkan kuat tarik belah beton, dengan peningkatan proporsional terhadap jumlah serat yang ditambahkan. Penambahan serat polypropylene sebesar 0,8% menghasilkan kuat tarik belah tertinggi sebesar 7,96 MPa, diikuti oleh serat kaca dengan hasil 7,81 MPa. Namun, penggunaan tanah diatomae sebagai substitusi semen sebesar 10% menurunkan kuat tarik belah beton secara signifikan, dari 7,41 MPa pada beton tanpa substitusi menjadi 5,44 MPa. Ini menunjukkan bahwa serat memiliki efek positif terhadap kuat tarik belah beton, sementara substitusi tanah diatomae cenderung melemahkan kekuatan tariknya. Penelitian yang dilakukan oleh (Rusvita et al., 2024) dengan judul “Analisa Pasir Pantai Bawasalo Sebagai Material Pengganti Pada Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Belah Beton”. Penelitian ini menunjukkan bahwa pasir pantai Bawasalo memiliki potensi untuk digunakan sebagai agregat halus dalam campuran beton, namun penggunaannya berdampak pada penurunan kekuatan beton. Meskipun pasir Bawasalo memenuhi spesifikasi material, hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin

tinggi persentase pasir Bawasalo yang digunakan, baik kuat tekan maupun kuat tarik belah beton mengalami penurunan. Penggunaan pasir Bawasalo sebagai substitusi agregat halus hingga 100% menghasilkan kuat tekan dan kuat tarik belah yang lebih rendah dibandingkan dengan beton normal, menunjukkan bahwa pasir pantai ini kurang optimal untuk meningkatkan performa mekanik beton secara keseluruhan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan substitusi semen dengan fly ash batu bara, agregat halus dengan pasir pozzolan, agregat kasar dengan cangkang sawit, serta penambahan filler nanomaterial bijih besi pada beton mutu tinggi hybrid menghasilkan kuat tarik belah yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton mutu tinggi normal. Kuat tarik belah beton mutu tinggi normal pada umur 28 hari mencapai 3,88 MPa dan meningkat menjadi 4,03 MPa pada umur 56 hari, sedangkan beton mutu tinggi hybrid dengan variasi Beton mutu tinggi hybrid (BMT-FBPP) menunjukkan peningkatan kuat tarik belah sebesar 4,65 MPa pada umur 28 hari dan 5,02 MPa pada umur 56 hari. Hasil ini menunjukkan bahwa material substitusi dan filler nanomaterial bijih besi efektif meningkatkan kuat tarik belah pada beton mutu tinggi.

Saran

Diharapkan hasil penelitian ini dapat bermanfaat dalam pengembangan ilmu bahan bangunan dan sebagai bahan pertimbangan dalam penggunaan material alternatif untuk mengurangi limbah industri. Penelitian ini perlu dilanjutkan dengan penggunaan material alternatif dalam persentase berbeda serta variasi jumlah faktor air semen. Selain itu, disarankan untuk menambahkan jenis material alternatif lainnya yang berasal dari limbah sekitar dan memperbanyak variasi jumlah benda uji agar data yang diperoleh lebih akurat dan komprehensif.

REFERENSI

- Ahmad, S. N., Hanafie, I. M., Sriwati, M., Kamba, C., Lapian, F. E. P., Risfawany, L. D., Syam, A., Mustika, W., Tumpu, M., & Suryamiharja, D. (2021). *Pemanfaatan Material Alternatif (Sebagai Bahan Penyusun Konstruksi)*. TOHAR MEDIA.
- Alkhaly, Y. R. (2016). Beton Non-Pasir dengan Agregat Cangkang Kelapa Sawit. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 3(1).
- Cakrawijaya, A., Supardi, S., & Fadhil, A. (2022). Pengaruh Subtitusi Pasir Silika sebagai Agregat Halus pada Sifat Mekanik Beton Mutu Tinggi. *Jurnal Teknik Sipil MACCA*, 7(3), 222–228.
- Dewi, S. U. (2016). Kajian Kuat Tarik Belah pada Perencanaan Beton dengan Additive Silica Fume Menggunakan Metoda American Concrete Institute (Agregat Halus Gunung Sugih dan Agregat Kasar Tanjungan Lampung). *TAPAK (Teknologi Aplikasi Konstruksi): Jurnal Program Studi Teknik Sipil*, 5(2).
- Faqihuddin, A., Hermansyah, H., & Kurniati, E. (2021). Tinjauan Campuran Beton Normal dengan Penggunaan Superplasticizer Sebagai Bahan Pengganti Air Sebesar 0%; 0, 3%; 0; 5% Dan 0, 7% Berdasarkan Berat Semen. *Journal of Civil Engineering and Planning (JCEP)*, 2(1), 34–45.
- Khaira, I., Muttaqin, M., & Mahlil, M. (2023). KUAT TARIK BELAH BETON MUTU TINGGI MENGGUNAKAN TANAH DIATOMAE SEBAGAI SUBSTITUSI SEMEN DENGAN PENAMBAHAN SERAT POLYPROPYLENE DAN SERAT KACA. *Journal of The Civil Engineering Student*, 5(3), 309–315.
- Mulyono, T. (2005). *Teknologi Beton*, Yogyakarta. Penerbit Andi.

- Mulyono, T. (2019). *Perancangan Campuran Beton, Pengolahan dan Pengujian Beton Segar, Seri 3: Uji Laboratorium Bahan Beton dan Beton*. Jakarta: Program Studi D3 Teknik Sipil FT Universitas Negeri Jakarta (UNJ).
- Nugraheni, M. W. (2011). *Tinjauan Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi Berserat Baja dengan Menggunakan Filler Nanomaterial*.
- Ozyildirim, C., & Carino, N. J. (2006). Concrete strength testing. In *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making Materials*. ASTM International.
- Pramanda, H., Hady, M., Kurniasari, F. D., & Anshar, M. (2024). Tinjauan Kuat Tarik Belah Beton Menggunakan Bahan Substitusi Serat Roving dan Cangkang Tiram. *Jurnal Serambi Engineering*, 9(2), 9064–9074.
- Prayuda, H. (2018). Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi Menggunakan Komparasi Agregat Gamalama, Agregat Merapi Dan Agregat Kali Progo. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, 2(1), 1–10.
- Rusvita, R., Adnan, A., & Hamsyah, H. (2024). Analisa Pasir Pantai Bawasalo Sebagai Material Pengganti Pada Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Belah Beton. *Venus: Jurnal Publikasi Rumpun Ilmu Teknik*, 2(1), 281–289.
- Somalinggi, L. J., Phengkarsa, F., & Febriani, L. (2020). Pengaruh Limbah Karbit/Calcium Carbit Sebagai Bahan Substitusi Semen Pada Beton. *Paulus Civil Engineering Journal*, 2(4), 289–297.
- Suwindu, K. S., Parung, H., & Sandy, D. (2020). Karakteristik Beton Mutu Tinggi dengan Substitusi Slag Baja dan Slag Nikel Sebagai Agregat Kasar. *Paulus Civil Engineering Journal*, 2(1), 8–15.
- Tobing, G. R. L., & Risdianto, Y. (2019). Pengaruh penambahan serat sabut kelapa (coconut fiber) terhadap kuat tekan, kuat tarik belah dan kuat lentur pada beton. *Rekayasa Tek. Sipil*, 1(2), 1–8.
- Tuwanakotta, E., Allo, A. L., & Ola, J. E. (2023). Pengujian Sifat–Sifat Fisik Laboratorium Agregat Kasar Dan Agregat Halus Quarry Baingket, Distrik Makbon Sebagai Material Beton. *Jurnal Karkasa*, 9(2), 24–29.