



Evaluasi Kinerja Beton dengan Material Substitusi Berbasis Bahan Alam

Ran Adinta Pratama¹, Samsul Abdul Rahman Sidik Hasibuan^{2*}

^{1,2}*Department of Civil Engineering, Universitas Medan Area*

**samsulrahman@staff.uma.ac.id*

Abstrak

Beton merupakan material konstruksi utama yang banyak digunakan karena kekuatan tekan yang tinggi dan durabilitasnya. Namun, produksi semen sebagai bahan utama beton berkontribusi signifikan terhadap emisi karbon dioksida (CO_2), sehingga diperlukan inovasi material yang lebih ramah lingkungan. Penelitian ini mengevaluasi pemanfaatan Bubuk Kulit Kopi Robusta (BKRR) sebagai substitusi parsial semen dalam beton guna mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan keberlanjutan konstruksi. Variasi kadar substitusi BKRR yang digunakan adalah 10%, 12%, dan 14% terhadap berat semen, dengan beton normal K-250 sebagai kontrol. Pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah dilakukan pada umur 14 dan 28 hari untuk menilai dampak substitusi terhadap sifat mekanik beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan BKRR mempengaruhi karakteristik beton, dengan kadar optimal yang masih mempertahankan sifat mekaniknya sesuai standar konstruksi. Selain itu, pemanfaatan limbah pertanian ini berpotensi mengurangi pencemaran lingkungan serta menyediakan alternatif material yang lebih berkelanjutan dalam industri konstruksi.

Kata kunci: beton, bubuk kulit kopi robusta, substitusi semen, kuat tekan, kuat tarik belah, material berkelanjutan

1. Pendahuluan

Beton merupakan salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan dalam pembangunan infrastruktur karena memiliki kekuatan tekan yang tinggi dan durabilitas yang baik [1]-[3]. Namun, produksi semen sebagai bahan utama beton memberikan kontribusi yang signifikan terhadap emisi karbon dioksida (CO_2), yang berdampak pada perubahan iklim global [4]. Untuk mengurangi dampak lingkungan tersebut, berbagai penelitian telah dilakukan guna mencari alternatif bahan pengganti atau bahan tambahan dalam campuran beton. Salah satu pendekatan yang berkembang adalah pemanfaatan material berbasis bahan alam, terutama dari limbah pertanian, sebagai substitusi parsial dalam beton [5]-[7]. Salah satu material berbasis bahan alam yang berpotensi digunakan adalah Bubuk Kulit Kopi Robusta (BKRR). Kulit kopi merupakan limbah pertanian yang melimpah, terutama di negara-negara penghasil kopi seperti Indonesia [8]-[10]. Limbah ini sering kali tidak dimanfaatkan secara optimal dan berpotensi mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Dengan demikian, pemanfaatan BKRR sebagai bahan substitusi parsial dalam beton dapat menjadi

solusi yang berkelanjutan, baik dalam upaya mengurangi limbah organik maupun dalam mengurangi ketergantungan terhadap semen sebagai bahan utama beton.

Sifat mekanik beton, seperti kuat tekan dan kuat tarik belah, sangat penting dalam menentukan kelayakan beton untuk aplikasi struktural [11]-[13]. Kuat tekan beton menggambarkan kemampuan beton dalam menahan beban aksial sebelum mengalami kegagalan, sedangkan kuat tarik belah mengacu pada ketahanan beton terhadap gaya tarik tidak langsung [14]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan bahan alami dalam campuran beton dapat mempengaruhi sifat mekaniknya, tergantung pada jenis dan proporsi material yang digunakan. BKKR mengandung senyawa organik dan serat alami yang berpotensi mempengaruhi sifat mekanik beton, baik dalam meningkatkan atau menurunkan kekuatan beton [15]-[17]. Studi terdahulu yang meneliti penggunaan limbah pertanian dalam beton menunjukkan bahwa beberapa jenis bahan alami dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap retak, tetapi dalam kadar yang berlebihan dapat menurunkan kuat tekan [18], [19]. Namun, penelitian mengenai pemanfaatan BKKR dalam beton masih sangat terbatas. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengevaluasi pengaruh substitusi BKKR terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah beton.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan Bubuk Kulit Kopi Robusta (BKKR) sebagai substitusi parsial semen dalam beton terhadap sifat mekaniknya, khususnya kuat tekan dan kuat tarik belah. Variasi kadar BKKR yang digunakan dalam penelitian ini adalah 10%, 12%, dan 14% terhadap berat semen, dengan beton normal K-250 sebagai kontrol. Dengan melakukan evaluasi terhadap hasil pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah beton pada umur 14 dan 28 hari, penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai kelayakan pemanfaatan BKKR dalam campuran beton. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi kadar optimal BKKR yang masih memungkinkan beton mempertahankan sifat mekaniknya sesuai dengan standar konstruksi yang berlaku.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan material konstruksi berbasis bahan alam yang lebih ramah lingkungan. Pemanfaatan BKKR sebagai bahan substitusi dalam beton berpotensi memberikan solusi terhadap dua permasalahan utama, yaitu pengurangan limbah kulit kopi yang berpotensi mencemari lingkungan serta pengembangan beton yang lebih berkelanjutan dengan emisi karbon yang lebih rendah. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi referensi bagi penelitian lanjutan dalam bidang inovasi material berbasis limbah organik serta memberikan wawasan bagi industri konstruksi dalam mencari alternatif bahan bangunan yang lebih ekologis dan ekonomis. Dengan memahami pengaruh BKKR terhadap sifat mekanik beton, penelitian ini diharapkan dapat membuka peluang dalam pemanfaatan limbah pertanian sebagai material konstruksi yang lebih berkelanjutan.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif untuk mengevaluasi pengaruh substitusi Bubuk Kulit Kopi Robusta (BKKR) sebagai bahan pengganti sebagian semen terhadap sifat mekanik beton, khususnya kuat tekan dan kuat tarik belah. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Bahan Konstruksi, Fakultas Teknik, Universitas Medan Area.

Material utama yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari semen Portland Tipe I merek Semen Padang, agregat halus berupa pasir dan agregat kasar berupa kerikil yang diperoleh dari PT. Sumber Rezeki Alam, serta air yang bersumber dari Laboratorium Fakultas Teknik Universitas Medan Area. Bubuk Kulit Kopi Robusta (BKKR) yang digunakan sebagai bahan substitusi semen diperoleh dari Desa Siboruon, Kecamatan Balige, Kabupaten Toba Samosir, Provinsi Sumatera Utara. BKKR dikeringkan terlebih dahulu sebelum digunakan dalam campuran beton agar kadar airnya sesuai dengan standar yang diperlukan.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi saringan untuk analisis gradasi agregat, timbangan digital, gelas ukur 1000 ml, oven untuk pengeringan material, cetakan beton silinder berukuran 15 cm × 30 cm, mesin uji kuat tekan beton, concrete mixer untuk pencampuran material, kerucut Abrams untuk pengujian slump, besi pengaduk, ember, sendok semen, serta alat bantu lainnya. Tahapan penelitian diawali dengan analisis karakteristik material, termasuk pengujian gradasi agregat kasar berdasarkan standar ASTM C33-2016 dan SII 0052, pemeriksaan kadar lumpur agregat kasar sesuai SK SNI S-04-1989-F, serta pengujian kadar air agregat kasar mengacu pada ASTM C70. Untuk agregat halus, dilakukan analisis gradasi menggunakan standar ASTM C33-03 dan SK SNI S-04-1989-F, pemeriksaan kadar lumpur sesuai ASTM C117-03, serta pengujian kadar air mengacu pada ASTM C566-04. Selain itu, gradasi BKKR juga dianalisis menggunakan metode ayakan standar guna memastikan distribusi ukuran partikel yang sesuai dalam campuran beton.

Campuran beton dirancang berdasarkan standar SNI 7656:2012 [20], dengan variasi kadar substitusi BKKR sebesar 10%, 12%, dan 14% terhadap berat semen, sementara beton normal tanpa substitusi digunakan sebagai kontrol. Setelah pencampuran, dilakukan pengujian slump untuk menilai tingkat kelecakan beton sebelum pencetakan. Beton yang telah dicetak dalam bentuk silinder kemudian dilakukan perawatan (curing) selama 14 hari dengan perendaman dalam air. Setelah mencapai umur 14 hari, dilakukan pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah beton menggunakan mesin uji tekan guna memperoleh data yang valid terkait pengaruh substitusi BKKR terhadap karakteristik mekanik beton.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman lebih mendalam mengenai potensi pemanfaatan BKKR dalam campuran beton serta dampaknya terhadap sifat mekanik beton. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar bagi pengembangan material konstruksi yang lebih ramah lingkungan dengan memanfaatkan limbah pertanian sebagai alternatif bahan tambah dalam beton.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini, dilakukan serangkaian pengujian terhadap bahan dan beton guna mengetahui pengaruh penambahan Bubuk Kulit Kopi Robusta (BKKR) sebagai bahan substitusi sebagian semen terhadap sifat mekanik beton. Hasil perhitungan dan pengujian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memberikan pemahaman yang lebih jelas mengenai kualitas bahan serta performa beton yang dihasilkan.

3.1. Hasil Perhitungan Analisis Saringan Agregat Kasar

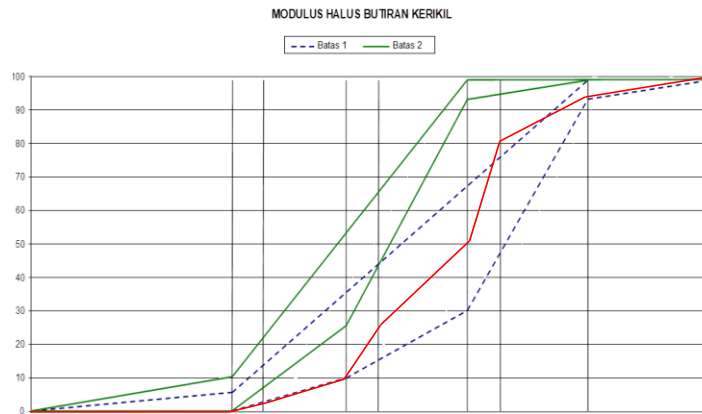
Analisis saringan agregat kasar dilakukan untuk mengetahui distribusi partikel pada berbagai ukuran saringan agar komposisi agregat sesuai dengan persyaratan standar dalam campuran beton. Berdasarkan hasil pengujian, distribusi ukuran agregat kasar memenuhi spesifikasi yang ditetapkan. Tabel 1 menunjukkan persentase masing-masing ukuran agregat kasar setelah dilakukan pengujian.

Tabel 1. Hasil analisis saringan agregat kasar

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gr)	Berat Kumulatif (%)	Berat Kumulatif Lewat Ayakan (%)
38,10	0	0	100
25,00	50	5	95
19,00	150	20	80
12,50	300	50	50
9,50	250	75	25
6,35	150	90	10
4,75	80	98	2
2,36	20	100	0
Sisa	0	100	0

Jumlah	1000	-	-
--------	------	---	---

Gambar 1 menunjukkan distribusi ukuran agregat kasar berdasarkan hasil analisis saringan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat kasar memiliki distribusi ukuran yang sesuai dengan standar yang ditetapkan, di mana distribusi hasil pengujian ditandai dengan warna merah.



Gambar 1. Distribusi ukuran agregat kasar

3.2. Hasil Pemeriksaan Kadar Lumpur Agregat Kasar

Pemeriksaan kadar lumpur dilakukan untuk mengetahui kandungan lumpur dalam agregat kasar, karena keberadaan lumpur dapat mempengaruhi daya rekat antara pasta semen dan agregat. Hasil pengujian kadar lumpur untuk berbagai sampel ditampilkan dalam Tabel 2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar lumpur agregat kasar berada dalam batas yang diperbolehkan oleh standar SK SNI S-04-1989-F, sehingga agregat kasar dapat digunakan dalam campuran beton tanpa mempengaruhi kualitasnya secara signifikan.

Tabel 2. Hasil pemeriksaan kadar lumpur agregat kasar

Percobaan	Berat Cawan (W_2)	Berat Cawan + Agregat Sebelum di Oven (W_1)	Berat Cawan + Agregat Setelah di Oven (W_4)	Berat Agregat Sebelum di Oven (W_3)	Berat Agregat Setelah di Oven (W_5)	Kadar Lumpur (%)	Kadar Lumpur rata-rata (%)	Syarat SK SNI S-04-1989-F
1	45,2	545,2	541	500	495,8	0,84	0,72	OK
2	45	545	542	500	497	0,6		

3.3. Hasil Pemeriksaan Kadar Air Agregat Kasar

Pemeriksaan kadar air agregat kasar bertujuan untuk memastikan kadar kelembaban agregat yang dapat mempengaruhi rasio air terhadap semen dalam campuran beton. Hasil pemeriksaan kadar air ditampilkan dalam Tabel 3. Berdasarkan hasil pengujian, kadar air agregat kasar memenuhi batas yang diizinkan dalam ASTM C70, sehingga tidak diperlukan penyesuaian tambahan terhadap jumlah air dalam campuran beton.

Tabel 3. Hasil pemeriksaan kadar air agregat kasar

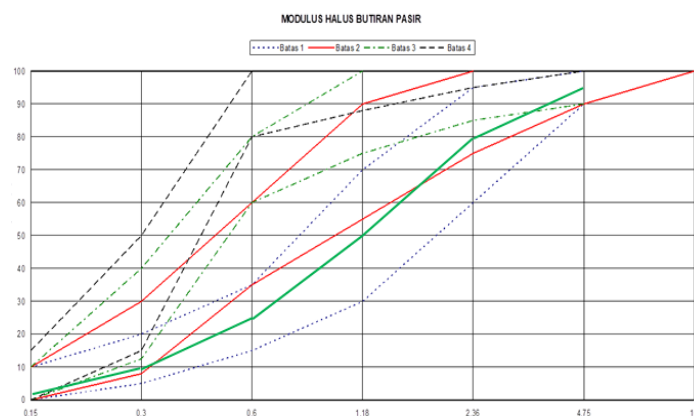
Percobaan	Berat Cawan (gr)	Berat Cawan + Agregat Sebelum di Oven (gr)	Berat Cawan + Agregat Setelah di Oven (gr)	Berat agregat sebelum di oven (W_1)	Berat agregat setelah di oven (W_2)	Kadar Air (%)	Kadar Air rata-rata (%)	Syarat ASTM C70
1	43,8	543,8	538	500	494,2	1,17	1,19	OK
2	44	544	538	500	494	1,21		

3.4. Hasil Perhitungan Analisis Saringan Agregat Halus

Analisis saringan agregat halus dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butirnya dalam campuran beton. Tabel 4 menyajikan hasil analisis saringan agregat halus. Gambar 2 menunjukkan distribusi ukuran agregat halus berdasarkan hasil analisis saringan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat halus memiliki distribusi ukuran yang sesuai dengan standar, di mana distribusi hasil pengujian ditandai dengan warna hijau.

Tabel 4. Hasil analisis saringan agregat halus

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gr)	Berat Kumulatif (%)	Berat Kumulatif Lewat Ayakan (%)
4,75	50	5	95
2,36	150	20	80
1,18	300	50	50
0,60	250	75	25
0,30	150	90	10
0,15	80	98	2
Sisa	20	100	0
Jumlah	1000	-	-



Gambar 2. Distribusi ukuran agregat halus

3.5. Hasil Pemeriksaan Kadar Lumpur Agregat Halus

Pemeriksaan kadar lumpur pada agregat halus bertujuan untuk menentukan keberadaan material yang tidak diinginkan yang dapat mempengaruhi kualitas beton. Kadar lumpur yang berlebihan dapat mengurangi daya rekat antara agregat dan pasta semen, sehingga mempengaruhi kuat tekan beton. Hasil pengujian kadar lumpur agregat halus ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil pemeriksaan kadar lumpur agregat halus

Percobaan	Volume Pasir + Lumpur (ml)	Volume Pasir (V_1)	Volume Lumpur (V_2)	Kadar Lumpur (%)	Kadar Lumpur Rata-Rata (%)	Syarat ASTM C117-03
1	500	470	30	6,00	4,00	OK
2	500	490	10	2,00		

3.6. Hasil Pemeriksaan Kadar Air Agregat Halus

Pemeriksaan kadar air agregat halus dilakukan untuk menentukan tingkat kelembaban agregat sebelum digunakan dalam campuran beton. Kadar air yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat mempengaruhi jumlah air pencampur yang dibutuhkan, sehingga berdampak

pada workability dan kekuatan beton. Hasil pemeriksaan kadar air agregat halus ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil pemeriksaan kadar air agregat halus

Percobaan	Berat Cawan (gr)	Berat Cawan + Agregat Sebelum di Oven (gr)	Berat Cawan + Agregat Setelah di Oven (gr)	Agregat Sebelum di Oven (gr)	Agregat Setelah di Oven (gr)	Kadar Air (%)	Kadar Air Rata-Rata (%)	Syarat ASTM C566-04
1	44,2	544,2	525,20	500,00	481,00	3,95	3,63	OK
2	35	535	519,00	500,00	484,00	3,31		

3.7. Hasil Pemeriksaan Gradasi Kulit Kopi Robusta

Kulit kopi robusta digunakan sebagai bahan substitusi sebagian semen dalam campuran beton. Oleh karena itu, gradasinya diperiksa untuk memastikan distribusi ukuran partikel yang sesuai dengan kebutuhan. Hasil pemeriksaan gradasi kulit kopi robusta disajikan dalam Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pemeriksaan Gradasi Kulit Kopi Robusta

Ukuran Saringan (mm)	Berat sampel (gr)	Persentase (%)
9,5	200	40
4,7	150	30
2,38	120	24
1,19	80	16
0,59	40	8
Σ	1000	100

3.8. Hasil Perancangan Campuran Beton berdasarkan SNI 7656:2012

Perancangan campuran beton dilakukan berdasarkan standar SNI 7656:2012 untuk mencapai mutu beton K-250. Proporsi material yang digunakan dalam campuran beton ditampilkan dalam Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Perancangan Campuran Beton

Material	Berat (kg/m ³)
Semen	385
Agregat Halus	660
Agregat Kasar	1050
Air	185
Kulit Kopi Robusta	Variatif

3.9. Hasil Pengujian Slump

Pengujian slump dilakukan untuk mengevaluasi workability campuran beton. Slump yang terlalu rendah menunjukkan beton yang terlalu kaku, sementara slump yang terlalu tinggi dapat mengindikasikan campuran yang terlalu cair dan dapat mengurangi kekuatan beton. Hasil pengujian slump ditampilkan dalam Tabel 9. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai slump masih berada dalam rentang yang sesuai dengan standar yang berlaku, sehingga campuran beton dapat dianggap memiliki workability yang baik.

Tabel 9. Hasil Pengujian Slump Beton

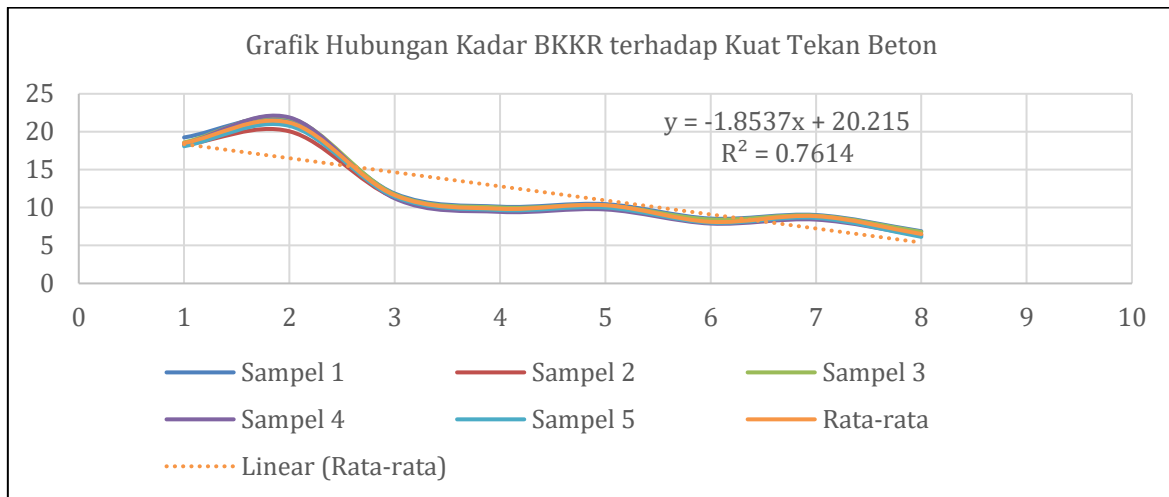
Sampel	Slump (cm)
BN K-250	11
BKKR 5%	10
BKKR 7%	9
BKKR 9%	8

3.10. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 14 dan 28 hari untuk mengevaluasi perkembangan kekuatan beton dengan substitusi sebagian semen menggunakan Bubuk Kulit Kopi Robusta (BKRR). Hasil pengujian kuat tekan disajikan dalam Tabel 10, sedangkan hubungan antara kadar BKRR dan kuat tekan beton divisualisasikan dalam Gambar 4.

Tabel 10. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Kode Sampel	Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3	Sampel 4	Sampel 5	Rata-rata
BN K-250 (14 Hari) - BN1	19.245	18.268	18.588	18.403	18.085	18.51
BN K-250 (28 Hari) - BN2	21.495	20.05	21.805	21.879	20.771	21.2
BKKR 10% (14 Hari) - B10-1	11.85	11.32	11.74	11.21	11.43	11.63
BKKR 10% (28 Hari) - B10-2	10.12	9.58	10.01	9.43	9.67	9.84
BKKR 12% (14 Hari) - B12-1	10.45	9.98	10.27	9.75	10.01	10.31
BKKR 12% (28 Hari) - B12-2	8.55	8.11	8.43	7.89	8.01	8.12
BKKR 14% (14 Hari) - B14-1	9.02	8.67	8.93	8.41	8.64	8.87
BKKR 14% (28 Hari) - B14-2	6.88	6.44	6.79	6.31	6.14	6.51



Gambar 4. Grafik Hubungan Kadar BKRR terhadap Kuat Tekan Beton

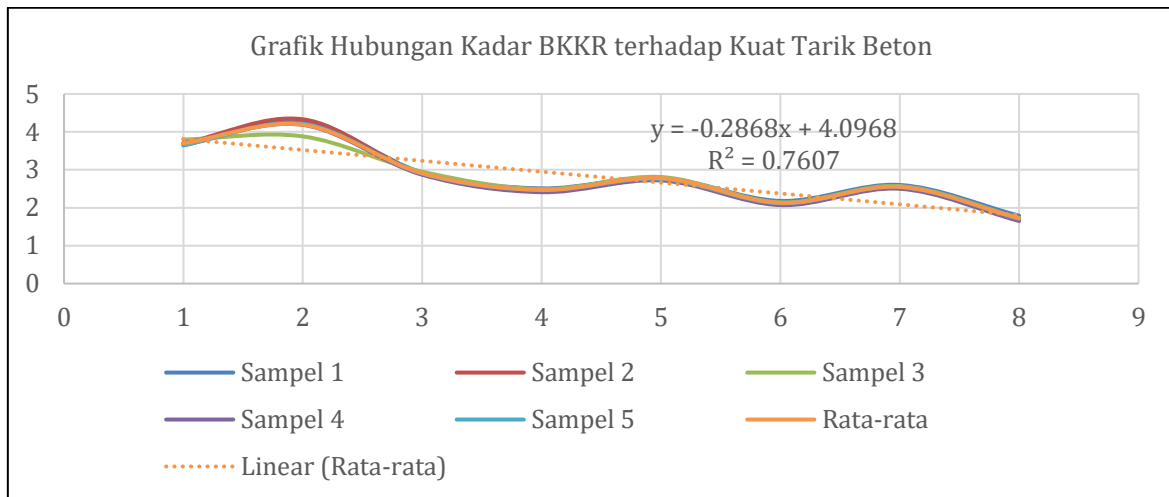
Berdasarkan hasil analisis regresi linier menggunakan Microsoft Excel, diperoleh bahwa setiap penambahan kadar BKRR sebesar 1% menyebabkan penurunan kuat tekan beton sekitar 1.8537 MPa. Koefisien determinasi $R^2 = 0.7614$ menunjukkan bahwa terdapat korelasi yang cukup kuat antara kadar BKRR dengan kuat tekan beton. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kadar BKRR yang digunakan sebagai pengganti semen, semakin rendah kuat tekan beton yang dihasilkan. Oleh karena itu, penggunaan BKRR dalam campuran beton perlu dibatasi agar tetap memenuhi persyaratan standar kekuatan beton yang telah ditetapkan.

3.11. Hasil Pengujian Kuat Tarik Beton

Selain uji kuat tekan, dilakukan juga pengujian kuat tarik belah untuk mengetahui pengaruh BKRR terhadap karakteristik tarik beton. Hasil pengujian kuat tarik belah ditampilkan dalam Tabel 11, sementara grafik hubungan kadar BKRR dan kuat tarik belah beton dapat dilihat pada Gambar 5.

Tabel 11. Hasil Pengujian Kuat Tarik Beton

Kode Sampel	Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3	Sampel 4	Sampel 5	Rata-rata
BN K-250 (14 Hari) - BN3	3.644	3.7	3.798	3.709	3.652	3.7
BN K-250 (28 Hari) - BN4	4.302	4.332	3.881	4.185	4.211	4.19
BKKR 10% (14 Hari) - B10-3	2.93	2.89	2.95	2.87	2.9	2.91
BKKR 10% (28 Hari) - B10-4	2.51	2.45	2.49	2.41	2.47	2.47
BKKR 12% (14 Hari) - B12-3	2.79	2.75	2.81	2.72	2.76	2.78
BKKR 12% (28 Hari) - B12-4	2.18	2.09	2.14	2.07	2.12	2.13
BKKR 14% (14 Hari) - B14-3	2.6	2.53	2.57	2.5	2.55	2.55
BKKR 14% (28 Hari) - B14-4	1.79	1.68	1.73	1.65	1.71	1.72



Gambar 5. Grafik Hubungan Kadar BKKR terhadap Kuat Tarik Beton

Berdasarkan hasil analisis regresi linier, diperoleh bahwa setiap kenaikan kadar BKKR sebesar 1% menyebabkan penurunan kuat tarik belah beton sekitar 0.2868 MPa. Dengan koefisien determinasi $R^2 = 0.7607$, hubungan antara kadar BKKR dan kuat tarik belah beton terbilang cukup kuat, meskipun tidak setinggi hubungan dengan kuat tekan beton. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin besar kadar BKKR dalam campuran beton, semakin rendah nilai kuat tarik belah yang dihasilkan. Dengan demikian, penggunaan BKKR sebagai bahan substitusi semen harus dikendalikan agar beton tetap memiliki sifat mekanik yang memenuhi standar desain struktural dan tidak mengurangi kualitas beton secara signifikan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan limbah kulit kopi robusta (BKKR) sebagai bahan substitusi sebagian semen dalam campuran beton berpengaruh terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah beton. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar BKKR yang digunakan, semakin rendah nilai kuat tekan dan kuat tarik belah yang diperoleh. Pada pengujian kuat tekan beton, beton normal (BN K-250) memiliki nilai rata-rata sebesar 18,51 MPa pada umur 14 hari dan meningkat menjadi 21,20 MPa pada umur 28 hari. Sebaliknya, beton dengan BKKR 10%, 12%, dan 14% mengalami penurunan kuat tekan seiring dengan meningkatnya kadar substitusi. Pada umur 28 hari, beton dengan BKKR 10% memiliki kuat tekan rata-rata sebesar 9,84 MPa, beton dengan BKKR 12% sebesar 8,12 MPa, dan beton dengan BKKR 14% hanya mencapai 6,51 MPa.

Pada pengujian kuat tarik belah beton, beton normal (BN K-250) menunjukkan kuat tarik belah rata-rata sebesar 3,70 MPa pada umur 14 hari dan meningkat menjadi 4,19 MPa pada umur 28 hari. Beton dengan BKKR 10% mengalami penurunan kuat tarik belah menjadi 2,91 MPa pada umur 14 hari dan 2,47 MPa pada umur 28 hari. Penurunan lebih lanjut terjadi

pada beton dengan BKKR 12% dan 14%, di mana kuat tarik belah pada umur 28 hari masing-masing hanya mencapai 2,13 MPa dan 1,72 MPa.

Meskipun penggunaan BKKR dalam campuran beton menyebabkan penurunan kuat tekan dan kuat tarik belah, material ini tetap memiliki potensi sebagai bahan tambah dalam beton ramah lingkungan. Namun, penggunaannya perlu dikendalikan agar tetap memenuhi standar kekuatan beton yang dipersyaratkan untuk aplikasi struktural.

References

- [1] Kurniati, Dwi. "Ketahanan Kuat Tekan Beton Serat Fiber Glass Sebagai Bahan Tambah." *Jurnal Karkasa* 10.2 (2024): 39-44.
- [2] Fahrezy, Gilang Oktavero, Ilanka Cahya Dewi, And Pujo Priyono. "Pengaruh Perawatan Beton Dengan Menggunakan Metode Wrapping Dan Curing Compound Terhadap Kuat Tekan Beto Silinder." *Jurnal Smart Teknologi* 6.2 (2025): 144-152.
- [3] Hasibuan, Samsul Abdul Rahman Sidik, Et Al. "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 (2023): 1731.
- [4] Mainaki, Revi, And Rendra Zainal Maliki. "Pemanfaatan Keanekaragaman Bambu Secara Hidrologis, Ekonomis, Sosial Dan Pertahanan." *Geodika: Jurnal Kajian Ilmu Dan Pendidikan Geografi* 4.1 (2020): 44-54.
- [5] Hidayanti, Fitria. "Fisika Material: Material Biokomposit." (2021).
- [6] Halim, Zainal Arifin, And Aswar Amiruddin. "Studi Abu Sekam Padi Sebagai Bahan Substitusi Terhadap Beton Mutu Tinggi." *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil* 8.2 (2024): 166-174.
- [7] Rajak, Febriany Safitri Abd, Servie O. Dapas, And Marthin Dj Sumajouw. "Pengujian Kuat Tekan Beton Yang Menggunakan Agregat Lokal Dengan Pemanfaatan Abu Sekam Padi Dan Batu Apung Sebagai Substitusi Parsial Semen." *Jurnal Sipil Statik* 8.2 (2020).
- [8] Fitri, Nursyah. "Pembuatan Briket Dari Campuran Kulit Kopi (*Coffea Arabica*) Dan Serbuk Gergaji Dengan Menggunakan Getah Pinus (*Pinus Merkusii*) Sebagai Perekat." Makasar: Uin Alauddin Makassar (2017).
- [9] Tjokrokusumo, Sabaruddin Wagiman. "Kekuatan Bioremediasi Jamur Dan Biokonversi Limbah Pertanian Menggunakan Teknologi Budidaya Jamur." *Jurnal Teknologi Lingkungan Bppt* 8.1 (2007): 149910.
- [10] Harsono, Soni Sisbudi, Et Al. "Pengembangan Teknologi Pengolahan Limbah Kopi Menjadi Bioetanol Dan Biogas Untuk Mendukung Percepatan Kemandirian Energi Pada Masyarakat Di Kawasan Sentra Kopi Rakyat." (2014).
- [11] Dwinta, Ade, Hilma Erliana, And Chaira Chaira. "Pengaruh Penggunaan Bahan Tambah Sebagai Substitusi Semen Dan Agregat Terhadap Nilai Kuat Tarik Belah Beton Mutu Tinggi Hybrid." *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan* 8.4 (2024): 2698-2709.
- [12] Amin, Muhammad Arrie Rafshanjani. "Analisis Efisiensi Beton Daur Ulang Sebagai Alternatif Agregat Pada Konstruksi Berkelanjutan." *Jurnal Penelitian Inovatif* 5.1 (2025): 207-216.
- [13] Saputro, Fandika Ahmad Dwi. Pengaruh Variasi Molaritas Alkali Aktifator Terhadap Sifat Mekanik Beton Geopolymer Menggunakan Limbah Fly Ash Pltu Kanci Cirebon. Diss. Universitas Islam Indonesia, 2024.

- [14] RSNI T-12. "Perencanaan Struktur Beton Untuk Jembatan." BSN, Jakarta (2004).
- [15] Asmamaw, Gedefaw Tegegne. Experimental Investigation On The Effects Of Coffee Husk Ash As Partial Replacement Of Cement On The Concrete Properties. Diss. 2021.
- [16] Atahu, Meskerem Kebede. The Effect Of Coffee Husk Ash On Geotechnical Properties Of Expansive Soil. Diss. Universität Rostock, 2020.
- [17] Maraveas, Chrysanthos. "Production Of Sustainable And Biodegradable Polymers From Agricultural Waste." *Polymers* 12.5 (2020): 1127.
- [18] Ganesan, K., K. Rajagopal, And K. Thangavel. "Rice Husk Ash Blended Cement: Assessment Of Optimal Level Of Replacement For Strength And Permeability Properties Of Concrete." *Construction And Building Materials* 22.8 (2008): 1675-1683.
- [19] Hermansah, Herli. Evaluasi Durabilitas Beton Geopolimer Dengan Penambahan Plastik Pet. Diss. Universitas Hasanuddin Makassar, 2024.
- [20] SNI 7656. Tata Cara Pemilihan Campuran Untuk Beton Normal, Beton Berat Dan Beton Massa. BSN, Jakarta (2012).