



Investigasi pada Komposit yang Terbentuk dari CR-ECC dengan Kerikil-Aspal Porus Berbasis *Styrofoam* Berdasarkan Uji Tekan dan Lentur

Arrya Fayiz Pranoto, Muhammad Aswin

Universitas Sumatera Utara, Indonesia

Email: fayizarrya2401@gmail.com, muhammad.aswin@usu.ac.id

Abstrak

Perkerasan jalan konvensional, baik tipe lentur maupun kaku, memiliki keterbatasan kinerja. Perkerasan lentur rentan terhadap deformasi permanen dan retak akibat beban lalu lintas berulang, sedangkan perkerasan kaku memerlukan waktu pengerjaan yang lebih lama. Untuk mengatasi kelemahan tersebut, dikembangkan perkerasan semi lentur yang diharapkan dapat menggabungkan kekuatan struktural perkerasan kaku dengan fleksibilitas perkerasan lentur melalui penggunaan material *grouting* berbasis CR-ECC (*Crumb Rubber-Engineered Cementitious Composites*). Penelitian ini menggunakan CR-ECC sebagai material *grouting* yang memanfaatkan limbah *fly ash*, abu cangkang sawit, dan *crumb rubber* untuk mendukung konsep keberlanjutan. CR-ECC diformulasikan dari mortar ECC dengan variasi *fly ash* dan abu cangkang sawit sebesar 0–15% dari berat semen untuk menentukan campuran optimum, kemudian dimodifikasi dengan *crumb rubber* sebesar 0–12,5%. Campuran optimum digunakan sebagai material *grouting* pada dua variasi kerikil aspal porus, yaitu variasi aspal murni dan aspal-*styrofoam*. Pengujian kuat tekan dilakukan pada benda uji kubus berukuran 150×150×150 mm, sedangkan pengujian kuat lentur dilakukan pada balok berukuran 600×150×150 mm, keduanya pada umur 3 hari. Hasil menunjukkan bahwa kuat tekan komposit aspal murni mencapai 4,470 MPa, sedangkan aspal-*styrofoam* sebesar 4,404 MPa. Pada uji lentur, aspal murni memiliki nilai 1,640 MPa dan aspal-*styrofoam* 1,600 MPa, dengan perbedaan yang relatif kecil.

Kata Kunci: CR-ECC, komposit kerikil aspal, *fly ash*, abu cangkang sawit, *crumb rubber*, kuat tekan, kuat lentur

Abstract

Conventional road pavements, both flexible and rigid types, have performance limitations. Flexible pavements are prone to permanent deformation and cracking due to repeated traffic loads, while rigid pavements require longer construction time. To overcome these weaknesses, semi-flexible pavements have been developed, which are expected to combine the structural strength of rigid pavements with the flexibility of flexible pavements through the use of grouting materials based on CR-ECC (*Crumb Rubber-Engineered Cementitious Composites*). This study utilizes CR-ECC as grouting material by incorporating waste fly ash, palm shell ash, and crumb rubber to support the sustainability concept. CR-ECC was formulated from ECC mortar with variations of fly ash and palm shell ash of 0–15% by cement weight to determine the optimum mix, then modified with crumb rubber of 0–12.5%. The optimum mix was used as grouting material in two variations of porous asphalt gravel, namely pure asphalt and asphalt-*styrofoam*. The compressive strength test was conducted on cube specimens measuring 150×150×150 mm, while the flexural strength test was carried out on beam specimens measuring 600×150×150 mm, both at 3 days of age. The results showed that the compressive strength of the pure asphalt composite reached 4.470 MPa, while the asphalt-*styrofoam* composite reached 4.404 MPa. In the flexural test, pure asphalt had a value of 1.640 MPa and asphalt-*styrofoam* 1.600 MPa, with a relatively small difference.

Keywords: CR-ECC, asphalt gravel composite, fly ash, palm shell ash, crumb rubber, compressive strength, flexural strength

PENDAHULUAN

Perkerasan jalan konvensional di Indonesia umumnya menggunakan tipe perkerasan lentur dan perkerasan kaku (Mulyawan, 2019). Kedua tipe ini memiliki keterbatasan kinerja, di mana perkerasan lentur rentan mengalami deformasi permanen dan retak akibat beban lalu lintas berulang, sedangkan perkerasan kaku memerlukan waktu pengerjaan lebih lama serta kurang mampu menyesuaikan diri terhadap deformasi tanah dasar. Salah satu inovasi untuk mengatasi kelemahan ini adalah perkerasan semi lentur, yaitu struktur perkerasan yang menggunakan kerikil aspal porus sebagai kerangka,

kemudian rongganya diisi dengan material grouting berbasis semen untuk menggabungkan kekuatan struktural perkerasan kaku dengan fleksibilitas perkerasan lentur (Cai et al., 2019).

Berdasarkan jenis material pengikatnya, perkerasan jalan dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu perkerasan lentur, perkerasan kaku, dan perkerasan komposit. Perkerasan lentur menggunakan aspal sebagai pengikat agregat dan bersifat fleksibel, namun rentan terhadap kerusakan akibat lalu lintas berat (Sukirman, 2016). Perkerasan kaku menggunakan pasta semen portland sebagai pengikat, memiliki umur layanan panjang, tetapi kurang fleksibel terhadap perubahan beban dan deformasi. Sementara itu, perkerasan komposit memadukan lapisan kaku dan lentur untuk memperoleh keunggulan keduanya (Nur et al., 2021). Menurut Setyawan et al. (2015), perkerasan semi lentur menunjukkan peningkatan kinerja struktural hingga 30% dibandingkan perkerasan lentur konvensional, dengan kemampuan mendistribusikan beban lebih merata melalui kombinasi kerangka aspal yang fleksibel dan material grouting yang kuat.

Permasalahan limbah global, khususnya limbah plastik dan limbah industri, telah menjadi isu krusial dalam dekade terakhir. Menurut United Nations Environment Programme, produksi plastik dunia mencapai 380 juta ton per tahun, dengan hanya 9% yang didaur ulang, sementara sisanya mencemari lingkungan (Wahditiya et al., 2025). Di Indonesia, data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2019) menunjukkan bahwa sampah plastik mencapai 64 juta ton per tahun, dengan styrofoam menyumbang kontribusi signifikan sebagai salah satu dari lima penyumbang limbah berbahaya terbesar (Harsono, 2023). Styrofoam, yang secara kimia dikenal sebagai expanded polystyrene (EPS), memiliki karakteristik sulit terurai secara biologis dan dapat bertahan di lingkungan hingga ratusan tahun. Kandungan styrene dalam styrofoam juga berpotensi menimbulkan masalah kesehatan seperti gangguan sistem saraf dan karsinogenik (Fadhila et al., 2024). Upaya pemanfaatan limbah styrofoam sebagai bahan campuran konstruksi tidak hanya mengurangi dampak lingkungan, tetapi juga menghemat sumber daya alam dan mendukung prinsip ekonomi sirkular dalam industri konstruksi (Hutahaean & Setiawati, 2023).

Di Indonesia, penggunaan *styrofoam* sebagai wadah makanan meningkat pesat karena ketersediaannya yang melimpah di pasaran. *Styrofoam*, yang tergolong plastik nomor 6 (polistirena), termasuk salah satu dari lima penyumbang limbah berbahaya terbesar di dunia, dengan kandungan styrene yang berpotensi menimbulkan masalah kesehatan (Fadhila et al., 2024). Upaya pemanfaatan limbah *styrofoam* sebagai bahan campuran konstruksi diharapkan dapat mengurangi dampak lingkungan sekaligus menghemat sumber daya (Gusty et al., 2021). Penelitian oleh Syafiarti et al. (2022) menunjukkan bahwa penambahan *styrofoam* sebesar 1% pada campuran Laston AC-WC dengan kadar aspal optimum 6% dapat meningkatkan kualitas campuran, sedangkan penambahan dalam kadar lebih tinggi cenderung menurunkan stabilitas dan nilai flow. Zoorob et al. (2012) dalam penelitiannya mengenai penggunaan waste plastic dalam campuran aspal menemukan bahwa modifikasi aspal dengan polimer daur ulang dapat meningkatkan ketahanan terhadap rutting dan fatigue cracking hingga 25%, meski memerlukan optimasi komposisi untuk mempertahankan workability campuran.

Selain limbah plastik, limbah ban bekas juga menjadi perhatian karena jumlah kendaraan bermotor di Indonesia meningkat signifikan. Limbah ban bekas dapat diolah menjadi *crumb rubber*, yaitu butiran karet hasil daur ulang ban yang diperoleh melalui proses pencacahan dan pemotongan (Wijaya et al., 2024). Dalam campuran ECC, *crumb rubber* dapat meningkatkan kemampuan lentur, memperkecil lebar retakan, menambah kelenturan, meningkatkan daya tahan terhadap deformasi, serta mengurangi berat material (Khed et al., 2018). Namun, penggunaannya juga memengaruhi sifat mekanis seperti workability dan kuat tekan. *Crumb rubber* cenderung menurunkan fluiditas campuran karena menyerap air, dan menurunkan kuat tekan akibat sifat elastisnya yang menggantikan sebagian material padat dalam mortar ECC (Harahap et al., 2022).

Engineered Cementitious Composites (ECC) adalah material berbasis semen yang diperkuat serat, memiliki kelenturan tinggi dan ketahanan terhadap retak mikro dengan deformasi hingga 500 kali lebih besar dibanding beton konvensional (Komara et al., 2021). ECC dikembangkan melalui pendekatan berbasis *micromechanics* untuk mengoptimalkan sifat serat, matriks, dan antarmuka, sehingga mampu mencapai performa tinggi dengan volume serat rendah (2–3%) dan biaya yang efisien (Wardana, 2025). Penambahan bahan pozzolan seperti fly ash terbukti mampu meningkatkan keberlanjutan dan durabilitas ECC tanpa menurunkan sifat mekanisnya (Bahar & Wiranto, 2024). Penggunaan ECC sebagai material grouting pada perkerasan semi lentur telah diteliti oleh Cai et al. (2019), yang melaporkan peningkatan ketahanan lentur, stabilitas struktural, dan kemampuan self-

healing dibandingkan mortar semen konvensional. Sementara itu, Khan et al. (2022) mengkaji penggunaan *grouting* mortar pada *semi flexible pavement* dan menemukan peningkatan stabilitas Marshall serta ketahanan terhadap deformasi plastis.

Kebaruan penelitian ini terletak pada tiga aspek orisinal yang membedakannya secara fundamental dari penelitian-penelitian sebelumnya. Pertama, penelitian ini merupakan upaya pertama yang mengintegrasikan secara simultan tiga jenis limbah industri—fly ash, abu cangkang sawit, dan crumb rubber—ke dalam formulasi CR-ECC yang diaplikasikan sebagai material *grouting* pada perkerasan semi lentur berbasis kerikil aspal porus yang dimodifikasi dengan styrofoam. Integrasi multi-limbah ini tidak hanya mendukung prinsip keberlanjutan lingkungan melalui waste valorization, tetapi juga menghasilkan sinergi fungsional di mana fly ash dan abu cangkang sawit meningkatkan kekuatan matriks sementosa melalui reaksi pozzolan, crumb rubber meningkatkan kemampuan deformasi dan energy absorption, dan styrofoam memodifikasi karakteristik reologi aspal sebagai pengikat kerangka agregat.

Kedua, penelitian ini mengembangkan pendekatan inovatif dalam desain perkerasan semi lentur dengan memadukan material *grouting* berteknologi tinggi (CR-ECC) dengan kerangka kerikil aspal porus yang dimodifikasi polimer daur ulang (styrofoam). Tidak seperti penelitian terdahulu yang umumnya menggunakan mortar konvensional atau ECC standar sebagai *grouting*, penelitian ini memanfaatkan CR-ECC dengan komposisi optimum yang telah terverifikasi secara eksperimental untuk memastikan kompatibilitas mekanis dan durabilitas antara *grouting* dan kerangka aspal. Pendekatan ini menghasilkan sistem komposit hibrida yang menggabungkan keunggulan multiple material system dalam satu struktur terintegrasi, yaitu fleksibilitas aspal, kekakuan agregat, ductility CR-ECC, dan efek modifikasi polimer.

Ketiga, kontribusi praktis penelitian ini adalah menyediakan data eksperimental komparatif yang sistematis mengenai pengaruh modifikasi kerangka aspal dengan styrofoam terhadap kinerja mekanis komposit perkerasan semi lentur. Dengan membandingkan variasi aspal murni dan aspal-styrofoam pada kondisi *grouting* yang identik, penelitian ini menghasilkan insight penting tentang interaksi interface antara *grouting* cementitious dan kerangka bituminous, yang selama ini belum banyak dieksplorasi dalam literatur. Temuan ini memiliki implikasi langsung terhadap optimasi desain mix perkerasan semi lentur yang lebih sustainable, cost-effective, dan performant untuk kondisi iklim tropis Indonesia.

Penelitian ini memiliki tiga tujuan spesifik yang terukur. Pertama, mengevaluasi secara kuantitatif kinerja kuat tekan dan kuat lentur komposit perkerasan semi lentur yang menggunakan CR-ECC optimum (10% fly ash, 10% abu cangkang sawit, 7,5% crumb rubber) sebagai material *grouting* pada kerangka kerikil aspal porus berbasis aspal murni dan aspal-styrofoam 7,5%. Kedua, menganalisis pengaruh modifikasi kerangka aspal dengan styrofoam terhadap karakteristik interaksi interface antara material *grouting* dan kerangka agregat-aspal, yang dimanifestasikan melalui perubahan sifat mekanis komposit. Ketiga, memberikan rekomendasi teknis berbasis bukti eksperimental mengenai kelayakan penggunaan waste-based materials (fly ash, palm shell ash, crumb rubber, dan styrofoam) dalam sistem perkerasan semi lentur untuk mendukung pembangunan infrastruktur berkelanjutan di Indonesia.

Penelitian ini memberikan manfaat multi-dimensi. Dari aspek teoritis, penelitian ini memperkaya literatur ilmiah tentang mekanisme komposit hibrid yang mengintegrasikan cementitious *grouting* dengan bituminous skeleton, khususnya dalam konteks waste-based materials, yang selama ini masih terbatas dalam database riset internasional. Dari aspek praktis, penelitian ini menyediakan data teknis yang dapat dijadikan rujukan oleh praktisi konstruksi jalan dan industri aspal dalam mengadopsi teknologi perkerasan semi lentur berbasis limbah untuk aplikasi jalan sekunder atau jalan dengan lalu lintas menengah. Dari aspek lingkungan, penelitian ini mendemonstrasikan potensi pemanfaatan simultan empat jenis limbah (fly ash, abu cangkang sawit, crumb rubber, styrofoam) dalam volume signifikan, yang berkontribusi terhadap pengurangan beban tempat pembuangan akhir (TPA) dan emisi karbon dari industri konstruksi. Dari aspek ekonomi, penggunaan waste-based materials dapat mengurangi biaya material hingga 20-30% dibandingkan menggunakan material virgin, sehingga meningkatkan cost-effectiveness proyek infrastruktur jalan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium yang dirancang untuk menginvestigasi kinerja mekanis komposit perkerasan semi lentur berbasis CR-ECC melalui pengujian kuat tekan dan kuat lentur. Pendekatan eksperimental dipilih karena memungkinkan kontrol variabel yang ketat dan pengukuran kuantitatif yang akurat terhadap parameter mekanis material komposit dalam kondisi laboratorium terkontrol (Neville & Brooks, 2010). Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Rekayasa Beton, Departemen Teknik Sipil Universitas Sumatera Utara, dengan seluruh pengujian mengacu pada standar pengujian nasional Indonesia (SNI) yang relevan untuk memastikan validitas dan reliabilitas data.

Penelitian ini terdiri dari dua tahap utama. Pada tahap pertama, digunakan komposisi CR-ECC hasil penelitian Suwandy (2025), yang sebelumnya telah mengkaji variasi mortar ECC dengan kombinasi *fly ash* dan abu cangkang sawit (ACS) sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat semen, serta memodifikasinya dengan *crumb rubber* (CR) sebesar 0% hingga 12,5%. Dari hasil penelitian tersebut, diperoleh variasi optimum pada kombinasi 10% *fly ash*, 10% ACS, dan 7,5% *crumb rubber*, dengan kuat tekan mencapai 32,18 MPa. Komposisi ini kemudian digunakan sebagai material *grouting* dalam penelitian ini. Mix proportion CR-ECC dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Mix Proportion CR-ECC Benda Uji Satu Kubus dan Satu Balok Komposit Kerikil Aspal

Bahan	Satuan	Kubus	Balok
Semen	kg	1,759	7,036
<i>Fly ash</i>	kg	0,176	0,704
Abu cangkang sawit	kg	0,176	0,704
Air	kg	0,765	3,061
Agregat halus	kg	1,583	6,332
<i>Superplasticizer</i> (SP)	kg	0,058	0,225
<i>Crumb rubber</i> (7,5%)	kg	0,132	0,528
Total berat CR-ECC	kg	4,649	18,6

Material utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi semen Portland komposit (PCC), pasir halus (lolos ayakan No. 16), kerikil ukuran 40-50 mm, *fly ash* dari PLTU Pangkalan Susu, dan abu cangkang sawit dari pabrik kelapa sawit di Sumatera Utara. *Crumb rubber* diperoleh melalui pembelian daring (online), berasal dari limbah ban bekas yang telah dicacah halus dan dikemas secara komersial. *Styrofoam* diperoleh dari pusat daur ulang lokal, sedangkan *superplasticizer* yang digunakan adalah tipe SIKA Viscocrete 3115 N. Aspal penetrasi 60/70 diperoleh dari PT. RAPI ARJASA.

Peralatan utama yang digunakan mencakup mixer bore untuk pencampuran, cetakan kubus dan balok, kualiti dan kompor untuk pemanasan aspal, serta plat besi untuk pendinginan campuran. Uji kuat tekan dilakukan menggunakan mesin uji tekan kapasitas 3000 kN, dan uji kuat lentur menggunakan mesin uji lentur dua titik. Seluruh pengujian dilakukan di Laboratorium Rekayasa Beton, Departemen Teknik Sipil Universitas Sumatera Utara.

Komposisi kerikil-aspal porus ditetapkan sebagai berikut, untuk benda uji berbentuk kubus, berat kerikil dihitung sebagai 1,5 kali volume cetakan dikalikan dengan berat jenis kerikil. Untuk benda uji balok, digunakan faktor koreksi sebesar 1,1 kali volume cetakan. Berat aspal ditetapkan sebesar 7% dari berat kerikil. *Styrofoam* ditambahkan sebesar 7,5% dari berat aspal. Rincian mix proportion benda uji kubus dan benda uji balok dengan kerikil-aspal porous berbasis *styrofoam* dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Mix Proportion Kerikil Aspal Benda Uji Satu Kubus dan Satu Balok

Jenis Campuran	Komposisi Penyusun	Satuan	Kubus (kg)	Balok (kg)
Aspal 7,5%	Aspal	kg	0,68	2,004
	Kerikil	kg	6,075	24,3
	Aspal	kg	0,68	2,004

Jenis Campuran	Komposisi Penyusun	Satuan	Kubus (kg)	Balok (kg)
Aspal 7,5% +	Kerikil	kg	6,075	24,3
Styrofoam 7,5%	Styrofoam	kg	0,051	0,151

Proses pembuatan benda uji diawali dengan pemanasan aspal hingga mencapai suhu sekitar 150 °C, kemudian ditambahkan *styrofoam* sesuai proporsi yang telah ditentukan dan diaduk hingga homogen. Selanjutnya, kerikil dicampurkan ke dalam aspal yang telah dicairkan hingga terlapisi merata, kemudian dipindahkan ke nampan dan dibiarkan mendingin. Kerikil yang sudah terlapisi aspal tersebut kemudian disusun ke dalam cetakan berbentuk kubus dan balok. Tahap akhir adalah melakukan mixing CR-ECC sesuai proporsi optimum dan menuangkannya ke dalam cetakan berisi kerikil-aspal porus hingga seluruh rongga terisi, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Proses Penuangan CR-ECC ke Dalam Bekisting

Pengujian kuat tekan dilakukan pada benda uji kubus berukuran 150×150×150 mm menggunakan *compression testing machine*, sedangkan pengujian kuat lentur dilakukan pada benda uji balok berukuran 600×150×150 mm menggunakan *flexural strength testing machine*. Seluruh pengujian dilakukan pada umur 3 hari. Gambar peralatan uji tekan dan uji lentur ditunjukkan pada **Gambar 2** dan **Gambar 3**, sedangkan jumlah total benda uji disajikan pada **Tabel 3**.



Gambar 2. Compression Testing Machine



Gambar 3. Flexural Strength Testing Machine

Tabel 3. Jumlah Benda Uji Komposit CR-ECC dengan Kerikil Aspal Porous berbasis styrofoam

Bentuk Benda Uji	Jenis Pengujian	Aspal Murni	Aspal Murni + Styrofoam	Jumlah
Kubus	Uji Tekan	3	3	6
Balok	Uji Lentur	3	3	6
Total				12

HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji Properties Aspal

Pengujian karakteristik aspal dilakukan untuk memastikan bahwa aspal yang digunakan memenuhi standar mutu sesuai spesifikasi teknis. Berdasarkan hasil pengujian yang dapat dilihat pada **Tabel 4**, nilai penetrasi aspal sebesar 67,4 (0,1 mm), berada dalam rentang standar SNI 2456:2011, yaitu 60–70. Titik lembek diperoleh sebesar 51°C, melebihi batas minimum 48°C sesuai SNI 2434:2011. Uji daktilitas menunjukkan nilai 112,3 cm, memenuhi syarat minimum 100 cm berdasarkan SNI 2432:2011. Berat jenis aspal tercatat sebesar 1,03 gr/cc, sesuai dengan ketentuan minimum 1,00 gr/cc menurut SNI 2411:2011. Seluruh parameter pengujian menunjukkan bahwa aspal Pen 60/70 yang digunakan memenuhi persyaratan teknis.

Tabel 4. Hasil uji Properties Aspal PEN 60/70

No.	Pengujian	Metode Pengujian	Syarat (Min–Max)	Hasil	Keterangan
1	Penetrasi (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60–70	67,4	Memenuhi
2	Titik lembek (°C)	SNI 2434:2011	≥48	51	Memenuhi
3	Daktilitas (cm)	SNI 2432:2011	≥100	112,3	Memenuhi
4	Berat jenis (gr/cc)	SNI 2411:2011	≥1,00	1,03	Memenuhi

Penambahan *styrofoam* memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap karakteristik dasar aspal sebagaimana ditunjukkan pada hasil pengujian dalam **Tabel 5**. Nilai penetrasi menurun pada kedua variasi, yaitu menjadi 50,9 (7,5%) dan 33,6 (15%), keduanya berada di bawah spesifikasi standar 60–70. Titik lembek meningkat menjadi 55,5°C dan 57°C, melampaui batas minimum 48°C. Uji daktilitas menunjukkan perbedaan yang kontras, variasi 7,5% menghasilkan nilai 135 cm, masih memenuhi syarat minimum 100 cm, sementara variasi 15% hanya mencapai 14,3 cm. Berat jenis kedua variasi berada di atas ambang minimum 1,00 gr/cc, masing-masing 1,05 dan 1,04 gr/cc. Berdasarkan keempat parameter uji, variasi 7,5% *styrofoam* menunjukkan karakteristik yang paling mendekati spesifikasi aspal Pen 60/70. Dengan demikian, variasi *styrofoam* 7,5% digunakan dalam pembuatan kerikil aspal porus pada penelitian ini.

Tabel 5. Hasil uji Properties Aspal-Styrofoam

No.	Pengujian	Metode Pengujian	Syarat Aspal PEN 60/70 (Min–Max)	Hasil	
				7,5%	15%
1	Penetrasi (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60–70	50,9	33,6
2	Titik lembek (°C)	SNI 2434:2011	≥48	55,5	57
3	Daktilitas (cm)	SNI 2432:2011	≥100	135	14,3
4	Berat jenis (gr/cc)	SNI 2411:2011	≥1,00	1,05	1,04

Uji Properties Kerikil

Penelitian ini melibatkan dua jenis pengujian karakteristik kerikil, yaitu uji keausan dan uji kelekatan. Pengujian keausan agregat dilakukan menggunakan mesin abrasi Los Angeles sesuai dengan SNI 2417:2008 untuk mengetahui ketahanan agregat terhadap gesekan dan tumbukan. Hasil pengujian disajikan pada **Tabel 6**, nilai keausan agregat pada 100 putaran sebesar 1,24% dan meningkat menjadi 10,14% pada 500 putaran. Peningkatan nilai keausan sejalan dengan jumlah putaran yang lebih tinggi, yang mencerminkan besarnya pengaruh gaya tumbukan terhadap degradasi agregat. Nilai keausan 10,14% pada 500 putaran masih berada di bawah batas maksimum 30% yang ditetapkan oleh standar umum untuk agregat perkerasan, menunjukkan bahwa agregat memenuhi kriteria ketahanan aus untuk digunakan dalam campuran perkerasan kerikil aspal porus.

Tabel 6. Hasil uji Keausan Agregat

Parameter	100 Putaran	500 Putaran
Berat awal (gram)	5000	5000
Berat tersisa (gram)	4938	4493
Selisih (gram)	62	507
Keausan (%)	1,24	10,14

Pengujian kelekatan kerikil terhadap aspal berdasarkan SNI 2439:2011, bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana aspal mampu melekat pada permukaan agregat, yang menjadi indikator penting dalam kinerja jangka panjang campuran aspal. Hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 7**, hasil menunjukkan bahwa kelekatan aspal terhadap kerikil berada pada nilai 97% untuk seluruh variasi. Nilai ini menunjukkan tingkat keterikatan yang tinggi antara aspal dan agregat, termasuk pada aspal yang dimodifikasi dengan *styrofoam*.

Tabel 7. Hasil uji Keausan Agregat

Variasi	Hasil (%)
Aspal PEN 60/70	97
Aspal-Styrofoam	97

Pengujian Kuat Tekan

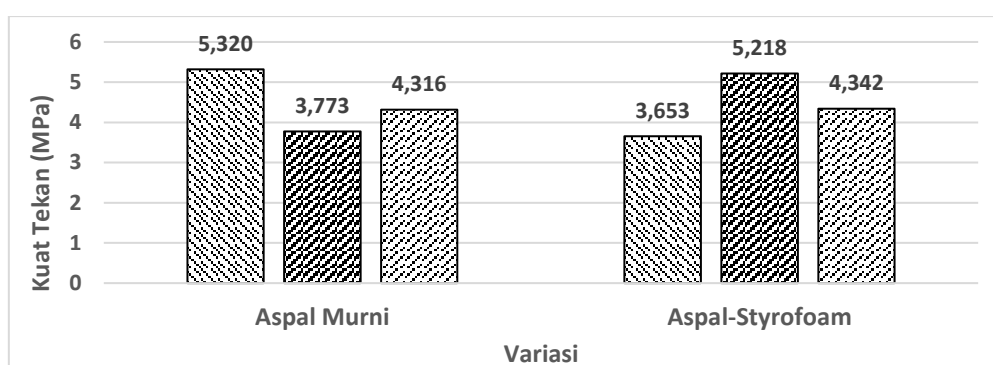
Pengujian kuat tekan dilakukan pada benda uji kubus berukuran 150×150×150 mm untuk dua variasi komposit kerikil aspal porus, yaitu aspal murni dan aspal–*styrofoam*, pada umur 3 hari. Pengujian ini mengacu pada SNI 1974:2011, di mana nilai kuat tekan diperoleh dari perbandingan antara beban maksimum dengan luas penampang benda uji. Hasil pengujian kuat tekan ditunjukkan pada Tabel 8 dan Gambar 4, sementara nilai kuat tekan rata-rata disajikan pada Gambar 5 dalam bentuk grafik batang.

Nilai kuat tekan rata-rata komposit aspal murni adalah 4,470 MPa, sedangkan komposit aspal–*styrofoam* memiliki nilai 4,404 MPa. Selisih nilai kuat tekan antara kedua variasi relatif kecil, yaitu sebesar 0,066 MPa atau sekitar 1,48% dari nilai aspal murni. Pada Tabel 8 terlihat bahwa nilai kuat tekan tiap sampel masih bervariasi, namun cenderung konsisten sehingga menghasilkan rata-rata yang stabil. Jika dikaitkan dengan hasil uji karakteristik aspal, aspal murni memiliki nilai penetrasi dalam rentang standar (67,4), sedangkan aspal–*styrofoam* 7,5% memiliki nilai penetrasi yang lebih rendah

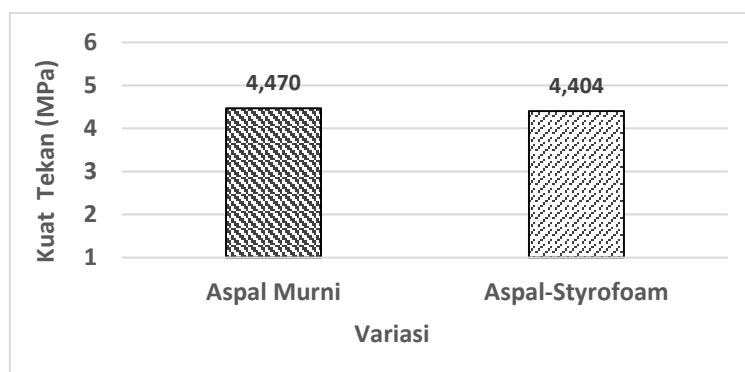
(50,9) dan titik lembek lebih tinggi (55,5°C), yang mengindikasikan peningkatan kekakuan. Perbedaan karakteristik ini dapat memengaruhi interaksi antara kerangka kerikil aspal dan material grouting CR-ECC, sehingga menghasilkan kuat tekan yang sedikit berbeda.

Tabel 8. Hasil Uji Kuat Tekan Komposit Kerikil Aspal CR-ECC Umur 3 Hari

Variasi	Sampel	Kuat Tekan Umur 3 Hari (MPa)	Rata-Rata (MPa)
Aspal Murni	1	5,320	4,470
	2	3,773	
	3	4,316	
Aspal-Styrofoam	1	3,653	4,404
	2	5,218	
	3	4,342	



Gambar 4. Variasi Nilai Kuat Tekan Komposit Kerikil Aspal CR-ECC Umur 3 Hari



Gambar 5. Kuat Tekan Rata-rata Komposit Kerikil Aspal CR-ECC Umur 3 Hari

Pengujian Kuat Lentur

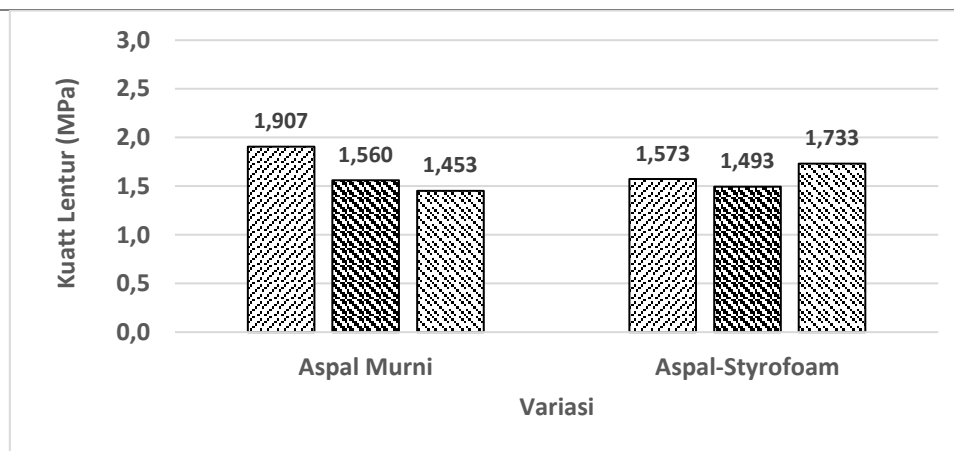
Pengujian kuat lentur dilakukan pada benda uji berbentuk balok berukuran 600 × 150 × 150 mm sesuai dengan SNI 4431:2011 untuk dua variasi komposit kerikil aspal porus, yaitu aspal murni dan aspal-styrofoam, pada umur 3 hari. Hasil pengujian tiap benda uji ditunjukkan pada Gambar 6 dan Tabel 9, sedangkan nilai kuat lentur rata-rata dalam bentuk grafik batang dapat dilihat pada Gambar 7.

Nilai kuat lentur rata-rata komposit aspal murni adalah 1,640 MPa, sedangkan komposit aspal-styrofoam sebesar 1,600 MPa. Selisih nilai kuat lentur antara kedua variasi relatif kecil, yaitu 0,040 MPa atau sekitar 2,44% dari nilai aspal murni. Pada Tabel 9 terlihat bahwa nilai kuat lentur tiap sampel masih bervariasi, namun konsisten menghasilkan rata-rata yang stabil. Jika dikaitkan dengan sifat material pengisi (grouting), CR-ECC yang digunakan pada kedua variasi memiliki komposisi optimum yang sama, sehingga perbedaan kuat lentur lebih dipengaruhi oleh karakteristik aspal yang digunakan pada kerangka kerikil. Aspal-styrofoam memiliki titik lembek lebih tinggi dibanding aspal murni, yang menunjukkan peningkatan kekakuan, namun juga nilai penetrasi yang lebih rendah. Kombinasi sifat

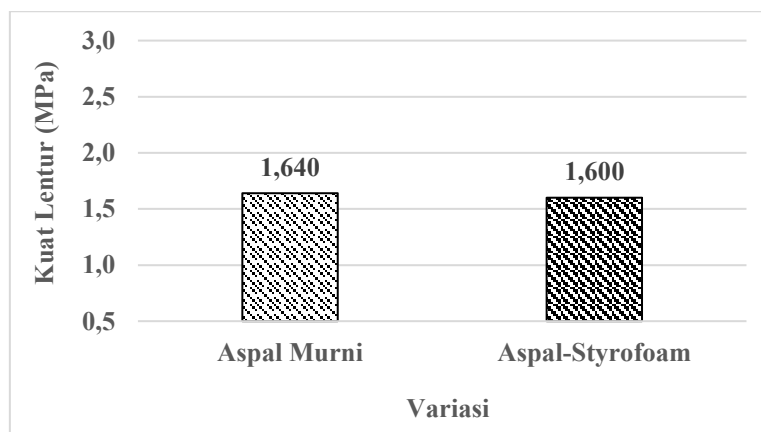
tersebut dapat memengaruhi ikatan antar agregat ketika menerima beban lentur, sehingga menghasilkan perbedaan kuat lentur yang relatif kecil.

Tabel 9. Hasil Uji Kuat Lentur Komposit Kerikil Aspal CR-ECC Umur 3 Hari

Variasi	Sampel	Beban (kN)	Kuat Lentur (Mpa)	Rata-Rata Beban (kN)	Rata-Rata Kuat Lentur (MPa)
Aspal Murni	1	14,300	1,907	12,300	1,640
	2	11,700	1,560		
	3	10,900	1,453		
Aspal-Styrofoam	1	11,800	1,573	12,000	1,600
	2	11,200	1,493		
	3	13,000	1,733		



Gambar 6. Variasi Nilai Kuat Lentur Komposit Kerikil Aspal CR-ECC Umur 3 Hari



Gambar 7. Kuat Lentur Rata-rata Komposit Kerikil Aspal CR-ECC Umur 3 Hari

KESIMPULAN

Pengujian kuat tekan dan kuat lentur komposit kerikil aspal CR-ECC pada umur 3 hari menunjukkan hasil yang relatif serupa antara variasi aspal murni dan aspal--styrofoam. Nilai kuat tekan rata-rata aspal murni sebesar 4,470 MPa, sedangkan aspal--styrofoam sebesar 4,404 MPa, dengan selisih hanya 0,066 MPa atau 1,48%. Pada uji lentur, nilai rata-rata aspal murni adalah 1,640 MPa dan aspal--styrofoam 1,600 MPa, dengan selisih 0,040 MPa atau 2,44%. Perbedaan kecil ini mengindikasikan bahwa penambahan styrofoam tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap kinerja tekan maupun lentur komposit, meskipun karakteristik aspal--styrofoam menunjukkan penetrasi lebih rendah dan titik lembek lebih tinggi yang menandakan peningkatan kekakuan. Secara umum,

kedua variasi memiliki performa mekanis yang setara pada umur awal pengujian, dengan nilai kuat tekan dan kuat lentur yang masih di bawah standar untuk aplikasi jalan dengan lalu lintas menengah-tinggi, namun berpotensi untuk aplikasi jalan sekunder atau jalan dengan lalu lintas ringan setelah mencapai full strength development pada umur 28 hari. Penelitian ini berhasil mendemonstrasikan feasibility pemanfaatan multi-waste materials (fly ash, palm shell ash, crumb rubber, dan styrofoam) dalam sistem perkerasan semi lentur, yang berkontribusi terhadap pengembangan sustainable construction materials. Penelitian lanjutan diperlukan untuk: (1) mengevaluasi kinerja jangka panjang pada umur 28 hari dan seterusnya, (2) mengkaji durability properties seperti water absorption, freeze-thaw resistance, dan fatigue performance, (3) mengoptimalkan void content dan interfacial bonding untuk meningkatkan transfer stress antara grouting dan skeleton, serta (4) melakukan full-scale field testing untuk validasi performance di bawah actual traffic loading.

DAFTAR PUSTAKA

- Bahar, F. F., & Wiranto, S. (2024). Inovasi material dalam beton berkelanjutan: Studi literatur tentang pemanfaatan fly ash dengan peningkatan kekuatan beton: Innovation in sustainable concrete materials: A literature review on the utilization of fly ash for enhanced concrete strength. *Jurnal Engineering*, 6(1), 47–52.
- Cai, X., Huang, W., & Wu, K. (2019). Study of the self-healing performance of semi-flexible pavement materials grouted with engineered cementitious composites mortar based on a non-standard test. *Materials*, 12(21). <https://doi.org/10.3390/ma12213488>
- Fadhila, N., Rahmawati, Y. N., & Siswati, N. D. (2024). Sintesis dan karakterisasi membran ramah lingkungan dari limbah styrofoam dengan penambahan biochar. *Jurnal XYZ*, 9(4), 11234–11242.
- Gusty, S., Ahmad, S. N., Bungin, E. R., Safar, A., Rangan, P. R., Tamim, T., Ismail, K. K., & Patiku, Y. (2021). *Sampah sebagai sumber energi alternatif*. TOHAR MEDIA.
- Harahap, F. I., Aswin, M., & Tarigan, A. P. M. (2022). Evaluasi kuat tekan pada bata ECC dan bata-CR ECC berbasis silica fume dan abu sekam padi. *Siklus: Jurnal Teknik Sipil*, 8(2), 248–260.
- Harsono, S. S. (2023). *Garbology: Pengelolaan sampah berbasis circular economy*. MEGA PRESS NUSANTARA.
- Hutahaean, M., & Setiawati, N. (2023). Pengelolaan limbah konstruksi infrastruktur berbasis circular economy di Metropolitan Rebana. *Prosiding Seminar Nasional WJES*, 1(1), 120.
- Khan, M. I., Sutanto, M. H., Yusoff, N. I., & Zoorob, S. E. (2022). Cementitious grouts for semi-flexible pavement surfaces — A review. *Journal of Construction Materials*.
- Khed, V. C., Mohammed, B. S., & Nuruddin, M. F. (2018). Effects of different crumb rubber sizes on the flowability and compressive strength of hybrid fibre reinforced ECC. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 140(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/140/1/012137>
- Komara, I., Suprobo, P., Faimun, F., & Iranata, D. (2021). Analisis perilaku material dan komposisi engineered cementitious composite: Review studi. *Cantilever: Jurnal Penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 10(2), 111–118.
- Mulyawan, A. (2019). Simulasi biaya penanganan jalan antara perkerasan kaku dan perkerasan lentur. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 9(2), 153–164.

- Nur, K. N., Mahyuddin, Bachtiar, E., Tumpu, M., Mukrim, M. I., Irianto, Kadir, Y., Arifin, T. S. P., Ahmad, S. N., Halim, H., & Syukuriah. (2021). *Perancangan perkerasan jalan*. Yayasan Kita Menulis.
- Sukirman, S. (2016). *Beton aspal campuran panas* (2nd ed.). Institut Teknologi Nasional.
- Syafiarti, A. I., Aslim, F. J., Utami, G. S., & Sekartadji, R. (2022). The effect of using styrofoam as additional material for asphalt concrete layer (Laston) – WC with BNA blend. *Jurnal IPTEK*, 26(1), 67–74. <https://doi.org/10.31284/j.iptek.2022.v26i1.2>
- Wahditiya, A. A., Semet, M. M., Nantan, Y., Istoto, E. H., Purnamasari, R., Maulana, A. P., Baali, Y., & Niati, S. M. (2025). *Energi dari limbah dan sampah: Teknologi, kebijakan, dan implementasi*. Yayasan Tri Edukasi Ilmiah.
- Wardana, M. P. (2025). Performa mekanik engineered cementitious composites (ECC) yang diperkuat serat sintetis makro dan mikro. *Journal of Syntax Literate*, 10(6).
- Wijaya, D. K., MP, A., Santoso, H. A., & Islahudin, N. (2024). Rancang bangun teknologi mesin crumb rubber dan sistem informasi rantai pasok untuk mengolah limbah ban bekas di Kota Semarang. *Jurnal Riptek*, 18(2), 165–176.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).