

Pemeriksaan Terhadap Komposit *Crumb Rubber–Engineered Cementitious Composite (ECC)* Kerikil Aspal Porous Berbasis *Styrofoam* Berdasarkan Uji Tekan dan Uji Lentur

Raissa Putri Kayana¹, Muhammad Aswin², Adina Sari Lubis³

Departemen Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara
Jl. Perpustakaan No.5, Kampus USU, Padang Bulan, 20155

²E-mail: muhammad.aswin@usu.ac.id

Abstract — Traffic growth in Indonesia demands the development of innovative pavement materials that are environmentally friendly, durable, and sustainable. Conventional asphalt pavements have limitations in durability under repeated loading, while cement-based pavements are prone to early cracking and require high construction costs. One potential alternative is the utilization of Crumb Rubber and Engineered Cementitious Composite (ECC) combined with porous asphalt aggregate based on Styrofoam. This study aims to evaluate the mechanical performance of the composite through compressive strength and flexural strength testing. The research method includes material preparation (60/70 penetration asphalt, aggregates, PCC cement, fly ash, rice husk ash, crumb rubber, and Styrofoam), mix design using a trial-and-error approach based on ECC literature, specimen preparation in the form of cubes (15×15×15 cm) for compressive tests and beams (15×15×60 cm) for flexural tests. Testing was conducted at 3 days of curing in accordance with SNI 1974:2011 and SNI 4431:2011. The results show that the CR-ECC asphalt aggregate composite without additives produced the highest average compressive strength of 10.27 MPa, while the mixture with Styrofoam and 7.5% crumb rubber decreased to 5.82 MPa. In contrast, in the flexural test, the variation with Styrofoam showed an increase in flexural strength up to 1.50 MPa compared to the control value of 1.40 MPa. These findings indicate that the addition of waste materials can enhance the flexibility of the composite, although it may reduce compressive strength at an early stage. The study concludes that the utilization of industrial and household waste materials such as crumb rubber, fly ash, rice husk ash, and Styrofoam has significant potential in developing more environmentally friendly pavement materials. Further research is recommended with variations in material composition and longer curing periods to optimize the balance between compressive and flexural performance and to support sustainable pavement applications in Indonesia.

Kata kunci: Crumb Rubber; Engineered Cementitious Composites (ECC); Fly ash; Compressive Strength; Styrofoam.

Abstrak — Pertumbuhan lalu lintas di Indonesia menuntut pengembangan material perkerasan inovatif yang ramah lingkungan, kuat, dan berkelanjutan. Perkerasan aspal konvensional memiliki keterbatasan pada durabilitas terhadap beban berulang, sedangkan perkerasan berbasis semen rentan terhadap retak dini dan memerlukan biaya konstruksi yang tinggi. Salah satu alternatif potensial adalah pemanfaatan Crumb Rubber dan Engineered Cementitious Composite (ECC) yang dikombinasikan dengan kerikil aspal porous berbasis Styrofoam. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja mekanik komposit tersebut melalui pengujian kuat tekan dan kuat lentur. Metode penelitian meliputi persiapan material (aspal penetrasi 60/70, kerikil, semen PCC, fly ash, abu sekam padi, Crumb Rubber, dan Styrofoam), perancangan mix design melalui pendekatan trial and error berdasarkan literatur ECC, pembuatan benda uji kubus (15×15×15 cm) untuk uji tekan, dan balok (15×15×60 cm) untuk uji lentur. Pengujian dilakukan pada umur 3 hari sesuai SNI 1974:2011 dan SNI 4431:2011. Hasil menunjukkan bahwa komposit kerikil aspal CR-ECC tanpa aditif memiliki kuat tekan rata-rata tertinggi 10,27 MPa, sedangkan campuran dengan tambahan Styrofoam dan Crumb Rubber 7,5% menurun menjadi 5,82 MPa. Sebaliknya, pada uji lentur, variasi dengan Styrofoam menunjukkan peningkatan kuat lentur hingga 1,50 MPa dibanding kontrol 1,40 MPa. Temuan ini mengindikasikan bahwa penambahan material limbah dapat meningkatkan fleksibilitas komposit, meskipun pada tahap awal menurunkan kekuatan tekan. Kesimpulan penelitian menegaskan bahwa pemanfaatan limbah industri dan rumah tangga seperti Crumb Rubber, fly ash, abu sekam padi, dan Styrofoam memiliki potensi dalam menciptakan material perkerasan yang lebih ramah lingkungan. Disarankan penelitian lanjutan dengan variasi kadar dan waktu perawatan lebih panjang untuk mengoptimalkan kombinasi kinerja tekan dan lentur serta mendukung aplikasi di perkerasan jalan berkelanjutan di Indonesia.

Kata kunci: *Crumb Rubber; Engineered Cementitious Composites (ECC); Fly ash; Kuat Tekan; Styrofoam.*

I. PENDAHULUAN

Pertumbuhan lalu lintas di Indonesia terus meningkat setiap tahun (Budiati, 2023; Putra & Widarto, 2023), sehingga mendorong kebutuhan terhadap material perkerasan jalan yang tidak hanya kuat, tetapi juga tahan lama dan ramah lingkungan. Saat ini, perkerasan lentur berbasis aspal masih banyak digunakan karena kemudahan konstruksi dan biaya awal yang relatif rendah (Khan & Singh, 2018; Faridl & Widarto, 2025; Setiaji et al., 2021). Namun, jenis perkerasan ini memiliki kelemahan dalam hal durabilitas terhadap beban berulang, sedangkan perkerasan kaku berbasis semen lebih rentan terhadap retak dini serta membutuhkan biaya konstruksi yang tinggi. Permasalahan umum ini mendorong perlunya eksplorasi material komposit baru yang dapat menggabungkan keunggulan kedua sistem perkerasan tersebut (Sarasanty & Asmorowati, 2025; Muis et al., 2021; Loi & Zai, 2025). Secara khusus, salah satu tantangan utama adalah meningkatkan daktilitas dan ketahanan retak pada material perkerasan, tanpa mengorbankan kekuatan tekan dan lenturnya. *Engineered Cementitious Composite (ECC)* dikenal memiliki daktilitas tinggi serta kemampuan membatasi retak mikro sehingga mampu memperpanjang umur layan struktur (Li, 2007; Ma et al., 2021; Shoji et al., 2022; Zhang et al., 2020; Xu et al., 2021; Zhu et al., 2021; Shumuye et al., 2023; Zhou et al., 2024). Kadar serat yang digunakan dalam ECC relatif rendah, yaitu sekitar 2% atau kurang, namun telah terbukti memberikan kontribusi signifikan terhadap kelenturan material. Selain itu, pemanfaatan abu sekam padi sebagai substitusi sebagian semen Portland dapat meningkatkan kuat tekan beton, meskipun menurunkan *workability* (Zhang et al., 2021; Harahap et al., 2022; Hasudungan & Aswin, 2022). Penggunaan limbah sekam padi yang dikelola dengan baik memberikan nilai tambah lingkungan sekaligus mendukung pengurangan emisi karbon dari industri semen. Di sisi lain, inovasi perkerasan aspal modern juga mengarah pada pemanfaatan limbah plastik, seperti *expanded polystyrene (EPS)* atau *Styrofoam*, yang diketahui dapat memengaruhi sejumlah parameter penting seperti stabilitas, *void in mineral aggregate (VMA)*, dan *void in mix (VIM)*, yang dinilai melalui uji *Marshall* (Lubis

& Hermanto, 2020; Siahaan et al., 2020; Putri 2023; Pasapan et al., 2021; Oemiati et al., 2022; Ardiatma et al., 2020). Penggunaan *Crumb Rubber* dan *Styrofoam* sebagai aditif dalam campuran aspal terbukti membantu meningkatkan fleksibilitas dan mengurangi penggunaan material konvensional, mendukung konsep *green pavement* (Alfikri et al., 2022; Budiati, 2023; Faridl & Widarto, 2025; Syarif et al., 2025; Alaloul et al., 2020; Lubis et al., 2024). Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan mendesak akan material perkerasan yang tidak hanya memenuhi persyaratan mekanis, tetapi juga memanfaatkan limbah industri dan rumah tangga, mendukung ekonomi sirkular, dan mengurangi ketergantungan pada material konvensional yang berdampak tinggi terhadap lingkungan (Shoji et al., 2022; Shumuye et al., 2023). Dengan menggabungkan *Crumb Rubber*, *fly ash*, abu sekam padi, dan *Styrofoam* dalam sistem kerikil aspal porous yang diisi *grouting ECC*, diharapkan dapat tercipta perkerasan baru dengan keseimbangan kinerja tekan dan lentur yang lebih baik. *Novelty* dari penelitian ini terletak pada penerapan *Crumb Rubber-ECC* sebagai material *grouting* dalam perkerasan kerikil aspal porous berbasis *Styrofoam* (Simbolon et al., 2025; Harahap et al., 2022; Hasudungan & Aswin, 2022), Lubis et al., 2024). Teknologi ini berbeda dari penelitian sebelumnya yang umumnya memanfaatkan ECC pada struktur beton konvensional, karena menggabungkan material limbah dan material berperforma tinggi ke dalam satu sistem komposit perkerasan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh penambahan *Styrofoam* dan *Crumb Rubber* terhadap sifat mekanik komposit kerikil aspal porous yang digrout menggunakan ECC melalui pengujian kuat tekan dan kuat lentur pada umur awal (3 hari) (Zulfikar et al., 2022, 2023; Aini et al., 2023; Manik et al., 2022; Umam, 2020; Aaron & Kushartomo, 2023). Hasilnya diharapkan dapat memberikan rekomendasi formulasi material perkerasan inovatif yang dapat diaplikasikan pada konstruksi jalan berkelanjutan di Indonesia. Untuk menentukan kemampuan beton dalam menahan beban tekan, digunakan pengujian kuat tekan sesuai SNI 1974:2011, yaitu dengan membagi beban maksimum yang diterima spesimen dengan luas penampangnya (Badan

Standardisasi Nasional (BSN), 2011a). Alat uji tekan yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 1, sementara persamaan perhitungan kuat tekan ditunjukkan dalam Persamaan (1).

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Dengan f'_c , adalah kuat tekan (MPa), P adalah beban tekan maksimum (N), dan A adalah luas penampang benda uji (mm^2). Selain itu, pengujian kuat lentur dilakukan untuk mengevaluasi kapasitas balok komposit ($60 \times 15 \times 15$ cm) dalam menahan beban lentur sebelum keruntuhan sesuai SNI 4431:2011 (Badan Standardisasi Nasional (BSN), 2011b). Pengujian dilakukan dengan metode pembebanan dua titik pada umur 3 hari. Alat uji kuat lentur ditunjukkan pada Gambar 2, sedangkan perhitungan nilai *Modulus of Rupture* (MOR) mengikuti Persamaan (2) (Milad et al., 2015).

$$\sigma_b = \frac{P.L}{b.h^2} \quad (2)$$

Dengan σ_b adalah kuat lentur (*Modulus of Rupture*) benda uji (MPa), P adalah beban lentur tertinggi (N), L adalah jarak bentang antar tumpuan (mm), b adalah lebar lintang horizontal (mm), dan h adalah tinggi lintang vertikal (mm).



Gambar 1 Alat uji tekan



Gambar 2 Alat uji lentur

II. METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Struktur, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, dengan sebagian pengujian karakteristik material kerikil dan aspal dilakukan di Laboratorium Balai Besar Jalan Nasional (BBPJN) II Medan. Rangkaian kegiatan penelitian meliputi persiapan material, perencanaan *mix design*, pembuatan benda uji, serta pengujian kuat tekan dan kuat lentur komposit. Material utama yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa komponen. Aspal yang digunakan adalah aspal penetrasi 60/70, diperoleh dari PT. RAPI ARJASA, Sunggal, Deli Serdang, Sumatera Utara, dengan variasi penambahan *Styrofoam* dan *Crumb Rubber* sebesar 0%, 7,5%, dan 15% terhadap volume aspal. Semen yang digunakan adalah *Portland Composite Cement* (PCC) produksi PT. Semen Padang. Air yang digunakan berasal dari Laboratorium Struktur, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, dengan syarat harus jernih, bersih, dan tidak mengandung kotoran sesuai SNI 03-6861.1-2002. Selain itu, *fly ash* dari PLTU Pangkalan Susu dan abu sekam padi (*rice husk ash*) dari Perusahaan Penggilingan Padi Setia di Medan Sunggal digunakan sebagai material *pozzolan* pengganti sebagian semen, masing-masing dengan proporsi 10%. Material lain yang digunakan meliputi *Crumb Rubber* dengan ukuran partikel 0,075 mm hingga 4,75 mm sebagai pengganti agregat halus, serta *Styrofoam* bekas berukuran maksimum 50 mm yang diperoleh dari Depo Daur Ulang Yayasan Buddha Tzu Chi di Medan untuk campuran aspal. *Superplasticizer* tipe SIKA Viscocrete 3115 N digunakan untuk meningkatkan kapasitas aliran dan mendukung sifat *self-compacting concrete* (SCC) pada campuran ECC. Agregat halus yang digunakan adalah pasir sungai dari Binjai yang lolos ayakan nomor 15 (1,25 mm), sedangkan agregat kasar berupa batu pecah dengan diameter maksimum 40–50 mm diperoleh dari Binjai, Sumatera Utara, yang digunakan sebagai kerikil untuk campuran aspal panas. Seluruh material yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3 sebelum digunakan dalam proses perancangan campuran. Perancangan *mix design* dilakukan berdasarkan referensi dari penelitian Prof. Victor C. Li dan studi sebelumnya mengenai *Engineered Cementitious Composites* (ECC), serta disempurnakan melalui pendekatan *trial and error* bersama pembimbing akademik. Proses

ini bertujuan mendapatkan komposisi optimal yang memenuhi kriteria kekuatan tekan dan lentur. Perancangan campuran CR-ECC menggunakan 350 kg/m³ semen sebagai dasar perhitungan. Kandungan *fly ash* dan abu sekam padi ditentukan sebagai proporsi dari berat semen, dengan faktor air-semen (FAS) sebesar 0,435. Pasir ditambahkan sebanyak 90% dari berat semen, sementara jumlah *superplasticizer* dihitung sebagai persentase dari total berat semen dan *fly ash*. Selain itu, *Crumb Rubber* ditambahkan sebesar 7,5% dari berat semen. Setiap variasi campuran dibuat dalam tiga benda uji kubus berukuran 15×15×15 cm untuk memastikan reliabilitas data. Komposisi optimum CR-ECC ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 3. Material yang digunakan dalam penelitian

Tabel 1. Komposisi optimum *Crumb Rubber*-ECC (CR-ECC)

No	Komposisi Penyusun	Satuan	Jumlah (kg)
1	Semen	Kg	350,00
2	<i>Fly ash</i>	Kg	35,00
3	Abu Cangkang Sawit	Kg	35,00
4	Air	Kg	152,25
5	Agregat Halus	Kg	315,00
6	<i>Superplasticizer</i> (SP)	Kg	17,70
7	<i>Crumb Rubber</i> (CR = 7,5%)	Kg	26,25

Total Berat CR-ECC per 1 m³ 952,20

Berdasarkan hasil uji kuat tekan, campuran CR-ECC dengan variasi 10% *fly ash*, 10% abu sekam padi, dan 7,5% *Crumb Rubber* menunjukkan performa paling optimal pada umur 3 hari. Komposisi tersebut kemudian digunakan sebagai material *grouting* pada pembuatan komposit kerikil aspal porous. Berat aspal yang digunakan ditentukan sebesar 7% dari berat kerikil, sedangkan berat *Styrofoam* yang digunakan ditetapkan sebesar 7,5% dari berat aspal. Komposisi lengkap campuran komposit kerikil aspal porous ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi campuran komposit kerikil aspal porous untuk satu kubus uji

No	Komposisi Penyusun	Satuan	Jumlah (kg)
Aspal 7%			
1	Aspal	Kg	0,6378
2	Kerikil	Kg	9,1125
	Total Berat	Kg	9,7503
Aspal 7% + <i>Styrofoam</i> 7,5%			
1	Aspal	Kg	0,6378
2	Kerikil	Kg	9,1125
3	<i>Styrofoam</i>	Kg	0,0478
	Total Berat	Kg	9,7981

Pembuatan benda uji komposit dilakukan dalam bentuk kubus berukuran 15×15×15 cm untuk pengujian kuat tekan dan balok berukuran 15×15×60 cm untuk pengujian kuat lentur. Tahap pertama pembuatan dilakukan dengan melapisi kerikil berukuran 40–50 mm menggunakan aspal panas, baik murni maupun yang telah ditambahkan *Styrofoam*, sehingga kerikil terselimuti secara merata. Agregat beraspal tersebut kemudian dimasukkan ke dalam cetakan tanpa dilakukan pemadatan untuk mempertahankan sifat porous. Selanjutnya, mortar CR-ECC dituangkan ke dalam cetakan sebagai *grouting* untuk mengisi rongga antar-kerikil hingga terbentuk komposit yang padat dan homogen. Proses pembuatan kerikil beraspal ditunjukkan pada Gambar 4, sedangkan tahap pencampuran dan penuangan CR-ECC ke dalam cetakan divisualisasikan pada Gambar 5.



Gambar 4. Proses pembuatan kerikil aspal

Gambar 5. Proses pembuatan *Crumb Rubber*-ECC (CR-ECC)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian karakteristik material dilaksanakan pada material aspal dan kerikil di Laboratorium Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional (BBPJN) II Medan. Pengujian kerikil dilakukan untuk mengetahui kelekatan agregat terhadap aspal serta tingkat keausan, sedangkan pengujian aspal mencakup uji penetrasi, titik lembek, daktilitas, dan berat jenis dengan beberapa variasi penambahan *Styrofoam*. Hasil pengujian kerikil menunjukkan bahwa material ini memenuhi seluruh standar teknis yang berlaku. Nilai keausan agregat tercatat sebesar 1,24% pada 100 putaran dan 10,14% pada 500 putaran, jauh di bawah batas maksimum 20% sesuai SNI 2417:2008. Selain itu, pengujian kelekatan agregat terhadap aspal menghasilkan nilai antara 97% hingga 99% pada masing-masing variasi kadar 7,5% dan 15%, lebih tinggi dari batas minimum 95% sesuai SNI 2439:2011. Temuan ini memastikan bahwa kerikil yang digunakan layak sebagai agregat pada campuran komposit CR-ECC. Karakteristik aspal diuji pada beberapa variasi, yaitu aspal penetrasi 60/70 sebagai kontrol dan aspal dengan penambahan *Styrofoam* masing-masing sebesar 7,5% dan 15%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa properti aspal dengan variasi tambahan tersebut masih mendekati spesifikasi aspal penetrasi 60/70. Rincian hasil pengujian karakteristik aspal ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengujian karakteristik aspal

Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Syarat (MIN-MAX)	Hasil Aspal PEN 60/70	Hasil Aspal + <i>Styrofoam</i> 7,5%	Hasil Aspal + <i>Styrofoam</i> 15%
Penetrasi (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60 – 70	67,4	50,9	33,6
Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	≥48	51	55,5	57
Daktilitas (cm)	SNI 2432:2011	≥100	112,3	135	14,3
Berat Jenis (Gr/Cc)	SNI 2411:2011	≥1,0	1,03	1,05	1,04

Pengujian kuat tekan dilakukan terhadap komposit kerikil aspal-ECC pada umur 3 hari menggunakan mesin uji tekan elektro-hidrolik berkapasitas 3000 kN di Laboratorium Struktur, Program Studi Teknik Sipil Universitas Sumatera Utara, sesuai SNI 1974:2011. Data hasil pengujian kuat tekan rata-rata dari masing-masing variasi campuran diperlihatkan pada

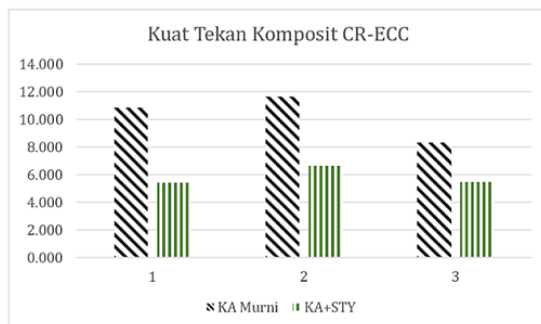
Tabel 4, sedangkan perbandingan visual antara setiap variasi campuran ditunjukkan pada Gambar 6. Berdasarkan data pada Tabel 4 dan Gambar 6, variasi campuran kerikil aspal CR-ECC tanpa penambahan *Styrofoam* menunjukkan nilai kuat tekan rata-rata tertinggi, yaitu 10,267 MPa, seperti diperlihatkan pada Gambar 7. Sebaliknya, campuran kerikil aspal-*Styrofoam* CR-ECC memiliki nilai kuat tekan rata-rata lebih

rendah, yaitu 5,822 MPa, sebagaimana terlihat pada Gambar 8. Penurunan kuat tekan ini mengindikasikan bahwa penambahan material tambahan seperti *Styrofoam* dan *Crumb Rubber* pada campuran CR-ECC cenderung menurunkan kekuatan tekan beton pada umur awal. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan kerikil aspal murni pada CR-ECC lebih efektif dalam mencapai kekuatan tekan yang tinggi pada usia beton 3 hari.

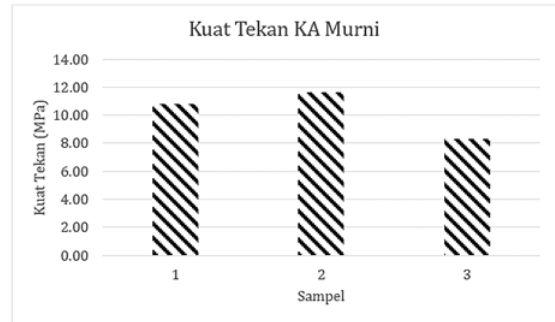
Tabel 4. Hasil Uji kuat tekan komposit kerikil aspal CR-ECC umur 3 hari

Variasi	Benda Uji 1 (MPa)	Benda Uji 2 (MPa)	Benda Uji 3 (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
Aspal CR-ECC	10,827	11,644	83,29	10,267
Aspal + Styrofoam CR-ECC	5,409	6,618	5,440	5,822

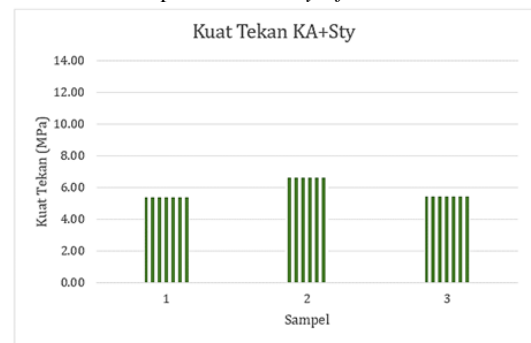
Selain uji tekan, dilakukan pula pengujian kuat lentur untuk mengevaluasi kemampuan balok komposit dalam menahan beban lentur sebelum keruntuhan. Hasil perhitungan *Modulus of Rupture* (MOR) atau kuat lentur tiap variasi ditunjukkan pada Tabel 5.



Gambar 6. Perbandingan hasil uji tekan



Gambar 7. Hasil uji tekan kerikil aspal CR-ECC tanpa penambahan *Styrofoam*

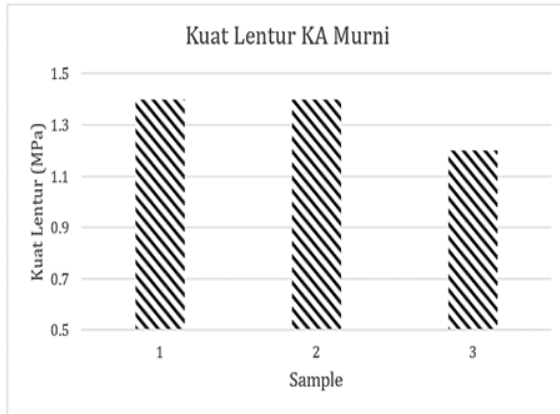


Gambar 8. Hasil uji tekan kerikil aspal–*Styrofoam* CR-ECC

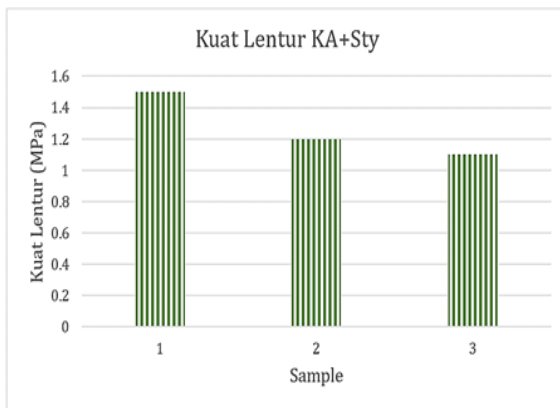
Berdasarkan hasil pengujian, campuran kerikil aspal CR-ECC tanpa penambahan *Styrofoam* memiliki kuat lentur rata-rata sebesar 1,40 MPa, seperti diperlihatkan pada Gambar 9. Sementara itu, variasi campuran kerikil aspal–*Styrofoam* CR-ECC menunjukkan peningkatan nilai kuat lentur menjadi 1,50 MPa, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10. Temuan ini memberikan gambaran bahwa meskipun penambahan *Styrofoam* cenderung menurunkan kuat tekan pada umur awal, sifat elastisitasnya mampu meningkatkan kuat lentur campuran. Dengan demikian, penggunaan material limbah seperti *Styrofoam* dan *Crumb Rubber* dalam komposit perkerasan berpotensi memberikan kombinasi sifat mekanik yang lebih fleksibel dan ramah lingkungan, meskipun optimalisasinya memerlukan kajian lebih lanjut.

Tabel 5. Hasil perhitungan *modulus of rupture* (kuat lentur) pada tiap variasi

Variasi	Sampel	P Maks (N)	Rata-rata P Maks (N)	L (mm)	b (mm)	h (mm)	σ (MPa)
K. Aspal	1	10,5	10	450	150	150	1,74
	2	10,5					
	3	9					
K. Aspal + STY	1	11,2	9,567	450	150	150	1,59
	2	9					
	3	8,5					



Gambar 9. Hasil uji lentur kerikil aspal CR-ECC tanpa penambahan *Styrofoam*



Gambar 10. Hasil uji lentur kerikil aspal–*Styrofoam* CR-ECC

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan *Crumb Rubber-Engineered Cementitious Composite* (CR-ECC) sebagai material *grouting* pada perkerasan kerikil aspal porous berbasis *Styrofoam* menunjukkan potensi untuk menggabungkan kekuatan tekan dan kelenturan dalam satu sistem komposit. Variasi campuran kerikil aspal CR-ECC tanpa penambahan *Styrofoam* menghasilkan nilai kuat tekan rata-rata tertinggi, yaitu 10,267 MPa pada umur 3 hari, sedangkan campuran dengan penambahan *Styrofoam* menurun menjadi 5,822 MPa. Sebaliknya, hasil pengujian kuat lentur memperlihatkan bahwa penambahan *Styrofoam* meningkatkan nilai *Modulus of Rupture* dari 1,40 MPa menjadi 1,50 MPa, menunjukkan adanya perbaikan dalam aspek kelenturan. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan material limbah seperti *Styrofoam* dan *Crumb Rubber* mampu memberikan efek positif terhadap sifat lentur material, meskipun berdampak pada penurunan kekuatan tekan awal. Secara

keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa penggabungan material limbah industri dan rumah tangga seperti *fly ash*, abu sekam padi, *Crumb Rubber*, dan *Styrofoam* berpotensi menciptakan material perkerasan jalan yang lebih berkelanjutan, ramah lingkungan, serta mendukung prinsip ekonomi sirkular. Namun, optimalisasi proporsi dan pengujian jangka panjang masih diperlukan untuk memastikan kinerja yang konsisten dan dapat diimplementasikan secara luas pada konstruksi jalan di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Aaron, J., & Kushartomo, W. (2023). Pengaruh kerapatan wiremesh terhadap kapasitas lentur pelat beton ringan komposit. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 207–216.
- Aini, K. N., Tjahjono, A., Muzayadah, N. L., Nugroho, A., & Nurtiasto, T. S. (2023). Analisis sifat mekanik komposit sandwich serat karbon twill 3k/divinycell foam dengan variasi metode fabrikasi. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 14(2), 601–609.
- Alaloul, W. S., Musarat, M. A., Tayeh, B. A., Sivalingam, S., Rosli, M. F. B., Haruna, S., & Khan, M. I. (2020). Mechanical and deformation properties of rubberized *Engineered Cementitious Composite* (ECC). *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00385.
- Alfikri, N., Olivia, M., & Wibisono, G. (2022). Karakteristik beton *Crumb Rubber* dan abu sekam menggunakan air gambut sebagai pencampur dan perawatan beton. *Jurnal Teknik*, 16(2), 144–152.
- Ardiatma, D., Sari, P. A., & Maharani, E. S. (2020, February). Analisis pemanfaatan limbah plastik jenis *Styrofoam* sebagai bahan baku pembuatan batako. In *Prosiding Seminar Hasil Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Unjani Expo (Unex)* (Vol. 1, No. 1, pp. 31–36).
- Badan Standardisasi Nasional. (2011a). *SNI 1974:2011 Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder*. www.bsn.go.id
- Badan Standardisasi Nasional. (2011b). *SNI 4431:2011 Cara uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebanan*. www.bsn.go.id
- Budiati, A. (2023). Pengaruh penambahan *Crumb Rubber* (Cr) terhadap parameter *Marshall* pada campuran lapis aspal beton (LASTON) untuk lalu lintas sedang. *J. Intertech*, 1(1), 18–21.
- Faridl, M., & Widarto, H. (2025). Pengaruh substitusi agregat halus dengan limbah ban bekas (*Crumb Rubber*) terhadap kuat tekan dan tarik belah beton. *Jurnal Teknik SILITEK*, 5(02), 731–738.
- 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.
- Hasudungan, H. I., & Aswin, M. (2022). Investigasi kuat tekan paving block-ECC oktagon berbasis *fly ash* dan abu sekam padi. *Jurnal Syntax Admiration*, 3(11), 1353–1365.

- Khan, S., & Singh, A. (2018). Behavior of *Crumb Rubber* concrete. *International Journal of Research in Engineering, IT and Social Sciences*, 08(2), 86–92.
- Li, V. C. (2007). *Engineered Cementitious Composites (ECC)* — Material, structural, and durability performance.
- Loi, E., & Zai, E. O. (2025). Optimalisasi perencanaan jembatan gantung menggunakan material komposit serat alam. *Jurnal Studi dan Aplikasi Teknik Sipil (JSATS)*, 1(1), 13–18.
- Lubis, K., & Hermanto, E. (2020). Pembuatan genteng beton serat dengan bahan tambah serat serabut kelapa dan *Styrofoam*. Fakultas Teknik, Universitas Medan Area.
- Lubis, A., Aswin, M., Cynthia, G., & Hasibuan, R. (2024). *Workability* investigation on the fresh mix of ECC mortar and *Crumb Rubber (CR)*-ECC based on variations of palm shell ash, river sand, and cement. *Syntax Literate*, 9(5).
- Ma, H., Yi, C., & Wu, C. (2021). Review and outlook on durability of *Engineered Cementitious Composite (ECC)*. *Construction and Building Materials*, 287, 122719.
- Manik, P., Samuel, S., Ariq Fikri Kamil, M., & Tuswan, T. (2022). Analisis kekuatan lentur dan kekuatan tekan balok laminasi bambu petung (*Dendrocalamus asper*) dan serat kelapa sebagai komponen konstruksi kapal.
- Milad, M., ... (2015). [Detail referensi sesuai sumber aslinya].
- Muis, K. A. F., Trinanda, A. Y., & Nasmirayanti, R. (2021). Studi eksperimental pengaruh penambahan limbah karet terhadap kuat tekan beton. *Civil Engineering Collaboration*, 24–28.
- Oemiati, N., Jonizar, J., & Meyrian, A. T. (2022). Pemanfaatan limbah *Styrofoam* sebagai campuran pembuatan bata ringan. *Bearing: Jurnal Penelitian dan Kajian Teknik Sipil*, 7(2), 107–113.
- Pasapan, R. M., Ali, N., & Rachman, R. (2021). Pengaruh *Styrofoam* sebagai bahan tambah dalam campuran laston lapis antara. *Paulus Civil Engineering Journal*, 3(4), 646–654.
- Putri, A. Y. (2023). Pemanfaatan *Styrofoam* sebagai bahan tambah untuk mortar dalam pembuatan genteng beton (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Nasional Malang).
- Putra, M. P., & Widarto, H. (2023). Analisis pemanfaatan plastik polystyrene (Ps) sebagai bahan tambahan aspal AC-WC dan AC-BC dengan metode *Marshall*. *Jurnal Karajata Engineering*, 3(2). <http://jurnal.umpar.ac.id/index.php/karajata>•91
- Sarasanty, D., & Asmorowati, E. T. (2025). Inovasi material beton berbasis limbah: Studi pengaruh terhadap kuat tekan. *Jurnal Riset Rumpun Ilmu Teknik*, 4(1), 374–383.
- Setiaji, D. H., Riyanto, S., & Novianto, D. (2021). Pengaruh limbah ban karet sebagai substitusi pasir terhadap kuat tekan dan modulus elastisitas beton. *Jurnal Online Skripsi Manajemen Rekayasa Konstruksi (JOS-MRK)*, 2(2), 175–181.
- Shoji, D., He, Z., Zhang, D., & Li, V. C. (2022). The greening of *Engineered Cementitious Composites (ECC)*: A review. *Construction and Building Materials*, 327, 126701.
- Shumuye, E. D., Li, W., Fang, G., Wang, Z., Liu, J., & Zerfu, K. (2023). Review on the durability of eco-friendly engineering cementitious composite (ECC). *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02324.
- Symbolon, E. S. M., Aswin, M., & Syam, B. (2025). Tinjauan kuat tekan dan microstructure pada mortar ECC (*Engineered Cementitious Composites*) dan CR (*Crumb Rubber*)-ECC. *Ranah Research: Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 7(4), 2291–2301.
- Siahaan, N. S. M., Sumajouw, M. D., & Mondoringin, M. R. (2020). Penggunaan *Styrofoam* sebagai substitusi parsial agregat kasar terhadap nilai kuat tekan dan kuat tarik belah beton ringan. *Jurnal Sipil Statik*, 8(4), 635–644.
- Syarif, A. N., Khairunnisa, F., & Fauziyah, S. (2025). Pemanfaatan *Crumb Rubber* dan *fly ash* sebagai substitusi agregat halus dan semen pada ventilation block. *Jurnal Sipil dan Arsitektur*, 3(2), 77–84.
- Umam, A. S. (2020, August). Analisa kekuatan komposit bata GRC (*Glassfiber Reinforced Concrete*) dengan bahan isian biji plastik terhadap kuat tekan, kuat lentur, dan daya serap air. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS* (pp. 31–37).
- Xu, L. Y., Huang, B. T., & Dai, J. G. (2021). Development of *Engineered Cementitious Composites (ECC)* using artificial fine aggregates. *Construction and Building Materials*, 305, 124742.
- Zhang, D., Jaworska, B., Zhu, H., Dahlquist, K., & Li, V. C. (2020). *Engineered Cementitious Composites (ECC)* with limestone calcined clay cement (LC3). *Cement and Concrete Composites*, 114, 103766.
- Zhang, Z., Liu, S., Yang, F., Weng, Y., & Qian, S. (2021). Sustainable high strength, high ductility *Engineered Cementitious Composites (ECC)* with substitution of cement by *rice husk ash*. *Journal of Cleaner Production*, 317, 128379.
- Zhou, W., Zhu, H., Hu, W. H., Wollaston, R., & Li, V. C. (2024). Low-carbon, expansive *Engineered Cementitious Composites (ECC)* in the context of 3D printing. *Cement and Concrete Composites*, 148, 105473.
- Zhu, H., Yu, K., & Li, V. C. (2021). Sprayable *Engineered Cementitious Composites (ECC)* using calcined clay limestone cement (LC3) and PP fiber. *Cement and Concrete Composites*, 115, 103868.
- Zhu, H., Zhang, D., Wang, Y., Wang, T., & Li, V. C. (2021). Development of self-stressing *Engineered Cementitious Composites (ECC)*. *Cement and Concrete Composites*, 118, 103936.
- Zulfikar, A. J., Ritonga, D. A. A., Pranoto, S., Nasution, F. A. K., Arif, Z., & Junaidi, J. (2023). Analisis kekuatan mekanik komposit polimer diperkuat serbuk kulit kerang. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, 6(1), 30–40.
- Zulfikar, A. J., Siahaan, M. Y. R., Irwan, A., Nasution, F. A. K., & Ritonga, D. A. A. (2022). Analisis kekuatan mekanik pipa air dari bahan komposit serbuk kulit kerang. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, 5(2), 83–93.