
Kajian Kuat Tekan dan Lentur pada Komposit yang Tersusun dari Mortar ECC dan Kerikil Aspal Porus Berbasis *Styrofoam* dan *Crumb Rubber*

Tamimah Nisrina Hasibuan

Universitas Sumatera Utara
tamimahnisrina06@gmail.com

Muhammad Aswin

Universitas Sumatera Utara
muhammad.aswin@usu.ac.id

Abstrak

Permasalahan infrastruktur jalan dan pengelolaan limbah di Indonesia menjadi tantangan serius yang membutuhkan solusi inovatif dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kekuatan tekan dan lentur dari komposit mortar *Engineered Cementitious Composite* (ECC) yang dipadukan dengan kerikil aspal porus berbasis *styrofoam* dan *crumb rubber*, serta menggunakan bahan tambah berupa *fly ash* dan abu sekam padi. Komposit dibuat dengan mencampurkan kerikil beraspal yang telah dimodifikasi dengan *styrofoam* dan *crumb rubber*, kemudian dituangkan mortar ECC ke dalam rongga-rongga agregat tersebut. Metode pengujian dilakukan terhadap benda uji berbentuk kubus (15×15×15 cm) untuk uji tekan, dan balok (15×15×60 cm) untuk uji lentur, pada umur 3 dan 7 hari. Penelitian ini menggunakan variasi bahan tambah *styrofoam* dan *crumb rubber* sebesar 7,5% dan 15%, serta *fly ash* sebesar 15% dan abu sekam padi sebesar 5% dari berat semen. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan alternatif perkerasan jalan yang ramah lingkungan, ekonomis, dan memiliki performa mekanik yang unggul. Selain itu, pendekatan ini juga berpotensi mengurangi limbah anorganik dan organik yang sulit terurai, serta memperkuat strategi pemanfaatan limbah industry dan pertanian dalam sektor konstruksi.

Keyword : mortar ECC, kerikil aspal porus, *styrofoam*, *crumb rubber*, kuat tekan, kuat lentur.

I. PENDAHULUAN

Perkerasan jalan merupakan salah satu infrastruktur transportasi yang berperan penting dalam mendukung mobilitas masyarakat dan distribusi barang. Pemilihan jenis perkerasan harus disesuaikan dengan kebutuhan lalu lintas serta

kondisi pelayanan yang diharapkan. Perkerasan lentur yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat memiliki beberapa kelemahan, seperti rentan terhadap pengelupasan, memerlukan pemeliharaan yang lebih sering, dan memiliki kemampuan terbatas dalam menahan beban berat serta kondisi cuaca ekstrem. Di sisi lain, perkerasan kaku berbasis semen memerlukan waktu pengerasan yang relatif lama dan memiliki permukaan yang cenderung licin serta menyilaukan (Khan et al., 2022; Sukirman, 2010). Oleh karena itu, diperlukan pengembangan material perkerasan yang mampu mengombinasikan kekuatan, fleksibilitas, dan keberlanjutan lingkungan.

Selain permasalahan infrastruktur jalan, Indonesia juga menghadapi tantangan dalam pengelolaan limbah. *Styrofoam* merupakan salah satu limbah anorganik yang sulit terurai secara alami dan jumlahnya terus meningkat. Berdasarkan hasil penelitian LIPI, limbah *styrofoam* menjadi salah satu jenis sampah yang mendominasi pencemaran perairan Indonesia. Di sisi lain, peningkatan jumlah kendaraan bermotor turut menghasilkan limbah ban bekas dalam jumlah besar yang sulit terdegradasi secara alami. Salah satu bentuk pemanfaatan limbah ban bekas adalah melalui penggunaan *crumb rubber* sebagai bahan modifikasi campuran aspal sehingga dapat memberikan nilai tambah sekaligus mengurangi dampak pencemaran lingkungan (BPS, 2023; BPS, 2020).

Pemanfaatan limbah industri dan pertanian juga menjadi perhatian dalam pengembangan material konstruksi berkelanjutan. *Fly ash* yang dihasilkan dari pembakaran batu bara dan abu sekam padi yang berasal dari limbah pertanian memiliki kandungan silika yang berpotensi dimanfaatkan sebagai material *pozzolan* dalam campuran semen. Penggunaan kedua material tersebut tidak hanya mengurangi jumlah limbah yang terbuang ke lingkungan, tetapi juga dapat meningkatkan sifat mekanik dan durabilitas material berbasis semen (Li et al., 2022).

Salah satu inovasi yang berpotensi diterapkan pada bidang perkerasan jalan adalah penggunaan *Engineered Cementitious Composite* (ECC). ECC merupakan material komposit berbasis semen yang memiliki daktilitas tinggi, ketahanan retak yang baik, serta kemampuan deformasi yang lebih besar dibandingkan beton konvensional. Pada penelitian ini, mortar ECC berbasis *fly ash* dan abu sekam padi digunakan sebagai material *grouting* pada susunan kerikil aspal porus yang dimodifikasi menggunakan *styrofoam* dan *crumb rubber*. Kombinasi material tersebut diharapkan mampu menghasilkan komposit yang memiliki kekuatan tekan dan lentur yang lebih baik sekaligus mendukung pemanfaatan limbah secara berkelanjutan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kuat tekan dan kuat lentur komposit mortar ECC berbasis *fly ash* dan abu sekam padi dengan kerikil aspal porus berbasis *styrofoam* dan *crumb rubber* pada umur 3 dan 7 hari. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi alternatif material perkerasan yang lebih ramah lingkungan, ekonomis, dan memiliki performa mekanik yang baik.

II. LANDASAN TEORI

Engineered Cementitious Composite (ECC) merupakan material komposit berbasis semen yang dikembangkan untuk mengatasi sifat getas beton konvensional. ECC memiliki daktilitas tinggi dan kemampuan strain-hardening sehingga mampu menahan beban lebih baik dibandingkan material semen biasa. Penggunaan material *pozzolan* seperti *fly ash* dan abu sekam padi pada ECC juga dapat meningkatkan keberlanjutan material konstruksi serta mengurangi penggunaan semen Portland (Li, 1993; Li & Kanda, 1998).

Fly ash merupakan hasil samping pembakaran batu bara yang memiliki sifat *pozzolanik* dan mampu meningkatkan *workability* serta kekuatan jangka panjang mortar. Abu sekam padi juga memiliki kandungan silika tinggi yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan pengganti sebagian semen. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan abu sekam padi pada mortar ECC mampu meningkatkan kuat tekan optimum pada kadar tertentu (Khan et al., 2022; Zakaria et al., 2023).

Styrofoam dan *crumb rubber* merupakan limbah yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan modifikasi aspal. Penambahan *styrofoam* dapat meningkatkan viskositas dan ketahanan deformasi aspal, sedangkan *crumb rubber* mampu meningkatkan stabilitas campuran aspal karena sifat elastisnya. Pemanfaatan kedua material tersebut tidak hanya meningkatkan kinerja perkerasan tetapi juga membantu mengurangi permasalahan limbah lingkungan (Ramadan et al., 2020; Ulfah, 2023).

Penelitian ini mengembangkan perkerasan komposit berupa mortar ECC berbasis *fly ash* dan abu sekam padi yang digunakan sebagai grouting pada kerikil aspal porus berbasis *styrofoam* dan *crumb rubber*. Kinerja komposit dievaluasi melalui pengujian kuat tekan dan kuat lentur pada umur 3 dan 7 hari untuk mengetahui pengaruh variasi material terhadap sifat mekanik komposit yang dihasilkan.

III. MASALAH PENELITIAN

Adapun tujuan penelitian ini antara lain:

1. Mengevaluasi kekuatan tekan umur 3 dan 7 hari pada benda uji kubus komposit mortar ECC berbasis *fly ash* dan abu sekam padi dengan kerikil aspal *porous*; aspal berbasis *Styrofoam*; dan aspal berbasis *crumb rubber*.
2. Mengevaluasi kekuatan lentur umur 3 dan 7 hari pada benda uji balok komposit mortar ECC berbasis *fly ash* dan abu sekam padi dengan kerikil aspal *porous*; aspal berbasis *Styrofoam*; dan aspal berbasis *crumb rubber*

IV. METODE PENELITIAN

1. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium untuk mengevaluasi kuat tekan dan kuat lentur komposit mortar *Engineered Cementitious Composite* (ECC) dengan kerikil aspal porus berbasis *styrofoam* dan *crumb rubber*. Mortar ECC yang digunakan merupakan campuran optimum dengan substitusi *fly ash* sebesar 15% dan abu sekam padi sebesar 5%. Pengujian dilakukan pada umur 3 dan 7 hari untuk mengetahui pengaruh variasi material terhadap sifat mekanik komposit.

2. Data

Benda uji terdiri atas tiga variasi komposit, yaitu kerikil aspal porus (KA), kerikil aspal porus berbasis styrofoam (KA-STY), dan kerikil aspal porus berbasis crumb rubber (KA-CR). Kadar aspal yang digunakan sebesar 7,5% dari berat kerikil, sedangkan penambahan *styrofoam* dan *crumb rubber* masing-masing sebesar 7,5% dari berat aspal.

Pengujian kuat tekan menggunakan benda uji kubus berukuran 150 mm × 150 mm × 150 mm, sedangkan pengujian kuat lentur menggunakan benda uji balok berukuran 150 mm × 150 mm × 600 mm. Setiap variasi terdiri atas tiga benda uji pada umur 3 hari dan tiga benda uji pada umur 7 hari. Total benda uji yang digunakan sebanyak 36 sampel.

3. Teknik Pengumpulan Data

Pembuatan benda uji diawali dengan pencampuran kerikil dan aspal panas hingga seluruh permukaan agregat terlapisi secara merata. Pada variasi *styrofoam* dan *crumb rubber*, material tambahan dicampurkan terlebih dahulu ke dalam aspal sebelum dicampur dengan kerikil. Selanjutnya, mortar ECC digrouting ke dalam rongga kerangka kerikil aspal yang telah disusun dalam cetakan kubus dan balok.

Data penelitian diperoleh melalui pengujian kuat tekan menggunakan mesin uji tekan sesuai SNI 1974:2011 dan pengujian kuat lentur menggunakan metode pembebanan empat titik sesuai SNI 4431:2011

4. Teknik Analisis Data

Nilai kuat tekan dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$f'_c = \frac{P}{A}$$

di mana f'_c adalah kuat tekan (MPa), P adalah beban maksimum (N), dan A adalah luas penampang benda uji.

Nilai kuat lentur dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$R = \frac{P \times L}{b \times d^2}$$

di mana R adalah kuat lentur (MPa), P adalah beban maksimum (N), L adalah panjang bentang, b adalah lebar benda uji, dan d adalah tinggi benda uji.

Data hasil pengujian kemudian dianalisis dan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk membandingkan pengaruh penggunaan styrofoam dan crumb rubber terhadap kuat tekan dan kuat lentur komposit mortar ECC.

V. PEMBAHASAN

1. Pengujian Karakteristik Material

Karakteristik material diuji pada dua jenis bahan, yaitu aspal dan kerikil. Pada material aspal, dilakukan empat macam pengujian yang mencakup uji penetrasi, titik lembek, daktilitas, serta berat jenis. Sementara itu, pengujian terhadap kerikil terdiri dari dua jenis, yaitu uji keausan dan uji kelekatan antara kerikil dan aspal. Seluruh rangkaian proses pengujian dilakukan di Laboratorium Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional (BBPJN) II Medan.

- Pengujian Karakteristik Aspal

Pengujian karakteristik aspal dilakukan pada aspal penetrasi 60/70 sebagai sampel kontrol, aspal termodifikasi styrofoam dan *crumb rubber* dengan variasi

kadar 7,5% dan 15%, serta kombinasi styrofoam dan *crumb rubber* pada kadar optimum berdasarkan hasil pengujian sebelumnya. Seluruh hasil pengujian disajikan dalam tabel berikut, diawali dengan hasil pengujian aspal penetrasi 60/70

Tabel 1. Hasil Uji Karakteristik Aspal Pen 60/70

Aspal Pen 60/70				
Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Syarat		Hasil
		Min	Max	
Penetrasi (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60	70	67.4
Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	48	-	51
Daktilitas (cm)	SNI 2432:2011	100	-	112.3
Berat Jenis (Gr/Cc)	SNI 2411:2011	1.0	-	1.03

Hasil pengujian menunjukkan bahwa aspal penetrasi 60/70 dari PT. RAPI ARJASA memenuhi seluruh spesifikasi Bina Marga, dengan nilai penetrasi 67,4 (0,1 mm), titik lembek 51°C, daktilitas 112,3 cm, dan berat jenis 1,03 gr/cc, sehingga layak digunakan sebagai material penelitian.

Tabel 2. Hasil Uji Karakteristik Aspal yang Dimodifikasi dengan Styrofoam

Aspal Pen 60/70 + Styrofoam					
Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Syarat		Hasil	
		Min	Max	7.5%	15%
Penetrasi (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60	70	50.9	33.6
Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	48	-	55.5	57
Daktilitas (cm)	SNI 2432:2011	100	-	135	14.3
Berat Jenis (Gr/Cc)	SNI 2411:2011	1.0	-	1.05	1.04

Hasil pengujian menunjukkan bahwa aspal dengan penambahan styrofoam 7,5% memiliki karakteristik lebih baik dibandingkan 15%, ditunjukkan oleh nilai penetrasi dan daktilitas yang lebih tinggi, sementara titik lembek dan berat jenis keduanya masih memenuhi syarat aspal konvensional. Oleh karena itu, meskipun belum terdapat standar khusus dalam Bina Marga 2018, kadar styrofoam 7,5% lebih direkomendasikan.

Tabel 3. Hasil Uji Karakteristik Aspal yang Dimodifikasi dengan Crumb Rubber

Aspal Pen 60/70 + Crumb Rubber					
Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Syarat		Hasil	
		Min	Max	7.5%	15%
Penetrasi (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60	70	45.8	41.6

Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	48	-	59	67
Daktilitas (cm)	SNI 2432:2011	100	-	15.3	7
Berat Jenis (Gr/Cc)	SNI 2411:2011	1.0	-	1.04	1.02

Berdasarkan hasil pengujian dan acuan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, campuran aspal dengan *crumb rubber* 7,5% menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan 15%, ditinjau dari nilai penetrasi yang lebih mendekati aspal PEN 60/70, titik lembek yang masih dapat diterima, serta daktilitas yang lebih tinggi. Meskipun beberapa parameter belum sepenuhnya memenuhi standar, kadar *crumb rubber* 7,5% dinilai lebih seimbang dalam aspek kekakuan, ketahanan suhu tinggi, dan fleksibilitas.

- **Pengujian Keausan Kerikil**

Pada penelitian ini, karakteristik kerikil diuji melalui dua metode, yaitu uji keausan yang mengacu pada SNI 2417:2008 dan uji kelekatan kerikil terhadap aspal berdasarkan SNI 2439:2011. Hasil dari kedua pengujian tersebut disajikan secara rinci pada tabel berikut

Tabel 4. Hasil Uji Keausan Agregat (SNI 2417:2008)

Uji Keausan Agregat (SNI 2417:2008)			
Gradasi Pemeriksaan		Jumlah Putaran	
Ukuran Saringan		100	500
Lolos	Tertahan	Berat (gr)	Berat (gr)
76.2 (3")	63.5 (2,5")		
63.5 (2,5")	50.8 (2")		
50.8 (2")	36.1 (1,5")		
36.1 (1,5")	25.4 (1")		
25.4 (1")	19.1(3/4")		
19.1(3/4")	12.7 (1/2")	2500	2500
12.7 (1/2")	9.52 (3/8")	2500	2500
9.52 (3/8")	6.35 (1/4")		
6.35 (1/4")	4.75 (No.4)		
4.75 (No.4)	2.36 (No.8)		
Jumlah Berat (gr)		5000	5000
Tertahan Saringan No.12 (gr)		4938	4493
I. 100 Putaran		II. 500 Putaran	
a = 5000 gr		a = 5000 gr	
b = 4938gr		b = 4493 gr	
a-b = 62 gr		a-b = 507 gr	
Keausan I =		Keausan II =	
1,24%		10,14%	

Tabel 5. Hasil Uji Kelekatan Kerikil Terhadap Aspal (SNI 2439: 2011)

Kelekatan Kerikil Terhadap Aspal

Variasi	Hasil	
	7,5%	15%
Aspal Pen 60/70	97%	97%
Aspal + STY	97%	99%
Aspal + CR	97%	99%

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kerikil memenuhi persyaratan teknis, dengan nilai keausan agregat sebesar 1,24% (100 putaran) dan 10,14% (500 putaran) yang berada di bawah batas maksimum SNI 2417:2008, serta nilai kelekatan kerikil aspal di atas 95% sesuai SNI 2439:2011, sehingga dinyatakan layak digunakan.

2. Pengujian Berat Volume Benda Uji

Pengujian terhadap berat volume dilakukan dengan tujuan untuk menilai seberapa besar pengaruh perbedaan komposisi material terhadap nilai berat jenis pada tiap benda uji. Rangkaian hasil pengukuran berat volume dari berbagai variasi dapat ditemukan pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Data Hasil Pengujian Berat Volume Komposit Mortar ECC dengan kerikil Aspal Umur 3 hari.

Variasi	Bentuk	Umur	Berat Sampel (kg)			Rata-rata (kg)
			I	II	III	
K. Aspal	Kubus	3 hari	7.52	7.57	7.53	7.54
K. Aspal-Sty	Kubus	3 hari	7.54	7.59	7.53	7.55
K. Aspal-CR	Kubus	3 hari	7.58	7.53	7.52	7.54

Berdasarkan dari tabel didapat berat spesimen kubus rata-rata untuk umur pengujian 3 hari sebesar 7.54-7.55 kg dan tidak terdapat perbedaan yang signifikan.

3. Pengujian Kuat Tekan Komposit Mortar ECC dengan Kerikil Aspal

- Hasil Pengujian Grouting Mortar ECC

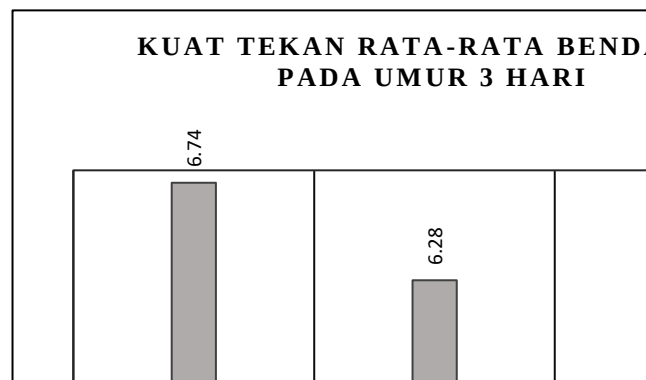
Campuran mortar ECC sebagai *grouting* untuk komposit kerikil aspal menggunakan 15% *Fly Ash* dan 5% Abu Sekam Padi (ASP). Proporsi ini merupakan hasil optimasi dari variasi LVFA dengan ASP. Spesimen yang diuji berbentuk kubus dengan dimensi 15×15×15 cm dan diuji pada umur 3 hari. Hasil pengujian menunjukkan nilai kuat tekan rata-rata sebesar 38.67Mpa (Hendy H., 2025).

Pengujian kuat tekan mortar ECC dilaksanakan di Laboratorium Struktural Universitas Sumatra Utara menggunakan alat uji tekan berkapasitas 3000 kN. Pengujian ini dilakukan pada spesimen dengan variasi campuran kerikil aspal murni, dan aspal modifikasi *Styrofoam* maupun *crumb rubber* dengan *grouting* mortar ECC dengan kode variasi M42_15-5_ASP. Informasi hasil uji kuat tekan untuk masing-masing proporsi campuran disajikan dalam bentuk tabel dan diagram batang sebagaimana ditampilkan pada bagian berikutnya.

Tabel 7. Analisis Kuat Tekan pada Mortar ECC dengan kerikil aspal pada Pengujian Hari ke-3

Variasi	Umur	Beban Tekan			Kuat Tekan (MPa)			Rata-rata (MPa)
		I	II	III	I	II	III	
		kN	kN	kN				
K. Aspal	3 hari	152.9	157.6	144.4	6.80	7.00	6.42	6.74
K.Aspal-Sty	3 hari	172.2	112.0	140.0	7.65	4.98	6.22	6.28
K.Aspal-CR	3 hari	173.6	126.0	114.3	7.71	5.60	5.08	6.13

Berdasarkan **Tabel 7** didapatkan hasil pengujian kekuatan tekan pada umur pengujian 3 hari, diperoleh kekuatan tekan rata-rata yang optimum pada variasi komposit mortar ECC dengan kerikil aspal murni yakni sebesar 6.74 MPa.



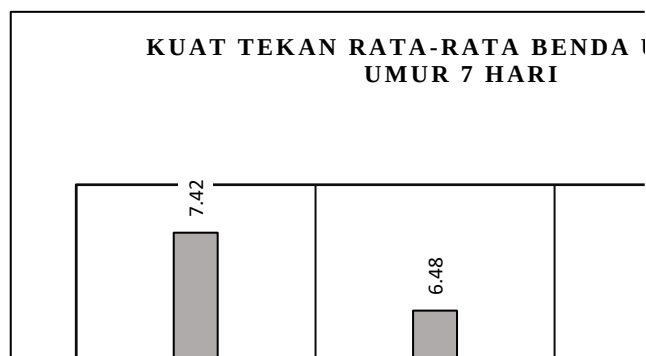
Gambar 1: Diagram Batang Rata-rata Kuat Tekan (MPa) pada ketiga Variasi Benda Uji Komposit Mortar ECC dengan Kerikil Aspal Berbasis Styrofoam dan Crumb rubber pada Umur Uji 3 hari.

Kekuatan tekan benda uji rata-rata pada umur 3 hari sebesar 6.13 MPa – 6.74 MPa sesuai dengan **Gambar 1**.

Tabel 8: Analisis Kuat Tekan pada Mortar ECC dengan kerikil aspal Berbasis Styrofoam pada Pengujian Hari ke-7

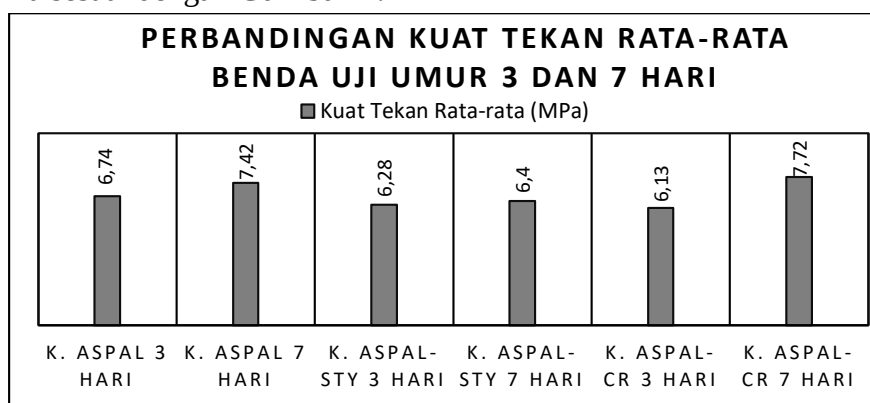
Variasi	Umur	Beban Tekan			Kuat Tekan (MPa)			Rata-rata (MPa)
		I	II	III	I	II	III	
		kN	kN	kN				
K.Aspal	7 hari	136.7	181.9	182.7	6.07	8.08	8.12	7.42
K.Aspal-Sty	7 hari	148.3	141.0	148.2	6.59	6.27	6.59	6.48
K.Aspal-CR	7 hari	173.6	185.7	162.3	7.71	8.25	7.21	7.72

Berdasarkan **Tabel 8** didapatkan hasil pengujian kekuatan tekan pada umur pengujian 7 hari, diperoleh kekuatan tekan rata-rata yang optimum pada variasi komposit mortar ECC dengan kerikil aspal campuran *crumb rubber* yakni sebesar 7.72 MPa.



Gambar 2: Diagram Batang Rata-rata Kuat Tekan (MPa) pada ketiga Variasi Benda Uji Komposit Mortar ECC dengan Kerikil Aspal Berbasis Styrofoam dan Crumb rubber pada umur Uji 7 hari

Kekuatan tekan benda uji rata-rata pada umur 7 hari sebesar 6.48 MPa – 7.72 MPa sesuai dengan **Gambar 2**.



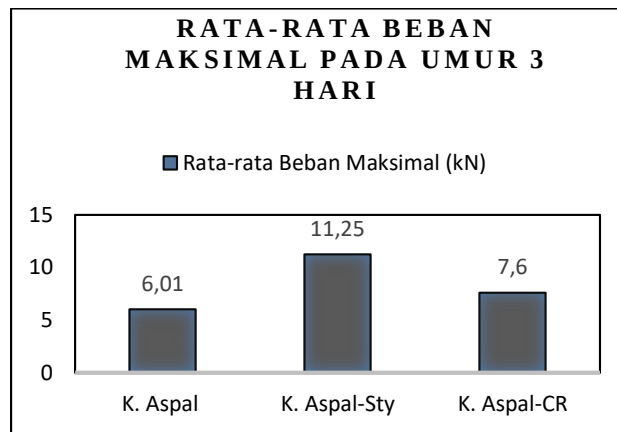
Gambar 3: Perbandingan Diagram Batang Rata-rata Kuat Tekan (MPa) pada ketiga Variasi Benda Uji Komposit Mortar ECC dengan Kerikil Aspal Berbasis Styrofoam dan Crumb rubber pada Umur Uji 3 dan 7 hari

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan, seluruh variasi mortar ECC mengalami peningkatan kekuatan dari umur 3 - 7 hari. Variasi kerikil aspal berbasis *crumb rubber* menunjukkan peningkatan kuat tekan paling signifikan, mencapai nilai rata-rata tertinggi sebesar 7.72 MPa pada umur 7 hari. Sementara itu, mortar dengan kerikil aspal murni dan *styrofoam* juga mengalami peningkatan, namun dengan nilai kuat tekan yang lebih rendah. Secara keseluruhan, penggunaan limbah *crumb rubber* dalam campuran mortar ECC terbukti efektif dalam meningkatkan performa kuat tekan seiring bertambahnya umur perawatan.

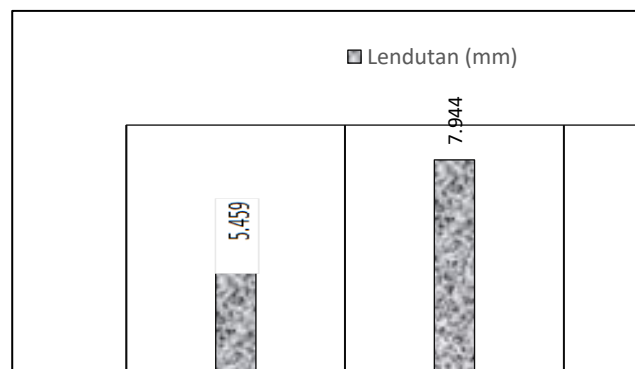
4. Pengujian Kuat Lentur Komposit Mortar ECC dengan Kerikil Aspal

Pengujian lentur balok dilakukan untuk mengidentifikasi beban maksimum serta defleksi tertinggi yang terjadi sebelum terjadinya keruntuhan pada balok komposit yang terbentuk dari Mortar ECC dengan kerikil aspal berbasis *styrofoam* dan *crumb rubber*.

Metode uji menggunakan pembebanan dua titik, di mana jarak antara titik beban dan tumpuan adalah sepertiga panjang balok. Pengujian ini dilaksanakan pada umur 3, dan 7 hari dengan menggunakan alat Universal Testing Machine TENSILON di Laboratorium Struktur Teknik Sipil USU.



Gambar 4: Beban maksimum rata-rata dan kuat lentur rata-rata pada umur uji 3 hari untuk setiap variasi komposit



Gambar 5: Lendutan maksimum rata-rata pada umur uji 3 hari untuk setiap variasi komposit

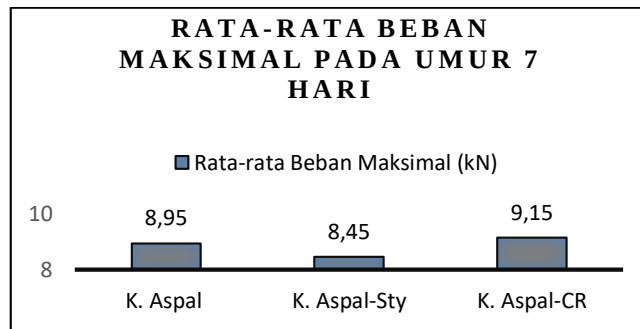
Terlihat pada **Gambar 5** diperoleh lendutan maksimum rata rata pada umur 3 hari sebesar 5.459mm untuk variasi kerikil aspal murni, 7.944 mm untuk variasi kerikil aspal Styrofoam, dan 4.578 mm untuk variasi kerikil aspal crumb rubber.

Tabel 9: Beban maksimum rata-rata dan kuat lentur rata-rata pada umur uji 3 hari untuk setiap variasi komposit

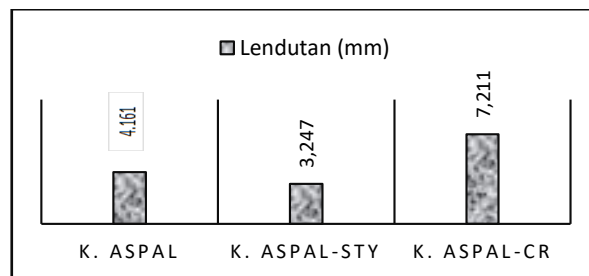
Variasi	Beban Rata-rata (kN)	Kuat Lentur Rata-rata (MPa)
K. Aspal Porous	6.01	0.80
K.Aspal Styrofoam	11.25	1.50
K. Aspal Crumb rubber	7.60	1.01

Hasil pengujian lentur pada umur 3 hari menunjukkan bahwa K. Aspal-Sty memiliki kuat lentur tertinggi sebesar 1,50 MPa, disusul K. Aspal-CR sebesar 1,01 MPa dan K. Aspal Porous sebesar 0,80 MPa. Dari sisi lendutan, K. Aspal-CR menunjukkan nilai terendah sebesar 4,578 mm sehingga memiliki kekakuan yang lebih baik, sedangkan K. Aspal-Sty menunjukkan lendutan terbesar sebesar 7,944 mm. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan crumb rubber mampu meningkatkan

kinerja lentur dengan pengendalian deformasi yang lebih baik dibandingkan styrofoam.



Gambar 6: Beban maksimum rata-rata dan kuat lentur rata-rata pada umur uji 7 hari untuk setiap variasi komposit

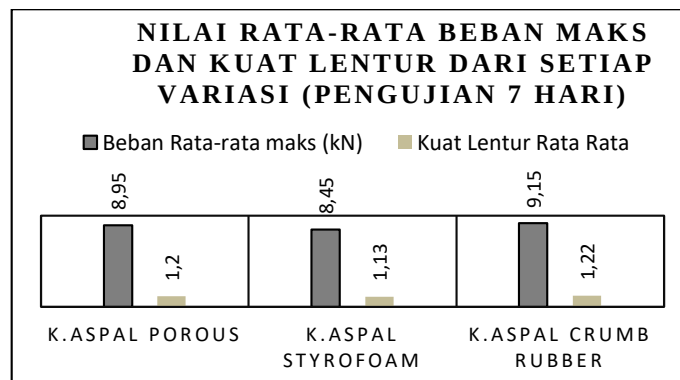


Gambar 7: Lendutan maksimum rata-rata pada umur uji 7 hari untuk setiap variasi komposit

Terlihat pada Gambar 4.11 diperoleh lendutan maksimum rata rata pada umur 7 hari sebesar 4.161mm untuk variasi kerikil aspal murni, 3.247 mm untuk variasi kerikil aspal Styrofoam, dan 7.211 mm untuk variasi kerikil aspal crumb rubber.

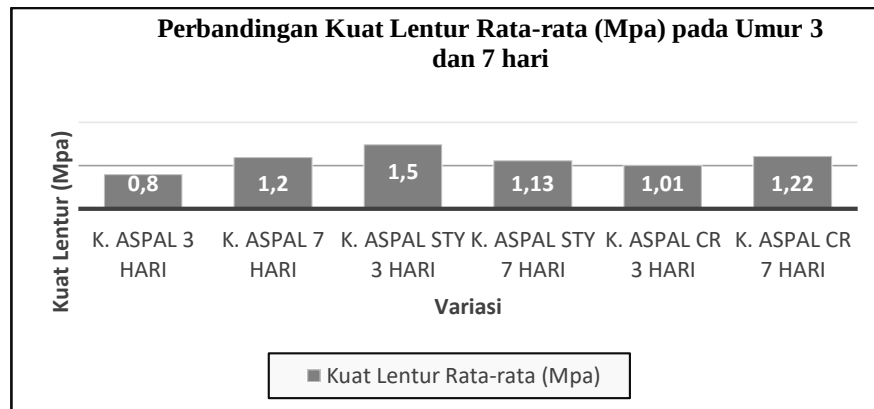
Tabel 10: Beban maksimum rata-rata dan kuat lentur rata-rata pada umur uji 7 hari untuk setiap variasi komposit.

Variasi	Beban Rata-rata (kN)	Kuat Lentur Rata-rata (MPa)
K. Aspal	8.95	1.20
K.Aspal Styrofoam	8.45	1.13
K. Aspal Crumb rubber	9.15	1.22



Gambar 8: Beban maksimum rata-rata dan kuat lentur rata-rata pada umur uji 7 hari untuk setiap variasi komposit

Hasil pengujian lentur pada umur 7 hari menunjukkan bahwa K. Aspal-CR memiliki kuat lentur tertinggi sebesar 1,22 MPa, diikuti K. Aspal sebesar 1,20 MPa dan K. Aspal-Sty sebesar 1,13 MPa. Dari sisi lendutan, K. Aspal-Sty menunjukkan nilai terendah sebesar 3,247 mm yang mengindikasikan kekakuan lebih baik, sedangkan K. Aspal-CR menunjukkan lendutan terbesar sebesar 7,211 mm. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan styrofoam meningkatkan kekakuan, sementara crumb rubber cenderung meningkatkan deformasi pada umur 7 hari.



Gambar 9: Perbandingan Kuat Lentur Rata-rata (MPa) pada Umur 3 dan 7 Hari

Berdasarkan Gambar 9, kuat lentur cenderung meningkat seiring bertambahnya umur pengujian. Pada Kerikil Aspal murni, kuat lentur meningkat dari 0,80 MPa pada umur 3 hari menjadi 1,20 MPa pada umur 7 hari. Variasi K. Aspal-Sty menunjukkan nilai tertinggi pada umur 3 hari sebesar 1,50 MPa, namun menurun menjadi 1,13 MPa pada umur 7 hari, yang mengindikasikan terhambatnya perkembangan kekuatan pada umur lanjut. Sementara itu, variasi K. Aspal-CR mengalami peningkatan kuat lentur dari 1,01 MPa menjadi 1,22 MPa. Secara umum, K. Aspal murni dan K. Aspal-CR menunjukkan tren peningkatan kuat lentur, sedangkan K. Aspal-Sty cenderung mengalami penurunan seiring waktu.

VI. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian berjudul “Kajian Kuat Tekan dan Lentur pada Komposit Mortar ECC dengan Kerikil Aspal Berbasis *Styrofoam* dan *Crumb rubber*,” maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Kuat Tekan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kuat tekan seluruh variasi komposit mortar ECC meningkat seiring bertambahnya umur dari 3 menjadi 7 hari. Nilai kuat tekan rata-rata berkisar 6,13–6,74 MPa pada umur 3 hari dan meningkat menjadi 6,48–7,72 MPa pada umur 7 hari. Variasi kerikil aspal berbasis crumb rubber menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 7,72 MPa pada umur 7 hari, sedangkan berat volume seluruh benda uji relatif seragam pada kisaran 7,54–7,57 kg.

2. Kuat Lentur

Hasil pengujian lentur menunjukkan bahwa penambahan *Styrofoam* dan *crumb rubber* meningkatkan performa lentur komposit mortar ECC. Variasi *Styrofoam* menghasilkan kuat lentur tertinggi pada umur 3 hari sebesar 1,50

MPa dengan beban maksimum 11,25 kN, sedangkan variasi crumb rubber memberikan performa terbaik pada umur 7 hari dengan kuat lentur 1,22 MPa dan beban maksimum 9,15 kN. Variasi kerikil aspal murni menunjukkan nilai lentur terendah, sehingga material modifikasi terbukti mampu meningkatkan kemampuan lentur komposit mortar ECC

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara atas fasilitas dan dukungan yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada dosen pembimbing, laboran, serta seluruh pihak yang telah membantu dalam proses penelitian dan penyusunan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ayuningtyas, U., Made Agus Dharma Susila, I., Leopold Sihombing, A. S., Adi Sasongko, N., Anggraeni, P., Pribadi Adi Nugroho, T., Tjahyo Eka Darmayanti, N., Riset Sistem Produksi Berkelanjutan dan Penilaian Daur Hidup, P., Riset dan Inovasi Nasional Kawasan Puspiptek, B., Selatan, T., & Riset Teknologi Pengujian dan Standar, P. (2022). *PEMANFAATAN FLY ASH DAN BOTTOM ASH SEBAGAI MATERIAL KONSTRUKSI RAMAH LINGKUNGAN DALAM RANGKA Mendukung Kriteria BANGUNAN HIJAU*.
- Badan Pusat Statistik. (2023). *Jumlah Kendaraan Bermotor Menurut Provinsi dan Jenis Kendaraan (unit)*. <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/3/VjJ3NGRGa3dkRk5MTlU1bVNFOTVbVbmQyVURSTVFUMDkjMw==/jumlah-kendaraan-bermotor-menurut-provinsi-dan-jenis-kendaraan--unit--2020.html?year=2023>
- Badan Pusat Statistik. (2024, Maret 1). *Pada 2023, luas panen padi mencapai sekitar 10,21 juta hektare dengan produksi padi sebesar 53,98 juta ton gabah kering giling (GKG)*. https://www.bps.go.id/id/pressrelease/2024/03/01/2375/pada-2023--luas-panen-__padi-mencapai-sekitar-10-21-juta-hektare-dengan-produksi-padi-sebesar-53-98-juta-ton-gabah-kering-giling--gkg-.html
- Badan Standardisasi Nasional. (1989). *SNI 03-1737-1989: Tata cara pelaksanaan lapis aspal beton (LASTON) untuk jalan raya*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2004). *SNI 15-2049-2004 Semen portland*. Badan Standardisasi Nasional. (2011). *SNI 1974:2011 Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder*. www.bsn.go.id
- Badan Standarisasi Nasional (BSN). (1997). *SNI 03-4431-1997 METODE PENGUJIAN KUAT LENTUR NORMAL DENGAN DUA TITIK PEMBEBANAN*. www.bsn.go.id.
- Kabdiyono, E. A., Iqball, M., & Saputra, R. A. (2021). *Pengenalan Inovasi Bahan Bangunan Berupa Limbah Abu Sekam Padi sebagai*

- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (MODI). (2020). *Produksi Batubara – MODI ESDM*. <https://modi.esdm.go.id/produksi-batubara>
- Khan, M. I., Sutanto, M. H., Yusoff, N. I. M., Zoorob, S. E., Rafiq, W., Ali, M., Fediuk, R., & Vatin, N. I. (2022). Cementitious Grouts for Semi-Flexible Pavement Surfaces—A Review. Dalam *Materials* (Vol. 15, Nomor 15). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ma15155466>
- Li, G., Zhou, C., Ahmad, W., Usanova, K. I., Karelina, M., Mohamed, A. M., & Khallaf, R. (2022). Fly Ash Application as Supplementary Cementitious Material: A Review. Dalam *Materials* (Vol. 15, Nomor 7). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ma15072664>
- Li, V. C. (1993). FROM MICROMECHANICS TO STRUCTURAL ENGINEERING-THE DESIGN OF CEMENTITIOUS COMPO-SITES FOR CIVIL ENGINEERING APPLICA-TIONS. Dalam *J. Struct. Mech. Earthquake Eng. No* (Vol. 10, Nomor 2). Japan Society of Civil Engineers.
- Li, V. C. (2003). On Engineered Cementitious Composites (ECC) A Review of the Material and Its Applications. Dalam *Journal of Advanced Concrete Technology* (Vol. 1, Nomor 3).
- Li, V. C., & Kanda, T. (1998). *Engineered Cementitious Composites for Structural Applications*.
- Pemerintah Provinsi Jawa Barat. (2025). *Salah satu sampah abadi, hindarilah penggunaan styrofoam*. Pemerintah Provinsi Jawa Barat. <https://citarumharum.jabarprov.go.id/salah-satu-sampah-abadi-hindarilah-penggunaan-styrofoam/>
- Ramadan, K. Z., Al-Khateeb, G. G., & Taamneh, M. M. (2020). Mechanical properties of styrofoam-modified asphalt binders. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 13(2), 205–211. <https://doi.org/10.1007/s42947-019-0102-4>
- Sukirman, S. (2010). *Perencanaan Tebal Struktur Perkerasan Lentur*.
- Sukirman, S. (2016). *Beton Aspal Campuran Panas*
- Ulfah, L. (2023). Pengaruh Karet Remah Terhadap Stabilitas Campuran Beraspal Laston AC-WC Menggunakan Metode Dry Mix. *Cantilever: Jurnal Penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 12(1), 9–18. <https://doi.org/10.35139/cantilever.v12i1.207>
- Zakaria, N., Ghani, K. D. A., Rosli, M. I. F., Aziz, A. A., Jafri, N., & Kamil, M. H. N. M. (2023). Workability and Compressive Strength of Mortar with Addition of Rice Husk Ash (RHA) as Partial Cement Replacement in Engineered Cementitious Composite (ECC). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1135(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1135/1/012052>