
Investigasi Terhadap Komposit Yang Terbentuk Dari Mortar ECC Dengan Kerikil Aspal Porus Berbasis *Styrofoam* Berdasarkan Uji *Impact*

Dixon Pekanto

Universitas Sumatera Utara
dxnpekantoo@gmail.com

Muhammad Aswin

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

Abstrak

Indonesia sebagai negara kepulauan sangat bergantung pada infrastruktur jalan untuk mendukung konektivitas dan pertumbuhan ekonomi. Namun, sistem perkerasan jalan yang ada masih menghadapi tantangan dari sisi durabilitas serta dampak lingkungan akibat penggunaan material konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik mekanis dari komposit yang terbentuk dari mortar *Engineered Cementitious Composite* (ECC) dengan campuran kerikil aspal porus berbasis limbah *styrofoam*. Penilaian dilakukan melalui uji *impact* pada benda uji berbentuk kubus ($15 \times 15 \times 15$ cm) pada umur 3 hari. Material limbah yang digunakan meliputi *fly ash* dan abu sekam padi sebagai substitusi sebagian semen karena sifat pozolaniknya, serta *styrofoam* sebagai agregat ringan daur ulang. Hasil pengujian menunjukkan adanya perbedaan karakteristik deformasi antar variasi material, yang mengindikasikan potensi pemanfaatan limbah sebagai bahan tambah dalam konstruksi berkelanjutan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan material perkerasan semi lentur atau semi kaku yang ramah lingkungan dan mampu menahan beban dinamis.

Keyword : mortar ECC, kerikil aspal porus, *fly ash*, *styrofoam*, uji *impact*, material berkelanjutan

I. PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara kepulauan sangat bergantung pada infrastruktur jalan untuk meningkatkan konektivitas, produktivitas ekonomi, dan aksesibilitas antar wilayah. Dua jenis sistem perkerasan yang umum digunakan adalah perkerasan lentur (*flexible pavement*) dan perkerasan kaku (*rigid pavement*), masing-masing memiliki keunggulan dan keterbatasan dalam hal daya dukung beban, biaya, dan kebutuhan pemeliharaan.

Seiring meningkatnya beban lalu lintas dan tuntutan terhadap material

konstruksi yang ramah lingkungan, dibutuhkan inovasi dalam pengembangan material perkerasan. Salah satu pendekatan yang berkembang adalah pemanfaatan limbah industri dan pertanian sebagai bahan tambah pada mortar komposit, seperti *fly ash*, *styrofoam*, dan abu sekam padi. Limbah-limbah tersebut memiliki kandungan silika dan alumina yang bersifat pozolanik, sehingga dapat meningkatkan kekuatan dan durabilitas beton serta mengurangi kebutuhan penggunaan semen konvensional.

Fly ash merupakan limbah padat hasil pembakaran batu bara di PLTU yang volumenya terus meningkat setiap tahun. *Styrofoam*, sebagai limbah plastik ringan, sulit terurai di alam dan berpotensi mencemari lingkungan. Sementara itu, abu sekam padi dihasilkan dalam jumlah besar dari proses pengolahan gabah, dan kaya akan kandungan silika aktif. Ketiga limbah ini memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan pengganti parsial agregat atau semen dalam mortar berperforma tinggi.

Engineered Cementitious Composite (ECC) merupakan salah satu material inovatif berbasis mortar yang memiliki fleksibilitas dan ketahanan retak lebih tinggi dibandingkan beton konvensional. Dengan mengombinasikan ECC dan agregat daur ulang seperti *styrofoam*, diharapkan tercipta komposit yang tidak hanya kuat secara mekanis, tetapi juga berkontribusi terhadap pengurangan limbah dan pembangunan berkelanjutan.

II. LANDASAN TEORI

Engineered Cementitious Composite (ECC) adalah material komposit berbasis semen yang dirancang untuk memiliki kekuatan tarik dan kelenturan tinggi. Terbuat dari campuran semen, air, pasir halus, dan bahan *cementitious* tambahan, ECC cocok untuk konstruksi yang membutuhkan daya tahan tinggi, serta mendukung pengembangan struktur yang lebih berkelanjutan secara sosial, ekonomi, dan lingkungan (Li, 2003).

Fly ash memiliki porositas tinggi dan luas permukaan besar, menjadikannya efisien dalam absorpsi, meskipun sifat hidrofiliknya membatasi fluiditas dalam campuran beton. Penggunaan *fly ash* dapat mengurangi kekuatan mortar jika tidak dikendalikan, namun memiliki potensi besar dalam menyerap zat berbahaya seperti fenol dari limbah cair. Sifatnya yang dapat disesuaikan termasuk non-polaritas dan hidrofobisitas permukaan membuat *fly ash* efektif untuk aplikasi lingkungan, seperti pengolahan limbah, pengurangan emisi, serta substitusi parsial semen (Yang, Li and Wang, 2024).

Styrofoam adalah polimer termoplastik yang mencair saat dipanaskan dan mengeras kembali saat dingin. Sifat ini, bersama dengan kelarutannya dalam bensin dan ketahanannya terhadap berbagai bahan kimia, menjadikannya kandidat potensial untuk modifikasi aspal. Selain ringan dan kaku, *styrofoam* juga menawarkan keuntungan struktural dalam aplikasi campuran aspal (Adly, 2016).

III. MASALAH PENELITIAN

Tujuan yang diharapkan tercapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menginvestigasi kuat *impact* dengan umur 3 hari pada komposit mortar ECC kerikil aspal porus.
2. Menginvestigasi kuat *impact* dengan umur 3 hari pada komposit mortar ECC kerikil aspal porus berbasis *styrofoam*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik mekanis komposit mortar ECC yang menggunakan bahan tambah *fly ash*, abu sekam padi, dan *styrofoam* sebagai material alternatif untuk pengembangan perkerasan semi lentur atau semi kaku yang ramah lingkungan.

IV. METODE PENELITIAN

1. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental di Laboratorium Struktur Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara untuk mengevaluasi kuat *impact* dari komposit mortar *Engineered Cementitious Composite* (ECC) yang diformulasikan dengan kerikil aspal berporus dan berbasis *styrofoam*. Komposisi mortar ECC yang diuji merupakan proporsi optimum dengan substitusi *fly ash* sebesar 15% dan abu sekam padi sebesar 5%. Pengujian dilakukan pada umur 3 hari untuk mengidentifikasi pengaruh variasi material terhadap performa komposit.

2. Data Penelitian

Komposisi sampel kubus mortar ECC dalam penelitian ini menggunakan campuran kerikil-aspal dengan *styrofoam* sebagai bahan dasar. Masing-masing proporsi aspal ditetapkan sebesar 7,5% dari total berat kerikil. Sementara itu, berat kerikil dihitung berdasarkan perkalian 1,5 volume kubus dengan massa jenisnya (kg/m^3). Uji kuat *impact* menggunakan kubus yang berukuran 150 mm x 150 mm x 150 mm dengan total 3 benda uji untuk variasi kerikil aspal porus dan 3 benda uji untuk variasi kerikil aspal porus + *styrofoam*.

3. Teknik Pengumpulan Data

Pembuatan Uji *impact* dilakukan untuk mengetahui daya serap energi dan ketahanan retak komposit mortar ECC dengan kerikil aspal *porous* dan yang dimodifikasi dengan penambahan *styrofoam*. Uji ini bertujuan mengevaluasi potensi material dalam menghadapi beban tumbukan mendadak, yang relevan pada aplikasi perkerasan fleksibel, struktur pelindung, maupun elemen bangunan yang terpapar beban dinamis.

Secara prosedur, awal pengujian dilakukan dengan cara menjatuhkan bola baja

berdiameter 60 mm dengan berat 1,115 kg dari ketinggian 1200 mm ke permukaan benda uji komposit dimana setiap sampel akan menerima 10 kali pembebanan. Setelah setiap benturan, pengukuran dilakukan menggunakan jangka sorong digital pada rata-rata kedalaman lekukan dan mistar untuk diameter rata-rata lekukan yang timbul pada permukaan benda uji. Pengukuran dilakukan secara berulang untuk setiap kali pembebanan dan seterusnya sampai sepuluh kali berdasarkan ACI 5445.2R-89 dan ASTM D7136.

V. PEMBAHASAN

1. Pengujian Karakteristik Material

Dalam studi ini dilakukan pengujian terhadap aspal yang meliputi uji penetrasi (SNI 2456:2011), titik lembek (SNI 2434:2011), daktilitas (SNI 2432:2011) dan berat jenis (SNI 2441:2011). Sedangkan pengujian terhadap agregat meliputi keausan dengan mesin Los Angeles (SNI 2417:2008) dan kelekatan terhadap aspal (SNI 2439:2011). Seluruh rangkaian proses pengujian dilakukan di Laboratorium Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional (BBPJN) II Medan.

Pengujian Karakteristik Aspal

Evaluasi karakteristik aspal mencakup uji penetrasi, titik lembek, daktilitas, dan berat jenis pada berbagai komposisi material: aspal dasar 60/70 (kontrol) yang dapat dilihat pada **Tabel 1.** dan aspal termodifikasi *styrofoam* (7,5% dan 15%) pada **Tabel 2.**

Tabel 1. Hasil Uji Karakteristik Aspal Pen 60/70

No.	Aspal Penetrasi 60/70				
	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Syarat		Hasil
			Min	Max	
1	Penetrasi (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60	70	67.4
2	Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	48	-	51
3	Daktilitas cm	SNI 2432:2012	100	-	112.3
4	Berat Jenis (Gr/Cc)	SNI 2411:2013	1.0	-	1.03

Analisis kualitas aspal dari PT. RAPI ARJASA menunjukkan performa yang sesuai dengan standar Bina Marga untuk aspal PEN 60/70. Karakteristik penetrasi material menunjukkan angka 67,4 (0,1 mm), berada dalam kisaran yang ditentukan yaitu 60-70. Pada pengujian titik lembek, material mencapai suhu 51°C, lebih tinggi dari batas minimal 48°C yang dipersyaratkan. Kemampuan material untuk mengalami deformasi juga terbukti unggul dengan nilai daktilitas 112,3 cm, jauh melebihi standar minimal 100 cm. Selain itu, pengukuran berat jenis menunjukkan nilai 1,03 gr/cc, memenuhi kriteria minimal 1,0 gr/cc. Berdasarkan seluruh parameter yang diuji, dapat dipastikan aspal produksi PT. RAPI ARJASA ini memenuhi seluruh standar kualitas yang ditetapkan untuk kategori PEN 60/70.

Tabel 2. Hasil Uji Karakteristik Aspal yang Dimodifikasi dengan *Styrofoam*

Aspal + Styrofoam					
Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Syarat		Hasil	
		MIN	MAX	7,5%	15%
Penetrasi (0,1 mm)	SNI 2456:2011	Mengacu Ketentuan*		50,9	33,6
Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011			55,5	57
Daktilitas (cm)	SNI 2432:2011			135	14,3
Berat Jenis (Gr/Cc)	SNI 2411:2011			1,05	1,04

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa aspal dengan kadar 7,5% memiliki performa lebih baik dibandingkan kadar 15%. Dari segi penetrasi, nilai 50,9 (0,1 mm) pada kadar 7,5% lebih unggul dibanding 33,6 (0,1 mm) pada kadar 15%. Kemudian uji daktilitas memperkuat keunggulan ini dengan hasil 135 cm untuk kadar 7,5% yang jauh melampaui 14,3 cm pada kadar 15%. Untuk titik lemek, kedua variasi menunjukkan hasil yang relatif sebanding (55,5°C vs 57°C). Berdasarkan pertimbangan teknis ini, meskipun Bina Marga 2018 tidak mengatur spesifikasi khusus untuk campuran tersebut, aspal dengan kadar 7,5% layak direkomendasikan sebagai pilihan yang lebih optimal.

Pengujian Keausan Kerikil

Evaluasi karakteristik agregat kasar (kerikil) dilakukan melalui dua metode pengujian standar meliputi uji adhesi agregat-aspal dan uji keausan menggunakan mesin abrasi *Los Angeles*. Hasil pengujian tersebut disajikan pada **Tabel 3.** dan **Tabel 4.** sebagai berikut.

Tabel 3. Hasil Uji Kelekatan Kerikil Terhadap Aspal (SNI 2439:2011)

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

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 (a)	Berat (a)
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		5000	5000
Tertahan Saringan No.12		4938	4493
I. 100 Putaran		II. 500 Putaran	
a =	5000	a =	5000
b =	4938	b =	4493
a-b =	62	a-b =	507
Keausan I	1.24%	Keausan II	10.14%

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada **Tabel 4.** diperoleh bahwa material kerikil memenuhi semua persyaratan teknis. Nilai keausan agregat (SNI 2417:2008) tercatat sebesar 1,24% (100 putaran) dan 10,14% (500 putaran), masih di bawah batas maksimum 20%. Selain itu, uji adhesi kerikil-aspal (SNI 2439:2011) menunjukkan nilai di atas 95% untuk semua variasi, sesuai standar yang ditetapkan.

2. Pengujian Berat Volume Benda Uji

Setiap spesimen diuji berat volumenya guna mengevaluasi sejauh mana perubahan komposisi material memengaruhi nilai berat jenisnya. Baik untuk variasi kerikil aspal porus dan kerikil aspal porus dengan modifikasi *styrofoam* dapat dilihat pada tabel dibawah.

Tabel 5. Data Hasil Pengujian Berat Volume Komposit Mortar ECC dengan kerikil Aspal Umur 3 hari

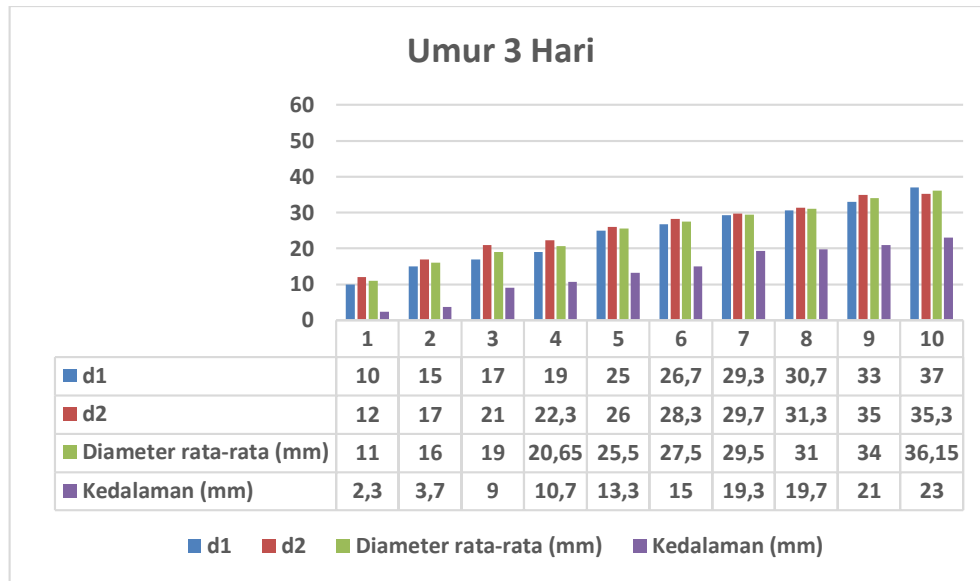
Variasi	Bentuk	Umur	Berat Sampel (kg)			Rata-rata (kg)
			I	II	III	
K. Aspal	Kubus	3 hari	7.52	7.57	7.53	7.54
K. Aspal-Sty	Kubus	3 hari	7.54	7.59	7.53	7.55

3. Uji Kuat *Impact* Komposit Mortar ECC Kerikil Aspal Porus Umur 3 Hari

Tabel 6. Hasil Uji Kuat *Impact* rata-rata Umur 3 hari Komposit Mortar ECC Kerikil Aspal Porus Sampel A-B-C

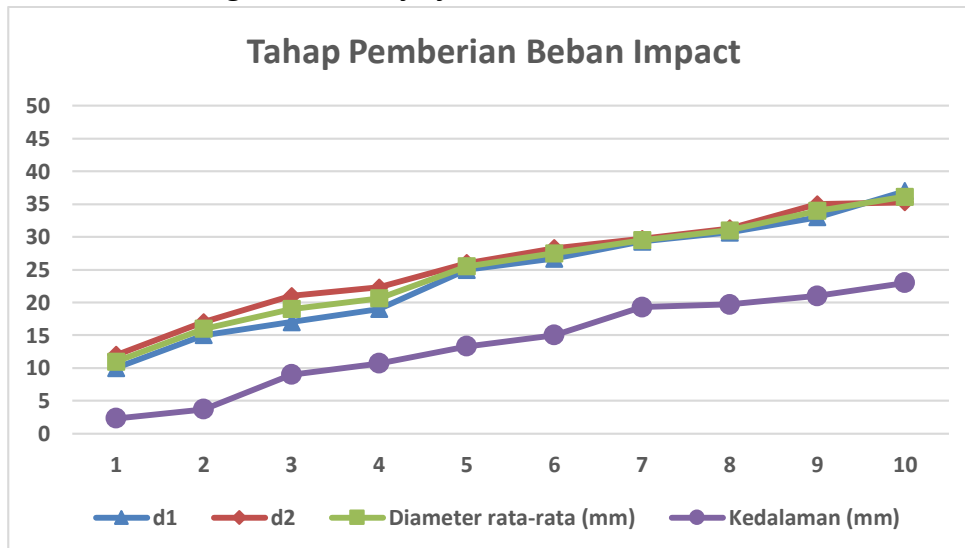
Kode Sampel	Tahap Beban	d1 (mm)	d2 (mm)	Diameter rata-rata (mm)	Kedalaman (mm)	Keterangan
KA3	1	6,7	5	5,85	2,3	-
	2	10,7	14	12,35	6	-
	3	16	20,7	18,35	9,7	-
	4	21,7	25,3	23,5	13,7	-
	5	24,3	30,3	27,3	15	-
	6	26	32	29	17	-
	7	28	33	30,5	19	-
	8	29	37	33	22	-
	9	31	38	34,5	25	Retak
	10	32	38,3	35,15	26,7	Retak

Hasil uji berdasarkan **Tabel 6.** Menunjukkan peningkatan diameter rata-rata sebesar 501% (dari 5,85 mm menjadi 35,15 mm), dan kedalaman tumbukan naik >1000% (dari 2,3 mm menjadi 26,7 mm) dari tahapan pembebanan 1 sampai 10. Retakan yang timbul dari rata-rata 3 benda uji mulai terjadi pada benturan ke-9, menandakan batas ketahanan material terhadap beban dinamis telah tercapai.



Gambar 1. Hubungan Kuat Impact Terhadap Diameter dan Kedalaman rata-rata Lekukan Komposit Mortar ECC Kerikil Aspal Porus Umur 3 Hari

Gambar 1. diatas menunjukkan benda uji kerikil aspal porus umur 3 hari, baik diameter rata-rata dan kedalaman tumbukan cenderung meningkat dari pembebanan 1 hingga 10. Hal ini menunjukkan bahwa material semakin lunak dan ketahanan terhadap *impact* menurun seiring bertambahnya jumlah benturan.



Gambar 2. Hubungan Kuat Impact Terhadap Diameter dan Kedalaman rata-rata Lekukan Komposit Mortar ECC Kerikil Aspal Porus Umur 3 Hari

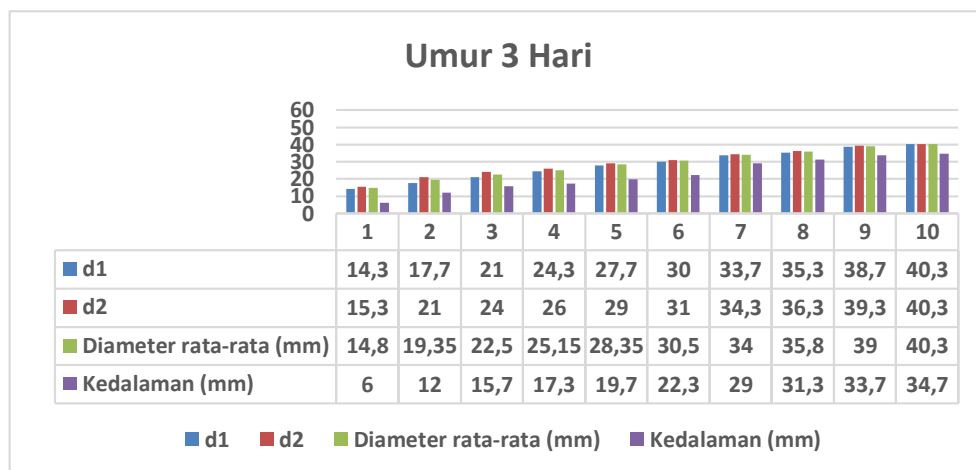
Kemudian berdasarkan grafik tahap pemberian beban *impact*, kembali terlihat pada **Gambar 2.** bahwa baik diameter (d1, d2, dan rata-rata) maupun kedalaman yang timbul akibat kerusakan meningkat secara bertahap dari pembebanan 1 hingga 10. Tren ini mengindikasikan bahwa setiap variasi material menunjukkan respons deformasi yang semakin besar terhadap beban tumbukan.

4. Uji Kuat *Impact* Komposit Mortar ECC Kerikil Aspal Porus + *Styrofoam* Umur 3 Hari

Tabel 7. Hasil Uji Kuat *Impact* rata-rata Umur 3 Hari Komposit Mortar-
ECC Kerikil Aspal Porus + *Styrofoam* A-B-C

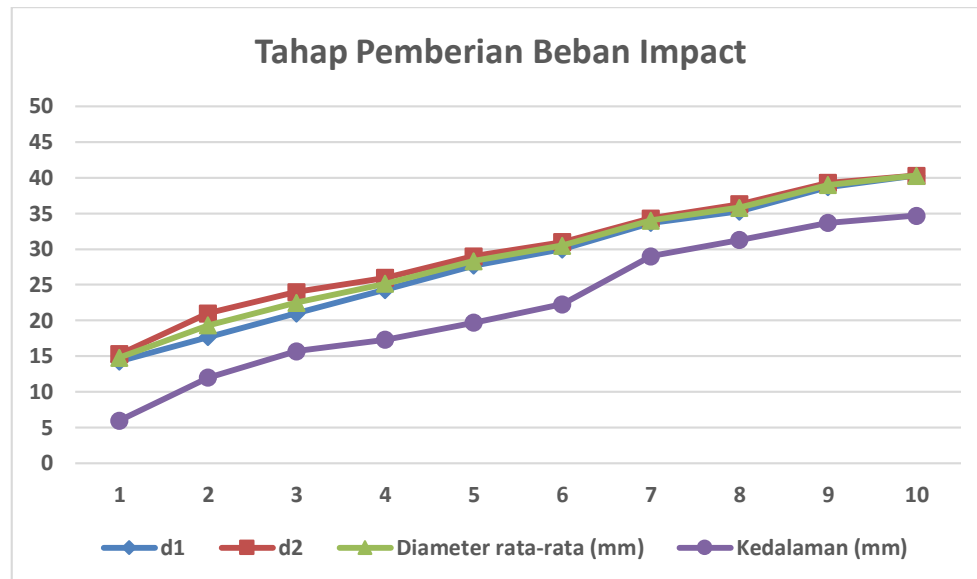
Kode Sampel	Tahap Beban	d1 (mm)	d2 (mm)	Diameter rata-rata (mm)	Kedalaman (mm)	Keterangan
KAS3	1	14,3	15,3	14,8	6	-
	2	17,7	21	19,35	12	-
	3	21	24	22,5	15,7	-
	4	24,3	26	25,15	17,3	-
	5	27,7	29	28,35	19,7	Retak
	6	30	31	30,5	22,3	Retak
	7	33,7	34,3	34	29	Retak
	8	35,3	36,3	35,8	31,3	Retak
	9	38,7	39,3	39	33,7	Retak
	10	40,3	40,3	40,3	34,7	Retak

Berdasarkan data yang terlihat di tabel diatas, diameter rata-rata pada benda uji meningkat sekitar 172% dari 14,8 mm menjadi 40,3 mm, sedangkan kedalaman tumbukan naik >478% dari 6 mm menjadi 34,7 mm. Retak mulai terjadi secara rata-rata pada tahap beban *impact* ke-5, menunjukkan material mencapai batas deformasi lebih awal dibandingkan sampel sebelumnya.



Gambar 3. Hubungan Kuat *Impact* Terhadap Diameter dan Kedalaman rata-rata Lekukan Komposit Mortar ECC Kerikil Aspal Porus + *Styrofoam* Umur 3 Hari

Kemudian untuk benda uji kerikil aspal porus + *styrofoam* pada umur 3 hari, data dalam **Gambar 3**. menunjukkan bahwa diameter tumbukan (d1, d2, dan rata-rata) serta kedalaman terus meningkat dari sampel 1 hingga 10. Peningkatan ini menandakan bahwa kemampuan material dalam menahan beban tumbukan juga turut menurun seiring bertambahnya jumlah tumbukan. Yang berarti semakin besar diameter dan kedalaman bekas tumbukan, semakin rendah ketahanan mekanis material terhadap gaya *impact*.



Gambar 4. Hubungan Kuat *Impact* Terhadap Diameter dan Kedalaman rata-rata Lekukan Komposit Mortar ECC Kerikil Aspal Porus + *Styrofoam* Umur 3 Hari

Grafik tahap pemberian beban *impact* yang disajikan pada **Gambar 4**. diatas menunjukkan tren peningkatan pada diameter tumbukan (d1, d2, dan rata-rata) serta kedalaman seiring bertambahnya tahapan uji (1–10). Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi tahapan pembebanan, semakin besar kerusakan permukaan yang terjadi, baik dari segi lebar maupun kedalaman. Kenaikan ini menandakan bahwa material mengalami penurunan ketahanan terhadap beban dinamis secara progresif.

VI. SIMPULAN

Penambahan *styrofoam* ke dalam komposit kerikil aspal porus menyebabkan peningkatan diameter rata-rata kerusakan sebesar 14,6% dan kedalaman tumbukan sebesar 30%, yang mengindikasikan deformasi permukaan dan penetrasi beban yang lebih besar. Selain itu, retak mulai muncul lebih awal pada variasi dengan *styrofoam*, yaitu pada tahap beban ke-5, dibandingkan dengan variasi tanpa *styrofoam* yang baru menunjukkan retak pada tahap ke-9. Hal ini menandakan bahwa penambahan *styrofoam* cenderung menurunkan ketahanan struktural terhadap tumbukan, meskipun memberikan keuntungan dari sisi pemanfaatan limbah dan pengurangan berat material.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara yang telah menyediakan sarana dan prasarana selama penelitian. Terima kasih juga kepada dosen pembimbing, laboran, dan semua pihak yang telah membantu hingga artikel ini selesai. Semoga kolaborasi yang terjalin ini terus berlanjut dan memberi dampak positif bagi kemajuan akademik di lingkungan kampus.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 544, 1999. *ACI 544.2R-89: Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- Adly, E., 2016. *Styrofoam sebagai Pengganti Aspal Penetrasi 60/70 dengan Kadar 0%, 6,5%, 7,5%, 8,5%, dan 9,5% pada Campuran AC-WC*. Undergraduate thesis. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta.
- ASTM International, 2020. *ASTM D7136/D7136M-20: Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event*. West Conshohocken, PA: ASTM International. https://doi.org/10.1520/D7136_D7136M-20
- Badan Standardisasi Nasional, 2008. *SNI 2417:2008 Cara Uji Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional, 2011a. *SNI 2432:2011 Cara Uji Daktilitas Aspal*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional, 2011b. *SNI 2434:2011 Cara Uji Titik Lembek Aspal dengan Alat Cincin dan Bola (Ring and Ball)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional, 2011c. *SNI 2439:2011 Cara Uji Penyelimutan dan Pengelupasan pada Campuran Agregat-Aspal*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional, 2011d. *SNI 2441:2011 Cara Uji Berat Jenis Aspal Keras*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional, 2011e. *SNI 2456:2011 Cara Uji Penetrasi Aspal*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Li, V.C., 2003. On Engineered Cementitious Composites (ECC): A review of the material and its applications. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), pp.215–230. <https://doi.org/10.3151/jact.1.215>
- Yang, J., Li, L. & Wang, W., 2024. Study on the hydrophobic modification mechanism of stearic acid on the surface of coal gasification fly ash. *Molecules*, 29(17), p.4071. <https://doi.org/10.3390/molecules29174071>