

## Pendahuluan

Perkerasan jalan merupakan infrastruktur yang penting dalam menopang kelancaran transportasi, namun setiap jenis perkerasan baik lentur maupun kaku memiliki keterbatasan teknis, biaya, dan durabilitas. Perkerasan lentur mudah mengalami retak akibat beban berat dan perubahan suhu[1], sedangkan perkerasan kaku memerlukan biaya konstruksi tinggi dan waktu pengerjaan lama. Seiring berkembangnya teknologi konstruksi, diperlukan inovasi material yang mampu meningkatkan performa dan keberlanjutan, salah satunya adalah *Engineered Cementitious Composites* (ECC).

ECC memiliki ketahanan yang baik terhadap abrasi, serangan kimia, dan cuaca ekstrem, membuatnya tahan lama dan ideal untuk digunakan pada struktur yang terpapar lingkungan[2]. Karena sifat ECC sama seperti SCC (*Self Compacting Concrete*) maka dapat digunakan untuk mengisi rongga semi-flexible pavement[3], sehingga ini dapat digunakan sebagai bahan *grouting* dalam pembuatan komposit.

Pemanfaatan bahan limbah seperti *fly ash* dari pembakaran batu bara dan abu cangkang sawit dari industri kelapa sawit sebagai material *cementitious* ECC, menawarkan solusi ramah lingkungan dan ekonomis. Proses pembakaran pada abu cangkang sawit dapat meninggalkan hingga 58,02% silika oksida ( $\text{SiO}_2$ ) dan senyawa lainnya yang juga terkandung pada semen[4]. Abu cangkang sawit (ACS) mengandung silika amorf yang tinggi dan menunjukkan sifat pozzolanik, yang memungkinkan terjadinya reaksi dengan kalsium hidroksida ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H), sebagai komponen utama yang memperkuat struktur mortar [5].

Sementara itu pengamatan SEM menunjukkan partikel *fly ash* berbentuk dominan bulat dengan permukaan relatif halus, yang merupakan karakteristik khas hasil pembakaran batubara dan berpengaruh terhadap reaktivitas pozzolan[6]. *Fly ash* adalah bahan pozzolan, yang mengandung senyawa alumina atau silika. Oleh karena itu, *Fly ash* sangat cocok digunakan sebagai bahan utama dalam campuran semen, ubin, dan berbagai bahan bangunan lainnya[7].

Di sisi lain, ketersediaan aspal murni yang terbatas serta dampak lingkungan dari *styrofoam* mendorong pemanfaatan *styrofoam* sebagai bahan modifikasi aspal. Penambahan *styrofoam* sebesar 5% meningkatkan stabilitas aspal[8]. Sifat *styrofoam* yang merupakan termoplastik, tentu ini dapat digunakan sebagai bahan perekat. Penambahan *styrofoam* pada aspal dapat mempengaruhi karakteristik fisik aspal, seperti penurunan nilai penetrasi dan daktilitas, serta peningkatan titik lembek. Hal ini menunjukkan bahwa dapat berperan sebagai bahan pengikat yang efektif dalam campuran aspal[9].

Untuk memahami karakteristik mikrostruktur komposit mortar ECC-kerikil aspal porus berbasis *styrofoam* dan abu cangkang sawit, salah satu metode karakterisasi yang relevan adalah *Scanning Electron Microscope*(SEM). Pengujian SEM umum digunakan untuk mengamati morfologi permukaan, distribusi partikel, serta pembentukan produk hidrasi seperti gel C-S-H pada material berbasis semen. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa analisis *microstructure* menggunakan SEM-EDX Mapping pada sampel-sampel hasil uji tekan pada mortar ECC menunjukkan bahwa matriks mortar ECC memiliki pori-pori yang lebih rapat dan *microcrack* yang lebih sedikit dibandingkan dengan sampel *crumb rubber* ECC (CR-ECC)[10].

Sehingga komposit mortar ECC sebagai bahan *grouting* untuk kerikil aspal porus berbasis *styrofoam* diharapkan mampu meningkatkan ketahanan struktur perkerasan jalan sekaligus mendukung pengelolaan limbah industri dan rumah tangga secara berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan material ECC dengan memanfaatkan limbah abu cangkang sawit dan *fly ash*, yang jumlahnya sangat melimpah di wilayah Sumatera Utara, serta limbah sampah yang sering digunakan dalam kehidupan sehari-hari yaitu *styrofoam*.

Komposit mortar ECC-kerikil aspal porus berbasis *styrofoam* dan abu cangkang sawit disusun dengan dua komponen yaitu kerikil aspal porus berupa kerikil, aspal pen 60/70 dan *styrofoam* 7.5% (aditif). Sedangkan mortar ECC berupa pasir, semen, *fly ash*, abu cangkang sawit, air, dan *superplastisizer*.

Evaluasi sifat mekanik pada komposit mortar ECC-kerikil aspal porus difokuskan pada uji kuat tekan pada umur 3 hari. Analisis kuat tekan yang dilakukan bersifat makroskopik, yaitu berdasarkan respons material terhadap beban tekan yang diberikan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah komposit mortar ECC-kerikil aspal porus tersebut dengan meninjau struktur internal secara lebih mendalam, dilakukan analisis menggunakan metode SEM (*Scanning Electron Microscope*) sehingga dapat memberikan pemahaman lebih lanjut mengenai kuat tekan yang dihasilkan secara mikro.

## Metode

### A. Material

Komponen penyusun dalam pembuatan komposit mortar ECC- kerikil aspal porus berbasis *styrofoam* dan abu cangkang sawit terdiri dari dua komponen yaitu kerikil aspal yang dicampur dengan *styrofoam* dan mortar ECC berbahan material *cementitious* berupa *fly ash* dan abu cangkang sawit sebagai bahan *grouting*. Material-material yang dibutuhkan dalam membuat kerikil aspal porus berbasis *styrofoam* yaitu kerikil, aspal pen 60/70, dan juga *styrofoam*. Sementara material mortar ECC yang digunakan meliputi semen, air, pasir sungai, abu cangkang sawit (ACS), *fly ash* dan *superplastisizer*. Semen sebagai bahan pengikat utama, air yang berfungsi sebagai media hidrasi untuk reaksi kimia, serta pasir sungai yang berperan sebagai agregat halus. Selain itu, digunakan ACS dan *fly ash* sebagai material *cementitious*. *Superplastisizer* ditambahkan untuk meningkatkan kemampuan alir dan *workability* tanpa perlu menambahkan jumlah air berlebih. Aspal pen 60/70 berfungsi sebagai pengikat pada kerikil. Sedangkan *styrofoam* berfungsi sebagai aditif pada aspal.

#### 1. Aspal Pen 60/70

Aspal yang digunakan adalah aspal pen 60/70. Aspal ini berfungsi sebagai lapis peresap pengikat pada kerikil. Aspal diambil dari PT. Rapi Arjasa. Adapun ketentuan untuk aspal pen 60/70 yang dibutuhkan sesuai spesifikasi umum Bina Marga 2018 [11] yang tertera pada Tabel 1.

**Tabel 1. Ketentuan Aspal Pen 60/70 Sesuai Spesifikasi Bina Marga**

Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Persyaratan
Penetrasi pada 25°C (0,1mm)	SNI 2456:2011	60-70
Titik lembek (°C)	SNI 2434:2011	≥48
Daktalitas pada 25 °C (cm)	SNI 2343:2011	≥100
Titik nyala (°C)	SNI 2433:2011	≥232
Berat Jenis	SNI 2441:2011	≥1,0

#### 2. Styrofoam

*Styrofoam* yang digunakan dalam penelitian ini *styrofoam* bekas yang sudah tidak terpakai yang diambil dari Depo Daur Ulang Yayasan Buddha Tzu Chi Titi Kuning Medan dengan dipotong halus membentuk butiran-butiran kecil dengan ukuran < 0,5 cm agar memudahkan pencampuran terhadap aspal pada saat dilakukan pemanasan.

#### 3. Semen dan Material *Cementitious*

Semen yang digunakan adalah semen *Portland Composite Cement* (PPC) Tipe-A yang diproduksi oleh PT Semen Padang, sedangkan abu cangkang sawit diperoleh dari perkebunan di Kabupaten Serdang Bedagai, Provinsi Sumatera Utara yang dihasilkan dari proses pembakaran. Penelitian ini menggunakan abu cangkang sawit yang memiliki ukuran diameter 0,15 mm (Lolos Ayakan No. 100). *Fly ash* yang digunakan berasal dari hasil pembakaran batu bara di PT. PLTU (Pembangkit Listrik

Tenaga Uap) Pangkalan Susu, Sumatera Utara dengan lolos saringan No. 200 (ukuran 0,075 mm). Kandungan kimia dari semen, *fly ash* dan abu cangkang sawit yang diuji menggunakan *X-Ray Fluorescence (XRF)* disajikan pada Tabel 2.

**Tabel 2. Komposisi Kimia dari Material Cementitious**

Oksida Kimia	Semen (%)	<i>Fly ash</i> (%)	Abu Cangkang Sawit (%)
$S_1O_2$	19.95	41.07	48.9
$Fe_2O_3$	3.70	16.42	16.01
$C_aO$	66.42	15.65	32.00
$SO_3$	2.51	0.97	0.88
$K_2O$	0.81	1.27	24.23
$T_1O_2$	0.23	1.24	0.22
$M_nO$	0.10	0.20	1.99

#### 4. Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan adalah pasir yang lolos ayakan dengan lubang #1.25 mm. Pasir halus diperoleh dari sungai yang berada di sekitar Binjai Provinsi Sumatera Utara.

#### 5. Superplastisizer (SP)

*Superplasticizer* yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari PT. SIKA yang memiliki nama produk yaitu *Viscocrete 3115N*. Karakteristik dari SP dapat dilihat pada Tabel 3.

**Tabel 3. Karakteristik dari Superplasticizer (SP)**

Material	Nama Produk	Warna Cairan	Bahan Dasar Kimia
SP	<i>Viscocrete 3115N</i>	Cairan/Keruh, Kekuningan	<i>Aqueous solution of modified polycarboxylate copolymers</i>

#### B. Mix Design Mortar ECC

Penelitian ini menggunakan *mix design* untuk merancang komposisi mortar yang tepat dan menghasilkan benda uji yang memenuhi standar teknis yang ditentukan. Proporsi mortar ECC ditentukan melalui trial dan error yang dilakukan di Laboratorium Bahan dan Rekayasa Beton Universitas Sumatera Utara dan dengan mengacu pada jurnal dan artikel pencipta yaitu Prof. Victor Li dan dari profile yang dikembangkan oleh peneliti-peneliti lainnya yang sudah di *publish*. Sementara itu, proporsi campuran mortar ECC diambil dari yang menghasilkan kekuatan tekan tertinggi dari masing-masing variasi dengan komposisi mortar ECC ditetapkan berdasarkan berat semen  $350 \text{ kg/m}^3$ , dengan proporsi *fly ash* (FA) dan abu cangkang sawit (ACS) dihitung terhadap berat semen. Faktor air-semen (FAS) ditetapkan sebesar 0,435, sedangkan berat air dihitung sebagai hasil perkalian fas dengan berat semen. Proporsi pasir ditentukan sebesar 90% dari berat semen, sementara *Superplasticizer* (SP)

dihitung berdasarkan persentase terhadap berat semen dan FA. Berikut adalah rincian proporsi campuran mortar ECC optimum pada Tabel 4.

**Tabel 4.** *Mix Design* dari Mortar ECC yang Optimum

No.	Komposisi penyusun Mortar ECC	satuan	Berat per 1 m <sup>3</sup>
1	Semen (padang)	kg	350,00
2	<i>Fly ash</i> (FA)	kg	35,00
3	Abu Cangkang Sawit (ACS)	kg	35,00
4	Air	kg	152,52
5	Agregat Halus	kg	315,00
6	<i>Superplasticizer</i>	kg	11,70
Total berat Mortar ECC Per 1 m <sup>3</sup>			898,95

## 1. Pembuatan Benda Uji Mortar ECC

Pencampuran bahan-bahan mortar ECC dilakukan dalam wadah kering hingga mencapai konsistensi yang diinginkan, yang memakan waktu sekitar 10-12 menit. Proses pencampuran bahan-bahan mortar ECC dilakukan dalam beberapa tahap. Pertama, semua bahan dan material disiapkan. Kemudian, air dan *superplasticizer* (SP) ditambahkan ke dalam wadah pencampur, diikuti dengan penambahan semen dan pasir secara bertahap (setiap 1/3 bagian lalu aduk). Setelah tercampur merata, campuran segar kemudian dimasukkan ke dalam kerucut Abrams untuk mengukur waktu kemampuan aliran (T<sub>500</sub>) dan diameter rata-rata distribusi campuran. Setelah itu, mortar ECC yang telah diukur kemampuan alirannya dimasukkan ke dalam cetakan kubus (15x15x15 cm) untuk pengujian lebih lanjut. Pengujian ini dilakukan dengan tiga sampel untuk masing-masing variasi. Pada *mix proportion* tabel 4 dapat menghasilkan kuat tekan optimum mencapai 37,5 MPa yang mana pengujian tekan ini dilakukan di Laboratorium Struktur Universitas Sumatera Utara dengan menggunakan *Compressive Testing Machine* yang berkapasitas 3000 kN (diproduksi oleh ELE Group).

## C. *Mix Design* Komposit

Setelah melakukan pengujian mortar ECC maka diperoleh nilai kuat tekan paling besar (optimum) umur 3 hari yaitu terjadi pada tabel 4 diatas dengan variasi *Fly ash* 10% dan abu cangkang sawit 10%. Sehingga *mix design* mortar ECC tersebut akan digunakan sebagai *grouting* untuk mengisi rongga-rongga pada komposit.

Komposisi benda uji kubus komposit yang terbentuk dari mortar ECC dengan kerikil aspal porus berbasis *styrofoam* pada penelitian ini maka berat aspal diambil sebesar 0,68 kg dalam satu kubus, untuk kerikil = 1,5 volume kubus x berat kerikil kg/m<sup>3</sup>, berat persentase *Styrofoam* = % variasi x berat aspal. Rincian proporsi campuran kerikil aspal porous terlihat pada Tabel 5.

**Tabel 5. Mix Design dari Kerikil Aspal Porus**

No.	Komposisi Penyusun	Satuan	Total
<b>Aspal 7,5 %</b>			
1.	Aspal	Kg	0,68
2.	Kerikil	Kg	6,075
<b>Aspal 7,5 % + Styrofoam 7,5%</b>			
1.	Aspal	Kg	0,68
2.	Kerikil	Kg	6,075
3.	Styrofoam	Kg	0,051

## 1. Pembuatan Benda Uji Komposit

Proses pembuatan benda uji komposit yang terdiri dari kerikil aspal *porous* dan mortar ECC dapat dilakukan dengan aspal dipanaskan kedalam wajan hingga mencair pada suhu  $150^{\circ}\text{C}$ , kemudian dilakukan penimbangan material seperti *styrofoam* dan aspal sesuai dengan berat benda uji. Setelah itu, bahan tambahan dicampur dan diaduk pada suhu  $150^{\circ}\text{--}200^{\circ}\text{C}$  hingga homogen. Campuran aspal dan bahan tambah seperti *styrofoam* kemudian dicampur dengan kerikil dalam wajan bersuhu  $150^{\circ}\text{C}$  sambil terus diaduk agar kerikil terbalut merata dan tidak mengental. Setelah dingin, kerikil aspal dimasukkan ke dalam bekisting ukuran  $15 \times 15 \times 15$  cm menggunakan capit, lalu dituangkan mortar ECC dan didiamkan di ruang terbuka untuk proses pengeringan selama 3 hari sehingga benda uji sudah mengeras seperti yang terlihat pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Benda Uji Komposit Mortar ECC-Kerikil Aspal Porus

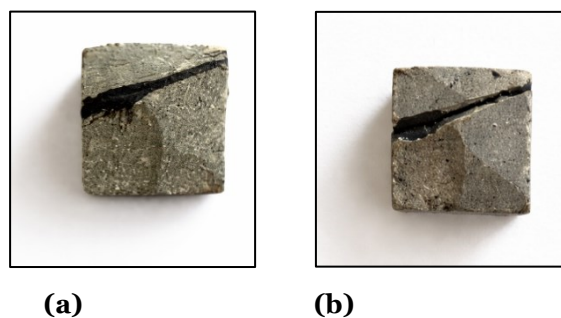
## 2. Prosedur Pengujian

Pengujian kuat tekan komposit mortar ECC-kerikil aspal porous dilakukan di Laboratorium Struktur Universitas Sumatera Utara dengan menggunakan *Compressive Testing Machine* yang berkapasitas 3000 kN (diproduksi oleh ELE Group). Pengujian *microstructure* dilakukan pada komposit mortar ECC-kerikil aspal porous yang murni dan juga berbasis *styrofoam* (7,5%) dengan hasil uji kuat tekan tertinggi pada benda uji umur 3 hari. Pengujian *microstructure* pada penelitian ini dilakukan dari segi *Scanning Electron Microscope* (SEM). Pengujian SEM dilakukan di Laboratorium Penelitian Terpadu Universitas Sumatera Utara dengan merk alat SEM Hitachi TM3000. Alat yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2. Sampel pengujian untuk SEM berbentuk kubus dengan ukuran  $8 \times 8 \times 8$  mm seperti

yang ditunjukkan pada Gambar 3. Sampel pengujian SEM dipotong dari komposit mortar ECC-kerikil aspal porus yang telah dilakukan pengujian kuat tekan terlebih dahulu.



Gambar 2. Alat Uji SEM pada Lab. Penelitian Terpadu USU



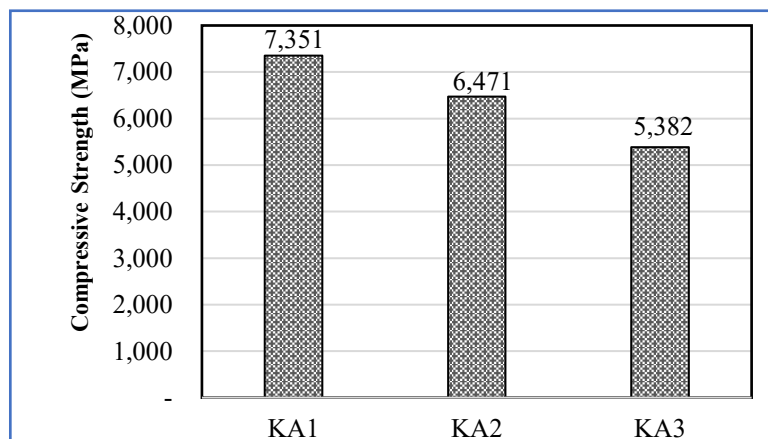
Gambar 3. Sampel Uji SEM: (a) komposit mortar ECC-kerikil aspal porus murni, (b) komposit mortar ECC-kerikil aspal porus berbasis *styrofoam*

## Hasil dan Pembahasan

### A. Hasil Pengujian Kuat Tekan

#### 1. Hasil Kuat Tekan Komposit Mortar ECC-Kerikil Aspal Porus

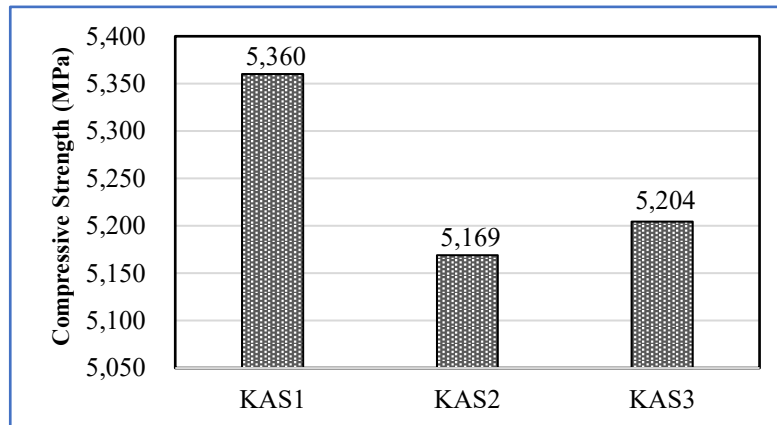
Hasil dari pengujian kuat tekan rata – rata komposit mortar ECC- kerikil aspal porus ditunjukkan pada Gambar 4. Berdasarkan hasil uji tekan pada umur 3 hari untuk tiga jenis variasi komposit mortar ECC-kerikil aspal porus (yaitu KA1, KA2 dan KA3), diperoleh kuat tekan rata-rata berkisar 5.382 – 7.351 MPa. Nilai kuat tekan tertinggi adalah 7.351 MPa, yang diperoleh dari komposisi KA1.



Gambar 4. Hasil Uji Tekan Komposit Mortar ECC-Kerikil Aspal Porus

## 2. Hasil Kuat Tekan Komposit Mortar ECC-Kerikil Aspal Porus Berbasis *Styrofoam*

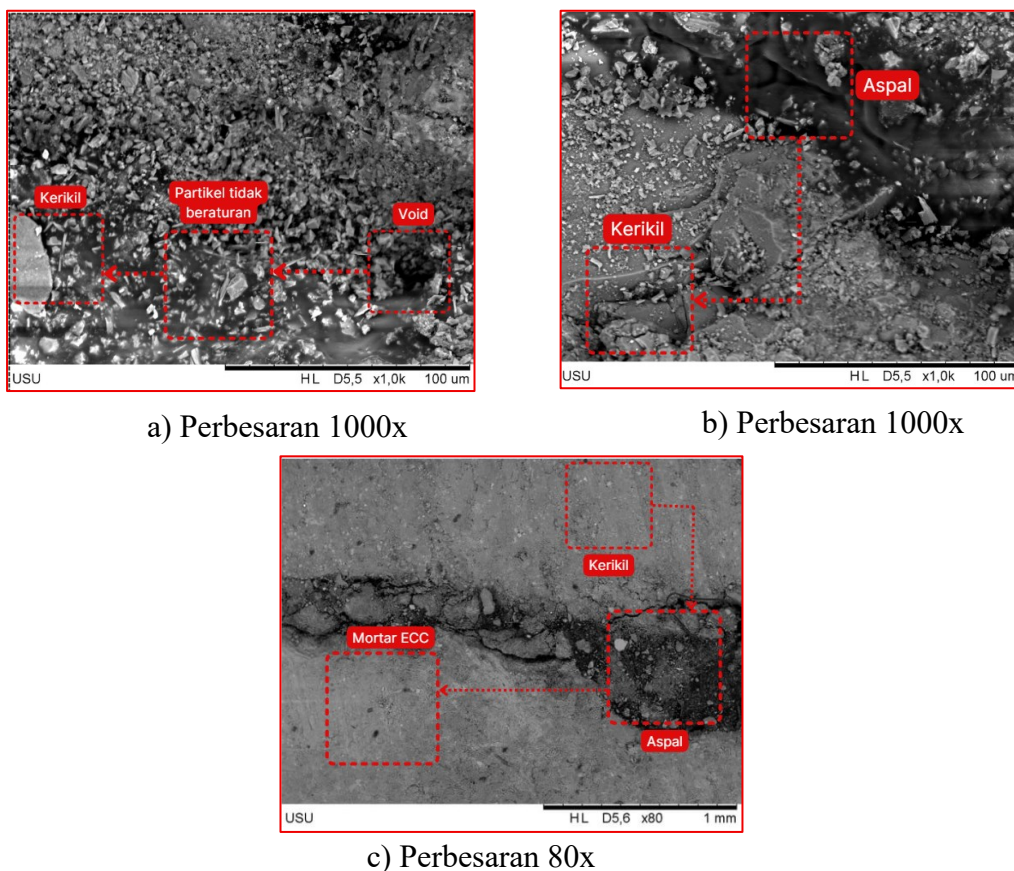
Hasil dari pengujian kuat tekan rata – rata komposit mortar ECC- kerikil aspal porus berbasis *styrofoam* ditunjukkan pada Gambar 5. Berdasarkan hasil uji tekan pada umur 3 hari untuk tiga jenis variasi komposit mortar ECC-kerikil aspal porus berbasis *styrofoam* (yaitu KAS1, KAS2 dan KAS3), diperoleh kuat tekan rata-rata berkisar 5.169 - 5.360 MPa. Nilai kuat tekan tertinggi adalah 5.360 MPa, yang diperoleh dari komposisi KAS1.



Gambar 5. Hasil Kuat Tekan Komposit Mortar ECC-Kerikil Aspal Porus Berbasis *Styrofoam*

## 3. Hasil Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*)

### a. Hasil Pengujian SEM Komposit Mortar ECC-Kerikil Aspal Porus



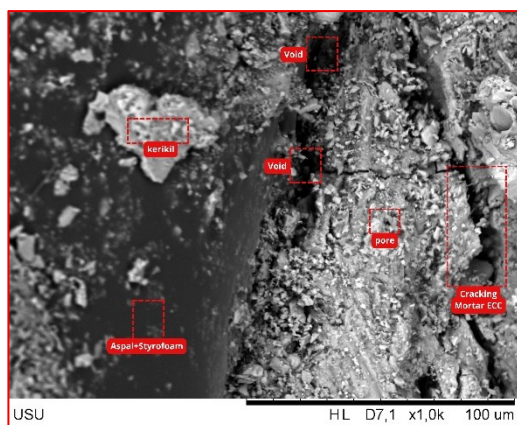
Gambar 6. Hasil SEM Komposit Mortar ECC-Kerikil Aspal Porus

Pada gambar (a), secara morfologi terlihat beberapa zona dengan karakteristik berbeda yang menunjukkan sistem komposit multiphase. Area bertekstur kasar dan bentuk partikel tidak beraturan merepresentasikan agregat kerikil. Di sekitarnya tampak partikel granular halus yang merupakan matriks mortar ECC hasil *grouting*. Selain itu, terlihat beberapa void atau rongga terbuka yang mengindikasikan adanya udara terperangkap selama proses pencampuran maupun proses *grouting* mortar. Void tersebut berpotensi menjadi titik konsentrasi tegangan ketika material mengalami pembebanan tekan. Permukaan mortar tampak relatif heterogen dengan tekstur granular yang mengindikasikan terbentuknya produk hidrasi semen yang berperan sebagai pengikat antar partikel, yang mana heterogenitas mikrostruktur semen-hidrat sangat menentukan kekuatan tekan serta ketahanan retak[12].

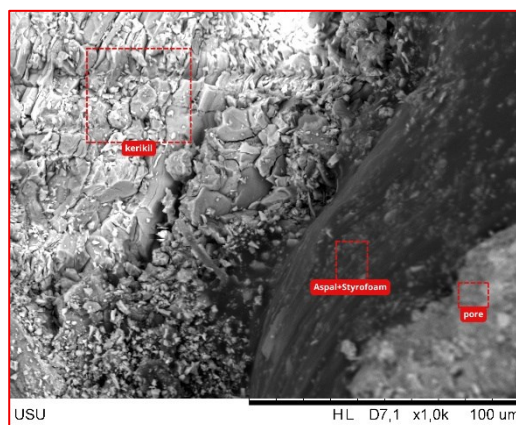
Pada gambar (b), dengan pembesaran yang sama, terlihat interaksi antara agregat kerikil dan lapisan aspal yang melapisi sebagian permukaan agregat. Lapisan aspal tampak lebih halus dan relatif homogen dibandingkan matriks mortar ECC, namun distribusinya tidak sepenuhnya merata. Hal ini menunjukkan bahwa proses pelapisan aspal pada agregat masih terbatas sehingga sebagian permukaan agregat tetap terekspos. Zona antarmuka antara aspal dan mortar ECC tampak cukup kontras akibat perbedaan sifat fisik material bitumen dan matriks semen. Perbedaan sifat fisik dan kimia antara bitumen dan material berbasis semen dapat menghasilkan zona antarmuka yang rentan terhadap debonding, terutama saat mengalami beban tekan atau siklus termal[13]. Kondisi ini dapat mempengaruhi kualitas adhesi antarmuka serta berpotensi menjadi lokasi awal terbentuknya retakan mikro setelah uji tekan.

Pada gambar (c), dengan pembesaran lebih rendah, terlihat distribusi fase secara lebih luas antara mortar ECC, agregat kerikil, dan lapisan aspal. Mortar ECC tampak sebagai matriks kontinu dengan tekstur granular halus, sedangkan agregat kerikil terlihat lebih kasar dan berukuran lebih besar. Lapisan aspal tampak sebagai zona lebih gelap yang menyelimuti sebagian agregat dan mengisi celah antar partikel. Namun demikian, terlihat adanya void dan celah mikro di beberapa bagian zona transisi. Hal ini mengindikasikan bahwa proses densifikasi mikrostruktur belum optimal, kemungkinan akibat evaporasi air selama hidrasi mortar atau adhesi yang kurang sempurna antara aspal dan matriks semen. Zona interfacial transition zone (ITZ) antara agregat berlapis aspal dan mortar ECC tampak sebagai batas morfologi yang cukup jelas. Pada beberapa area terlihat adanya celah mikro yang menunjukkan ikatan antarmuka belum sepenuhnya kompak. Kondisi ini dapat menjadi jalur propagasi retakan ketika material menerima beban tekan. Keberadaan produk hidrasi semen pada mortar ECC berperan dalam memperkuat mikrostruktur, namun distribusi pori yang masih terlihat menunjukkan bahwa kualitas *grouting* sangat mempengaruhi integritas mekanik komposit dan distribusi pori yang tidak seragam mempercepat propagasi retakan karena terjadi perbedaan stiffness antar fase[14].

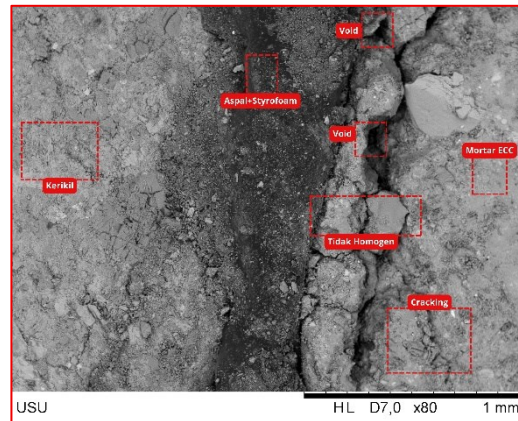
## b. Hasil Pengujian SEM Komposit Mortar ECC-Kerikil Aspal Porus Berbasis *Styrofoam*



a) Perbesaran 1000x



b) Perbesaran 1000x



c) Perbesaran 80x

**Gambar 7.** Hasil SEM Komposit Mortar ECC-Kerikil Aspal Porus Berbasis *Styrofoam*

Pada gambar (a), pembesaran 1000x menunjukkan distribusi mikrostruktur yang lebih detail. Zona kerikil tampak kasar dan tidak beraturan, sementara bagian aspal-*styrofoam* terlihat lebih halus dan gelap sebagai fase binder. Di sisi lain, mortar ECC menunjukkan struktur granular dengan adanya pore, void, dan microcracking. Retakan pada mortar ECC kemungkinan merupakan efek dari pembebanan tekan, di mana tegangan terkonsentrasi pada daerah berpori atau zona transisi. Pori-pori yang tampak dapat berasal dari evaporasi air bebas saat pengerasan mortar atau dari proses *grouting* yang kurang sempurna. Kondisi ini dapat mempengaruhi kuat tekan karena porositas tinggi biasanya berkorelasi dengan penurunan kepadatan mikrostruktur. Peningkatan porositas 1% dapat menurunkan kuat tekan hingga 3–5% pada mortar berbasis semen[15].

Pada gambar (b), terlihat interaksi lebih dekat antara kerikil, lapisan aspal-*styrofoam*, dan mortar ECC. Lapisan aspal-*styrofoam* tampak menyelimuti sebagian agregat dengan tekstur relatif halus, menunjukkan fungsinya sebagai binder tambahan sekaligus pengisi rongga permukaan agregat. Sementara itu, mortar ECC tampak lebih kasar dengan butiran hidrasi yang membentuk jaringan padat di sekitar agregat. Meski demikian, masih terlihat pore mikro yang menunjukkan adanya ruang kosong tersisa. Zona transisi antara aspal-*styrofoam* dan mortar ECC terlihat cukup menyatu, namun keberadaan pori dan potensi retakan mikro menunjukkan bahwa ikatan antarmuka belum sepenuhnya homogen, kemungkinan akibat kombinasi material polimer (*styrofoam*-aspal) dengan matriks semen serta efek pembebanan tekan sebelumnya.

Pada gambar (c), secara morfologi terlihat tiga zona utama dengan karakteristik berbeda, yaitu area kasar bertekstur menonjol sebagai bagian kerikil, lapisan lebih gelap dan relatif homogen yang menunjukkan campuran aspal-*styrofoam*, serta bagian yang lebih granular dan berpori yang merepresentasikan mortar ECC. Zona mortar ECC tampak memiliki tekstur heterogen dengan butiran halus dan pori mikro yang mengindikasikan produk hidrasi semen yang mengisi celah antar partikel. Struktur ini menunjukkan proses pengikatan antara agregat dan pasta mortar, meskipun masih terlihat beberapa void dan ketidakhomogenan akibat proses *grouting* dan kemungkinan udara terperangkap saat pencampuran. Pada area transisi antara kerikil berlapis aspal-*styrofoam* dan mortar ECC terlihat. Pada gambar (c), secara morfologi terlihat tiga zona utama dengan karakteristik berbeda, yaitu area kasar bertekstur menonjol sebagai bagian kerikil, lapisan lebih gelap dan relatif homogen yang menunjukkan campuran aspal-*styrofoam*, serta bagian yang lebih granular dan berpori yang merepresentasikan mortar ECC. Zona mortar ECC tampak memiliki tekstur heterogen dengan butiran halus dan pori mikro yang mengindikasikan produk hidrasi semen yang mengisi celah antar partikel. Kepadatan jaringan C–S–H menentukan kekuatan dan ketahanan retak ECC. Ketidaksempurnaan *grouting* dan udara terperangkap meningkatkan pori kapiler[16]. Struktur ini menunjukkan proses pengikatan antara agregat dan pasta mortar, meskipun masih terlihat beberapa void dan ketidakhomogenan akibat proses *grouting* dan kemungkinan udara terperangkap saat pencampuran.

Pada area transisi antara kerikil berlapis aspal-*styrofoam* dan mortar ECC terlihat Interfacial Transition Zone (ITZ) yang cukup jelas. Lapisan aspal-*styrofoam* tampak menempel pada permukaan agregat, menandakan adanya penetrasi binder ke pori permukaan kerikil. Namun keberadaan rongga dan retakan mikro menunjukkan bahwa setelah uji tekan terjadi redistribusi tegangan yang memicu deformasi lokal pada antarmuka tersebut yang cukup jelas. Lapisan aspal-*styrofoam* tampak menempel pada permukaan agregat, menandakan adanya penetrasi binder ke pori permukaan kerikil.

## Simpulan

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan dan analisis mikrostruktur melalui SEM, dapat disimpulkan bahwa karakteristik mikrostruktur komposit sangat berpengaruh terhadap kekuatan mekanik material. Komposit mortar ECC-kerikil aspal porus tanpa penambahan *styrofoam* (7.351 MPa) menunjukkan kuat tekan lebih tinggi dibandingkan komposit berbasis *styrofoam* (5.360 MPa), yang mengindikasikan bahwa keberadaan material polimer ringan cenderung meningkatkan porositas dan menurunkan densitas struktur. Hasil pengamatan SEM memperlihatkan bahwa pada komposit tanpa *styrofoam* matriks mortar ECC relatif lebih padat, meskipun masih ditemukan void dan celah mikro pada zona transisi agregat-mortar yang berpotensi menjadi titik awal retakan saat pembebanan. Sementara itu, pada komposit berbasis *styrofoam* terlihat mikrostruktur yang lebih heterogen dengan pori, void, dan microcracking yang lebih dominan, sehingga kualitas ikatan antarmuka menjadi kurang optimal. Kondisi tersebut selaras dengan penurunan nilai kuat tekan yang diperoleh. Dengan demikian, semakin padat dan homogen mikrostruktur serta semakin baik kualitas zona transisi antar fase, maka kemampuan komposit dalam menahan beban tekan cenderung meningkat, sedangkan peningkatan porositas dan ketidakhomogenan struktur dapat menurunkan kinerja mekanik komposit mortar ECC-kerikil aspal porus.

## References

- [1] R. Note, "Evaluasi Tebal Perkerasan Lentur Dengan Metode Analisa Komponen Dari Bina Marga 1987 Dan Metode Aashto 1993 Menggunakan Program Kenpave (Studi Kasus: Jalan Karangmojo-Semin Sta 0 + 000 sampai Sta 4 + 050) Karakteristik Lapis Permukaan Jalan," vol. 20, no. 1, hal. 8–19, 2017. <https://doi.org/10.18196/st.v20i1.2723>
- [2] H. Liu, Q. Zhang, V. Li, H. Su, dan C. Gu, "Durability Study on Engineered Cementitious Composites (ECC) Under Sulfate and Chloride Environment," *Construction and Building Materials*, vol. 133, hal. 171–181, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.029>
- [3] X. Cai, W. Huang, dan K. Wu, "Study of the Self-Healing Performance of Semi-Flexible Pavement Materials Grouted With Engineered Cementitious Composites Mortar Based on a Non-Standard Test," *Materials*, vol. 12, no. 21, hal. 3488, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12213488>
- [4] A. Darmawan, D. Anggraini, dan G. Gunawan, "Pengaruh Substitusi Semen oleh Silika Abu Sekam Padi terhadap Kuat Tekan dan Suhu Reaksi Semen Portland," *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, vol. 11, no. 1, hal. 15–19, 2008. <https://doi.org/10.14710/jksa.11.1.15-19>
- [5] W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, dan P. Chindapasirt, "Use of Palm Oil Fuel Ash as a Supplementary Cementitious Material for Producing High-Strength Concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 7, hal. 2641–2646, 2009. <https://doi.org/10.3390/ma12213488>
- [6] F. I. Harahap, M. Aswin, dan A. P. M. Tarigan, "Evaluasi Kuat Tekan pada Bata ECC dan Bata-CR ECC Berbasis Silica Fume dan Abu Sekam Padi," *Siklus Jurnal Teknik Sipil*, vol. 8, no. 2, hal. 248–260, 2022. <https://doi.org/10.31849/siklus.v8i2.10993>
- [7] T. Azizah, A. S. Wahyuni, M. Islam, A. Gunawan, dan Y. Afrizal, "Pengaruh Penggunaan Abu Terbang (Fly Ash) sebagai Bahan Tambah terhadap Kuat Tekan Mortar," *Inersia Jurnal Teknik Sipil*, vol. 14, no. 1, hal. 28–34, 2022. <https://doi.org/10.33369/ijts.14.1.28-34>
- [8] D. A. Barus dan A. L. Sinaga, "The Effect of Addition of Used Styrofoam on the Characteristics of Asphalt Physical Properties," vol. 2, no. 2, hal. 123–128, 2020. <https://doi.org/10.32734/jotpv2i2.5404>
- [9] R. S. Wibowo, "Effect of Compaction Temperature Variations on the Characteristics of Marshall Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) Using Modified Asphalt," hal. 176–191, 2023. <https://doi.org/10.32832/astonjadro.v12i1.8277>
- [10] E. S. M. Simbolon, M. Aswin, dan B. Syam, "Tinjauan Kuat Tekan dan Microstructure pada Mortar ECC (Engineered Cementitious Composites) dan CR (Crumb Rubber)-ECC," *Ranah Research*:

- Journal of Multidisciplinary Research and Development, vol. 7, no. 4, hal. 2291–2301, 2025. <https://doi.org/10.38035/rrj.v7i4.1547>
- [11] L. G. Bitu dan A. Ainun, “Studi Karakteristik Aspal Porous dengan Aspal Penetrasi 60/70 sebagai Bahan Pengikat,” *Jurnal MEDIA Inovasi Teknik Sipil Unidayan*, vol. 6, no. 1, hal. 38–48, 2017. <https://doi.org/10.55340/jmi.v6i1.586>
- [12] J. W. Bullard et al., “Mechanisms of Cement Hydration,” *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 12, hal. 1208–1223, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.08.010>
- [13] A. I. Al-Hadidy dan Y. Tan, “Evaluation of Pyrolysis LDPE Modified Asphalt Paving Materials,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 21, no. 10, hal. 618–623, 2009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:10\(618\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:10(618))
- [14] A. Adesina dan S. Das, “Performance of Engineered Cementitious Composites Incorporating Crumb Rubber as Aggregate,” *Construction and Building Materials*, vol. 274, hal. 122033, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122033>
- [15] S. Jin, J. Zhou, X. Zhao, dan L. Sun, “Quantitative Relationship Between Pore Size Distribution and Compressive Strength of Cementitious Materials,” *Construction and Building Materials*, vol. 273, hal. 121727, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121727>
- [16] M. Bai, J. Xiao, Y. Gao, dan T. Ding, “Pore Structure Characteristics and Mechanical Property of Engineered Cementitious Composites (ECC) Incorporating Recycled Sand,” *Construction and Building Materials*, vol. 408, hal. 133721, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133721>

---

# Academia Open



*By Universitas Muhammadiyah Sidoarjo*

---

# Academia Open

Vol. 11 No. 1 (2026): June  
DOI: 10.21070/acopen.11.2026.13968

## Table Of Contents

<b>Journal Cover</b> .....	1
<b>Author[s] Statement</b> .....	3
<b>Editorial Team</b> .....	4
<b>Article information</b> .....	5
Check this article update (crossmark) .....	5
Check this article impact .....	5
Cite this article.....	5
<b>Title page</b> .....	6
Article Title .....	6
Author information .....	6
Abstract .....	6
<b>Article content</b> .....	7

## Originality Statement

The author[s] declare that this article is their own work and to the best of their knowledge it contains no materials previously published or written by another person, or substantial proportions of material which have been accepted for the published of any other published materials, except where due acknowledgement is made in the article. Any contribution made to the research by others, with whom author[s] have work, is explicitly acknowledged in the article.

## Conflict of Interest Statement

The author[s] declare that this article was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

## Copyright Statement

Copyright © Author(s). This article is published under the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) licence. Anyone may reproduce, distribute, translate and create derivative works of this article (for both commercial and non-commercial purposes), subject to full attribution to the original publication and authors. The full terms of this licence may be seen at <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>

# Academia Open

Vol. 11 No. 1 (2026): June  
DOI: 10.21070/acopen.11.2026.13968

## EDITORIAL TEAM

### Editor in Chief

Mochammad Tanzil Multazam, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

### Managing Editor

Bobur Sobirov, Samarkand Institute of Economics and Service, Uzbekistan

### Editors

Fika Megawati, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Mahardika Darmawan Kusuma Wardana, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Wiwit Wahyu Wijayanti, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Farkhod Abdurakhmonov, Silk Road International Tourism University, Uzbekistan

Dr. Hindarto, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Evi Rinata, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

M Faisal Amir, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Dr. Hana Catur Wahyuni, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Complete list of editorial team ([link](#))

Complete list of indexing services for this journal ([link](#))

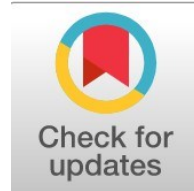
How to submit to this journal ([link](#))

# Academia Open

Vol. 11 No. 1 (2026): June  
DOI: 10.21070/acopen.11.2026.13968

## Article information

**Check this article update (crossmark)**



**Check this article impact (\*)**



**Save this article to Mendeley**



(\*) Time for indexing process is various, depends on indexing database platform

**SEM Evaluation of ECC-Porous Asphalt Gravel Mortar Composites Based on Styrofoam and Palm Shell Ash Based on Compressive Strength Tests: Evaluasi SEM terhadap Komposit Mortar ECC-Kerikil Aspal Porus Berbasis Styrofoam dan Abu Cangkang Sawit Berdasarkan Uji Tekan**

**Lusi Rahmawati, lusirahmawati@students.usu.ac.id (\*)**

*Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara, Indonesia*

**Muhammad Aswin , muhammad.aswin@usu.ac.id**

*Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara, Indonesia*

**Nursyamsi Nursyamsi, nursyamsi@usu.ac.id**

*Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara, Indonesia*

(\*) Corresponding author

**Abstract**

**General Background:** Road pavement development requires materials with reliable mechanical performance and greater sustainability to address limitations in flexible and rigid pavement systems. **Specific Background:** Engineered Cementitious Composites combined with porous asphalt gravel, fly ash, palm shell ash, and styrofoam waste were investigated as alternative pavement composite materials. **Knowledge Gap:** The internal microstructural explanation of compressive strength behavior in ECC mortar–porous asphalt gravel composites with styrofoam and palm shell ash remains limited. **Aims:** This study aimed to evaluate compressive strength behavior and SEM-based microstructural characteristics of ECC mortar–porous asphalt gravel composites. **Results:** Compressive testing at three days showed that the composite without styrofoam reached the highest compressive strength of 7.351 MPa, while the styrofoam-based composite reached a maximum of 5.360 MPa. SEM observations showed that the non-styrofoam composite had a relatively denser ECC mortar matrix with fewer pores and micro-gaps. In contrast, the styrofoam-based composite showed a more heterogeneous microstructure dominated by pores, voids, and microcracking, particularly in the aggregate–mortar interface transition zone. **Novelty:** This study links SEM microstructural evidence with compressive strength behavior in ECC mortar–porous asphalt gravel composites using fly ash and palm shell ash. **Implications:** The findings indicate that fly ash and palm shell ash can support sustainable pavement material development, while polymer waste addition must be controlled to prevent excessive mechanical performance loss.

**Highlights:**

- Non modified specimens reached 7.351 MPa after three days.
- Polymer additive specimens reached a maximum of 5.360 MPa.
- Interface voids and microcracks explained weaker mechanical behavior.

**Keywords:** Palm Kernel Shell Ash, ECC, Porous Asphalt, Polystyrene, Compressive Strength, SEM

Published date: 2026-06-29