Evaluasi SEM pada Komposit Mortar ECC–Kerikil Aspal–*Styrofoam–Crumb Rubber* Berbasis Abu Cangkang Sawit

Adellia Fitri[1], Muhammad Aswin[2]
Departemen Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara
Jl. Perpustakaan No.5, Kampus USU, Padang Bulan, 20155
[2]E-mail: muhammad.aswin@usu.ac.id

Abstrak — Road infrastructure development requires pavement materials that are not only strong but also environmentally friendly. The high use of cement in construction contributes to increased CO_2 emissions, while industrial waste such as fly ash, styrofoam, crumb rubber, and palm shell ash remains an environmental issue. Therefore, this study investigates the potential utilization of these waste materials in the production of Engineered Cementitious Composite (ECC) mortar based on porous asphalt aggregate. The main objective is to evaluate the microstructure and interactions between materials using Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis after compressive strength testing. The research method includes preparing cube specimens of ECC mortar incorporating asphalt aggregate, styrofoam, and crumb rubber, followed by compressive strength testing at 3 days of curing. The tested samples were then cut and analyzed for their microstructure using SEM. The results show that ECC mortar with porous asphalt aggregate achieved an average compressive strength of 6.401 MPa, which is higher than the mixture containing styrofoam–crumb rubber, with an average of 4.447 MPa. SEM analysis revealed the presence of voids, microcracks, and interfacial transition zones between the paste and aggregates. The addition of styrofoam resulted in larger voids and weaker paste–aggregate bonding, while crumb rubber tended to be unevenly distributed and deformed under compressive loading. The study concludes that the incorporation of styrofoam and crumb rubber in ECC mortar reduces compressive strength and produces a more fragile microstructure compared to porous asphalt aggregate. These findings suggest that although the use of waste materials offers sustainability benefits, a more appropriate material design approach is required to achieve a balance between mechanical performance and environmental considerations.
Keywords: SEM; ECC; asphalt aggregate with styrofoam–crumb rubber; microstructure; palm shell ash.

Abstrak — Pembangunan infrastruktur jalan menuntut material perkerasan yang tidak hanya kuat tetapi juga ramah lingkungan. Tingginya penggunaan semen dalam konstruksi berdampak pada meningkatnya emisi CO_2, sementara limbah industri seperti fly ash, styrofoam, crumb rubber, dan abu cangkang sawit masih menjadi permasalahan lingkungan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji potensi pemanfaatan material limbah tersebut dalam pembuatan komposit mortar Engineered Cementitious Composite (ECC) berbasis kerikil aspal porous. Tujuan utama penelitian adalah mengevaluasi mikrostruktur dan interaksi antar material melalui analisis Scanning Electron Microscopy (SEM) setelah uji kuat tekan. Metode penelitian meliputi pembuatan benda uji kubus ECC dengan campuran kerikil aspal, styrofoam, dan crumb rubber, yang kemudian diuji kuat tekan pada umur 3 hari. Sampel yang telah diuji selanjutnya dipotong dan dianalisis mikrostrukturnya menggunakan SEM. Hasil uji menunjukkan bahwa mortar ECC dengan kerikil aspal porous memiliki kuat tekan rata-rata 6,401 MPa, lebih tinggi dibandingkan campuran dengan styrofoam-crumb rubber yang rata-rata hanya 4,447 MPa. Analisis SEM memperlihatkan adanya celah, retakan mikro, serta zona transisi antara pasta dan agregat. Penambahan styrofoam menyebabkan rongga besar dan ikatan pasta-agregat yang kurang kuat, sementara crumb rubber cenderung menyebar tidak merata dan mengalami deformasi akibat beban tekan. Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa penggunaan limbah styrofoam dan crumb rubber pada mortar ECC menurunkan kekuatan tekan serta menimbulkan mikrostruktur yang lebih rapuh dibandingkan kerikil aspal porous. Implikasi penelitian ini menegaskan bahwa meskipun pemanfaatan limbah dapat menjadi solusi keberlanjutan, diperlukan pendekatan desain material yang lebih tepat agar kinerja mekanis dan aspek ramah lingkungan dapat tercapai secara seimbang..
Kata kunci: SEM; ECC; kerikil aspal styrofoam-crumb rubber; mikrostruktur; abu cangkang sawit.

I. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur jalan memegang peranan penting dalam mendukung mobilitas dan konektivitas antar wilayah. Salah satu aspek krusial dalam konstruksi jalan adalah pemilihan jenis perkerasan, yang terdiri dari perkerasan lentur, perkerasan kaku, dan perkerasan komposit. Perkerasan komposit dianggap unggul karena menggabungkan kelebihan dari perkerasan lentur dan kaku (Sukirman, 1999, 2010; Tenriajeng, 2002; Abdulsahib, Hilal, & Fattah, 2023). Namun, tantangan muncul seiring meningkatnya kebutuhan beton berkualitas tinggi dalam konstruksi, khususnya terkait ketahanan beton terhadap retak dan dampak lingkungan akibat tingginya penggunaan semen. Di Indonesia, konsumsi semen diperkirakan mencapai 62 juta metrik ton, meskipun mengalami penurunan sebesar 3,13%. Penggunaan semen yang berlebihan berdampak negatif terhadap lingkungan karena meningkatkan emisi CO_2 sebagai polutan rumah kaca (Li, 2007). Permasalahan lain yang tidak kalah penting adalah tingginya volume sampah akibat gaya hidup konsumtif di perkotaan. Limbah industri seperti *fly ash*, *crumb rubber*, *styrofoam*, serta abu cangkang sawit tergolong sulit terurai sehingga berpotensi mencemari lingkungan. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah sebagai bahan tambah konstruksi merupakan langkah strategis untuk mendukung pembangunan berkelanjutan. *Engineered Cementitious Composite* (ECC) menjadi salah satu inovasi penting dalam menjawab tantangan tersebut. Material ini pertama kali diperkenalkan oleh Victor Li pada tahun 1989, dengan karakteristik utama berupa kuat tarik dan daktilitas yang tinggi melalui pendekatan desain berbasis prinsip fraktur dan mikromekanika (Frisda, Aswin, Perwira, & Tarigan, 2022; Li, 2007; Wang & Li, 2007). ECC disusun dari campuran semen, air, pasir halus, fiber, dan material cementitious, tanpa menggunakan agregat kasar yang dapat mengurangi daktilitas (Hasudungan & Aswin, 2022). Dibandingkan beton biasa, ECC menawarkan ketahanan retak dan performa mekanis yang lebih baik (Ma, Yi, & Wu, 2021; Wang & Li, 2007; Zhang, Jaworska, Zhu, Dahlquist, & Li, 2020). Secara khusus, penelitian ini menyoroti penggunaan kerikil aspal *porous* yang dimodifikasi dengan *styrofoam* dan *crumb rubber* serta dikombinasikan dengan *fly ash* dan abu cangkang sawit sebagai material cementitious. Permasalahan khusus yang dikaji adalah bagaimana kombinasi limbah tersebut memengaruhi ikatan antar material, morfologi, serta ketahanan tekan mortar ECC. Urgensi penelitian ini terletak pada upaya mengurangi dampak lingkungan melalui pemanfaatan limbah sekaligus meningkatkan kinerja mekanis material konstruksi. Novelty penelitian ini adalah integrasi limbah *styrofoam* dan *crumb rubber* ke dalam ECC berbasis kerikil aspal *porous*, dengan evaluasi mikrostruktur menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Metode SEM dipilih karena memiliki resolusi tinggi dibanding mikroskop optik sehingga mampu memberikan informasi detail mengenai porositas, retakan, dan zona transisi pada mikrostruktur mortar (Sujatno, Salam, & Dimyati, 2015; Sari, 2018; Aziz, Rozli, Ghani, Jafri, & Zakaria, 2023; Chyliński, 2024). Dengan demikian, tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh material limbah terhadap struktur mikro, interaksi pasta-agregat, serta karakteristik mekanis komposit mortar ECC kerikil aspal *styrofoam–crumb rubber* berbasis abu cangkang sawit melalui pengujian kuat tekan dan SEM. Alat uji SEM yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.

Gambar 1 Alat uji SEM

II. METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Unit Pelaksana Teknis, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara. Tahapan penelitian meliputi persiapan material, pembuatan benda uji, pengujian kuat tekan, serta analisis mikrostruktur menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Material yang digunakan terdiri dari berbagai komponen utama dan bahan tambah. Semen yang dipakai adalah *Portland Composite Cement* (PPC) tipe A produk PT Semen Padang dengan berat kemasan 40 kg. Air yang digunakan

harus jernih dan bebas dari kotoran atau residu sesuai SNI 03-6861.1-2002. Untuk meningkatkan workability campuran, digunakan *superplasticizer* tipe *SIKA Viscocrete 3115N* yang diproduksi oleh PT SIKA Indonesia. Pasir berasal dari Jalan Megawati, Binjai, Sumatera Utara, dan telah lolos saringan No. 16 (1,25 mm). *Fly ash* diperoleh dari hasil pembakaran batu bara di PT. PLTU Pangkalan Susu, Sumatera Utara, dan telah lolos saringan No. 200 (0,075 mm). Abu cangkang sawit berasal dari pabrik kelapa sawit di Desa Tinjowan, Kabupaten Serdang Bedagai, yang telah diayak menggunakan saringan No. 100 (0,15 mm). Selain itu, digunakan kerikil berukuran maksimum 40–50 mm dari PT. SWL Deli Serdang, serta aspal padat penetrasi 60/70 dari PT. RAPI ARJASA, Sunggal, Sumatera Utara. *Styrofoam* yang digunakan berupa limbah bekas berbentuk bulir yang diperoleh dari Depo Pelestarian Lingkungan Buddha Tzu Chi, Medan. Sementara itu, *crumb rubber* didapat melalui pembelian daring dan digunakan sebagai pengganti agregat halus untuk mengurangi pencemaran limbah ban bekas. Seluruh material yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2. Proses pembuatan benda uji dilakukan dengan membentuk kubus berukuran 15×15×15 cm untuk pengujian kuat tekan. Kerikil berukuran 40–50 mm terlebih dahulu dilapisi aspal panas yang telah dicampur *styrofoam* dan *crumb rubber* hingga seluruh permukaan kerikil terselimuti secara merata. Agregat beraspal tersebut kemudian dimasukkan ke dalam cetakan tanpa pemadatan (*compacting*) agar sifat *porous* tetap terjaga. Setelah itu, mortar ECC dituangkan ke dalam cetakan sebagai material *grouting* untuk mengisi rongga antar kerikil. Alur lengkap pembuatan benda uji dapat dilihat pada Gambar 3. Setelah benda uji berumur 3 hari, dilakukan pengujian kuat tekan. Benda uji yang telah diuji selanjutnya dipotong menjadi kubus berukuran 8×8×8 cm untuk kebutuhan analisis mikrostruktur. Proses pemotongan benda uji ditunjukkan pada Gambar 4.

Semen Air *Superplasticizer*

Pasir *Fly ash* Abu Cangkang sawit
Kerikil Aspal *Styrofoam*
Crumb rubber

Gambar 2. Material yang digunakan

Penimbangan aspal
Penimbangan *Styrofoam*
Pencampuran *Styrofoam* dengan aspal
Pemasukan kerikil yang terlumuri aspal campuran ke dalam bekisting
Pendinginan kerikil yang terlumuri aspal campuran
Mencampurkan kerikil ke dalam aspal *Styrofoam* & *Crumb rubber*
Penuangan Mortar ECC ke dalam bekisting berisi kerikil aspal campuran

Gambar 3 Proses pembuatan benda uji

Benda uji Mortar ECC + kerikil aspal *porous*
Benda uji Mortar ECC + kerikil aspal campuran
Pemotongan benda uji

Hasil pemotongan benda uji 8x8xx cm

Pemotongan benda uji 8x8x8 cm

Hasil pemotongan setengah benda uji

Gambar 4 Proses pemotongan benda uji

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian kuat tekan pada mortar ECC berbasis kerikil aspal *porous* menghasilkan variasi nilai dari tiga sampel uji. Hasilnya menunjukkan bahwa sampel pertama memiliki kuat tekan tertinggi sebesar 7,351 MPa, diikuti oleh sampel kedua sebesar 6,471 MPa, dan sampel ketiga sebesar 5,382 MPa. Rata-rata kuat tekan yang diperoleh adalah 6,401 MPa. Data ini ditampilkan pada Tabel 1. Secara umum, nilai kuat tekan yang relatif tinggi menunjukkan bahwa mortar ECC dengan kerikil aspal *porous* mampu membentuk ikatan yang cukup baik antara pasta dan agregat, meskipun tetap ditemukan beberapa indikasi retakan mikro akibat beban tekan. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menekankan bahwa ikatan antar material pada ECC dapat meningkatkan ketahanan retak, meskipun adanya zona transisi yang rapuh dapat menyebabkan terbentuknya retakan mikro (Wang & Li, 2007; Ma, Yi, & Wu, 2021).

Tabel 1. Hasil pengujian kuat tekan kerikil aspal *porous* mortar-ECC

Benda Uji	Sampel	Kuat Tekan Umur 3 Hari (MPa)	Rata-rata (MPa)
K.Aspal + Mortar-ECC	1	7,351	6,401
	2	6,471	
	3	5,382	

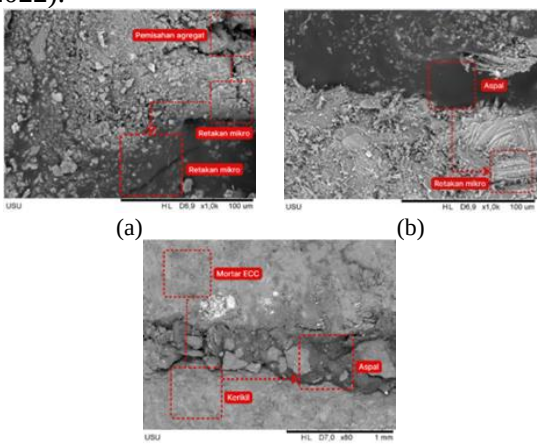
Pengujian kuat tekan juga dilakukan pada mortar ECC dengan campuran kerikil aspal yang dimodifikasi menggunakan *styrofoam* dan *crumb rubber*. Hasil uji menunjukkan nilai kuat tekan tertinggi sebesar 4,702 MPa pada sampel pertama, sementara sampel kedua dan ketiga masing-masing memiliki nilai 4,080 MPa dan 4,560 MPa. Rata-rata kuat tekan dari ketiga sampel adalah 4,447 MPa, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. Nilai ini lebih rendah dibandingkan dengan mortar ECC berbasis kerikil aspal *porous*, yang mengindikasikan bahwa penambahan *styrofoam* dan *crumb rubber* cenderung menurunkan kekuatan tekan akibat terbentuknya rongga udara dan ikatan antar material yang kurang solid. Hasil ini konsisten dengan temuan sebelumnya bahwa penggunaan *crumb rubber* dan *styrofoam* sebagai substitusi parsial agregat dapat mengurangi integritas struktural karena peningkatan porositas (Aziz, Rozli, Ghani, Jafri, & Zakaria, 2023; Hanif Khan et al., 2022).

Tabel 2. Hasil pengujian kuat tekan kerikil aspal *styrofoam–crumb rubber* mortar-ECC

Benda Uji	Sampel	Kuat Tekan Umur 3 Hari (MPa)	Rata-rata (MPa)
K.Aspal + STY + CR + Mortar-ECC	1	4702	4447
	2	4080	
	3	4560	

Analisis mikrostruktur dengan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) digunakan untuk mengamati morfologi dan ikatan antar material setelah uji tekan. Hasil pengamatan ditampilkan pada Gambar 5. Pada perbesaran 1000 kali (Gambar 5a), terlihat retakan mikro pada matriks aspal, pemisahan pada permukaan agregat, serta pecahnya kerikil akibat tekanan tinggi. Mortar ECC menunjukkan retakan menjalar yang menggambarkan respons material terhadap beban hingga mencapai keruntuhan. Pada perbesaran yang sama (Gambar 5b), tampak kontras antara mortar ECC (terang) dan aspal (gelap), serta retakan mikro yang mengindikasikan lemahnya keterikatan antar material. Sementara itu, pada perbesaran 80 kali (Gambar 5c), terlihat perbedaan tekstur antara kerikil aspal dan mortar ECC, di mana mortar berperan mengisi celah sekaligus menutup kekosongan pada permukaan kerikil. Zona transisi pada area pertemuan menunjukkan adanya ikatan mekanis antar material meskipun tidak sepenuhnya homogen. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menekankan pentingnya analisis SEM untuk mengidentifikasi porositas, ikatan antar material, dan retakan mikro pada komposit berbasis ECC (Sujatno, Salam, & Dimyati, 2015; Sari, 2018; Zhang, Jaworska, Zhu, Dahlquist, & Li, 2020; Liao et al., 2023). Pengamatan SEM juga dilakukan pada mortar ECC dengan campuran *styrofoam* dan *crumb rubber*. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 6. Pada perbesaran 1000 kali (Gambar 6a), terlihat interaksi antara aspal, *crumb rubber*, dan *styrofoam* setelah uji

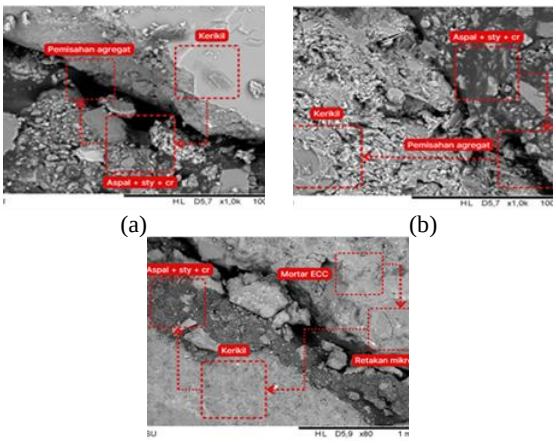
tekan. Terdapat perubahan bentuk pada *styrofoam*, retakan, serta pemisahan di area pertemuan antar bahan. Pada pengamatan selanjutnya (Gambar 6b), masih dengan perbesaran 1000 kali, terlihat distribusi *crumb rubber* dan *styrofoam* yang tidak merata serta retakan kecil pada mortar, yang menunjukkan lemahnya zona transisi pada campuran ini. Sementara itu, pada perbesaran 80 kali (Gambar 6c), tampak susunan mortar ECC, aspal, *crumb rubber*, *styrofoam*, dan kerikil. Walaupun detail mikroskopis sulit diamati, masih terlihat retakan besar dan pemisahan komponen yang mempertegas bahwa penambahan *styrofoam* dan *crumb rubber* cenderung menurunkan integritas struktural campuran mortar ECC. Hasil ini memperkuat temuan penelitian terdahulu bahwa variasi material ringan dapat menyebabkan penurunan ikatan mikrostruktural dan kekuatan tekan beton komposit (Wang, Lai, Zhang, Wang, & Ho, 2020; Aziz et al., 2023; Hanif Khan et al., 2022).



(a) (b)

(c)

Gambar 5. Hasil pengujian sem pada kerikil aspal *porous* mortar-ECC



(a) (b)

(c)

Gambar 6. Hasil pengujian SEM pada kerikil aspal *styrofoam–crumb rubber* mortar-ECC

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa mortar ECC berbasis kerikil aspal *porous* memiliki rata-rata kuat tekan yang lebih tinggi (6,401 MPa) dibandingkan dengan campuran kerikil aspal yang dimodifikasi dengan *styrofoam* dan *crumb rubber* (4,447 MPa). Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan *styrofoam* dan *crumb rubber* cenderung menurunkan kekuatan tekan akibat terbentuknya rongga udara serta lemahnya ikatan antar material. Analisis mikrostruktur menggunakan SEM memperlihatkan adanya retakan mikro, zona transisi yang tidak homogen, serta pemisahan antar material, baik pada mortar ECC berbasis kerikil aspal *porous* maupun pada campuran yang mengandung *styrofoam* dan *crumb rubber*. Perbedaan distribusi material serta kualitas ikatan antarmuka menjadi faktor penting yang memengaruhi performa mekanis komposit. Implikasi dari penelitian ini menegaskan bahwa pemanfaatan limbah industri seperti *styrofoam*, *crumb rubber*, *fly ash*, dan abu cangkang sawit dapat mendukung pengembangan material konstruksi berkelanjutan dengan tetap memperhatikan aspek mekanis dan lingkungan (Putu Wisnu, 2025; Yulianti, Ulfah, Lubis, & Haki, 2025; Dasar & Patah, 2024). Selain itu, hasil penelitian ini juga memperlihatkan pentingnya analisis mikrostruktur lanjutan dalam mengevaluasi kualitas ikatan dan porositas material komposit. Oleh karena itu, penelitian lanjutan dengan pendekatan karakterisasi mikro yang lebih detail perlu dilakukan untuk memperkuat pemahaman mengenai mekanisme interaksi antar material (Sujatno, Salam, & Dimyati, 2015; Chyliński, 2024).

DAFTAR PUSTAKA

Abdulsahib, I., Hilal, M. M., & Fattah, M. Y. (2023). Semi-flexible pavement: A review of design and performance evaluation. *E3S Web of Conferences, 427*, 3001.

Al Ambia, I., Syarwan, S., & Ar, S. (2022). Pengaruh penambahan *styrofoam* terhadap material reclaimed asphalt pavement (RAP) sebagai campuran asphalt concrete–binder course (AC–BC). *Jurnal Sipil Sains Terapan, 5*(2).

Asri, L. M., Zakaria, Z., & Mulyo, A. (2023). Mineral tanah lempung formasi Batuasih berdasarkan data SEM (scanning electron microscope) dan XRD (X-ray diffractometer) pada lereng Citatah KM-23, Padalarang, Jawa Barat. *Jurnal Geosains dan Teknologi, 6*(1), 53–63.

Aziz, A. A., Rozli, M. I. F., Ghani, K. D. A., Jafri, N. A., & Zakaria, N. (2023). Effects of pre-treated *crumb rubber* as sand partial replacement on compressive

strength of *Engineered Cementitious Composite*s (ECC). *Journal of Mechanical Engineering, 20*(2), 153–166.

Badan Standarisasi Nasional (BSN). (2002). *SNI 03-6861.1-2002 Spesifikasi bahan bangunan bagian A (bahan bangunan bukan logam).*

Cakrawisnu, D., Dwina, D. O., Nurdin, A., & Alfernando, O. (2022). Pengaruh campuran palm oil fuel ash (POFA) terhadap stabilisasi tanah gambut ditinjau dari nilai CBR tanah. *Jurnal Teknik Sipil Institut Teknologi Padang, 9*(1), 1–7.

Chyliński, F. (2024). Microstructural assessment of pozzolanic activity of ilmenite mud waste compared to *fly ash* in cement composites. *Materials, 17*(11), 17–19.

Dasar, A., & Patah, D. (2024). Kekuatan dan durabilitas beton menggunakan palm oil fuel ash (POFA) dan pasir pantai. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil, 8*(1), 83–94.

Didik, L. A. (2020). Penentuan ukuran butir kristal CuCr0,98Ni0,02O2 dengan menggunakan X-ray diffraction (XRD) dan scanning electron microscope (SEM). *Indonesian Physical Review, 3*(1), 6–14.

Frisda, T., Aswin, M., Perwira, A., & Tarigan, M. (2022). Potensial penggunaan bata-ECC berbasis silica fume dan abu cangkang sawit berdasarkan kuat tekan. *Siklus: Jurnal Teknik Sipil, 8*(2), 261–271.

Hanif Khan, M., Zhu, H., Ali Sikandar, M., Zamin, B., Ahmad, M., & Muayad Sabri, M. M. (2022). Effects of various mineral admixtures and fibrillated polypropylene fibers on the properties of *Engineered Cementitious Composite* (ECC) based mortars. *Materials, 15*(8), 2880.

Hasudungan, H. I., & Aswin, M. (2022). Investigasi kuat tekan paving block ECC oktagonal berbasis *fly ash* dan abu sekam padi. *Jurnal Syntax Admiration, 3*(11), 1353–1365.

Hidayatussa'diah, H. D., Apriyanti, Y., & Fahriani, F. (2020). Pengaruh penambahan limbah abu cangkang sawit (POFA) terhadap nilai California Bearing Ratio (CBR) untuk stabilisasi tanah lempung. *FROPIL (Forum Profesional Teknik Sipil), 8*(2), 102–109.

Jufrimal, F., Muharani, I. F., Ultari, M., Maghensky, R., Jody, N. S., & Kushandayani, A. (2025). Pengaruh penambahan abu cangkang kelapa sawit palm oil fuel ash (POFA) terhadap nilai kuat geser tanah lempung. *Akselerasi: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil, 6*(2).

Li, V. C. (2007). *Engineered Cementitious Composite*s (ECC)–Material, structural, and durability performance.

Liao, Q., Su, Y. R., Yu, J. T., Yao, Q. Y., Meng, D., & Yu, K. Q. (2023). Experimental and theoretical investigation on compression-shear properties of high-strength *Engineered Cementitious Composite*s (HS-ECC). *Journal of Building Engineering, 67*, 106015.

Ma, H., Yi, C., & Wu, C. (2021). Review and outlook on durability of *Engineered Cementitious Composite* (ECC). *Construction and Building Materials, 287*, 122719.

Pungut, P., Widyastuti, S., & Wiyarno, Y. (2021). Identifikasi mikroplastik pada cangkang kerang darah (*Anadara granosa* Linn) dengan menggunakan Fourier transform infrared (FTIR) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). In *Seminar Nasional Hasil Riset dan Pengabdian* (Vol. 3, pp. 109–120).

Purwanto, D., Permadi, D. D., & Saputri, U. S. (2023). Analisis uji kuat beton dengan menggunakan limbah *styrofoam* sebagai pengganti sebagian agregat halus. *Jurnal TESLINK: Teknik Sipil dan Lingkungan, 5*(1), 10–17.

Putri, E. E., & Adji, B. M. (2020). The effect of the use of *styrofoam* on performance of *porous* asphalt mixture. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Sipil, 17*(1), 31–40.

Putu Wisnu, A. C. (2025). Pemanfaatan limbah rubber deposit dan aspal emulsi CRS-1P sebagai material waterproofing ramah lingkungan (Doctoral dissertation, Politeknik Penerbangan Palembang).

Rahmadi, R., Maizir, H., & Suryanita, R. (2021). Kekuatan mortar cellular lightweight concrete dengan tambahan abu cangkang sawit (POFA). *Jurnal Rekayasa Sipil, 17*(3), 239–247.

Sahdiah, H., & Kurniawan, R. (2023). Optimasi tegangan akselerasi pada scanning electron microscope–energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDX) untuk pengamatan morfologi sampel biologi. *Jurnal Sains dan Edukasi Sains, 6*(2), 117–123.

Sari, D. K. (2018). Study of chemical and physical characteristic of *fly ash* to determine the mechanical strength of *fly ash*-based geopolymer.

Sujatno, A., Salam, R., & Dimyati, A. (2015). Studi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk karakterisasi proses oksidasi paduan zirkonium. *Jurnal Forum Nuklir (JFN).*

Sukirman, S. (1999). *Perkerasan lentur jalan raya.* Bandung: Nova.

Sukirman, S. (2010). *Perencanaan tebal struktur perkerasan lentur.* Bandung: Nova.

Syahputra, N. (2023). Analisa kerusakan pada sistem kopling mobil Toyota Rush menggunakan metode uji SEM (scanning electron microscope). *Jurnal MESIL (Mesin Elektro Sipil), 4*(1), 25–30.

Tenriajeng, A. T. (2002). *Rekayasa jalan raya-2.* Depok: Gunadarma.

Wang, Q., Lai, M. H., Zhang, J., Wang, Z., & Ho, J. C. M. (2020). Greener *Engineered Cementitious Composite* (ECC)–The use of pozzolanic fillers and unoiled PVA fibers. *Construction and Building Materials, 247*, 118211.

Wang, S., & Li, V. C. (2007). *Engineered Cementitious Composite*s with high-volume *fly ash*. *ACI Materials Journal, 104*(3), 233–241.

Yulianti, D., Ulfah, L., Lubis, L. R., & Haki, H. (2025). Studi eksperimental penambahan biji plastik dan *fly ash* pada karakteristik campuran aspal (AC-WC). *Jurnal Talenta Sipil, 8*(1), 430–439.

Zhang, D., Jaworska, B., Zhu, H., Dahlquist, K., & Li, V. C. (2020). *Engineered Cementitious Composite*s (ECC) with limestone calcined clay cement (LC3). *Cement and Concrete Composites, 114*, 103766.