

Meningkatkan keberlanjutan rekayasa geoteknik dengan pemanfaatan Fly Ash

Nurul Lia Suryani¹ dan Ahmad Faqihul M.²

¹Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Madura, Pamekasan

E-mail: liadhana20@gmail.com .

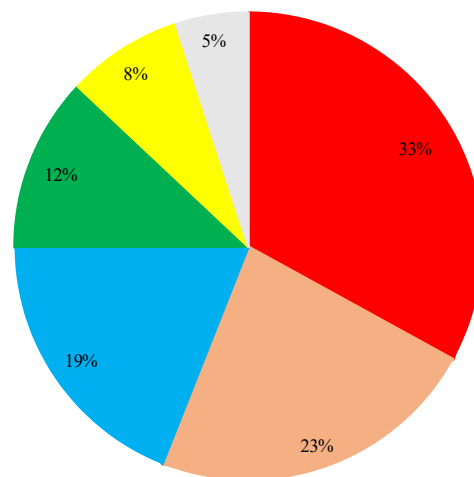
ABSTRAK: Fly ash (FA) dalam jumlah besar dibuang secara sembarangan sehingga menimbulkan pengaruh negatif terhadap lingkungan. Namun, FA memiliki beberapa keuntungan jika digunakan dalam proyek-proyek teknik geoteknik dan teknik sipil yang tidak hanya membuang limbah tetapi juga meningkatkan keberlanjutan. Selain menawarkan solusi yang menjanjikan untuk masalah pembuangan, penggunaan material limbah dalam proyek teknik sipil juga menawarkan pengganti yang terjangkau untuk material konvensional yang menggunakan sumber daya alam. Banyak penelitian para ahli menunjukkan bagaimana FA digunakan dan bagaimana pengaruhnya terhadap karakteristik geoteknik tanah. Meskipun telah banyak dilakukan penelitian, penilaian kesesuaian FA menjadi rumit karena komposisi kimia FA yang sangat bervariasi antar sumber. Variabilitas ini dapat mempengaruhi bagaimana FA berinteraksi dengan jenis tanah yang berbeda, yang mengarah pada hasil yang tidak konsisten dalam hal perbaikan tanah dan sifat geoteknik. Oleh karena itu, diperlukan tinjauan komprehensif yang mengkompilasi semua data yang efektif dan memberikan petunjuk sederhana kepada pengguna tentang penggunaan FA. Artikel ini mengulas penelitian terkini mengenai sifat-sifat fisik FA, komposisi kimia FA dari berbagai negara, batas Atterberg, sifat-sifat pemadatan, rasio bantalan California, kuat tekan tak terkekang, kuat geser kompresi, dan indeks pembengkakan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan FA pada tanah dapat meningkatkan kualitas geotekniknya, namun pengaruhnya tergantung pada jenis tanah dan kondisi tertentu, seperti kadar air, pemadatan, dan persentase FA yang ditambahkan.

Kata Kunci: Abu terbang - Batas Atterberg - Rasio bantalan California - Kuat tekan tak-terkekang - Dan kuat geser

1. PENDAHULUAN

Produk pembakaran batubara adalah hasil sampingan dari pembakaran batubara untuk menghasilkan tenaga listrik. Produk ini terdiri dari terak boiler, FA, abu dasar, gipsum, dan limbah lainnya dari pembangkit listrik. Produk sampingan ini dihasilkan dalam jumlah yang sangat besar setiap tahunnya. Sebuah studi [1], [2] melaporkan bahwa jutaan metrik ton produk ini dihasilkan di Amerika Serikat. Dari jumlah tersebut, 64,3 juta metrik ton diproduksi sebagai FA, 25,5 juta sebagai abu dasar, 2,0 juta sebagai terak ketel, dan 28,5 juta sebagai gipsum FGD. Jumlah tersebut meningkat menjadi 131 juta metrik ton. Sekitar 375 juta ton FA dan bottom ash diproduksi di Cina. Kecenderungan ini diperkirakan akan terus berlanjut karena pembangkit listrik tenaga batu bara terus memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pembangkitan energi di banyak negara. Dengan teknologi yang ada saat ini, tidak ada sumber energi alternatif yang signifikan yang dapat mendukung pengurangan penggunaan batu bara secara cepat. Sebuah studi [3], [4] juga menunjukkan bahwa Estimasi program pemanfaatan abu terbang (FAUP) menetapkan bahwa batubara yang dipasok ke pembangkit listrik tenaga panas mencapai 686,34 juta ton pada tahun 2020-2021, menghasilkan produksi abu terbang yang substansial sebesar 232,56 juta ton pada tahun yang sama. Kementerian Tenaga Listrik, Pemerintah India, memproyeksikan konsumsi batubara tahunan sebesar 1800 juta ton dan produksi 600 juta ton FA pada tahun 2031-2032. Diperkirakan produksi FA akan meningkat dari hari ke hari karena adanya permintaan pembangkit listrik tenaga batu bara [5], [6]. Selain itu, FA dapat digunakan dalam proyek-proyek konstruksi, tetapi tingkat daur ulangnya terbatas dan perlu ditingkatkan. Dapat juga dicatat bahwa Cina menggunakan FA dalam

berbagai proyek yang berbeda dibandingkan dengan negara lain (Gbr. 1).



Tujuh puluh persen dari keseluruhan output abu batubara biasanya ditempatkan sebagai sampah di fasilitas pembuangan utilitas [7], [8]. Penggunaan abu batubara dalam proyek-proyek teknik sipil yang mengandung material dalam jumlah besar, seperti tanggul jalan raya, merupakan pilihan yang menarik. Biaya pembuangan abu dapat dikurangi secara signifikan, dan tanah serta lahan alami dapat dilestarikan. Tidak ada evaluasi yang akurat dan telah diteliti dengan baik mengenai biaya pembuangan yang ada. Namun, pada tahun 1980, biaya yang diharapkan untuk pembuangan per ton adalah antara \$5 dan \$10. Biaya rata-rata untuk meminjam material berkisar antara \$4 hingga \$10 per ton. Harga pembuangan memang telah meningkat selama 24 tahun terakhir, dan menggunakan abu sebagai bahan timbunan tampaknya lebih hemat biaya

[9]. Saat ini sumber daya alam yang tersedia tidak mencukupi [10], [11]; terutama agregat halus yang dibutuhkan untuk bangunan [12]. Oleh karena itu, saat ini sulit untuk mendapatkan bahan timbunan ringan dan timbunan yang dibutuhkan untuk proyek-proyek pembangunan. Sumber daya alam ini menjadi semakin terbatas karena konsumsinya yang terus meningkat. Oleh karena itu, mengeksplorasi bahan alternatif yang tersedia sangat dibutuhkan dan berbagai penelitian berfokus pada pemanfaatan limbah sebagai bahan timbunan [5], [13]. Di antara limbah industri yang berbeda seperti asap silika [14], [15], [16], limbah marmer [2], terak tembaga [17], [18], limbah kaca [19], [20], terak sembur butiran [19] dan terak baja [21], [22], FA menyajikan pilihan pembuangan yang diinginkan karena penghematan keuangan yang signifikan dapat direalisasikan dengan menurunkan biaya pembuangan abu dan melestarikan tanah dan ekosistem alami. Beberapa peneliti merekomendasikan bahwa FA dapat digunakan sebagai bahan konstruksi [23], [24]. Namun, terlepas dari manfaat-manfaat tersebut, banyak kendala yang membatasi penggunaan FA secara luas. Perbedaan komposisi kimia di antara berbagai sumber dapat mempengaruhi kinerja dan kompatibilitasnya dengan tanah, yang mengakibatkan hasil yang tidak merata. Selain itu, aspek lingkungan jangka panjang dari penggunaan FA, terutama risiko pencucian senyawa yang merusak, masih menjadi masalah.

Seorang peneliti pada awalnya mengusulkan ide untuk menggunakan kapur karbida, yang juga dikenal sebagai residu karbida, untuk meningkatkan persentase kalsium pada FA berkalsium rendah untuk meningkatkan sifat geotekniknya [25], [26], [27]. Dampak penambahan kapur karbida terhadap respon tegangan-regangan tanah pada awalnya dijelaskan dalam penelitian [28], yang bergantung pada waktu. Metode yang berhasil untuk menstabilisasi tanah ekspansif meliputi penggunaan beberapa material yang berkelanjutan [29], [30]. Penelitian [31], [32] mengenai stabilisasi FA dari sudut pandang geoteknik menunjukkan bahwa FA dapat distabilisasi secara efisien dengan kapur dan digunakan sebagai bahan jalan di Amerika Serikat. FA di AS mengandung sejumlah kecil natrium klorida (NaCl). Namun, FA di Jepang sering kali mengandung garam dalam jumlah yang cukup besar karena tingginya kandungan plastik dalam FA yang akan dibakar, sehingga menghambat kemampuan reaksi dengan semen atau kapur [33]. Literatur menunjukkan bahwa banyak peneliti yang melakukan penelitian tentang pemanfaatan FA dan merekomendasikan bahwa FA dapat digunakan sebagai bahan konstruksi. Namun, pengetahuan tersebut tersebar, dan sulit untuk menilai manfaatnya, yang membatasi aplikasinya. Oleh karena itu, diperlukan analisis yang komprehensif dan terkini, yang mengumpulkan semua data penting dan memberikan panduan yang mudah bagi pengguna.

Penelitian ini mengumpulkan literatur yang tersedia mengenai aplikasi FA dalam rekayasa geoteknik khususnya dalam stabilisasi tanah. Penelitian ini juga menyoroti area-area yang lemah atau area-area yang belum dieksplorasi yang perlu dieksplorasi.

Partikel fly ash (FA) sebagian besar berbentuk bulat, berstruktur amorf (seperti kaca) di alam dan berongga [34], [35] Dalam beberapa kasus, partikulat FA teramati dalam bentuk yang tidak beraturan, yang mengindikasikan bahwa batubara dibakar pada suhu antara 850 hingga 900 °C. FA

diamati dalam berbagai warna mulai dari coklat, oranye hingga merah, atau abu-abu hingga hitam berdasarkan besi dan karbon yang tidak terbakar di dalam FA seperti yang disajikan pada Gbr. 2. Konsentrasi besi yang tinggi menghasilkan warna coklat, tetapi tingkat karbon yang tinggi secara konsisten menghasilkan warna abu-abu gelap hingga hitam. Warna terang dan coklat menunjukkan banyaknya kandungan kapur. Sebuah studi mencatat bahwa warna abu-abu hingga hitam pada FA terutama diperoleh dari karbon yang sangat tidak terbakar, sementara kandungan besi saling terkait dengan warna coklat dan warna FA yang lebih terang menunjukkan konsentrasi kapur yang tinggi [36], [37].



Gbr. 2 Warna FA yang berbeda: Sumber a Abu-abu putih, b Abu-abu semen, c Abu-abu hitam, dan d Abu-abu kecoklatan

Secara umum, partikel FA lebih kecil daripada partikel tanah liat. Ukuran partikel FA berkisar antara 0,5 hingga 100 mikron, sedangkan ukuran partikel lempung berkisar antara 0,002 hingga 0,05 mm. Berat jenis merupakan faktor kunci dalam pemadatan. Sebuah penelitian mencatat bahwa distribusi ukuran FA bervariasi dari pasir hingga lempung. Partikel-partikel FA berkisar antara 0,5 hingga 400 µm dengan ukuran rata-rata bervariasi dari 12 hingga 80 µm [40]. Para peneliti mengindikasikan bahwa FA adalah partikel yang umumnya halus dan sering diamati dalam ukuran lanau. Sebuah studi [38] mengungkapkan bahwa jika partikulat FA dibuang lebih jauh dari unit pelepasan, kisaran ukuran lanau akan dicapai pada lebih dari 50% partikulat dan kisaran ukuran yang lebih tinggi akan diperoleh.

Selain itu, berat jenis FA (SG) bervariasi antara 1,6 dan 3,1 dan umumnya sekitar 2,0. Kehalusan, karbon, konsentrasi besi, dan mineralogi FA mempengaruhi berat jenisnya. Nilai SG dari FA umumnya lebih rendah daripada tanah yang diperoleh dengan cara halus, yang menyebabkan kepadatan tanah yang lebih rendah. Peneliti sebelumnya mengungkapkan bahwa SG yang lebih rendah atau penurunan kepadatan kering bermanfaat ketika FA digunakan untuk memperbaiki tanah yang lemah, dan bahan timbunan untuk dinding penahan tanah dan tanggul. Tanah liat dikenal karena plastisitasnya dan dapat dibentuk (kondisi basah). FA tidak bersifat plastis dan tidak dapat dibentuk dengan cara yang sama seperti tanah liat. FA dan bottom ash memiliki berat jenis yang berbeda. Jika dibandingkan, bottom ash memiliki berat jenis yang lebih rendah daripada FA, yang menunjukkan bahwa bottom ash mungkin mengandung lebih banyak zat besi.

Hal ini mungkin disebabkan oleh adanya lapisan bawah abu dasar.

partikel abu yang berpori [39], [40]. Berdasarkan beberapa pengujian komposisi, kepadatan kering maksimum FA (MDD) berkisar antara 1,01 hingga 1,78 g/cm³. MDD lumpur dan pasir serta lumpur dan lempung berada di antara 1,68 dan 2,08 g/cm³ serta 1,28 dan 1,92 g/cm³. Namun, MDD FA sedikit lebih rendah daripada lanau dan lempung tetapi secara substansial lebih rendah daripada pasir. Selain itu, kadar air optimum (OMC) FA umumnya bervariasi dari 11 hingga 53%, dari 6 hingga 10% untuk pasir, dari 11 hingga 15% untuk lanau, dan bervariasi dari 13 hingga 21% untuk lempung. Oleh karena itu, OMC dari FA mungkin mengandung kisaran tanah berbutir halus. FA yang diamati terutama bersifat non-plastis (NP) dalam hal sifat fisik, yang berarti tidak memiliki kapasitas pembengkakan ketika digunakan untuk tujuan geoteknik.

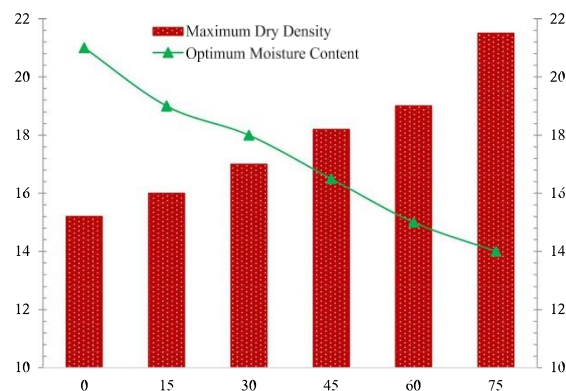
Permeabilitas FA dipengaruhi oleh tingkat pemadatan, distribusi ukuran partikel, dan struktur mikro. Selain itu, FA kelas C menunjukkan permeabilitas yang lebih rendah daripada FA kelas F, yang mungkin disebabkan karena FA kelas C memiliki sifat sementit karena konsentrasi Ca yang tinggi, yang menyebabkan permeabilitas yang lebih rendah daripada FA kelas F. Sudut tahanan geser FA umumnya berkisar antara 26 hingga 42, dan nilai-nilai ini sejajar dengan sudut tahanan geser pasir dan lanau. Variasi ini disebabkan oleh variasi sumber dan suhu.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Kepadatan fly ash (FA) mempengaruhi kualitas geoteknik seperti kekuatan, kompresibilitas, dan konduktivitas hidrolik. FA yang telah dipadatkan dan distabilisasi dengan baik memenuhi standar untuk digunakan pada subbase perkerasan dan timbunan penahan beban. Seorang peneliti menyelidiki penggunaan FA dan debu kuari dengan rasio 1:2 yang diberikan pada tanah ekspansif hingga 75% dari massa keringnya. FA ditambahkan dengan kadar 0 sampai 25% dengan kenaikan 5%, dan debu kuari ditambahkan dengan kadar 0-50% dengan kenaikan 10%. Campuran dibuat sedemikian rupa sehingga persentasenya berjumlah 100, seperti tanah: FA: debu kuari: 70:10:20, dan seterusnya. Gambar 5 menampilkan hasil untuk MDD dan OMC. Berdasarkan Gbr. 5, MDD tanah terus meningkat ketika jumlah FA-debu kuari meningkat. Pada campuran tanah-FA-debu kuari, hal ini disebabkan oleh berat jenis debu kuari yang lebih tinggi (2,77), dibandingkan dengan berat jenis tanah (2,67). Menurut Gbr. 5, OMC tanah terus menurun seiring dengan bertambahnya jumlah debu kuari-FA. Hal ini disebabkan oleh penggantian lempung tanah dengan campuran debu kuari FA yang kurang menarik bagi molekul air. Penelitian juga menemukan bahwa kepadatan kering meningkat hingga 15% FA, kemudian menurun pada 20% abu. Kelembaban optimal menurun hingga 15% FA, setelah itu mulai naik.

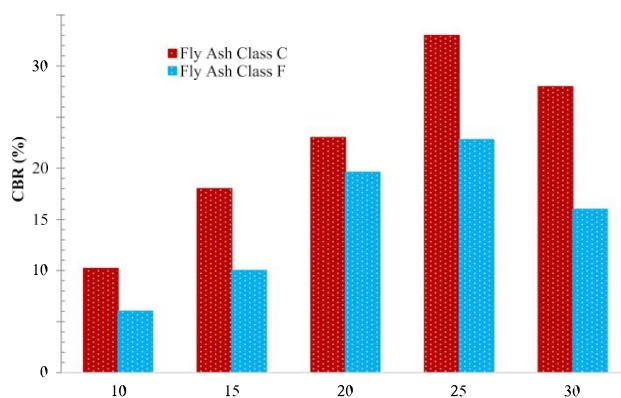
Penelitian [39] menyatakan bahwa OMC berkisar antara 15 hingga 20,5%, sedangkan MDD berkisar antara 1648 hingga 1853 kg/m³. OMC tanah asli lebih besar dibandingkan dengan kombinasi lainnya. Meskipun demikian, kombinasi dengan 40% FA memiliki MDD terbesar dibandingkan dengan tanah referensi dan

campuran lainnya. Kemampuan indeks tanah ditemukan meningkat dengan dimasukkannya FA. Ditemukan bahwa OMC berkurang dengan FA sementara MDD meningkat. Hal ini dapat diakibatkan oleh adanya lubang-lubang pada distribusi partikel tanah bergradasi buruk yang dimasuki oleh partikel FA, sehingga meningkatkan hubungan antar partikel tanah karena adanya sejumlah besar partikel FA yang meningkatkan MDD hingga proporsi FA tertentu. Metode ini dikenal sebagai rasio pencampuran FA-tanah yang ideal.



Gbr. 5 Dampak abu terbang MDD dan OMC [94]

Nilai CBR sering digunakan dalam desain lapis pondasi bawah dan lapis pondasi atas perkerasan jalan. Hasil pengujian CBR ditampilkan pada Gbr. 6. Hasil CBR menunjukkan bahwa jumlah CBR setelah 7 hari untuk benda uji yang distabilisasi kelas F berkisar antara 6,1 hingga 22,8%, dan untuk spesimen yang distabilisasi kelas C berkisar antara 9,6 hingga 32,7%. Sebanding dengan UCS, CBR naik hingga 25% dan kemudian turun. Ketika tanah SiO₂ dan Al(2)O₃ bercampur dengan FA CaO, maka akan terbentuk gel tahan CSH yang meningkatkan kekuatan dan CBR.



Gbr. 6 Dampak abu terbang CBR [51]

Hasilnya menunjukkan bahwa 20% FA dan 20% terak baja dengan penuaan 7 hari meningkatkan nilai CBR optimal dari 3,524 persen menjadi 26,14 persen. CBR terbesar pada kombinasi ini dapat diklasifikasikan sebagai tanah dasar yang sangat baik. Terdapat kecenderungan peningkatan CBR yang konsisten dengan kadar fly dan bottom ash. Peningkatan nilai CBR ditentukan oleh jumlah FA, bottom ash, dan air dalam campuran. Dimasukkannya 20% FA meningkatkan nilai CBR di daerah penelitian, meskipun jumlah peningkatannya bervariasi pada jenis tanah yang ada. Sebesar 7,99 persen pada tanah berlanau atau tanah

lempung berkerikil dan pasir, 6- 8 persen pada tanah lempung, dan 0,22-5 persen pada tanah berlanau. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan FA lebih efektif untuk tanah lempung. Penelitian dilakukan untuk meningkatkan kualitas teknik subgrade tanah lempung seperti CBR. Campuran stabilisasi tanah dengan kadar FA dan bottom ash yang bervariasi disiapkan: 4, 8, dan 12 persen, dengan sampel yang dipadatkan pada kadar air optimal, dan kemudian dilakukan percobaan CBR. Stabilisasi campuran dengan FA dan bottom ash secara signifikan meningkatkan nilai CBR dan dapat memberikan pilihan yang berharga untuk tanah dasar jalan raya lempung konstruksi jalan raya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Meskipun hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan FA ke dalam tanah dapat meningkatkan sifat geotekniknya, namun pengaruhnya bervariasi tergantung pada faktor-faktor seperti jenis tanah, kadar air, pemadatan, dan persentase FA yang ditambahkan. Oleh karena itu, penelitian di masa depan harus fokus pada penyelidikan lebih lanjut bagaimana variabel-variabel ini mempengaruhi kinerja FA pada kondisi tanah yang berbeda dan menentukan kandungan FA yang optimal untuk berbagai aplikasi geoteknik untuk memaksimalkan kinerjanya.

4. KESIMPULAN

Artikel ini mengulas penelitian tentang karakteristik geoteknik tanah dengan FA yang menentukan kemampuannya untuk digunakan kembali, termasuk batas Atterberg, pemadatan, rasio bantalan California, kuat tekan tak terkekang, kuat geser tekan, dan indeks pembengkakan. Kesimpulan selanjutnya adalah.

1. Penambahan abu terbang, khususnya kelas C, sangat menurunkan indeks plastisitas (PI) tanah lempung, yang menurunkan kapasitasnya untuk mengembang dan menyusut sehingga tanah menjadi lebih stabil untuk keperluan konstruksi.
2. Penambahan FA meningkatkan karakteristik geoteknik tanah, seperti batas konsistensi, California Bearing Ratio (CBR), Unconfined Compressive Strength (UCS), kuat geser, dan indeks kompresi yang menjadikannya solusi yang efektif untuk meningkatkan kinerja tanah dalam aplikasi teknik.
3. Penambahan FA pada tanah berpotensi meningkatkan CBR, kuat tekan tak terkekang, dan kuat geser. Hal ini dikarenakan FA dapat meningkatkan kekuatan dan kekakuan tanah karena sifat pozzolannya. Pozzolan seperti FA bereaksi dengan kalsium hidroksida di dalam tanah untuk membentuk senyawa semenit yang dapat memperkuat tanah.
4. Penggunaan FA dapat mengurangi indeks pemampatan tanah dengan cara meningkatkan pemadatan partikel-partikel tanah, mengurangi rongga-rongga di antara partikel-partikel tanah,

dan menciptakan kerangka yang lebih kuat yang dapat menahan pemampatan.

5. Temuan SEM mengungkapkan bahwa FA meningkatkan struktur internal tanah karena aksi pozzolan dan efek pengisian mikro.
6. Investigasi XRD memverifikasi bahwa memasukkan 25% abu terbang ke dalam tanah lempung memodifikasi komposisi mineralogi dengan mengurangi puncak mineral lempung dan meningkatkan jumlah kuarsa dan mullite, yang berdampak pada struktur kristal.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Nasiri, A. Eslami, and A. Fahimifar, "Assessment of Construction and Demolition Waste Depot Materials for Filling," *Transportation Infrastructure Geotechnology*, vol. 11, no. 1, pp. 236–262, 2024, doi: 10.1007/s40515-023-00279-1.
- [2] A. el M. Safhi *et al.*, "Characterizations and potential recovery pathways of phosphate mines waste rocks," *J Clean Prod*, vol. 374, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134034.
- [3] A. Ahmad, W. Ahmad, F. Aslam, and P. Joyklad, "Compressive strength prediction of fly ash-based geopolymer concrete via advanced machine learning techniques," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00840.
- [4] G. Khambra and P. Shukla, "Novel machine learning applications on fly ash based concrete: An overview," *Mater Today Proc*, vol. 80, pp. 3411–3417, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2021.07.262.
- [5] N. Mondem and U. Balunaini, "Manufacturing Artificial Aggregates from Overburden Coal Mine Waste and Their Properties for Pavement Applications," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 36, no. 7, 2024, doi: 10.1061/jmcee7.mteng-17138.
- [6] G. F. Estupendo, F. Ferreira, K. Govindan, R. J. C. Correia, L. Pereira, and I. Meidute-Kavaliauskiene, "'Life After Coal': Renewable Energy Impacts on SME Conduct," *IEEE Trans Eng Manag*, vol. 70, no. 10, pp. 3571–3586, 2023, doi: 10.1109/TEM.2021.3088416.
- [7] P. Ofori, J. Hodgkinson, M. Khanal, P. Hapugoda, and J. Yin, "Potential resources from coal mining and combustion waste: Australian perspective," *Environ Dev Sustain*, vol. 25, no. 9, pp. 10351–10368, 2023, doi: 10.1007/s10668-022-02492-3.
- [8] Z. Hu *et al.*, "Coupling of underground coal mining and mine reclamation for farmland protection and sustainable mining," *Resources Policy*, vol. 84, 2023, doi: 10.1016/j.resourpol.2023.103756.
- [9] A. Roozbeh Nia, A. Awasthi, and N. Bhuiyan, "Integrate exergy costs and carbon reduction policy in order to optimize the sustainability development of coal supply chains in uncertain conditions," *Int J Prod Econ*, vol. 257, 2023, doi: 10.1016/j.ijpe.2023.108772.
- [10] A. Sajadi, J. A. Ranola, R. W. Kenyon, B. M. Hodge, and B. Mather, "Dynamics and Stability of

- Power Systems with High Shares of Grid-Following Inverter-Based Resources: A Tutorial,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 29591–29613, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3260778.
- [11] Y. Gu and T. C. Green, “Power System Stability With a High Penetration of Inverter-Based Resources,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 111, no. 7, pp. 832–853, 2023, doi: 10.1109/JPROC.2022.3179826.
- [12] K. Ouyang *et al.*, “Influence of pre-treatment methods for recycled concrete aggregate on the performance of recycled concrete: A review,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 188, 2023, doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106717.
- [13] M. Q. Ismael, Z. A. Sahib, and A. H. Rasheed, “Utilizing Waste Engine Oil and Soft Binder as Additives to Mitigate the Moisture Damage of Asphalt Mixtures,” *Engineering, Technology and Applied Science Research*, vol. 14, no. 6, pp. 17604–17612, 2024, doi: 10.48084/etasr.7451.
- [14] H. Ding and X. Geng, “Strength and Durability Performance of Sandy Loam Reinforced with Xanthan Gum and Biochar,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 37, no. 2, 2025, doi: 10.1061/JMCEE7.MTENG-18508.
- [15] T. Faisal, L. Hui, M. J. Khattak, V. Gopu, W. Alaywan, and G. Escoto, “Periodic cellular core sandwich panel (CCSP) for bridge deck applications,” *Eng Struct*, vol. 328, 2025, doi: 10.1016/j.engstruct.2025.119791.
- [16] Z. Fang, Z. Zhu, P. Wu, and Z. Moradi, “Vibration and damping analysis of sandwich electrorheological fluid deep arches with bi-directional FGM containers,” *Eng Struct*, vol. 276, 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.115325.
- [17] E. A. Azooz, J. R. Moslim, S. M. Hameed, S. K. Jawad, and E. A. J. Al-Mulla, “Aspirin in food samples for separation and micro determination of copper(II) using cloud point extraction/solvation method,” *Nano Biomed Eng*, vol. 13, no. 1, pp. 62–71, 2021, doi: 10.5101/nbe.v13i1.p62-71.
- [18] L. Liu, L. Zhang, S. Jiang, Z. Yuan, and J. Chen, “Global copper cycles in the anthroposphere since the 1960s,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 199, 2023, doi: 10.1016/j.resconrec.2023.107294.
- [19] N. A. Wani and U. Mishra, “A sustainable municipal solid waste supply chain management with biodiesel energy production using microwave technology,” *Environ Dev Sustain*, vol. 26, no. 5, pp. 12863–12900, 2024, doi: 10.1007/s10668-023-04039-6.
- [20] F. de Andrade Salgado and F. de Andrade Silva, “Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review,” *Journal of Building Engineering*, vol. 52, 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104452.
- [21] D. N. Bajaj, M. Steel, S. Ogden, and K. Rahman, “Consumer motivations to create alternative consumption platforms,” *Australasian Marketing Journal*, vol. 28, no. 3, pp. 50–57, 2020, doi: 10.1016/j.ausmj.2020.06.001.
- [22] S. Qin, J. Zhang, C. Huang, L. Gao, and Y. Bao, “Fatigue performance evaluation of steel-UHPC composite orthotropic deck in a long-span cable-stayed bridge under in-service traffic,” *Eng Struct*, vol. 254, 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.113875.
- [23] X. Li *et al.*, “A facile Immunoregulatory Constructional Design by Proanthocyanidin Optimizing Directional Chitosan Microchannel,” *Small*, vol. 20, no. 31, 2024, doi: 10.1002/sml.202310689.
- [24] D. Wheatley, T. Bayley, and M. Araghi, “Able Construction: A Spreadsheet Activity for Teaching Bayes’ Theorem,” *Operations Research Forum*, vol. 3, no. 1, 2022, doi: 10.1007/s43069-021-00119-3.
- [25] S. Węgliński, M. Flieger-Szymańska, M. Just, and D. A. Krawczyk, “Ground improvement and rebuild of a district road in complex geotechnical-engineering conditions – case study,” *Archives of Civil Engineering*, vol. 68, no. 2, pp. 63–82, 2022, doi: 10.24425/ace.2022.140630.
- [26] M. G. Uljarević, S. Z. Milovanović, R. B. Vukomanović, and D. D. Zeljić, “Geotechnical problems in flexible pavement structures design,” *Geomechanics and Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 35–47, 2023, doi: 10.12989/gae.2023.32.1.035.
- [27] A. Garg *et al.*, “Geotechnical engineering educational modules demonstrating measurement and regulation of soil moisture,” *COMPUTER APPLICATIONS IN ENGINEERING EDUCATION*, vol. 30, no. 3, pp. 973–985, 2022, doi: 10.1002/cae.22497.
- [28] S. Wang, H. Chang, Z. Dong, Y. Ren, T. Tan, and H. Deng, “Dephenolization pyrolysis fluid improved physicochemical properties and microbial community structure of saline-alkali soils,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 8, pp. 20223–20234, 2023, doi: 10.1007/s11356-022-23598-1.
- [29] V. Nasir, S. Ayanleye, S. Kazemirad, F. Sassani, and S. Adamopoulos, “Acoustic emission monitoring of wood materials and timber structures: A critical review,” *Constr Build Mater*, vol. 350, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128877.
- [30] B. Ali, A. Hawreen, N. Ben Kahla, M. Talha Amir, M. Azab, and A. Raza, “A critical review on the utilization of coir (coconut fiber) in cementitious materials,” *Constr Build Mater*, vol. 351, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128957.
- [31] N. Barton, C. Wang, and R. Yong, “Advances in joint roughness coefficient (JRC) and its engineering applications,” *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 15, no. 12, pp. 3352–3379, 2023, doi: 10.1016/j.jrmge.2023.02.002.
- [32] A. N. El-Attar and A. A. El-Latief, “Effect of Glass Fiber Reinforcement on Bearing Capacity and Settlement of Foundations on Soft Clay,” *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 42, no. 7, pp. 6435–6456, 2024, doi: 10.1007/s10706-024-02867-5.
- [33] J. Hussain *et al.*, “Resource Assessment of Limestone Based on Engineering and Petrographic Analysis,” *Civil Engineering Journal (Iran)*, vol.

8, no. 3, pp. 421–437, 2022, doi: 10.28991/CEJ-2022-08-03-02.

- [34] K. Mostafa, S. Ojulari, and T. Hegazy, “Enhanced repetitive scheduling formulation for meeting deadlines and resource constraints in linear and scattered projects,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 50, no. 3, pp. 172–183, 2023, doi: 10.1139/cjce-2022-0029.
- [35] K. Ruane *et al.*, “Material and Structural Characterization of a Wind Turbine Blade for Use as a Bridge Girder,” *Transp Res Rec*, vol. 2676, no. 8, pp. 354–362, 2022, doi: 10.1177/03611981221083619.
- [36] L. Yao, Y. Wang, and X. Xiao, “Concentrated Solar Power Plant Modeling for Power System Studies,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 39, no. 2, pp. 4252–4263, 2024, doi: 10.1109/TPWRS.2023.3301996.
- [37] Z. Xiong *et al.*, “Axial performance of seawater sea-sand concrete columns reinforced with basalt fibre-reinforced polymer bars under concentric compressive load,” *Journal of Building Engineering*, vol. 47, 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.103828.
- [38] Z. Xu *et al.*, “Effects of temperature, humidity and CO₂ concentration on carbonation of cement-based materials: A review,” *Constr Build Mater*, vol. 346, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128399.
- [39] M. S. Sandeep, K. Tiprak, S. Kaewunruen, P. Pheinsusom, and W. Pansuk, “Shear strength prediction of reinforced concrete beams using machine learning,” *Structures*, vol. 47, pp. 1196–1211, 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2022.11.140.
- [40] J. L. Feng *et al.*, “The Forward Physics Facility at the High-Luminosity LHC,” *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, vol. 50, no. 3, 2023, doi: 10.1088/1361-6471/ac865e.