

# Perilaku Geoteknik Busa Poliuretan pada Berbagai Kepadatan

Ainun Mumtaz Mohammad Gasa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

**ABSTRAK:** Deformasi tanah yang disebabkan oleh transfer tegangan dari struktur teknik sipil sering kali menyebabkan masalah penurunan, yang berdampak pada kinerja struktur seperti jalan raya, pelataran parkir, dan lantai pabrik. Busa poliuretan (PU), yang dikenal dengan ekspansi volumetriknya yang signifikan, muncul sebagai solusi potensial untuk mengurangi masalah penurunan. Namun, pemahaman yang komprehensif mengenai sifat-sifat rekayasa geoteknik busa PU sangat penting untuk desain dan perencanaan pekerjaan injeksi yang efektif. Penelitian ini berfokus pada busa PU dua komponen yang terdiri dari polioliol dan isosianat, yang mengevaluasi berbagai sifat geoteknik pada kepadatan busa yang berbeda. Sampel uji disiapkan dengan menginjeksikan busa PU ke dalam silinder PVC vertikal untuk mengangkat piston internal. Sifat-sifat utama yang dinilai meliputi kuat tekan ( $\sigma_u$ ), modulus secant ( $E_{50}$ ), rasio Poisson secant detik, regangan residu siklik  $\epsilon_{cyN}$ , tegangan vertikal luluh  $y$ , indeks kompresibilitas, dan koefisien permeabilitas ( $k$ ). Hasil penelitian menunjukkan peningkatan  $\sigma_u$ ,  $E_{50}$ ,  $\epsilon_{cyN}$ , dan  $y$  dengan meningkatnya densitas busa, sementara detik, indeks kompresibilitas, dan  $k$  menurun. Selain itu, pada densitas busa yang konstan, detik menurun dengan tegangan vertikal yang lebih tinggi, dan ( $\epsilon_{cyN}$ ) meningkat dengan rasio tegangan siklik (CSR) dan jumlah siklus ( $N_{(C)}$ ). Analisis regresi menghasilkan formula empiris untuk memprediksi sifat-sifat ini, yang memberikan wawasan berharga untuk pemanfaatan busa PU dalam aplikasi geoteknik.

**Kata Kunci:** Deformasi tanah, indeks kompresibilitas, dan koefisien permeabilitas ( $k$ )

## 1. PENDAHULUAN

Wilayah tengah Thailand, khususnya di daerah sekitar Bangkok, dicirikan oleh lapisan lempung lunak yang cukup banyak pada profil tanahnya [1], [2], [3]. Ketika struktur teknik sipil, seperti struktur perkerasan jalan, pelat lantai pabrik, dan pelat lantai parkir, secara langsung menanggung beban pada permukaan tanah, Penurunan terjadi karena konsolidasi lapisan lempung lunak ini. Penurunan ini dapat tidak seragam, yang menyebabkan penurunan yang berbeda, yang pada gilirannya mengakibatkan hilangnya kemampuan layanan dan, terkadang, kegagalan struktural. Untuk mengatasi masalah ini, berbagai teknologi perbaikan tanah telah muncul. Dalam beberapa tahun terakhir, injeksi busa poliuretan (PU) telah muncul sebagai alternatif yang layak untuk memulihkan struktur yang terpengaruh oleh penurunan tanah [4], [5], [6]. Teknik ini dikenal luas karena keefektifan dan kecepatannya [7], [8], [9]. Dalam proses injeksi busa PU, cairan polioliol dan cairan isosianat diinjeksikan ke dalam tanah atau rongga di bawah struktur, sehingga tidak perlu dilakukan penggalian atau pemindahan struktur yang ada. Setelah reaksi kimia antara cairan-cairan ini, busa PU mengembang, memberikan tekanan yang mengangkat dan meratakan struktur, yang secara efektif memperbaiki masalah penurunan yang berbeda [10], [11]. Selain itu, injeksi busa PU telah terbukti meningkatkan kekuatan dan daya dukung tanah sekaligus mengurangi rasio kekosongan dan kompresibilitas. Hal ini terjadi melalui beberapa mekanisme: busa yang mengembang mengisi rongga, menggantikan udara dan air untuk mengurangi rasio kekosongan dan meningkatkan transfer beban [12], [13], [14] pemuaiannya memberikan tekanan lateral dan vertikal, meningkatkan pengurangan dan mendistribusikan tegangan, yang meningkatkan tegangan efektif dan mengurangi kompresibilitas [15], [16], [17], dan busa yang diawetkan memperkuat matriks tanah, membatasi deformasi di bawah beban dan meningkatkan stabilitas [18], [19], [20]. Selain itu, tegangan yang diakibatkan oleh pemuaiannya bervariasi

berdasarkan anisotropi dan pelapisan tanah, yang menyebabkan perilaku kompresi yang berbeda tergantung pada arah pembebanan. Pada tanah anisotropik, distribusi tegangan yang tidak seragam dapat mempengaruhi deformasi secara berbeda pada arah horisontal dan vertikal [21]. Efektivitas busa PU dalam memodifikasi perilaku tanah dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti struktur tanah, tegangan pembatas, dan kondisi batas. Pendekatan multifaset ini tidak hanya mengatasi masalah penurunan tetapi juga berkontribusi pada stabilitas dan daya tahan keseluruhan struktur yang terkena dampak.

Poliuretan (PU) merupakan kelompok polimer yang luas yang dapat direkayasa untuk menunjukkan beragam sifat fisik, baik dalam keadaan mengembang maupun tidak mengembang. Busa PU yang diperluas dihasilkan dari reaksi eksotermis antara polioliol dan isosianat, yang dicampur dalam rasio volumetrik yang tepat sesuai kebutuhan produk tertentu. Reaksi ini menghasilkan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), yang memfasilitasi ekspansi volume dan pembentukan busa, di mana gelembung gas (sel) terbungkus di dalam dinding yang kaku. Meskipun  $\text{CO}_2$  adalah produk sampingan, injeksi busa PU memiliki jejak karbon yang lebih rendah secara keseluruhan daripada metode perbaikan tanah konvensional karena penggunaan bahan mini-mal, mengurangi kebutuhan penggalian, dan efisiensi energi. Selain itu, kemajuan dalam formulasi busa PU, termasuk polioliol berbasis bio dan teknologi polioliol daur ulang, telah dikembangkan untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meningkatkan keberlanjutan [22], [23], [24]. Penelitian tentang busa PU yang dapat terurai secara hayati lebih lanjut menunjukkan potensi manfaat lingkungan dalam aplikasi jangka panjang [16]. Tekanan yang diberikan selama ekspansi dan kepadatan resin yang dihasilkan bergantung pada tingkat ekspansi gas sebelum solidifikasi [25], [26].

Busa PU dapat mengembang hingga 20 kali lipat dari volume awal atau lebih ketika mengembang tanpa ada batasan (ekspansi bebas). Biasanya, waktu reaksi yang

diperlukan untuk membentuk busa PU adalah antara 30 detik hingga 2 menit, menjadikannya proses yang sangat cepat [27]. Waktu reaksi ini, tergantung pada resin spesifik yang digunakan, dipengaruhi oleh suhu komponen selama pencampuran. Patut dicatat bahwa busa PU menunjukkan toksisitas rendah hingga sedang [28], [29] dan hanya sensitif terhadap sinar Ultraviolet (UV) dan bahan kimia sintesis tertentu (seperti aseton) yang tidak umum ditemukan di tanah yang ditemukan [30], [31].

Busa dikategorikan berdasarkan struktur mikronya. Jika busa memiliki pori-pori yang saling berhubungan untuk membentuk jaring-jaring, maka disebut sebagai busa sel terbuka. Sebaliknya, jika busa tidak memiliki jaringan seperti itu, maka disebut sebagai busa sel tertutup [32]. Busa sel tertutup menunjukkan modulus, kekuatan, dan penyerapan energi tumbukan yang lebih tinggi dibandingkan dengan busa sel terbuka. busa [33]. Tipe sel tertutup merupakan karakteristik busa PU dua komponen yang biasa digunakan dalam aplikasi rekayasa geoteknik [34], [35]. Kepadatan akhir busa PU ini bergantung pada tingkat pengurangan [36], dan hubungan yang terdefinisi dengan baik menghubungkan kepadatan akhir dan tekanan pengurangan [37].

Meskipun sifat mekanik busa PU telah dipelajari secara ekstensif, sebagian besar penelitian terutama berfokus pada kekuatan dan karakteristik deformasi, khususnya di bawah kompresi. Beberapa penelitian penting mencontohkan tren ini. Penelitian ekstensif telah menganalisis perilaku deformasi berbagai bahan seluler [20], mengeksplorasi hubungan rumit antara geometri struktur mikro dan sifat material pada busa sel terbuka dan sel tertutup. Selain itu, penelitian ini mengidentifikasi dan menjelaskan kemungkinan mode kegagalan di bawah kompresi. Selanjutnya, model dikembangkan untuk menghubungkan sifat-sifat curah dengan struktur mikro busa untuk setiap mode kegagalan tertentu.

Perilaku tekan dari dua kelas busa polimer dengan kepadatan yang berbeda-beda pada berbagai tingkat regangan yang sangat luas telah diperiksa secara ekstensif. Tegangan puncak dan penyerapan energi diamati, dan disimpulkan bahwa tegangan puncak dan penyerapan energi secara signifikan bergantung pada laju regangan dan kepadatan. Lebih jauh lagi, berbagai penelitian [38], [39], [40] telah menunjukkan bahwa tegangan luluh busa PU meningkat dengan meningkatnya kepadatan. Penelitian dilakukan pada dua jenis resin PU yang umum digunakan dalam aplikasi geoteknik [35]. Temuan ini mengungkapkan bahwa tegangan kegagalan dan modulus Young meningkat secara proporsional dengan kepadatan. Dalam studi penelitian sebelumnya, perhatian terbatas telah diberikan untuk mengeksplorasi sifat-sifat rekayasa geoteknik busa PU dan memahami korelasi antara sifat-sifat ini dan kepadatan busa. Selain itu, terdapat kesenjangan yang signifikan di lapangan di mana sebagian besar injeksi busa PU, yang dilakukan untuk tujuan remediasi, hanya mengandalkan pengalaman operator tanpa pertimbangan desain sebelumnya. Pada dasarnya, praktik-praktik ini menyerupai pendekatan coba-coba.

Dalam penelitian ini, spesimen busa PU dengan densitas berkisar antara 100 hingga 200 kg/m<sup>3</sup> disiapkan menggunakan busa PU dua komponen yang biasa

digunakan dalam pekerjaan rekayasa geoteknik. Efek kepadatan busa PU pada berbagai sifat rekayasa geoteknik, termasuk: (i) kuat tekan tak terkekang; (ii) rasio Poisson secant; (iii) modulus secant; (iv) regangan siklik sisa; (v) kompresibilitas satu dimensi; dan (vi) permeabilitas, telah diselidiki. Korelasi antara sifat-sifat ini dan densitas busa PU dieksplorasi, dan masing-masing persamaan empiris diusulkan untuk prediksi. Persamaan-persamaan ini dapat diimplementasikan dalam desain awal pekerjaan perbaikan yang menggunakan busa PU.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Busa poliuretan (PU) ekspansif tinggi yang spesifik, yang dikenal sebagai "HM-4000" dan disediakan oleh ChemiConstruction Co, Ltd, Thailand, digunakan. HM-4000 adalah busa PU dua komponen yang dibuat dengan mencampurkan polioliol dan isocyanate secara tepat. Ketika kedua komponen ini, yang awalnya dalam keadaan cair, digabungkan, mereka memulai reaksi kimia yang cepat, menyebabkan busa mengembang secara signifikan, meningkatkan volumenya hingga 30 kali lipat dari ukuran awalnya



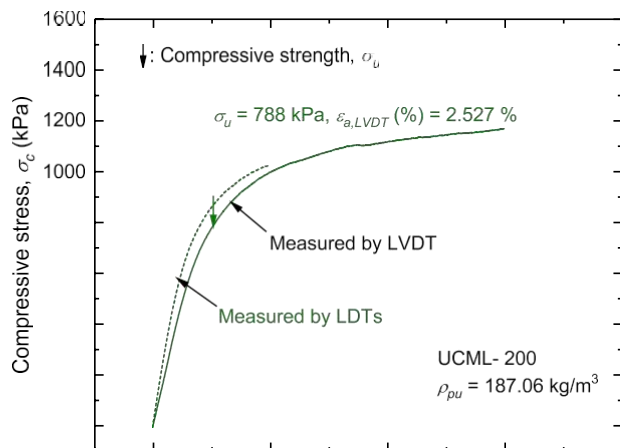
**Gbr. 2** Contoh spesimen busa PU yang diekstrusi dari silinder persiapan spesimen busa PU: a selama proses bubut; dan b setelah menyelesaikan proses bubut

Dalam aplikasi teknik geoteknik, busa PU yang diinjeksikan mengalami tekanan karena ruang terbatas dan tekanan vertikal dari lapisan di atasnya. Tekanan ini secara langsung berkaitan dengan kedalaman titik injeksi di bawah permukaan tanah dan massa objek (seperti pelat beton atau pondasi) yang akan diangkat [10]. Gambar 1 mengilustrasikan silinder persiapan spesimen busa PU yang digunakan untuk persiapan sampel. Perangkat ini memungkinkan persiapan sampel dalam berbagai kondisi tegangan vertikal overburden selama injeksi dan ekspansi. Silinder preparasi spesimen busa PU digunakan untuk menghasilkan sampel busa PU yang dikarakteristikan dengan tingkat tegangan vertikal overburden yang berbeda. Secara khusus, dengan menerapkan beban tetap pada bagian atas piston, tegangan vertikal overburden selama

pengangkatan piston dapat dinilai. Menyesuaikan beban mati pada persiapan spesimen busa PU

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar dan Tabel yang ditampilkan harus diacu dan diberi judul sesuai urutannya seperti pada contoh. Gambar diharapkan tidak berwarna dan mempunyai icon untuk membedakan antara parameter dalam gambar. Gambar yang berwarna akan dikenakan biaya tersendiri. Tulisan atau keterangan gambar masih bisa dibaca dengan jelas. Tabel dibuat sesuai dengan contoh yang diberikan berikut ini (Tabel 1).

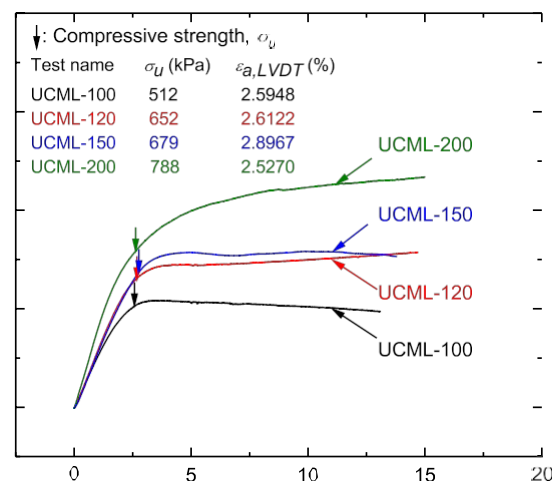


Gambar 4 menyajikan hubungan tegangan tekan ( $\sigma_c$ )- regangan aksial ( $\epsilon_a$ ) dari pengujian ML UC kontinu yang dilakukan pada spesimen busa PU dengan target densitas 200 kg/m<sup>3</sup>. Dua teknik pengukuran regangan yang berbeda digunakan: LVDT dan LDT.

Pengukuran regangan dalam pengujian UC dapat diklasifikasikan menjadi metode global dan lokal, masing-masing dengan kelebihan dan keterbatasannya. Pengukuran regangan global, biasanya diperoleh dengan menggunakan LVDT, mencatat total perpindahan aksial di sepanjang spesimen. Meskipun efektif untuk menangkap tren deformasi secara keseluruhan, pengukuran LVDT dapat dipengaruhi oleh kesalahan alas, kesesuaian perlengkapan, dan efek akhir, yang berpotensi melebih-lebihkan nilai regangan. Di sisi lain, pengukuran regangan lokal menggunakan LDT memberikan pembacaan yang lebih akurat dengan menangkap deformasi secara langsung dari bagian tengah spesimen, meminimalkan kesalahan yang disebabkan oleh batasan ujung LDT sangat berguna untuk mengukur perilaku regangan kecil, secara tepat menangkap kekakuan awal dan deformasi tahap awal busa PU dalam rentang regangan terbatas (1-3%). Namun, di luar rentang ini, pembacaan LDT menjadi tidak dapat diandalkan karena melebihi kapasitas pengukuran yang dirancang, sehingga mengharuskan penggunaan LVDT untuk menangkap respons tegangan-regangan penuh. Dalam penelitian ini, LDT digunakan untuk pengukuran regangan yang akurat pada fase pembebanan awal, sedangkan LVDT digunakan di atas regangan 3% untuk memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang perilaku deformasi busa PU.

Karena kesalahan alas pada kedua ujung spesimen, nilai yang diukur oleh LVDT secara konsisten

lebih tinggi daripada yang dicatat oleh LDT. Meskipun demikian, respons tegangan-regangan busa PU tidak menunjukkan penurunan dengan meningkatnya  $\epsilon_a$ ; sebaliknya, terus meningkat selama pengujian, mencapai maksimum pada regangan aksial sekitar 15%. Dalam penelitian ini, kekuatan tekan ( $\sigma_u$ ) dalam pengujian UC didefinisikan sebagai nilai pada titik yang menunjukkan kelengkungan maksimum (radius minimum) pada hubungan  $\log \sigma - \log \epsilon$  yang sesuai.



Gbr. 5 Hubungan antara tegangan tekan ( $\sigma_c$ ) dan regangan aksial yang diukur dengan LVDT ((a) ( $\epsilon_a, LVDT$ )) dari spesimen busa PU yang diuji dengan kepadatan yang berbeda

Hubungan  $\sigma_c$ -  $\epsilon_a$  dari spesimen busa PU dengan berbagai kepadatan dibandingkan pada Gbr. 5. Dari gambar tersebut terlihat bahwa nilai yang diperoleh dengan menggunakan teknik yang disebutkan di atas selaras dengan nilai  $\epsilon_a$  sekitar 2,5%. Modulus secant ( $E_{50}$ ) dihitung sebagai berikut:  $E_{50} = \sigma_{u2} / \epsilon_{a50}$ , di mana  $\epsilon_{a50}$  mewakili regangan aksial (diukur dengan LDT) yang sesuai dengan nilai  $\sigma_{u2}$  di sepanjang  $\sigma_c$ - $\epsilon_a$  hubungan dari uji UC yang dilakukan melalui kompresi ML.

### 4. KESIMPULAN

Studi ini menyelidiki dampak kepadatan pada sifat teknik geoteknik busa poliuretan (PU), menggunakan uji kompresi tak terkekang (UC), satu dimensi (1D) uji kompresi, dan uji permeabilitas. Kesimpulan utama yang dapat diambil dari hasil pengujian dan analisis adalah sebagai berikut:

1. Kekuatan tekan ( $\sigma_u$ ) dan modulus sekan ( $E_{50}$ ) busa PU menunjukkan peningkatan yang signifikan dengan kepadatan yang lebih tinggi. Sebaliknya, rasio secant Poisson ( $\nu$ ) menurun dengan meningkatnya kepadatan dan tingkat tegangan.
2. Regangan sisa siklik ( $\epsilon_{cy}$ ) dalam busa PU dapat diabaikan untuk rasio tegangan siklik (CSR) kurang dari 0,5. Namun, dengan nilai CSR yang lebih tinggi,

cyNmeningkat dengan kepadatan busa PU yang lebih besar, CSR, dan jumlah siklus (N(c)).

3. Tegangan vertikal luluh ymeningkat dengan kepadatan busa PU yang lebih tinggi. Jika dibandingkan pada kerapatan yang sama, ymelebihi nilai ukarena efek pembatas lateral. Selain itu, koefisien rekompresi ( $C^*$ ) dan komprersi ( $C$ )\* cmenurun dengan meningkatnya kepadatan busa PU.
4. Koefisien permeabilitas (k) menurun seiring dengan meningkatnya kepadatan busa PU.

Ketergantungan parameter properti rekayasa geoteknik busa PU pada densitas, seperti yang dievaluasi dalam penelitian ini, dapat diestimasi dengan menggunakan persamaan empiris yang diusulkan. Persamaan-persamaan ini berfungsi sebagai alat konseptual untuk memberikan panduan umum tentang bagaimana berbagai properti berhubungan dengan densitas busa PU. Namun, penting untuk dicatat bahwa hubungan-hubungan ini didasarkan pada jenis busa PU tertentu dan metode persiapan yang digunakan dalam penelitian ini. Pembaca dapat menggunakan persamaan ini sebagai perkiraan referensi untuk properti busa PU mereka berdasarkan kepadatan yang diketahui, tetapi untuk bahan yang berbeda dari busa PU yang diuji, pengujian laboratorium tambahan disarankan untuk memastikan penilaian properti yang akurat

## 5. Daftar Pustaka

- [1] M. A. Espinoza-Guzmán, D. Aragonés Borrego, and F. J. Sahagún-Sánchez, "Evaluation of recent land-use and land-cover change in a mountain region.," *Trees, Forests and People*, vol. 11, 2023, doi: 10.1016/j.tfp.2023.100370.
- [2] N. Janani, B. Kannan, K. Nagarajan, G. Thiyagarajan, and M. R. Duraisamy, "Soil moisture mapping for different land-use patterns of lower Bhavani river basin using vegetative index and land surface temperature," *Environ Dev Sustain*, vol. 26, no. 2, pp. 4533–4549, 2024, doi: 10.1007/s10668-022-02896-1.
- [3] G. Balletto, F. Sechi, G. Borruso, M. Sinatra, I. Meloni, and G. Fancello, "Mobility and land-use system in the sport mega-events. The case of the Cagliari stadium (Sardinia, Italy)," *European Transport - Trasporti Europei*, no. 93, 2023, doi: 10.48295/ET.2023.93.4.
- [4] Y. Feng, W. Zhang, J. Yu, and R. Zhuo, "Optimization of land-use pattern based on suitability and trade-offs between land development and protection: A case study of the Hohhot-Baotou-Ordos (HBO) area in Inner Mongolia, China," *J Clean Prod*, vol. 466, 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.142796.
- [5] M. Busse *et al.*, "Conceptualizing and Reflecting Co-design Processes for the Transformation Towards Insect-friendly Agricultural Landscapes - Experiences from Transdisciplinary Processes in three German Landscape Labs," *Journal of Innovation Management*, vol. 12, no. 3, pp. 273–316, 2024, doi: 10.24840/2183-0606\_012.003\_0012.
- [6] J. Liu, X. Jin, W. Xu, F. Yang, S. Wang, and Y. Zhou, "Assessing trade-offs and synergies among multiple land use functional efficiencies: Integrating ideal reference and key indicators for sustainable landscape management," *Applied Geography*, vol. 158, 2023, doi: 10.1016/j.apgeog.2023.103037.
- [7] E. Orsi, G. Crispino, M. Iervolino, and C. Gissonni, "Hydraulic and Hydrologic Invariance: Effectiveness of Green Roofs and Permeable Pavements," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 151, no. 2, 2025, doi: 10.1061/JIEDH.IRENG-10304.
- [8] A. Demiröz and O. Saran, "Investigation of the effect of additives on the microstructure of clay," *Turkish Journal of Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 563–571, 2024, doi: 10.31127/tuje.1439113.
- [9] A. M. Feneri, S. Rasouli, and H. J. P. Timmermans, "Modeling the effect of Mobility-as-a-Service on mode choice decisions," *Transportation Letters*, vol. 14, no. 4, pp. 324–331, 2022, doi: 10.1080/19427867.2020.1730025.
- [10] N. R. Taher, M. Gör, H. S. Aksoy, and H. A. Awlla, "Numerical investigation of the effect of slope angle and height on the stability of a slope composed of sandy soil," *Gumushane Universitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 12, no. 2, pp. 664–675, 2022, doi: 10.17714/gumusfenbil.1051741.
- [11] M. Awais, T. Salahuddin, and S. Muhammad, "Effects of viscous dissipation and activation energy for the MHD Eyring-powell fluid flow with Darcy-Forchheimer and variable fluid properties," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15, no. 2, 2024, doi: 10.1016/j.asej.2023.102422.
- [12] V. Rajaguru and K. I. Annapoorani, "Virtual synchronous generator based superconducting magnetic energy storage unit for load frequency control of micro-grid using African vulture optimization algorithm," *J Energy Storage*, vol. 65, 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.107343.
- [13] E. M. Ahmed *et al.*, "Improving load frequency control performance in interconnected power systems with a new optimal high degree of freedom cascaded FOTPID-TIDF controller," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. 10, 2023, doi: 10.1016/j.asej.2023.102207.
- [14] A. E. Khalil, T. A. Boghdady, M. H. Alham, and D. K. Ibrahim, "Enhancing the Conventional Controllers for Load Frequency Control of Isolated Microgrids Using Proposed Multi-Objective Formulation via Artificial Rabbits Optimization Algorithm," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 3472–3493, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3234043.
- [15] H. Hooshyar and R. Sadeghi, "Volumetric and isentropic compressibility behaviour of ionic liquid, tetrapropylammonium bromide in some inorganic salts aqueous systems at T = (293.15 to

- 318.15) K,” *Phys Chem Liquids*, vol. 59, no. 4, pp. 549–563, 2021, doi: 10.1080/00319104.2020.1753189.
- [16] Z. Shen, A. F. Deifalla, P. Kamiński, and A. Dyczko, “Compressive Strength Evaluation of Ultra-High-Strength Concrete by Machine Learning,” *Materials*, vol. 15, no. 10, 2022, doi: 10.3390/ma15103523.
- [17] 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.
- [18] S. Chen, Y. Sun, X. Hou, H. Han, S. Fu, and M. Su, “Quantitative Parameters Design of VSG Oriented to Transient Synchronization Stability,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, no. 5, pp. 4978–4981, 2023, doi: 10.1109/TPWRS.2023.3293016.
- [19] 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.
- [20] M. K. Senapati, O. Al Zaabi, K. Al Hosani, K. Al Jaafari, C. Pradhan, and U. Ranjan Muduli, “Advancing Electric Vehicle Charging Ecosystems With Intelligent Control of DC Microgrid Stability,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 60, no. 5, pp. 7264–7278, 2024, doi: 10.1109/TIA.2024.3413052.
- [21] F. He, J. Li, J. Pan, and Z. Yuan, “An experimental study of a rectangular floating breakwater with vertical plates as wave-dissipating components,” *Applied Ocean Research*, vol. 133, 2023, doi: 10.1016/j.apor.2023.103497.
- [22] S. Cristiano, “The ‘price’ of saved time, the illusion of saved fuel: Life-Cycle Assessment of a major highway expansion,” *J Clean Prod*, vol. 344, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131087.
- [23] M. Sengupta, “A turnaround fuelled by transformational leadership,” *South Asian Journal of Business Studies*, vol. 12, no. 4, pp. 465–472, 2023, doi: 10.1108/SAJBS-01-2021-0025.
- [24] H. Dong, L. Zhang, and H. Zheng, “Green bonds: Fueling green innovation or just a fad?,” *Energy Econ*, vol. 135, 2024, doi: 10.1016/j.eneco.2024.107660.
- [25] J.-B. Yuan, Y. Jin, W. Zhang, and D.-C. Li, “Solid-Liquid Phase Equilibria of Ternary System (NH<sub>4</sub>Cl–MgCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O) and Quaternary System (NH<sub>4</sub>Cl–MgCl<sub>2</sub>–SrCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O) at 288.15 K,” *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, vol. 68, no. 8, pp. 1029–1037, 2023, doi: 10.1134/S0036023623600727.
- [26] A. Mosendz, V. Levchyk, and M. Zui, “Derivatization, solid-phase microextraction and gas chromatography for determination of dialdehydes—biomarkers of oxidative stress,” *Toxicol Environ Chem*, 2024, doi: 10.1080/02772248.2024.2368109.
- [27] X.-P. Zhang, W. Wang, H.-Z. Zhang, and S.-H. Sang, “Solid-Liquid Phase Equilibria in the Ternary System CaBr<sub>2</sub>–SrBr<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O at 273, 298, and 323 K,” *J Chem Eng Data*, vol. 66, no. 1, pp. 138–145, 2021, doi: 10.1021/acs.jced.0c00487.
- [28] Y.-C. Tsai, K.-R. Chen, F.-Y. Liao, J.-R. Weng, and C.-H. Feng, “Simultaneous derivatization and liquid-solid phase transition microextraction of six biogenic amines in foods followed by narrowbore liquid chromatography-ultraviolet detection,” *J Chromatogr A*, vol. 1659, 2021, doi: 10.1016/j.chroma.2021.462629.
- [29] J. A. Custodio-Mendoza, P. Pokorski, H. Aktaş, A. M. Carro, and M. A. Kurek, “Simultaneous determination of six catechins and caffeine in tea and wine using salting-out assisted liquid–liquid extraction and high-performance liquid chromatography with ultraviolet detection,” *J Sep Sci*, vol. 47, no. 9–10, 2024, doi: 10.1002/jssc.202400142.
- [30] Y. C. Toklu and P. Akpınar, “Lunar soils, simulants and lunar construction materials: An overview,” *Advances in Space Research*, vol. 70, no. 3, pp. 762–779, 2022, doi: 10.1016/j.asr.2022.05.017.
- [31] B. Yu *et al.*, “Do microplastics affect sulfamethoxazole sorption in soil? Experiments on polymers, ionic strength and fulvic acid,” *Science of the Total Environment*, vol. 860, 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160221.
- [32] 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.
- [33] X. Dong, X. Tan, X. Lin, and S. Liu, “Reliability analysis of two adjacent piles in spatially variable unsaturated expansive soil,” *Ocean Engineering*, vol. 319, 2025, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.120227.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] A. Leonardi and M. Pirulli, “Analysis of the load exerted by debris flows on filter barriers: Comparison between numerical results and field measurements,” *Comput Geotech*, vol. 118, 2020, doi: 10.1016/j.compgeo.2019.103311.
- [37] X. S. Zhang *et al.*, “Dynamic Response of Roadbed Soil Under Various Dynamic Load

- Waveforms,” *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 42, no. 7, pp. 6237–6251, 2024, doi: 10.1007/s10706-024-02879-1.
- [38] 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.
- [39] L.-S. Niu, A.-J. Zhang, J.-M. Zhao, Y.-G. Wang, and Q.-Y. Zhao, “Influences of soluble salt content on mechanical properties of Ili undisturbed loess,” *Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 42, no. 9, pp. 1705–1714, 2020, doi: 10.11779/CJGE202009015.
- [40] F. Zhou, Y. Ran, X. Wan, and L. Wang, “Water-salt phase transition of saline soils during evaporation,” *Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 46, no. 5, pp. 1030–1038, 2024, doi: 10.11779/CJGE20230117.